



International
Fertilizer Industry
Association




INTERNATIONAL
POTASH INSTITUTE



Fertigation
*A Tool for Efficient Fertilizer
and Water Management*

灌溉施肥： 水肥高效应用技术

(以色列) 乌兹·卡夫卡费 (阿根廷) 荷黑·塔奇特斯基
田有国 译 谢建昌 审定

 中国农业出版社

灌溉施肥： 水肥高效应用技术

(以色列) 乌兹·卡夫卡费 (阿根廷) 荷黑·塔奇特斯基
田有国 译 谢建昌 审定

国际肥料协会 (IFA)
国际钾肥研究所 (IPI)
法国 巴黎 2011

 中国农业出版社

本书所持的任何观点和所采用的任何材料均与国际肥料协会（IFA）和国际钾肥研究所（IPI）无关。包括材料中涉及的任何国家的法律地位、领土、城市或地区或其主权，或其国境或疆界的勘定等。

灌溉施肥：水肥高效应用技术

第一版，国际肥料协会（法国巴黎）和国际钾肥研究所（瑞士霍根），2011年5月

Copyright 2011 IFA and IPI. All rights reserved

ISBN 978-2-9523139-8-8

本书的**中英文版本**均可在国际肥料协会（IFA）和国际钾肥研究所（IPI）的网站下载

欲获得**英文的纸质版**，请与国际肥料协会（IFA）联系

欲获得**中文的纸质版**，请与全国农技中心（NATESC）田有国博士联系



国际肥料协会（IFA）

28, rue Marbeuf,

75008 巴黎

法国

Tel: +33 1 53 93 05 00

Fax: +33 1 53 93 05 45/47

publications@fertilizer.org

www.fertilizer.org



全国农技中心（NATESC）

中国北京市朝阳区麦子店

街20号楼

Tel: +86 10 59194121

Fax: +86 10 59194515

tianyouguo@agri.gov.cn

www.natesc.gov.cn



国际钾肥研究所 (IPI)

Baumgärtlistrasse 17

P.O. Box 260, 8810 霍根

瑞士

Tel: +41 43 8104922

Fax: +41 43 8104925

ipi@ipipotash.org

www.ipipotash.org

英文版巴黎印刷

封面照片提供：Haifa (左边)，Yara International ASA (中间和右边)

序

灌溉施肥是灌溉技术与施肥技术结合发展起来的一种现代农业技术，通过灌溉系统进行施肥，适时、适量地满足农作物对水分和养分的需求，实现水肥同步管理和水肥高效利用，具有显著的节水、节肥、省工、高产、优质、高效、环保的优点。欧美、以色列等发达国家在灌溉施肥技术的基础理论、灌溉施肥的设备和肥料、系统的监测和自动控制等方面都积累了丰富的经验。

目前，我国灌溉施肥的设备已经实现了国产化，基本能够满足国内市场需求。在灌溉施肥技术方面，形成了具有中国特色的膜下滴灌施肥技术、小白龙喷水带微喷施肥技术、痕量灌溉施肥技术等，尤其是新疆地区的棉花膜下滴灌施肥技术已处于国际领先水平。另外，灌溉施肥技术在新疆和华北地区的小麦、华北和东北地区的玉米上的应用，走出了一条完全不同于欧美和以色列的发展道路，开创了将灌溉施肥技术大面积应用于大田粮食作物的先河。

然而，从总体上分析，我国灌溉施肥系统管理水平仍然较低，应用灌溉施肥技术面积所占比例小，灌溉技术与施肥技术脱节的情况还比较严重，与施肥相配套的设备如大型过滤器、大容积肥料罐、精密施肥设备等开发不足，专业的技术服务人才和机构缺乏，灌溉施肥制度设计不够精准，水肥协同耦合的理论与应用研究较少，深度不够，适用于灌溉施肥的专用肥料品种少，标准低。翻译和出版国际上最新的灌溉施肥理论和技术研究成果，对掌握最新动态，学习和借鉴最新发展成果，促进我国灌溉施肥技术更大范围和更高水平的推广应用，具有十分重要的意义。

田有国博士是我国较早从事灌溉施肥技术引进和推广应用的专业人士之一。1999年开始，他与国际钾肥研究所合作先后在山东的苹果、浙江的柑橘等作物上开展灌溉施肥技术试验研究，这是我国农业技术推广部门第一次开展类似的试验研究。2000年开始，连续5年组织灌溉施肥技术国际培训班，培养了我国第一批灌溉施肥技术应用领域的

骨干力量。2005年，与国际钾肥研究所合作，组织了我国第一次灌溉施肥国际研讨会。另外，在此期间，他还与国际钾肥研究所合作，拍摄制作了我国第一部中英文双语电影《灌溉施肥技术》，主编翻译出版了国际钾肥研究所专题研究丛书中的《灌溉施肥》，多次在有关国际合作项目中主讲灌溉施肥技术专题，这些都有力地推动了我国灌溉施肥技术的推广应用。

《灌溉施肥：水肥高效应用技术》一书由田有国博士翻译，南京土壤研究所83岁高龄的谢建昌研究员审定。该书的英文版是国际肥料协会（IFA）和国际钾肥研究所（IPI）共同组织编写的，两位原作者都是国际上灌溉施肥方面的顶尖专家，特别是在植物生理、植物营养和灌溉等领域知识丰富。全书16章，主要介绍了如何针对不同的大田和园艺作物、土壤和气候条件，选择和施用合适的适用于灌溉施肥的肥料，是一本难得的关于灌溉施肥技术最新知识的专业书籍。我相信，该书的翻译出版，必将促进我国灌溉施肥知识的普及和灌溉施肥技术的推广应用。

值本书付梓之时，特作此序以示祝贺！

全国农业技术推广服务中心主任



2013年7月

目录

序	
本书简介	
作者简介	
译者简介	
致谢	
略语表	
概述	
1 引言	1
2 灌溉施肥	4
2.1 定义	4
2.2 灌溉施肥设备	4
2.2.1 重力灌溉系统	4
2.2.2 压力灌溉系统	4
2.3 灌溉施肥系统施肥方法	5
2.4 适宜灌溉施肥的肥料	6
3 土壤特性和植物生长	10
3.1 灌水制度和水在土壤中的分布	10
3.2 土壤氧气状况	11
3.3 作物根系分布	12
3.4 盐分和养分在土壤中的分布	14
3.5 点源养分供应	15
3.6 碱性和酸性土壤的灌溉施肥	16
3.6.1 碱性土壤	16
3.6.2 酸性土壤	17
4 灌溉施肥中的氮素 (N) 营养	18
4.1 肥料中的氮素形态	18
4.2 氮素在土壤中的反应	18
4.2.1 尿素	18
4.2.2 铵态氮	19
4.2.3 硝态氮	19
4.3 灌溉施肥中氮肥施用时应注意的问题	20
4.3.1 根区潜在的氮素损失	20

4.3.2 用灌溉制度或灌水速率保证滴头下不形成水坑	20
4.4 氮素形态与土壤类型和作物生长条件的适应性	20
4.5 不同形态氮素在灌溉施肥中的移动特征及其施用方法	22
4.5.1 铵态氮和硝态氮	22
4.5.2 尿素	22
4.6 植物生理与氮素肥料	22
4.6.1 铵的植物敏感性	23
4.6.2 作物根区温度	23
4.6.3 植物生理发育阶段	26
4.7 根据作物生长规律量化氮肥灌溉施肥方案	27
4.7.1 作物需氮规律	27
4.7.2 作物不同生育期需氮量变化	28
4.8 氮素的吸收	28
5 灌溉施肥中的磷素 (P) 营养	30
5.1 磷素与土壤颗粒的相互作用：吸附、解吸、沉淀和释放	30
磷酸根离子与土壤溶液 pH 值	30
5.2 作物根系分泌物与磷素的吸收	31
5.3 氮素营养对磷素吸收的影响	31
5.4 滴头施入点磷素在土壤中的迁移	32
5.5 磷肥	33
5.5.1 磷酸	34
5.5.2 聚磷酸盐肥料	34
5.5.3 磷酸脲 (UP) [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{H}_3\text{PO}_4$]	35
5.5.4 磷酸二氢钾 (MKP) (KH_2PO_4)	36
5.5.5 磷酸二氢钾 + 磷酸混合物 ($\text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{H}_3\text{PO}_4$)	36
5.5.6 磷酸一铵 (MAP) ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)	36
5.6 磷素的吸收	36
6 灌溉施肥中的钾素 (K) 营养	38
6.1 钾和土壤颗粒的相互作用：吸附、解吸和固定	38
6.2 用于灌溉施肥的钾肥	38
6.3 钾素通过灌溉系统施用的好处	39
6.4 钾肥灌溉施肥中的阴离子评价	39
6.5 滴头施入点钾素在土壤中的迁移	40
6.6 钾素的吸收	41
7 灌溉施肥中的中量元素营养	42
7.1 钙 (Ca)	43
7.2 镁 (Mg)	43
7.3 硫 (S)	44

7.4 灌溉水中的钙、镁、硫	44
8 微量元素	45
8.1 缺素表现现象	45
8.2 灌溉施肥中的微量元素营养	45
8.3 灌溉施肥中的微量元素肥料	45
8.3.1 硼 (B)	45
8.3.2 氯 (Cl)	46
8.3.3 铜 (Cu)	47
8.3.4 铁 (Fe)	47
8.3.5 锰 (Mn)	48
8.3.6 钼 (Mo)	49
8.3.7 锌 (Zn)	49
8.4 微量元素的有效性 with 土壤 pH 值的关系	49
9 灌溉水质与灌溉施肥	50
9.1 灌溉水质对植物营养的影响	50
9.1.1 盐水灌溉	50
9.1.2 中水 (TWW) 灌溉	52
9.2 水质与灌溉系统	57
9.2.1 含亚铁离子的灌溉水	57
9.2.2 钙镁离子含量高的灌溉水	58
9.2.3 灌溉水中磷与钙和铁的相互作用	58
10 大田作物的灌溉施肥	60
10.1 玉米	60
10.2 棉花	63
10.2.1 棉花生长发育与灌溉	63
10.2.2 棉花营养	63
11 果树的灌溉施肥	70
11.1 香蕉	70
11.2 葡萄	72
12 蔬菜作物的灌溉施肥	75
12.1 马铃薯	75
12.1.1 水分需求	75
12.1.2 养分需求	76
12.1.3 不同国家马铃薯生产中的滴灌系统	78
12.1.4 马铃薯灌溉施肥前景展望	80
12.2 番茄	81

12.2.1 温室种植番茄	81
12.2.2 盐分	84
12.2.3 加工番茄的灌溉施肥	86
12.2.4 番茄的加工质量	87
13 有土栽培花卉和观赏植物的灌溉施肥	93
13.1 凤仙花属植物	93
13.2 玫瑰	93
13.3 康乃馨	95
14 无土栽培和介质栽培中的灌溉施肥	96
14.1 生长介质的定义	96
14.2 生长介质的分类	96
14.2.1 无机生长介质	96
14.2.2 有机生长介质	97
14.3 生长介质的特性	97
14.3.1 物理特性	97
14.3.2 化学特性	97
14.4 化学特性和养分含量	98
14.4.1 碳氮比和氮素含量	98
14.4.2 阳离子交换量	98
14.4.3 pH	99
14.5 灌溉施肥的应用	101
15 灌溉施肥中水分、土壤和植株的监测	103
15.1 灌溉水水质监测	103
15.2 土壤和生长介质监测	106
15.2.1 土壤监测	106
15.2.2 生长介质和下渗液监测	107
15.3 植株监测	108
16 灌溉施肥的未来发展趋势	111
参考文献	112

本书简介

本书是国际钾肥研究所（IPI）和国际肥料协会（IFA）共同策划编写的，目的在于为肥料生产商、科学家、农技推广人员和决策者提供灌溉施肥中有关土壤—水—肥料相互作用的有用参考资料。作者试图将大田和温室中应用灌溉施肥时有关植物生理、植物营养和灌溉等综合性的实用技术进行有效整合。通过灌溉施肥，无论种植大田作物还是园艺作物，可以确保作物施肥能做到“四适当”（即适当的肥料品种，以适当的使用量，在适当的时机，施到适当的位置）。从作物在不同生长期、不同土壤或者生长基质、气候和灌溉水质条件下植物生理需求出发，阐述了部分肥料用于灌溉施肥的适用性。

作者简介

U. Kafkafi (乌兹·卡夫卡费) 1934年出生于以色列特拉维夫市，1963年以“磷素施肥”为研究课题，获得耶路撒冷希伯来大学土壤学博士学位。他早期的研究领域包括土壤中营养元素的有效性评价以及黏粒吸附磷元素形态鉴别等。

1977年，U. Kafkafi 被任命为以色列首个“研究和发展中心”的负责人。这个研究中心将研究所的科学家和在开发沙地保护性耕作适应作物方面有实践经验的农民汇集在一起。他对沙丘地应用灌溉施肥技术种植番茄的研究始于1968年。自1966年开始，他的主要研究兴趣是土壤和营养液中氮的形态，以及植物吸收氮素和氯素的竞争关系。1986年，他加入耶路撒冷希伯来大学，任Rehovot农学院植物营养和旱作农业方面的教授。

U. Kafkafi 教授同时兼任国际钾肥研究所（IPI）科学委员会的委员和以色列

肥料工业的顾问。1996年，因为卓越的研究成果和在推动灌溉施肥技术应用方面的贡献，他获得了“国际肥料协会（IFA）国际作物营养奖”。

综观 U. Kafkafi 教授的整个研究生涯，可以看出，他对大田和营养液栽培的植物根际活性方面很有研究。通过研究，他开发了一种全新的埋设放射块的应用方法，用于监测和绘制植物根区活性图，并在希伯来大学开设了植物根际活性课程。他还与同事一道，主编了《植物根系：看不见的另一部分》一书，该书汇集了全世界有关植物根际研究名家的研究成果。这个合作非常成功，它直接促成了后来在国际上连续推出、被广泛认可的3个版本。虽然从1999年开始，U. Kafkafi 教授就退休了，但他至今依然为博士生授课，为以色列和中国提供土壤管理和植物营养方面的咨询服务和发表科学论文。

J. Tarchitzky (荷黑·塔奇特斯基) 1951年出生在阿根廷布兰卡港，1974年在阿根廷取得农业工程学士学位，1980年完成了以色列希伯来大学 Rehovot 农学院的土壤和水的理学硕士学习。1994年，希伯来大学授予他的博士论文“腐殖质、多聚糖与黏土矿物的交互作用及其对土壤结构的影响”优秀论文奖。1980年，J. Tarchitzky 被任命为以色列农业部推广服务局土壤和水田间技术服务的区域咨询官，负责为农民提供作物灌溉和施肥管理，以及灌溉施肥技术咨询服务。1992年，他被任命为盐化水和污水灌溉中心的全国咨询专家，负责培训区域推广机构的人员和提供相关咨询服务。他提供咨询的领域包括水质、土壤盐化和盐化水、废水农业灌溉、农业和城市固体废弃物用作植物营养剂和土壤改良剂等。从1998年开始，他为以色列农业和乡村发展部管理委员会提供农业环境质量咨询，2006年，被任命为以色列农业和乡村发展部推广服务局土壤和水田间服务部门的负责人。

2008年，J. Tarchitzky 加入耶路撒冷希伯来大学 Robert H. Smith 农业、食品和环境科学学院土壤和水科学系，现在是该系的高级副研究员。他负责讲授研究生课程“污水处理后作物灌溉再利用及其环境影响”。除了为硕士研究生和博士生授课外，他还为政府机构或者私人公司提供水质和农业环境问题的咨询。

译者简介

田有国 博士，推广研究员，全国农技中心处长，兼任农业部耕地保育重点实验室学术委员会委员，国家标准委全国土壤质量标委会副主任委员等。

多年来，获省部级科技进步奖 2 项、推广奖 3 项；部级先进个人表彰 1 项；主编出版专著 6 部；主持制定国标 1 个，农业行业标准 22 个；在核心期刊发表学术论文 17 篇，英文 3 篇。近 4 年来，每年翻译《国际肥料通讯》等超过 10 万字。

1989—1995 年，参与第二次全国土壤普查全国成果汇总。1995—2004 年，主要从事耕地地力评价和旱作节水农业技术推广工作。1999 年开始，与国际钾肥研究所合作，在全国组织灌溉施肥技术试验示范、培训和国际研讨会。2002 年开始，负责全国耕地地力调查与质量评价工作，至 2009 年初，完成 600 个县的耕地地力评价。期间，完成《基于 GIS 的全国耕地质量评价方法及应用》的博士论文，主持制定技术规程，主编出版《耕地地力评价指南》等 3 部专著。2003 年起，参与国家级耕地土壤监测工作，主持制定《土壤监测》及其系列标准，参与监测点耕层土壤样品库的建立，系统整理 1984 年以来国家级耕地土壤监测数据，翻译评介国外耕地质量监测进展 5 万多字，主编出版《耕地质量演变趋势》。2004—2011 年初，任农业部土壤肥料质量监督检验测试中心副主任，参与中心的筹建、评审和复评审，参与编制质量体系文件和检测中心运转的管理工作。2004 年开始，参与测土配方施肥项目规划、技术规程的制定、测土配方施肥数据处理与化验室质量控制工作，参与组织 2004—2009 年初与测土配方施肥有关的重大活动。2009 年至今，主持《中国农技推广》和《中国植保导刊》的编辑出版发行和经营管理工作，完善编辑流程和质量控制程序，搭建理事会和绿色防控战略联盟两个服务平台，扩大刊物影响，提升综合效益。

致谢

我们很高兴地感谢下面这些为本书提供严苛而具有建设性意见的人们：

- Eran Barak, Haifa Chemicals, Israel
- Kevin Moran, Yara, UK
- Giuseppe Natale, Valagro, Italy
- Terry Tindall, Simplot, USA
- Harmen Tjalling Holwerda, SQM, Belgium

感谢下面这些斧正初稿的人们：

- Hillel Magen, IPI, Switzerland
- Patrick Heffer, IFA, France
- Angela Olegario, IFA, France
- Ernest Kirkby, UK（负责编辑）
- Claudine Aholou-Pütz, IFA, France（负责版式设计）

非常感谢他们在我们枯燥无味地检索全世界滴灌文献和按照我们的知识系统重组这些信息时给予的大力支持，目的在于为种植农户提供不同田间状况、植被条件和作物的实用而安全的灌溉施肥技术。

很多人慷慨大方地为我们提供了很多照片，尽管有些照片没有被本书收录，但我们要对所有为我们提供照片的人们表示衷心感谢！

最后，感谢国际肥料协会（IFA）和国际钾肥研究所（IPI），正是他们的资助，才使本书的出版成为可能。

乌兹·卡夫卡费（U. Kafkafi）和荷黑·塔奇特斯基（J. Tarchitzky）

2011年4月

略语表

缩略词

ADP	adenosine di-phosphate	二磷酸腺苷
APP	ammonium polyphosphate	聚磷酸铵
ATP	adenosine tri-phosphate	三磷酸腺苷
BOD	biochemical oxygen demand	生物化学需氧量
CEC	cation exchange capacity	阳离子交换量
cm	centimeter	厘米
cm ³	cubic centimeter	立方厘米
cmol _c	centimole charge	厘摩尔电荷
C/N	carbon/nitrogen ratio	碳氮比
DAS	days after sowing/seeding	播种后天数
DM	dry matter	干物质
dS/m	deci-Siemens per meter	分西门子每米
DTPA	diethylene-triamine-pentaacetic acid	二乙基三胺五乙酸
EC	electrical conductivity	电导率
EDDHA	ethylene-diamine di ortho-hydroxyphenylacetic acid ...	乙二胺二邻羟苯基大乙酸
EDTA	ethylene-diamine-tetraacetic acid	乙二胺四乙酸
g	gram	克
hm ² /hectare		公顷
HAP	hydroxyapatite	羟基磷灰石
HDP	hydroxydicalcium phosphate	羟基磷酸氢二钙
kg	kilogram	千克
kg/hm ²	kilogram per hectare	千克每公顷
kPa	kilo Pascal	千帕
L	liter	升
lb	pound	英磅 ^①
lb/a	pound per acre	英磅每英亩 ^②
m ³	cubic meter	立方米
meq	milliequivalent	毫克当量 ^③
meq/g	millequivalent per gram	毫克当量每克 ^④

① 英磅为非法定量单位，1lb = 0.453 592kg。

② 英亩为非法定量单位，1a=0.404 685 6hm²。

③ 毫克当量为非法定量单位。

④ 现在用 cmol/100g 代替 meq/g 作为 CEC 的单位了。

mm millimeter 毫米
mg milligram 毫克
mg/L milligram per liter 毫克每升
MKP mono potassium phosphate 磷酸二氢钾
mL milliliter 毫升
mmol millimole 毫摩尔
mmol/L millimolar 毫摩尔每升
mol mole 摩尔
MOP muriate of potash (also known as potassium chloride) 氯化钾
pH H ion concentration (measure of acidity or alkalinity) 氢离子浓度 (度量酸碱性)
mg/kg part per million 百万分之一
SAR sodium adsorption ratio 钠吸附比
SAT soil aquifer treatment 土壤渗滤处理
SDI sub-surface drip irrigation 表土下滴灌
SOP sulfate of potash or potassium sulfate 硫酸钾
TSS total suspended solids 总悬浮物
TWW treated waste water 处理过的污水
t/hm² tonne per hectare 吨每公顷

Acronyms 简称

EPA Environmental Protection Agency (美国) 环境保护署
USA United States of America 美国
EU European Union 欧盟

Symbols 符号

Al aluminum 铝
B boron 硼
B(OH)₃ boric acid 硼酸
B(OH)₄⁻ borate 硼酸根
Ca calcium 钙
CaCl₂ calcium chloride 氯化钙
CaCO₃ calcium carbonate 碳酸钙
Ca(NO₃)₂ calcium nitrate 硝酸钙
5 Ca(NO₃)₂ · NH₄NH₃ · 10H₂O calcium ammonium nitrate 硝酸铵钙
Cd cadmium 镉
Cl chloride 氯
CO(NH₂)₂ urea 尿素

$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{H}_3\text{PO}_4$ urea phosphate(UP) 磷酸脲
 Cu copper 铜
 Fe iron 铁
 Fe^{2+} ferrous ion 亚铁离子
 Fe^{3+} ferric ion 铁离子
 H^+ hydrogen ion 氢离子
 HCO_3^- bicarbonate 碳酸氢根
 HPO_4^{2-} hydrogen phosphate 磷酸氢根
 H_2PO_4^- dihydrogen phosphate 磷酸二氢根
 H_3PO_4 phosphoric acid 磷酸
 K potassium 钾
 KCl potassium chloride 氯化钾
 K_2O potash 氧化钾
 KH_2PO_4 monopotassium phosphate (MKP) 磷酸二氢钾
 KNO_3 potassium nitrate 硝酸钾
 K_2SO_4 potassium sulfate 硫酸钾
 Mg magnesium 镁
 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ magnesium nitrate 硝酸镁
 Mn^{2+} manganese ion 锰离子
 N nitrogen 氮
 Na sodium 钠
 NaCl sodium chloride 氯化钠
 NH_3 ammonia 氨
 NH_4^+ ammonium ion 铵离子
 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ammonium carbonate 碳酸铵
 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ monoammonium phosphate (MAP) 磷酸一铵
 NH_4NO_3 ammonium nitrate 硝酸铵
 NH_4OH ammonium hydroxide 氢氧化铵
 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ammonium sulfate 硫酸铵
 Ni nickel 镍
 NO nitric oxide 一氧化氮
 NO_3^- nitrate ion 硝酸根离子
 N_2O nitrous oxide 一氧化二氮
 P phosphorus 磷
 Se selenium 硒
 Si silicon 硅
 SO_4^{2-} sulfate 硫酸根
 Zn zinc 锌

概述

本书的目的在于为先进的种植农户和农业技术推广人员介绍灌溉施肥技术及其最新进展。作者用 16 章的内容，向读者提供了如何针对不同的农田和园艺作物、土壤和气候条件，选择合适的适用于灌溉施肥的肥料。同时，介绍了基于“四适当”的原则贯穿作物生长发育全过程的养分需求特点和施肥要求。本书主要关注土壤中的肥料交互作用和它们供应作物所需养分的能力。灌溉施肥作为一种高效实用技术，能够根据作物不同生育期特殊的养分和水分需求变化而变化，满足作物不断变化的对水分和养分的需求，从而获得最大的施肥效应。这是一种类似哺育婴儿时的“汤匙喂养（spoon feeding）”的方法，能精确计算作物整个生育期内每株作物每天多少毫克氮、磷、钾的需要量，按照作物需要定时、定量地施肥。采用这种施肥方法，易溶性营养成分可以直接施到作物的根区，从而可以最大限度地提高养分利用效率和减少过量施肥和养分下渗到地下水对环境的破坏。作者试图将全世界许多研究中心和实验室里最新的关于植物生理和植物营养的成果，与大田或者温室环境下实用的施肥知识有机地结合起来。限于篇幅，作者有意避免了部分土壤水分及其分布的详细讨论，但还是在描述养分在土壤中的运移时引用了很多早先的与此相关的优秀研究成果。作者无论是在大田作物还是温室大棚施肥管理上都具有丰富的经验，这一点在个案研究和从作者引用了全世界超过半个世纪的文献中都得到了清晰的反映。适用于灌溉施肥系统的肥料的选择非常关键，作者从植物不同生育时期对养分的需求、土壤和植物生长介质、气候条件和灌溉水质等方面进行了详细的论述。灌溉施肥还使人们能够在沙丘上种植作物，这在过去被认为是“不适宜农作的土地”。向全世界推广应用灌溉施肥技术，有利于把广大的沙化土壤变成高产的农业区，而且可以节约在传统农业系统中被浪费的珍贵的水资源。

1 引言

全世界工业生产的水溶性单质肥料和复合肥料的化学成分几乎是一样的；另一方面，这些肥料的施用是精确地根据土壤类型、气候条件和水质状况等确定的。事实上，特别是在集约农业生产系统中，肥料的需要量不是一成不变的，不同季节，不同年份，有时候甚至从白天和晚上，作物的需肥量都有所不同。一年生作物的养分需要量与作物的生长发育阶段关系非常大，从播种到收获，不同发育阶段需肥量变化很大；同样的，多年生的果树从营养生长到生殖生长的养分需要量变化也非常大。

传统的地面浇灌和植物顶部的喷灌把整个土壤断面都要浇湿。植物养分根据其移动性、与土壤颗粒的吸附和沉淀作用不同，而在整个被浇湿的土层中不同程度地分布。

水分在土壤中的移动，根据土壤深度、土壤含水量不同，从滴头所在的那个点开始在地表呈纵向的圆圈状移动，在垂直面向下移动。这样，就营造了一个湿润的土体（Bressler,1977）。土壤颗粒和水的交互作用主要受土壤物理性质的影响，土壤的吸附作用和毛细作用是决定土体中水分分布的主要控制因素。土体受田间操作机械的压实，影响土壤孔隙大小和土壤体积含水量。

满足日益增加的世界人口食物安全的压力，刺激人们要不断提高灌溉水分的利用效率。20世纪20年代，喷灌技术得到了很大的发展；20世纪30年代，喷灌和轻质钢管得到大面积的应用（Keller and Bliesner,1990）。

最早的细流灌溉（Trickle irrigation）应用实验可以追溯到19世纪末，但直到20世纪50年代后期和20世纪60年代早期，细流灌溉才取得实质性的进步（Keller and Bliesner,1990）。便宜好用的塑料管发明以后，也就是在20世纪70年代，细流灌溉系统得到较快的发展。细流灌溉或微灌（Micro irrigation）包括滴灌、微射流灌、微喷灌和微喷射流灌。1974年，全世界微灌面积是6.6万 hm^2 ，到1996年达到298万 hm^2 （Magen and Imas, 2003），到2006年达到了600万 hm^2 （Sne, 2006）。

应用微灌技术灌溉作物只湿润局部土壤，这样就把作物根系分布相应地限制在湿润区域。有限的作物根系导致传统的施肥管理变化很大，从以前的撒施

到条施或者将肥料添加到灌溉水中随水施用，目的在于满足微灌条件下作物的养分需求。按时间顺序来说，灌溉施肥是固定化灌溉系统发展后带来的结果。

土壤颗粒和经过微灌系统输送的各种化合物的反应非常复杂。这些交互作用有表面不携带电荷的土壤颗粒的成分之间的作用，还有碱性土壤中和石灰发生的沉淀反应，以及在酸性土壤中和铁、铝的反应。

N 在肥料溶液中主要有 3 种形态：

铵态氮 (Ammonium N)：具有正电荷（阳离子）。

硝态氮 (Nitrate N)：具有负电荷（阴离子）。

尿素氮 (Urea N)：不带电荷。

这些形态的氮和土壤接触时遇到一个非常复杂的环境。铵离子被带有负电荷的土壤颗粒吸附，然后被土壤微生物慢慢氧化成硝态氮。硝态氮进入滴头下呈水饱和状态的土壤中。在此水饱和土壤中活跃着一些土壤微生物，它们利用有氧呼吸，使水饱和土壤成无氧的状态。这就带来这样一个结果，在被作物吸收利用前，土壤中的硝态氮经氧化有可能变成二氧化氮和氮气而返回到大气中。另外一部分硝态氮随着水而移动，在土壤干湿交替的边缘累积到非常高的浓度。最重要的是，作物吸收溶解在灌溉水中的硝态氮，这是灌溉施肥系统经济性较高的重要原因。尿素是一种不带电荷的分子，在水中能移动很远的距离。一旦尿素分子遇到土壤中无所不在的尿酶，就很快被转化成二氧化碳和氨，能溶解在水中，导致暂时性，比如几天内，土壤 pH 值升高。

磷素水溶肥，当灌溉水溶液的 pH 值高于 7 时，它们容易和灌溉水中的钙、镁生成沉淀；或者当 pH 值低于 7 时容易和水中的铁结合生成沉淀。事实上，在磷素应用于微灌系统之前，人们就开始注意采取措施防止微灌管内部和施肥罐内生产沉淀。在土壤中，磷的移动距离是所有灌溉施肥系统带去的养分中移动最短的。磷素应用于灌溉施肥时，要特别注意水质、土壤的化学组成和植物生长发育时期。

钾是所有通过灌溉施肥系统施用的大量元素中最稳定的，它始终保持同样的一价阳离子的形态。

含有高钙的沙化土壤、盐碱土在全世界的干旱地区广泛分布 (Richards, 1954)。这类土壤有个共同的特征，就是养分含量低、土壤表层的土壤持水量不高。这些特征导致干旱气候条件下植被覆盖度很低。通常的喷灌条件下，沙漠和沙丘远离水源，土壤持水量低，这样的土壤没法用于农业生产。灌溉施肥

技术的应用，使这些沙丘和高钙沙漠土壤变成了高附加值经济作物的高产农业土壤（Kafkafi and Bar-Yosef, 1980）。应用灌溉施肥技术在沙漠地区可以栽种枣树，将灌溉水用到每一株枣树根部，比将水直接灌溉在开放的空间，可以减少由于蒸腾导致的大量水损失。与此类似，微灌技术还使一些在以前从来不可能被农业利用的边缘土壤上可以种植作物。

该书阐述了肥料溶于灌溉水的技术问题，以及用于灌溉施肥系统的肥料的基本特性。

该书的主要目的在于描述微灌系统在不同气候条件下、不同土壤类型上种植不同作物的应用中，微灌系统中水溶性肥料的基本行为特征。灌溉施肥技术使生产者可以选择和施用适合其土壤、水源、作物和气候条件的高品质肥料，在获得高产高质的同时，保护环境免受污染。

2 灌溉施肥

2.1 定义

通过灌溉水给田间作物提供施肥的做法就叫灌溉施肥（Bar-Yosef, 1991）。灌溉施肥是一种先进的农业技术，可以使作物获得最高产量，同时，通过提高肥料利用效率，减少肥料使用量和提高肥料的投资回报率，达到最大限度地减少施肥对环境的污染（Hagin *et al.*, 2002）。实行灌溉施肥的情况下，非常容易控制施肥时间、施肥量和肥料在水中的浓度。将肥料和灌溉系统合在一起，设备和肥料两方面都有其特殊要求。

- 设备：
 - 在压力灌溉系统内，吸入肥料溶液后其内压更大。
 - 需要用过滤器防止任何可能引起滴头堵塞的固体颗粒进入滴头（Elfuving, 1982）。
 - 需要 1 个逆止阀。
- 肥料：
 - 肥料在当地灌溉水中的溶解性：灌溉水中含有多种化学物质，其中有些可能会与溶解在水中的肥料发生意想不到的反应。
 - 必须考虑肥料溶液的酸度，因为过酸的溶液可能腐蚀灌溉系统的一些部件。

2.2 灌溉施肥设备

选择灌溉施肥设备时必须考虑作物的需求，还要考虑灌溉系统的保灌能力。

2.2.1 重力灌溉系统

这种方法非常简单，在自然大气压下，水就能从开放的管道流入灌溉系统。施肥罐比开放的管道要高些，这样就可以将肥料溶液加入到灌溉管道中。为了使肥料溶液和灌溉水有较好的混合，灌溉水流动速率要足够高。

2.2.2 压力灌溉系统

为了克服灌溉系统的内部压力，将肥料溶液注入压力灌溉系统需要消耗能

量。依据让肥料溶液获得较高压力的方式不同，肥料注入设备可分为三大类：

- 文丘里注肥器 (Venturi device)：这是利用文丘里吸力原理的一套装置，利用流动水产生的压力将肥料溶液从肥料罐中吸入灌溉系统中。在管道上突然有个圆锥形的收窄，导致水流速度提高和压力降低，从而将肥料从施肥罐中经过过滤装置吸入到灌溉系统中。有 1 个阀门，可以调节流经该阀门水流的速度。

- 压差式注肥器：这套装置利用密封的金属罐，其内壁经过防酸保护处理，金属罐上有个节流阀，制造压差，从而使部分水流入到肥料罐中。这是唯一一种既可以使用固体肥料又可以使用液体肥料的装置。整个施肥罐中的肥料全部被送到灌溉区域。只要施肥罐中有固体肥料并且肥料的溶解性非常好，在灌溉滴头的终端，灌溉水中肥料浓度将一直保持不变。一旦肥料全部溶解完成，肥料浓度就以指数速率下降。实际操作中，当 4 倍于其体积的水流经施肥罐时，只有极少的肥料留在罐中。这种设备在灌溉施肥发展的早期用得比较多。根据肥料罐的大小不同，一次性可以灌溉一定面积的作物。当然，应用固体肥料时，必须小心操作。肥料溶解过程是一个吸热过程，例如 KNO_3 ， $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ，Urea， NH_4NO_3 ，KCl 和 $5\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{NH}_4\text{NH}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 等肥料溶解时，可以降低肥料罐中的温度，灌溉之前的清早，温度还很低的情况下溶解肥料，甚至可能导致部分溶液结冰，从而导致肥料浓度发生意想不到的变化。

- 加压注肥器：注肥泵能够以一种预先设定好的速率，升高从肥料母液池中吸取肥料液体的速度，加入到灌溉水中，从而可以使灌溉水中营养物质的浓度保持恒定。注肥泵还有不损失灌溉水压力的优势，以及极高的精确性和在整个灌溉施肥过程中保持设定的肥料浓度不变的优点。目前，应用较多的有两种注肥泵，柱塞式和隔膜式。注肥泵使用较多的能源是水能和电能：

- 水能：当大量挤压的水（最大达到 3 倍于吸入的肥料溶液量）排放时产生巨大的水压，这种设备就利用这种水压注入肥料。这种注肥器适宜在缺乏电源的地区实施灌溉施肥。
- 电能：这种装置激活肥料泵。这种设备在温室和那些有稳定电源的地区比较常见。

2.3 灌溉施肥系统施肥方法

根据 Sne (2006) 的研究，根据作物品种、土壤类型和农场管理系统的不同，

在植物特定的生长发育时期施用等量的肥料，可以有两种不同的方式。

- 等量施用：在每次灌水时将一定量的肥料注入灌溉系统中，施等量的肥料。注肥过程可能是自动化控制或者手动的。

- 等比例施用：在灌溉施肥过程中，一定量的肥料和一定量的灌溉水以一定的比例保持不变，这样，在灌溉水中的养分浓度保持恒定。

2.4 适宜灌溉施肥的肥料

根据肥料的物理化学特性，很多的固体或液体肥料都适用于灌溉施肥系统。对较大规模的田间实施灌溉施肥时，应用固体肥料代替常常使用的液体肥料，可以降低施肥成本。这些肥料的溶解性差别很大。当从液体肥料转为固体肥料时，可以将大量水加入营养母液配制池从而避免固体肥料带来的各种问题。

在选择用于灌溉施肥的肥料时，有4个方面必须加以考虑（Kafkafi, 2005）：

- 植物类型和生长发育时期。
- 土壤状态。
- 灌溉水质。
- 肥料可获得性和肥料价格。

适用于灌溉施肥的肥料应该是高品质、高溶解性和高纯度，含盐量较低和pH值比较合适，以及必须适应于相应的农场管理模式。肥料的特性及其对土壤和作物的影响将在后面的章节进行讨论。

Hagin 和 Lowengart-Aycicegi（1996）列举了适应于注肥施用的肥料特性：

- 形态：固体肥料和液体肥料都适合进行灌溉施肥，根据其可获得性、经济上的可行性和便利性进行决定。

- 可溶性：较高和完全溶解是肥料用于灌溉施肥系统的前提条件。肥料的溶解性随温度升高而升高。

- 溶液中不同肥料的交互作用：当农户准备混合几种肥料，或者在灌溉系统中添加几种肥料时，必须考虑不同肥料的相容性（表2.1）。可以采取以下措施进行预防：

- 确保使用的肥料是相容的而不产生沉淀。特别要避免在溶液pH值不是足够低的情况下将含有钙质的肥料溶液和含有磷和硫的肥料溶液混合。
- 检查肥料的可溶性及其与当地灌溉水可能产生沉淀的情况。在使用一

种新的肥料以前，取 50mL 的肥料溶液和 1L 的灌溉水混合在一起，观察 1~2 小时，看是否产生沉淀。如果产生沉淀，或者生成不透明状物质，就一定要注意不要在灌溉系统中使用这种肥料（Roddy，2008）。

- 在田间混合不同品种肥料时观察其温度变化情况。有些肥料单独或者和其他肥料一起，可以将肥料溶液的温度降低到结冰的状态（ KNO_3 ， $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ，Urea， NH_4NO_3 ，KCl 和 $5\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{NH}_4\text{NH}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ）。当然，如果购买的是已经配制好的液体肥料，在田间就不会出现吸热反应了，这样肥料溶液中的浓度可以达到较高的水平。

- 腐蚀性：化学反应可能在肥料之间发生，也可能在肥料和灌溉系统的金属部件之间发生。腐蚀性可能会破坏系统的金属部件，比如钢管、阀门、过滤器和注肥装置。

表 2.1 肥料相容性 (Rooddy, 2008)

	尿素	硝酸铵	硫酸铵	硝酸钙	硝酸钾	氯化钾	硫酸钾	磷酸铵	硫酸铁、 锌、铜、 锰	螯合铁、 锌、铜、 锰	硫酸镁	磷酸	硫酸	硝酸
尿素	√													
硝酸铵	√	√												
硫酸铵	√	√	√											
硝酸钙	√	√	X	√										
硝酸钾	√	√	√	√	√									
氯化钾	√	√	√	√	√	√								
硫酸钾	√	√	R	X	√	R	√							
磷酸铵	√	√	√	X	√	√	√	√						
硫酸铁、 锌、铜、 锰	√	√	√	X	√	√	R	X	√					
螯合铁、 锌、铜、 锰	√	√	√	R	√	√	√	R	√	√				
硫酸镁	√	√	√	X	√	√	R	X	√	√	√			
磷酸	√	√	√	X	√	√	√	√	√	R	√	√		
硫酸	√	√	√	X	√	√	R	√	√	√	√	√	√	
硝酸	√	√	√	√	√	√	√	√	√	X	√	√	√	√

√ = 相容 X = 不相容 R = 相容性降低

表 2.2 一些肥料的溶解性、pH 值和其他性质（引自第一产业：农业，2000）

	20℃时 100L 中最大 溶解量 (Kg)	溶解时间 (分钟)	溶液 pH 值	不溶物 (%)	备注
尿素	105	20 ¹	9.5	忽略不计	尿素溶解时溶液温度下降
硝酸铵 (NH ₄ NO ₃)	195	20 ¹	5.62	-	对镀锌铁和铜有腐蚀作用，肥料溶解时溶液冷却
硫酸铵 (NH ₄) ₂ SO ₄	43	15	4.5	0.5	对低碳钢有腐蚀作用
磷酸一铵 (MAP)	40	20	4.5	11	对碳钢有腐蚀作用
磷酸氢二铵 (DAP)	60	20	7.6	15	对碳钢有腐蚀作用
氯化钾 (KCl)	34	5	7.0~9.0 ²	0.5	对铜和低碳钢有腐蚀作用
硫酸钾 (K ₂ SO ₄)	11	5	8.5~9.5 ²	0.4~4 ²	对低碳钢混凝土结构有腐蚀作用
磷酸二氢钾 (MKP)	213	-	5.5+/-0.5	< 0.1	不具腐蚀性
硝酸钾 (KNO ₃)	31	3	10.8	0.1	肥料溶解时溶液温度下降，对金属有腐蚀性

1 溶液温度下降到 0℃，所以尿素完全溶解的时间更长。
2 数据来自肥料运输时的分析和参考不同的供应商资料。

表 2.3 一些肥料的溶解性随着温度的变化而变化的情况

温度	KNO ₃	KCl	K ₂ SO ₄	NH ₄ NO ₃	Urea
10℃	21	31	9	158	84
20℃	31	34	11	195	105
40℃	46	37	13	242	133

将先前讨论过的肥料的一些特性列入表 2.1 至表 2.3。表 2.1 描述了用于灌溉施肥的不同肥料的相容性。表 2.2 描述了田间条件下灌溉施肥溶液的特性。表 2.3 描述了一些肥料的溶解性随着温度的变化而变化的情况。

3 土壤特性和植物生长

3.1 灌水制度和在水在土壤中的分布

大水漫灌、沟灌和喷灌等传统的灌溉方式，一次灌水量很大，同时灌溉间隔要几天甚至数周。与此对应的是，微灌（表层滴灌或者表土下滴灌、微喷）的特征是较短的灌溉间隔，持续几个小时甚至几天，每次灌溉单位时间里的灌水量较少。在大水漫灌或喷灌的条件下，水分在土壤中运移是在整个土壤的垂直方向形成一个浸透的水体。但微灌系统通常只灌溉局部的土壤，就是说只湿润特定区域的土体。

水分在土体中的运移受重力和毛细管力的作用而在 3 个方向上运动。重力使水分向下运动。毛细管力使水在每个方向都向外扩展。在地下滴灌系统中，土体湿润模式不同，有时水分还向上运动（Sne, 2006）。这就是毛细管力作用的结果。湿润局部区域和整个种植区域的比与每个灌水滴头灌水量和灌水速率，灌水滴头间距和土壤类型有关（Keller and Bliesner, 1990）。滴灌被认为是单个滴头单位时间灌水量相对较小的灌溉方式。在炎热的夏季，部分土壤在整个灌溉期间甚至是干的（比如将灌水管隔 2 行而放置的灌溉方式，作物为棉花，见图 3.1）。



图 3.1 棉花灌溉 (Haifa Chemicals 提供)

较早的水分在均质压实的土壤中的分布试验是 Bresler (1977) 设计的。试验表明, 对于特定的土壤来说, 水分从一个滴头开始的点上在横向和纵向的运移距离是其灌溉速率的关系函数。灌溉同样量的水分, 在较低的灌溉速率下 (2L/h) 比在较高的灌溉速率 (20L/h) 下, 水分在土体中向下浸润更深。

理论上的水分运移原理用于实际的滴灌滴头安排设置时, 会发现实际中田间有更多的相关因素对水分在土壤中的运移影响很大 (Dasberg and Or, 1999), 包括土壤类型和土壤黏粒含量、机械化整地状况、土壤物理组成, 以及土壤石灰含量、随着灌溉而发生变化的盐或者钠的运移。最近用处理过的污水灌溉的水分运移模式的研究发现表明 (Tarchitzky *et al.*, 2007), 和清水灌溉相比, 溶解在污水中的有机化合物导致污水灌溉的水分运移模式发生很大的变化。试验观察到, 在灌水间隔期土壤干燥后, 在土壤颗粒表面吸附有机薄膜时, 土壤的疏水性增加了。这种干湿交替改变了土壤的湿润特征。在植物根系分泌物很多、土壤微生物很活跃或者使用大量有机肥的情况下, 也可以观察到田间灌溉土壤在干湿交替期间土壤湿润特征发生了改变 (Imas *et al.*, 1997a and 1997b)。

3.2 土壤氧气状况

在喷灌或者大水漫灌的情况下, 整个土地先是都湿透了, 然后因为植物蒸腾和土壤表面的蒸发作用而干燥。作物灌溉操作, 特别是在炎热夏季对黏重土壤的灌溉, 往往为了补充根部水分的亏缺而长时间地进行灌溉。在作物活跃生长期, 这样持续几个小时的长时间灌溉, 可能导致土壤剖面中水分过于饱和和氧气缺乏, 以及导致反硝化作用使土壤氮素大量流失 (Bar-Yosef and Kafkafi, 1972)。

在黏重土壤上, 灌水速率常常超过土壤的水分渗透速率, 常常在滴头下形成一个小水坑 (Bar-Yosef and Sheikolslami, 1976)。这个小水坑在黏重土壤上比砂性土壤更大 (Ben-Gal and Dudley, 2003)。水坑的形成导致滴头下土壤中的氧气缺乏。Silberbush *et al.* (1979) 研究了灌水点下水分渗入土壤的速率, 他检测了离灌水点不同距离的土壤水分的分布、氧气含量和植物根系分布情况。Huck 和 Hillel (1983) 发现, 灌水点的正下方土壤水分含量几乎是完全饱和的, 导致此处土壤中氧气非常稀薄。

3.3 作物根系分布

微灌条件下水分和养分在土壤中的分布对作物根系的分布非常重要。受许多因素诸如时间、植物类型、土壤水分状况、土壤温度、氮肥品种和浓度的影响，根系分布状况也发生变化。在滴头下的水分饱和区域，植物根系因为土壤中缺乏氧气很快就死了（Huck and Hillel, 1983），这样，活性根只能在既能提供土壤水分，又能提供氧气的土壤里生长（在第四章会专门讨论硝态氮的损失）。

微灌系统可以将水分从水源直接输送到植物需要水分的地方，而且可以最大限度地减少没有种植作物的空地上由于蒸发作用造成的土壤水分损失。在有水分和养分的地方植物根系发育很快。植物根系的向水性使我们可以两行作物之间只放置 1 根灌溉管道（图 3.1），甚至在辣椒上可以用 1 根管道灌溉 3 行作物（图 3.2），或用灌溉施肥湿润果园的部分土壤（图 3.3）和植被（图 3.4）。



图 3.2 以色列南部 3 行辣椒共用 1 条滴灌管（©Hillel Magen 提供）



图 3.3 种植柑橘应用灌溉施肥湿润局部土壤 (© Yara International ASA 提供)



图 3.4 中国南部种植香蕉应用灌溉施肥湿润局部土壤 (© Hillel Magen 提供)

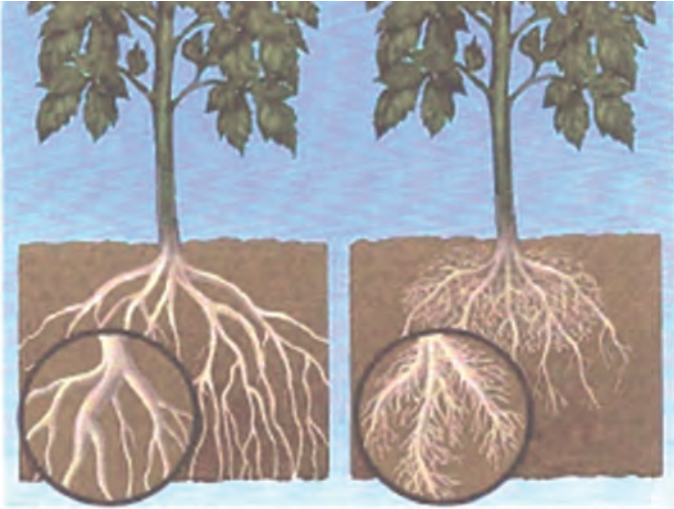


图 3.5 滴灌条件下（右）和喷灌条件下（左）植物根系发育状况示意图（© Netafim 提供）

应用滴灌进行经常的、小流量的水分供给，使作物根系变浅而密实（Sne, 2006），而喷灌或大水漫灌使作物根系扎得更深，分布更广。与此对照的是，因为提高了滴灌土体中土壤的透气性和养分，滴灌下作物根系的密度显著高于生长在喷灌条件下的作物（图 3.5; Sne, 2006）。这样，农户要避免在种植前整地时将作物种植区域的土壤压实（Huck, 1970）。

3.4 盐分和养分在土壤中的分布

水在土壤中的渗透模式进一步影响了土壤养分和盐分的分布。在沟灌时，因为下渗主要发生在比灌溉沟低的地方，所以土壤盐分主要在种植带上累积。大水漫灌和喷灌系统湿润整个土壤表面，这样就增加了深到整个根区底部的土壤的盐分（Hoffman *et al.*, 1990）。

在滴灌条件下，湿润的土体较浅，表示较大的湿润表面直接发生水分蒸发，土壤表面的盐分逐渐累积。不断重复的经常的灌溉和蒸发的循环，使滴头下的土壤发生淋洗，而盐分只在湿润区域边缘地带累积（Kafkafi and Bar-Yosef, 1980）。滴灌条件下湿润土体中盐分累积状况见图 3.6（Kremmer and Kenig, 1996）。



图 3.6 滴头下湿润土体中盐分分布 (引自 Kremmer and Kenig, 1996)

当非吸附性溶质 (比如硝酸盐和氯化物) 通过灌溉水添加到土壤中时, 会导致其在土壤中的浓度梯度和先前描述的盐分的分布表现出类似的规律。与此相对照, 吸附性养分 (比如磷、钾和铵) 在土壤中表现出的移动性要低一些。在黏质和砂质土壤中, 硝酸盐与水分的分布规律是一致的。与此相对照, 磷在砂质土壤和黏质土壤中分别只能移动到离滴头 11 cm 和 6 cm 的距离, 这是 Bar-Yosef 和 Sheikholislami (1976) 分别报道的。钾在黏重土壤中保持性很强, 特别是在伊利石为母质的土壤中更是这样。应该避免将磷用于喷灌系统的灌溉施肥, 因为磷素在喷灌时的移动性比滴灌时更受限。几乎所有用喷灌施肥系统施用的磷素, 都集中在表层土壤即在灌溉间隔中很快就干掉的几厘米土体中。

3.5 点源养分供应

微灌系统下的作物根系与整个土体都湿润的喷灌和漫灌相比相对小一些 (Sagiv *et al.*, 1974)。这就要求在作物从播种到收获的整个生长期, 要为种植在贫瘠的砂质土壤中的作物持续不断的提供水分和矿物质养分。对灌溉施肥条件下植物养分供应的基本知识可以追溯到早期的植物营养水培试验 (Benton-Jones, 1983)。水培和无土栽培技术就是在很短的间隔中替换全部的营养液。这一过程保证了在植物的整个生长过程中任何营养元素都不缺乏。Assouline 等 (2006) 采用类似的办法, 1 天内多次灌溉种植在砂壤上的柿子椒。采用这种方

法，在大田条件下持续为砂质土壤供应养分，可以导致养分的过量供应，从而引起养分淋洗到根区以下，引起地下水的硝酸盐污染。

Bartal 等（2006, 未发表）比较了 1 天多次灌溉、1 天 1 次或者 1 周 1 次灌溉条件下，大田条件下种植柑橘的情况，发现 1 天多次灌溉处理的上层土壤的盐分增加。这个问题在不充分灌溉导致氯化物的淋洗的情况下更严重。在经常灌溉条件下，上层湿润土壤因为蒸发而损失的水分很高，导致盐分在土壤表面累积。

Scaife 和 Bar-Yosef（1995）描述了大田作物应用灌溉施肥技术要点，即将实际的每日养分和水分供应量根据不同时间、不同生育期植物蒸发的需要而定。在灌溉施肥条件下，农户为作物提供作物每日需要的养分和水分。这种技术肯定对环境更友好，但也需要农户给予更多的日常管理，使提供的养分和水分满足作物的需要。使用“每日喂养”技术在种植玉米时采用重力微灌系统，可以充分保证作物的养分供应，同时证明作物吸收了所有养分，而没有过量的养分被相邻的作物所利用（Abura, 2001）。在装备较好的农场里，通过计算机程序控制水分和养分的供应，使之真正做到按作物每日的养分、水分需要量灌溉施肥，这样就可以节约大量的灌溉水和养分。

3.6 碱性和酸性土壤的灌溉施肥

3.6.1 碱性土壤

碱性土壤有以下一些特点：有活性碳酸钙，过量的可溶性钙离子，硝化反应快，对外源性的来自肥料的磷的固定作用不强。所有的 N 素化肥都适合添加到碱性土壤的灌溉施肥系统中。甚至像尿素这样完全溶解于水，并在施肥初期由于土壤中尿酶作用而引起土壤 pH 值升高的氮素肥料，也可以在碱性土壤的微灌施肥系统中使用，而不会出现想象中的增加碱性土壤中尿素含量的情况。在碱性土壤中，黏土类型主要是 2:1 型的，铵离子很容易被吸附在黏土颗粒上，但由于灌溉水的稀释作用而不会引起作物根系出现铵中毒的情况。土壤 pH 值的高低对选择钾肥种类、中量元素肥料和螯合态的微量元素没有影响。当然， Fe^{2+} 是一个例外。由于 Fe-EDTA 在碱性土壤 pH 值高于 6.5 时就不稳定，Fe-DTPA 被推荐在 pH 值高到 7.5 的碱性土壤中施用，而由于 Fe-EDDHA 在 pH 值高达 9 时都很稳定，从而被推荐在 pH 值特别高的碱性土壤上施用。

3.6.2 酸性土壤

酸性土壤的特点是有活性铝离子存在，但 Ca^{2+} 缺乏，硝化反应慢，对外源性来自肥料的磷素有很强的固持性。用于酸性土壤上的灌溉施肥的氮肥推荐见表 3.1，施用硝态氮会引起作物根际土壤的 pH 值升高（详见第四章）。根际土壤 pH 值的升高，有助于减轻铝的毒害，促进作物根系生长。

表 3.1 适宜中性、碱性 (6.5~8.5) 和酸性 (4.5~6.5) 土壤灌溉施肥的肥料

养分	土壤 pH 值	
	中性—碱性土壤 (pH 值 6.5~8.5)	酸性—中性土壤 (pH 值 4.5~6.5)
氮		硝酸铵 (NH_4NO_3)
		硝酸钾 (KNO_3)
		硝酸钙 [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$]
		尿素 (Urea)
		硫酸铵 [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$]
		磷酸铵 ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)
磷		磷酸二氢钾 (KH_2PO_4)
		聚磷酸铵
		磷酸 (H_3PO_4)
钾		氯化钾 (KCl)
		硫酸钾 (K_2SO_4)
		硝酸钾 (KNO_3)
中量元素		硝酸钙 [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$]
		硝酸镁 [$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$]
		硫酸钾 (K_2SO_4)
微量元素		硼酸 - B
		钼酸铵 - Mo
	Cu、Zn、Mo、Mn 的 EDTA 螯合物	
	EDDHA 螯合 Fe	EDTA 螯合 Fe
	DTPA 螯合 Fe	

4 灌溉施肥中的氮素 (N) 营养

4.1 肥料中的氮素形态

氮肥有 3 种基本形态：

- 尿素氮：中性分子， $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 。
- 铵态氮：带正电荷， NH_4^+ 离子。
- 硝态氮：带负电荷， NO_3^- 离子。

4.2 氮素在土壤中的反应

4.2.1 尿素

尿素 [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] 在纯水中溶解时不带电荷。尿素和土壤接触后，很快就被转化为氨 (NH_3) 和二氧化碳 (CO_2)。这种转换是在绝大多数土壤中都存在的尿酶的作用下发生的。氨很快就和水反应生成氢氧化铵 ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} = \text{NH}_4\text{OH}$)，导致土壤 pH 值升高。在田间施用尿素 1 天内，在施用尿素周围的土壤中就可以看到 pH 值升高的现象 (Court *et al.*, 1962)。

很多研究文献表明，当尿素撒施在土壤表面时， $\text{NH}_3\text{-N}$ 直接就损失到大气中了 (Black, 1968; Hoffman and Van Cleemput, 2004)。影响尿素施用后通过氨气挥发损失的土壤因素主要有：

- 阳离子交换量 (CEC)。
- 土壤 pH 值。
- CaCO_3 含量。
- 土壤水分含量。

土壤阳离子交换量与土壤黏粒含量直接相关。随着土壤 CEC 的上升，土壤中氨的挥发损失下降。当 CEC 低于 10 cmol/kg (Volk, 1959) 时，氨挥发损失很严重，但在黏质土壤中 (CEC 达到 100 cmol/kg)，氨的挥发损失可以忽略不计。黏质土壤施用尿素时氨挥发低的原因，是因为在尿素和土壤混为一体的条件下，水解产生的氨被土壤黏粒强烈吸附而不是排放到大气中。

土壤 pH 值是影响尿素水解时氨的挥发的第 2 个主要因素 (Hoffman and Van Cleemput, 1995 and 2004)。氨挥发损失的程度与尿素和土壤的混合程度有关 (Terman and Hunt, 1964)。尿素施在 pH 值为 5.2 的土壤表面，高达 70% 的

尿素氮会损失掉。而在经过施用石灰的同样的土壤上,将土壤 pH 值调整到 7.5 时,有 82% 的尿素氮会损失掉。但是,如果尿素和原先 pH 值为 5.2 的土壤充分混合的话,只有 25% 的尿素氮会损失掉 (Terman and Hunt, 1964)。

在灌溉施肥的条件下,尿素随灌溉水在土壤中移动。尿素在土壤湿润区的分布与其溶解到灌溉水的时间有关系。在冲洗周期以前的第 3 个灌水周期添加尿素的话,通过灌溉施用的尿素在湿润土区的边缘很容易被挥发损失。土壤表面的蒸发作用会导致接近土壤表面部分的尿素含量增高。土壤表面残余的尿素也一定会以氨的形式挥发到大气中。虽然在田间条件下很难监测到尿素氮的这种损失,但很多研究通过测试植物对氮的利用率,从而发现这是氮素直接损失的一个途径 (Haynes, 1985)。无论是铵态氮还是尿素用于灌溉施肥的肥料,都可以检测到大量的 N_2O 和 NO 的损失 (Hoffman and Van Cleemput, 2004)。尿素的另外一个潜在的问题就是尿素中少量的杂质即缩二脲的影响。作物生根和早期种子生长阶段,作物能忍受尿素中缩二脲的含量为 2% (Tisdale *et al.*, 1985)。

4.2.2 铵态氮

铵离子 (NH_4^+) 带正电荷 (阳离子), 被吸附在土壤黏粒表面带负电荷的地方, 也可以置换土壤黏粒表面的其他阳离子。这些吸附在土壤黏粒表面的阳离子主要是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 。这种交互作用的结果是, 铵在滴头附近聚集, 被置换下来的大量的 Ca^{2+} 和少量的 Mg^{2+} , 随灌溉水而移动。几天内, 土壤中的铵通常就被土壤细菌氧化成硝态氮, 随灌溉水在土壤中四处移动。

4.2.3 硝态氮

硝酸根离子 (NO_3^-) 带负电荷 (阴离子)。所以, 它不会被吸附在带负电荷的碱性和中性土壤黏粒上。但是, 它可以吸附在酸性土壤上带正电荷的氧化铁和氧化铝上。和尿素一样, 硝态氮随水移动, 而且其在土壤中的分布与其注入施肥系统的时间有关。硝酸根离子是一种强氧化剂。在滴头附近, 通常都有一定体积的水饱和的土壤, 处于缺氧状态 (厌氧条件) (Silberbush *et al.*, 1979; Bar-Yosef and Sheikolslami, 1976; Martinez *et al.*, 1991)。在这种情况下, 很多土壤微生物利用硝酸根离子中的氧而不再是利用氧分子满足其呼吸作用的需要, 结果就导致一氧化二氮和氮气损失到大气中。这种硝酸根离子经生物还原反应变成一氧化二氮或者氮气 (通常被称为反硝化作用) 的机制, 是氮肥损失的原因。在种植玉米的砂土田里进行灌溉, 连续灌溉深为 70mm, 导致 250 kg

N/hm^2 气态氮素的损失。农户很少关注由于过量灌水而引起的缺氧，进而导致气态氮素损失的情况（Bar-Yosef and Kafkafi, 1972）。其影响因素包括土壤黏粒含量高和土壤温度高，这些都导致根区土壤微生物在呼吸作用中利用硝酸根。

4.3 灌溉施肥中氮肥施用时应注意的问题

作物吸氮量与该地块的作物生长条件和当年作物长势有关。土壤有机物质中氮的矿化也随年度而变化。所以，同一地块同一作物的氮肥正确的施用量每年都是不一样的，在整个生长季节可能需要进行调整。

4.3.1 根区潜在的氮素损失

有 3 种氮素损失的潜在途径：

- 氮素（硝态氮和尿素）淋洗到作物根区以外。
- 土壤溶液的蒸发使含氮的盐类在干燥的土壤表面累积。
- 反硝化作用带来的氮素损失。

4.3.2 用灌溉制度或灌水速率保证滴头下不形成水坑

非常必要设置一种自动控制系统使滴头下的作物根区不至于缺氧，从而可以节约大量的氮素，不会损失到大气中。

Zhang 等（2004）展示了灌水量对水在土壤中的分布模式，具体描述了水锋在砂土和壤土中移动的情形。如果灌溉水量一定，提高灌水速率，则水分在土壤中纵向下渗越深；反之，减少灌水速率则水分在土壤中横向移动越远。Bresler（1977）更早的时候就得出了类似的结论。

4.4 氮素形态与土壤类型和作物生长条件的适应性

黏重土壤在土壤温度比较高的情况下，因为尿素不会发生反硝化作用而带来氮素损失，所以尿素态氮可能是黏重土壤比较好的氮源。黏质土壤通常都是碱性土壤，氨气的挥发性也更强，在这样的条件下， $\text{NH}_3: \text{NH}_4\text{OH} \rightarrow [\text{NH}_3(\text{gas}) + \text{H}_2\text{O}]$ 平衡右移产生氨气。在砂质土壤上，硝态氮可能比尿素更适宜，因为尿酶活化时产生较高的 pH 值可能会使氨浓度增高产生毒害。砂质土壤的持水量较低，CEC 也较低。较高的 CEC 的土壤能吸附尿素水解产生的氨，从而保证氨不破坏作物根系。

考虑氮素形态及其反应产物以及其在各种土壤类型中的行为, 是理解一种氮肥形态对作物有益还是有毒害作用的基础。Haynes (1990) 做过一个田间试验, 比较了来自硫酸铵、尿素、硝酸钙几种肥料的铵态氮、尿素态氮和硝态氮在滴头下湿润土体中的移动和转化的情况。在一个灌溉施肥周期 (滴水速率 2L/h), 施进去的铵盐聚集在滴头正下方土壤的 10cm 土体中, 几乎没有侧向移动。与此对照, 因为尿素和硝态氮在土壤中的移动性更强, 尿素和硝态氮在滴头下的整个土体中均匀分布, 并在以滴头为中心, 半径 15cm 的范围内发生侧向移动。尿素态氮比硫酸铵的铵态氮更容易转化为硝态氮。Haynes (1990) 发现, 滴头下土体中积累的大量的铵有可能会减缓硝化作用。这说明, 在这种情况下, 作物根系可能只能吸收铵态氮而不是硝态氮, 从而给植物生理和作物根系生长带来影响。因为都转化为硝态氮, 所以, 应用硫酸铵和尿素进行灌溉施肥都会引起湿润土体的酸化。施用硫酸铵处理的土壤, 酸化发生在 20cm 土体中。但是, 因为尿素在土壤中的移动性更强, 在 2L/h 的滴头流量下, 土壤酸化在深到 40cm 的土壤中都发生。这样的深层土壤的酸化很难修复, 同时, 在非石灰性土壤上, 可以减轻铝的毒害。如果将滴头流量从 2L/h 提高到 4L/h 的话, 尿素在土壤表面的侧向移动更严重, 从而, 土壤酸化也只发生在表土 (0~20cm) 土体中。

根据当地不同的土壤类型、作物品种和气候条件, 选择适宜的氮肥品种, 是农民和肥料经销商应该作出的重要的决策。举例来说, 用含有碳酸氢根离子的灌溉水在石灰性土壤上施用与 Haynes (1990) 相同的肥料, 可以获得同样的氮肥施肥效应, 但碱性高的条件下可以阻止土壤 pH 值的剧烈变化。

在果园里实施灌溉施肥, 滴水管线多年都保持在同样的位置。土壤和植物几年里都一直会受到同类型的灌溉施肥的影响, 氮素对土壤和作物根系的影响会不断累积并产生毒害。Zhang 等 (1996) 研究了氮肥施用方法对种植在排水不畅土壤、嫁接在酸橙 (*Citrus aurantium* Lush) 上的白什葡萄柚 (White Marsh grapefruit) 的根系分布和矿质元素浓度的影响。在 0~15cm 土壤深度, 撒施 N 112kg/(hm²·y) 的处理比通过灌溉施肥施用等量肥料的处理, 作物根系显著更密。在灌溉施肥条件下, 60cm 土层中总的根系中, 超过 75% 的根系分布在 0~15cm 土层, 低于 10% 的根系分布在 30~60cm 土层中。滴头附近的根系更密。灌溉施肥施用氮肥处理的作物根系中的氮浓度比表面撒施等量氮肥和不施氮肥处理要高。这样的研究结果支持这样一个观点, 即灌溉施肥施用的肥料浓度影响作物的根形态。精确地对土壤中每种氮肥形态进行准确定位的研究没有实际价值,

因为根系只分布在合适的土壤深度并吸收速效氮素养分。

4.5 不同形态氮素在灌溉施肥中的移动特征及其施用方法

农民使用灌溉施肥时考虑和关注最多的是氮素形态（尿素、铵态氮或者硝态氮）如何最优地适应作物、土壤和气候条件。这对苗木和玻璃或塑料温室中的作物尤其重要。

4.5.1 铵态氮和硝态氮

调整水分和养分供应顺序而制订不同灌溉施肥处理，对土壤中铵态氮和硝态氮的浓度分布进行了测定。灌溉水溶液中铵态氮的浓度和硝态氮浓度相同。但是，因为铵离子被吸附到土壤黏粒的表面，从而使铵离子大量聚集在滴头下方的土壤中。同时，硝酸根离子移动到湿润土体的边缘部分。这个发现说明，在田间进行灌溉施肥作业时，如果最后滴灌的肥料是硝态氮肥，无肥冲洗性滴灌时间要尽量短些，以避免造成硝态氮损失而使根区缺乏硝态氮养分。Zhang 等（2004）提出了硝态氮肥灌溉施肥时的推荐做法：

- 灌溉前滴清水时间占整个灌溉时间的 1/4。
- 滴灌硝态氮肥溶液时间占整个灌溉时间的 1/2。
- 灌溉后滴清水冲洗剩余肥料时间占整个灌溉时间的 1/4。

采用这种方法，可以使绝大多数硝态氮养分都集中在滴头附近土壤中。

4.5.2 尿素

可溶性很高的尿素在土壤中随水移动。肥料被注入灌溉管道系统的时间对氮素在湿润土壤中的分布影响非常大。在同样的灌溉水量的情况下，如果尿素是在灌溉开始的前 1/4 时段加入的话，尿素将随着后面的灌溉水而在土壤中移动，这样尿素就移动到湿润土体最边缘的部分。如果尿素是在后 1/4 时段加入的，则尿素将集中在靠近滴头的部分。就像上面提过的，土壤中尿素和硝态氮的后续反应不可忽视。

4.6 植物生理与氮素肥料

因为氮素的重要性以及不同氮形态在土壤中的反应复杂，农民实施灌溉施肥时考虑最多和最为关注的就是氮素营养。主要的速效氮源要根据作物、土壤

和当地气候条件进行选择。在选择氮素肥料时，要考虑的与植物生理条件有关的因素主要有：

- 作物对铵营养的敏感性 (Moritsugu *et al.*, 1983; 见 4.6.1)。
- 作物根区的土壤温度范围 (Ganmore–Newman and Kafkafi, 1985; 见 4.6.2)。
- 作物的生理发育时期。

在没有实施灌溉施肥的田块，无论是在整地时施入的氮肥，或后来追施的氮肥，选择氮素肥料时主要基于经济成本因素和对降雨量的估计，以确保硝态氮不至于被淋洗到根区以下。这种情况下，在田间，即使施用的是铵态氮或者尿素，作物也往往吸收的是硝态氮。但在水饱和土壤条件下，比如水稻土，通常情况下施用的是尿素或者铵态氮肥，这时作物吸收的是铵态氮。给生长在集约化温室等狭小空间里的作物施氮肥时，或者给砂质土壤上作物每日通过灌溉施肥系统施氮肥时，每日供应的氮素肥料迫使作物根系以供应的氮素形态吸收，因为植物吸收氮素速率比氮素被土壤微生物转化速率要快。

4.6.1 铵的植物敏感性

根据 Moritsugu 等 (1983) 的研究结果，不同作物品种对持续施用的氮素的反应不一样。Moritsugu 和 Kawasaki (1983) 做了非常精确的研究，图 4.1 显示，当溶液中的氮浓度保持在 5 mmol/L 时 (N 70mg/L)，像水稻、大麦、玉米、高粱和大豆等作物，对施用的氮肥形态不敏感。但是，番茄、萝卜、大白菜和菠菜等作物，则因为溶液中含有的铵而备受煎熬。大白菜和菠菜在溶液中 NH_4^+ 浓度为 5 mmol/L 时就会死去，Moritsugu 等 (1983) 进一步揭示了在 NH_4^+ 浓度为 5 mmol/L 时敏感致死的作物，在 NH_4^+ 浓度非常低时这些作物都生长得非常好 (NH_4^+ 浓度低于 0.05 mmol/L)。如此低浓度的 NH_4^+ 溶液通过滴灌系统持续施肥，保证了作物可以获得符合其养分需求的恒定的氮浓度 (图 4.2)。

4.6.2 作物根区温度

Ganmore–Newman 和 Kafkafi (1983) 在相同的氮浓度但硝态氮和铵态氮比例不同的营养液中种植草莓 (图 4.3)。保持根区温度在 17℃ 时，草莓在铵态氮源的情况下生长非常好，但在根区温度调整为 32℃ 并保持 4 周时间后，草莓死掉了。当作物根区的温度升高时，在所有氮处理作物根中糖的含量下降了。

pH 值恒定培养液中的铵态氮和硝态氮营养

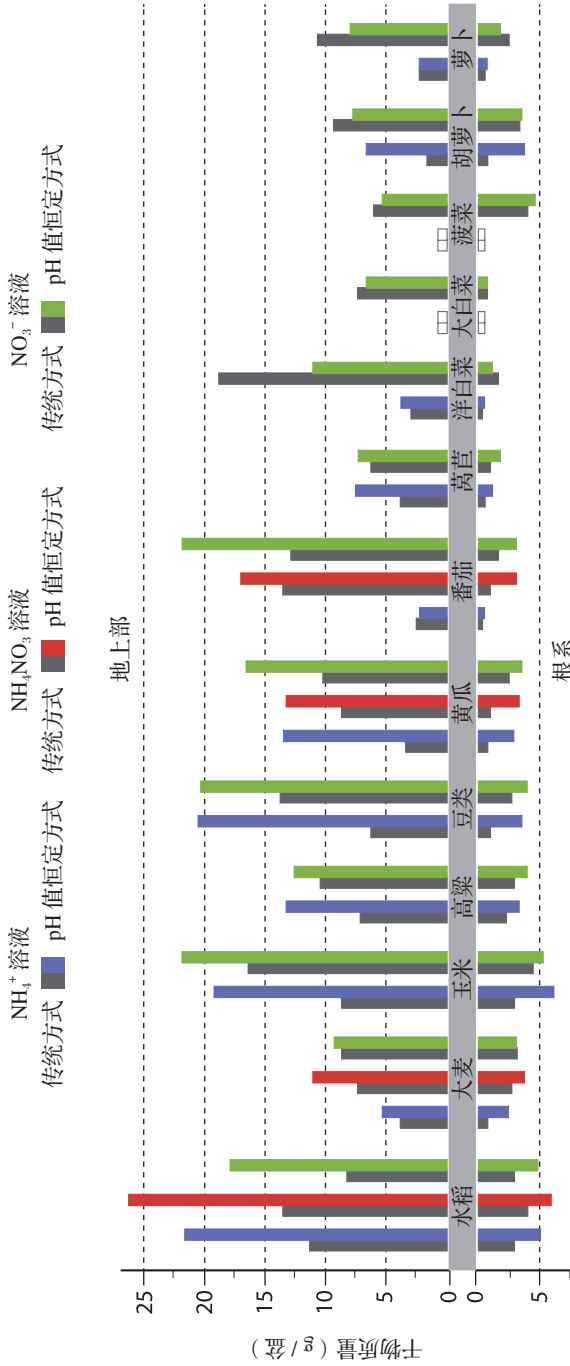


图 4.1 不同氮源对作物生长发育的影响 (引自 Mortisugu and Kawasaki, 1983)

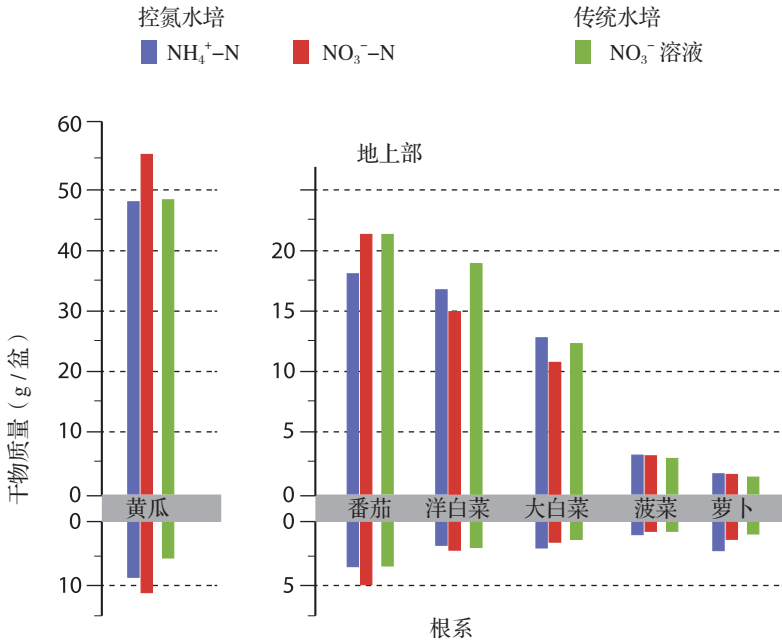


图 4.2 控氮栽培时不同氮源对作物生长发育的影响 (引自 Moritsugu *et al.*, 1983)

无论处于高温还是低温, 经铵态氮处理的草莓作物根中糖的含量都比经硝态氮处理的含量要低。实际上, 不同作物在不同温度下对氮形态的敏感性不同, 解释了很多情况和问题, 特别是在大田和苗木基地用塑料盆种植植物、在高温环境生长时易出现问题。不同植物对根区氮含量的敏感性不同, 与糖分在作物根系和地上部的含量不同有关。双子叶植物对氮浓度非常敏感, 而单子叶植物相对就不那么敏感 (Moritsugu *et al.*, 1983)。

氮素在作物的根系和叶片中都会发生同化作用 (Marschner, 1995)。吸收硝态氮时, 70%~90% 的氮素以硝态氮的形式运输到植物叶片中 (van Beusichem *et al.*, 1988)。在植物叶片中, 硝态氮转化为氨。当氨和叶片中的糖类结合产生氨基酸时 (通常是谷氨酸), 氨对植物叶片的毒害作用受到阻止 (Marschner, 1995), 且植物叶片细胞中产生糖类的地方非常接近受氨毒害的地方。但是, 当铵进入作物根系, 所有的铵态氮被作物根系的新陈代谢所利用, 所消耗的糖分通过韧皮部流动运输到作物根部 (Marschner, 1995)。在作物根部, 糖分有 2 个用途: (i) 细胞呼吸和 (ii) 铵的新陈代谢作用。但根部的温度升高时, 根系

细胞呼吸作用加强，根系的糖分浓度降低。当植物根系中糖分的浓度降低到不足以满足铵的新陈代谢活动时，游离氨就在根系细胞中积累并对根系的呼吸作用产生毒害，然后植物根系死亡（Ganmore-Newman and Kafkafi, 1985）。这就解释了为什么许多温室大棚中在高温生长季节作物不能很好生长的原因。所以，在土壤温度较高时，特别是对温室中种植的植物，其根系限定在一个有限的容积中，选用硝态氮用于灌溉施肥更好。另一方面，对大田生长的作物来说，并不是所有的作物根系都处于同样的温度条件、铵浓度或者缺氧状态。因此，大田生长的作物对氮素形态的敏感性要低得多。但是，即使对大田作物，土壤条件也是选择氮源时要考虑的重要因素。

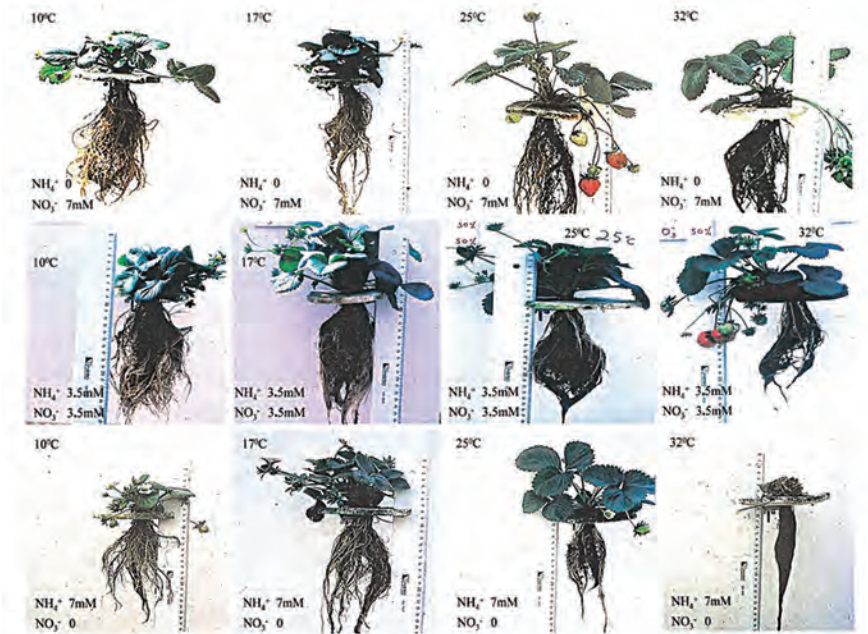


图 4.3 生长在相同氮浓度但不同的铵态氮和硝态氮比例和不同温度下的草莓
(Ganmore-Newman and Kafkafi, 1983)

4.6.3 植物生理发育阶段

施用铵态氮比施用硝态氮时作物体内的 Mg 和 Ca 的浓度要低（Van Tuil, 1965）。对番茄这样的敏感作物来说，在营养生长阶段，植物的木质部运输的 Ca 和 Mg 的浓度有几乎观测不到的轻微下降（Chio 和 Bould, 1976）。但在果实发育阶段，铵会引起 Ca 的缺乏，导致番茄果实上发生严重的花腐病。Xu 等（2001）

报道, 辣椒在开花前施用高达 30% 的铵态氮不会影响植株的正常生长。但是, 坐果后只有经硝态氮处理的辣椒不发生花腐病。发生这样的情况, 可能是因为铵态氮减小了根压, 而根压负责夜间植物细胞膨胀和果实膨大。由于 Ca 是在夜间被根压运送到正在膨大的果实的, 有铵态氮参与时, 减少了能到达正在膨大的果实的 Ca, 因而发生花腐病。

4.7 根据作物生长规律量化氮肥灌溉施肥方案

4.7.1 作物需氮规律

Cabrera 等 (1995) 研究了玫瑰花一个开花周期内不同时期的氮素需求。温室栽培玫瑰吸收氮素最低的时期是枝条快速生长阶段, 最高的是开花枝条停止生长的时期。为了研究玫瑰不同生长时期吸收的氮素和总氮素动态变化之间的比率, 用 ^{15}N 对水培的“Royalty”玫瑰花上施用的肥料进行标记。研究发现, 在花枝快速生长阶段, 从营养液中吸收的氮素仅占整个花枝氮素含量的 16%~36%, 剩余的在花枝中占大多数的氮素都是来自储藏在其他器官中的氮素, 特别是一些老茎和叶片。在开花期的后期, 植物吸收氮素量增加了, 以满足花枝对氮素的需求, 以及补充老叶和茎中的氮素。这些器官继续储存氮素, 直到后来开始长出花芽, 这些储存的氮素正好可以被下一个开花周期花枝生长所利用。

对苹果来说, Millard 和 Neilsen (1989) 研究结果表明, 施氮可以促进叶的生长, 而对根系的生物量没有影响, 从而改变了根系 / 叶片的干物质比。不施氮肥的苹果树完全依赖植物体内储存的氮素, 支撑其周期性的生长。一开始, 这些氮素都用于苹果叶片的生长, 不过几周后就停止了。随后, 在缺氮的苹果树上, 一些氮素被从叶片上转运过去支持苹果树根系的生长。虽然在施用足量氮肥的果树叶片中有氮素积累, 但增加氮素用量对满足生长需要而转运的氮素量几乎没有什么影响。这个研究成果还揭示了, 在苹果树生长时转运氮素的主要是富含天冬酰胺和精氨酸的蛋白质。这个结果说明了氮素内部循环对幼年苹果树生长的重要性, 以及氮素循环对所有落叶果树的重要性 (Millard and Neilsen, 1989)。Mattos, Jr. 等 (2003) 研究了 6 年树龄的“Hamlin”柑橘树 [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] 生物量的情况, 这些柑橘树是嫁接在“Swingle Citrumelo”砧木 [*Poncirus trifoliata* (L.) Raf. \times *C. paradisi* Macfad.] 的, 种植

的土壤为美国佛罗里达州低流量灌溉的砂质土。柑橘树地上部分占干物质总量的70%左右。绝大多数支根都集中在0~15 cm土层中，离树干0.5 m和1.5 m的地方，支根的密度分别为1.87 cm/cm³和0.88 cm/cm³。施肥280 d后柑橘收获时，用¹⁵N标记的尿素和铵态氮的利用率分别为25.5%和39.5%。¹⁵N在新近发芽叶片上累积为4.3%，在老叶上为2.5%。但在柑橘的木质组织中¹⁵N的累积较低。柑橘果实是氮的最大的储存库（施用尿素和铵态氮的利用率分别为10.2%和18.4%）。他们的研究结果验证了在柑橘果实发育前施用氮肥是非常重要的。

把一些苹果树的根放到无氮（NO）的溶液中，受缺氮影响而使苹果树根系比例发生变化（Frith and Nichols, 1975）。在最优的照明环境下，如果部分根系没有氮素营养，剩余的根系就会补偿性地吸收更多的氮素。在灯照强度降低时，植物的这种补偿性多吸收氮素的适应性也降低了。从灌溉施肥的角度看，这些实验的结果表明，没有必要在土壤中均一施用氮肥，因为在养分浓度高的地方，苹果根系会过量吸收氮素，以补偿在低浓度地方根系吸收氮素养分的不足。

4.7.2 作物不同生育期需氮量变化

当硝态氮是液体栽培介质中唯一的氮源时，没有根瘤的大豆（*Glycine max* L. Merr. cv. Ransom）净吸收氮的多少随叶片生长周期在最大和最小峰之间周期性摆动（Henry and Raper, Jr., 1989）。在21 d的植物营养生长期中，每天都对其净吸收的铵态氮进行测定。净吸收铵态氮的速率也与叶片周期有类似的变幅。负的净吸收速率表示由于净吸收铵态氮流入、流出的变化而使其在最大、最小之间不断变动。所以，可以得出结论，植物吸收氮素的多少，实际上是受植物体内在机制控制的，而农民的作用就是通过灌溉施肥系统在靠近植物根系的区域保持充足的速效氮素。

4.8 氮素的吸收

植物生长发育的整个过程吸收的所有矿质营养，必须保证满足该养分在特定的植物发育阶段的需要。举例来说，K素储存在比如葡萄（Conradie, 1981）、甜菜、木薯、马铃薯、柑橘和绝大多数的多汁果实中。这样，收获这些果实时钾素就从土壤中被带出去了。谷物就不一样了。一般来说，谷物籽粒收获时主要带走的是土壤中的氮素和磷素，一般认为它带走的钾素少到可以忽略不计，除非收获物为作物顶尖部的嫩绿的干物质时，或者收获后作物秸秆也

被移除农田。

研究单个的不同根龄、根系功能的变化, 对了解作物资源获取物、竞争能力和最佳生育期等有重要的指标意义。有报道显示 (Volder *et al.*, 2005), 当根龄提高时, 葡萄的细根对硝态氮的吸收和根呼吸水平都急剧下降。这种氮素吸收量和根的呼吸水平都下降的情况与根系中氮素浓度一致, 表明氮素从作物根部迁移出去了。根系吸氮量的下降主要发生在植物细根有根系活力的 5 d 内。这些发现强化了保持肥沃土壤的重要性, 肥沃的土壤有助于植物根系持续不断地生长, 也保证植物获得足够的养分促进作物生长。部分大田作物的需氮量测定结果见表 4.1。

表 4.1 部分大田作物和蔬菜不同相对生长阶段吸氮量 (Kafkafi and Kant, 2004)

作物	相对生长阶段 (%)					总吸收量 (g/株)	株数 (株/hm ²)	预期产量 (t/hm ²)
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100			
	吸收量* (g/株)							
棉花	0.20 (6)	1.80 (58)	3.80 (123)	2.20 (71)	1.60 (52)	9.60 (62)	25 000	1.3 **
玉米	0.25 (11)	1.58 (70)	1.00 (44)	0.83 (37)	0.50 (22)	4.17 (37)	60 000	8
番茄	0.50 (19)	0.75 (28)	2.50 (91)	4.25 (156)	3.25 (119)	11.25 (83)	20 000	100
甜椒	0.40 (20)	1.80 (90)	1.10 (55)	0.70 (35)	0.60 (30)	4.60 (46)	50 000	55
马铃薯	0.08 (4)	1.00 (50)	1.08 (54)	0.50 (25)	0.17 (9)	2.83 (28)	60 000	50
香瓜	0.20 (10)	0.60 (30)	1.60 (80)	2.80 (140)	0.80 (40)	6.00 (60)	25 000	50
西瓜	0.83 (41)	1.67 (84)	3.33 (166)	6.67 (333)	2.50 (125)	15.00 (150)	12 000	75
洋白菜	0.10 (8)	0.20 (16)	0.80 (63)	1.90 (150)	0.60 (47)	3.60 (56)	50 000	29
花椰菜	0.10 (8)	0.20 (16)	0.50 (40)	2.00 (157)	1.40 (110)	4.20 (66)	50 000	9
茄子	0.50 (14)	3.25 (89)	2.00 (55)	2.50 (69)	1.50 (41)	9.75 (54)	20 000	40

* 括号里的数字是不同相对生长阶段通过灌溉施肥作物每日累积吸氮量 [mg N / (株 · 天)]。这一数值包括了供植物根系消耗的额外的 10% 的量。

** 皮棉产量。

5 灌溉施肥中的磷素 (P) 营养

5.1 磷素与土壤颗粒的相互作用：吸附、解吸、沉淀和释放

在溶液中的磷 (P) 必然跟土壤中的无机和有机成分发生交互作用。只要 pH 值处于较低水平，灌溉水溶液中的 H_2PO_4^- 离子就会保持稳定。一旦 H_2PO_4^- 离子被释放到土壤中，就会快速与碱性土壤中黏土矿物（如蒙脱石和伊利石）发生反应，或者与酸性土壤中的高岭石、铁和铝化合物发生反应。碱性土壤条件下，磷主要与石灰 (CaCO_3) 发生反应。土壤中有大量的相对难溶性的磷化合物，它们通常被称为“固定态磷”。从种植者的角度来看，确定土壤中每一种磷化合物是没有意义的。事实上，种植者问的主要问题是土壤中是否有足够的“有效磷”能确保植物对磷的需求。为了回答这个问题，在 20 世纪开发了很多关于土壤磷的提取方法，为测定土壤中磷含量与对植物施入磷的实际反应之间建立了对应关系 (Kafkafi, 1979)。

磷酸根离子与土壤溶液 pH 值

磷酸 (H_3PO_4) 也可以写成 $\text{PO}(\text{OH})_3$ ，有 3 个羟基，能积极与碱性土壤中的钙（通常以碳酸盐形式存在）和酸性土壤中的铝、铁的氢氧化物发生反应，形成很多由 pH 值大小决定的潜在化合物。在 pH 值 5~9 时，水溶液中主要的可溶性磷酸盐离子为 H_2PO_4^- 和 HPO_4^{2-} 。当溶液中总磷保持稳定时，磷的一价和二价离子的相对分配由 pH 值决定（图 5.1）。pH 值为 7.2 时，50% 的磷以 H_2PO_4^- 存在；当 pH 值超过 7.2 时，二价磷的比例增加非常快；当 pH 值低于 7.2 时，一价磷离子是主要的组成成分。

植物只吸收 H_2PO_4^- 形态的一价磷 (Marschner, 1995)。从图 5.1 可以很明显地看出，随着溶液 pH 值的增加，溶液中磷的有效性下降。例如，溶液的 pH 值为 5 时，溶液中含有 1g 磷，那么所有的磷对植物来说都是有效的（100%）。当溶液 pH 值增加到 8 左右时，尽管溶液中总磷含量没有变化，但仅有 0.1g 磷（占总磷的 10%）是有效的。当植物吸收 NH_4^+ ，根系周围就会变酸，但是，若植物吸收 NO_3^- ，根系周围就会碱化 (Marschner, 1995)。植物吸收氮的形态，影响了根系周围的 pH 值，从而影响土壤对磷的有效性。研究表明，与根系直接接触的土壤是植物吸收磷的主要来源。除非土壤中原有的磷浓度非常高，土壤中磷

的扩散速率与根伸长的速率相比非常缓慢 (Lewis 和 Quirk, 1965)。

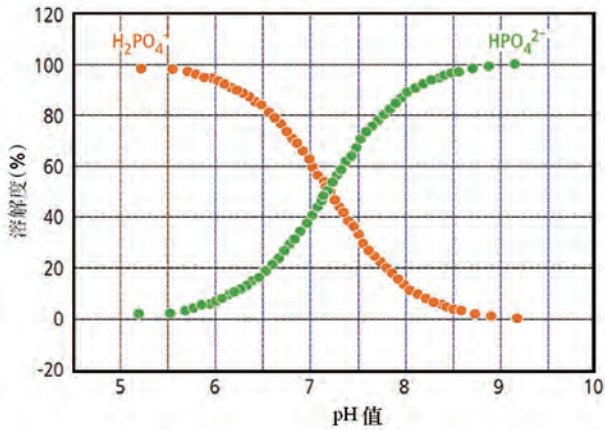


图 5.1 一价和二价磷离子 ($H_2PO_4^-$: HPO_4^{2-}) 的相对浓度与土壤溶液 pH 值的关系方程 (基于 H_3PO_4 第二个等电点 $pK=7.2$)

5.2 作物根系分泌物与磷素的吸收

鹰嘴豆 (*Cicer arietinum* L.) 根系能够分泌酸性的有机化合物, 而玉米却不能。结果表明, 当施入硝态氮肥时, 玉米根系的 pH 值增加到 6.5, 而相同条件下鹰嘴豆根系周围 pH 值从 5.0 下降到 3.9 (Marschner, 1995)。这表明有些植物根系的酸性分泌物能够促进土壤中低浓度磷的活化。

5.3 氮素营养对磷素吸收的影响

铵盐的吸收能降低根系周围的 pH 值, 而硝酸盐的吸收却能增加 pH 值。研究表明, 磷肥配合硫酸铵一起施入, 玉米的吸磷量比配施硝酸盐肥料增加了 5 倍 (Black, 1968)。磷肥配施铵态氮肥 (一种酸性肥料) 与配施一种碱性碳酸铵肥相比, 能促进玉米幼苗吸收更多的磷 (图 5.2) (Duncan and Ohlrogge, 1957)。Imas 等 (1997a, 1997b) 进一步证实了铵态氮的吸收降低了根系表面的 pH 值, 从而促进了对磷的吸收。

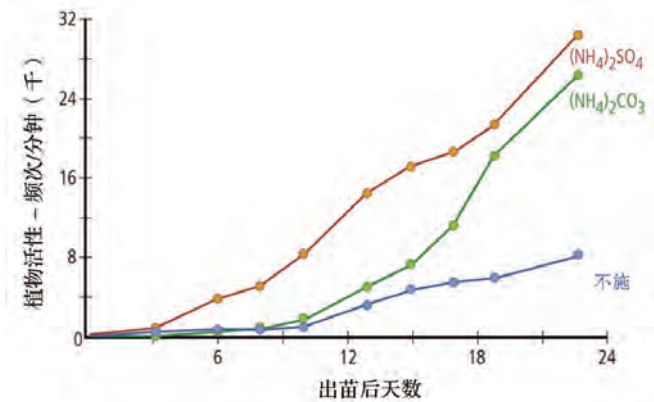


图 5.2 与酸性或碱性氮肥一起施入时，玉米对放射性磷的吸收情况
(图中红线来源于 Duncan 和 Ohlrogge, 1957)

5.4 滴头施入点磷素在土壤中的迁移

碱性土壤中 Ca (石灰富集型土壤) 及酸性土壤中 Fe 和 Al 与磷酸盐的快速反应, 限制了施入的磷在土壤中的迁移距离。土壤黏粒含量或者 CaCO_3 含量越高, 磷从滴头施入点运移的距离越短。即使在砂质土壤中 (Ben Gal and Dudley, 2003), 磷的运移距离与在水溶液中相比也明显受到限制 (图 5.3)。

然而, 当土壤中施入鸡粪以后, 形成了磷的有机复合物 (Kleinman *et al.*, 2005)。研究发现, 淋洗下渗液中磷的浓度高低与通过土壤的水流量大小无关。这就是说, 土壤中的大孔隙是土壤磷素流动的主要通道。当磷与有机肥等有机复合物结合后, 就不会与土壤中的其他成分发生反应而被固定, 从而能从施肥点运移到较远的距离。然而, 目前对控制磷运移的机理了解得还不完全。土壤中磷的运移已经成为一个环境问题。通常认为, 磷只在粗骨结构的土壤中随着水分的快速下渗而淋失, 或者在砂质土壤中随着活性磷吸附点位的消失而造成渗漏 (Ozanne *et al.*, 1961; Mansell *et al.*, 1977; Peverill *et al.*, 1976; Sharpley *et al.*, 1993)。与之对立的观点认为, 假如土壤可溶性磷库是非饱和的, 由于这些随时间变化的吸附或解吸过程主要出现在铁、铝氧化物或碳酸钙、碳酸镁表面, 磷不会淋失几厘米进入含有大量黏粒的剖面中 (Rajan *et al.*, 1974; Rolston *et al.*, 1975; Bolt, 1976)。除非在泥炭土或者有机质含量高的土壤中, 水溶性有机碳能包覆在磷的吸附点位上, 从而促进磷在土体中的移动 (Pierzynski

et al., 1994)。Kirby *et al.* (1997) 对集水坡的土壤研究发现, 如果水分穿透土壤中的大孔穴, 磷素就会向深层渗滤。

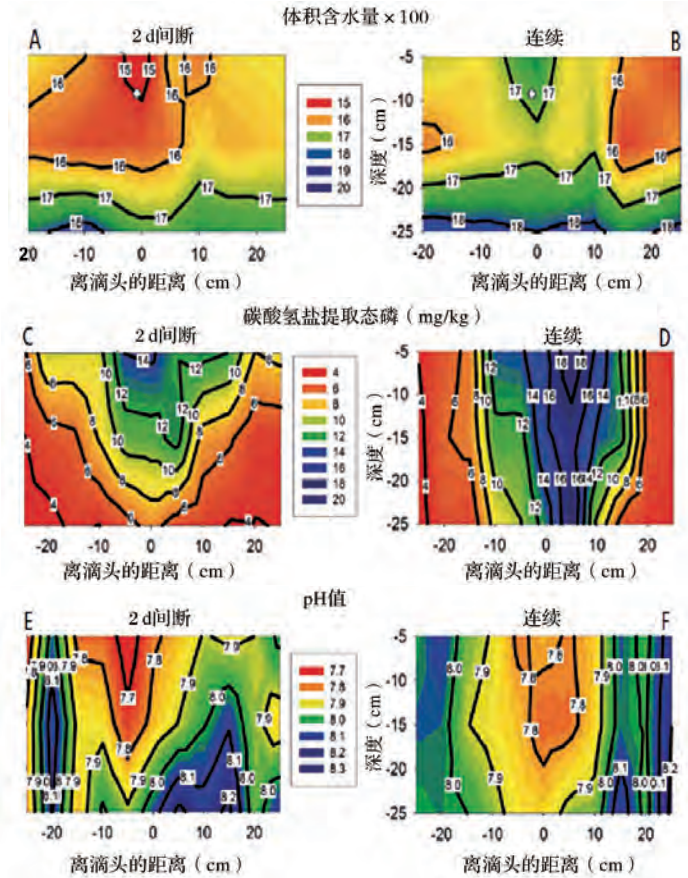


图 5.3 在贫瘠土壤上间断 (A, C, E) 和连续灌溉施肥 (B, D, F) 14d 后, 测定体积含水量, 碳酸氢盐提取态磷和水土比 2 : 1 提取测定 pH 值。样品于 2d 为一个灌溉循环周期的中间采集 (Ben-Gal and Dudley, 2003)

5.5 磷肥

用于灌溉施肥中的磷肥必须是完全可溶性的。常用的磷肥类型有磷酸钾或磷酸铵盐、磷酸脲或者工业磷酸。在磷酸盐工业中, 可溶性聚磷酸盐化合物是很常见的, 但作为肥料使用仍然有限 (表 5.1)。

表 5.1 用于灌溉施肥的磷肥的性质

名称	磷酸 (75%) ¹	磷酸脲	MKP ²	酸化 MKP ³	MAP ⁴
化学式	H ₃ PO ₄	(NH ₂) ₂ CO · H ₃ PO ₄	KH ₂ PO ₄	KH ₂ PO ₄ +H ₃ PO ₄	NH ₄ H ₂ PO ₄
pH 值 (1% 溶液)	0	1.8	4.5	2.2	4.3~4.5
P ₂ O ₅ (%)	52~54	44	51.5	60	61
K ₂ O (%)	0	0	34	20	0
N-NH ₂ (%)	0	17.5	0	0	0
N-NH ₄ (%)	0	0	0	0	12
备注	避免 金属材料	避免 金属材料	对金属材料 安全	避免 金属材料	对金属材料 安全
注：1 工业绿磷酸。 2 MKP (磷酸二氢钾)。 3 酸化的 MKP——磷酸二氢钾与磷酸的一种混合物。 4 MAP (磷酸一铵)；灌溉等级。 用于灌溉施肥的很多液体肥料，其磷素都来源于表 5.1 中的一种。					

5.5.1 磷酸

磷酸在工业生产过程中的应用非常普遍，如用来清洁金属表面。磷酸的相对密度为 1.6，通常装在塑料容器中。在灌溉施肥中，磷酸用于清洗灌溉施肥管道和开关滴头中的无机沉淀，同时也提供了植物生长所需的磷肥。与浓硝酸或硫酸相比，其操作更为安全。然而，磷酸是高浓度酸，操作过程中的防护措施是十分必要的，例如，需要带上护目镜和手套，以防止溅到皮肤和衣服上。由于它是高浓度磷源，在田间施用时需要一个分液的输送泵。

5.5.2 聚磷酸盐肥料

“聚”一字是指这种物质的分子结构中含有 1 个以上的磷原子。只有 1 个磷原子的化合物被称为“正磷酸盐”；通过加热，去除水分子，生成的 1 个磷化合物分子中含有 2 个磷原子，被称为“焦磷酸盐”；当化合物中含有 3 个或 3 个以上磷原子时，就成为“聚磷酸盐”。焦磷酸盐是高浓度液体肥料聚磷酸铵 (APP) 的主要形态。当 APP 施入土壤后，焦磷酸盐就会水解成正磷酸盐。

在化肥工业领域，聚磷酸盐肥料是在有氨存在的条件下加入高浓度液态磷肥而生成的，其氮、磷、钾养分组成为 10-34-0 或 11-37-0。磷的相对浓度越高，

其单位运输成本越合适。然而, 植物只能吸收 H_2PO_4^- 形态的磷, 这就意味着聚磷酸盐肥料在植物吸收之前必须转化成一价磷形态。该反应需要酸性环境提供质子 (H^+)。质子的主要供应者为根系本身, 它能够在吸收 NH_4^+-N 过程中向土壤释放 H^+ , H^+ 的产生促进聚磷酸盐的分解, 将其转化为植物可吸收利用的一价磷酸盐。在钙质土壤中, P 素半衰期 (降解 50%) 为 14~21 d (Khasawneh *et al.*, 1974 and 1979)。这个半衰期非常长, 因为 5 个半衰期 (70~100 d) 才能将 90% 的磷转化成植物可吸收的形态 (McBeath *et al.*, 2006)。土壤中根系周围微观尺度的 pH 值是持续变化的, 所以, 通过将风干土壤重新湿润, 并在实验室内测定 pH 值, 不能反映根系周围微观 pH 值的变化。Lombi 等 (2004) 比较了液态磷酸一铵 (MAP) 与颗粒 MAP 化肥施入澳大利亚高钙土壤后的差异。施入等量磷肥时, 液态磷肥比颗粒磷肥增加了作物的吸磷量和产量。结果表明液态 MAP 溶解更快, 比颗粒 MAP 能供应更多的有效态磷。颗粒 MAP 在施入土壤 5 周后, 仍有大量的颗粒态磷 (12%) 存在于土壤中。与颗粒态磷肥相比, 液态磷肥增加了田间试验中土壤磷的有效性, 这可能是由于土壤中溶解、扩散和反应过程等差异造成的。

在美国苜蓿上施用液态的聚磷酸铵 (APP) 肥 (10-34-0) 和固体 MAP 肥 (11-52-0), 比较两者间的差异 (Ottman *et al.*, 2006)。结果表明, 液体 APP 成本较高, 与粒状 MAP 肥相比, 虽然增产, 却不能增加收入。然而, 在低量施用磷肥的情况下, 由于成本较低, APP 液肥可能比顶级包装的 MAP 颗粒肥更实惠。因此, 肥料本身的花费及其施用成本是选择肥料时应考虑的主要因素。灌溉施肥的滴灌管线, 可通过自动遥控系统来控制磷肥的施用, 从而节省施肥成本, 使种植者受益。滴灌施肥技术为解决实际问题提供了一个简单易行的办法。

5.5.3 磷酸脲 (UP) [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{H}_3\text{PO}_4$]

磷酸脲是尿素和磷酸分子之间的化学加合物。它至少包含了 17.5% 的 N 和 44% 的 P_2O_5 。它被用于在中性和碱性土壤上种植作物的灌溉施肥。相比液态酸, 磷酸脲易于操作, 使用更安全, 因为它流动自由且以干酸结晶形态存在。此外, 每千克磷酸脲溶解后会产生 6.3 mol H^+ , 从而使其成为一种高浓度酸化剂。它的酸性反应能够使储液保持清洁, 防止灌溉施肥设备的阻塞。磷酸脲降低了灌溉水和土壤的 pH 值, 提高了养分的有效性和养分的利用效率。在钙质含钠的土壤上, 磷酸脲与碳酸钙反应, 钙离子代替了土壤复合物中的钠离子, 改善了土壤

结构（降低紧实度）。当灌入足够的水后，钠离子就会从根系冲走，从而使水分渗透增加，根系周围的钠离子减少（Rya and Tabbara, 1989）。磷酸脲能减少 N 素挥发的风险（Mikkelsen and Bock, 1988）。施用磷酸脲还能促使开花和结实提前（Becker *et al.*, 2004）。由于最早入市的产品其价格通常较高，所以早结实对种植者来说非常重要。

5.5.4 磷酸二氢钾（MKP）（ KH_2PO_4 ）

磷酸二氢钾是一种包含氢氧化钾和磷酸的水溶性盐。它含有 51.5% 的 P_2O_5 和 34% 的 K_2O 。当需要每天在砂质土壤耕作中供应磷时，磷酸二氢钾常常用作灌溉施肥的磷素肥料。由于非常低的盐残留，磷酸二氢钾特别适合在盐化大田土壤中使用。

5.5.5 磷酸二氢钾 + 磷酸混合物（ $\text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{H}_3\text{PO}_4$ ）

磷酸二氢钾 + 磷酸混合物是近年来新引入的化肥，其 P_2O_5 浓度可达到 60%，并能增加酸度，以防止使用硬水（高钙含量）作为灌溉水源时可能造成的磷沉淀和灌溉管道的堵塞。

5.5.6 磷酸一铵（MAP）（ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ）

磷酸一铵肥料含有 61% 的 P_2O_5 和 12% 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ，大田的灌溉施肥常常用其作为磷源。在水田系统中，当 NH_4^+ 对植物无害时，它可以保持酸性溶液的 pH 值。如果种植的作物对 NH_4^+ 非常敏感，像水培生菜，那么，在水溶液中使用磷酸一铵时需要特别谨慎。在泥炭或土壤做基质栽培作物时，硝化作用占优势，施用这种肥料通常是安全的。

5.6 磷素的吸收

表 5.2 列出了大田作物需磷量。

表 5.2 中植物的吸磷模式显示了植物不同生理阶段对磷吸收的差异。通常来说，磷需求的高峰出现在向繁殖器官分化的早期。玉米结棒时需要较多的磷素，因而，可在玉米棒出现后 30 ~ 40 d 内使用高剂量的磷肥。对于工业化生产番茄来说，出苗 60 ~ 80 d 后，大多数的磷富集在番茄的果实中。而且，在很短时间内，二次开花形成了所收获的全部果实。滴灌能够使磷素固定最少（Kafkafi，未发表资料），能最大限度地供应磷素以满足植物的需要，并且在植物吸收之前，最大

程度地减少肥料磷与土壤的接触时间。在棉花行间施入磷的同位素标记的磷肥的研究表明, 在供应磷素后, 滴灌湿润区域的棉花根系表面会迅速吸收磷素。

表 5.2 部分大田作物和蔬菜不同相对生长阶段对磷的吸收
(Kafkafi and Kant, 2004)

作物	相对生长阶段 (%)					总吸收量 (g / 株)	株数 (株 /hm ²)	预期产量 (t/hm ²)
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100			
	吸收量 * (g/ 株)							
棉花	0.17 (5.2)	0.24 (7.7)	0.80 (25.8)	0.44 (14.2)	0.17 (5.2)	1.80 (11.6)	25 000	1.3**
玉米	0.07 (2.9)	0.30 (13.2)	0.28 (12.1)	0.25 (11.0)	0.10 (4.4)	1.00 (8.8)	60 000	8
番茄	0.03 (1.1)	0.05 (1.8)	0.17 (6.2)	0.45 (16.5)	0.25 (9.0)	0.95 (7.0)	20 000	100
甜椒	0.03 (1.5)	0.10 (5.0)	0.20 (10.0)	0.08 (4.0)	0.04 (2.0)	0.45 (4.5)	50 000	55
甜瓜	0.02 (1.1)	0.08 (4.0)	0.20 (10.0)	0.32 (16.0)	0.20 (10.0)	0.82 (8.2)	25 000	50
茄子	0.03 (0.8)	0.12 (3.3)	0.18 (5.0)	0.42 (11.5)	0.35 (9.6)	1.10 (6.0)	20 000	40

* 括号里的数字是不同相对生长阶段通过灌溉施肥 [mg P₂O₅ / (株·天)] 作物每日累积吸磷量 [mg P₂O₅ / (株·天)] 这一数值包括了供植物根系消耗的额外的 10% 的量。

** 皮棉产量。

6 灌溉施肥中的钾素 (K) 营养

钾是作物必需的大量的基本元素，广泛分布在植物的很多部分。钾在植物体中存在的形态从不发生变化，从来都是以 K^+ 形式存在。钾作为阳离子在植物木质部导管中移动，主要靠硝酸盐来平衡 (Ben Zioni *et al.*, 1971)。在植物叶片中，硝酸盐被新陈代谢掉了，钾随着有机阴离子向下移动到植物根部。钾的这些重要特征是 Ben Zioni 等 (1971) 和 Kirkby 与 Knight (1977) 研究发现的。

6.1 钾和土壤颗粒的相互作用：吸附、解吸和固定

钾在岩石、土壤和溶液中以稳定的阳离子 (K^+) 形式存在，带一个正电荷。 K^+ 是花岗岩的组成成分，也是伊利石黏土颗粒的组成成分，占其颗粒含量的 6% 左右。几乎在所有的黏粒中都含有交换性阳离子，但一般不超过黏粒阳离子交换量的 3%。当通过施肥提高土壤溶液中的钾离子浓度时，钾离子通常有 3 种方式存在：① 土壤溶液中；② 吸附在土壤黏粒表面；③ 固定在黏土颗粒内部空间。土壤溶液中的钾离子和吸附在黏粒表面的钾离子经常发生交换，维持一种瞬时的平衡状态。但是，“被固定”的钾离子和“被释放”的钾离子之间很少交换，不能满足植物根系对钾素的吸收需求 (Kafkafi *et al.*, 1978)。因为被固定的钾离子变成释放态的钾离子非常缓慢，不能满足作物生长发育对钾素的需求，所以需要通过施肥添加外源性的钾素。特别是在滴灌施肥的情况下，施用钾肥就更为重要，因为活性根只占土壤容积的很小一部分，不是所有的土壤中的钾都能被作物生长发育所利用。

6.2 用于灌溉施肥的钾肥

有 4 种钾素肥料可以用于灌溉施肥：氯化钾 (KCl 或者 MOP)、硫酸钾 (SOP)、磷酸二氢钾 (MKP) 和硝酸钾 (KNO_3)。这种排列顺序也显示了其阴离子满足作物营养需求的重要性越来越高。

氯化钾是世界上资源最丰富的钾素肥料。可溶于水，溶解速度快，容易和其他的氮素肥料混合。反对使用氯化钾的理由通常是认为它含有氯离子 (Cl^-)。施用氯化钾带入的氯离子有可能对那些对氯敏感的作物有影响，比如氯离子影

响烟草的燃烧质量 (Xu *et al.*, 2000)。在其他绝大多数作物上, KCl 都是可以使用的。KCl 也常常作为最便宜的钾源, 用于生产复合肥料。

硫酸钾 (K_2SO_4) 广泛用于含盐条件下。因为硫酸根离子的原因, 当只有“软水”作为灌溉水源时, 这时的灌溉水含钙量很低, 用硫酸钾作为肥料就很好。当灌溉水中的钙含量很高时, 使用硫酸钾就容易在灌溉管线中形成石膏类的沉淀物质, 堵塞滴头。

磷酸二氢钾用于灌溉施肥不仅可以作为钾源, 也是另外一种磷源。因为灌溉施肥中作物需要的磷量往往只有需钾量的 10%, 所以磷酸二氢钾在灌溉施肥中往往作为磷源而不是钾源。

硝酸钾在高于 20℃ 时溶解性非常好, 而且从作物养分吸收的角度看, 硝酸钾的 K:N 比非常合适。如果在大田条件下, 储藏硝酸钾溶液的容器放置在室外, 需要给予更多的关注, 因为硝酸钾在夜间低温条件下, 可以在储肥罐里形成沉淀。

6.3 钾素通过灌溉系统施用的好处

严格限制用水量的滴灌作物常常限制作物根系大小。土壤颗粒表面的可交换性阳离子, 或者存在伊利石黏土矿物晶格中的钾, 都不足以完全满足植物对钾的需求。因为钾在收获的新鲜蔬菜、果实、鲜叶、块茎和根茎作物中含量很高, 所以大量的钾素被从田间带走。因此, 通过灌溉施肥不断地施用钾素, 是保证作物生长发育、农产品品质和产量所必需的。

番茄中番茄红素的提高是不断施用钾素的结果。Sosnitsky (1996) 研究了土壤溶液中钾离子浓度对番茄颜色的影响 (图 6.1)。针对品种为 cv.8687 番茄的试验表明, 逐渐增加循环灌溉水溶液的钾浓度, 可以提高番茄的品质, 增加番茄红素的含量, 但对番茄的产量没有影响。因为钾素对作物的品质有影响, 所以在在大田作物、园艺作物和果园中通过灌溉施肥施用钾素非常重要。

6.4 钾肥灌溉施肥中的阴离子评价

植物吸收硝态氮的量几乎和吸钾量一样, 它们在溶液中的浓度单位都是 mol/L。由于 K : N 的比率是 39 : 14, 植物组织中钾的浓度, 用质量比分数表示, 比植物组织中氮的含量高。但是, 从进入植物体中电荷数量的角度看,

氮比钾高 4 倍 (Marschner, 1995)。硫 (S) 是植物的必需元素, 但在植物组织中的浓度只有不到氮浓度的 6%。在土壤中硫和钾一起运移, 但因为植物吸收更多的钾素, 硫就被留在了植物根系表面附近。氯也是植物必需元素, 但属于微量元素 (Marschner, 1995)。如果氯离子在植物根系周围的土壤溶液中出现, 植物就会吸收氯离子, 而且会和氮素形成竞争性吸收 (Xu *et al.*, 2000)。所以, 对通过滴灌进行灌溉的那些经济价值较高的温室大棚作物和品质较高的作物来说, 施用 KNO_3 既可以满足作物对钾的需要, 也可以部分满足作物对氮的需求。当施用含硫或含氯的钾素肥料时, 需要另外添加氮素。

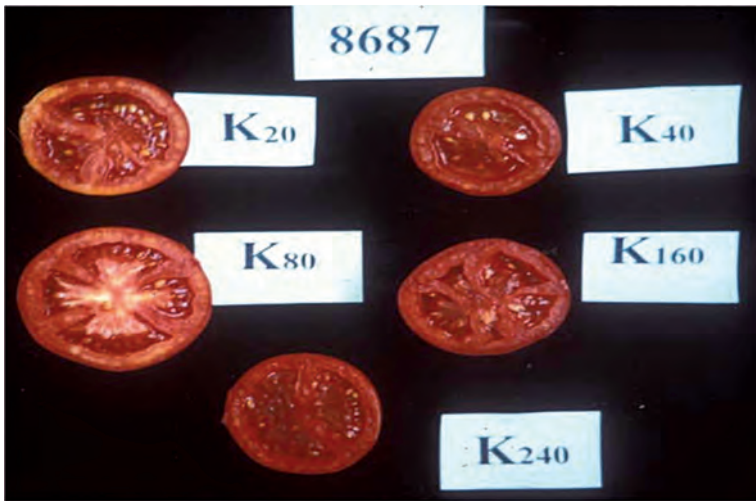


图 6.1 土壤溶液中钾浓度对加工番茄 cv.8687 的颜色和番茄红素的影响 (Sosnitsky, 1996)

6.5 滴头施入点钾素在土壤中的迁移

Mmolawa 和 Or (2000) 深度研究了滴灌条件下土壤养分的动态变化。Bar-Yosef (1999) 讨论了土壤中钾素的迁移。生产实践中, 土壤中钾从滴头开始的移动的精确分布没有那么重要, 因为植物根系会生长, 会找到湿润根区土壤中的钾素。植物根系吸收钾素的速度非常快, 一旦钾素接触根系就很容易被吸收。在含钾量很低的沙丘土壤上, 需要每天通过灌溉施肥施用钾素和氮素以满足作物对营养的需求, 特别是在根系限定在一定范围的情况下更是如此。当土壤因为黏粒含量低而不吸附钾素时, 钾素的分布范围比磷素的分布范围要大得多,

但比氮素要小些。在 CEC 较低的含碳酸钙 95% 的大田土壤上, 种植番茄的灌溉施肥试验验证了这一结论 (Kafkafi and Bar-Yosef, 1980)。

6.6 钾素的吸收

表 6.1 显示了不同作物对钾的吸收情况。表中将植物生长的绝对时间转换成从播种到收获的全部时间的相对百分数 (%)。

表 6.1 部分大田作物和蔬菜在不同相对生长阶段的吸钾量
(Kafkafi and Kant, 2004)

作物	相对生长阶段 (%)					总吸收量 (g/株)	株数 (株/hm ²)	预期产量 (t/hm ²)
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100			
	吸收量* (g/株)							
棉花	0.60 (20)	2.00 (65)	3.60 (117)	0.60 (20)	0.20 (7)	7.00 (45)	25 000	1.3 **
玉米	0.25 (11)	1.83 (80)	1.00 (44)	0.33 (14)	0.08 (4)	3.50 (31)	60 000	8
甘蔗	0.50 (11)	0.60 (13)	0.70 (15)	1.80 (40)	0.60 (13)	4.20 (19)	50 000	140
番茄	0.70 (25)	0.80 (30)	3.50 (128)	7.00 (256)	4.50 (165)	16.50 (121)	20 000	100
甜椒	0.50 (25)	2.00 (100)	1.40 (70)	1.40 (70)	0.40 (20)	5.70 (57)	50 000	55
马铃薯	0.20 (10)	0.80 (40)	1.80 (90)	1.50 (75)	0.40 (20)	4.70 (47)	60 000	50
香瓜	0.40 (20)	1.20 (60)	4.00 (190)	4.40 (220)	2.00 (100)	12.00 (120)	25 000	50
茄子	0.75 (21)	5.00 (138)	3.00 (82)	1.75 (48)	1.00 (28)	11.50 (64)	20 000	40

* 括号里的数字是不同相对生长阶段通过灌溉施肥作物每日累积吸钾量 [mg K₂O / (株·天)]。这一数值包括了供植物根系消耗的额外的 10% 的量。

** 皮棉产量。

7 灌溉施肥中的中量元素营养

中量元素这一概念指的是钙（Ca）、镁（Mg）、硫（S）等元素，它们与氮、磷、钾等大量元素比起来，其对植物的重要性居于第2位。但是，部分植物对钙、镁、硫的需要量甚至超过了对磷的需求。表 7.1 列出了部分作物对中量元素的需求量。

表 7.1 代表性作物对钙、镁、硫的吸收

元素	符号	吸收形态	kg / t 干物质 *
钙	Ca	Ca ²⁺	5 (0.5%)
镁	Mg	Mg ²⁺	2 (0.2%)
硫	S	SO ₄ ²⁻	1 (0.1%)

* 大多数植物的有效浓度。

在绝大多数碱性和弱酸性土壤中，Ca 和 Mg 的有效性及其向植物根系的运输是通过土壤溶液中的质流完成的。因为很多原因，通过质流输送到植物根部的 Ca 和 Mg 比植物根系的吸收量要多得多。这样 Ca 和 Mg 就富集在植物根部（Barber, 1962）。一些中量元素通过使用氮磷钾等大量元素肥料带入土壤（表 7.2）。

在播种前施用大量元素肥料比如硫酸铵时，施入土壤中的 S 和 Ca 的量比 N 和 P 的量还要高，而这时候植物吸收 S 和 Ca 的量少于 N 素。从重量上说，普通过磷酸钙含 Ca 和含 S 量超过含 P 量。所以，农业上施用 Ca、Mg 和 S 等元素肥料，在重要性上不如大量元素肥料。但是，在酸性土壤上施用 Ca、Mg 和 S 是头等大事，因为酸性土壤常常缺 Ca，P 素也通常被土壤固定（Marschner, 1995）。

表 7.2 施用 N、P、K 肥料时带入的中量元素

肥料	大量营养元素	中量营养元素
普通过磷酸钙	P ₂ O ₅	Ca ²⁺ 、SO ₄ ²⁻ 和一些微量元素
重过磷酸钙	P ₂ O ₅	Ca ²⁺ 和一些微量元素
硫酸铵	N	SO ₄ ²⁻
硫酸钾	K ₂ O	SO ₄ ²⁻

7.1 钙 (Ca)

植物中钙的行为特征非常特别。土壤溶液需要持续不断地供应 Ca 以满足植物根系生长的需要。Ca 总是从植物根部向上移动 (Marschner, 1995), 它是唯一一种不会在韧皮部从叶片向根部或者向正在膨大的果实移动的元素。所以, 只要植物根区缺钙就会导致植物根系伸长区细胞死亡。这是酸性土壤上植物根系不发达的主要原因, 也是为什么要在酸性土壤上施用碳酸钙 (CaCO_3) 或石灰以降低土壤酸性、促进根系生长的原因。在灌溉施肥中, 硝酸钙 [$5(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) \cdot \text{NH}_4\text{NO}_3$] 是主要的 Ca 源。当灌溉水中的 Ca 含量很低时, 灌溉施肥系统中必须添加钙元素肥料。在旱作地区或者碳酸盐丰富的土壤上, 如果要在灌溉施肥系统中添加钙肥的话必须非常小心, 因为含钙高的灌溉水可能会引起碳酸钙沉淀从而堵塞滴头, 特别是在每次灌溉结束前没有用足够的清水冲洗管道中的残留物的情况下更容易发生这种情况。

7.2 镁 (Mg)

因为镁在植物叶绿体中起核心作用, 所以人们都知道镁是植物的必需元素。同时, 它在植物的新陈代谢中也发挥着重要作用, 包括蛋白质的合成、高能化合物 ATP 的合成和活化, 以及碳水化合物在植物体中的分配等等 (Marschner, 1995)。

在碱性土壤条件下, 黏土矿物主要是蒙脱石, 镁含量占其晶格重的 6% 左右。所以, 这种黏土矿物可以持续地、缓慢地向土壤溶液中供应 Mg。

镁肥主要有几种有效形态:

- 硫酸镁石 ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$): 是一种自然形成的矿物, 在酸性土壤中用作可溶态的镁肥, 含白云石的石灰石, 煅烧镁和熔融磷酸镁 (Loganathan *et al.*, 2005)。

- 可溶态镁肥: 硝酸镁 [$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$] 和硫酸镁 [$\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$] 是灌溉施肥中常用的可溶镁肥。

通过灌溉施肥施用铵态氮时可能会与镁的吸收产生竞争关系, 从而引起植物缺镁 (Kafkafi *et al.*, 1971)。镁和铵态氮的这种竞争关系常常发生在黏粒含量很低的砂质土灌溉施肥的情况下。

7.3 硫 (S)

硫是植物的必需元素，在植物体内的含量和磷素接近。作为一种必需元素，灌溉水中的 SO_4^{2-} 常常就能满足植物对硫的需要。作为硫酸钾、硫酸铵和镁肥的阴离子，它们就可以完全满足植物对硫的需求。

7.4 灌溉水中的钙、镁、硫

在灌溉施肥中必须考虑当地灌溉水中的盐分含量和含盐总量。灌溉水含有不同浓度的多种元素 (Harward, 1953)。在美国加利福尼亚州北部各种河流水中的 Ca 含量范围为 6~9mg/L，而其井水中的 Ca 含量为 26~200mg/L。在灌溉水中比较丰富的元素有 Ca ($26\sim 200\text{ g/m}^3$)、Mg ($14\sim 60\text{ g/m}^3$) 和 S (SO_4^{2-} , $21\sim 599\text{ g/m}^3$)。灌水 500mm (1mm 水相当于每公顷 10t 水)，相当于给作物施用了 Ca 肥 $130\sim 1000\text{ kg Ca/hm}^2$ 。如果所有的钙都施到作物根部，对大多数作物来说都不会缺钙。这个例子说明一点，在滴灌施肥时需要将灌溉水中的养分元素考虑在内，以免给土壤施入过多的盐分。

灌溉施肥时，土壤中固有的养分含量与植物营养供应之间并不相关，因为植物根系在灌溉施肥条件下严格限制在湿润土体中 (参见“3.1 灌溉制度和水在土壤中的分布”一节)，植物不能利用整个土体中的营养元素，而只能利用湿润土体中的养分。

8 微量元素

8.1 缺素表现现象

植物缺乏微量元素时首先在嫩叶的叶尖部分出现症状，与缺乏氮、磷、钾大量元素时在植物下部的老熟叶片出现的相关症状不同。大量元素都集中在新的正在生长的植物组织中。当缺乏这些大量元素时，植物的分生组织将老叶中的大量元素运移到新长出的植物器官中。与这种解释相一致，植物缺氮时植物下部的老熟叶片黄化（有时也叫黄萎病），当缺乏微量元素铁时，黄萎病出现在植物上部的、顶点的嫩叶上。

8.2 灌溉施肥中的微量元素营养

植物体中需要的相对氮、磷、钾来说少很多的营养元素称为微量元素（Harmsen and Vlek, 1985），有时也被称为痕量元素（Moran, 2004）。植物吸收的二价阳离子微量元素有铁（ Fe^{2+} ）、锰（ Mn^{2+} ）、铜（ Cu^{2+} ）和锌（ Zn^{2+} ），吸收的阴离子有 MoO_4^{2-} 、 $\text{B}(\text{OH})_3$ 或者 $\text{B}(\text{OH})_4^-$ 。

8.3 灌溉施肥中的微量元素肥料

Fe、Cu、Zn 和 Mn 非常容易和土壤黏粒及土壤其他成分发生反应，所以，当微量元素肥料以无机硫酸盐这样最简单的无机盐形式施入土壤时，它们的有效性就急剧下降，而且，在绝大多数情况下，很快转化为无效态。然而，如果以螯合态施入（Moran, 2004），金属元素会从螯合物中释放出来，在植物根系表面一直保持植物能吸收利用的有效形态（Chayney, 1988）。而且，当它们被吸收进植物体内时，它们就和植物体内的有机酸，比如果酸，形成果酸盐，并以这种复合形态通过木质部从根部运输到其他组织中。植物能产生大量的这种复合物，促进特定的微量元素的吸收和转运。

8.3.1 硼（B）

和上面讨论的金属微量元素不同，任何酶中都不含有 B，但是缺硼却会严重

抑制植物的生长发育。举例来说，移到无 B 的溶液 100h 后，植物根系停止生长（Chapman and Jackson, 1974）。另外，B 对花粉发芽、花粉管伸长和生殖细胞有丝分裂影响明显（Jackson and Linskens, 1978）。B 对 Ca 的植物代谢和利用效率非常重要。在纯的灌溉施肥溶液中，B 以硼酸[$B(OH)_3$]或者硼酸根离子[$B(OH)_4^-$]的形态存在。在植物细胞质中（pH 值为 7.5），超过 98% 的 B 以 $B(OH)_3$ 的形态存在，在液泡中（pH 值为 5.5），99.95% 的 B 以 $B(OH)_3$ 的形态存在（Brown *et al.*, 2002）。植物根部的 pH 值影响 B 的吸收。B 吸收受溶液 pH 值的影响见图 8.1。PH 值高于 8 时，B 的吸收有 1 个明显的拐点并快速下滑，说明植物吸收 B 的形态是 $B(OH)_3$ 。

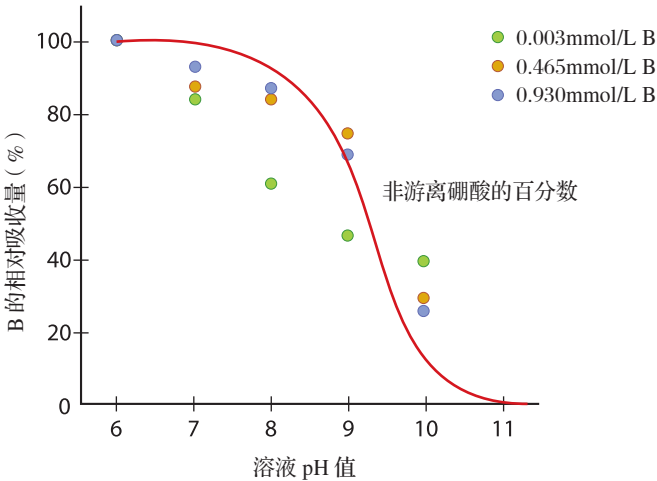


图 8.1 不同 pH 值条件下植物对 B 的相对吸收量（pH 值为 6 时，所有浓度下，植物吸收 B 为 100%）。（引自 Oertli and Grgurevic, 1975）

8.3.2 氯 (Cl)

氯被认为是植物的必需元素（Shorrocks, 1994）。但是，Cl 的需求量很低，由于植物可以从土壤溶液和灌溉水中吸收大量的 Cl^- ，所以 Cl 不太可能缺乏。缺乏 Cl 的情形大多发生在远离海洋的地方，因为那里的降水中没有含 Cl 等微量元素的海相悬浮物（Xu *et al.*, 2000）。在植物体内部，光合作用中的水解必需氯的参与（Marschner, 1995），同时 Cl 和 Mn 一起构成植物体内光合系统 II 的氧气释放中心（OEC）（Ferriera *et al.*, 2004）。Cl 还在植物吸收的营养元素阴离子和阳离子的离子电荷平衡方面扮演着重要角色。在盐水中通常含有大量 Cl，大量 Cl 累积在植物叶片上可能会给植物带来毒害作用，引起敏感植物坏死，

例如鳄梨边缘的坏死 (Xu *et al.*, 2000; Bar, 1986) (图 8.2)。

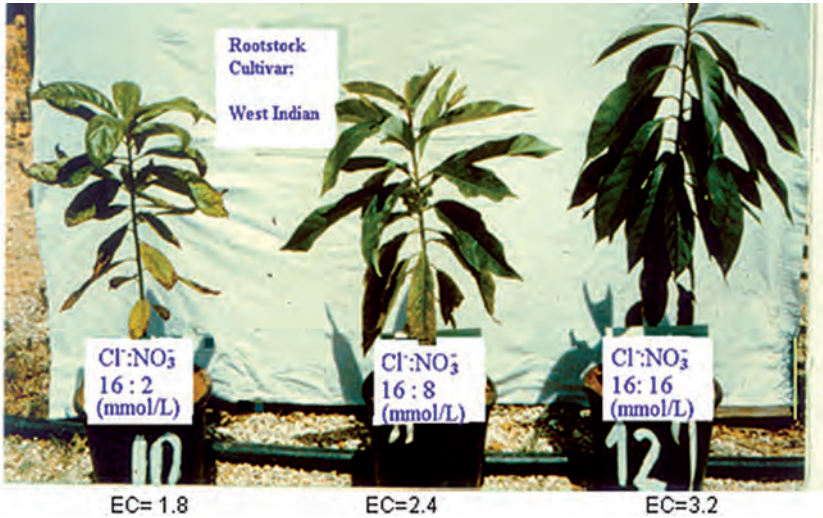


图 8.2 提高含 Cl 量为 16mmol/L 灌溉水中的硝态氮含量可以减缓氯对鳄梨叶片的毒害 (Bar, 1986)

8.3.3 铜 (Cu)

铜是负责光合作用的植物细胞叶绿体的组成成分。铜是典型的植物必需营养元素, 虽然需求的数量很少, 但对光合作用非常重要。在土壤中, 特别是当 pH 值大于 7.0 时, 铜被土壤有机质固定, 减少了铜对植物的有效性。但是, 在应用营养液膜栽培技术 (Nutrient Film Technique, NFT) 和水培技术时, 对植物有效态铜的含量高于数个 g/m^3 时就会带来诸如“铜休克” (Copper shock) 等铜中毒 (Marschner, 1995)。所以, 非常严格地控制灌溉施肥溶液中的铜含量是十分必要的。

8.3.4 铁 (Fe)

一般来说, 在通气良好的土壤中, Fe 以难溶形态, 如氢氧化铁 $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ 的形式存在。当根系附近的土壤 pH 值较低时, 比如在植物吸收硝态氮的情形下, 这时可能有足够的铁能满足植物的需要。虽然通常较高的碳酸钙含量会降低 Fe 的有效性, 但在根系附近土壤 pH 值较低的情况下, 即使土壤碳酸钙含量达到 95%, 植物也不会缺铁 (Kafkafi and Ganmore-Newmann, 1985)。铁一旦进入植物体内, 就会和无机酸形成化合物, 比如柠檬酸铁, 并转运到植物细胞

特定的点位。植物缺铁最常见的症状就是在植物顶部新叶的黄化现象（黄萎病）。这种情况特别是在 pH 值大于 8.0 的钙化土壤上非常明显，常常称为石灰引起的黄萎病。有时候，分析测试发现植物叶片中含铁量很高，但依然有缺铁现象影响植物生长，所以，叶片中的铁的功效有延迟现象（Römheld, 2000）。

植物形成了 2 种吸收铁的方式（Marschner, 1995）：

- 方式 I 是除了草以外的所有的植物吸收铁的方式。先是在植物根系质膜上的一种叫做铁螯合还原酶的作用下，将 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+} 。然后 Fe^{2+} 通过根系表皮细胞膜运输到其他组织。这种吸收铁的机理被 Chaney 等（1972）在大豆上得到了验证。

- 方式 II 是只在草上发现的植物吸收铁的方式。高铁载体化合物是铁的配合基，当草在缺铁的情况下，其根系分泌出这种载体。

在灌溉施肥中，像 Cu、Fe、Mn 和 Zn 这些金属微量元素，大多数都是以 EDTA 螯合态施用（Moran, 2004）。EDTA 螯合态的金属微量元素化合物在 pH 值低于 7.0 的情况下，绝大多数都很稳定（Lehman, 1963）。用于碱性土壤（pH 值 > 7.0）上的稳定螯合态铁通常为 EDDHA（Barak and Chen, 1982）。要用于灌溉施肥的话，只能用铁的螯合态化合物。

8.3.5 锰 (Mn)

Mn 是植物体内叶绿体中光合系统 II 的氧气释放中心（OEC）（Ferreira *et al.*, 2004）所必需的元素，其基本功能是在光合作用过程中将水光解为电子（ e^- ）、氢（ H^+ ）和氧（ O_2 ）。电子（ e^- ）用于生成 ATP 形式的能量物质，氢（ H^+ ）与二氧化碳形成碳水化合物（糖）和将硝态氮还原为铵态氮（在叶绿体中发生）。所以，锰是植物生长发育过程中碳水化合物和蛋白质合成的功能因子。

灌溉施肥过程中，Mn 要在土壤溶液中保持一定的浓度有一系列的问题。有研究表明，给植物施入 Mn^{2+} 后很短时间（以秒或者分钟计），土壤溶液中的 Mn 浓度就快速下降到缺乏的程度（Sonneveld and Voogt, 1997; Silber *et al.*, 2005）。这是由于负电荷表面和黏土颗粒的快速吸附反应导致的结果（Davies and Morgan, 1989; Morgan, 2005）。灌溉表土层的良好通气条件有利于形成氧化锰 Mn^{3+} 和 Mn^{4+} （Lindsay, 1979），这些不溶矿物降低了 Mn 的可溶性，使 Mn 浓度降到较低的水平。所以，当评估吸附、沉淀和氧化反应的相对重要性时，必须考虑反应的动力学问题（Morgan, 2005）。在灌溉施肥条件下， Mn^{2+} 的溶解性绝对受 pH 值有关反应的控制，比如吸附反应和氧化反应（Silber *et al.*,

2008)。沉淀反应的作用，包括形成 Mn^{2+} -P 或 Mn^{2+} -碳酸盐，作为移除 Mn^{2+} 的促进因素，可能没有那么重要。在施用后数秒到几个小时的时间内， Mn^{2+} 的可溶性受瞬间吸附作用的控制，但是，经过一段时间后，生物 Mn^{2+} 的氧化作用的重要性上升了，变成 Mn^{2+} 移除的主要控制机制 (Silber *et al.*, 2008)。

8.3.6 钼 (Mo)

钼是硝酸还原酶的共同影响因子 (Sagi *et al.*, 2002)。在这方面，对植物的硝酸盐的新陈代谢来说，钼是必不可少的。对植物吸收来说，有 1 个 Mo 的阴离子吸收进入植物体的同时，就有 100 万个硝酸根离子进入植物体 (Lucas and Knezek, 1972)。一般来说，在肥料的配方中都不添加 Mo，除非经过验证植物出现了缺钼导致的症状 (Loue, 1986)。

8.3.7 锌 (Zn)

因为受锌的有效性而不是土壤中锌的总含量的影响，经常发生植物缺锌的情况。pH 值大于 7.5 和较高的碳酸钙含量，较低的有机质含量和较低的土壤水分含量，是锌对植物有效性的主要控制因素 (Kalayci *et al.*, 1999)。锌对控制植物组织伸长和扩展的生长素的合成非常重要。缺锌症状包括茎和枝条生成簇叶和小叶，叶片很小和发育不良。

8.4 微量元素的有效性与土壤 pH 值的关系

绝大多数情况下最适合植物吸收的有效微量元素的土壤 pH 值范围列于表 8.1。

表 8.1 植物吸收微量元素最适宜的 pH 值范围 (Soil Fertility Manual, 2003)

微量元素	有效性最大的 pH 值范围
铁	4.0~6.5
锰	5.0~6.5
锌	5.0~7.0
铜	5.0~7.0
硼	5.0~7.5
钼	7.0~8.5
氯	与 pH 值大小无关

9 灌溉水质与灌溉施肥

在灌溉施肥的管理中，肥料的选择和灌溉水质是两个最重要的需要考虑的方面。影响灌溉施肥操作的水质因素主要有离子组成、盐碱化程度、pH、碳酸氢根浓度和氧化还原反应电位。

考虑灌溉施肥水质的重要性主要有两个方面：

- 灌溉水质对植物营养的影响。
- 灌溉施肥系统中肥料和水的交互作用。

下面从这两个方面加以详细讨论。

9.1 灌溉水质对植物营养的影响

虽然所有的灌溉水源的质量都对植物营养有影响，但是下面 2 种水源的灌溉水质特别重要：

- 含盐总量很高和以钠离子与氯离子等特定离子毒害的盐水作为灌溉水源的。
- 经无害化处理过的含有营养成分和较高盐分浓度的中水（TWW）。

9.1.1 盐水灌溉

9.1.1.1 总盐浓度

盐水作为灌溉水源常常在干旱、半干旱地区。不同的植物种类和品种对溶液盐分的敏感程度不同。关于植物对灌溉水盐分的敏感性的研究有很多综述，下面列出 Maas（1985）的文献。导致不同植物减少生长的电导率（EC）值变幅很大。甜菜可以耐受的 EC 值为 7 dS/m（不包括播种期），番茄在 EC 值为 2.5 dS/m 的情况下就开始减产。柑橘根据砧木的不同可以耐受的 EC 值为 1.7 dS/m。植物类型、土壤和气候条件都对植物的耐盐性有所影响。盐水里的钙通常以 CaCl_2 的形式存在。在盐水灌溉中也有硫酸钙（ CaSO_4 ）存在，但是其在水溶液中的溶解度很低（~0.1%）（ $0.24 \text{ g}/100 \text{ mL} = 0.24\% \text{ w/v}$ ， 20° ， $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ），限制了其在抵消盐化作用中的作用。灌溉施肥中，灌溉水中硝态氮的浓度为 5~10 mmol/L（70~140 g N/m³，而 Ca 的浓度为 5~10 mmol/L（200~400 g Ca/m³），可以减少灌溉水中盐分对作物的危害（Yermiyaho *et al.*, 1997; Bar, 1990）。

9.1.1.2 特定离子的毒害 钠 (Na)

土壤碱性是用钠吸附率 (SAR) 来表示的 (Richards, 1954)。SAR 值升高, 土壤结构就会被破坏。但是, 绝大多数植物并不吸收大量的钠。土壤溶液中 Na^+ 浓度高, 会阻碍植物根系生长 (Kafkafi, 1991)。 Na^+ 和 Ca^{2+} 在植物根系伸长区细胞壁特定的吸附点上存在竞争性吸收 (Yermiyaho *et al.*, 1997)。提高 Ca^{2+} 浓度可以减缓 Na 对植物根系伸长的阻碍作用。Yermiyaho 等 (1997) 证实, 土壤溶液中存在 0~40 mmol/L NaCl 的情况下, Ca^{2+} 的竞争性吸收可以使植物根系正常生长, 虽然这个时候植物根系周围的土壤溶液中 Na^+ 浓度还很高。在更高的 Na^+ 浓度条件下, 植物根系生长下降了, 因为这时已经超过了植物根系的渗透条件 (图 9.1)。

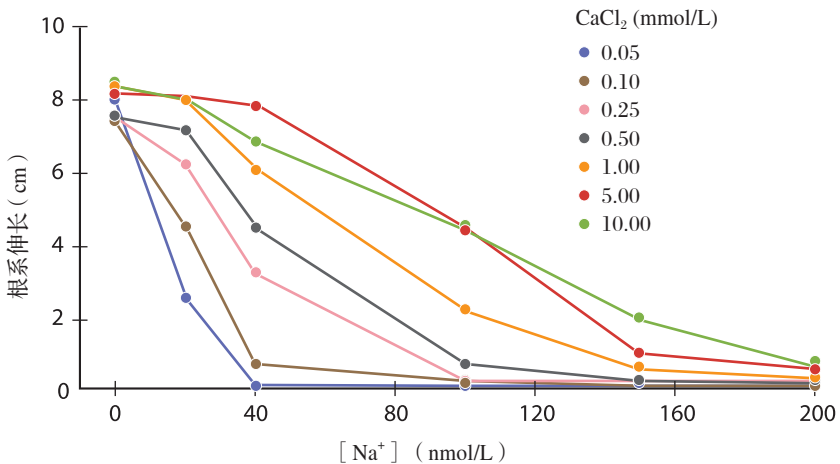


图 9.1 提高溶液中 Ca^{2+} 浓度减缓 Na^+ 对抑制根系伸长的影响 (引自 Yermiyaho 等, 1997)

氯 (Cl)

在盐溶液中, 除了 Na^+ 的盐害以外, 还含有大量的氯离子 (Cl^-), 所有植物都大量吸收氯离子。部分肥料中的特定成分可以减缓盐水的毒害作用。例如, 当持续不断地在盐水灌溉时施入硝酸钾 (KNO_3) 或硝酸钙 [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$], 可以减少植物对 Cl^- 的吸收 (Xu *et al.*, 2000)。随着植物生长进程, 植物叶片中的 Cl^- 浓度升高, 在极端情况下, 叶片内部 Cl^- 浓度会升高到灼伤叶片直至叶片完全死亡。Bar (1990) 的研究表明, 升高营养液中氮的浓度, Cl^- 的吸收量会降低, 在这种情况下, 甚至像鳄梨这样对 Cl^- 非常敏感的植物, 都能在 Cl^- 浓度高

达 568g/m^3 (16mmol/L) 时存活。在溶液中硝态氮浓度为 2mmol/L NO_3^- (28g/m^3) 的情况下, 下部叶片显示有 Cl^- 累积并出现灼伤症状(参见第8章图8.2)。将硝态氮浓度提高到 16mMNO_3^- (224g/m^3) 时, 阻止了叶片中 Cl^- 的累积。

9.1.2 中水(TWW)灌溉

9.1.2.1 中水在农业上的应用

世界上部分地区使用处理过的污水(中水)作为农业灌溉水源, 在美国的亚利桑那州(Arizona)、加利福尼亚州(California)、新墨西哥州(New-Mexico)、宾夕法尼亚州(Pennsylvania)和墨西哥、澳大利亚、加拿大和德国等不同气候区都有中水灌溉的例子(Feigin *et al.*, 1991)。美国环境保护署的出版物(EPA, 1992)列举了阿根廷、巴西、智利、塞浦路斯、印度、以色列、日本、科威特、墨西哥、中国、秘鲁、南非、沙特阿拉伯、新加坡、也门、突尼斯和阿联酋等国家应用中水灌溉农田的例子。中水用于灌溉农田的主要驱动力来自于以下两点:

表 9.1 以色列 1995—2020 年水资源供给和需求预测
(以色列水资源管理委员会预测, 2002, 单位: 百万米³/年)

供 给					
年 份	人口 (百万)	水资源			
		自然补给	中 水	盐水淡化	总 计
1995	5.6	1 710	245	5	1 960
2000	6.0	1 720	360	20	2 100
2010	7.0	1 725	520	75	2 320
2020	8.0	1 740	780	160	2 680
需 求					
1995	730	980	250	1 230	1 960
2000	850	900	350	1 250	2 100
2010	1 060	760	500	1 260	2 320
2020	1 330	600	750	1 350	2 680

- 在干旱和半干旱地区, 中水是非常重要的水源, 中水提高了1个国家或者区域的水资源量。

- 中水用于灌溉提供了一种非常重要的保护人类健康和防止环境污染的方法。

对清洁的人类饮用水源的需求是驱动人们利用循环水或中水进行农田灌溉的动力。在以色列, 允许利用中水滴灌和表土下滴灌 (SDI) 棉花等非食用作物, 发展目标是使用中水进行滴灌的面积占总灌溉面积的 70%。1995—2020 年以色列用水及预测见表 9.1。

尽管世界各地都广泛地应用中水进行农业灌溉, 但这里必须强调一点, 即利用中水灌溉必须是在土壤盐分含量没有高到不可逆的水平以前, 以免导致过度的盐分累积。盐水处理的终极原则是脱盐并将卤水返回到大海中 (Kafkafi, 2010)。

9.1.2.2 中水的植物营养价值

污水经处理后的中水含有许多植物需要但在淡水中没有的营养成分, 如 N、P、K 和微量元素。由于 N 和 P 的主要来源是有机的, 所以, 中水中 N 和 P 的含量与污水处理的水平有关, 而 K 含量在所有的处理水平下都不发生变化, 其高低受污水水源的影响。N 在污水中主要是有机的 (蛋白质、氨基化合物、氨基酸和尿素)。所以, 中水中的 N 形态主要是有机的和铵态氮。污水处理厂采取不同的处理方式, 可能会改变中水中 N 的形态, 而在密集曝气条件下, 也会产生硝态氮。污水和废水中的 P 也是来源于有机物质, 其浓度随着处理水平的提高而降低。通常, 中水中 50%~90% 的 P 都是水溶的。钾在污水和废水中是以离子形态存在的, 其浓度在所有的处理水平下都不发生变化。表 9.2 列出了在污水和废水及其不同处理水平下 N 形态和 P、K 的浓度。据估计, 生活污水中 N、P、K 的含量分别为 50、10 和 30 g/m³ (Magen, 2002)。

表 9.2 中水的营养成分浓度 (mg/L) (Magen, 2002)

水源	生活污水	SAT* 处理之前二级处理	SAT 处理之后二级处理	三级处理	过滤出水	二级处理
总氮(N)	85					
NH ₄ -N		7	< 0.02	0.55		30~60
NO ₃ -N		0.28	9.34	7.74	0.08~20.6	
磷(P)	20	2.2	< 0.05	1.6	3.8~14.6	6~15
钾(K)		18	24	15.5	13.~31.2	30~120
文献	FAO, 2002	Icekson-Tal et al., 2003	Icekson-Tal et al., 2003	Gori et al., 2004	Asano, 1989	National Wastewater Survey, 2004

* SAT: 污水土壤渗滤处理。

处理过的污水中的营养元素价值高低决定于以下几个因素：

- 有效性：植物能否利用这种营养元素。钾素是完全有效的，速效氮素是矿质形态（铵态氮和硝态氮），水溶性磷是正磷酸盐。有机态的 N 和 P 是有效态的，但植物吸收需要的时间较长。
- 总量：中水中的营养元素能否满足植物的需要，不会带来负面的“大量元素 - 微量元素”交互作用。中水中的营养元素的量可以用它的浓度和灌溉水量的乘积来计算。中水中带去太多的 P 可以引起土壤 P 素的累积，也会抑制植物对 Fe 和 Zn 的吸收。
- 时机：中水中的营养元素能否满足特定植物生长发育阶段的需要。污水中的营养元素的浓度是很难控制的，在有些情况下，植物不需要这些营养元素或者其含量太高，这些都会给作物带来一些问题，比如推迟落叶果树和柑橘类果树的果实成熟期，因为太多 N 素而影响着色，N 素还会延迟收获前棉花的叶片脱落，以及因为过量的 K 素而影响果实的酸度。当然，如果中水中养分浓度低于作物的需要时，必须通过施肥加以弥补。

有一个以色列的例子见表 9.3，它列出了灌溉种植玫瑰的中水和淡水的养分含量（Berenstein *et al.* 2006）。中水中的铵态氮、K 和 P 分别比淡水高 100 倍、8 倍和 7 倍。不过，它们依然在植物生长发育需求的浓度范围内。

9.1.2.3 中水中养分含量的变化

中水的组成成分受季节、来源和最终使用前的污水处理程序的影响而不同。城市居民每天都在产生污水，但农业灌溉都集中在作物生长季节，当然也受灌溉季节前冬季降水在土壤中累积状况的影响。这样，必须修建大型的开放式的设施储藏城市冬季产生的污水。

通常来说，经过二级处理后，水中的铵态氮浓度为 $10\sim 50\text{ gN/m}^3$ 。由于铵态氮对植物是有效态的，加上比一般 N 肥还额外多 $3\ 000\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 的灌溉水，所以，水中的铵态氮可以为植物提供 $30\sim 50\text{ kgN/hm}^2$ 。根据土壤本底氮素含量的不同，施用氮肥或者中水中的氮素就可以完全满足棉花对氮素的需求。要对每个点的中水的养分含量进行测定，以便决定施用多少额外的化肥。在污水处理厂，对 P 素采取强化的生物去除技术，可以极大地减少处理系统的水华。有一部分 P 通过物理沉淀的方法去除。在一个含有较高溶解 Ca（约 1.5 mol/m^3 ）和 P（约 1 mol/m^3 ）的灭活污泥试验中，在 pH 值低于 8.0 时，可以观察到有对 pH 敏感而且部分可逆的磷酸钙沉淀产生。下列反应：(i) 完全可逆的沉淀物 HDP [Ca_2HPO_4]

(OH)₂] 是中介产物；(ii) 在中水中 P 浓度是一个重要问题，必须考虑从 HDP 中产生 HAP [Ca₃(PO₄)₂OH] 的情况 (Maurer *et al.*, 1999)。

表 9.3 灌溉玫瑰的淡水和中水中营养元素的浓度 (meq/L)
(Berenstein *et al.*, 2006)

阳离子	淡水	中水	阴离子	淡水	中水
N-NH ₄	0.03	3	N-NO ₃	0.05	0.01
K	0.22	1.75	HCO ₃	2.9	10
Ca	1.5	1.75	P	0.03	0.21
Mg	1.5	1.7	Cl	8.5	11.8
Na	5.6	12.9			
阳离子合计	8.85	21.1	阴离子合计	11.48	22.02

微量元素 (mg/L)		
Fe	0.001	0.079
Mn	0.0001	0.02
Zn	0.04	0.05
Cu	0.0001	0.003
B	0.18	0.49
Cd	0.0001	0.0009
Ni	0.0001	0.016
EC (ds/m)	1.1	2.5
pH	7.4	7.7

在 Vangush 和 Keren (1995) 的一个研究中，连续 10 年向地下储水层注入中水，没有观察到地下水的组成成分发生改变。但是，监测到水中 Na⁺、Cl⁻、HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺ 和 SO₄²⁻ 含量持续增加，K 含量基本没有变化，没有 P 的数据。利用中水作为灌溉水源，必须坚持持续监测，在施用额外肥料前必须掌握中水中所含植物营养成分。

9.1.2.4 循环水或中水中的盐分因子

来源于家庭生活用水处理后的中水中 Na、Cl 和 B 含量是利用循环水或中水进行农业利用时要考虑的因素。例如，有报告称，中水灌溉的椰枣 Cl 含量较高 (El Mardi *et al.*, 1998)。持续地利用中水灌溉而不进行监测，容易造成土壤

中 Na 的累积和破坏土壤结构。用再造水或中水灌溉柑橘，叶片中 Na、Cl 和 B 的含量比用井水灌溉的柑橘叶片高很多（Zekri *et al.*, 1994）。但是，在美国佛罗里达州中部，处理很好并得到很好管理的的中水是非常安全的灌溉水源的补充。在得到很好处理的中水中，绝大多数养分都去除了，利用这样的中水灌溉时必须额外施肥。

西班牙研究了利用中水作为柑橘的替代灌溉水源对不同土壤和作物的影响（Reboll *et al.*, 2000）。在 3 个连续的季节里对幼年柑橘利用中水灌溉，检测其生长发育状况、叶片矿物质含量和果实品质，发现利用地下水和中水灌溉的不同。在中水灌溉处理中，Na、Cl、B 和有机质含量普遍高于地下水灌溉处理。但是，柑橘叶片中的 Na、Cl、B 含量还是低于发生毒害的程度。2 种处理的叶片中的 N 素含量没有显著不同，都处于植物营养最优状态。植物的生长发育和果品品质都没有受到中水中较高 Na、Cl、B 的影响。经过 3 年的研究，没有发现利用中水灌溉对幼年柑橘的不良影响。可能因为地下储水层受到污染，地下水的 N 素含量增高了。在所有的研究期间，经分析，土壤植物营养状况都处于柑橘最优的状态。在产量和叶片营养水平没有受到影响的情况下，施肥量明显下降了。Reboll 等（2000）得出结论，中水看起来可以作为柑橘灌溉的替代水源。

但是，在澳大利亚利用中水灌溉葡萄对葡萄酒品质的影响试验表明，葡萄酒的化学组成发生了变化。利用中水灌溉的葡萄酿制的澳大利亚红酒中 Na 和 Cl 的含量比正常灌溉的含量高。与每周灌溉 45L 中水或者 135L 淡水相比，利用每周灌溉 135L 中水灌溉的葡萄酿制的红酒中的 N、P、K 和 Mg 含量，没有高出有关报道所称的澳大利亚 Shiraz 葡萄酒中这些元素含量的范围（McCarthy and Downton, 1981）。

关于中水灌溉葡萄的研究发表了大量的论文（Prior *et al.*, 1992a, and 1992b; Walker *et al.*, 1996）。Mass（1993）报道了中水灌溉柑橘树对不同砧木的敏感性，Catlin 等（1993）报道了关于对核果类植物使用中水灌溉的研究结果。在澳大利亚，也有梨树（Myers *et al.*, 1995）和桃树（Boland *et al.*, 1993）对灌溉中水的敏感性的报道。因为 Na 和 Cl 在土壤黏粒上的累积，长期来看，所有自然的盐分都有潜在的威胁。长期使用城市和工业废水灌溉植物都很危险，因为 B 和重金属的累积可以达到有毒的程度。将来城市污水利用将有赖于阻止 B 的污染和减少工业或生活污水中化学物质的累积，用去离子水稀释，以便能够用于农业灌溉系统。

有关污水处理的研究表明，人们花了很多努力使中水适宜于农业灌溉，也对其用于农业生产的影响进行了长期的监测。连续使用中水灌溉的主要危险之一，在于 B 可能累积到对植物产生毒害的水平。污水中的 B 来源于家庭洗涤剂和洗衣粉。在干旱气候条件下的灌溉区，应该禁止销售含 B 的化工产品，因为还没有一种低成本的从水中去除 B 的方法。灌溉水中的 Na 浓度高的话，从长远来看，会引起对土壤结构的破坏。土壤施钙可以消除 Na 的危害，但对长期灌溉来说不可行。在中水中的有机化合物可以在土壤表面聚集，这样，水分干了后，土壤表面就会产生疏水性，从而导致不均匀的土壤湿润特征 (Tarchitzky *et al.*, 2007)。在以上例子中，对中水灌溉的长期监测绝对重要。负面效应的累积和逐渐增加非常缓慢，可以持续数年，所以，非常必要对其进行长期的观测和分析测试。

9.2 水质与灌溉系统

滴头堵塞会对施肥量和灌溉水的均一程度带来负面影响，这也是滴灌系统的最大问题之一。灌溉水中的物理、化学和生物物质是引起滴头堵塞的主要因素。

9.2.1 含亚铁离子的灌溉水

含可溶性铁离子的灌溉水中出现非晶形、凝胶状、棕红色、污泥样的沉淀时，表示有含铁的沉淀物。这种含铁污泥可以彻底地堵塞滴头。当地下水防水层是由砂质土壤构成时，或者 pH 值低于 7.0 而且是溶解氧较低的井水但含有较多有机淤泥时（在美国佛罗里达州比较普遍），容易出现这种问题。这些水中含有溶于水的亚铁离子 (Fe^{2+})，同时这些亚铁离子也是污泥的主要构成部分。当水中含有像 *Gallionella* sp., *Leptolhris*, *Sphaerotihus*, *Pseudomonas* 和 *Enterobacter* 这些铁细菌时，这些细菌和亚铁离子发生氧化作用生成不溶于水的三价铁离子 (Fe^{3+})。这些不溶于水的三价铁离子被网状的细菌菌落所包围，这样就形成了含铁的凝胶状污泥，堵塞滴头。

当灌溉水中的亚铁离子含量达到 $0.15\sim 0.22\text{g/m}^3$ 时就会对滴灌系统带来危害 (Ford, 1982)。亚铁离子含量在 $0.2\sim 1.5\text{g/m}^3$ 时，滴头会发生中等程度的堵塞，而亚铁离子含量超过 1.5g/m^3 时，则会对滴头系统造成严重的损害 (Nakayama and Bucks, 1991)。在实际操作中，除非在用于滴灌之前进行了专门的物理性处理，水中亚铁离子含量超过 0.5g/m^3 时，就不能用于滴灌。

在美国佛罗里达州的试验表明，如果水中亚铁含量低于 3.5 g/m^3 ，而且 pH 值低于 6.5，通过加氯消毒，就能很好地控制含铁堵塞物的形成（Nakayama and Bucks, 1991）。也有报道说，长期使用含铁量高的水对灌溉系统也可能带来损害。一般认为，含铁量高于 4.0 g/m^3 的水，就不适合于作为滴灌系统的水源了，因为这种情况下需要 1 个泵将沉降池中的水抽回灌溉系统。为了解决铁对滴头的堵塞问题，考虑到在滴灌管内部会发生生物反应，下面的一系列措施通过在美国佛罗里达州的实践证明是有效的：i) 利用装有过滤碟片的水力旋流器向管道中注入氯气，以形成微小流量的均一的混合氯气；ii) 利用沙质过滤器去除氧化铁沉淀物；iii) 使用备用过滤器确保最后过滤后的灌溉水没有含铁沉淀物。这样一个处理系统可以每天成功运转并确保灌溉施肥的安全用水。

9.2.2 钙镁离子含量高的灌溉水

灌溉水中含有较高的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- （硬度高），会使滴头堵塞的风险上升，特别是在滴灌系统中使用磷肥的情况下这种情况会更严重（参见 9.2.3）。 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 含量高的碱性水中出现碳酸钙沉淀是十分常见的。这种水用于灌溉的后果就是灌溉系统产生水垢，从而使滴头堵塞和灌溉系统不能正常使用（Feigin *et al.*, 1991）。这种反应受温度和 pH 很大影响。pH 值大于 7.5 和重碳酸盐含量大于 5 mmol/L 时，灌溉水更容易发生结垢问题。通过灌溉施肥系统施用的肥料的 pH 越高，结垢情况越严重。

9.2.3 灌溉水中磷与钙和铁的相互作用

通过灌溉施肥系统施用磷肥对灌溉水质和灌溉水的 pH 非常敏感。灌溉水中的 Ca^{2+} 浓度也需要重点考虑，必须保持灌溉水的 pH 在较低状态（酸性），以防止形成 Ca-P 沉淀。用浅层地下水作灌溉水源时（如在美国迈阿密地区），灌溉水中含有可溶性的二价铁离子（ Fe^{2+} ）（Bar, 1995）。Ca 和 Fe 这 2 种元素，当灌溉水中加入 P 时，在 pH 值高于 4 或 5.5 时，Ca 和 Fe 离子均很快生成沉淀物质。所以，在灌溉水中含有水溶性铁离子时，不要在滴灌系统中添加磷素。地下滴灌系统中的沉淀物质的问题更麻烦，因为直到堵塞的滴头附近的植物出现明显症状时才能知道滴头已经堵塞了。

磷肥还有可能带来腐蚀作用，比如 P 和灌溉系统中的金属发生化学反应就有可能产生沉淀物质。早期有磷肥和肥料罐反应产生巧克力色的铁磷膏状物堵塞所有过滤器和滴灌系统的报道（Malchi, 1986a and b）。

当铁磷沉淀产生后，唯一的解决之道就是用硝酸去溶解这些沉淀物质，以保障灌溉系统的通畅。因为施用磷肥有可能造成堵塞的情形，所以，灌溉施肥系统施磷肥时要十分小心地监测，防止灌溉水中产生使滴头和过滤器堵塞的物质。聚磷酸肥料在一定浓度时也会和Ca和Mg反应，形成堵塞滴头的胶状悬浮物。聚磷酸是正磷素的聚合物。聚磷酸肥料通常都是不同链长度的化合物的混合物（Hagin *et al.*, 2002）。聚磷酸的铵盐也可以用于肥料配方。聚磷酸肥料在一定的浓度下会产生胶状沉淀物。但是，聚磷酸盐在特定浓度时可能会屏蔽 Ca^{2+} ，从而阻止胶状悬浮物的形成（Noy and Yoles, 1979; Hagin *et al.*, 2002）。防止和不同浓度 Ca^{2+} 反应在灌溉水中产生胶状沉淀物质的最低聚磷酸铵（APP）的浓度见表 9.4。

表 9.4 避免形成胶状物和堵塞滴头的灌溉水中聚磷酸铵的最低浓度
（Noy and Yoles, 1979）

灌溉水中 Ca^{2+} 含量 (meq/L)	灌溉水中聚磷酸铵的最低浓度 (%)
< 2	< 1.0
2~5	1.0
5~8	2.5
8~11	4.0

10 大田作物的灌溉施肥

10.1 玉米

André 等（1978）报道了玉米在不同生长阶段（营养生长期、抽丝期、散粉期和孕穗期）每天的生长量和营养物质的消费量。从种子发芽到散粉期，蒸腾作用与光合作用保持一定的比率。在散粉期，作物的蒸腾作用超过光合作用。吐丝期后，玉米棒和籽粒形成过程中对水分的需求持续减少。在玉米生长发育的第 62d（吸氮量最大），单株玉米吸收氮、钾分别为 140 mg N 和 254 mg K。此后一直到玉米收获期，玉米吸收氮、钾的量约为最大吸收氮、钾量的 20%。即使在每天都更新的营养液中种植植物，植物每天吸收的养分量也是不断波动的。植物对氮的需求是由植物内部的多种生长发育器官在特定时间的新陈代谢所决定的。

玉米的生育期对制订灌溉施肥计划非常重要，它决定给作物根系提供多少水分和养分以满足生长发育的需要。如果在温室里盆栽，限制了玉米根冠生长量，每天必须保证一定频率的水分和养分的供应。玉米种植在大田时，最重要的是要根据玉米根系分布情况决定灌溉时间和养分供应量。图 10.1 中，给种植在沙地上的玉米每天进行灌溉施肥，玉米吸收全部施用的氮素，没有多余的氮素被相邻的玉米吸收，这样就可以看到全量施氮和完全不施氮处理的强烈的对比效果（Abura, 2001）。每日总需水量和需肥量都按照 André 等（1978）的研究结果，根据玉米预期的养分需要量来确定。



图 10.1 微滴灌玉米。精确按照玉米每日对养分的需求量施用 NPK 肥料。全素施肥和缺素处理玉米长势形成强烈对比（Abura, 2001）

玉米吐丝期，即在播种后的 68d 或者大概在玉米的整个生育期的 1/2 时，用克 / 株来表示，吸收占到收获时养分吸收总量的 75% 的钾、66% 的氮和 43% 的磷。绝大多数的磷都在吐丝期后的 1 个月被吸收和转运到玉米籽粒中。因为大多数磷素都在土壤表层，所以为了保证植物对磷的吸收，很重要是在玉米吐丝后长达 40 d 里保持土壤水分（通过灌溉或降雨）。在玉米吐丝后的 5~6 周内任何一个时期土壤缺水都会降低玉米对磷的吸收，从而影响玉米籽粒的形成。

表 10.1 美国中西部玉米产量为 10t/hm² 的地上部养分平均含量 (kg) (Voss, 1993)

营养元素	籽粒	干秸秆	总计	籽粒中养分占地上部分所含养分总量的比例 (%)
10t/hm ² 地上部产量中所含养分量 (kg)				
氮 (N)	49.5	28.1	77.6	63.8
磷 (P)	10.3	4.3	14.6	71
钾 (K)	16.8	43	59	28
钙 (Ca)	0.3	15.6	15.9	1.9
镁 (Mg)	3.5	12.3	15.7	22
硫 (S)	3.1	3.4	6.5	47.7
铁 (Fe)	0.05	0.9	0.91	5.5
锌 (Zn)	0.08	0.08	0.16	50
锰 (Mn)	0.02	0.12	0.14	14.3
铜 (Cu)	0.01	0.04	0.05	20
硼 (B)	0.02	0.06	0.08	25
钼 (Mo)	0.002	0.001	0.004	50
氯 (Cl)	1.8	32.7	34.5	5

非常清楚的是，玉米籽粒从土壤中带走大量的 N 和 P，带走的 K 相对少些(表 10.1)。另外，青贮玉米带走相对多得多的 K 素。

灌溉施肥的作用是要通过灌溉水将足够的肥料养分输送到作物根表面，以保证植物生长发育阶段不产生缺素问题。在适当的时间，为作物提供每日需要的适量的养分和水分，这对防止过量使用肥料造成硝态氮下渗到地下水中也非常重要。精确的灌溉施肥可以防止地下水污染，也可以降低农民投入。

灌溉时间影响水和养分在土壤中的分布。Ben-Gal 和 Dudley (2003) 的研

究结果显示，在对磷吸附性能比较低的沙土上进行滴灌施肥，土壤中含磷量最大的地方是滴头下 10cm 处。用同样量的水，但持续滴灌，在 25cm 以下的土层还能发现 P。灌溉频率也影响土壤水分含量和土壤 pH。可以预期，在黏重的土壤上灌溉，滴灌点源的养分分布状况会和砂质土壤上的不一样（Bar-Yosef, 1999）。从磷吸收或者干物质生产的观点看，P 在土壤中的精确分布不像从 Ben-Gal 和 Dudley（2003）的试验数据推定出来得那么重要。因为玉米吸收的绝大多数 P 都是在玉米籽粒形成和成熟期吸收的，所以玉米生长后期伴随低 N、低 K 施用的 P 可以保障玉米高产，但施肥方法是每天施用很少的水分和很少的 P 素。这种灌溉施肥方式可以避免地下水污染和肥料浪费。表 10.2 是在 10d 的间隔里施用肥料的计划表的例子，可以作为实际的田间灌溉施肥模式。

表 10.2 制订灌溉施肥计划表施肥间隔为 10 d 一次的养分量的计算
(Andre et al., 1978)

天数	植物日 吸 N 量 (mg)	10 万株玉米 每天每 hm ² 需 N 量 (kg)	植物日 吸 P 量 (mg)	10 万株玉米 每天每 hm ² 需 P 量 (kg)	植物日 吸 K 量 (mg)	10 万株玉米 每天每 hm ² 需 K 量 (kg)
0~10	1.4	0.14	3.1	0.31	0	0
10~20	1.4	0.14	3.1	0.31	11.7	1.17
20~30	12.6	1.26	7.75	0.78	31.2	3.12
30~40	77	7.7	12.4	1.24	156	15.6
40~50	119	11.9	21.7	2.17	<u>253.5</u>	<u>25.35</u>
50~60	<u>140</u>	<u>14</u>	24.8	2.48	<u>253.5</u>	<u>25.35</u>
60~70	63	6.3	34.1	3.41	128.7	12.87
70~80	28	2.8	<u>38.75</u>	3.88	78.0	7.80
80~90	35	3.5	20.15	2.02	62.4	6.24
90~100	35	3.5	13.95	1.40	35.1	3.51
100~110	28	2.8	18.62	1.86	19.5	1.95
110~120	7	0.7	0	0	0	0

总计约：336kg N/hm²、200kg P/hm²、1 000kg K/hm²。
下划线的数字表示植物对特定营养元素需求量最大的植物生长期。

Coelho 和 Or（1996）报道了在土表滴灌和地下滴灌的情况下玉米吸收水分的研究结果，发现在 2 种灌溉方式下，玉米根系分布都与水分在土壤中的分布一致。

10.2 棉花

10.2.1 棉花生长发育与灌溉

人们很早就发现了灌溉对棉花种植大有益处。棉花在世界很多地区都有种植，在高温高降水量的地区都有种植。棉花是夏季作物。棉花的生长期可分为3个阶段：(i) 播种至初花，大概在播种后 60 d；(ii) 主发育阶段，播种后 60~110d；(iii) 成熟期，播种后 110~160 d，包括棉桃成熟和吐絮。

直到 1970 年，棉花种植都不使用滴灌系统。种植棉花时采用的灌溉方法包括沟灌（种植棉花时最普遍的灌溉形式）、喷灌、畦灌和水平畦灌或者漫灌（Berger, 1969）。表面灌溉在世界各地都有广泛的应用，它需要具有较高的持水量的深厚土层。采用沟灌有可能在土脊间产生盐分累积。

棉花滴灌主要采用地下滴灌，这种方式在美国，特别是在夏季为干季的加利福尼亚州呈增加的趋势（Robertson *et al.*, 2007）。使用滴灌的好处是使棉花可以在不存在阴雨天气导致烂桃的干热气候地区种植，也使棉花可以在土层较浅的地区种植。这些都有利于棉花生产的发展。

在以色列，特别是在棉花和青贮玉米等那些非食用作物上，滴灌用水主要是使用循环处理过的中水。另外，棉花可以忍受盐水和半咸水。从公共健康的观点看，滴灌系统使用作物需要量的中水是一种安全的方法。Robertson 等（2007）在美国阿肯色州的一个试验表明，低压表面滴灌系统在一个单位作物生长期可以节水 39%。因为全世界水资源短缺问题都越来越严重，所以低压（重力）表面滴灌是一种非常有用的技术。但是还没有将这种方法用于地下滴灌的研究。

10.2.2 棉花营养

棉花吸收或移出的养分总量列于表 10.3 和表 10.4。

Mendes (1960) 广泛研究了在养分或水分充足的条件下，棉花吸收养分（N、P、K、Ca、Mg 和 S）的量，下面分别进行阐述。

氮（N）

化学分析方法获得棉花吸收氮素的 4 个线性区间：

- 10~20 d：第 20 d，在棉花顶部氮含量为全生育期总吸氮量的 4.6%。
- 20~60 d（第 1 片叶到现蕾）：每天吸氮量上升为全生育期总吸氮量的

1.159%。

- 60~100 d (开花期)：每天吸氮量下降为全生育期总吸氮量的 0.743%。
- 100~150 d：在成熟期的最后阶段，持续 50 d 左右（差不多为全生育期的 1/3），这一时期吸收的氮素只占全生育期吸 N 量的 20%。

表 10.3 棉花吸收 / 移出的大量和中量元素养分的量 (IFA, 1992)

国别	文献	皮棉产量 (kg/hm ²)	(kg/hm ²)					
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S
巴西	Malavolta, 1987	2 500 *	156	36	151	40	168	64
中国 **	An Yang, 1985	1 421	183	64	156	—	—	—
	An Yang, 1985	1 115	153	53	112	93	204	—
	An Yang, 1985	941	128	45	90	—	—	—
美国	Mullins & Burmester, 1988	每 100kg 皮棉	19.9	5.2	18.4			

* 籽棉。
** 养分吸收 = 所有地上部分和根系吸收的养分。

表 10.4 棉花吸收 / 移出的微量元素养分的量 (IFA, 1992)

国别	文献	皮棉产量 (kg/hm ²)	(g/hm ²)				
			Fe	Mn	Zn	Cu	B
巴西	Malavolta, 1987	2 500 *	2 960	250	116	120	320
中国	An Yang, 1985	1 115	5 000	254	397	71	205

* 籽棉。

N 素吸收及其在植物体内的分布

有报道称，棉花总吸氮量为 240 kgN/hm² (Halevy, 1976)。通过棉花种子移出农田的氮素只占植株全部含氮量的 40%，这个数值比玉米移出的氮素占全部干物质的 68% 要低很多。所以，棉花比起玉米来说是更不耗氮的作物。播种后的 2 个月内，棉花只吸收大约 15 kgN/hm²。在这段时间，棉花的深根发育丰富 (Adams *et al.*, 1942)。在接下来的 55d 内，棉花吸氮量达 215 kgN/hm²。棉花的这种生长特征使其根系很早发育，棉花也就可以在营养生长阶段和开花期都可以从更大的土壤范围吸收氮素营养。在深度发育的黏质冲积土壤上，早期供氮水平和水分供应状况影响生殖生长和结实阶段的平衡。营养生长早期过量施氮

有利于棉花叶片和枝条的生长,还导致较低的侧枝上的花蕾落铃(Yogev,1986)。这样的结果是只有发育较晚的棉桃能够留下来。但是,收获较晚结的棉桃有可能会遇上早冬的雨水,从而给皮棉带来损失。研究发现,棉花主茎每天长高1cm,是棉花取得高产的最佳的主茎生长速度(Yogev,1986)。滴灌施肥使棉农持续监测并通过调节灌溉速率、灌溉频率和灌溉水中的氮素浓度,控制棉花的高度,从而控制棉花的营养生长速率。只有在严格控制灌溉施肥中的N、P和K素浓度的情况下,棉花初花时期的灌溉才能定时进行。因为滴灌棉花时只湿润大约1/2的土壤,这样就需要额外的养分补偿正常情况下由另外1/2的土壤带来的有效养分。

磷(P)

研究发现,棉花吸收磷素最快的时期处于棉花发芽后的30~50d,这段时间棉花每天吸收的磷素为生育末期植株含磷量的0.993%。第2个吸磷高峰处于棉花生长发育的50~120d,这期间棉花每天吸磷量为整个吸磷量的0.746%。这是根系从含有无限量的有效磷的营养液中吸收磷素的最大潜力。植物吸磷的特征说明,为了保持田间条件下长时间的稳定的吸磷速率,必须保证湿润土壤中有足够的水分和足够高的磷含量,使磷素能从湿润土壤中扩散到棉花根部。在收获前的1个月内,棉花只吸收15%的磷素。

磷素吸收和磷素在棉花体内的分布

和玉米籽粒含磷量占植物体含磷总量的80%相比,棉花籽粒含磷量只占44%。非常清楚的是,整个棉桃生长发育期间,棉花吸收磷素全部来自土壤而不是植物体内部的磷素转运。玉米、棉花和马铃薯都是这种吸磷模式。后期供应棉桃生长发育需要的磷素来自土壤,这对于干旱地区的棉农来说是一个巨大的挑战。由于至少在机械收获前6周就停止灌溉了,这样,通常富含磷素的上层土壤是干的,所以在干旱地区,磷素就可能成为棉铃发育后期的限制因素。棉花生长的最后1个月通过滴灌补充磷素就有很多优势。棉花通过地下滴灌施磷,磷素就不会成为其后期生长发育的限制因素。通过地下滴灌管周围分布的葡萄的根系明显看出,使用地下灌溉,在地下埋管周围形成了1个水饱和区(图10.2)(Ben-Gal *et al.*, 2004)。如果是土壤吸附了多加入的磷素,说明使用灌溉施肥无效,或者说播种前土壤施磷就是有效的方法。

钾 (K)

在种子发芽后的 25~47d 的叶片形成期，棉花吸收钾素是最快的。在此期间，棉花吸钾量占收获时植株含钾量的 36.5%。在发芽后的 50~111d 这个更长的期间里，棉花以较低的吸收速率继续吸收钾素，从土壤中吸钾的总量占收获时植株含钾量的 44%。在植物生长发育的最后 1 个月里，棉花以低得多的吸收速率，吸收只占收获时植株含钾量的 10% 的钾素。



图 10.2 表土下滴灌 7 年后的葡萄园暴露在垂直于种植行的土壤剖面中的葡萄根系分布情况 (Ben-Gal et al., 2001)

施钾需要考虑的因素

植物生长发育阶段钾聚集在生殖器官。棉花植株中差不多 40% 的钾素集中在棉桃、空棉铃壳和棉籽中 (Halevy,1976; Mullins and Burmester,1990)。除非棉秆被移出农田，否则只有 25% 的钾素在收获棉籽和皮棉时被带走，其余的都在整地时返回农田了。以平均产量来说，棉花比玉米收获时带走更多的钾素。

从连续种棉花 20 年的棉田观察发现，在收获前的 6~8 周停止灌溉，30cm 表层土壤就会缺水。这样，钾就成了限制因素，在棉桃和叶片上会出现缺乏症状。后期灌溉时施钾可以防止棉花缺钾。收获前 6 周就结束灌溉且使用机械收获的棉田就会发生这种情况。连续多年种棉花后，深层土壤会出现缺钾的情况。过去，人们采用深耕的方法培肥深层土壤。采用传统的适度的土壤施肥和喷灌时，在表层土壤测试显示含钾丰富时，植物也可能会出现缺钾症状。大范围应用滴灌时，有限的根区更需要通过滴灌连续地施用钾素养分来满足作物对钾素营养的需要。

钙 (Ca)

和钾类似,棉花吸收钙素主要是在早期棉架形成到现铃的 25~50 d,这期间,棉花每天吸收钙素占全生育期吸钙总量的 1.53%。在花期结束时,棉花每天吸收钙素比率降低一半,为 0.89%。在棉铃形成的最后 2 个月内,仅吸收占棉花吸收钙总量的 16% 的钙素。

镁 (Mg)

在棉花生长发育的最初 50d 里,棉花每天吸收镁素的速率一直为吸收钙素总量的 0.89%,非常稳定。从 50d 到棉铃成熟,棉花每天吸收镁素的量也相当稳定,为 0.66%。在棉花生长发育的头 4 个月里,棉花吸收镁素的量占总吸镁量的比例和吸收磷素的比例差不多。

硫 (S)

棉花吸收硫素的量有 3 个非常明显的线性变化时期:生长发育 20~50 d,每天吸硫量占全部吸硫量的 1.36%,处于吸钾量和吸钙量之间;50~90 d (开花末期),每天吸收硫的比例为 0.73%;此后直到棉花收获期,每天吸收硫的比例稳定在 0.38%。

美国的棉花常常都是大面积种植,播种和摘花都是机械操作,农田的机械来往比较多,地下滴灌就是一个优选的方案。在世界其他地区,在棉花播种 1 个月后,每年在地面铺设滴灌管线,棉花的前期幼苗生长都是依靠前年冬天储藏在土壤中的水分。

Haley(1976)提出了棉花生育期干物质积累和棉花吸收养分量的累积表(表 10.5),他同时描述了棉花不同器官中养分吸收绝对量和养分分布情况。

表 10.5 长达 156d 的棉花生育期养分吸收和干物重累积 (Haley, 1976)

生长季长 (%)	干物重 (%)	N (%)	P (%)	K (%)
36	4	7	8	9
46	15	28	18	29
53	36	44	37	56
62	60	72	62	83
71	89	97	92	95
100	100	100	100	100

影响棉花产量的主要因素是因为种植密度过大导致的对光的遮蔽

(Eaton,1955)。Yogev (1986) 研究了使用灌溉施肥技术种植棉花时光线阻断的情况。试验的棉花是种植在火山渣凝灰岩(来自火山喷发)上的,这样就阻止了棉花根系深扎。他研究了在保证充分养分和水分供应的情况下,行距为0.5m、1m和2m的情况。研究结果见表10.6。当棉株更多部分暴露在太阳照射下(2m行距)时,尽管干物质总量下降了,但单株产量增加了10倍,单位面积产量增加2.5倍。如果对根系生长没有限制的棉花施用同样量的养分和水分的话,营养生长超过棉花纤维发育。这项研究的实用性的结论是,在夏季是旱季的地区,棉花的营养生长有可能受到限制。滴灌施肥可以为受到限制的营养生长和植物提供所需的养分和水分。沙漠地区种植行距为2m的棉花,滴灌可以为其提供最少灌水量的棉花种植模式。这种综合性的灌溉施肥的试验研究将来还需要不断地做下去。

一年两季种植模式下棉花的滴灌施肥

通过滴灌施肥,施肥和灌水次数频繁但每次的量都很小,从而使棉花根系限定在有限的土壤容积中,棉花在这种情况下,植株矮小,但开花更早(Carmi *et al.*, 1992)。根系很浅,将根系限制在一定范围,主要表现就是细根(每天少于1mm)所占比例非常高,占到根系干物质总重量的90%。根系集中在滴头下有限的土壤中且根区土壤中只有有限的水分,使棉花对很小的灌溉都反应快速且敏感。当然,如果不能在灌溉的同时每天为作物提供完全的营养液的话,这样的灌溉系统就失败了,因为土壤养分库离作物根系非常远,不能满足作物的需要。虽然单株的棉花产量降低了,但生殖生长和营养生长的比例却升高了。滴灌棉花的根系分布范围小,棉花种植密度就要比常规种植的大些,皮棉总产也比常规种植的棉花要高。这样的一个非常敏感的田间生长系统,就有可能种植一年两季。例如,11月份播种青贮小麦,第二年3月中旬收获,在收获小麦后的干旱土壤上(北半球),通过滴灌控制灌溉播种棉花。在需要青贮小麦的农场里,在相对比较小的农田里,安装使用这样的滴灌系统就有可能实现一年两季。作为青贮饲料的小麦,带走大约 $500\text{kg}/\text{hm}^2$ 的钾素(Kafkafi and Halevy, 1974),收获青贮小麦后马上播种棉花可能导致缺钾。为了防止钾素和其他矿质营养缺乏,必须给根系受到限制的棉花通过滴灌提供完全的N、P、K养分。在酸性土壤上,如果灌溉水中不含Ca、Mg和S的话,在灌溉施肥时对这些营养元素也必须加以考虑。

表 10.6 起垄栽培的棉花 3 种不同行距对棉花产量因素的影响 (Yogev, 1986)

植株产量因素	行距 (m)		
	0.5	1	2
株高 (cm)	173 c*	145 b	120 a
首次采摘 (g/m)	91.4 a	435.6 b	828.4 c
第二次采摘 (g/m)	90.6 a	94.3 a	231.1 b
每行棉花总产 (g/m)	182 a	529 b	1059 c
棉花总产 (棉籽 + 皮棉) (g/m ²)	364 a	529 b	530 b
早采棉比例 (%)	50 a	82 b	78 b
干物重 (g/m ²)	1494 c	1116 b	889 a
(棉籽 + 皮棉 / 棉籽)	0.32 a	0.9 b	1.47 c

* 同一列数字后英文字母相同表示没有达到 0.05 水平下显著性差异。

11 果树的灌溉施肥

11.1 香蕉

有很多关于在印度和巴西的酸性土壤中使用灌溉施肥技术种植香蕉的研究报道。香蕉是高耗氮高耗钾的作物。Reddy 等（2002）和 Badgular（2004）研究了印度通过灌溉施肥施用氮素和钾素种植香蕉的效益，施氮和施钾水平均为 $200\text{g}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$

B.H. Jain 先生因为其“印度 Jalgaon 地区小规模农户种植香蕉微灌案例研究”获得了 1997 年 Crawford Reid 纪念奖。这一奖项是为了奖励那些为提高适用的灌溉技术和规范做出巨大成就，促进将灌溉作为基础产业做出巨大进步的人。

在巴西，随着施氮量的增加，土壤 pH 值下降（Teixeira *et al.*, 2002）。报道称巴西热带地区土壤 pH 值下降的情况，都是因为施用铵态氮或者更多时候是尿素作为主要的 N 素来源。因为作物消耗大量的钾素，土壤交换性钾含量降低非常显著。通过微灌施用 N 素（施 N 量分别为 0、200、400 和 $800\text{ kg}/\text{hm}^2$ ）和 K 素（施 K_2O 量分别为 0、300、600 和 $900\text{ kg}/\text{hm}^2$ ），灌溉显著提高了香蕉产量和 N、K 肥料的效应。尽管交换性钾含量处于较高水平，但在不灌溉的情况下施用钾肥对提高香蕉产量有正效应。澳大利亚也有报道（Moody and Aitken, 1997）称，尽管每年都表施 $2.4\text{ t}/\text{hm}^2$ 的石灰，在种植香蕉的深层土壤还是会发生严重酸化。在所有检测的作物系统中，香蕉是最主要的导致土壤酸化的作物。施用铵态氮肥，结果导致严重的土壤酸化现象和因为过量施用氮素导致的硝态氮向地下淋失（图 11.1）。能够提高作物根部附近的土壤 pH 值的实用措施就是施用硝态氮肥（详见第四章的相关内容）。

在西班牙加那利群岛（Canary Islands），香蕉的灌溉施肥使用的是过量灌溉的微喷灌（Muñoz-Carpena 等，2002）。土壤和水的平衡显示，绝大多数的干旱（18% 的总灌水量 + 降水量）都发生在没有灌溉情况下的作物需水高峰期和雨季较短的时节。土壤溶液监测表明，整个试验阶段硝态氮的浓度都非常高（ $50 \sim 120\text{ mg}/\text{L N-NO}_3$ ）。土壤剖面的下层土壤中水分含量和硝态氮浓度都很高，导致每年有 48% ~ 52% 的施氮量（每年 $202 \sim 218\text{ kg}/\text{hm}^2$ ）都损失掉了。所以，少量多次地灌水和施用氮肥是值得推荐的减少灌溉系统对环境影响的方法。

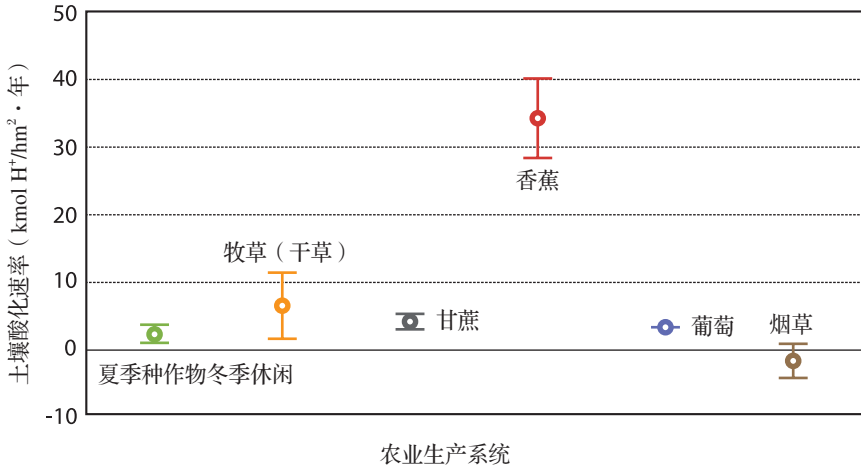


图 11.1 澳大利亚昆士兰东部几种农业生产系统土壤酸化速率平均值和变化幅度(竖线)
(Moody and Aitken, 1997)

西班牙加那利群岛种植香蕉每年有 2 个月份吸收氮素的量最多(图 11.2): 1 月和 8 月。了解香蕉吸氮特征对农民尽量减少 N 素损失和满足作物对养分的需求都非常重要。每个月香蕉对 N 素需求量最大和最小之间相差大约 20kgN。图 11.2 展示的是一个试验点的情况。香蕉蕉叶展开的速度大概是 6 天 1 片叶。每片蕉叶含 N 约 100g。了解了蕉叶生长速度,有助于蕉农估计每周需要施用多少氮素。

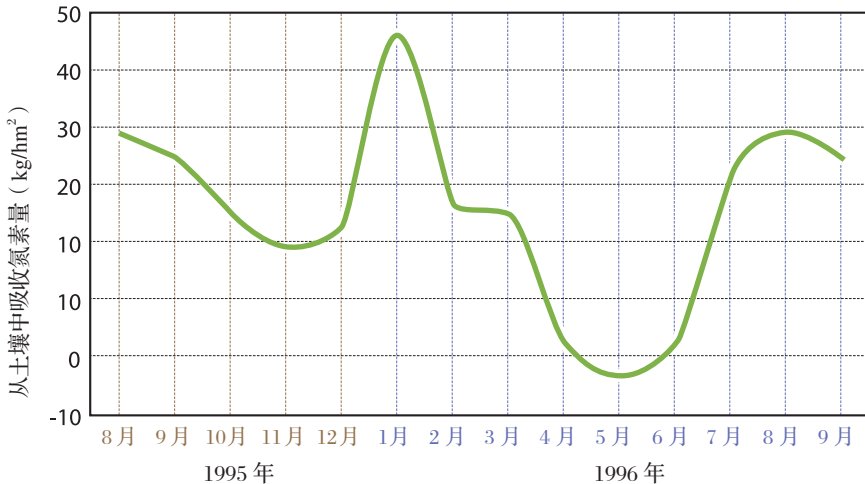


图 11.2 西班牙加那利群岛的香蕉每月从土壤中吸收的氮素营养情况
(Muñoz-Carpena et al., 2002)

香蕉实施灌溉施肥要遵循下面的原则：

- 根据作物需求施用 N 素和 K 素肥料。养分需求根据 1 年内植物生长发育阶段和温度的不同而不同。
- 在酸性土壤上施用硝态氮肥有助于防止土壤的进一步酸化，从而减少可能由土壤酸化导致的铝毒。
- 监测植物叶片生长速度，有助于据此确定施氮量。

11.2 葡萄

滴灌最早就是在多年生的葡萄园和成熟果园上应用的（Elfvig,1982），没有造成任何减产。20 世纪 70 年代早期的田间试验为滴灌在葡萄（Goldberg *et al.*, 1971）、柑橘（Bester *et al.*, 1974）、苹果（Groot Obbink and Alexander, 1977）、梨（Black and Mitchell, 1974）和棕榈（Aljibury *et al.*, 1974）等果园上应用铺平了道路。现在世界上很多的新建果园都实施了滴灌和灌溉施肥（图 11.3）。



图 11.3 滴灌葡萄（悬挂式滴灌带）（© SQM）

N 素肥料是葡萄园施用最广泛的肥料（Christensen *et al.*, 1978）。葡萄推荐的施 N 时间有的在萌芽之前（Cahoon *et al.*, 1991），也有有的在萌芽和开花之间（Bates, 2001）。在一个很长的、温暖的生长季节里，葡萄收获后施用 N 素

肥料非常有效 (Conradie, 1986)。

在葡萄较长生长季的后期施用 N 素, 其利用率非常高。南非的白诗南 (Chenin blanc) 酒葡萄在采收后吸收的 N 素占全生长季吸收 N 素总量的 34% (Conradie, 1980, 1991)。

在美国加利福尼亚州, 葡萄在 7 月 (生长季中期) 和 9 月 (采收后) 吸收施用的 N 素, 要多于在 3 月份萌芽期吸收的 N 素 (Peacock *et al.*, 1989)。有专家认为 (Bates *et al.*, 2002), 在葡萄生长季节较短的地区, 葡萄采收后树冠活跃的时间较短, 导致在葡萄生长季末和采收后施入的 N 素肥料有效性较低。

澳大利亚新种植的葡萄绝大多数都使用了滴灌系统。但只有 N 素肥料 (尿素、硝酸钙, 在缺钾的地区使用硝酸钾) 是通过灌溉来施用的。因为在自然状态下澳大利亚土壤严重缺磷, 所以在葡萄园建立前就在土壤中施入大量的磷肥, 而微量元素肥料通常都是通过叶面喷施的 (Robinson, 2000)。

世界上其他地区有很多新建的葡萄园都使用了灌溉施肥系统。最早在以色列的所有使用滴灌系统的葡萄园进行的灌溉施肥试验中, 都包括磷素 (Bravdo *et al.*, 1984, 1985; Hepner and Bravdo, 1985)。Bravdo 和 Hepner (1987) 总结了以色列葡萄园灌溉施肥试验的情况, 而 Bravdo 和 Proebsting (1993) 总结了全世界葡萄园灌溉施肥的情况。葡萄园的滴灌带不是像图 11.3 中显示的那样挂在树冠下的支架上, 就是像图 11.4 中那样放在沿葡萄植株行的土上。Atalay (1978) 详细研究了常常用来评价葡萄钾素利用状况的叶片分析方法。



图 11.4 滴灌葡萄 (滴灌带放置在种植葡萄的土壤上) (© Yara International ASA)

Christenssen (1984) 比较了 26 种葡萄干、鲜食葡萄和酒葡萄品种 3 年中的 5 个生长发育阶段葡萄叶柄和叶片养分状况，发表了 26 个葡萄品种生长发育阶段的详细的植株分析报告。这些品种按植株总氮、铵态氮、硝态氮、磷、钾、锌和硼的含量多少进行排列。他的详细的分析报告指出，必须对每个单一的品种分别进行研究；对叶片和叶柄的分析有助于监测葡萄植株的硝态氮和钾素水平，但是具体的数值必须根据每个不同的品种分别进行校正。这样的研究工作完成后，就可以用叶片分析结果指导葡萄施肥了。

12 蔬菜作物的灌溉施肥

12.1 马铃薯

马铃薯为块茎繁殖，在作物生长初期极易受到根区水分和氮浓度的影响。马铃薯在各生长发育阶段对水分和养分的需求如下：

- 马铃薯生长发育阶段（见表 12.1）：
 - 地上部营养生长期——以开花作为该生育期结束的形态标志（初始阶段）。
 - 新块茎生长期（块茎形成至生长发育中期）。
 - 叶片衰老和块茎成熟（块茎膨大至成熟期）。
- 生长发育阶段持续时间：根据生育期的长短将不同种类的马铃薯进行分类（Bald, 1946; Jackson and Haddock, 1959）。
 - 早熟品种（90~120 d）。
 - 中熟品种（120~150 d）。
 - 晚熟品种（150~180 d）。

在许多商业种植马铃薯的地区，发芽后的较早一段时期内，2 行的土被堆砌成疏松的垄，垄下用于生长匍匐茎和块茎。这一栽培措施意味着，在马铃薯种植中铺设滴灌设备，只能在土壤“起垄”后进行。生长中的马铃薯块茎必须处于潮湿的土壤环境中，以保证土壤中的钙离子能源源不断地到达块茎表皮（Marschner, 1995）。因此，滴灌是大规模马铃薯生产中最普遍又最实用的灌溉方式。

12.1.1 水分需求

水分不足会降低马铃薯产量和质量。块茎的一些质量指标也会受到水分胁迫的影响（缺水），如块茎大小、重量、心坏死、损伤、空心等。块茎大小对灌溉不足极为敏感。灌溉的时间取决于土壤水分消耗量、土壤水张力系数和作物蒸发—蒸腾作用，这常常被用来制订某一特定区域的灌溉计划（Susnoschi and Shimshi, 1985; Onder *et al.*, 2005）。马铃薯对水分的需求随着马铃薯生长发育阶段和外界气候的变化而变化（Shalhevet *et al.*, 1983）（表 12.1）。在块茎开始形成前遭受水分胁迫时间越长，单茎结薯数越少（MacKerron and Jefferies, 1996）。

表 12.1 马铃薯在不同生长发育阶段和不同气候条件下对水分的需求
(Shalhevet *et al.*, 1983)

生长阶段	结薯初期	生长期	中期 ¹	膨大期	成熟期
持续时间 (d)	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 60	20 ~ 35	—
作物水分系数 ²	0.4 ~ 0.5	0.7 ~ 0.8	1.05 ~ 1.2	0.85 ~ 0.95	0.7 ~ 0.75

注：1 在花期，水分的需求较自由水面蒸发量大。
2 从 A 型蒸发皿中蒸发的水分 (%)。

12.1.2 养分需求

马铃薯对营养元素的需求随着时间和生长阶段的变化而变化。

氮 (N)

马铃薯对氮素的需求需要精心管理。生长初期，施用高氮会延迟块茎的形成，转而促进地上部营养器官生长（见表12.2）。决定生长期是否施用氮肥的最佳方法是测试植株组织。叶柄测试是管理马铃薯氮素需求的有效途径，尤其是通过灌溉施肥进行精准补充施肥的情况下更是如此。直到块茎形成初期，马铃薯叶柄中硝态氮浓度维持在25 000mg/kg，而在块茎膨大期则应在13 000 ~ 15 000mg/kg（Zhang *et al.*, 1996）。

表 12.2 马铃薯块茎与N素供应之间的关系（Krauss and Marschner, 1982）

NO ₃ (mmol / L)	氮素吸收 [mmol / (L · d)]	块茎增长速度 (cm / d)
0	0	3.89
1.5	1.18	3.24
3.5	2.10	4.06
7	6.04	0.44

磷 (P)

在马铃薯生长的初期，土壤中高浓度的磷会刺激块茎数量的增多（Jenkins and Ali, 2000）。在整个块茎生长阶段（第35 d至第95 d），植株都会吸收利用磷素，每株马铃薯日恒定摄取磷量为51mg（图12.1）（Carpenter, 1957）。在传统马铃薯种植体系中，磷和钾常常被用作基肥，使用的磷肥大多为不同类型的有机肥（van Delden, 2001）。农户选择有机磷肥是因为该措施能降低缺少养分的风险，但有机肥所提供的氮量难以控制，会导致作物营养生长过盛和块茎形成延迟。

研究滴灌施肥中的磷，Papadopoulus (1992) 发现在马铃薯整个生长季节中，使用 40mg/L 恒定磷浓度溶液进行滴灌施肥，能维持叶柄内的磷浓度水平，确保高产优质。收获块茎从土壤中带走 22kg/hm² 的磷。

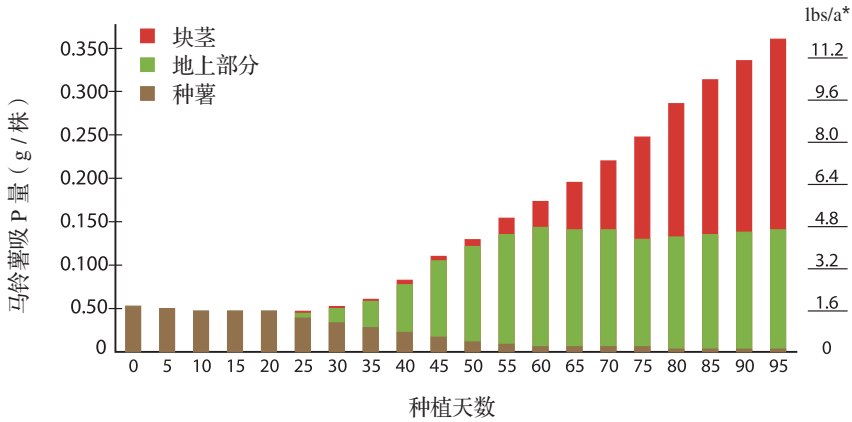


图 12.1 马铃薯不同生长阶段植株地上部分、块茎和种薯中磷的含量 (Carpenter, 1957)

钾 (K)

直到马铃薯第二生长阶段末期，钾素以每天多达 128mg K 的速度在植株上部叶片和藤蔓中积累。在第三生长阶段，块茎以每株作物日摄取钾量约 60mg 的速度从土壤和藤蔓中吸收钾素，以满足其生长（图 12.2）（Carpenter, 1957）。所以在马铃薯整个生长发育阶段中，块茎不断地从营养器官和土壤中直接吸收钾素并累积。

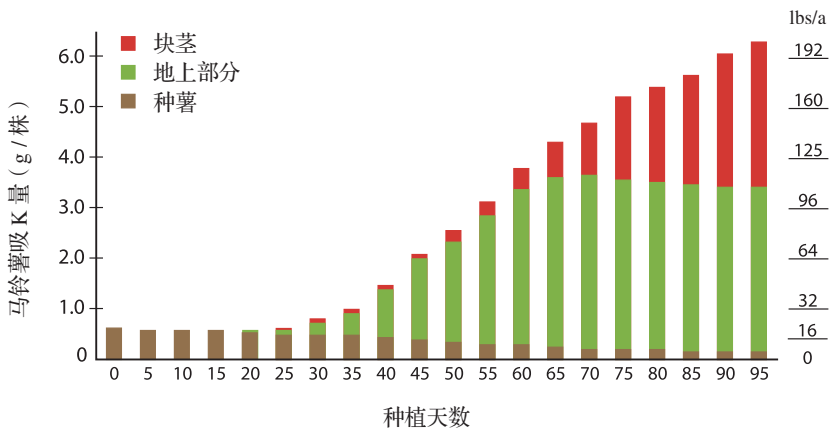


图 12.2 马铃薯不同生长阶段植株地上部分、块茎和种薯中钾的含量 (Carpenter, 1957)

* 1lbs/a=1.12kg/hm²。

钙 (Ca)

马铃薯块茎表皮上的钙是直接从土壤溶液中获取的 (Marschner, 1995), 这就意味着生长发育中的块茎需要始终处于潮湿的土壤环境中。灌溉间歇会使得土壤变干燥, 令新表皮组织发育缺钙, 导致块茎表皮破裂, 产量下降。在块茎整个发育过程中, 灌溉施肥能使块茎周围的土壤保持潮湿。所以, 灌溉施肥管道应位于垄上, 高于块茎。若地下灌溉管道铺设在块茎下部, 则可能会导致块茎表皮破裂, 形成劣质的成熟块茎。在实际生产中, 常采用喷灌、圆形喷灌和微喷来控制水与氮肥的施用。

砂质土和砂壤土是最受青睐的种植马铃薯的土壤类型, 在这种土壤上种植马铃薯, 不仅在生长季节能更好地控制灌溉与氮肥施用, 而且在块茎生长末期也易于收获。而种植在黏土中的马铃薯不仅难于管理和收获, 还可能因泥土黏附在块茎上, 导致品质下降。

密度是马铃薯重要的商品参数。研究发现, 在灌溉施肥中使用硫酸铵, 当施氮量为 35, 70 和 105mg/L 时, 未施氮肥的马铃薯密度最大。试验还表明, 随着施氮量的增加马铃薯总产量增加, 究其原因是, 施氮虽然降低了马铃薯的密度, 但增大了块茎的大小 (Mohammad *et al.*, 1999)。

12.1.3 不同国家马铃薯生产中的滴灌系统

印度

Gupta 和 Saxena (1976) 发现, 在马铃薯 45 d 老植株叶柄中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度临界值为 9 100~9 600mg/kg, 而在相应的中脉内 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度为 3 000~3 900mg/kg。对于 $\text{PO}_4\text{-P}$ 而言, 45 d 老植株叶柄内临界浓度为 2 250mg/kg。在生育期中测试植株叶柄中的养分含量, 是检测养分状态最精准的方法; 无论马铃薯何时需氮均可通过滴灌做出快速反应。在这方面, 滴灌是唯一能在马铃薯需要时控制日供给养分量的灌溉方式。

以色列

Shalhevet 等 (1983)、Shimshi 和 Susnochi (1985)、Susnochi 和 Shimshi (1985) 最早在以色列黄土上开展滴灌研究, 评价同时改变土壤湿度和氮素水平对马铃薯生长发育及体内干物质的累积分配的影响。2007 年最广为接受的种植马铃薯的灌溉方式是微喷灌溉施肥 (U. Kafkafi, 私人通信)。

西班牙

Fabeiro 等在 2001 年采用 10 种滴灌措施, 研究不同时期不足量灌溉对马铃薯产量和水分利用率的影响。研究发现, 在块茎膨大中期和晚期, 缺水造成减产。马铃薯生长初期灌溉不足的情况下, 可以在较高的水分利用率的同时获得高产。

叙利亚

Mussaddak (2007) 报道了叙利亚马铃薯生产中的滴灌施肥。和沟灌相比, 采用滴灌施肥的春季马铃薯的商品薯产量更高。采用滴灌施肥处理, 当氮肥施用量为 70, 140, 210 和 280 kgN/hm² 时, 春季马铃薯块茎产量分别增加了 4%、2%、31% 和 13%。而采用沟灌施肥处理, 秋季马铃薯产量相应分别增加了 13%、27%、20% 和 35%。该研究还揭示了马铃薯生长过程中的气候条件与高量氮肥处理下的块茎产量之间微妙的关系。在块茎膨大期和收获期, 采用滴灌施肥提高了农田水分利用率。同时也发现, 与沟灌施肥相比, 滴灌施肥提高了马铃薯块茎密度。同时, 在 2 种灌溉施肥措施下, 高量氮肥处理均会降低马铃薯块茎密度, 这与 Mohammad 等 (1999) 所得结论一致。

美国

直到近些年美国才开始将滴灌施肥用于马铃薯种植, 因此滴灌施肥在美国商业马铃薯生产中所占比例较小。在西北太平洋沿岸地区的马铃薯生产试验中, 滴灌措施与喷灌相比马铃薯产量并没有增加, 甚至未能持平。失败的原因是因为采用了 Russet Burbank 马铃薯品种, 以及要准确安放滴灌管非常困难。滴灌管过分深置时, 以下原因会导致马铃薯产量和品质降低: 马铃薯浅层根系缺水, 马铃薯块茎不够湿润影响养分吸收以及在干旱丘陵地区块茎温度过高。滴灌管浅置的话, 虽然在黏土地区可以达到节水的效果, 但由于在机械化采摘时黏土会黏附在块茎上, 因此很难保证质量。Sammis (1980) 在新墨西哥州比较了喷灌、地表滴灌、地下滴灌和沟灌在马铃薯生产中的应用效果。在所有的灌溉系统中, 采用土壤张力为 20 kPa 灌溉标准的地下滴灌系统的生产能力最高。在北达科他州, Shae 等 (1999) 研究了马铃薯生产中的 4 种滴灌措施, 发现采用土壤水分张力 30 kPa 为灌溉标准的自动灌溉系统水分利用率较高。

Smajstrla 等 (2000) 在佛罗里达州对自动地表滴灌系统和传统半封闭地下滴灌系统进行了比较研究。由于地表径流与养分对邻近水道的污染, 所以陈旧的灌溉系统需要更换。尽管 Smajstrla 等 (2000) 选用的自动地下滴灌系统较为耗电, 但同等产量下该系统节省了至少 36% 的水。Steyn 等 (2000) 研究了如

何选择滴灌马铃薯的灌溉制度。Waddell (Waddell *et al.*, 2000) 比较了不同灌溉标准的喷灌、地表滴灌和结合一系列施肥处理的地下滴灌对明尼苏达州马铃薯产量和薯块大小的影响。相比之下, 地表滴灌和地下滴灌处理其总产量和商品产量较高。

与普通喷灌相比, 滴灌或微喷灌减少了硝酸盐的淋洗 (Waddell *et al.*, 1999)。Simonne (Simonne *et al.*, 2002) 认为, 在美国东南部采用滴灌进行马铃薯生产是一项经济且切实可行的措施。Zartman 等 (1992) 在得克萨斯州的卢伯克研究了埋管深度、滴头间距对 Norgold Russet 马铃薯产量和块茎分级的影响。埋管深度或者滴头间距对马铃薯产量没有影响, 但与滴管浅置相比, 滴管埋深为 0.2m 时畸形薯所占比例更多。灌溉埋深 0.2m 的土温高于埋深 0.1m 或 0.025m 的土温。DeTar 等 (1996) 发现最佳的灌溉埋藏深度为 0.08m (滴管埋深处于种薯上部) 和 0.46m (滴管埋深处于种薯下部)。DeTar 等 (1996)、Zartman 等 (1992)、Susnoschi 和 Shimshi (1985) 早期在以色列的试验, 都证明不同土壤类型、马铃薯种类和气候条件对水分和施肥的需求各不相同。

土耳其

在 Capadocia 地区, 采用滴灌和灌溉施肥的马铃薯种植面积从 2003 年的 500hm², 增加到 2006 年的 4 000hm², 可见滴灌和灌溉施肥已经成为该地区马铃薯种植的主要灌溉方式。Capadocia 地区应用滴灌和灌溉施肥的经验可以外推到所处气候条件几乎一致的安纳托利亚—博卢中部地区和爱琴海地区 (Central Anatolia—Bolu region and the Aegean Sea region) 的轻质土壤上 (FAO, 1990)。

12.1.4 马铃薯灌溉施肥前景展望

灌溉条件下种植马铃薯进行田间管理的复杂性, 以及马铃薯用途的广泛性, 如日常餐食消费、工业需求和食品连锁零售等, 都减缓了滴灌在马铃薯种植中的应用。

在马铃薯块茎发育过程中保持块茎周围土壤水分湿度均一性, 同时, 针对不同的土壤类型、整地方法和气候条件采用不同的灌溉技术, 这些都是马铃薯种植时应着重考虑的因素。在轻砂质土壤采用微喷和灌溉施肥技术, 可以经常性地, 1 天 1 次或 1 天数次, 少量多次地为作物提供必需的水分和养分。在重黏土壤, 喷灌既可在整地时提供基肥, 也可在马铃薯开花之前根据灌溉制度数次喷施氮肥。磷和钾肥常常在整地时基施, 部分为有机肥部分为化肥。

栽种马铃薯土地条件的复杂性和全球马铃薯市场的多样性, 均表明需要定

点的、精准的施肥和灌溉技术来达到马铃薯最佳经济产量。滴灌条件下，不同马铃薯品种其表现各不相同（Shock *et al.*, 2003）。在马铃薯上推广应用滴灌和灌溉施肥技术注定是一项艰辛而长期的事情；只有当大面积种植，市场销路良好以及水源缺乏成为限制性因素时，滴灌和灌溉施肥才会变得经济有效。但在砂质土壤上采取微喷施肥是一项行之有效的措施。通过圆形喷灌系统喷施 3~4 次氮肥是一种常见的做法。

12.2 番茄

12.2.1 温室种植番茄

温室栽种的番茄常常整枝打叉保留 1 个主茎。生长模式为：从底部往上数的 9 叶和第 1 花序共同构成第 1 层，以后每隔 3 片叶和 1 个花序，分别为第 2 层、第 3 层……从理论上讲，只要保持了顶端优势番茄便可无限生长（图 12.3）。温室栽种的番茄在整个生长过程中保持这一生长模式。播种后的前 3 个月番茄植株吸收大量元素营养的量缓慢上升。在番茄植株生长至 9 片叶并着生第 1 花序后，植物吸收氮、磷、钾和钙的量几乎就恒定不变了。

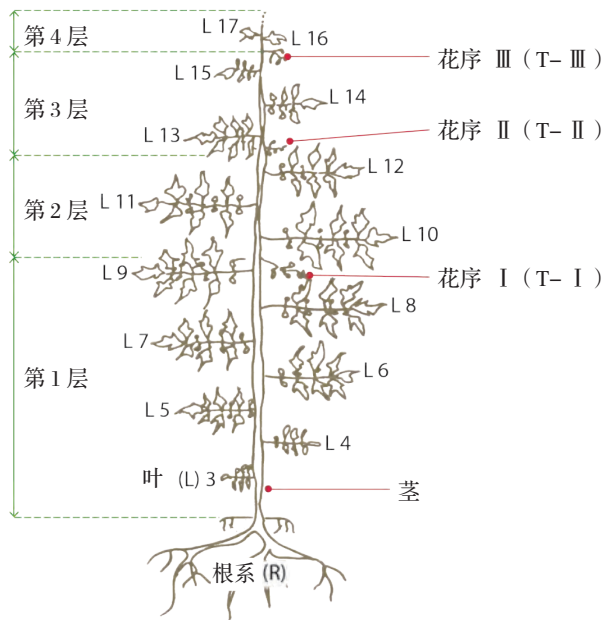


图 12.3 番茄植株示意图 (引自 Tanaka *et al.*, 1974)

去掉番茄植株的顶端优势（图 12.4，虚线）会阻止植株伸长和养分吸收。在吸收速率线性缓慢增长期，每日氮素吸收量最高达到 $4\text{kg N}/\text{hm}^2$ 。

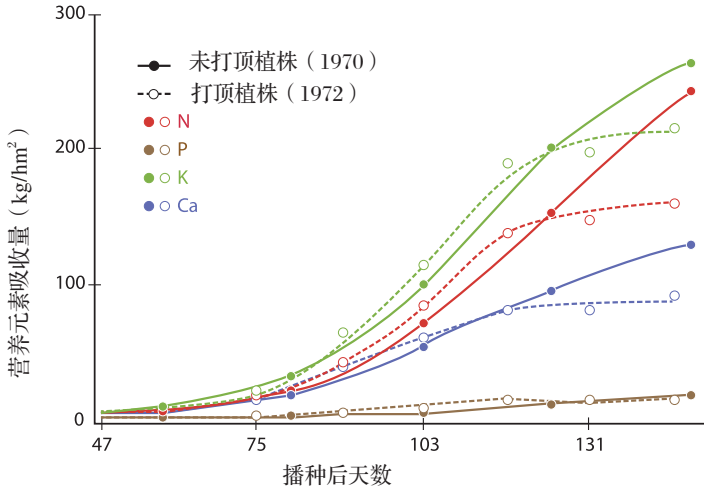


图 12.4 去顶端优势和未去顶端优势的番茄对氮、磷、钾和钙的吸收量 (引自 Tanaka *et al.*, 1974)

番茄茎叶和果实的养分分布模式表明了植物对植物体内的矿质元素分布的内部控制（图 12.5）（Tanaka *et al.*, 1974）。番茄植株吸收的 62% 的氮被贮存在果实中，近 70% 的磷贮存在种子中。钾均匀地分布在植株茎叶和果实中，不足 5% 的钙进入了果实部分（图 12.5）。

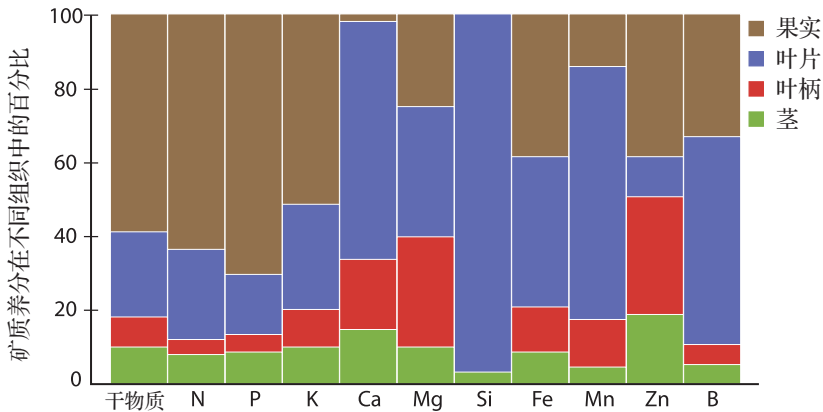


图 12.5 番茄植株各器官中矿质元素的分布 (引自 Tanaka *et al.*, 1974)

温室砂培番茄每日氮磷钾供应量见表 12.3 (Bar-Yosef *et al.*, 1992)。

表 12.3 温室番茄灌溉施肥的日养分供应量^{*}

定植后天数	N (kg/hm ² ·d)	P (kg/hm ² ·d)	K (kg/hm ² ·d)
1 ~ 10	1	0.1	2
11 ~ 20	1	0.1	4
21 ~ 30	1	0.1	3.5
31 ~ 40	2	0.2	3.5
41 ~ 50	2.5	0.4	5.5
51 ~ 60	2.5	0.6	5.5
61 ~ 70	2.5	0.3	6
71 ~ 80	2.5	0.3	4
81 ~ 90	1.5	0.3	6
91 ~ 100	1.5	0.1	0.1
101 ~ 110	1	0.1	0.1
111 ~ 120	1	0.1	1
121 ~ 130	1.5	0.2	1
131 ~ 150	1.5	0.35	1.3
151 ~ 180	4	0.5	3.8
181 ~ 220	2	0.3	3
共计 (kg/hm ²)	450	65	710

^{*} 番茄品种cv F-144, Daniela, 于9月25日定植, 每公顷23 000株, 产量195 t/hm² (Bar-Yosef *et al.*, 1992)。

温室番茄可生长在由有机物(如草炭和堆肥)和矿物质(如珍珠岩、小石子、玻璃岩、凝灰岩或沙子)混合而成的基质中,亦可水培或营养液栽培(NFT)。上述栽培方式使得番茄植株根系环境的温度和温室内部的温度一致。但气候转冷,在晚上需要通过持续加热来维持温室的温度。当气候转暖,温室温度可能会过高,与叶子可以通过蒸腾来冷却叶片相比,番茄的根系无法躲避温室热度从而暴露在较高的温度环境中。正是因为这个原因,选择何种形式的氮肥就变得十分重要。

硝酸根离子被运送至叶片成为硝酸盐,在那里硝酸盐被同化成氨。氨与

叶片光合作用产生的糖迅速结合产生氨基酸。氨对于细胞而言是有毒物质，其在形成氨基酸过程中得以消除，这是维持番茄生长的一种机制（Marschner, 1995）。在根系中铵态氮利用根细胞中的糖，经过新陈代谢形成氨基酸。根系中的糖含量多少取决于其从叶片中转运到根的程度。当根系温度升高，根系呼吸作用加剧的同时大量消耗糖，但与氨的新陈代谢无关。这两个新陈代谢过程——根系的呼吸作用和氨的新陈代谢，都激烈竞争根系中的糖。当呼吸作用完全消耗掉根系中的糖，铵的新陈代谢过程中产生的氨不仅对细胞产生毒害，损害根系生长，还会导致根细胞死亡（Ganmore–Newmann and Kafkafi, 1985）（图 12.6）。Britto 和 Kronzucker（2002）对植株体内的铵盐或硝酸盐的新陈代谢进行了研究。他们的研究覆盖了对铵营养反应敏感和对铵营养耐受性强的不同科属的作物的整个代谢周期。作物对铵盐或硝酸盐的敏感程度，可成为某一特定作物种类或气候条件下挑选最佳氮肥形态的标准。



图 12.6 日光温室番茄（番茄品种 cv. Money Maker）
右边——仅施硝酸盐；左边——增加循环养分溶液中的铵浓度（Kafkafi, 1964）

12.2.2 盐分

Ho *et al.*（1987）研究了番茄果实干物质、果实水分运输和盐分之间的关系，表明在高盐条件下进入果实的总水量大幅降低，最终导致果实鲜重下降。由于番茄果实尺寸很大程度上取决于有效水量，农户可根据具体市场需求来控制进入果实的水分量。在同等栽培条件下，总可溶性固形物含量高的小个番茄，其

含糖量高于同一地点同样品种但灌水多的大个番茄。鲜食番茄和加工番茄对灌溉和盐分水平的反应一致。Flores *et al.* (2003) 的研究认为, 番茄总可溶性固形物含量随着盐分的增加而增加, 也随着肥料溶液中铵态氮和硝态氮比例的增加而增加。表 12.4 的数据引自 Ben-Oliel (2004) 的研究。

表 12.4 氮源和盐分对品种为 cv. 'R144' 类型番茄产量和果实品质参数的影响

*NH ₄ ⁺ (mmol/L)	MY ¹ (g/株)	BER ² (g/株)	TY ³ (g/株)	BY ⁴	MFW ⁵ (g)	TSS ⁶ (%)	FSEC ⁷ (dS/m)	TA ⁸ (%)	pH	LAI ⁹ (m ² /株)
NaCl—0mmol/L										
0	5 480b	158d	6 084b	322b	141a	5.3b	5.3c	0.51b	4.07a	1.8ab
1	5 980a	236c	6 814a	368a	143a	5.4b	5.3c	0.48b	4.04a	2.1a
2	5 160b	247c	5 906b	325b	140a	5.5b	5.5c	0.53b	4.00a	1.8ab
4	4 430c	356c	4 927b	256c	126b	5.2b	5.1c	0.46b	4.04a	1.6b
NaCl—45 mmol/L										
0	2 700e	763c	3 663e	267c	82d	7.3a	6.9ab	0.67a	4.02a	1.25d
1	3 820d	821bc	4 840d	334b	103c	6.9a	7.2a	0.64a	4.00a	1.7b
2	2 810e	954ab	3 914e	282c	89d	7.2a	7.2a	0.64a	3.96a	1.5c
4	1 670f	1 183a	2 919f	201d	87d	6.9a	6.4b	0.43b	3.98a	1.05e
<p>* NH₄⁺ 在总计为 8mmol/L N 中所占份额。</p> <p>1 MY——商品产量。</p> <p>2 BER——脐腐病。</p> <p>3 TY——总产量 = 商品产量 (MY) + 有脐腐病的果实产量 (BER) + 还在生长的果实。</p> <p>4 BY——糖产量。</p> <p>5 MFW——平均果重。</p> <p>6 TSS——总可溶性固形物。</p> <p>7 FSEC——果实浆液电导率。</p> <p>8 TA——柠檬酸滴定酸度。</p> <p>9 LAI——叶面积指数。</p> <p>每一列数据后面, 相同英文字母表示在 p<0.05 水平下无显著差异。</p>										

试验研究了在减少硝态氮 (总量为 8mmol/L N)、增加铵态氮的条件下, 添加或不添加 NaCl 对日光温室番茄植株生长发育和果实质量系数的影响 (表 12.4)。番茄植株生长在装满珍珠岩基质 (类似于硅材质的海绵) 的容积为 10 L 的容器中, 持续提供营养液并不断排干。试验发现, 无论营养液中有无 NaCl, 高量铵态氮均增加了番茄脐腐病 (BER) 的发生率。当然, 加 NaCl 处理的番茄

脐腐病的发病率更高。尽管高铵和高盐会导致番茄总产量急剧下降，但 NaCl 处理却增加了番茄果实总可溶性固形物。NaCl 处理也降低了平均果重（MFW）。所以在含盐条件下，高浓度的总可溶性固形物使得小番茄更甜（糖浓度更高）。

12.2.3 加工番茄的灌溉施肥

番茄加工业的发展改变了根据番茄重量计价的方法（Santos, 1996）。目前，农户的经济收入主要取决于番茄果实干物质百分比水平。仅这一项就促成了加工番茄灌溉管理系统的巨大改变，而这也是番茄商品性的技术质量的需要。Santos（1996）研究了最佳干物质生产、预期收入和季节性用水之间的关系。果品质量分布均匀性被认为是控制利润的关键因素。季节性用水量的增加会导致果实干物质的下降。获取高量干物质的最佳用水量常常要比获得最高鲜重的需水量低。该相互作用表明，经济利润与加工番茄生产中的用水量成反比。每公顷总可溶性固形物产量等于每公顷番茄鲜重乘以总可溶性固形物浓度，但缺水可能会成为植株生长的限制性因素，进而降低番茄鲜重。而鲜重降低的情况下，即使是高总可溶性固形物浓度也不能弥补每公顷总可溶性固形物产量的降低。地表滴灌设备的应用，使得精准灌溉替代了大水漫灌，同时也控制了产量品质。

表 12.5 密西西比地区移栽番茄灌溉施肥推荐方案，所有肥料通过灌溉施肥施入（截止到 14 周）

总量（磅/英亩）*		生长阶段	灌溉施肥（周数）	养分注入速度（磅/（英亩·周））	总注入量（磅/英亩）
N	K ₂ O	营养生长	2	6	12
		开花	3	8	24
120	120	坐果	7	10	70
		坐果结束	1	8	8
		成熟	1	6	6
共计			14		120

注：表中未提及磷肥，是因为磷肥应在整地前施入，而非灌溉施用。

* 1 磅/英亩 = 1.12kg/hm²。

Hebbar *et al.*（2004）在印度对番茄生产中不同形式的灌溉和灌溉施肥进行了比较。与地下滴灌施肥（76.55t/hm²）相比，采用 100% 水溶性肥料的滴灌处理显著地增加了番茄产量（79.2t/hm²）。与滴灌、沟灌控制措施相比，灌溉施

肥显著地促进了每株番茄的坐果数（56.9 个），提高了肥料利用率（1kg 氮、磷、钾可产生 226.48kg 番茄）。随着作物的生长，对养分的需求不断增加，灌溉施肥时养分的供应是以每日少量的方式提供的，这样就减少了土壤钾和硝态氮被淋洗到深层土壤的量。

美国加工番茄灌溉施肥计划见表 12.5 和表 12.6（Snyder and Thomas, 2007）。

在美国，加工番茄主要的滴灌方法是渗灌，将滴灌管铺设于地表下 15~20cm 的土层中，以确保滴灌管不会被收获机械损坏。

表 12.6 密西西比移栽番茄施肥灌溉推荐用量，N 和 K₂O 用量为种植前肥料基施用量的 20%（截止到 12 周）

总量（磅 / 英亩）*		生长阶段	灌溉施肥（周数）	养分注入速度（磅 / 英亩 · 周）	总注入量（磅 / 英亩）
N	K ₂ O	营养生长	2	0	0
		开花	3	7	21
96	96	坐果	7	9	63
		坐果结束	1	7	7
		成熟	1	5	5
共计			12		96

注：表中未提及磷肥，是因为磷肥应在整地前施入，而非灌溉施用。

* 1 磅 / 英亩 = 1.12kg /hm²。

12.2.4 番茄的加工质量

果实表面红色色泽的强弱、果实甜度或总可溶性固形物含量，与番茄红素含量和番茄品质有直接的相关关系。番茄植株下部叶片中钾浓度与番茄红素含量之间的关系见图 12.7（Sosnitsky, 1996）（也可见图 6.1）。

第 50 d 至第 65 d 是番茄主要的花期，这期间钾消耗量最小。花期后的 2 周内果实生长发育迅速达到最高点。灌溉施肥必须保证在果实生长发育达到顶点之前，有效根区有充足的钾素。比如：（i）基施钾肥以保证植物前期生长；（ii）增施钾素以确保第 1 批果实生长；（iii）增施钾素至每日单株施钾量达到 1g K，以满足植物生长后期钾素供应（图 12.8 A 和 B）

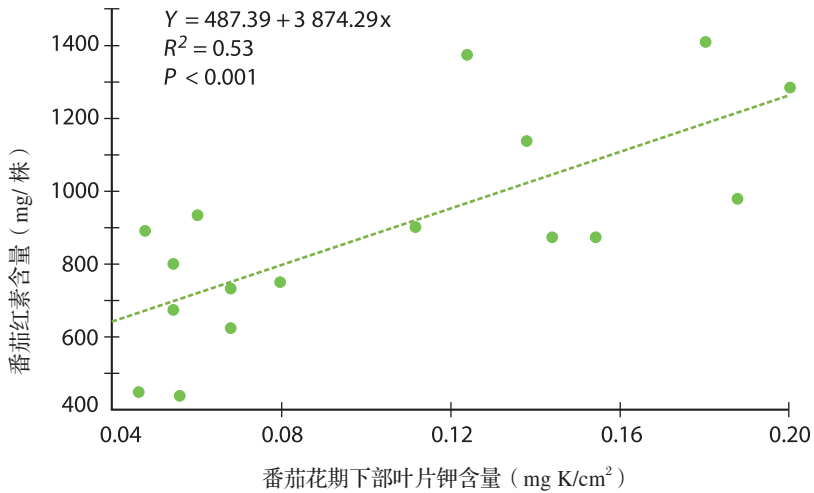


图 12.7 番茄移栽 40d 后叶片中低钾浓度与番茄红素含量的关系

线段符号表示惰性基质溶液中钾的浓度为 0.5~8mmol/L

● 0.5 ● 1 ● 2 ● 4 ● 6 ● 8

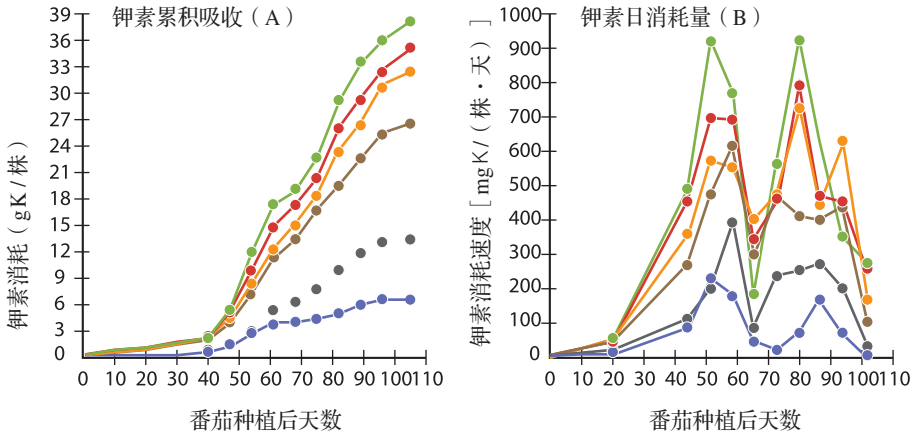


图 12.8 cv.8687 品种番茄生长阶段钾素累积吸收 (A) 和钾素日消耗量 (B) (Sosnitsky,1996)

Sosnitsky (1996) 在加工番茄上进行肥料试验的结果表明，番茄灌溉施肥的主要原则如下：

- 在播种的时候基施作物需要的全部磷肥。
- 初期高量氮肥会与磷素竞争吸收，进而降低作物生长速率。
- 在整个作物生长期间都需要钾肥，尤其是在始花期的初期。

表 12.7 表明在早期生长阶段, 即直播后的第 37d 至第 81d, 播种前施用铵态氮肥的处理, 与对照相比番茄生长速度降低了 25%。

表 12.7 氮肥施用对大田番茄干物质质量的影响 (Feigin A., 私人通信)

植株部分	累积干物质质量 (kg / hm ²)				
	(NH ₄) ₂ SO ₄ (kg N / hm ²)	5 月 27 日 (37DAS)	7 月 11 日 (81DAS)	7 月 30 日 (100DAS)	8 月 19 日 (120DAS)
果实	0	0	905	2 429	4 143
	60	0	1 000	2 762	4 286
	120	0	1 095	2 905	4 000
	180	0	619	3 352	3 905
营养枝	0	166	2 143	2 619	3 000
	60	119	2 095	2 524	3 810
	120	95	2 048	2 905	3 619
	180	72	1 905	2 571	3 381
共计	0	166	3 048	5 048	7 143
	60	119	3 095	5 286	8 095
	120	95	3 143	5 810	7 619
	180	72	2 524	5 924	7 286
DAS—播种后天数。					

大量基施磷肥 (表 12.8) 对加工番茄的生长和果实产量的正效应影响非常明显。磷素能增加番茄开花的数量, 在整地期间基施大量磷肥能提高果实产量。40d 内果实干物质可增加近 4 倍, 而植株部分仅能增加约 50%。美国就是采用这种基施方法而避免通过地下灌溉施肥的方法施用磷肥 (Snyder and Thomas, 2007)。

在大田番茄生长最后的 6 周, 从土壤中吸收的全部氮素被吸收利用转移至果实中。收获前 40d, 对照处理中营养器官损失的氮有利于果实形成。对照处理中土壤中的氮素仅能满足植株前期 37d 的生长, 而不能为潜在的番茄产量提供养分。总之, 磷肥应在整地期间作为基肥施用, 而氮肥则应在生长的最后 10 周里分别施用, 并随作物的生长逐渐增加施氮量 (表 12.9)。

表 12.8 施用磷肥对大田番茄干物质量的影响 (Feigin A., 私人通信)

植株部分	累积干物质量 (kg / hm ²)				
	过磷酸钙 (kgP / hm ²)	5 月 27 日 (37DAS)	7 月 11 日 (81DAS)	7 月 30 日 (100DAS)	8 月 19 日 (120DAS)
果实	0	0	714	2 190	3 619
	80	0	905	2 648	4 000
	240	0	1 238	3 619	5 095
新梢	0	48	1 667	2 571	3 143
	80	114	1 952	2 476	3 857
	240	190	2 286	2 905	3 381
共计	0	48	2 381	4 762	6 762
	80	114	2 857	5 124	7 857
	240	190	3 524	6 524	8 476

表 12.9 施用氮肥对氮素吸收累积量的影响 (Feigin A., 私人通信)

植株部分	氮素累积量 (kg N / hm ²)				
	(NH ₄) ₂ SO ₄ (kg N / hm ²)	5 月 27 日 (37DAS)	7 月 11 日 (81DAS)	7 月 30 日 (100DAS)	8 月 19 日 (120DAS)
果实	0	0	22	53	94
	60	0	28	76	112
	120	0	34	97	109
	180	0	25	90	118
营养枝	0	7	52	47	37
	60	5	58	53	59
	120	5	60	62	59
	180	4	58	69	65
共计	0	7	74	100	131
	60	5	86	129	171
	120	5	94	159	168
	180	4	83	160	182

在早期番茄生长阶段，磷素对氮素吸收的影响十分明显。在此期间，由于高量磷肥的施用，植株吸氮量与对照相比高出近 6 倍。番茄幼苗这种早期的“助

推启动”的效果最终在果实的含氮量中得到反应（表 12.10）。

表 12.10 施用磷肥对氮素累积量的影响（Feigin A., 私人通信）

植株部分	氮素累积量 (kgN/hm ²)				
	过磷酸钙 (kgP/hm ²)	5月27日 (37DAS)	7月11日 (81DAS)	7月30日 (100DAS)	8月19日 (120DAS)
果实	0	0.0	2.2	8.2	11.7
	80	0.0	4.2	10.6	14.7
	240	0.0	5.4	11.7	16.9
营养枝	0	0.1	3.3	4.5	4.2
	80	0.3	4.8	4.4	5.0
	240	0.6	4.1	4.8	4.7
共计	0	0.1	5.6	12.6	16.0
	80	0.3	8.9	15.0	19.8
	240	0.6	9.5	16.5	21.6

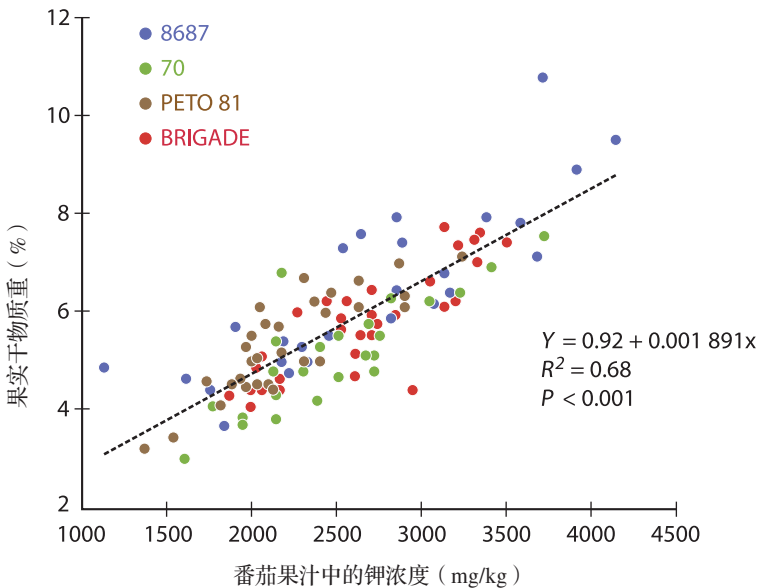


图 12.9 4 种加工番茄品种果汁中的钾浓度

在植株和果实生长过程中植株不断吸收钾素。像试验研究中那样施用硫酸铵而在初期施用较高氮素时，植株吸收钾素较少从而生长减缓（表 12.11）。如

图 12.9 所示，4 种加工番茄品种的番茄汁内的钾含量与干物质总量之间为线性相关关系。

表 12.11 施用氮肥对钾素累积量的影响 (Feigin A., 私人通信)

植株部分	钾素累积量 (kg / hm ²)				
	(NH ₄) ₂ SO ₄ (kgN / hm ²)	5 月 27 日 (37DAS)	7 月 11 日 (81DAS)	7 月 30 日 (100DAS)	8 月 19 日 (120DAS)
果实	0	0	48	112	187
	60	0	57	127	212
	120	0	58	146	187
	180	0	42	167	206
营养枝	0	5	56	52	67
	60	4	53	46	77
	120	3	56	58	67
	180	2	50	62	63
共计	0	5	104	163	254
	60	4	110	173	288
	120	3	113	204	254
	180	2	92	229	269

13 有土栽培花卉和观赏植物的灌溉施肥

由于花卉植物所具有的生物多样性可作为发展中国家潜在的收入来源，因此，联合国粮农组织（FAO）提出了“为了粮食安全的花卉种植”（Baudoin *et al.*, 2007）。大多数情况下，滴灌和灌溉施肥被用于确保这些娇弱的植物品种的种植。

适应当地的土壤与气候环境，使得世界各地的花卉植物各具特色。这使得花卉种植在向商业化生产转变时，常常需要涉及培养基和养分含量的问题。澳大利亚特有的花卉就对土壤中磷的增加尤为敏感。例如种植一种叫 Safari Sunset 的花卉，增施 N、P、K 和微量元素肥料，或只增加磷的浓度，就可提高它的鲜重，促进其生长。当培养液中磷含量很低时，簇生排根（密集的侧根，会限制根系的生长）（Watt and Evans, 1999）得以生长，而在加了磷的培养液中，这种排根则不能生长（Silber *et al.*, 1998）。

13.1 凤仙花属植物

高品质的花卉种植，需要在植物生长期提供最佳的养分供应，尤其是在总施氮量和不同氮肥品种的施用比例这两方面。凤仙花属植物（*Impatiens wallerana* Hook. F）是美国最为重要的园艺作物之一。在该品种上对灌溉施肥中硝态氮（ NO_3^- ）和铵态氮（ NH_4^+ ）的施用比例进行了深入研究（Romero *et al.*, 2006），结果表明，硝态氮：铵态氮施用比为 1 : 3、总氮含量为 10.5mmol/L 时，凤仙花属的鲜芽数、干重和花芽数最大。由于植物生长的介质源自于当地，因此，实际灌溉施肥溶液中所使用的铵态氮和硝态氮比例，会受到所使用的生长培养基的缓冲能力影响。如之前在第四章所述，铵态氮和硝态氮的施用比例是用于调控正处于生长期的植物根际 pH 值的一种主要手段。

13.2 玫瑰

玫瑰是一种普遍种植和生长在世界很多国家的花卉。在火山岩（凝灰岩）苗床或其他人造介质上种植玫瑰，滴灌系统都有着较为广泛的应用（Paradiso *et al.*, 2003）。每天对根系附近的滤出液的 pH 值（约为 6.5）进行测量，并通过

调节铵态氮和硝态氮施用比例，将 pH 值的变化范围维持在一个很窄的范围内。植物的种植年限、光照强度和发育时期也都会影响根系附近的 pH 值。表 13.1 中所列数据为种植玫瑰时，所常用的一种循环营养液的组成成分 (Lykas *et al.*, 2006)。

表 13.1 种植玫瑰再循环营养液最初矿质营养构成 (Lykas *et al.*, 2006)

营养元素	浓度 (毫克 / 千克)
硝态氮 (NO ₃ -N)	172
铵态氮 (NH ₄ -N)	14
磷 (H ₂ PO ₄ -P)	31
硫 (SO ₄ -S)	24
钾 (K)	250
钙 (Ca)	160
镁 (Mg)	24
铁 (Fe)	1.3
硼 (B)	0.28
铜 (Cu)	0.6
钼 (Mo)	0.027
锰 (Mn)	0.50
锌 (Zn)	0.23

Cabrera 等 (1995) 研究了在循环营养液体系中，温室“Royalty”玫瑰的氮吸收与光照强度、植物发育时期之间的关系。在这种循环营养液的模式下，氮吸收量同花茎的发育和采收相关，但与蒸腾速率无关。在花枝生长时期的单个循环里，氮吸收量的变化范围能达到 4~5 倍，每株玫瑰每天氮吸收量 (N) 为 29~146mg。随着对花的采收，这时即使有新花枝开始发育，氮吸收量也都会降低。枝条伸长达达到峰值时氮吸收量最低。之后，氮的吸收量开始增加，花枝成熟时氮吸收量最高。K、Ca、Mg 和 P 的吸收模式与 N 的吸收模式相同。光照强度不能控制氮吸收循环的周期，但能影响玫瑰每日对氮的平均需求量。玫瑰在夏季吸氮 (N) 量为每株每天 60~70mg，约为冬季吸收量的 2 倍 (冬季吸氮量为每株每天约 30mg)。玫瑰 1 年的氮总吸收量为每株每年 16.8g。

13.3 康乃馨

改变土壤介质中的养分浓度和用量,会影响花的品质。在以色列沿海高原(东部 18km)的沙土上种植的大花白康乃馨(Standard White Candy),针对萼裂和花茎易脆的失调情况,通过灌溉施肥增施钾肥(硫酸钾和硝酸钾)和提高硝态氮、铵态氮比来处理(Yermiyahu and Kafkafi, 2009)。提高灌溉施肥中钾的施用水平,植株干物质中钾含量也相应增加。施用硝酸钾所带来的益处,可能是由于灌溉施肥中缺少铵态氮所致。这些益处包括康乃馨花的产量提高了 17%,同时减少了萼裂情况的发生。与灌溉水中有铵态氮肥的处理相比,通过对康乃馨花茎脆化的测量发现,无论是施用硝酸钾肥还是硫酸钾肥,只要施钾水平最高,康乃馨花的品质都会得到提高。试验结果表明,相对于不可预料的白天为晴天但夜晚寒冷的气候事件(这是导致失调情况的主要因素)来说,通过维持钾肥的持续供给以提高土壤溶液中钾的含量,使其含量水平高于“亏缺”水平,以确保高产的这种施肥方式,是一种较为“保险”的措施。

14 无土栽培和介质栽培中的灌溉施肥

容器培育植物同大田条件下生长的植物相比，很多方面都有所不同。容器限制了根系的发育，这使得植物在生长发育时会需要更多的水、氧气和养分。种植户和农艺师会根据生长介质的物理和化学性质，以及植物生长的需求，使用不同的天然或人造生长介质，以适应当地条件。然而，无土栽培时，由于根际有限空间中养分的流失，必须要不断补充更新营养液。Silber 等（2003）提出，产量的降低是由于灌溉（和灌溉施肥）频率偏低，致使养分亏缺，这种亏缺比水源短缺所造成的危害更严重。提高灌溉频率可以对养分的亏缺起到补偿作用。频繁进行灌溉施肥能改善养分的吸收，这种效果主要可有 2 种机制进行解释：一是对流失养分的根际空间进行持续的养分更新；二是由于生长介质中平均含水量较高，通过质流提高水溶性营养成分的运输。灌溉施肥的频率、养分浓度及不同养分之间的比例、混入肥料后灌溉水的酸碱度等都需要同生长介质的有关特性相适应。

以下章节中将对生长介质进行定义。同养分供给相关的物理、化学性质和灌溉施肥管理的相关内容也将有所讨论。

14.1 生长介质的定义

“生长介质”适用于任何的固体材料，不同于原状土壤，包括天然或人造产品，工业产品残渣，矿物质或有机物等，这些材料单独或混合填入容器中，用于植物根系的固定。“生长介质”可以参与（化学活性材料）或不参与（惰性材料）植物养分供给的复杂过程（Abad Berjón *et al.*, 2005）。

14.2 生长介质的分类

Abad Berjón 等（2005）依据所使用的不同原料对生长介质进行了分类。

14.2.1 无机生长介质

- 天然介质：取自岩石或矿物，且未经处理或只进行了如筛分等简单物理处理。

- 物理或化学处理后的介质：膨胀黏土、珍珠岩（将硅质火山岩加热至约 1 000℃后获得）、蛭石（含镁的水铝硅酸盐）、石棉（玄武质岩、石灰岩和石炭在 1 600℃融合而成）。

- 残余物或工业副产品：碎砖、高炉渣。

14.2.2 有机生长介质

- 天然来源：不同植物源的泥炭、草炭、苔藓（Bryalers Broilers）、莎草、松屑、腐叶土和木本植物。

- 人造合成：有机聚合物、不可生物降解材料、化学合成物（发泡聚苯乙烯、脲醛和聚氨酯泡沫塑料）。

- 生活废弃物或工业副产品、工业和农业活动产品：（大部分在使用前都要进行堆沤，以获得稳定的物料）米糠、树皮、有机肥、锯屑、椰纤维、制作木塞的残余物、城市固体废弃物、处理过的废水等。

14.3 生长介质的特性

Chen 和 Inbar（1995）总结出了利于植物生长的理想生长介质的特性（Poole *et al.*, 1981；Hanan *et al.*, 1978；Hartmann and Kester, 1975；Richards *et al.*, 1964；Wilson, 1984）。

14.3.1 物理特性

- 高保水性，使植物容易获得水分。
- 在较低的水张力时具有较高的空气含量。
- 满足前面 2 个条件要求的粒度分布。
- 低容重，使得生长介质重量很轻。
- 多孔透气。
- 高渗透系数，使得排水效率高。
- 稳定的固定植物的能力。
- 体积恒定，生长介质随时间而发生收缩的变化最小。

14.3.2 化学特性

- 较强的阳离子交换能力。
- 适宜的养分水平和将养分提供给植物吸收利用的能力。

- 具有缓冲能力，保持 pH 值稳定。
- 可溶性盐含量较低。
- 有机生长介质的 C/N 比较低，介质稳定不易降解。

以上所述的特性，不是所有的生长介质都具有的典型特性，但通过适宜的灌溉和灌溉施肥，可能让生长介质具有其中的某些特性。植物可以生长在单一种类的生长介质上，但更多时候生长介质由 2 种或 2 种以上的介质组成，这样可以弥补单一种类所存在的不足。混合了多种介质种类的生长介质要比单一种类的生长介质更加有效，特性也更加均衡。

14.4 化学特性和养分含量

14.4.1 碳氮比和氮素含量

新鲜的有机质会被微生物分解。微生物在分解有机质时会用到氮素。微生物体内的碳氮比为 5~30 (Chen and Inbar, 1985)。当生长介质中的碳氮比处于该范围内时，就可以认为有机质的分解是相对稳定的。微生物分解有机质所需要的高碳氮比，诱发了微生物对氮的固定，从而减少了生长介质中能被植物所吸收的氮的含量。不同的生长介质具有不同的碳氮比。

表 14.1 不同有机生长介质的碳氮比 (Verdonck, 1983)

介质物料	碳氮比
鲜树皮	75~110
腐熟的硬木树皮	30~40
腐熟的软木树皮	30~40
泥炭	± 50
松屑	± 25
污泥	50~80

14.4.2 阳离子交换量

阳离子交换量 (CEC) 是特定材料和土壤在一定 pH 条件下，所能吸收的可交换性阳离子的总量。该特性对于养分是否能被植物有效吸收起到了十分重要的作用。这种特性保护吸收的离子不会被淋失掉，从而能被植物吸收利用。CEC 的单位为单位重量的毫当量。有机生长介质中的 CEC 随着介质的 pH 值变

化而变化。有机生长介质中腐殖质的 CEC，随着溶液中 pH 值每增加 1 个单位，增加 0.30meq/g。与之相比，黏土中 CEC 则仅增加 0.044meq/g (Helling *et al.*, 1964)。Abad 等 (2005) 根据灌溉施肥的频率，对生长介质的最佳 CEC 值进行了界定。当灌溉施肥持续进行时 (每天 1 到多次)，生长介质中的 CEC 没有明显作用，因此，在这种条件下可以使用惰性生长介质。当灌溉施肥为间歇式进行时，应使用 CEC 含量中等或较高的生长介质 (一般应高于 0.20meq/g)。

表 14.2 不同生长介质中的阳离子交换量
[根据 Chen and Inbar (1985), Verdonck (1983) 修改]

生长介质	阳离子交换量 (meq/100g 干物重)
泥炭—锈色泥炭藓	140
疣泥炭藓	110
狭叶泥炭藓	90
莎草泥炭藓	110
水藓泥炭	130
莎草泥炭	80
黑泥炭	160
蛭石	150
蒙脱石	100
珍珠岩	1.5
鲜树皮	40~50
腐熟的硬木树皮	70~75
腐熟的软木树皮	70~80
泥炭	120~140
松屑	70~80
粉状椰棕	
新鲜	107
存放 3~4 月	120
存放 3~4 年	150

14.4.3 pH

植物可以生长在 pH 值变化范围很宽 (4~8) 的生长介质中，不会因此导致

植物生理上的紊乱情况。但在强酸或强碱条件下，植物的生长发育会受到抑制。生长介质中的 pH 值会影响养分的有效性、CEC 和生物活性。植物在生长介质中生长一般都要求进行集约化的管理。在此条件下，就应该对 pH 的变化范围进行限定。种植观赏植物的最佳 pH 值范围为 5.2~6.3，蔬菜为 5.5~6.8。pH 值较高时（高于 7.5~8.0），P、Fe、Mn、B、Zn 和 Cu 的养分有效性就会降低。与之相反，pH 值较低时（低于 5.0），可能会发生植物出现 N、K、Ca、Mg 和其他养分的亏缺。pH 值较低时，可溶性金属氧化物含量增加，会导致植物出现中毒症状（Roy *et al.*, 2006）。不同的生长介质的 pH 值见表 14.3。

表 14.3 不同生长介质的 pH 值 [根据 Verdonck (1981) 和 Verdonck (1983) 修改]

生长介质	pH 值
松屑	3.9~5.5
树皮	6.0~6.8
珍珠岩	6.5~7.2
石棉	±7.0
蛭石	±7.0
鲜树皮	5.5
腐熟的硬木树皮	6.5
腐熟的软木树皮	6.7
泥炭	4.0~5.0
污泥	7.3~7.6
松屑	5.5~5.5
粉状椰棕	
新鲜	5.8
存放 3~4 月	6.0
存放 3~4 年	6.0

生长介质的 pH 管理有一些事项需要特别注意。新的石棉（未用过的）的 pH 值可能较高（7~8）。这时，可以在种植前使用酸性营养溶液（pH 值为 5.0 ~ 5.5）进行调节。调节完后，pH 值可以达到 5.5~6.5，这样就达到了许多作物适合生长的 pH 值的范围（FAO, 1990）。

相对矿物质生长介质和惰性材料的生长介质而言，有机生长介质的 pH 缓冲

能力较强(Penningsfeld, 1978)。当有机生长介质中的pH值不在适宜的范围内时,就需要对其进行调节。石灰岩或白云石可以用来提高酸性生长介质的pH值,硫黄则用来调节pH值较高的生长介质。调节生长介质pH值的物质的使用量取决于生长介质的原始pH值、最终需要的pH值和生长介质中的CEC值。如果生长介质中没有石灰岩或白云石,灌溉水中钙和镁这2种元素的含量又不高时,就需要补充钙和镁(Benton Jones, 2005)。

惰性生长介质的pH呈中性或碱性,可以通过酸化灌溉溶液来调节。在灌溉水中使用酸化剂的用量取决于水质,或灌溉水中碳酸盐或碳酸氢盐的含量。

14.5 灌溉施肥的应用

如前所述,不同生长介质的化学性质和物理性质有很大的差别。建立灌溉施肥系统时,生长介质的化学性质是最为重要的考虑因素,因为惰性无机生长介质和活性有机生长介质的需求有很大的不同。

惰性生长介质的CEC值几乎为0,没有缓冲性,也不能提供养分。使用惰性生长介质的灌溉施肥体系,与水培法很像,需要通过灌溉施肥来弥补灌溉水中所缺乏的所有必需营养元素。这种体系只使用灌溉施肥的手段,这也是其同传统施肥方式相比的主要优点。但是,由于灌溉施肥体系必须能精确供应植物生长时所有的营养——这点十分关键,体系中出现任何的失误和故障,都会使作物受到损害。惰性生长介质中所使用的肥料种类也需精心挑选,要考虑到水质(主要是碳酸氢盐的含量)。另外,由于该生长介质的缓冲能力为零,因此还要对该介质溶液的pH进行选择。高浓度的酸性肥料会降低pH值。依据溶液组成成分进行的计算,可以用来决定酸性肥料允许施用的最高浓度,以此来调节介质溶液的pH值。另外,该pH值还可以通过滴定田间条件下灌溉施肥中肥料和水的混合液来直接测定。肥料配方中铵态氮和硝态氮的比例也必须加以考虑。铵态氮由于受到作物吸收和生长介质中硝化作用的双重影响,它在作物生育期会降低pH值。硝态氮在作物吸收时则会增加pH值。灌溉施肥同惰性生长介质相结合的好处在于,可以对生长介质中的溶液进行管理,使其能近乎完美地符合各种作物生长的需求。然而,同这样的优点相伴随的是,隐藏其后的灌溉和灌溉施肥系统失败所带来的风险。因为这种生长介质不具有缓冲能力,一旦系统失败,就可能会迅速地转变为导致作物产生不可逆损害的极端条件。

有机生长介质特性则与前面所述惰性介质特性完全相反：高 CEC 值，对介质 pH 的高缓冲能力，性质一般很稳定。灌溉水和生长介质的相互作用决定着介质溶液的组成。因此，只能部分控制介质溶液的组成成分。然而，这也可以算作一个优点，一旦灌溉施肥体系出现问题，有机生长介质在维持适宜的养分浓度和 pH 值方面的能力，要明显强于惰性生长介质。

通常，无土栽培采用混合介质材料，这样，单个介质的化学性质能纳入生长介质之中，从而使得生长介质和灌溉施肥结合从整体上表现出适应于作物生长的优势。

15 灌溉施肥中水分、土壤和植株的监测

灌溉施肥是一种十分先进的施肥方式，它为种植户们提供了一种根据作物需要和土壤或生长介质条件，来进行精准灌溉和施肥的方式。为了更好地发挥灌溉施肥的技术优势，建议对灌溉水、土壤和生长介质、滤出液和作物进行监测。

15.1 灌溉水水质监测

对灌溉水取样和分析的目的是：

- 评估其对特定作物、土壤、灌溉方式、过滤程度和其他必须进行的化学处理的适应性。
- 确定水中盐分含量水平和金属氧化物的浓度，评估其对作物的影响。
- 确定钠含量和钠吸附比（SAR），评估其潜在的对土壤结构和渗水的长期效应。
- 确定养分相关数值，以计算灌溉施肥中灌溉水的养分含量。

灌溉水中的盐分含量，按溶解的无机离子的总量计算，单位为 mol/L；或者按溶解于水的总盐分重量来计算，单位为 g/L。盐分主要组成成分有，钙离子、镁离子和钠离子等阳离子，还有氯离子、硫酸根和碳酸氢根等阴离子。硝酸盐和钾在盐分组成中所占的量很少。在对盐分和灌溉水进行评估时，硼和其他可溶性的微量营养元素可以忽略不计。通过测量水中的电导率（EC）可以对盐分进行便捷的测定。

灌溉水的碱性或钠盐的危害，与土壤分散性、土壤结构崩解、水渗透势和植物中的钠盐积累等相关。SAR 常用于作为评价钠的潜在危害的参数。 HCO_3^- 会降低钙离子在溶液中的活性，因此将其离子浓度纳入阳离子在水中活性的计算，为评估土壤溶液中由于钙化合物溶解度的变化所导致的钙浓度的降低，提供了更好的办法。

同盐分问题不一样，灌溉水中的元素毒性问题，通常发生在某种离子在植物蒸腾作用时被吸收和在叶片中积累达到某一浓度水平后，叶片出现受损状况。叶片损害程度取决于这种元素在灌溉水中的浓度、时间、数量、作物的敏感程度和作物耗水量。最常见的毒性元素为 Cl、B 和 Na。

通常，多数地表水和地下水水源中，磷和钾的含量微不足道。地下水中硝态氮的含量则可以达到一个相对高的水平，因此，地下水在用于作物种植和灌溉施肥时，要考虑其硝态氮含量。

表 15.1 中所列的是评价灌溉水水质的一些实验室推荐检测标准。这些检测并非是所有样品和采样时间所必需的。但是，记录下水质分析结果、取样日期和取样次数是十分重要的，这样就可以省去某些试验，或者降低某些元素的分析频率。表 15.1 列出了经过处理后的废水中一些元素的浓度范围，这些数据在国家 and 区域之间会有所变化，这主要受到人类饮用水的供给、工农业废水的排放、废水处理厂对废水的处理等影响。

另外的监测方法还有从灌溉施肥系统的滴头处采集灌溉水样品（滴灌、微灌或喷灌）。这些水样能反映出水质和灌溉施肥时所添加的肥料。不同的灌溉施肥设备在注入肥料时，不是连续进行的，而是脉动间歇式的，这样使得所施用的肥料浓度会高于或低于设计的灌溉施肥浓度。对正在进行灌溉的流水提取小部分的水样，可能导致结果高于或低于预设的平均浓度。为了避免这个问题，建议在一个完整的灌溉施肥循环周期内，从滴头处采集灌溉水样。收集样品的容器须适合设备状况和灌溉周期。养分和盐分的测定应在实验室中进行，但也可开展一些野外检测分析。如果种植户知道灌溉水的电导率（EC）和加施肥料对电导率的影响，就可以将滴头采集灌溉水所测出的总的 EC 值，用于评价注肥设备施肥的效果，控制向灌溉施肥管道中注入肥料的量。

随着处理过的废水（TWW）的用量不断增加，为了避免盐碱危害、养分在土壤和作物中的积累，计算灌溉水中的养分含量等，对水质进行评价越来越重要。对处理过的废水进行采样和检测，还可应用于计算有机物质含量和发现病原菌等方面。

以色列农业和农村发展部推广服务中心所使用的，对处理过的废水进行采样的操作说明如下（Tarchitzky and Eitan, 1997）：

- 对于多数的物理和化学分析，1L 的采样容积已经足够。建议对采样用的瓶子在采集样品前要用拟装入的水样进行冲洗。所有必要的细节都要写在标签上，并贴于瓶子上。

- 如果直接从灌溉系统中取样，应打开阀门，让水流冲洗 20~30s（这取决于灌溉管道的直径）。这样做的目的，是为了保证取样时，不会采集到在管道中滞留很长时间的水，这样的水可能其组成成分都有所变化。应从控制过滤器和滴头（喷灌，微喷灌和滴灌）处采样。采样应在灌溉施肥系统不运行时进行（避

免样品中混入肥料)。

表 15.1 用于评估灌溉水质的推荐的实验室检测标准
[根据 Westcot and Ayers (1985) 和 Feigin *et al.* (1991) (修改)]

水质参数	符号	单位	标准变幅	中水	淡水
电导率	EC _w	ds/m	0.62~0.71	*1	*
钙	Ca ²⁺	mg/L	20~120	*	*
镁	Mg ²⁺	mg/L	10~50	*	*
钠	Na ⁺	mg/L	50~250	*	*
碳酸根	CO ₃ ²⁻	mg/L	—	*	*
碳酸氢根	HCO ₃ ⁻	mg/L	—	*	*
氯	Cl	mg/L	40~200	*	*
硫	SO ₄ ²⁻	mg/L	—	*	*
硼	B	mg/L	0~1	*	*
pH 值			7.8~8.1	*	*
钠离子吸附比	SAR ²	[meq/L] ^{1/2}	4.5~7.9	*	*
生物需氧量	BOD	mg/L	10~80	*	
化学耗氧量	COD	mg/L	30~160	*	
固体悬浮物总量	TSS	mg/L	10~100	*	
硝态氮	NO ₃ -N	mg/L	0~10	*	*
铵态氮	NH ₄ -N	mg/L	1~40	*	
有机氮	Org-N	mg/L	—	*	
总氮	Total-N	mg/L	10~50	*	
钾	K	mg/L	10~40	*	
磷酸根磷	PO ₄ -P	mg/L	—	*	
总磷	Total-P	mg/L	6~17	*	
残余含氯量	Cl ₂	mg/L	—	*	
微量元素 ³		mg/L	—	*	

1 表示此标准可用于评估中水或淡水作为灌溉水的水质。
2 为了计算钠吸附比, 钠、钙和镁离子浓度转换为 meq/L。
3 微量元素包括铝、砷、钡、镉、铬、铜、氟、铁、铅、锂、锰、汞、镍、硒、银、钒和锌。

采集到的样品应尽快送到实验室。用于氮、生化需氧量 (BOD) 或细菌分析的样品, 需存放于冰冻旅行盒 (4℃) 中。

淡水样品的采集也可使用上述规则。

直接从水库采集，而非从灌溉系统中采集处理过的废水，可采取以下 2 种方法：

- 使用自动采样器。
- 使用带有重物的容器（该方法限于深度 1m 以内的采样）。

应远离水库岸边进行采样，以避免风积油脂富集的区域。在对处理后的废水进行采样时，采样点应尽可能靠近泵的位置。如果采样用的是采样瓶而不是自动采样器时，应注意以下几点：采样瓶的瓶颈应是细口，有瓶把手，采样瓶用绳子和重物相连。采样瓶的下沉深度一般为 1m，沉入水中时速度要快，以确保采集到的表层水水量最少。

采样类型

样品组成成分的变化可以发生在 1 天或者 1 周内，这是由于废水形成时不同的水源和添加物所致。因此，建议使用以下两种方法之一进行采样，选择哪种方法应依据所需信息而定。

- 随机采样。所采样品代表了采样时当地的情况。如果已经知道水源会随时间变化而发生变化，这时采样就应有适当的时间间隔，才能说明这些变化的范围、频率和持续性（Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1998）。

- 在不同时间、深度，或同一时间（白天或晚上，24h 内）、不同采样点，进行混合采样。混合样品采集时应按照以下程序进行：

- 分开进行采样，每个样品的容积相同，然后再将这些样品混合起来。
- 使用自动采样器时，直接将样品混合在一起后形成混合样品。

15.2 土壤和生长介质监测

15.2.1 土壤监测

对于有在田作物的情形，土壤采样和检测是管理土壤盐分和决定养分供给的重要手段。通过土壤测试，可以发现传统施肥量和最佳施肥量的差别，并通过按需供给养分的方式，对有问题的施肥方式进行纠正。可以通过 2 种方法来对土壤养分进行监测（Bar-Yosef, 1992）。第一种方法是对根际空间的土壤进行取样，通过浸提的方法检测土壤中可溶且被吸收的养分含量。第二种方法只适用于 NO_3^- 和 Cl^- 的测定，通过永久埋入土壤中的样品杯，采集土壤溶液，并

对其进行测定。

采样频率取决于土壤类型、水质和作物生长速度。果园一年采样2次就足够了，但如果所用水盐分含量较高，就应每3~4周取一次样，对土壤盐分含量进行监测，可用来决定进行土壤淋洗的灌溉量。在如蔬菜等的集约种植作物中，应经常进行土样采集，每2~3周一次，用以监测土壤中的养分含量和盐分，最终用来调整施肥计划，或淋洗土壤中积累的盐分。以色列推广服务中心（Tarchitzky and Eitan, 1997）的土样采集说明如下：

- 滴灌：沿着滴灌的侧面进行取样，离滴头距离为10cm，采样深度为0~30cm，30~60cm，60~90cm。在2000m²的地块中随机采样约20个。
- 喷灌和微喷灌：采样点离喷灌的距离，取决于喷灌的灌水定额和滴头处水分的分布，例如，微喷灌时采样距离为70~100cm，小型喷灌或喷灌时采样距离为100~120cm。采样深度为0~30cm，30~60cm，60~90cm。在2000m²的地块中随机采样约20个。

将相同采样深度的土壤样品混匀，以获得具有代表性的混合样品。某一深度的混合样品应独立置于样品袋中，将1kg的样品送至实验室。样品应标识名称、地址、采样点数、作物、采样深度和采样日期。

不同的养分和土壤特性具有其特定的样品浸提方法（Hagin *et al.*, 2002）。水溶性养分通常采用饱和浸提法，吸附性离子则采用特定的浸提剂（Bar-Yosef, 1992）。有一些方法是微酸性浸提。钾一般采用可交换性成分的浸提进行测定，或利用钾交换速率（PAR），即利用与可溶性钾相关的二价阳离子转变为可交换的过程的方式进行测定。分析结果必须通过野外作物田间试验结果进行校正。

确定滴灌应加入多少量的磷肥时，需要对土壤中有效磷含量进行检测。由于世界各地土壤检测实验室所采用的土壤测试方法、土样浸提方法都不尽相同，各地都有自己的土壤有效磷含量的检测方法，这使得有效磷含量检测结果的差异变化很大。集约蔬菜种植和温室种植中，往往不看检测出的土壤中磷含量水平，而是在作物的整个生长阶段都使用全量营养元素溶液，从而确保作物不会发生养分亏缺的情况。

在使用滴灌的集约种植中，使用植株分析的方法较好。因为，在滴灌的情况下，只有部分的土壤是湿润的，而且根部空间的土壤只能代表整个土壤的很小一部分。

15.2.2 生长介质和下渗液监测

了解无土栽培系统中所有组成成分的养分状况有以下2个方面的作用：一

是种植户判断灌溉施肥管理措施是否成功的手段，并判断所制定的施肥计划是否满足了作物的养分利用率要求；二是有助于对养分亏缺状况进行诊断，对可能出现的症状进行矫治（Johnson, 2008）。生长介质中有效养分的检测方法基于生长介质样品提取剂的均衡性。典型的提取剂有：DTPA、醋酸铵和水（Bunt, 1988）。浸提要在标准时间内，使用不同质量/体积比的生长介质提取剂（1:1.5、1:5、1:10）进行。生长介质的样品制备过程为，从根际采集一定量的有代表性的生长介质，将其混匀后用于检测。生长介质溶液的制备过程为，在实验室中选取一定体积的基质进行浸提，或在田间使用野外套装工具制备并用于测量硝态氮、P和K等项目。石棉或类似生长介质的介质溶液样品可以通过医学注射器，或与压力计相连的注射器，在一定压力下抽取制备。

在养分溶液循环系统中，即时进行采样和控制养分组成，或者采集检测用样品，都是十分容易做到的。在集成式种植系统中，没有养分溶液的循环，灌溉系统中包括了必要的养分过滤部分，可以避免盐分的积累。容器基质中所有过剩的养分都通过基质底部的排水孔排出。在一些容器底部设置溶液采集装置，随机分布于整个温室中，通过其收集到排出的溶液样品，用于分析或者送往实验室检测。这样就可以计算出相关养分的流失量。

15.3 植株监测

通过外观观察发现养分缺失症状可作为一种诊断方式（Scaife and Turner, 1983; Winsor *et al.*, 1987）。这种情况下，高水平的专家是进行有效诊断的先决条件。这种通过观察进行诊断的缺点是，在出现缺失症状时，对植株的损害就已经形成，而且这种缺失情况可能已经很严重，这时再想通过矫治来防止作物减产，为时已晚。

通过植物组织分析，可以反映出植株样品中的养分状况，不管是根际养分供应充足，还是可能会出现养分缺失症状。中毒水平也能够检测出来。通过植物组织分析，可以及时发现养分问题并进行矫治，或为以后制定施肥计划提供依据。

植物组织的干物质和养分含量的检测是一项枯燥的、破坏性的和需要相关试验设备的工作。一年生作物和像大田作物、蔬菜和花卉等生育期短的作物，样品检测要十分迅速地完成。为了有效地矫治作物的缺素症状，检测工作必须在采样后的2~3 d内完成。

表 15.2 大田作物的植株组织采样技术 (Flynn *et al.*, 1999)

作物	采样时间	采样部位	每个小区采样数量
棉花	盛花期	主茎上新定型叶	40~50
向日葵	现蕾期之前	新定型叶	20~30

表 15.3 蔬菜作物的植物组织采样技术 (Flynn *et al.*, 1999)

作物	采样时间	采样部位	每个小区采样数量
芦笋	成熟期	地上 45~75cm 的植株 蕨状枝叶	10~30
菜豆	苗期、花期或花期之前	全部地上部分或新叶	23~30
花椰菜	现蕾之前	新成熟叶	10~20
球芽甘蓝	生长中期	新成熟叶	10~20
芹菜	生长中期	新成熟叶的外叶柄	10~20
黄瓜	坐果之前	新成熟叶	10~20
圆球状蔬菜 (甘蓝、菜花)	现蕾之前	菜心的新成熟叶	10~20
叶菜 (如生菜、菠菜)	生长中期	新成熟叶	10~20
瓜类	坐果之前	新成熟叶	10~20
豌豆	花期之前	顶部第 3 节叶片	40~60
辣椒	生长中期	新成熟叶	25~50
马铃薯	花期或花期之前	生长点第 3 片到第 6 片叶	25~30
甘薯	生长中期或根膨大之前	中部生长点的第 3 片到第 6 片 叶或成熟叶片	25~30
根茎类蔬菜 (如胡萝卜、 甜菜、洋葱)	根或茎膨大之前 的生长中期	新成熟叶	20~30
番茄 (大田)	花期中期	生长点第 3 片到第 4 片叶	15~20
番茄 (格架或不定)	花期中期从 第 1 到第 6 簇花	顶簇花的对面或 下面叶片的叶柄	12~20

果树或常绿植物的叶片分析是提供养分指导的一个常用手段，通过植物组织的检测，可以为以后制定施肥计划做好准备。实验室有较长的时间进行检测分析工作。植物组织分析的数据通常不能直接用于肥料推荐用量。这是因为，植物组织中的养分含量会随着植物组织的生理龄期而发生变化。空气湿度、温度和土壤湿度，通过影响蒸腾作用、植株中溶质的运输和生长速度对植株中的

养分含量产生影响。因此，植物组织采样时，须采用十分严格的标准（Hagin *et al.*, 2002）。然而，比较在植物生育期的任何时间对“好”和“坏”的地方进行采样，都有助于矫治措施的实施。

植物取样部位取决于植物种类和生长阶段。大田作物、蔬菜、观赏植物和花卉、水果和坚果果树等的植物组织采样技术见表 15.2 至表 15.5（Flynn *et al.*, 1999）。植物样品可用来检测以下养分：氮、磷、钾、钙、镁、硫、铁、铜、锌、硼、钠、氯和其他微量营养元素。应根据特定作物的标准，在该植物的适宜阶段，进行叶片或整株植物样品的采集。叶柄和叶片的采样可能会有所不同。

表 15.4 观赏植物和花卉的植物组织采样技术（Flynn *et al.*, 1999）

作物	采样时间	采样部位	每个小区采样数量
康乃馨	刚栽种时 / 培植期	从底部第 4 至第 5 片叶 从底部第 5 至第 6 片叶	20~30
菊花	花期或开花之前	花蕾的顶叶	20~30
观赏灌木和乔木	近年生长	新成熟叶	30~70
一品红	花期或开花之前	新成熟叶	15~20
玫瑰	花期	花茎上新成熟的复叶	25~30
草皮	旺盛生长期	叶片（避免土壤污染）	2 杯

表 15.5 水果和坚果果树的植物组织采样技术（Flynn *et al.*, 1999）

作物	采样时间	采样部位	每个小区采样数量
苹果、梨、扁桃、杏、樱桃、李子、梅子	生长期（6~7 月）	近期没有结果也没有生长的短枝上的叶片	50~100
桃和油桃	生长期（6~7 月）	长了一半的新梢上的小叶	25~100
葡萄	花期	与开花时底部那串花相邻的叶片或叶柄	50~100
山核桃	生长中期	长了一半的新梢上的小叶 / 叶片	25~60
开心果	生长中后期（8 月）	没有结果枝条末端小叶	25~60
覆盆子	生长中期	重生茎的侧根上新成熟的叶片	30~50
草莓	生长中期	新成熟叶片	25~40
胡桃	6~7 月	没有结果枝条末端的小叶 / 叶片	25~40

16 灌溉施肥的未来发展趋势

灌溉施肥起初应用于大田作物和园艺作物，其后应用于果园。再后来，在小型花园和盆栽行业，开始接受针对家庭和城市花园的、能自动循环灌溉的灌溉施肥。如今，灌溉施肥已经应用于各种种植制度，无论是小规模或是大范围的，遍及全世界。

随着世界范围内农业用水的短缺和城镇化进程的加快，使得农业发展到了一个新阶段，这时已经不再适合原来的大水漫灌和沟渠灌溉的方式。当广袤平原地带使用中心支轴式喷灌系统，并利用其进行氮肥施用，丘陵地区的新种植园越来越时兴葡萄种植和果树种植。相对于传统果树种植的深植模式，在这样的丘陵地区的种植条件下，果树种植的土壤有效容积较小，因此，该地区的养分供给主要为完全养分供给。

在干旱地区，饮用水的短缺和人口的增加，驱使农户们去利用任何可以获得的水资源。有两条主要可行的途径，一是使用城市可回收再利用的污水，二是对海水或再回收利用水进行脱盐处理。对再循环水进行脱盐处理后可防止耕层土壤的盐分积累，但这种脱盐处理要消耗能源，从而限制了其使用。使用再循环水所造成的氯化钠积累是灌溉地区的主要问题，由于长时间使用含氯化钠的再循环水，造成了土壤生产力的退化。只有在有质量较好并能用于农业生产的水源条件下，才适合在干旱贫瘠的土地上进行耕种。

只要存在人口对淡水的需求所造成的水资源紧缺的压力，滴灌和灌溉施肥就将持续得以推广应用，并逐渐替代传统的灌溉模式。因为这样可以显著减少农业用水，更多的水供城市人口使用。

劳动力成本也是传统漫灌和沟灌模式向灌溉施肥模式转变的一个重要的驱动因素。随着农业的目的由解决生产者自给向商业化发展，使得向灌溉施肥进行转变的趋势不可避免。

我们相信，本出版物中所讨论的将植物营养和农田灌溉相结合的一些基本内容，会使世界各地的种植户们，对于农业生产中如何高效利用水资源和肥料等方面有所收获。

参考文献

- Abad Berjón, M., P. Noguera Murray, and C. Carrión Benedito. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. Cap. In: Fertirrigación— Cultivos Hortícolas, Frutales y Ornamentales. Ed.: C. Cadahía. Ed. Mundi—Prensa. Madrid. 8 pp. 299–354.
- Abura, L. 2001. Growth curves as a tool to understanding maize production in Uganda. M. Sc. Thesis, The Hebrew University of Jerusalem, Faculty of Agriculture, Rehovot.
- Adams, F., F.J.Veihmeyer, and L.N. Brown. 1942. Cotton irrigation investigations in San Joaquin Valley, California, 1926 to 1935. California Agr. Exp. Sta. Bull. 668.
- Aljibury, F.K., M. Gerds, A. Lange, J. Huntamer, and G. Leavitt. 1974. Performance of plants with drip irrigation. In: Proc. 2nd Intern. Drip Irrigation Congr. San Diego California, Univ of California, Riverside. pp 497–502.
- Andre, M., D. Massimino, and A. Dagueuet. 1978. Daily pattern under the life cycle of a maize crop II. Mineral nutrition, root respiration and root excretion. *Physiol. Plant.* 44:197–204.
- Asano, T. 1998. Wastewater reclamation, recycling, and reuse: An introduction. In: Wastewater Reclamation and Reuse (T. Asano, Ed.). Water Quality Management Library. Vol. 10. Technomic Publishing Co. Inc. Lancaster—Basel.
- Assouline, S. M. Moler, S. Cohen, M. Ben—Hur, A. Grava, K.Narkis and A. Silber. 2006. Soil—Plant system response to pulsed drip irrigation and salinity: Bell pepper case study. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 70:1556–1568.
- Atalay, I.Z. 1978. The petiole and the leaf blade relationships for the determination of phosphorous and zinc status of vineyards. *Vitis* 17:147–157.
- Badgujar, C.D., S.S. Deshmukh, S.M. Dusane, and S.S. Shide. 2004. Influence of ‘N’ and ‘K’ fertigation and different plant densities on yield of banana cv. Grand—Naine. *South Indian Horticulture* 52: 22–28.
- Bald, J.G. 1946. A plan of growth, maturity and yield of the potato plant. *Emp. J. Exp. Agric.* 14:43–48.
- Bar, Y. 1995. Iron control system for drip irrigation. Proceedings of the Fifth International Micro—irrigation Congress. Orlando, Florida, USA. pp. 239–247.
- Bar, Y. 1990. Chloride nitrate interaction in avocado rootstocks. M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, The Hebrew University of Jerusalem.
- Barak, P. and Y.Chen 1982. The evaluation of iron deficiency using a bioassay type test.

- Soil Sci. Soc. Am. J. 46:1019–1022.
- Barber, S.A. 1962. A diffusion and mass flow concept of soil nutrients availability. *Soil Sci.* 93:39–49.
- Bar–Yosef, B. 1992. Fertilization under drip irrigation. In: *Fluid Fertilizer, Science and Technology*. Ed. by D.A. Palgrave. Marcel Dekker, New York. pp. 285–329.
- Bar–Yosef, B. 1999. *Advances in Fertigation*. *Adv. Agron.* 65:1–77.
- Bar–Yosef, B. and U. Kafkafi. 1972. Rates of growth and nutrient uptake of irrigated corn as affected by N and P fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 36:931–936.
- Bar–Yosef, B. and M.R. Sheikolslami. 1976. Distribution of water and ions in soils irrigated and fertilized from a trickle source. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40:575–582.
- Bar–Yosef, B., E. Matan, I. Levkovich, A. Assaf, and E. Dayan. 1992. Response of greenhouse tomato (CV F–144) to irrigation and fertilization. ARO, Ministry of Agriculture., Bet Dagan Israel (Hebrew).
- Bates, T.R. 2001. *Vineyard nutrient management*. Lake Erie Grape Research, Cornell University, New York. <http://lenewa.netsync.net/public/Bates/NutrientRec.htm#Chart>
- Bates, T.R., R.M. Dunst, and P. Joy. 2002. Seasonal dry matter, starch, and nutrient distribution in ‘Concord’ grapevine roots. *HortScience* 37:313–316.
- Baudoin, W.O., C. Bester, D. Chemonidou, N. Laws, M. Mohktari, and E. Ozzambak. 2007. *Proc. XXnd Intl. Eucarpia Symp. (Sect. Ornamentals) on Breeding for Beauty (Vol II)*. Eds. A. Mercuri and T. Schiva. *Acta Hort.* 743:25–32. ISHS 2007.
- Becker, S. J., A. Kania, G. Neumann, and V. Römheld. 2004. Effects of urea phosphate and monoammonium phosphate fertilizers on plant earliness in vegetable production. Institute of Plant Nutrition (330), University of Hohenheim, D–70599 Stuttgart.
- Ben–Gal, A. and L.M. Dudley. 2003. Phosphorus availability under continuous point source irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1449–1456.
- Ben–Gal, A., N. Lazarovitch, and U. Shani. 2004. Subsurface drip irrigation in gravel filled cavities. *The Vadose Zone Journal*. 3:1407–1413. A204.
- Ben–Oliel, G., S. Kant, M. Naim, H.D. Rabinowitch, G.R. Takeoka, R.G. Buttery, and U. Kafkafi. 2004. Effects of ammonium to nitrate ratio and salinity on yield and fruit quality of large and small tomato fruit hybrids. *Journal of Plant Nutrition*. 27(10):1795–1812.
- Benton Jones Jr., J. 2004. *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, USA. Benton Jones, J. Jr. 1983. *A guide for the hydroponic and soilless culture grower*. Timber Press. Portland, Oregon, USA.
- Ben–Zioni, A., Y. Vaadia, and S.H. Lips. 1971. Nitrate uptake by roots as regulated by

- nitrate reduction products in the shoot. *Physiol. Plant.* 24:288–290.
- Berenstein, N., A. Bar–Tal, H. Fridman, P. Snir, I. Rot, A. Chazan, and M. Ioffe. 2006. Application of treated wastewater for cultivation of roses (*Rosa hybrida* L.) In: *Soillessculture. Scientia Hortic.* 108: 185–193.
- Berger, J. 1969. The world's major fibre crops: their cultivation and manuring. Centre d'etude del' azote Monographs No. 6. Zurich.
- Bester, D.H., D.C. Lötter, and G.H. Veldman. 1974. Drip irrigation on citrus. In: *Proc. 2nd Intern. Drip Irrigation Congress, San Diego, California, University of California, Riverside.* pp 58–64.
- Black, C.A. 1968. *Soil–plant relationships.* J. Wiley. New York. USA.
- Black, J.D.F. and P.D. Mitchell. 1974. Changes in root distribution of mature pear trees in response to trickle irrigation. In: *Proc. 2nd Intern. Drip Irrigation Congress, San Diego, California, Univ. of California, Riverside.* pp 437–438.
- Boland, A.M., P.D. Mitchell, and P.H. Jerie. 1993. Effect of saline water combined with restricted irrigation on peach tree and water use. *Austr. J. Agric. Res.* 44:799–816.
- Bolt, G. H. 1976. Adsorption of anions by soil. In 'Soil Chemistry'. Eds: G. H. Bolt and M. G. M. Bruggenwert. Elsevier Scientific Publishing Co. New York.
- Bravdo, B. and E.L. Proebsting. 1993. Use of drip irrigation in orchards. *Hortechology* 3:44–49.
- Bravdo, B. and Y. Hepner. 1987. Irrigation management and fertigation to optimize grape composition and vine performance. *Acta Hort.* 206:49–67.
- Bravdo, B., Y. Hepner, C. Loinger, S. Cohen, and H. Tabacman. 1984. Effect of crop level on growth, yield and wine quality of a high yielding Carignane vineyard. *Am. J. Enol. Vitic.* 35(4):247–252.
- Bravdo, B., Y. Hepner, C. Loinger, S. Cohen, and H. Tabacman. 1985. Effect of crop level and crop load on growth, yield, must and wine composition and quality of Cabernet Sauvignon. *Am. J. Enol. Vitic.* 36:125–131.
- Bresler, E. 1977. Trickle–drip irrigation: Principles and application to soil–water management. *Advances in Agronomy* 29:343–393.
- Britto, D.T. and H.J. Kronzucker. 2002. NH_4^+ toxicity in higher plants: a critical review. *Journal of Plant Physiology.* 159:567–584.
- Brown, P.H., N. Bellaloui, M.A. Wimmer, E.S. Bassil, J. Ruiz, H. Hu, H. Pfeffer, F. Dannel, and V. Römheld. 2002. Boron in plant biology. *Plant Biol.* 4: 205–223.
- Bunt, A.C. 1988. Media and mixes for container–grown plants: a manual on the preparation and use of growing media for pot plants. 2nd Edition. Unwin Hyman, Ltd,

- London, 309p.
- Burt, C., K. O'Connor, and T. Ruehr. 1998. Fertigation. Irrigation Training Center, California Polytechnique State University, San Luis Obispo, CA, USA.
- Cabrera R.I., R.Y. Evans, and J.L. Paul. 1995. Cyclic nitrogen uptake by greenhouse roses. *Scientia Horticulturae* 63:57–66.
- Cahoon, G., M. Ellis, R. Williams, and L. Lockshin. 1991. Grapes: Production, Management, and Marketing. Extension Bulletin 815. The Ohio State University, Columbus.
- Carmi, A., Z. Plaut, B. Heuer, and A Grava. 1992. Establishment of shallow and restricted root systems in cotton and its impact on plant response to irrigation. *Irrig. Sci.* 13:87–91.
- Carpenter, P.N. 1957. Mineral accumulation in potato plants. *Maine Agric. Exp. Sta. Univ. of Maine, Orono, Bul.* 562, September.
- Catlin, P.B., G.J. Hoffman, R.M. Mead, and R.S. Johnson. 1993. Long term response of mature plum trees to salinity. *Irrig. Sci.* 13:171–176.
- Chaney, R. L., J. C. Brown, and L. O. Tiffin. 1972. Obligatory reduction of ferric chelates in iron uptake by soybeans. *Plant Physiol.* 50:208–213.
- Chapman, K.S.R. and J.F. Jackson. 1974. Increased RNA labelling in boron-deficient root-tip segments. *Phytochem.* 13:1311–1319.
- Chen, Y. and Y. Inbar. 1985. Growth media: properties and characterization. Faculty of Agriculture, Hebrew University of Jersusalem (In Hebrew).
- Chio, T.F. and C. Bould. 1976. Effect of shortage of calcium and other cations on ⁴⁵Ca mobility, growth and nutritional disorder of tomato plant. *J.Sci. Food Agric.* 27:969–977.
- Christensen, L.P., A.N. Kasimatis, and F.L. Jensen. 1978. Grapevine nutrition and fertilization in the San Joaquin Valley. Publication 4087. Division of Agricultural Sciences, University of California, Berkeley.
- Christensen P. 1984. Nutrient level comparisons of leaf petioles and blades in twenty-six grape cultivars over three years (1979 through 1981), *Am. J. Enol. Vitic.*, 35: 124–133.
- Coelho, P.E., and D. Or. 1996. A parametric model for two-dimensional water uptake intensity in corn roots under drip irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1039–1049.
- Conradie, W.J. 1980. Seasonal uptake of nutrients by 'Chenin blanc' in sand culture: I. nitrogen. *S. Af. J. Enol. Vitic.* 1:59–65.
- Conradie, W.J. 1981. Seasonal uptake of nutrients by Chenin blanc culture: II. phosphorus, potassium, calcium and magnesium. *S.Afr. J. Enol. Vitic.* 2:7–18.
- Conradie, W.J. 1986. Utilization of nitrogen by the grapevine as affected by time of

- application and soil type. *S. Af. J. Enol. Vitic.* 7:76–83
- Conradie, W.J. 1991. Translocation and storage of nitrogen by grapevines as affected by time of application. In *Proceedings of the International Symposium on Nitrogen in Grapes and Wine*. J.M. Rantz (Ed.). American Society for Enology and Viticulture, Davis, CA. pp. 32–42.
- Court, M.N., R.C. Stephen, and J.S. Waid. 1962. Nitrite toxicity arising from the use of urea fertilizer. *Nature* 194:1263–1265.
- Dasberg, S. and D. Or. 1999. *Drip irrigation*. Springer Verlag, Berlin.
- Davies, S.H.R., Morgan, J.J. 1989. Manganese (II) oxidation kinetics on metal oxide surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science* 129: 63 –77.
- DeTar, W.R., G.T. Browne, C.J. Phene, and B.L. Sanden. 1996. Real-time irrigation scheduling of potatoes with sprinkler and subsurface drip systems. In *Proc Int Conf. on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, eds. C.R. Camp, E. J. Sadler, and R.E. Yoder, 812–824. ASAE, St. Joseph, Michigan.
- Duncan, W.G. and A.J. Ohlrogge. 1957. Measuring fertilizer uptake in growing plants with the Geiger counter. *Agron. J.* 49:57–58.
- Eaton, F.M. 1955. Physiology of the cotton plant. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 6:299–328.
- EFMA.(European Fertilizer Manufacturers Association). 2004. *Understanding nitrogen and its use in agriculture* (Karl–Friedrich Kummer and Chris Dawson, editors). Published by EFMA, Brussels, Belgium.
- Elfuvig, D.C. 1982. Crop response to trickle irrigation. In: *Horticultural Reviews*. J. Janick ed. AVI publishing Co. Inc. Westport Conn. USA. pp.1–48.
- El–Mardi, M.O., S.B. Salama, E.C. Consolacion, and M. Al–Solomi. 1998. Effect of treated sewage water on the concentration of certain nutrient elements in date palm leaves and fruits. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29:763–776.
- EPA (Environmental Protection Agency). 1992. *Guidelines for water reuse*. Washington DC, United States Environmental Protection Agency, EPA/625/r–92/004.
- Epstein, E.1999. Silicon. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50:641–665.
- Fabeiro, C., F. Mart í n de Santa Olalla, and J.A. de Juan. 2001. Yield and size of deficit irrigated potatoes. *Agricultural Water Management* 48:255–266.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2002. *Wastewater treatment and use in agriculture–FAO irrigation and drainage paper 47*. ISBN 92–5–103135–5. Rome, Italy.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1990. *Soilless culture for horticultural crop production*. FAO Plant production and protection. Paper 101. Food

- and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. <http://www.naweb.iaea.org/nafa/news/crop-drop-turkey.html>.
- Feigin, A., I. Ravina, and J. Shalhevet. 1991. Irrigation with treated sewage effluent. Management for Environmental Protection. Advances Series in Agricultural Sciences 17. Pub. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York.
- Ferreira, K.N., T.M. Iverson, K. Maghlaoui, J. Barber, and S. Iwata. 2004. Architecture of the Photosynthetic Oxygen-Evolving Center. *Science* 303 (5665):1831–1838.
- Flores, P., J.M. Navarro, M. Caravajal, A. Cerada, and V. Martinez. 2003. Tomato yield and quality as affected by nitrogen source and salinity. *Agronomie* 23:249–256.
- Flynn, R., S.T. Ball, and R.D. Baker. 1999. Sampling for plant tissue analysis. Guide A–123. College of Agriculture, Consumer and Environmental Sciences New Mexico State University
- Ford, H.W. 1982. Iron ochre and related sludge deposits in subsurface drain lines. Circular 671 Florida Cooperative Extension Service, I.F.A.S, University of Florida, Gainesville.
- Frith, G.J.T. and D.G. Nichols. 1975. Nitrogen uptake by apple seedlings as affected by light, and nutrient stress in part of the root system. *Physiologia Plantarum* 34:129–133.
- Ganmore–Newman, R. and U. Kafkafi. 1983. The effect of root temperature and $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ ratio on strawberry plants. I. Growth, flowering and root development. *Agron. J.* 75:941–947.
- Ganmore–Newman, R. and U. Kafkafi. 1985. The effect of root temperature and $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ ratio on strawberry plants. II. Nutrient uptake and plant composition. *Agron. J.* 77:835–840.
- Goldberg, S.D., M. Rinot and N. Karu. 1971. Effect of trickle irrigation intervals on distribution and utilization of soil moisture in vineyard. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35:127–130.
- Goodwin, P.B. 1983. Nitrogen, phosphorus, potassium and iron nutrition of Australian native plants. In Proc National Technical Workshop on Production and Marketing of Australian Wild-flowers for export. Univ. Ext., Univ. West., Nedlands. pp 5–97.
- Groot Obbink, J., and D.M. Alexander. 1977. Observations of soil water and salt movement under drip and flood irrigation in an apple orchard. *Agr. Water Management.* 1:179–190.
- Gupta, A. and M.C. Saxena. 1976. Evaluation of leaf analysis as a guide to nitrogen and phosphorus fertilization of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant and Soil* 44: 597–605.
- Hagin, J. and A. Lowengart. 1996. Fertigation for minimizing environmental pollution by fertilizers. *Fert. Res.* 43:5–7.
- Hagin, J., M. Sneh, and A. Lowengart–Aycicegi. 2002. Fertigation–Fertilization through

- irrigation. IPI Research Topics No. 23. Ed. by A.E. Johnston. International Potash Institute, Basel, Switzerland.
- Halevy, J. 1976. Growth rate and nutrient uptake of two cotton cultivars grown under irrigation. *Agron. J.* 68:701–705.
- Hanan, J.J., W.D. Holley, and K.L. Goldsberry. 1978. Soils and soil mixtures. *Greenhouse management*, Springer-Verlag, pp. 255–322.
- Harmsen, K. and P.L.G. Vlek. 1985. The chemistry of micronutrients in soil. *Fertilizer Research* 7:1–42.
- Hartmann, H.T. and D.E. Kester. 1975. Propagation structure. Media, fertilizers, soil mixtures and containers plant propagation, principles and practices. 3rd ed. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J. pp. 17–55.
- Harward, C.S. 1953. Determination of total dissolved solids in water analysis. *Ind. Eng. Chem.* 5:4–6.
- Haynes, R. J. 1990. Movement and transformations of fertigated nitrogen below trickle emitters and their effects on pH in the wetted soil volume. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 23:105–112.
- Haynes, R.J. 1985. Principles of fertilizer use for trickle irrigated crops. *Fertilizer Research* 6:235–255.
- Hebbar, S.S., B. K. Ramachandrapa, H. V. Nanjappa, and M. Prabhakar. 2004. Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *European Journal of Agronomy* 21:117–127.
- Helling, C.S., G. Chester, and R.B. Corey. 1964. Contribution of organic matter and clay to soil cation-exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28:517–520.
- Henry, L.T. and C. D. Raper, Jr. 1989. Cyclic variations in nitrogen uptake rate of soybean plants; ammonium as a nitrogen source. *Plant Physiol.* 91:1345–1350.
- Hepner, Y. and B. Bravdo. 1985. Effect of crop level and drip irrigation scheduling on the potassium status of Cabernet Sauvignon and Carignane vines and its influence on must and wine composition and quality. *Am. J. Enol. Vitic.* 36:140–147.
- Ho, L.C., R.I. Grange, and A.J. Picken. 1987. An analysis of the accumulation of water and dry matter in tomato fruit. *Plant Cell and the Environment* 10:157–162.
- Hofman, G.J., J.D. Rhoades, and J. Letey. 1990. Salinity Management. In: *Management of farm irrigation systems*. Edited by G.J. Hofman, T.A. Howell, and K.H. Solomon. The American Society of Agricultural Engineers. Michigan. U.S. pp. 667–715.
- Hofman, G.J. and O. Van Cleemput. 1995. Ammoniakvervluchtiging uit kunstrnest.

- Landbouwkundige Uitgeverij G.C. van den berg (ed.). Waddinxveen, The Netherlands, 27 pp.
- Hofman, G.J. and O. Van Cleemput. 2004. Soil and plant nitrogen. International Fertilizer Industry Association (IFA), Paris, France.
- Hu, H. and P.H. Brown. 1997. Absorption of boron by plant roots. *Plant and Soil* 193:49–58.
- Huck, M.G. and D. Hillel. 1983. A model of root growth and water uptake accounting for photosynthesis, respiration, transpiration and soil hydraulics. In: *Advances in Irrigation*, Vol. 2 (D. Hillel Ed.). Academic Press New York. pp. 273–333.
- Huck, M.G. 1970. Variation in tap root elongation rate as influenced by composition of the soil air. *Agron. J.* 62:815–818.
- Ickson–Tal, N., Avraham O., Sack J., Cikurel H. 2003. Water reuse in Israel – the Dan Region Project: evaluation of water quality and reliability of plant’ s operation. *Water Science & Technology: Water Supply* 3:231–237.
- IFA. 1992. *World Fertilizer Use Manual*. W. Wichman (editor) Cotton. 457–471. <http://www.fertilizer.org/ifa/Home–Page/LIBRARY/World–Fertilizer–Use–Manual/bytype–of–crops>.
- Imas, P., B. Bar–Yosef, U. Kafkafi and R. Ganmore–Neumann. 1997a. Release of carboxylic anions and protons by tomato roots in response to ammonium nitrate ratio and pH in solution culture. *Plant and Soil*, 191: 27–34.
- Imas, P., B. Bar–Yosef, U. Kafkafi and R. Ganmore–Newmann. 1997b. Phosphate induced carboxylate and proton release by tomato roots. *Plant and Soil* 191:35–39.
- Israel Water Commission. 2002. *National Water Plan 2002–2010*. <http://www.water.gov.il>
- Jackson, J.F. and H.F. Linskens. 1978. Evidence for DNA repair after ultraviolet irradiation of *Petunia hybrida* pollen. *Molecular and General Genetics* 161,117–120.
- Jackson, R.D. and J.L. Haddock. 1959. Growth and nutrient uptake of Russet Burbank potatoes. *Amer. Potato J.* 36:22–28.
- Jenkins, P.D. and H. Ali. 2000. Phosphate supply and progeny tuber numbers in potato crops. *Annals of Applied Biology* 136:41–46.
- Johnson, H. 2008. *Soilless culture of greenhouse vegetables*. UC Davis, Vegetable Research and Information Center. http://vric.ucdavis.edu/pdf/hydroponics_soillesscultureofgreenhouse%20vegetables.pdf
- Kafkafi, U. 1979. Measurements of available nutrients in the soil for prediction of fertilizer requirements by crops in the Mediterranean region. In: *Soils in Mediterranean type climate and their yield potential*. Proc. 14th Colloq of International Potash Institute, Sevilla, Spain. pp. 225–236.

- Kafkafi, U. 1991. Root growth under stress: Salinity. In: *Plant Roots. The Hidden Half.* Y. Waisel, A. Eshel and U. Kafkafi (Eds.). Marcel Dekker, Inc., New York. pp 375–391.
- Kafkafi, U. 1994. Combined irrigation and fertilization in arid zones. *Israel J. Plant Sci.*42:301–320.
- Kafkafi, U. 2005. Global aspects of fertigation usage. *Fertigation Proceedings, International Symposium on Fertigation Beijing, China. 20–24 September 2005.* pp.8–22.
- Kafkafi, U. 2010. Chlorides in TWW and their effects on plants. In: *Use of treated wastewater in agriculture: impacts on crop and soil environment.* Editors: G.J. Levy, P. Fine and A. Bar–Tal (editors) Publisher: Wiley Blackwell (In print).
- Kafkafi, U. and B. Bar–Yosef. 1980. Trickle irrigation and fertilization of tomatoes in high calcareous soils. *Agron. J.* 72:893–897.
- Kafkafi, U. and R. Ganmore–Newmann. 1985. Correction of iron chlorosis in peanut by ammonium sulfate and nitrification inhibitor. *J. Plant Nutr.* 8:303–310.
- Kafkafi, U. and J. Halevy. 1974. Rates of growth and nutrients consumption of semidwarf wheat. *Trans. Int. Congr. Soil Sci.*, 10th (v. 4): 137–143.
- Kafkafi, U. and S. Kant. 2004. Fertigation. In: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, (Hillel, D.; Rosenzweig, C.; Powlson, D.; Scow, K., Singer, M. and Sparks, D. Eds.), Elsevier Ltd., Oxford, UK, Vol. 2: 1–9.
- Kafkafi, U., B. Bar–Yosef, and A. Hadas. 1978. Fertilization decision model. *Soil Science.*125:261–268.
- Kafkafi, U., G. Xu, P. Imas, H. Magen, and J. Tarchitzky. 2001. Potassium and Chloride in Crops and Soils: The role of potassium chloride fertilizer in crop nutrition. *Research Topics, No. 22.* International Potash Institute, Basel, Switzerland.
- Kafkafi, U., I. Walerstein, and S. Feigenbaum. 1971. Effect of potassium, nitrate and ammonium nitrate on the growth, cation uptake and water requirement of tomato grown in sand soil culture. *Israel J. agric. Res.* 21:13–30.
- Kalayci, M., B. Torun, S. Eker, M. Aydin, L. Ozturk, and I. Cakmak. 1999. Grain yield, zinc efficiency and zinc concentration of wheat cultivars grown in a zinc–deficient calcareous soil in field and greenhouse. *Field Crops Research* 63:87–98.
- Keller, J. and R.D. Bliesner. 1990. *Sprinkle and trickle irrigation.* Van Nostrand Reinhold. New York.
- Khasawneh, F.E., E.C. Sample, and I. Hashimoto. 1974. Reactions of ammonium orthoand polyphosphate fertilizers in soil, I. Mobility of phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 38:446–450.
- Khasawneh, F.E., I. Hashimoto, and E.C. Sample. 1979. Reactions of ammonium orthoand

- polyphosphate fertilizers in soil, II. Hydrolysis and reactions with soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:52–58.
- Kirkby E.A. and A.H. Knight. 1977. Influence of the level of nitrate nutrition on ion uptake and assimilation, organic acid accumulation and cation–anion balance in whole tomato plants. *Plant Physiol.* 60:349–353.
- Kirkby, C.A., L. J. Smythe, J. W. Cox, and D. J. Chittleborough. 1997. Phosphorus movement down a top sequence from a landscape with texture contrast soils. *Aust. J. Soil Res.*, 35:399–417.
- Kleinman, P.J.A., M.S. Srinivasan, A.N. Sharpley, and W.J. Gburek. 2005. Phosphorus leaching through intact soil columns before and after poultry manure application. *Soil Science* 170:153–166.
- Krauss, A. and H. Marschner. 1982. Influence of nitrogen nutrition, day length and temperature on content of gibberellic and abscisic acid and on tuberization in potato plants. *Potato Res.* 25:13–21.
- Kremmer, S. and Kenig E. 1996. Principles of drip irrigation. Irrigation & Field Service. Extension Service, Ministry of Agriculture and Rural Development, Israel (in Hebrew).
- Lamont, B.B. 1972. The effect of soil nutrients on the production of proteoid roots by *Hakea* species. *Aust. J. Bot.* 20:27–40.
- Lamont, B.B., G. Brown, and D.T. Mitchell. 1984. Structure, environmental effects on their formation, and function of proteoid roots in *Leucadendron laureolum* (Proteaceae). *New Phytol.* 97:381–390.
- Lehman, D.S. 1963. Principles of chelation chemistry. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 27 : 167–170.
- Lewis, D. G. and J.P. Quirk. 1965. Diffusion of phosphate to plant roots. *Nature* 205: 765–766.
- Lindsay, W.L. 1979. *Chemical Equilibria in Soils*. Wiley, New York, 449 pp.
- Loganathan, P., A.D. Mitchell, J.A. Hanly, and T.M. Aye. 2005. An improved procedure for determining magnesium fertilizer dissolution in field soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 36:2121–2128.
- Lombi, E., M.J. McLaughlin, C. Johnston, R.D. Armstrong, and R.E. Holloway. 2004. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid mono–ammonium phosphate differs in a calcareous soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:682–689.
- Loué A. 1986. *Les oligo–elements en agriculture* (in French). La Nouvelle librairie–ISBN2.86479.943.X.
- Lucas, R.E., and B.D. Knezek. 1972. Climatic and soil conditions promoting micronutrient

- deficiencies in plants. In: *Micronutrients in Agriculture*. Mortvedt, J.J., Giordano, P.M. and Lindsay, W.L. (eds.). Soil Sci. Soc. America, Madison, p. 265–288.
- Lykas, C., N. Katsoulas, P. Giaglaras, and C. Kittas. 2006. Electrical conductivity and pH prediction in a re-circulated nutrient solution of a greenhouse soilless rose crop. *Journal of Plant Nutrition*, 29:1585–1599.
- Maas, E.V. 1985. Crop tolerance to sprinkling water. *Plant and Soil* 89: 373–354.
- Maas, E.V. 1993. Salinity and citriculture. *Tree Physiol.* 12:195–216.
- MacKerron, D.K.L., and R.A. Jefferies. 1986. The influence of early soil moisture stress on tuber numbers in potato. *Potato Res.* 29:299–312.
- Magen, H. 2005. Potential development of fertigation and its effect on fertilizer use. International Potash Institute (IPI) International Symposium on Fertigation: Optimizing the utilization of water and nutrients, Beijing, September 2005. <http://www.ipipotash.org/udocs/Potential%20development%20of%20fertigation.pdf>.
- Magen, H. and P. Imas. 2003. Fertigation–The Global View. 4th Fertigation Training Course, NWSUAF, September 2003. International Potash Institute, Basel, Switzerland.
- Malchi, I. 1986a. Iron in irrigation water “Hassadeh” , Vol. 66 (Hebrew).
- Malchi, I. 1986b. Personal and internal information, (Netafim Irrigation Inc. U.S.A.)
- Mansell, R. S., H.M. Selim, P. Kanchanasut, J.M. Davidson, and J.G.A. Fiskell. 1977. Experimental and simulated transport of P through sandy soils. *Water Resources Research* 13:189–194.
- Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. AP London.
- Martinez Hernandez, J.J., B. Bar–Yosef and U. Kafkafi. 1991. Effect of surface and subsurface drip fertigation on sweet corn rooting, uptake, dry matter production and yield. *Irrig. Sci.* 12: 153–159.
- Mattos Jr. D, D. Donald, A. Graetz, and A.K. Alva. 2003. Biomass distribution and nitrogen–15 partitioning in citrus trees on a sandy entisol. *Soil Science Society of America Journal* 67: 555–563.
- Maurer, M., D. Abramovich, H. Siegrist, and W. Gujer. 1999. Kinetics of biologically induced phosphorus precipitation in waste–water treatment. *Water Research* 33:484–493.
- McBeath, T.M., R.J. Smernik, E. Lombi, and M.J.McLaughlin. 2006. Hydrolysis of pyrophosphate in a highly calcareous soil: A solid–state phosphorus–³¹NMR study. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:856–862.
- McCarthy, M.G. and W.J.S Downton. 1981. Irrigation of grapevines with sewage effluent. II. Effects on wine composition and quality. *Amer. J. Enology and Viticulture* 32:197–

- 199.
- Mendes, H.C. 1960. Nutricao do algodoeiro. *Baragantia*, 19:435–458.
- Mikkelsen, R.L and B.R. Bock. 1988. Ammonia volatilization from urea fertilizers. In: *TVA Bulletin* p. 175–189.
- Millard P. and G.H. Neilsen. 1989. The influence of nitrogen supply on the uptake and remobilization of stored N for the seasonal growth of apple trees. *Annals of Botany* 63: 301–309.
- Mmolawa, K. and D. Or. 2000. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. *Plant and Soil* 222:163–190.
- Mohammad, M.J., S. Zuraiqi, W. Quasmeh, and I. Papadopoulos. 1999. Yield response and nitrogen utilization efficiency by drip-irrigated potato. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 54:243–249.
- Moody, P.W. and R.L. Aitken. 1997. Soil acidification under some tropical agricultural systems. I. Rates of acidification and contributing factors. *Aust. J. Soil Res.* 35:163–173.
- Morgan, J.J. 2005. Kinetics of reaction between O₂ and Mn(II) species in aqueous solutions. *Geochimica et Cosmochimica. Acta* 69: 35–48.
- Moran, K. 2004. Micronutrient product types and their development. *Proceedings No. 545, International Fertilizer Society, York, UK.* 1–24.
- Moritsugu M. and Kawasaki T. 1983. Effect of nitrogen sources on growth and mineral uptake in plants under nitrogen restricted culture solution. *Berichte de Okayama Instituts fur landwirtschaftliche Biologie, Okayama Universitat* 18:145–158.
- Moritsugu M., T. Suzuki, and T. Kawasaki. 1983. Effect of nitrogen sources on growth and mineral uptake in plants under constant pH and conventional culture solution. *Berichte de Okayama Instituts fur landwirtschaftliche Biologie, Okayama Universitat* 18:125–144.
- Mullins, G.L. and C.H. Burmester. 1990. Dry matter, nitrogen phosphorus, and potassium accumulation by four cotton varieties. *Agronomy J.* 82:729–736.
- Muñoz-Carpena, R., A. Ritter, A.R. Socorro, and N. Pérez. 2002. Nitrogen evolution and fate in a Canary Islands (Spain) sprinkler fertigated banana plot. *Agricultural Water Management*, 52:93–117.
- Mussaddak, J. 2007. Efficiency of nitrogen fertilizer for potato under fertigation utilizing a nitrogen tracer technique. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 38:2401–2422.
- Myers, B. A., D.W. West, L. Callinan, and C.C. Hunter. 1995. Long term effects of saline

- irrigation on the yield and growth of mature “Williams” pear trees. *Irrig. Sci.* 16: 35–46.
- Nakayama, F.S. and D.A. Bucks. 1986. *Trickle irrigation for crop production*, Elsevier Science Publishers B. V. (p 383).
- Nakayama F. S., and D.A. Bucks. 1991. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. *Irrigation Science* 12: 187–192.
- Primary Industry: Agriculture. 2000. Horticultural fertigation—techniques, equipment and management. Industry and Investment, New South Wales, Australia. <http://www.dpi.nsw.gov.au/agriculture/resources/water/irrigation/crops/publications/fertigation>.
- Nichols D.G., D.L. Jones, and D.V. Beardsell. 1979. The effect of phosphorus on the growth of *Grevillea* ‘Poorinda Firebird’ in soil-less potting—mixtures. *Scientia Hort.* 11:197–206.
- Noy, J. and D. Yoles. 1979. Precipitates formed by APP 11–37–0 in irrigation water. *Hassadeh* 59:2129–2130 (In Hebrew).
- Oertli, J.J. and E. Grgurevic. 1975. Effect of pH on the absorption of boron by excised barley roots. *Agronomy J.* 67:278–280.
- Onder, S., M.E. Caliskan, D. Onder, and S. Caliskan. 2005. Different irrigation methods and water stress effects on potato yield and yield components. *Agricultural Water Management.* 73:73–86.
- Ottman, M.J., T.L. Thompson, and T.A. Doerge. 2006. Alfalfa yield and soil phosphorus increased with top dressed granular compared with fluid phosphorus fertilizer. *Agron. J.* 98:899–906.
- Ozanne, P. G., D.J. Kirton, and T.C. Shaw. 1961. The loss of P from sandy soils. *Australian Journal of Agricultural Research* 12:409–423.
- Papadopoulos, I. 1992. Phosphorus fertigation of trickle-irrigated potato. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 31:9–13.
- Paradiso, R., G. Raimondi, and G. De Pascale. 2003. Growth and yield of rose in a closed soilless system on two inert substrates. *Proc. 6th IS on Protected Cult.* Eds: G. La Malfa et al. *Acta Hort* 614:193–198. ISHS 2003.
- Peacock, W.L., L.P. Christensen, and F.E. Broadbent. 1989. Uptake, storage, and utilization of soil-applied nitrogen by ‘Thompson Seedless’ as affected by time of application. *Am. J. Enol. Vitic.* 40:16–20.
- Penningsfeld, F. 1978. Substrates for protected cropping. *Acta Horticulturae* 82:13–22.
- Peverill, K. I. and L.A. Douglas. 1976. Use of undisturbed cores of surface soil for investigating leaching losses of S and P. *Geoderma* 16:193–199.

- Pierzynski, G. M., J.T. Sims, and G.F. Vance. 1994. *Soils and Environmental Quality*. Lewis Publishers: Boca Raton, FL.
- Poole, R.T., C.A. Conover, and J.N. Joiner. 1981. Soils and potting mixtures. Foliage plant production. J.N. Joiner (ed.). Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., pp.179-202.
- Primary Industries: Agriculture. 2005. Horticultural fertigation- techniques, equipment and management. Industry and Investments. New South Wales, Australia. <http://www.dpi.nsw.gov.au/agriculture/resources/water/irrigation/crops/publications/fertigation>
- Prior, L.D., A.M. Grieve, and B.R. Culis. 1992a. Sodium chloride and soil texture interaction in irrigated field grown Sultana grapevines I. yield and fruit quality. *Austr. J. Agric.Res.* 43:1051-1066.
- Prior, L.D., A.M. Grieve, P.G. Slavich, and B.R. Culis, B.R. 1992b. Sodium chloride and soil texture interactions in irrigated field grown Sultana grapevines. 3. Soil and root system effects. *Aust. J. Agric. Res.* 43:1085-1100.
- Rajan, S.S S., K.W. Perrott, and W.M.H. Saunders. 1974. Identification of phosphate reactive sites of hydrous alumina from proton consumption during phosphate adsorption at constant pH values. *Journal of Soil Science* 25:438-447.
- Reboll, V., M. Cerezo, A. Roig, V. Flors, L. Lapena, and P. Garcia-Agustin, 2000. Influence of wastewater vs. groundwater on young citrus trees. *J. Sci. Food and Agric.* 80:1441-1446.
- Reddy, B.M.C., K. Srinivas, P. Padma, and H.B. Raghupathi. 2002. Response of Robusta banana to N and K fertigation. *Indian J. of Hort.* 59:342-348.
- Richards L.A. (editor) 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkalai soils*. Agriculture Handbook No.60. USDA Washington DC, USA.
- Richards, S.J., J.E. Warneka, A.W. Marsh, and F.K. Aljibury. 1964. Physical properties of soil mixes used by nurseries. *Calif. Agr.* 18:12-13.
- Robertson, W.C., F.E. Groves, R. Hagen Jr., L. Espinoza, M. Ismanov, and R. Franks. 2007. Evaluation of drip irrigation for cotton in Arkansas. In: *Summaries of Arkansas cotton research 2006*, AAES research series 552, DM Oosterhuis ed. pp 73-77.
- Robinson J.B. 2000. The mineral nutrition of wine grapes in Australia. *Acta Hort.* 512 ISHS.
- Roddy, E. 2006. Fertigation Fertilizer Sources. www.omafra.gov.on.ca/english/crops/hort/news/vegnews/2006/vg0406a2.htm.
- Rolston, D.E., R.S. Rauschkolb, and D.L. Hoffman. 1975. Infiltration of organic phosphate compounds in soil. *Soil Science Society of America* 39:1089-1094.
- Romero, F., H. Taber, and R. Gladon. 2006. Nitrogen source and concentration affect

- growth and performance of bedding-plant Impatiens. *J. Plant Nutrition*, 29:1315–1326.
- Römheld, V. 2000. The chlorosis paradox: Fe inactivation as a secondary event in chlorotic leaves of grapevine. *J. Plant Nutrition*, 23: 1629–1643.
- Roy, R.N., A. Finck, G.J. Blair, and H.L.S. Tandon. 2006. *Plant Nutrition for Food Security. A guide for integrated nutrient management*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 16. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Russell EJ. 1950. *Soil Conditions and Plant Growth*, 8th ed. London: Longmans Green & Co.
- Ryan, J. and H. Tabbara. 1989. Urea phosphate effects on infiltration and sodium parameters of a calcareous sodic soil. *Soil Sci Soc of Am J* 53:5 p 1531–1536.
- Sagi, M., C. Scazzocchio, and R. Fluhr. 2002. The absence of molybdenum co-factor sulfuration is the primary cause of the flacca phenotype in tomato plants. *The Plant J.* 31:305–317.
- Sagiv, B., J. Ben-Asher, B. Bar-Yosef, U. Kafkafi and D. Goldberg 1974. Combined irrigation and fertilization of tomatoes grown on sand dunes. Symposium Israel-France on ecological research on development of arid zones (Mediterranean deserts) with winter precipitation. Special Publication 39, Dept. of Scientific publications ARO, Volcani Center. Bet Dagan, Israel.
- Sammis, T.W. 1980. Comparison of sprinkler, trickle, subsurface and furrow irrigation methods for row crops. *Agron. J.* 72:701–704.
- Santos, F.L. 1996. Quality and maximum profit of industrial tomato as affected by distribution uniformity of drip irrigation system. *Irrigation and Drainage Systems* 10:281–294.
- Scaife, A. and B. Bar-Yosef. 1995. *Nutrient and fertilizer management in field grown vegetables*. IPI Bulletin No. 13. International Potash Institute, Basel, Switzerland.
- Scaife, A. and M. Turner. 1983. *Diagnosis of mineral disorders in plants*. Vol. 2. Vegetables. J.B.D. Robinson (ed.). Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. London.
- Shae, J.B., D.D. Steele, and B.L. Gregory. 1999. Irrigation scheduling methods for potatoes in the Northern Great Plains. *American Society of Agricultural Engineers* 42:351–360.
- Shalhevet, J., D. Shimshi, and T. Meir. 1983. Potato irrigation requirements in a hot climate using sprinkler and drip method. *Agron. J.* 75:13–16.
- Shannon, M.C. and C.M. Grieve, 1999. Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horticulturae*, v.78, p.5–38.
- Sharpley, A. N., T.C. Daniel, and D.R. Edwards. 1993. P movement in the landscape.

- Journal of Production Agriculture 6:492–500.
- Shimshi, D. and M. Susnoschi. 1985. Growth and yield studies of potato development in a semiarid region. 3. Effect of water stress and amounts of nitrogen top dressing on physiological indices and on tuber yield and quality of several cultivars. *Potato Res.* 28:177–191.
- Shock, C.C., E.B. Feibert, L.D. Saunders. S.R. James. 2003. Umatilla Russet' and 'Russet Legend' Potato Yield and Quality Response to Irrigation. *HortScience*, 38:1117–1121.
- Shorrocks, V.M., 1997. The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant Soil* 193:121–148.
- Shock, C.C., Z.A. Holmes, T.D. Stieber, E.P. Eldredge, and P. Zhang. 1993. The effect of timed water stress on quality, total solids and reducing sugar content of potatoes. *Am. Potato J.* 70:227–241.
- Silber, A., B. Bar-Yosef, I. Levkovitch, L. Kautzky, D. Minz. 2008. Kinetics and mechanisms of pH-dependent Mn(II) reactions in plant-growth medium. *Soil Biology and Biochemistry*. 40:2787–2795.
- Silber, A., M. Bruner, E. Kenig, G. Reshef, H. Zohar, I. Polaski, H. Yehezkel, D. Shmuel, S. Cohen, M. Dinar, E. Matan, I. Dinkin, Y. Cohen, L. Karni, B. Aloni, and S. Assouline. 2005. High fertigation frequency and phosphorus level: effects on summer-grown bell pepper growth and blossom-end rot incidence. *Plant and Soil*: 270: 135–146.
- Silber, A., G. Xu, I. Levkovitch, S. Soriano, A. Bilu and R. Wallach. 2003. High fertigation frequency: the effects on uptake of nutrients, water and plant growth. *Plant and Soil* 253: 467–477.
- Silber A., R. Ganmore-Neumann, and J. Ben-Jaacov. 1998. Effects of nutrient addition on growth and rhizosphere pH of *Leucadendron* 'Safari Sunset'. *Plant and Soil* 199:205–211.
- Silberbush, M., B. Gornat, and D. Goldberg. 1979. Effect of irrigation from a point source (trickling) on oxygen flux and on root extension in the soil. *Plant and Soil* 53:507–514.
- Simonne, E., N. Ouakrim, and A. Caylor. 2002. Evaluation of an irrigation scheduling model for drip-irrigated potato in southeastern United States. *HortScience* 37:104–107.
- Smajstrla, A.G., S.J. Locascio, D.P. Weingartner, and D.R. Hensel. 2000. Subsurface drip irrigation for water table control and potato production. *Appl. Eng. Agric.* 16:225–229.
- Sne, M. 2006. Micro irrigation in arid and semi-arid regions. Guidelines for planning and design. Ed. by S.A. Kulkarni. ICID-CIID. International Commission on Irrigation and Drainage. New Delhi, India.
- Snyder, R.G. and J.G. Thomas. 2007. Publication 2037. Extension Service of Mississippi

- State University, cooperating with U.S. Department of Agriculture. <http://msucares.com/pubs/publications/p2037.htm>
- Soil Fertility Manual. 2003. Potash and Phosphate Institute. ISBN#0-9629598-5-5.
- Sonneveld, C. and W. Voogt. 1997. Effects of pH value and Mn application on yield and nutrient absorption with rockwool grown gerbera. *Acta Horticulturae* 450: 139-147.
- Sosnitsky P. 1996. Salinity, potassium and N nutrition effect on lycopene content of processing tomato. MSc. Thesis, Faculty of Agriculture, Rehovot, Israel. Supervised by U. Kafkafi (in Hebrew).
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition. 1998. Lenore S. Clesceri, WEF, Chair. Arnold E. Greenberg, APHA. Andrew D. Eaton (Eds.), AWWA. American Public Health Association 1015 Fifteenth Street, NW Washington, DC 2005-2605.
- Steyn, J.M., H.F. Du Plessis, P. Fourie, and T. Ross. 2000. Irrigation scheduling of drip irrigated potatoes. *Micro-irrigation technology for developing agriculture*. 6th International Microirrigation Congress. South Africa. October 22-27, 2000.
- Susnoschi, M. and D. Shimshi. 1985. Effect of water stress and amounts of nitrogen top dressing on growth of several cultivars. *Potato Res.* 28:161-176.
- Tanaka, A., K. Fujita, and K. Kikuchi. 1974. Nutro-physiological studies of the tomato plant I. Outline of growth and nutrient absorption. *Soil Science Plant Nutrition* 20:57-68.
- Tarchitzky, J. and G. Eitan. 1997. Irrigation with wastewater. Recommendations for sampling and analyzing. Soil & Water Extension Service, Ministry of Agriculture and Rural Development, Israel. (In Hebrew).
- Tarchitzky, J., M. Bar-Hay, A. Lowengart-Aycicegi, M. Peres, A. Zilberman, E. Kenig, E., Y. Menashe, Y. Gal, A. Eizenkot, Y. Eisenstadt. 2004. "National survey on treated wastewater" . Extension Service. Ministry of Agriculture and Rural Development. Israel (In Hebrew).
- Tarchitzky, J., O. Lerner, U. Shani, A. Guilboa, A. Loewengart-Acyicii, and A. Brener, and Y. Chen . 2007. Water distribution pattern in treated-wastewater-irrigated soils: hydrophobicity effect. *European J. Soil Sci.* 58:573-588.
- Teixeira, L.A.J., W. Natale, and C. Ruggiero. 2002. Nitrogen and potassium fertilization of 'Nanicao' banana (*Musa aaa cavendish* subgroup) under irrigated and nonirrigated conditions. *Acta Hort.* (ISHS) 575: 71-779.
- Terman G.L. and Hunt, C.M. 1964. Volatization losses of nitrogen from surface-applied fertilizers, as measured by crop response. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28:667-672.

- Tisdale, S.L., W.L. Nelson, and J.D. Beaton. 1985. *Soil Fertility and Fertilizers*. Macmillan Publishing Company, New York.
- Van Beusichem M.L., Kirkby, E.A. and Baas R. 1988. Influence of nitrate and ammonium nutrition, and the uptake, assimilation and distribution of nutrients in *Ricinus communis*. *Plant Physiol.* 86: 914–921.
- Van Delden Arnout 2001. Yield and growth components of potato and wheat under organic nitrogen management. *Agronomy J.* 93:1370–1385.
- Van Tuil, H.D.W. 1965. Organic salts in plants in relation to nutrition and growth. *Ctr. For Agric. Pub and Docu. Wageningen. Agric. Res. Rep. No. 657.*
- Vangush A. and Keren R. 1995. Saline water and saline sources In: Israel shore aquifer: Hydrogeochemical aspects. *Water and Irrigation* 340:4–11. (Hebrew).
- Verdonck, O. 1981. The influence of the substrate to plant growth. *Acta Horticulturae* 126:251–258.
- Verdonck, O. 1983. Reviewing and evaluation of new materials used as substrates. *Acta Horticulturae* 150:467–473.
- Volder, A. Smart, D. R. Bloom, A.J., Eissenstat, D.M. 2005. Rapid decline in nitrate uptake and respiration with age in fine lateral roots of grape: implications for root efficiency and competitive effectiveness. *New Phytologist* 165:493–502.
- Volk, G.M. 1959. Volatile loss of ammonia following surface application of urea to turf or bare soils. *Agron. J.* 51:746–749.
- Voss R.D. 1993. Corn. In: *Nutrients deficiencies and toxicities in crop plants*. W.F. Bennet (ed.). The American Phytopathological Society, St. Paul, Minnesota, USA.
- Waddell, J.T., S.C. Gupta, J.F. Moncrief, C.J. Rosen, and D.D. Steele. 1999. Irrigation and nitrogen management effect on potato yield, tuber quality, and nitrogen uptake. *Agron. J.* 91:991–997.
- Waddell, J.T., S.C. Gupta, J.F. Moncrief, C.J. Rosen, and D.D. Steele. 2000. Irrigation and nitrogen–management impacts on nitrate leaching under potato. *Environ. Qual.* 29:251–261.
- Walker, R.R., D.H. Blackmore, and P.R. Clingelffer. 1996. Salinity–vine vigor interactions and their effect in fruitfulness and yield of Sultana on Ramsy and own roots. *Aust. Dried Fruit News*, NS 23:16–18.
- Watt, M. and J.R. Evan, 1999. Proteoid roots: Physiology and development. *Plant Physiology*, American Society of Plant Physiologists. 121:317–323.
- Westcot, D.W. and R.S. Ayers. 1985. Irrigation water quality criteria. In: *Irrigation with reclaimed municipal wastewater: A guidance manual*. G.S. Pettygrove and T. Asano

- (Eds.). Lewis Publishers, Inc. Chelsea, MI.
- Wilson, G.C.S. 1984. The physico-chemical properties of horticultural substrates. *Acta Horticulturae* 150: 19-32.
- Winsor, G., P. Adams, P. Fiske, and A. Smith. 1987. Diagnosis of mineral disorders in plants. London (UK). Her Majesty's Stationary Office. V. 3, 168 p.
- Xu, G.H., H. Magen, J. Tarchitzky, and U. Kafkafi. 2000. Advances in chloride nutrition of plants. *Advances in Agronomy* 68: 97-150.
- Xu, G.H., S. Wolf, and U. Kafkafi. 2001. Effect of varying nitrogen form and concentration during growing season on sweet pepper flowering and fruit yield. *J. Plant Nutr.* 24:1099-1116.
- Yermiyahu, U. and U. Kafkafi. 2009. Higher yields and reduction incidence of stem brittle in white carnation by increasing potassium concentration and $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ ratio in the fertigation medium. *International Fertilizer Correspondence (IFC)*, June 2009. International Potash Institute, Horgen, Switzerland. <http://www.ipipotash.org/eifc/2009/20/2>.
- Yermiyahu, U., S. Nir, G. Ben Hayyim, U. Kafkafi, and T.B. Kinraide. 1997. Root elongation in saline solution related to calcium binding to root cell plasma membranes. *Plant and Soil* 191:67-76.
- Yogev, H. 1986. Radiation effects on translocation and assimilation partitioning in the cotton canopy. Ph. D. thesis, Faculty of Agriculture, Rehovot.
- Zartman, R.E., L. Rosado-Carpio, and R.H. Ramsey. 1992. Influence of trickle irrigation emitter placement on yield and grade distribution of potatoes. *HortTechnology* 2:387-391.
- Zekri, M. and R.C.J. Koo. 1994. Treated municipal wastewater for citrus irrigation. *J. Plant Nutr.* 17:693-708.
- Zhang J., L. Jiu Sheng, R. MinJie. 2004. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Agricultural Water Management*, 67:89-104.
- Zhang, H., D. Smeal, R.N. Arnold, and E.J. Gregory. 1996. Potato nitrogen management by monitoring Petiole nitrate level. *J. Plant. Nutr.* 19:1405-1412.
- Zhang, M., Alva, A.K. Li, Y. C. and Calvert. D. V. 1996. Root distribution of grapefruit trees under dry granular broadcast vs. fertigation method. *Plant and Soil* 183:79-84.

图书在版编目 (CIP) 数据

灌溉施肥 : 水肥高效应用技术 / (以) 卡夫卡费,
(阿根廷) 塔奇特斯基著 ; 田有国译. — 北京 : 中国农
业出版社, 2013.7

ISBN 978-7-109-18009-3

I. ①灌… II. ①卡… ②塔… ③田… III. ①肥水管
理 IV. ①S365

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第160898号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路2号)

(邮政编码 100125)

责任编辑 杨桂华

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2013年8月第1版 2013年8月北京第1次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 9.25

字数: 245千字

定价: 58.00元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)