

高效施肥

BETTER CROPS CHINA

2016年10月总第37期

本期文章……

不同栽培方式与施肥对马铃薯产量及其水分利用效率的影响



前瞻性养殖农场项目措施—实施保护性措施对减少化肥和粪肥养分从农场流失的效果



土壤钾素养分和理化性质对生物炭的响应



更多文章 敬请关注



高效施肥

国际植物营养研究所系列期刊
《BETTER CROPS》中文版专刊

2016年10月总第37期

主 编 何 萍
编 辑 陈 防 涂仕华 李书田
孙桂芳

国际项目部

Saskatoon, Saskatchewan, Canada
Kaushik Majumdar, Vice President, IPNI
Asia, Africa, and Middle East Group

理事会

Norbert Steiner, Chairman (K+S Aktiengesellschaft)
Tony Will, Vice Chair (CF Industries)
Dmitry Osipov, Finance Committee Chair (Uralkali)

IPNI 总部

Norcross, Georgia, USA
T.L. Roberts,
President, IPNI

美洲和大洋洲项目部

Brookings, South Dakota, USA
P.E. Fixen, Senior Vice President, IPNI Americas and
Oceania Group and Director of Research

东欧/中亚项目部

Moscow, Russia
Svetlana Ivanova, Vice President, IPNI Eastern Europe
/ Central Asia

中国项目部

何 萍 主 任 北京办事处 phe@ipni.net
李书田 副主任 北京办事处 sli@ipni.net
孙桂芳 女 士 北京办事处 gfsun@ipni.net
陈 防 副主任 武汉办事处 fchen@ipni.net
涂仕华 副主任 成都办事处 stu@ipni.net

会员公司:

Agrium Inc. • Arab Potash Company • BHP Billiton •
CF Industries Holdings, Inc. • Compass Minerals Plant
Nutrition • International Raw Materials LTD • K+S KALI
GmbH • Kingenta Ecological Engineering Group Co. •
LUXI Fertilizer Industry Group • OCP S.A. • PhosAgro •
PotashCorp • Shell Sulphur Solutions • Simplot • Sinofert
Holdings Limited • SQM • The Mosaic Company •
Uralchem, JSC • Uralkali • Yara International ASA .

CONTENTS

目录

化学肥料减施增效调控途径 周 卫	3
我国有机肥资源与利用 刘晓永 李书田	6
作物推荐施肥方法研究进展 串丽敏 何 萍 赵同科	9
基于养分专家系统 (NE) 的江西省双季稻化肥减施效果 柳开楼 胡惠文 余喜初 李大明 杨富强 叶会财 徐小林 周利军 胡志华 黄庆海	17
双季稻田土壤基础地力和养分利用效率对长期施肥的响应 鲁艳红 廖育林 聂 军 周 兴 谢 坚 杨曾平	22
钾肥品种对加工番茄生长发育及产量品质的影响 王金鑫 李青军 张 炎	29
不同栽培方式与施肥对马铃薯产量及其水分利用效率的影响 张平良 郭天文 李书田 刘晓伟 曾 骏	35
两种控释氮肥养分释放特性及其在双季水稻上的应用效果 廖育林 鲁艳红 聂 军 周 兴 谢 坚 杨曾平	39
基于植物营养的荔枝龙眼果实异常现象的初步诊断 姚丽贤 周昌敏 何兆桓 姜子德 白翠华 涂仕华	47
前瞻性养殖农场项目措施—实施保护性措施对减少化肥和 粪肥养分从农场流失的效果 谢 玲 译 涂仕华 校	53
土壤钾素养分和理化性质对生物炭的响应 姜 敏 顾焱明 李志国 聂新星 王 利 陈 防	56
地表覆草对坡地表层土壤有机碳动态变化影响 顾焱明 李志国 聂新星 姜 敏 陈 防	61
2016 年 IPNI 研究生奖学金评选结果揭晓	68

网页: <http://www.ipni.net>
<http://china-zh.ipni.net>

The Government of Saskatchewan helps make this publication possible through its resource tax funding. We thank them for their support of this important educational project.

此刊物由加拿大萨斯喀彻温省政府资助。
特此致谢!

《高效施肥》为 IPNI 中国项目部的出版物，每年五月及十月各一期。
本刊物以推动科学化的合理施肥为目标。
可免费向北京、武汉、成都办事处索取。

化学肥料减施增效调控途径

周卫

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所)

摘要: 针对我国化肥不合理施用引起环境污染等问题,分析了肥料利用率低的主要原因,剖析了欧美发达国家提高肥料利用率的主要途径;从推荐施肥方法,化肥有机替代、新型肥料创制、面向智能机具的基础研究等方面综述了化肥减施增效研究的主要进展,提出未来主要任务包括建立先进推荐施肥方法与养分限量标准,实施有机养分替代化肥策略,创制高效新型肥料,研发智能化施肥技术与装备,为我国化肥用量零增长行动提供有力支撑。

关键词: 化肥减施增效; 推荐施肥; 有机替代; 新型肥料; 智能机具

1 国内现状

肥料是国家粮食安全的重要保障。我国化肥过量施用严重,肥料利用率低。我国常年化肥用量高达6000万吨,占世界化肥消费总量的35%。单位耕地面积化肥用量是世界平均水平的3倍,是欧美国家的2.5倍。肥料利用率氮30%—35%,磷10%—20%,远低于发达国家。肥料利用率低的主要有四方面原因,一是养分管理方法局限。我国东北、华北和长江中下游过量施肥严重,但测土施肥实现困难,土壤氮素至今缺少满意的测试方法,土壤测试不及时或条件不具备,小农户不可能都测土施肥;二是有机肥料替代困难。有机肥料资源未能充分利用,畜禽有机肥还田率不到一半,秸秆还田率仅35%,有机肥和秸秆在土壤中微生物转化缓慢,养分释放难以匹配作物需求。秸秆还田C/N过高,微生物与作物争氮,造成减产;三是肥料品种结构不足。氮肥易于损失,总损失率43%,缓控释氮肥缺乏;磷肥土壤固定强烈(40%—80%),大量磷素蓄积,微生物活化土壤磷的潜力远未发挥;作物专用复混肥料、水溶肥料、微生物肥料产品不足,急需优化升级;四是施肥机具方式落后。传统人工施肥方式仍然占主导地位,化肥撒施、表施普遍,浪费严重。机械化施肥较少,仅占主要农作物种植面积30%左右,精准施肥、水肥一体化等智能化施肥基础薄弱。过量施肥造成水体富营养化、温室气体增排、土壤酸化等生态环境问题,引起世界广泛关注。若不加控制,到2030年化肥用量将达8000万吨,氮排放增长50%。

2 国际趋势

化学肥料减施是全球性重大科学命题,发达国家优先得以解决。欧美发达国家自上世纪五十年代开始,化肥用量快速增加,到八十年代达到顶峰,引发了一系列的生态环境问题。为此,这些国家采用一系列调控措施,欧洲氮磷化肥用量随之分别下降30%和50%而粮食产量保持稳定,美国则实现了化肥用量零增长而粮食产量持续增加,从而实现了化肥的科学减施。发达国家的主要有以下调控措施:一是建立先进的推荐施肥方法,制订养分限量标准。欧盟、英国、德国、丹麦等肥料立法,颁布养分限量标准;加拿大制定《肥料法令》和《肥料管理条例》;美国倡导4R施肥技术,各州均建有计算机推荐施肥专家系统。二是充分发挥有机肥料替代化肥的作用。秸秆还田列入国际持续农业的关键技术之一,美国每年秸秆还田量约占秸秆总量的68%,最高达90%。2013年美国出版的《微生物养活世界》一书,认为有机肥与无机肥配施下化肥可减施20%,作物增产20%。三是创制新型肥料。欧美日的复合肥料和作物专用肥占据市场主导地位,并注重研发与作物养分需求匹配的缓控释肥料、速溶肥料等新型肥料。四是研发智能机具。美国研发智能化精准施肥机具,日本研发化肥深施机械,以色列大力发展水肥一体化技术与装备,大幅度提高肥料利用率。与发达国家比较,我国的差距主要体现在推荐施肥实现困难,肥料限量标准缺失;以化学肥料为主,有机替代不足;肥料技术跟踪国际,创新产品少;施肥装备缺乏智能化配套。因此,建立先进养分管理

方法、实施有机肥料替代策略、创制新型高效肥料、研发智能化施肥机具是实现化学肥料减施增效的关键。

3 研究进展

在 973 计划、国家科技支撑计划、公益性农业行业科研专项、IPNI 重大国际合作项目等支持下，围绕化学肥料减施增效调控途径，研究团队在以下方面取得重要进展。

(一) 建立推荐施肥新方法。中国农业科学院农业资源与农业区划研究所和国际植物营养研究所近年来提出了基于作物产量与农学效率的推荐施肥方法，并将其结合现代信息技术研发形成界面友好，操作简单的 NE 养分专家系统。该方法既适合当前我国以小农户为主体的国情，也适合大面积区域推荐施肥，可以在没有土壤测试的条件下应用，是一种轻简化的推荐施肥方法。大量田间验证试验表明，该方法在保证作物产量的前提下，能够科学减施氮肥和磷肥 20%–30%，提高了氮肥利用率 10 个百分点以上，也推动了钾肥的平衡施用，增加了农民收入^[1-3]。这种协调经济、社会和环境效应的养分管理方法，是当前施肥技术的重要革新和极具突破性的激动人心的重大进展，显示出强劲而广阔的应用前景。

(二) 实施有机肥料替代化肥策略。田间试验表明，玉米、小麦有机肥施用可当季减施化肥氮磷 50%–60%，水稻可减施 35%–55%，最适施氮量下可替代氮素 20%；发现单施 N 肥处理增加氨氧化细菌的多样性，特别是亚硝化螺菌(Cluster 3, 4)的条带数显著增加，而有机肥更有利于 AOA 生长；长期施用化肥，有利于放线菌和硝化螺菌的生长，有机肥将这种已改变的细菌群落向其初始状态恢复^[4-6]；建立秸秆还田碳氮互作调氮方法，提出氮肥基追比黑龙江玉米 1:2，河南玉米和小麦 7:3，湖北小麦 7:3，水稻 7:3 或 8:2，江西水稻 6:4。发现秸秆还田提高了硝化螺菌 AOB、根瘤菌 nirK、产黄杆菌和变形菌 nirS 等相关基因丰度，目前正利用 SIP 技术研究有机肥和秸秆微生物转化。

(三) 创制新型高效肥料。发明了低成本、易降解系列肥料用缓释材料，解决了成本高、降解难的技术难题；研究菌根及溶磷微生物提高磷素吸收的机理，华北小麦应

用解磷菌和解磷菌 – AMF 提高了产量，湖北水稻应用兼性厌氧枯草芽孢杆菌可减施磷肥 30%；研创含硫增效复混肥料，专用肥含 S4%，NPK46%，水稻、油菜、蔬菜平均增产分别为 8.5%、10.5% 和 9.8%；研发出含有热带假丝酵母、米曲霉、木霉菌、及枯草芽孢杆菌等高效秸秆腐熟菌剂，比现有腐熟剂缩短 1/3 腐解时间；研发高效钙肥等水溶肥料，解决了我国果树和蔬菜严重缺钙难题。

(四) 开展了面向智能化施肥机具研发的基础研究。研究面向化肥机械深施的根区施肥技术，提出了水稻、小麦和玉米根区的适宜氮素浓度，通过根区施肥，黑龙江玉米节氮 40%，增效 17%；湖北单季稻节氮 27%，增产 20%；江西双季稻节氮 15%，增产 35%；研究了智能化精准施肥技术，通过研究养分空间变异、确定管理单元、制订精准施肥方案，增产水稻 9.0%–12.5%，玉米 7.2%–11.0%，小麦 8.6%–12.5%，节约氮肥 10%–51%；研究水肥一体化技术，通过控水调氮降低了稻田氮素的淋溶损失，提高氮肥利用率；通过灌溉施肥，显著降低菜地硝态氮淋溶损失，节省氮肥 50% 以上。

4 未来战略

针对我国化肥不合理施用引起环境污染和生态破坏等问题，农业部提出，到 2020 年我国农业要实现化肥用量零增长。科技部启动了国家重点研发计划试点专项“化学肥料和农药减施增效综合技术研发”。与发达国家人少地广的国情不同，我国人多地少，决定了我国高投入高产出的集约化生产体系，要确保粮食持续高产、肥料养分高效、及生态环境安全多重目标的实现，这一命题更具特殊性和挑战性，不能完全照搬国外经验，必须根据我国主要作物的养分需求，资源特点和工作基础，提出符合国情的化学肥料减施增效调控途径。

在化学肥料减施方面，应以东北、华北、长江中下游、华南、西南和西北等化肥过量施用地区为研究区域，聚焦主要粮食作物、经济作物、蔬菜、果树的化肥减施增效。未来主要任务包括：一是建立推荐施肥方法与养分限量标准。建立主要粮食作物、经济作物、蔬菜、果树基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法，提出养分限量标准；二是实施有机养分替代化肥策略。研究有机肥施用和秸秆还田资源特点，微生物转化调控，以及对化肥养分的替代作

用；三是创制高效新型肥料，包括增效复混肥与作物专用肥、缓控释肥料、水溶肥料、生物碳、微生物肥料与生物有机肥等；四是研发智能化施肥技术与装备，主要包括精准施肥、养分快速诊断、氮素实时监控、原位监测、水肥

一体化、化肥深施等技术与智能化装备。通过以上技术的集成应用，预期我国实际可减施化肥养分 30%—45%。研究成果将为我国化肥用量零增长行动提供有力支撑。

参考文献

- [1] Ai C and Zhou W et al. Reduced dependence of rhizospheremicrobiome on plant-derived carbon in 32-year long-term inorganic and organic fertilized soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80:70–78.
- [2] Ai C and Zhou W et al. Different roles of rhizosphere effect and long-term fertilization in the activity and community structure of ammonia oxidizers in a calcareous fluvo-aquic soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57:30–42.
- [3] Zhang Q and Zhou W et al. Distribution of soil nutrients, extracellular enzyme activities and microbial communities across particle-size fractions in a long-term fertilizer experiment[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 94: 59–71.
- [4] Xu XP and He P et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency[J]. *Field Crops Research*, 2014, 157: 27–34.
- [5] Chuan LM and He P et al. Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 146:96–104.
- [6] Xu XP and He P, et al. Estimating nutrient uptake requirements for rice in China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 180:37–45.

我国有机肥资源与利用

刘晓永¹ 李书田^{1, 2}

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 中关村南大街 12 号, 北京, 100081;

2 国际植物营养研究所北京办事处, 北京, 100081, E-mail: sli@ipni.net)

摘要: 弄清我国有机肥养分资源现状对其在农业生产中合理分配和有效利用至关重要。本研究是在省级水平上估算我国不同有机肥资源的养分供应潜力和有效还田数量。中国有机肥资源丰富, 其氮磷钾养分量超过 2013 年我国化肥的消费量。然而, 在不同地区间合理收集处理、运输和有效利用仍面临巨大挑战。这些有机肥养分资源是我国 2020 年化肥消费量零增长下的宝贵资源, 对减少化肥施用, 提高养分利用率具有重要影响。今后的重点应尽一切努力回收和有效利用目前未能利用的 50% 甚至以上的有机肥资源。

关键词: 有机肥资源; 畜禽粪便; 秸秆; 潜力; 回田率

随着我国粮食产量的增加和畜牧业的发展, 农作物秸秆和畜禽粪尿等有机废弃物增加, 加上绿肥和人粪尿资源, 有机肥资源量巨大。2020 年中国政府要求化学肥料消费不再增加, 而粮食和其他农作物产量需要稳定增长以满足人口增长的需求, 因此, 有机肥资源就是理想的养分资源, 既能替代部分化肥, 提高肥料养分的利用效率, 还能培肥地力, 提高农产品品质, 消除有机废弃物对环境的不良影响。弄清我国有机肥养分资源潜力和利用现状对其合理分配和有效利用以及估算我国农业系统中养分投入/产出平衡都具有重要意义。

经估算, 我国畜禽粪尿资源量达 31 亿吨, 理论上可提供 N、 P_2O_5 、 K_2O 养分 1510、880、1620 万吨, 有 18 个省/市氮磷钾总量超过 100 万吨, 其中四川、河南、山东最高, 分别为 422、298、255 万吨。全国畜禽粪尿氮磷钾养分总量是 2013 年全国化肥消费量 (5912 万吨) 的 67.7%。然而, 考虑有效还田率和收集、储存、处理中的养分损失, 真正返还农田的氮磷钾养分分别为 483 万吨 N, 495 万吨 P_2O_5 和 833 万吨 K_2O , 分别占其资源量的 32.0%、56.3% 和 51.4%, 氮磷钾共计回田 1811 万吨, 占 2013 年全国化肥消费量的 30.6%。

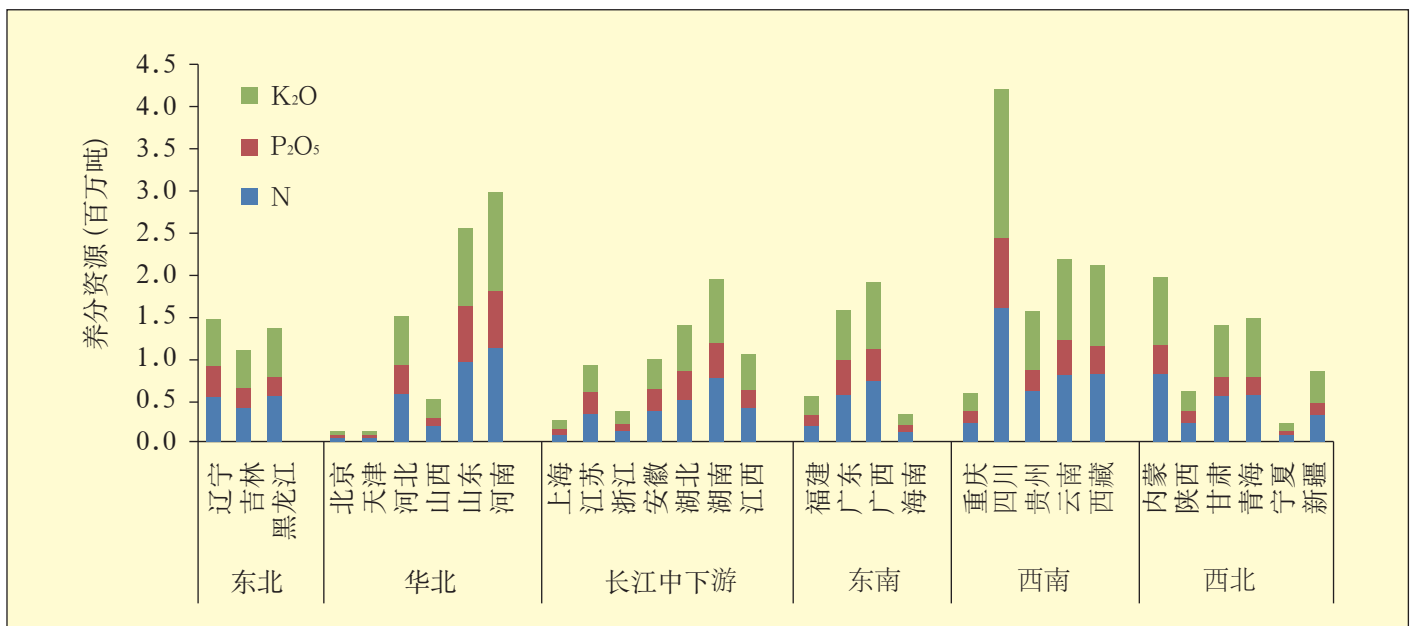


图 1 畜禽粪尿养分资源分布

人粪尿资源与人口有关，经估算全国人粪尿约 11 亿吨，可提供 707、267 和 248 万吨 N、P₂O₅ 和 K₂O，共计 1221 万吨。然而，有效回田的养分只有 131、75 和 39 万吨 N、P₂O₅、K₂O，分别占资源量的 18.5%、28% 和 15.7%。人粪尿养分多的省份主要集中在华北和长江中下游地区的人口大省，以广东、河南、山东、四川和江苏 5 省较多。

全国农作物秸秆资源 9.25 亿吨，主要分布在华北和长江中下游地区，可提供氮磷钾养分 2645 万吨，其中 N、P₂O₅、K₂O 分别为 916、281、1448 万吨，以钾为主。有 13 个省市秸秆氮磷钾养分超过 100 万吨，主要分布在东北、华北和长江中下游粮食主产区。如今秸秆还田数量不

断增加，特别在华北地区和南方省分，而在东北和西北地区优于温度和水分的限制，不利于秸秆腐解，秸秆还田受限。秸秆还田可以有效补充移走的钾，节省钾肥投入，降低生产成本，提高效益。然而目前没有秸秆还田率的官方数据，依据参考资料估算各省的秸秆还田情况表明，大约有 311、137 和 724 万吨秸秆 N、P₂O₅、K₂O 通过直接或焚烧后还田形式返还农田，分别占秸秆氮磷钾资源量的 34.0%、48.8% 和 50.0%。需要强调的是，通过秸秆还田返还农田的 K₂O 数量相当于 2013 年化肥钾消费量的 77%。全国有 12 个省 / 市秸秆氮磷钾养分还田量超过 50%，主要在华北和南方省份。

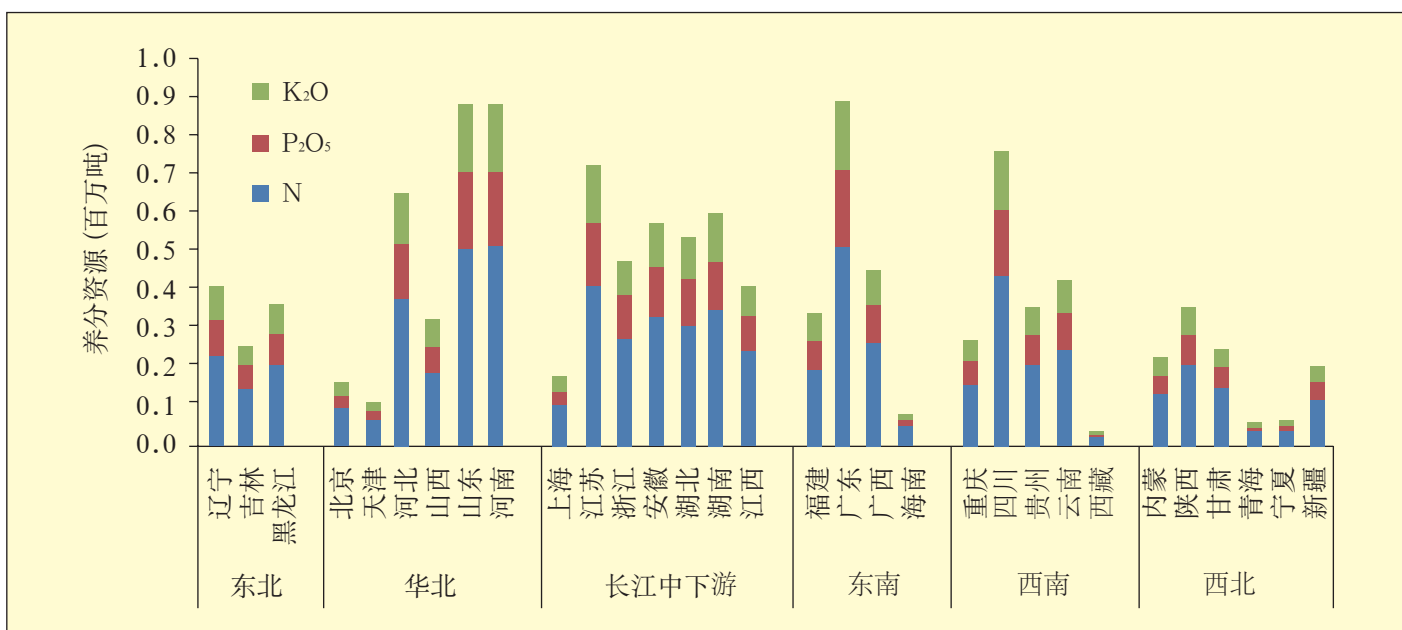


图2 人粪尿养分资源分布

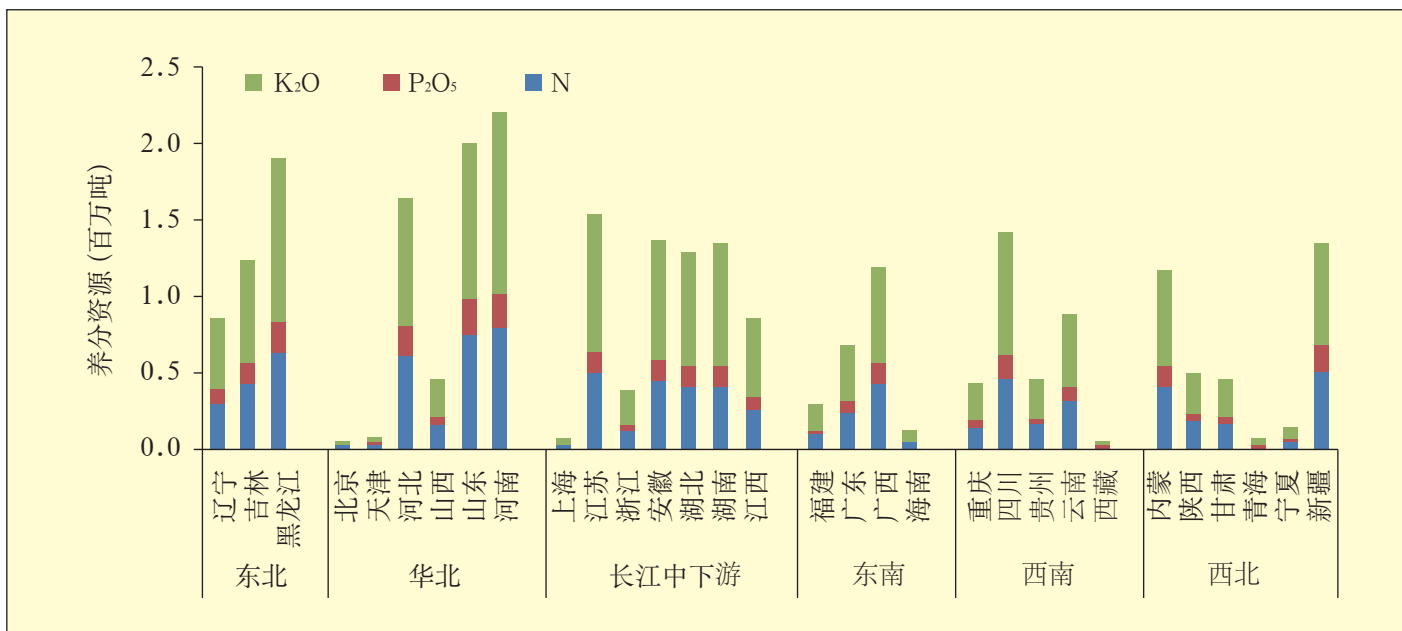


图3 农作物秸秆养分资源分布

全国豆科绿肥资源达 93.4 万吨（鲜重），按照其养分 N、P₂O₅、K₂O 养分含量 0.50%、0.126% 和 0.504%（CNATES, 1999）计，绿肥氮磷钾养分资源为 106 万，其中 N、P₂O₅、K₂O 养分分别为 47、12、47 万吨，显著低于畜禽粪尿和秸秆养分资源。按照杨帆等（2010）对绿肥回田率的估计，大约有 49% 的绿肥直接回田。

不同地区间有机肥氮素资源差异很大，东北地区有机肥氮素资源主要来源于畜禽粪尿（42.2%）和作物秸秆（39.4%），而在西北和西南地区有机肥氮主要来源于畜禽粪尿，平均分别占 54.9% 和 64.0%。在华北、长江中下游以及东南地区除畜禽粪尿外，秸秆和人粪尿氮素平均占有机肥氮素总量的 58.4%、61.2% 和 52.7%。

对有机肥磷素来说，所有省份有机肥磷素主要来源于畜禽粪尿，在东北、华北、长江中下游、东南、西南和西北地区平均分别有 56.6%、58.4%、54.9%、62.3%、72.2% 和 62.3% 的有机肥磷来源于畜禽粪尿。

有机肥中钾素最多，主要来源于畜禽粪尿和作物秸秆。东北、华北和长江中下游地区各省秸秆钾平均占有机肥钾总量的 54.4%、48.4% 和 54.0%，高于畜禽粪尿的贡献。而在东南、西南和西北地区各省畜禽粪尿是有机肥钾的主要来源，平均分别占 50.7%、66.9% 和 55.0%。

总之，我国年有机肥资源量超过 50 亿吨（鲜重），可提供 7970 万吨氮磷钾养分，包括 3170、1440 和 3360 万吨 N、P₂O₅、K₂O。其中氮和磷的量于 2013 年的化肥消费量相当，而钾量是 2013 年钾肥消费量的 4 倍左右。有机肥养分资源前三的省份是四川、河南和山东，其有机肥氮磷钾养分总量分别超过 500 万吨，各省不同有机肥源

对有机肥养分的贡献具有很大差异，畜禽粪尿的贡献率为 28.1%–96.5%，平均 49.6%，秸秆为 2.3%–55.6%，平均 30.8%，人粪尿占 1.2%–48.0%，平均 18.1%，绿肥小于 5%，平均 1.52%。这些有机肥养分资源通过合理利用可以替代部分化肥，尤其钾肥的施用，但如果施用不当或废弃会对环境和水体构成威胁。

有机肥养分的有效回田数量与其资源量一样各省间差异较大，各省有机肥养分 N、P₂O₅ 和 K₂O 回田量为 4–92，3–66，5–141 万吨，回田率分别为资源量的 17.8–38.5%、39.1–64.1% 和 37.1–61.7%，全国总计回田量 948、713 和 1619 万吨，平均回田率为 29.5%、49.2% 和 47.9%。表明还有一半以上的有机养分资源没有还田利用，需要增加还田率，与化肥配合合理施用，需要科研和政策支持。

还田的有机肥养分中各种有机肥来源的贡献率不同地区差异很大，畜禽粪尿的贡献率为 27.9%–99.1%，平均 56.3%，秸秆 0.4%–59.6%，平均 32.7%，人粪尿 0.5%–23.0%，平均 9.0%，绿肥 10% 以下，平均 2.0%。

有机肥料的施用并非越多越好，需要考虑其养分尤其氮素的当季有效性，替代化肥时要考虑替代率和替代当量以及有机无机肥料的最佳配比。此外，有机肥中的有毒有害物质也会对土壤和农产品构成环境风险。因此有机肥料的用量应该依据土壤性质、作物种类和有机肥重金属含量综合考虑而确定。实践证明，有机肥可以替代部分化肥，减少化肥用量，提高经济效益和环境效益。

参考文献（略）

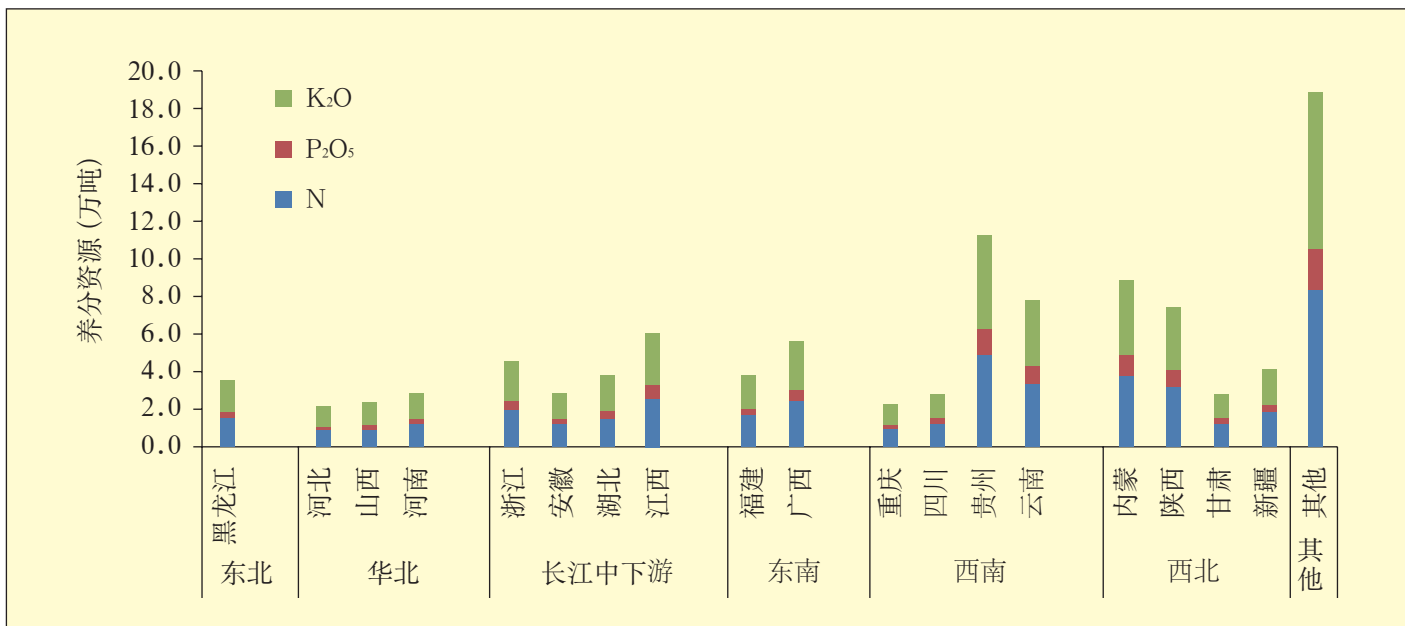


图 4 豆科绿肥养分资源分布

作物推荐施肥方法研究进展¹

串丽敏¹ 何萍^{2*} 赵同科^{3*}

(1 北京市农林科学院农业科技信息研究所, 北京, 100097; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京, 100081; 3 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京, 100097)

摘要: 针对当前农业生产存在施肥不科学, 肥料效率低下, 单产水平低等问题, 综述了当前作物推荐施肥方法研究进展, 为保障粮食安全、提高肥料利用率和保护生态环境安全提供理论与方法支撑。采取文献调研方法, 在当前作物施肥以及肥料利用率现状基础上, 分析不科学施肥对土壤、水体、大气、农产品品质和人体健康的影响, 进而综述了基于土壤养分测试和地上部作物反应的两类推荐施肥策略。测土施肥法、肥料效应函数法、叶绿素仪、叶色卡、硝酸盐反射仪、冠层反射仪、植株症状诊断、实时实地养分精准管理技术以及基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法, 均是指导作物进行合理施肥推荐的科学方法, 每种方法各有独自的特点。在实践中应因地制宜, 选择适用的推荐施肥方法, 以达到协调作物产量、环境保护和农田可持续利用的共赢。在国家政策扶持下, 今后应在基础养分供应、作物长势与养分之间的关系、适应不同大小区域的施肥推荐、养分循环与平衡等方面开展深入研究。

关键词: 施肥; 环境; 推荐施肥; 土壤测试; 产量反应

我国用占世界不到 10% 的耕地, 养活了全球 22% 的人口, 其中化肥在提高粮食产量, 改善民生中发挥了不可替代的重要作用, 是作物增产不可或缺的因子^[1]。资料显示, 从 1980 年到 2013 年间, 我国化肥用量由 1269 万吨增长到 5912 万吨, 翻了近五番, 粮食总产由 1980 年的 32055.5 万吨上升到 2013 年的 60193.8 万吨, 已连续十年增产^[2]。人们为了多产粮食, 逐渐形成了依靠增加化肥投入来提高单产和总产的农田高强度生产体系。然而, 目前在农业生产上仍然存在着施肥不科学, 肥料效率低下, 单产水平低等问题, 导致肥料资源浪费、环境风险增大以及农产品品质下降等一系列后果, 并进一步危害人体健康。随着我国城镇化进程的推进可能带来的粮食种植面积的减少, 以及人口的较快增长, 粮食总需求量持续增长的压力逐渐增加。尤其是 2015 年中国提出实施“化肥零增长”行动, 力争到 2020 年主要农作物化肥使用量实现零增长。如何在化肥用量稳定的前提下, 科学合理使用化肥, 如何在有限的土地上生产出更多的

粮食, 进一步提高作物产量和肥料利用率, 实现粮食生产高产高效, 确保国家粮食安全, 进而减少化肥带来的负面环境影响是当今关注的热点问题, 也是摆在我们面前的现实问题。

国内外在科学合理推荐施肥方面开展了大量研究, 并已在科学确定作物施肥量、提高作物产量、肥料利用效率、增加农民收入和改善土壤肥力上取得了良好成效^[3-6]。本文将在当前农业生产施肥现状与肥料利用效率基础上, 分析不科学施肥对土壤、水体、大气、农产品品质和人体健康的影响, 综述国际上基于土壤养分测试和地上部作物反应的两类推荐施肥策略, 着重介绍测土施肥法、肥料效应函数法、叶绿素仪、叶色卡、硝酸盐反射仪、冠层反射仪、植株症状诊断、实时实地养分精准管理技术以及基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法, 并建议在实践中因地制宜, 选择适用的推荐施肥方法, 从而达到协调作物产量、环境保护和农田可持续利用的共赢。

¹ 资助项目: 北京市农林科学院科技创新能力建设专项 (KJ CX20140207); 国家 973 项目 (2013CB127405); 国际植物营养研究所平衡施肥项目; 国家科技支撑计划项目 (2012BAD15B01) 资助。

作者简介: 串丽敏 (1984—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事农业环境与学科发展态势研究。E-mail: xiaochuan200506@126.com

* 通讯作者: heping02@caas.cn; tkzhao@126.com

1 当前施肥现状与肥料利用效率

传统观念认为,肥料投入越多,产量就越高。为了追求高产和效益,农民大量施用化学肥料,一些地区施肥过量及不平衡现象极为突出。研究表明,华北平原许多地区,农民在冬小麦和夏玉米每季作物上的氮肥用量普遍超过 20 公斤/亩,远远超过达到最高产量时的优化施肥量^[7, 8]。高强等^[9]对东北地区 443 个农户春玉米施肥现状调查发现,东北地区 N、P₂O₅ 和 K₂O 的平均施用量为 13.8、6.7 和 4.3 公斤/亩,氮磷钾施用量适宜的农户比例分别为 38.9%、22.3% 和 38.5%,农户施磷量偏高、施钾量偏低以及施用有机肥农户很少是主要问题。常艳丽等^[10]对陕西关中平原冬小麦-夏玉米轮作施肥情况调查发现,冬小麦季 N、P₂O₅ 和 K₂O 平均用量为 21、12.2 和 1.7 公斤/亩,夏玉米季 N、P₂O₅ 和 K₂O 平均用量为 19.2、3 和 0.8 公斤/亩,整个轮作体系中,氮肥施用过量严重,且前期投入偏多,后期投入偏少,磷肥投入偏高。另有调查表明,太湖流域水稻氮肥施用量普遍偏高,平均施氮量为 20 公斤/亩,若以 14 公斤/亩的专家推荐施肥量为基准,则有 74.4% 的农户施氮量超过这一数值^[11]。

虽然我国在施用有机肥肥料方面有着悠久的历史,农民对施用有机肥的好处也有一定的认识,然而,由于种粮效益低,长期以来农民培肥地力的积极性不高,加上农家肥传统生产方法费工、费力,在同等投入条件下,商品有机肥当年所产生的增产效益不明显,鼓励农民施用有机肥的政策力度较弱等原因,导致农民施用有机肥的积极性不高,更愿意施用化肥,目前农田中投入的有机肥资源多是来自秸秆还田。

大量研究证明,高量化肥投入将会造成严重的资源浪费,降低肥料回收率。1998 年朱兆良^[12]就曾指出当时主要粮食作物的氮肥、磷肥和钾肥回收率范围分别为 30% - 35%、15% - 20% 和 35% - 50%。张福锁等^[13]对 2000 - 2005 年不同地区、不同粮食作物施肥研究也表明,不同地区间主要粮食作物(包括水稻、玉米和小麦)的氮、磷和钾肥回收率变异较大,其变化幅度主要分布在 10.8% - 40.5%、7.3% - 20.1% 以及 21.2% - 35.9%,平均分别为 27.5%、11.6% 和 31.3%。同时,中国农业科学院对全国 165 个监测点的田间试验统计得出,小麦和玉米的氮、磷和钾肥当季回收率平均分别为 28.7%、13.1% 和 27.3%^[14]。王伟妮等^[15]对湖北省水稻、小麦、油菜和棉

花的田间肥效试验进行汇总发现,农作物平衡施用氮、磷、钾肥的增产效果显著,但不同作物的施肥效应差异较大。水稻、小麦、油菜和棉花施肥后对产量的贡献率分别为 29.6%、48.6%、56.2% 和 38.0%,肥料农学利用率分别为 7.2、7.7、4.0 和 3.0 公斤/公斤。本课题组汇总了 2000 - 2011 年中国粮食作物的氮磷钾养分效率,结果显示,小麦氮、磷和钾肥的农学效率分别为 9.4、10.2 和 6.5 公斤/公斤,玉米氮、磷和钾肥农学效率分别为 11.4、6.9 和 9.7 公斤/公斤,水稻氮、磷和钾肥的农学效率分别为 13.0、12.7 和 8.4 公斤/公斤^[16-18]。上述研究结果显示,我国化肥利用效率偏低,与发达国家相比还有较大差距,尤其在华北平原粮食作物集约化种植区,氮肥回收率低的现象更为严重。同时发现,无论是氮、磷,还是钾肥,我国主要粮食作物的肥料回收率均呈现逐渐下降趋势。

2 不科学施肥的影响

2.1 不科学施肥对土壤的影响

目前肥料的不科学施用,使过多的养分(尤其是氮素)残留在土壤中,更可能威胁到生态环境安全,并影响到农田的可持续利用。研究发现^[19],华北地区小麦-玉米轮作体系多年多点(n>500)农田土壤硝态氮累积量在 0 - 90 厘米土层中最高达到 40 - 60 公斤/亩,平均约 13.3 公斤/亩。赵士诚等^[4]研究也表明,河北省冬小麦收获后 0 - 100 厘米土层矿质氮积累量达 20 - 20.2 公斤/亩,远远高于欧盟国家规定的大田作物收获后硝态氮最高残留量(0 - 90 厘米土层)6 - 6.7 公斤 N/亩的标准^[20]。这种因过量施肥导致的土壤硝态氮残留现象极为普遍。土壤中的硝酸盐长期累积,就会造成硝酸盐含量超标,进而土壤发生酸化、盐渍化和土壤板结,土壤肥力质量降低。同时,肥料生产过程中混入的重金属也会在土壤中逐渐富集,最终造成土壤重金属污染。

2.2 不科学施肥对水体的影响

土壤中的硝态氮随着地表径流或淋溶下渗到水体,加剧了江、河、湖、库等地表水的富营养化以及地下水硝酸盐含量超标。众所周知,水体中硝酸盐含量超标,直接危害人畜健康,对人类以及环境带来一定的潜在风险。

磷肥虽然在土体中不易移动,但是磷素也是造成水体富营养化的重要元素之一。磷通过径流冲刷进入地表水体,作为营养物质被藻类吸收,藻类的快速生长使水道阻塞,

鱼类生长空间缩小, 氧气浓度下降, 水体透明度降低, 有害物质繁殖积蓄, 最终污染水体。

2.3 不科学施肥对大气环境的影响

氮肥施入土壤后, 经过氨挥发、反硝化等过程生成 NH_3 、 NO 、 N_2O 等气体进入大气, 可导致气候变暖, 臭氧层破坏, 甚至形成酸雨。大气中的氨含量增加, 经降雨途径进入陆地水体, 也会成为地表水富营养化的因素之一。 N_2O 是一种重要的温室气体, 其增温潜势是 CO_2 的 190 - 270 倍, 并且还可与臭氧作用进而破坏臭氧层对地球的保护作用, 增加地面紫外线强度, 破坏生物循环, 危害人类健康。

2.4 不科学施肥对农产品品质和人体健康的影响

过量的氮肥施用会导致硝酸盐在土壤中的累积。 NO_3^- 本身没有毒害, 但是土壤中的硝酸盐被作物吸收以后, 通过食物链进入人体, 在人体被还原为亚硝酸盐后, 可与食品中的二级胺合成亚硝酸胺。亚硝酸胺具有致癌作用, 如果含量过高, 会给人体健康带来严重威胁。另外, 不科学的施肥还会导致农产品的营养物质失衡, 口感变差, 可食部分营养价值降低。

3 科学施肥方法研究进展

肥料过量与不合理施用不仅不能进一步提高产量, 还造成肥料资源浪费, 并影响到人体健康和生态环境安全。因此, 研究作物种植体系高效施肥理论与方法对于保障粮食安全、提高肥料利用率和保护生态环境安全具有重要意义。

平衡施肥是促进粮食高产、肥料高效的有效途径, 也是一项科学而有意义的农业推广技术, 其重要目标是实现施肥效益的最大化, 而如何合理确定施肥量一直是施肥技术的核心和难点。因此, 科学合理推荐施肥方法的建立是平衡施肥技术的核心内容之一。在农作物推荐施肥实践和研究中, 推荐施肥方法主要分为基于土壤养分的推荐施肥方法以及基于作物的推荐施肥方法等两大类。

3.1 基于土壤养分的推荐施肥方法

基于土壤养分的推荐施肥方法是根据土壤中不同养分含量以及作物生长的养分需求量进行施肥推荐, 而能否快速、准确地进行土壤养分测试是测土施肥技术的基础和前提。目前, 在全国范围内已经广泛开展了测土配方施肥工

作, 用于推动粮食增产、农民增收和保护生态环境。测土施肥方法普遍是通过设计“3414”田间试验来建立推荐施肥指标体系, 进而指导合理施肥^[21]。

“3414”试验方案属二次回归 D - 最优设计的一种, “3”是指氮、磷和钾 3 种元素; “4”是指试验设计 4 个肥料用量水平, “14”是指共设计 14 个处理, 分别为 (1) N0P0K0 , (2) N0P2K2 , (3) N1P2K2 , (4) N2P0K2 , (5) N2P1K2 , (6) N2P2K2 , (7) N2P3K2 , (8) N2P2K0 , (9) N2P2K1 , (10) N2P2K3 , (11) N3P2K2 , (12) N1P1K2 , (13) N1P2K1 , (14) N2P1K1 。该方案设计吸收了回归最优设计处理少、效率高的优点。其中, 0 水平表示不施肥, 2 水平视为当地最佳施肥量的近似值, 1 水平为 2 水平的一半, 3 水平为 2 水平的 1.5 倍, 视为过量施肥水平。

该方案中的 14 个处理可以进行氮、磷、钾三元二次肥料效应函数的拟合。除此之外, 还可分别对氮、磷或钾三种元素中的任意二元或一元肥料进行效应函数的拟合。例如: 选用 2 - 7、11 和 12 处理, 可以进行氮、磷二元肥料效应函数拟合, 求得以 K2 施用水平上的氮、磷二元二次肥料效应函数; 选用 2、3、6 和 11 处理, 可求得在 P2K2 施用水平上的氮肥效应函数; 选用 4、5、6 和 7 处理, 可求得在 N2K2 施用水平上的磷肥效应函数; 选用 6、8、9 和 10 处理可求得在 N2P2 施用水平上的钾肥效应函数。有了相应的肥料效应函数, 就可获得具体的最佳肥料用量, 为肥料配方和施肥推荐提供依据。

另外, 还可通过土壤测试结果和田间肥效试验结果, 建立不同作物、不同区域的土壤养分丰缺指标, 提供肥料配方。或者, 根据作物目标产量需肥量与土壤供肥量之差估算肥料施用量。其表达式如下:

$$W_{\text{input}} = (W_{\text{output}} - 0.15 * k_{\text{soil}} * T_n) / k_{\text{fer}}$$

其中, W_{input} 为当季肥料施用量 (公斤 / 亩); W_{output} 为作物形成一定产量所需要的总养分吸收量 (公斤 / 亩); k_{soil} 为土壤该种有效养分的表观利用率 (%); T_n 为土壤有效养分的室内分析测试值 (毫克 / 公斤); k_{fer} 为来自肥料养分的当季回收率 (%); 0.15 是将土壤测试值转换为公斤 / 亩的系数, 是将 20 厘米耕层土壤按每亩 15 万公斤来计算。 k_{soil} 和 k_{fer} 两个参数需要由相应的田间试验计算得出。其中, k_{soil} 可以通过缺素区或空白区作物吸收某种养分的总量与季前耕层土壤该种有效养分总量的比值获得, 用百分数表示; k_{fer} 为施肥区作物吸收某种养分的总量与缺素区或空白区作物吸收该种养分吸收量之间的差值

再与施肥区该养分施入总量的比值,也用百分数表示。

目前的测土分析技术多是通过联合提取剂进行浸提,一次性可以提取多种元素,然后借助原子吸收或 ICP 等先进仪器对多个元素同时进行测定,大幅度提高了测试效率。中国国家测土施肥中心实验室普遍采用土壤养分系统研究法(ASI法)进行土壤养分测试。ASI法用于测土配方施肥土壤养分测试的主要方法,是由美国佛罗里达的国际农化服务中心(Agro Services International Inc.)在总结前人土壤测试工作基础上,结合美国北卡罗莱那州立大学的相关研究结果,于1980年提出的一套用于土壤养分状况评价的实验室分析和盆栽实验方法。1989年该方法引入我国,称为“土壤养分状况系统研究法”^[22]。ASI法不仅可以提高土壤养分分析的效率,而且还实现了土壤养分测定的工厂化、系列化操作。它可测定土壤中的15个肥力指标(包括11种营养元素),即土壤活性有机质、pH、交换性酸、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、速效P、K、Ca、Mg、S、B、Cu、Fe、Mn、Zn等元素,并成功用于指导作物专用肥生产,取得了显著的经济效益和社会效益。

在测土配方施肥工作中,主要采取综合兼优选用的原则,可选择使用传统方法,也可同时采用创新方法。目前,在田间实践中,逐渐形成了一套针对我国主要土壤类型和作物种类的测土推荐施肥方法与技术体系,可对我国不同土壤类型和130多种作物进行测土并做出施肥推荐^[22]。测土施肥技术与农民习惯施肥相比,一定程度的降低了氮肥用量,调整了磷钾肥用量,提高了作物产量和肥料回收率,也增加了农民收入^[17, 23],成效明显。

3.2 基于作物的推荐施肥方法

土壤养分供应能力以及作物对养分的吸收能力决定着作物整体的营养状况,可以通过对作物的营养状况诊断,确定植株体内养分含量的丰缺动态,并以此作为作物追肥决策的依据,实现精准变量施肥。基于作物的推荐施肥方法通常将作物地上部的产量及营养状况作为诊断作物生长正常与否的依据,主要从作物的生长表现与产量的建成等方面进行考虑,如作物籽粒产量的高低、作物地上部的长势与颜色外观表现等。

基于作物产量的推荐施肥方法目前主要提出了肥料效应函数法、叶绿素仪、叶色卡、硝酸盐反射仪、冠层反射仪、植株症状诊断以及实时实地养分精准管理技术等方法。传统的地上部营养诊断方法通常是采集植株样品进行实验

室分析,该方法是进行破坏性取样,操作复杂、测试分析周期长,难以在较短时间内实现对作物生长期间的实时监测。随着速测技术的推广,基于作物地上部长势与颜色外观的无损诊断技术,如叶绿素仪、叶色卡以及基于光谱反射进行诊断的技术逐渐发展起来,可以在较短时间内实现作物养分的实时科学管理^[24]。

肥料效应函数方法认为作物地上部的产量是肥料综合作用的效果,通过建立作物产量与肥料施用量之间的统计关系,可以进行施肥推荐。具体步骤是通过不同的试验设计,包括简单的对比、回归和正交设计等方法布置多点田间试验,将来自不同处理的地上部作物产量与施肥量进行数理统计,得到肥料效应函数,由此可计算出代表性地块的最高施肥量、最佳施肥量以及获得最大经济效益时的施肥量,并将其作为推荐施肥的依据。

叶绿素仪方法是一种迅速而准确地监测田间作物氮素营养状况的有效手段,是一种无损速测技术,可以为氮素的追肥施用提供实时指导,其测定方法是将作物叶片插入叶绿素仪的测定部位,通过感光后读出叶绿素值(表示为SPAD),从而建立叶绿素值与植株含氮量的相关关系。研究已表明,叶片SPAD值与作物的氮素含量具有显著正相关关系^[25]。在此基础上确定氮素营养诊断的叶色值,其原理主要是基于叶绿素对红光的强吸收与对远红外光的低吸收。近年来,手持叶绿素仪由于其操作简单、及时、对作物无损伤而被广泛应用于不同粮食作物和经济作物上的氮肥推荐^[26-28]。

叶色卡片法(Leaf colour chart, LCC)是依据作物叶色深浅与叶片全氮含量之间具有良好的线性关系原理研制出标准叶色卡,根据实际作物叶色深浅诊断养分的丰缺,进而指导施肥。然而,该方法对叶色的判读存在一定的人为因素,并且品种或基因型的不同,也会不可避免地存在一些误差;另外,叶色卡片法还不能辨别作物失绿是由缺氮引起还是由其它因素所为,但是与其它推荐施肥方法相比,该方法较为简单、方便、并使营养诊断呈现半量化、易于看到实效等特点,逐渐得到农民的广泛认可^[29-30]。

硝酸盐反射仪方法是利用 NO_3^- 具有偶氮反应,能够生成红色染料%的原理,可以利用通过比色法直接读出 NO_3^- 浓度,然后找到氮素营养诊断值指导氮肥施用的方法。目前,在植株营养诊断中,小麦一般以茎基部作为诊断部位,玉米一般采用新成熟叶的叶脉作为诊断部位。随着硝酸盐反射仪等便捷仪器的出现,加快了硝态氮测试技术在推荐施肥中的应用。

作物的冠层颜色直接反映了作物的营养状况，例如缺氮植物叶片颜色较浅，冠层颜色呈现偏黄绿色。因此在传统农业生产中，农民可以直接通过肉眼观察判断作物绿色深浅来断定作物营养状况，决策是否需要施肥。在光谱研究基础上，一些简化的便携式光谱测试仪逐渐发展起来，这些仪器可以在田间直接获取植物冠层的多光谱反射信息，将光谱数字化，建立与植株氮素营养之间的关系，进而获得相应的推荐施肥量。如美国开发的基于冠层多光谱分析的仪器 Green Seeker，属多光谱主动探测，通过光源主动发射红外光和近红外光，被作物冠层反射后由其传感器接收并进行数模转换，从而可以计算出标准化的植被指数（即 NDVI 指数），该指数是植物生长状态以及作物空间分布密度的最佳指示因子。在此基础上建立相应的诊断推荐模型，用于小麦、玉米和水稻作物的追肥推荐^[31-33]。

根据作物生长所表现出的某种特定症状，推断其可能缺乏某种营养元素并进行指导施肥的方法称之为植株症状诊断技术。作物缺乏的元素不同所表现的症状也不同。如冬小麦缺氮症状表现为茎秆矮小，植株生长不良，叶片狭小而稍硬，单株分蘖少，穗数少，粒穗小，叶色淡，早熟且产量低；冬小麦氮素供应过量的症状表现为易倒伏，易受病虫害侵入，同时分蘖增多，贪青晚熟。然而，症状诊断技术通常在植株仅缺一种营养元素情况下有效，当植株同时缺乏两种或两种以上营养元素或由非营养因素，如受到病虫害、药害、生理病害等因素引起时，原因容易混淆且难以分辨，可能会造成误诊。从另一角度考虑，当植株已经表现出某种特定的缺素症状时，说明植物缺素程度已经相当严重，如果此时再采取补救措施可能为时已晚。因此，症状诊断在实际应用上存在时效上的局限性。

精准变量施肥作为新近发展起来的施肥技术，具有广阔的应用前景。实时实地氮肥管理技术最初是国际水稻研究所研发的一种新型水稻养分管理方法，属精准变量施肥技术方法之一，在生产上应用面积逐步扩大。与传统的氮肥管理方法相比，实时实地氮肥管理技术其重要特点是较大幅度降低基肥和作物生长前期的氮肥用量，而增加中后期的氮肥用量。在实时实地氮肥管理研究方面，多与便携仪器无损速测技术相结合，如与叶绿素仪或叶色卡等技术的结合。Peng 等^[34]在 SPAD 测定值与单位面积叶片含氮量的极显著正相关关系基础上，将 SPAD 测定值作为水稻氮素营养状况快速诊断的特征指标，提出了实时氮肥管理模式 (Real-time Nitrogen Management, RTNM)，其技术特征是利用叶绿素仪或叶色卡从施肥有效期开始，

每周测定叶片的 SPAD 值，来表征氮素营养状况，将每周 1 次的实时测定结果与设定的 SPAD 或 LCC 阈值相比较，来确定是否需要追施氮肥，并且根据土壤肥力、目标产量和作物养分吸收特征决定追肥用量，一般用量在 2.0 - 3.3 公斤 N/亩，并可根据生长期适当调整。为减少田间测定工作量，Dobermann 等^[35]将该方法进行简化，只在水稻生长关键时期利用 SPAD 或 LCC 测定水稻氮素营养状况的动态调节氮肥追肥用量的方法，提出了实地养分管理技术 (Site-specific Nutrient Management, SSNM)。目前该方法已在国内外广泛应用^[36-37]。

基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法是国际植物营养研究所提出来的平衡施肥方法，并将其开发集成形成以电脑软件形式面向科研人员和农业科技推广人员的养分专家系统 (Nutrient Expert, NE)^[6, 38, 39]。其中，产量反应是指施用氮磷钾肥料的处理与不施某种养分的缺素处理之间的产量差，即为该养分的产量反应。农学效率是指施入 1 公斤 N、P₂O₅ 或 K₂O 养分所能增加的籽粒产量。基于产量反应和农学效率的施肥方法认为，作物施肥后所达到的产量主要有两部分组成，一部分是由土壤基础养分供应所能生产的产量，可用不施某种养分的缺素处理其作物产量来表征^[23, 40]；另一部分是由施肥作用所能增加的产量^[40]。基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法能够充分利用来自土壤本身、秸秆还田、灌溉水、大气沉降、生物固氮、种子带入等多种途径来源的土壤基础养分。由于作物主要通过地上部产量的高低来表征土壤基础养分供应能力以及作物生产能力，因此依据施肥后作物地上部的生长反应，如产量反应，来表征作物营养状况是更为直接评价施肥效应的有效手段^[6]，从而避免过量养分在土壤的累积，并且考虑了 N、P 和 K 养分之间的相互作用。

在养分专家系统中，预估产量反应的方法主要有两种：一种是在附近区域具有相似养分管理措施的土壤上做过减素试验，产量反应直接由具体的养分供应充足的产量与缺素产量之间的产量差获得；如果在附近区域没有做过减素试验，养分专家系统可以根据作物的生长环境特征（灌溉情况、旱涝情况）、土壤肥力指标、有机肥施用情况、上季作物秸秆处理和施肥情况以及当前作物实际产量等信息调用背后数据库对产量反应进行估算。一旦产量反应数值确定，根据产量反应和农学效率之间的关系，可以确定在该产量反应时对应的农学效率，进而计算得出氮、磷和钾的推荐施肥量。由于 N 素比较活跃，且容易损失到水体或大气环境中进而带来环境风险，因此，氮肥推荐仅考

考虑了产量反应和农学效率两个参数，而磷钾肥的推荐量则还考虑了土壤磷钾素的养分平衡以及土壤可持续性，以保证充足供应和维持地力，即磷钾肥的推荐用量为产量反应所需要的养分加上籽粒或（和）秸秆带走的养分。具体如下公式所示^[41]：

氮肥推荐量 = N 产量反应 / N 肥农学效率

磷（钾）肥推荐量 = 磷（钾）产量反应部分所需养分 + 当季作物收获带走的养分

基于产量反应和农学效率的养分专家系统是在多年多点数据库基础上，通过向农户询问问题的形式可以在几分钟内做出施肥推荐，弥补了测土施肥耗时耗力、测试时间长以及推荐不及时和不足，是测土条件不充分时可供选择的一种推荐施肥技术。该种推荐施肥方法能够综合作物养分管理的“4R”原则，即在合适的施肥时间（right time），选择合适的肥料种类（right source），在合适的施肥位置（right place），放合适的肥料用量（right rate），能够在保障产量的条件下提高肥料利用率和农民收入，也满足了对不同大小田块推荐施肥的适应性，既可适于田间尺度，又可针对区域尺度，并且对于养分的平衡供应、降低因施肥过量而带来的环境风险具有重要意义。该方法已经在印度、菲律宾等东南亚国家和非洲等一些国家的水稻和玉米作物上逐渐得到应用^[38, 39, 42]，我国在玉米、小麦和水稻作物上的多年研究也证明，基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥，在保持或提高作物产量的同时，不仅考虑了土壤-作物系统的养分平衡，而且能够最大限度提高作物养分利用率并减少养分的环境损失，最大限度高效施用肥料和提高农民经济效益，协调了作物的农学效应、环境效应和经济效应^[6, 16-18]。与传统的测土施肥、植株营养诊断施肥等一系列测试技术和方法相比，该理论与技术具有时效性强、简便经济、易于掌握、适用广泛等优点，特别是在测土和植株诊断等条件不充分时采用显得尤为重要。随着科学施肥技术的发展，基于作物产量反应和农学

效率的养分专家推荐施肥系统会逐渐成为一种重要的、有效的生态集约化养分管理方法。

4 结论与展望

肥料过量与不合理施用不仅不能进一步提高产量，还造成肥料资源浪费，并影响到生态环境安全。基于土壤测试和基于作物地上部反应进行推荐施肥是两类不同的方法，每种方法各有独自的特点。因此，在实际应用中应因地制宜，选择适用的推荐施肥方法，以达到协调作物产量、环境保护和农田可持续利用的共赢。

同时，今后在实践中，应从以下几方面着重开展研究与应用：（1）对来自土壤本身、大气沉降、灌溉水、作物秸秆还田、生物固氮等途径的养分供应开展定性和定量分析，为基于土壤养分测试的推荐施肥方法提供理论和数据支撑，进而合理调节施肥推荐量；（2）基于作物地上部反应的各种推荐施肥方法，应进一步研究作物外观长势与养分之间的相关关系，并根据实地特征对其进行调节，增强基于作物推荐施肥方法的本地适用性；（3）区域尺度对肥料进行宏观调控的施肥方法可以和针对小农户的测土施肥方法相互补充，尤其在当前作物种植体系复杂，茬口紧，测试工作量繁重、推荐施肥不及时以及相关不同推荐方法存在某些不足等条件下，仍然需要建立和推广更为方便、快捷、更适合于大小不同农户田块应用的科学养分管理方法，协调作物产量、环境保护和农田可持续利用共赢。（4）开展土壤-作物-环境生态系统的养分循环与平衡研究，保证不同的科学施肥方法能够保持土壤的可持续利用与环境友好；（5）在政策上，建议国家给予支持和引导，科研人员也应积极开展推荐施肥方法培训，使各种方法不要仅仅停留于理论研究，更要扩大实践与应用范围，发挥最大的效益。

参考文献

- [1] 田素妍. 中国化学肥料制造业生产率研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 博士学位论文, 2008.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [3] 王贺, 白由路, 杨俐苹, 等. 基于 ASI 方法的推荐施肥在东北玉米上的应用 [J]. 中国土壤与肥料, 2010, (5):31-37.
- [4] 赵士诚, 沙之敏, 何萍. 不同氮素管理措施在华北平原冬小麦上的应用效果 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2):517-524.
- [5] 韩晓君, 张先政. 安徽省芜湖县实施测土配方施肥后耕地土壤养分状况及变化特征 [J]. 土壤通报, 2014, 45(4):892-896.
- [6] 何萍, 金继运, Pampolino MF, 等. 基于产量反应和农学效率的推荐施肥新方法 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2):499-505.
- [7] He P, Li S T, Jin J Y, et al. Performance of an optimized nutrient management system for double-cropped wheat-maize rotations in North-Central China[J]. Agron. J., 2009, 101:1489-1496.
- [8] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, et al. Nitrogen balance and groundwaternitrate contamination:Comparison among three intensivecropping systems on the North China Plain[J]. Environ. Poll., 2006, 143:117-125.
- [9] 高强, 冯国忠, 王志刚. 东北地区春玉米施肥现状调查 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(14):229-231.
- [10] 常艳丽, 刘俊梅, 李玉会, 等. 陕西关中平原小麦 / 玉米轮作体系施肥现状调查与评价 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2014, 42(8):51-61.
- [11] 蒋孝松, 刘彩玲, 隋标, 等. 太湖流域稻麦轮作体系施肥现状分析与对策 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(15):15-18.
- [12] 朱兆良. 我国氮肥的使用现状、问题和对策 [C] // 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1998, 38-51.
- [13] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5):915-924.
- [14] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展 [J]. 中国农业科学, 2008, 4(2):450-459.
- [15] 王伟妮, 鲁剑巍, 李银水, 等. 当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究 [J]. 中国农业科学, 2010, 43(19):3997-4007.
- [16] Chuan LM, He P, Pampolino MF, et al. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: yield response and agronomic efficiency[J]. Field Crop Res., 2013, 140:1-8.
- [17] Xu X P, He P, Pampolino MF, et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency[J]. Field Crop Res., 2014, 157:27-34.
- [18] 徐新朋. 基于产量反应和农学效率的水稻和玉米推荐施肥方法研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 博士学位论文, 2015.
- [19] 朱兆良. 中国土壤氮素研究 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5):780-790.
- [20] Isfan D, Zizka J, Avignon AD, et al. Relationships between nitrogen rate, plant nitrogen concentration, yield and residual soil nitrate nitrogen in silage corn[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1995, 26:2531-2557.
- [21] 杨俐苹, 白由路, 王贺, 等. 测土配方施肥指标体系建立中“3414”试验方案应用探讨—以内蒙古海拉尔地区油菜“3414”试验为例 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4):1018-1023.
- [22] 白由路, 杨俐苹. 我国农业中的测土配方施肥 [J]. 土壤肥料, 2006, (2):3-7.
- [23] 沙之敏. 冬小麦、夏玉米氮素优化管理研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 硕士学位论文, 2010.
- [24] 郭建华, 赵春江, 王秀, 等. 作物氮素营养诊断方法的研究现状及进展 [J]. 中国土壤与肥料, 2008, (4):10-14.
- [25] 鱼欢, 邬华松, 王之杰. 利用 SPAD 和 Dualox 快速、无损诊断玉米氮素营养状况 [J]. 作物学报, 2010, 36(5):840-847.
- [26] 易琼. 麦-稻作物系统氮素优化管理技术研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 硕士学位论文, 2011.
- [27] 赵士诚, 何萍, 仇少君, 等. 相对 SPAD 值用于不同品种夏玉米氮肥管理的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5):1091-1098.
- [28] Varinderpal S, Bijay S, Yadvinder S, et al. Need based nitrogen management using the chlorophyll meter and leaf colour chart in rice and wheat in South Asia: a review[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2010, 88(3):361-380.
- [29] Ali A M, Thind H S, Sharma S, et al. Prediction of dry direct-seeded rice yields using chlorophyll meter, leaf color chart and Green Seeker optical sensor in northwestern India[J]. Field Crops Res., 2014, 161:11-15.
- [30] Varinderpal S, Yadvinder S, Bijay S, et al. Calibrating the leaf colour chart for need based fertilizer nitrogen management in different maize (Zea mays L.) genotypes[J]. Field Crops Res., 2011, 120:276-282.
- [31] Ali A M, Thind H S, Varinderpal S, et al. A framework for refining nitrogen management in dry direct-seeded

- rice using Greenseeker (TM) optical sensor[J]. *Comput. Electron. Agr.*, 2015, 110:114–120.
- [32] Bajay S, Sharma R K, Jaspreet K, et al. Assessment of the nitrogen management strategy using an optical sensor for irrigated wheat[J]. *Agron. Sustain. Dev.*, 2011, 31(3):589–603.
- [33] Schmidt J, Beegle D, Zhu Q, et al. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor[J]. *Field Crops Res.*, 2011, 120(1):94–101.
- [34] Peng SB, Laza RC, Garcia FV, et al. Chlorophyll meter estimates leaf area-based nitrogen concentration of rice[J]. *Commun. Soil Sci. Plant*, 1995, 26:927–935.
- [35] Dobermann A, Witt C, Dawe D, et al. Site-specific nutrient management for intensive ricecropping systems in Asia[J]. *Field Crops Res.*, 2002, 74:37–66.
- [36] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, et al. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management. A review[J]. *Agron. Sustain. Dev.*, 2010, 30(3):649–656.
- [37] Singh V K, Shukla A K, Singh M P, et al. Effect of site-specific nutrient management on yield, profit and apparent nutrient balance under pre-dominant cropping systems of Upper Gangetic Plains[J]. *Indian J. Agr. Sci.*, 2015, 85(3):43–51.
- [38] Pampolino MF, Witt C, Pasuquin JM, et al. Nutrient Expert for Hybrid Maize (version 1.11). A software for formulating fertilizer guidelines for tropical hybrid maize[J]. *Int. Plant Nutr. Inst.*, Penang, Malaysia, 2011.
- [39] Pampolino M F, Witt C, Pasuquin J M. et al. Development approach and evaluation of the Nutrient Expert software for nutrient management in cereal crops[J]. *Comput. Electron. Agr.*, 2012, 88:103–110.
- [40] Janssen B H, Guiking F C T, Vander E D, et al. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS)[J]. *Geoderma*, 1990, 46, 299–318.
- [41] 串丽敏. 基于产量反应和农学效率的小麦推荐施肥方法研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 博士学位论文, 2013.
- [42] Sapkota T B, Majumdar K, Jat M L, et al. Precision nutrient management in conservation agriculture based wheat production of Northwest India: Profitability, nutrient use efficiency and environmental footprint[J]. *Field Crops Res.*, 2014, 155:233–244.

基于养分专家系统 (NE) 的江西省双季稻化肥减施效果¹

柳开楼¹ 胡惠文¹ 余喜初¹ 李大明¹ 杨富强² 叶会财¹ 徐小林¹ 周利军¹ 胡志华¹ 黄庆海¹
(1 江西省红壤研究所 / 国家红壤改良工程技术研究中心, 江西 南昌, 330046; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京, 100081)

摘要: 2015年在江西省南昌市进贤县和南昌县7个农户进行双季稻区作物养分专家系统 (Nutrient Expert) 的肥料试验, 在双季稻生产中提出优化施肥 (OPT) 处理, 在 OPT 的基础上设置减素试验, 分别是减氮 (OPT-N) 处理、减磷 (OPT-P) 处理、减钾 (OPT-K) 处理。同时根据土壤测试值进行推荐设置测土优化施肥 (OPTS) 处理, 以及当地农民习惯施肥 (FP) 处理, 对 OPT、OPTS、FP 进行产量、效益比较, 分析氮、磷、钾养分的农学效率。试验结果表明, 在增加种植密度的前提下, 相对于农民习惯施肥处理 FP, OPT 处理的产量提高了 23.6%–48.0% (早稻) 和 8.4–36.8% (晚稻)。从施肥量角度来看, 在秸秆还田的背景下, 作物养分专家系统分别比农民习惯施肥每公顷少施用 18.7–41.3 公斤 N、13.0–25.1 公斤 P₂O₅ 和 52.8–118.9 公斤 K₂O。通过减素试验计算出各地水稻生产上的农学效率, 早晚稻氮肥农学效率平均值为 23.4 和 15.3 公斤 / 公斤。磷肥农学效率的平均值为 44.4 和 25.7 公斤 / 公斤。钾肥农学效率变化范围平均值为 37.4 和 29.4 公斤 / 公斤。

关键词: 养分专家系统 (Nutrient Expert); 江西省; 双季稻; 产量反应

江西省是我国 13 个粮食主产省之一, 又是全国仅有的两个不间断向国家提供商品粮的省份之一^[1-2], 因此大力发展水稻种植技术显得十分重要。据统计, 江西省双季稻种植面积 4600 多万亩, 占全省水稻种植总面积的 89%, 双季稻种植比例居全国前列^[3]。近 50 年来, 该地区早稻和晚稻的实际单产和趋势产量均呈明显的上升趋势, 但 20 世纪 90 年代以后增幅变小^[4]。因此, 研究如何提高水稻单产, 增加农民种稻积极性就显得十分迫切。

本研究针对江西双季稻区水稻生产中存在的化肥施用不合理等问题, 结合作物养分专家系统 (Nutrient Expert), 通过在双季稻主要生产区设置肥料优化和减素试验, 研究双季稻种植的肥料最佳施用量, 分析双季稻生产中的氮、磷、钾作物养分的产量反应、农学

效率, 从而为该地区双季稻的合理施肥提供理论和技术依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于 2015 年 1 月到 2015 年 12 月在江西省南昌市进贤县和南昌县进行试验, 该地处中亚热带, 年均气温 18.1℃, ≥ 10℃ 积温 6480℃, 年降雨量 1537 毫米, 年蒸发量 1150 毫米, 无霜期约为 289 天, 年日照时数 1950 小时。

试验前采耕层土壤 (0–20 厘米) 进行养分测定, 分别测定 pH、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质, 具体肥力情况见表 1。供试水稻品种以当地主栽品种为主, 供试肥料氮肥为尿素, 磷肥为钙镁磷肥, 钾肥为氯化钾。

¹ 基金项目: 国际植物营养研究所项目资助; 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (201503122);

作者简介: 柳开楼 (1984–), 男, 河南滑县人, 在读博士, 助理研究员, 主要从事土壤肥料方面的研究 E-mail: liukailou@126.com

* 通讯作者: 余喜初 (1973–), 男, 江西都昌人, 硕士, 副研究员, 主要从事植物营养方面的研究 E-mail: yxchu@163.com

表 1 供试土壤基础养分

地点	农户	pH	OM (%)	全 N	全 P	全 K	速效 P	速效 K
				(克/公斤)			(毫克/公斤)	
进贤县	李国平	5.3	1.1	1.5	0.7	13.6	44.6	200.8
	王春根	5.1	1.2	1.6	0.8	16.5	61.7	243.7
	张国本	5.1	1.2	1.6	0.8	9.1	58.9	258.7
	付财根	5.1	1.3	1.4	0.9	16.5	67.6	266.9
	文有亮	5.3	1.2	1.5	0.7	14.9	47.5	230.6
南昌县	刘运保	4.7	2.3	1.4	0.5	21.5	23.0	94.1
	刘芳顺	4.5	1.4	1.6	0.5	18.5	25.2	90.2
统计	平均值	5.0	1.4	1.5	0.7	15.8	46.9	197.9
	标准差	0.3	0.4	0.1	0.2	3.9	17.5	75.3
	变异系数	6.1	29.3	5.4	22.6	24.8	37.3	38.1

1.2 试验方法

每个试验站点试验之前进行种植情况调查,了解往年施肥及产量情况,根据调查结果运行 NE 软件进行施肥推荐 (OPT 处理),根据当地农业技术部门根据测土配方进行推荐施肥 (OPTS 处理),同时对当地习惯性施肥 (FP 处理)进行统计记录,

试验处理:共设计 6 个处理

(1) OPT:基于 Nutrient Expert 推荐量;并进一步优化种植密度。株行距为 20 厘米 × 18 厘米。

(2) OPT-N:不施氮肥;株行距为 20 厘米 × 18 厘米。

(3) OPT-P:不施磷肥;株行距为 20 厘米 × 18 厘米。

(4) OPT-K:不施钾肥;株行距为 20 厘米 × 18 厘米。

(5) OPTS:根据当地土壤测土配方施肥优化的施肥处理。当地普通种植密度,株行距为 20 厘米 × 20 厘米。

(6) FP:农民习惯施肥。当地普通种植密度,株行距为 20 厘米 × 20 厘米。

试验面积:每处理小区面积 30 平方米,1 次重复。(具体施肥量见表 2)

表 2 双季稻平衡施肥小区施肥量

农户	处理	施氮量	施磷量	施钾量	施氮量	施磷量	施钾量
		(公斤 N/亩)	(公斤 P ₂ O ₅ /亩)	(公斤 K ₂ O/亩)	(公斤 N/亩)	(公斤 P ₂ O ₅ /亩)	(公斤 K ₂ O/亩)
李国平	OPT	9.3	4.0	4.4	10.3	4.5	4.1
	OPTS	10.0	5.0	8.0	12.0	5.4	9.0
	FP	9.0	4.5	9.8	10.5	4.5	10.5
王春根	OPT	10.1	3.9	3.6	11.0	5.5	5.1
	OPTS	10.0	5.0	8.0	12.0	5.4	9.0
	FP	21.3	7.5	12.3	22.8	9.0	15.0
张国本	OPT	10.3	5.1	5.2	10.5	4.6	4.1
	OPTS	10.0	4.5	7.0	11.0	4.5	7.5
	FP	8.2	3.8	3.8	10.8	5.3	11.3
付财根	OPT	9.8	3.7	3.5	10.3	4.3	3.9
	OPTS	10.0	5.0	8.0	12.0	5.4	9.0
	FP	8.2	4.5	8.1	10.6	6.0	10.8
文有亮	OPT	10.1	4.1	3.8	10.1	4.1	3.8
	OPTS	10.0	5.0	8.0	12.0	5.4	9.0
	FP	9.9	5.3	10.1	10.6	6.0	12.0
刘运保	OPT	10.7	4.7	5.0	10.1	4.1	3.8
	OPTS	10.0	4.0	7.0	12.0	3.0	8.0
	FP	9.0	4.5	4.5	10.6	6.0	12.0
刘芳顺	OPT	10.3	3.9	3.9	10.3	4.5	4.1
	OPTS	10.0	4.0	7.0	12.0	3.0	8.0
	FP	13.7	5.5	5.5	15.9	6.7	12.7

肥料运筹和施用方法：

OPT 与 OPT 减素试验，肥料使用尿素、钙镁磷肥，氯化钾。所有磷肥全部作为基肥，氮肥的基肥、分蘖肥和穗肥按照 4:3:3 的比例施用。钾肥的基肥：穗肥按照 5:5 的比例施用。

FP 为当地农民习惯施肥，肥料使用尿素、钙镁磷肥，氯化钾，所有磷肥全部作为基肥，氮肥的基肥、分蘖肥按照 4:6 的比例施用。钾肥的基肥、分蘖肥按照 5:5 的比例施用。

OPTS 为当地测土配方施肥的推荐施肥，肥料使用尿素、钙镁磷肥，氯化钾，所有磷肥全部作为基肥，氮肥的基肥、分蘖肥按照 4:6 的比例施用。钾肥的基肥、分蘖肥按照 5:5 的比例施用。

1.3 样品采集和分析

1) 收获时测定水稻籽粒和秸秆干重。

2) 收获时各处理采取有代表性 3 株水稻植株和籽粒样品，烘干至恒重，分别测定籽粒和秸秆中测定氮磷钾养分含量。并对数据进行整理，计算出氮、磷、钾产量反应、农学效率、肥料偏生产力^[7]。

3) 各指标计算公式(以氮为例)：

N 产量反应(公斤/亩)= 施氮处理 - 减氮处理产量

N 农学效率(公斤/公斤)= N 产量效应 / N 施用量

N 偏生产力(公斤/公斤)= 施氮处理产量 / 施氮量

2 结果与分析

2.1 双季稻 NE 推荐施肥系统的化肥减施潜力

在早稻季，农民习惯施肥氮肥用量(N)在 8.2 -

21.3 公斤/亩之间，平均值是 11.3 公斤/亩。磷肥施用量(P_2O_5)在 4.5 - 7.5 公斤/亩，平均值是 5.1 公斤/亩。钾肥用量(K_2O) 3.7 - 12.3 公斤/亩之间，平均值是 7.7 公斤/亩。各个地区施肥量差异较大，从养分施用量上来看，以氮肥为主，钾肥居中，磷肥施用最少，从变异系数上看，变异系数分别氮肥(42.3%) > 钾肥(41.7%) > 磷肥(23.9%)。养分专家系统根据前期调查给出了推荐施肥(OPT 处理)，其中氮肥用量在 9.3 - 10.7 公斤/亩，平均值是 10.1 公斤/亩。磷肥用量是在 3.7 - 5.1 公斤/亩，平均值是 4.2 公斤/亩。钾肥用量是在 3.5 - 5.2 公斤/亩，平均值是 4.2 公斤/亩。与农民习惯施肥相比，氮肥、磷肥和钾肥用量分别降低了 11.0%、17.0% 和 45.6%。当地农业技术推广部门根据测土配方推荐施肥量(OPTS 处理)施肥，其中氮肥施用量为 10 公斤/亩。磷肥施用量在 4.0 - 5.0 公斤/亩，平均值是 4.6 公斤/亩。钾肥施用量在 7 - 8 公斤/亩，平均值是 7.6 公斤/亩。较农民习惯施肥略微降低了氮肥、磷肥和钾肥用量。

晚稻季的结果与早稻季基本一致，也呈现出 OPT 显著减低了氮肥、磷肥和钾肥用量。

2.2 双季稻 NE 推荐施肥系统的产量效应

从各处理水稻产量表 3 可知，OPT 施肥处理早稻产量变化范围在 489 - 591 公斤/亩，平均值为 546 公斤/亩。OPTS 施肥处理早稻产量变化范围在 384 - 487 公斤/亩，平均值为 448 公斤/亩。FP 施肥处理早稻产量变化范围在 368 - 453 公斤/亩，平均值为 411 公斤/亩。其中 OPT 施肥处理较 FP 农民习惯施肥增产 23.6% - 48.0%，这主要与该处理优化的种植密度有关。晚稻结果与早稻基本一致。

表 3 OPT、OPTS、FP 各处理水稻产量

农户	早稻产量 (公斤/亩)			OPT 相对 FP	OPTS 相对 FP	晚稻产量 (公斤/亩)			OPT 相对 FP	OPTS 相对 FP
	OPT	OPTS	FP	增产率 (%)	增产率 (%)	OPT	OPTS	FP	增产率 (%)	增产率 (%)
李国平	567	445	420	34.9	6.0	567	445	420	34.9	6.0
王春根	532	467	369	44.3	26.7	532	467	369	44.3	26.7
张国本	489	417	392	24.8	6.4	489	417	392	24.8	6.4
付财根	515	384	417	23.6	-8.0	515	384	417	23.6	-8.0
文有亮	591	465	450	31.3	3.3	591	465	450	31.3	3.3
刘运保	558	474	377	48.0	25.7	558	474	377	48.0	25.7
刘芳顺	569	487	454	25.4	7.4	569	487	454	25.4	7.4

注：OPT 相对 FP 增产率 % = (OPT 产量 - FP 产量) / FP 产量 × 100%；OPTS 相对 FP 增产率 % = (OPTS 产量 - FP 产量) / P 产量 × 100%。

2.3 双季稻 NE 推荐施肥系统的氮产量反应、农学效率和偏生产力分析

从表 4 可以看出, 早稻氮的产量反应为 177–320 公斤/亩, 平均值为 238 公斤/亩。氮肥农学效率变化范围在 17.3–32.7 公斤/公斤, 平均值为 23.6 公斤/公斤。氮肥偏生产力变化范围为 47.6–60.7 公斤/公斤, 平均值为 54.3 公斤/公斤。晚稻氮的产量反应效应为 114–199 公斤/亩, 平均值为 158 公斤/亩。氮肥农学效率变化范围在 11.1–19.3 公斤/公斤, 平均值为 15.3 公斤/公斤。氮肥偏生产力变化范围为 40.1–53.9 公斤/公斤, 平均值为 50.4 公斤/公斤。

2.4 双季稻 NE 推荐施肥系统的磷产量反应、农学效率和偏生产力分析

从表 5 可以看出, 早稻磷产量反应为 152–228 公斤/亩, 平均值为 183 公斤/亩。磷肥农学效率变化范围在 32.2–57.6 公斤/公斤, 平均值为 44.4 公斤/公斤。磷肥偏生产力变化范围为 96.5–147.1 公斤/公斤, 平均值为

131.3 公斤/公斤。晚稻磷的产量反应效应为 69–170 公斤/亩, 平均值为 115 公斤/亩。磷肥农学效率变化范围在 15.2–39.3 公斤/公斤, 平均值为 25.7 公斤/公斤。磷肥偏生产力变化范围为 97.7–125.1 公斤/公斤, 平均值为 115.0 公斤/公斤。

2.5 双季稻 NE 推荐施肥系统的钾产量反应、农学效率和偏生产力分析

从表 6 可以看出, 早稻钾产量反应效应为 114–202 公斤/亩, 平均值为 151 公斤/亩。钾肥农学效率变化范围在 24.2–53.3 公斤/公斤, 平均值为 37.4 公斤/公斤。钾肥偏生产力变化范围为 94.1–155.5 公斤/公斤, 平均值为 133.3 公斤/公斤。晚稻钾产量反应效应为 59–190 公斤/亩, 平均值为 119 公斤/亩。钾肥农学效率变化范围在 11.7–46.6 公斤/公斤, 平均值为 29.4 公斤/公斤。钾肥偏生产力变化范围为 106.3–136.1 公斤/公斤, 平均值为 126.8 公斤/公斤。

表 4 OPT 处理水稻氮产量反应、农学效率和偏生产力

农户	早 稻			晚 稻		
	N 产量反应 (公斤/亩)	N 农学效率	N 偏生产力	N 产量反应 (公斤/亩)	N 农学效率	N 偏生产力
李国平	177	18.9	60.7	114	11.1	52.3
王春根	235	23.3	52.8	153	13.9	53.9
张国本	251	24.4	47.6	177	16.8	52.5
付财根	320	32.7	52.6	199	19.3	48.8
文有亮	286	28.4	58.7	146	14.5	40.1
刘运保	186	17.3	52.0	121	12.0	51.4
刘芳顺	209	20.3	55.4	198	19.3	53.4

注: 氮产量效应 (N response) = OPT 产量 – OPT – N 产量; AEN = (OPTe 产量 – OPT – N 产量) / 施氮量; N 偏生产力 (公斤/公斤) = 施氮处理产量 / 施氮量。

表 5 OPT 处理水稻磷产量反应、农学效率和偏生产力

农户	早 稻			晚 稻		
	P 产量反应 (公斤/亩)	P 农学效率	P 偏生产力	P 产量反应 (公斤/亩)	P 农学效率	P 偏生产力
李国平	163	40.9	141.7	69	15.2	118.4
王春根	172	43.6	135.2	86	15.5	107.2
张国本	167	33.0	96.5	151	32.8	120.3
付财根	215	57.6	138.0	170	39.3	115.7
文有亮	228	55.1	143.0	113	27.4	97.7
刘运保	152	32.2	117.8	89	21.5	125.1
刘芳顺	187	48.4	147.1	129	28.5	120.9

注: 磷产量效应 (P response) = OPT 产量 – OPT – P 产量; AEP = (OPTe 产量 – OPT – P 产量) / 施磷量; P 偏生产力 (公斤/公斤) = 施磷处理产量 / 施磷量。

表 6 OPT 处理水稻钾产量反应、农学效率和偏生产力

农户	早 稻			晚 稻		
	K 产量反应 (公斤/亩)	K 农学效率	K 偏生产力	K 产量反应 (公斤/亩)	K 农学效率	K 偏生产力
李国平	163	37.1	128.9	190	46.6	132.0
王春根	172	47.7	147.7	59	11.7	117.0
张国本	114	21.9	94.1	134	32.5	133.9
付财根	148	42.8	148.6	155	39.4	127.5
文有亮	203	53.3	155.5	103	27.2	106.3
刘运保	121	24.2	111.5	79	20.9	136.1
刘芳顺	134	34.6	147.1	113	27.7	134.8

注: 钾产量效应 = OPT 产量 - OPT - K 产量; AEK = (OPT 产量 - OPT - K 产量) / 施氮量; K 偏生产力 (公斤/公斤) = 施钾处理产量 / 施钾量。

3 结论

1) 在优化种植密度的基础上, NE 推荐施肥方案 (OPT) 比农民习惯施肥 (FP) 产量提高了 23.6% - 48.0% (早稻) 和 8.4 - 36.8% (晚稻)。在施肥量的角度来看, NE 推荐施肥方案相对农民习惯施肥每亩少施用 1.2 - 8.3 公斤纯 N, 少施用 0.87 - 1.67 公斤 P_2O_5 , 少施用 3.52 - 7.9 公斤 K_2O (前提是秸秆全量还田)。

2) 通过减素试验计算出江西省水稻生产上的 NE 推荐施肥系统的农学效率, 早晚稻氮肥农学效率平均值为 23.4 和 15.3 公斤/公斤。磷肥农学效率的平均值为 44.4 和 25.7 公斤/公斤。钾肥农学效率变化范围平均值为 37.4 和 29.4 公斤/公斤。

参考文献

- [1] 周陈曦, 翁贞林. 农业政策相关变量对江西水稻总产的影响及其对策研究 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(2), 192-197.
- [2] 邹应斌. 长江流域双季稻栽培技术发展 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(2), 254-262.
- [3] 潘晓华, 李木英, 曾勇军, 等. 江西双季稻主要种植方式及其配套栽培对策 [J]. 江西农业大学学报, 2013, (1), 1-6.
- [4] 潘晓华, 石庆华. 江西省双季水稻单产不高的原因及对策 [J]. 中国稻米, 2008, 15(4), 1-2.
- [5] Xu, X., He, P., Zhao, S., et al. Quantification of yield gap and nutrient use efficiency of irrigated rice in China [J]. Field Crops Research, 2016, 186, 58-65.
- [6] 串丽敏, 何萍, 赵同科. 作物推荐施肥方法研究进展 [J]. 中国农业科技导报, 2016, (1), 95-102.
- [7] 贾良良, 刘孟朝, 赵珊珊, 等. 养分专家系统推荐施肥对河北省小麦玉米产量及养分利用率的影响 [J]. 高效施肥, 2013, 30(5):21-24.

双季稻田土壤基础地力和养分利用效率对长期施肥的响应

鲁艳红^{1, 2} 廖育林^{1, 2} 聂军^{1, 2*} 周兴^{1, 2} 谢坚^{1, 2} 杨曾平^{1, 2}

(1 湖南省土壤肥料研究所, 湖南长沙, 410125; 2 农业部湖南耕地保育科学观测实验站, 湖南长沙, 410125)

摘要: 研究长期不同施肥对土壤基础地力和氮磷钾养分吸收利用效率的影响, 探明土壤基础地力变化和氮磷钾养分吸收利用效率差异及其相互关系。采集双季水稻种植制度下 33 年长期定位施肥试验的不施肥 (CK)、施氮磷钾肥 (NPK) 和氮磷钾肥配施稻草 (NPKS) 3 个处理的土壤, 设置施肥与不施肥盆栽试验, 监测水稻产量、土壤基础地力产量和基础地力贡献率、水稻氮磷钾养分吸收量、氮磷钾养分利用效率; 研究长期不同施肥对土壤基础地力和氮磷钾养分吸收利用效率的影响, 探讨土壤基础地力变化和氮磷钾养分吸收利用效率差异及其相互关系。结果表明, 早晚稻土壤基础地力产量和基础地力贡献率大小顺序均为 NPKS > NPK > CK, NPKS 处理土壤早晚稻两季平均基础地力产量和基础地力贡献率较 CK 处理土壤分别增加 113.8% 和 93.7%, NPK 处理分别增加 100.7% 和 81.9%。在同一施肥水平下, 早、晚稻均以 NPKS 处理的土壤基础地力较高, 其氮、磷、钾肥偏生产力、土壤养分依存率、氮、磷、钾素收获指数也较高, 但氮、磷、钾肥回收利用率、肥料农学效率、肥料对产量的贡献率则较低。回归分析表明, 氮、磷肥回收利用率、氮、磷、钾肥农学效率、氮、钾素生理利用率均随土壤基础地力贡献率的提高呈显著或极显著降低; 氮、磷、钾肥偏生产力、氮、磷、钾素土壤依存率随土壤基础地力贡献率的提高呈显著或极显著提高。长期施用氮磷钾肥和长期氮磷钾肥配施稻草均能提高土壤基础地力, 以后者效果更显著。在较高基础地力土壤上生产, 可以在保证作物高产稳产的情况下实现减量化施肥, 实现农业生产的可持续性。

关键词: 长期施肥; 双季稻田; 土壤基础地力; 养分利用效率

随着我国人口增长和经济的发展, 对粮食的需求也日益增多, 如何保证粮食安全已成为亟待解决的问题。但是, 目前我国耕地仍然面临中低产田面积大、障碍因子多等问题^[1], 严重制约了粮食生产潜力的发挥。

基础地力是指在特定立地条件、土壤剖面理化性状、农田基础设施建设水平下, 经过多年水肥培育后, 当季旱地无水肥投入、水田无养分投入时的土壤生产能力^[2]。长期不同施肥会使土壤基础地力朝向不同方向发展, 中低产田改良过程也是土壤地力培育和提升过程。据估算, 通过低产田改造可实现增加粮食产量 390 亿公斤, 潜力巨大^[3]。因此, 通过合理施肥提高土壤质量和土地生产力, 调控农田基础地力与肥料高效和作物高产有关的重要过程, 不但可保证作物高产稳产的情况下实现减量化施肥, 而且对挖掘农田生产潜力、增加水稻产量、提高养分利用效率、优

化养分资源管理和实现农业可持续发展具有现实指导意义。施肥尤其是长期施肥制度是水稻增产稳产的重要途径, 也是土壤基础地力培育的重要措施。合理均衡施肥或有机无机肥合理配施能缓慢培育或维持土壤肥力, 而长期非均衡或不施肥则可能导致作物产量下降、土壤养分比例失衡、养分耗竭^[4-5]。研究表明, 农田基础地力提升对农作物的产量有非常重要的作用, 基础地力越高, 作物产量也越高; 土壤基础地力的提高还对减少化肥的投入, 减少对环境的负担也有重要意义^[6]。但以往有关长期施肥的研究较多集中在长期施肥对作物养分吸收、养分利用效率和土壤肥力的影响等方面, 从基础地力与作物养分吸收和肥料利用效率相互关系角度的研究还鲜有报道。

目前关于农田基础地力研究大多基于长期定位试验的不施肥处理, 然而长期不施肥处理土壤处于一种长期养分

基金项目: 国际植物营养研究所 (IPNI) 资助项目 (IPNI-HN-18)

作者简介: 鲁艳红 (1974-), 女, 湖北武穴人, 博士, 副研究员, 主要从事植物营养与作物高效施肥研究

E-mail: luyanhong6376432@163.com

通讯作者: 聂军 (1972-), 男, 湖南沅江人, 博士, 研究员, 主要从事土壤与施肥原理方面的研究 E-mail: junnie@foxmail.com

消耗状态, 其产量只能反映长期不施肥条件下的土壤基础地力状况, 而不能反映其他施肥措施下农田的实际基础地力状况^[2]。因此有研究利用裂区法将原有长期施肥小区进行了划分, 如曹承富等在长期定位试验基础上增设多年连续施肥与当年不施肥的处理来研究长期不同施肥对砂姜黑土土壤基础地力的影响^[7]。该方法可以较为客观地研究长期不同施肥措施下土壤基础地力的变化, 但当前大部分长期定位试验的面积不大, 尤其是我国南方水田长期定位试验, 采用裂区法将对农艺操作带来诸多不便, 也会对长期定位试验造成不可恢复的破坏。

因此, 本文以 33 年 66 季水稻种植后的不同施肥处理土壤为基础, 采用盆栽试验施肥与不施肥的对比盆栽试验, 以当季不施肥产量表示基础地力产量, 以当季不施肥产量与施肥产量的比值表示基础地力贡献率, 能够较为客观准确地表征长期不同施肥模式下的基础地力状况。研究长期不同施肥早晚稻产量和土壤基础地力贡献率的差异, 分析长期不同施肥模式对氮磷钾肥养分吸收利用效率和对土壤氮磷钾养分依存率的差异, 探讨氮磷钾肥养分利用效率、土壤氮磷钾养分依存率与土壤基础地力的相互关系, 阐明长期施肥稻田土壤基础地力变化和氮磷钾养分利用效率及其响应机制, 旨在为双季稻田土壤的地力培育和合理施肥提供基础数据和科学支撑。

1 材料和方法

1.1 试验设计

长期定位施肥试验位于湖南省长沙市望城区黄金乡(北纬 28°16'24", 东经 112°49'24" 海拔 100 米), 定位试验开始于 1981 年。供试土壤为第四纪红土发育的水稻土(粉质轻粘土, 土壤分类为普通筒育水耕人为土)。定位试验前 0-15 厘米土壤的主要化学性状为: pH6.6, 土壤有机质 34.7 克/公斤, 全氮 2.05 克/公斤, 全磷 0.66 克/公斤, 全钾 14.1 克/公斤, 碱解氮 151.0 毫克/公斤, 有效磷 10.2 毫克/公斤, 速效钾 62.3 毫克/公斤^[8]。

试验共设 9 个处理, 每个处理 3 次重复。本研究选择其中 3 个处理土壤进行盆栽试验, 包括: 不施任何肥料(CK)、施氮磷钾化肥(NPK)和氮磷钾化肥配施稻草(NPKS)。在 1981-2013 年期间, 氮肥(N)按早稻 10 公斤/亩和晚稻 12 公斤/亩施入; 磷肥(P)按早稻、晚稻各 2.58 公斤/亩施入; 钾肥(K)按早稻、晚稻各 6.64 公斤/亩施入; 稻草按每年 280 公斤/亩(折合养分 N 2.85 公斤/亩, P 0.37 公斤/亩和 K 7.28 公斤/亩)施入。

盆栽试验于 2014 年在湖南省农业科学院盆栽试验场进行。2013 年晚稻收获后采集长期定位试验 CK、NPK 和 NPKS 三种处理的耕层土壤(0-15 厘米)进行装盆。在长期施肥处理土壤基础上设置常规施肥(施 NPK 化肥, CF)和不施肥(NF)处理, 5 次重复。试验采用的陶瓷钵高 32.0 厘米, 直径 20.0 厘米, 用于盆栽试验的土壤风干过 5 毫米筛, 混合均匀后按每盆 10.0 公斤土装盆, 浸水两天使土壤完全湿润后再施基肥。盆栽试验氮肥(N)按早稻 1.38 克/盆和晚稻 1.60 克/盆施入; 磷肥(P)按早稻、晚稻各 0.35 克/盆施入; 钾肥(K)按早稻、晚稻各 0.89 克/盆施入; 插秧时每盆 3 穴, 化肥品种、水稻品种、农事操作方式和时间与长期定位施肥试验一致^[9-10]。盆栽试验前 3 处理土壤的基本理化性状见表 1。

1.2 样品采集与测定

水稻成熟后每个钵钵单独测产。盆栽试验前采集定位试验 CK、NPK 和 NPKS 三个处理的耕层(0-15 厘米)土样, 用于基本理化性状的测定。早、晚稻成熟期采集植株样品用于测定籽粒和稻草的氮、磷、钾含量。植株氮、磷、钾养分和土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾的含量采用常规分析法测定^[11]。

1.3 数据处理

基础地力产量(公斤/盆)= 不施肥区籽粒产量

基础地力贡献率(%)= 不施肥区籽粒产量 / 施肥区籽粒产量 × 100%

表 1 不同长期施肥处理土壤的基本理化性状

长期施肥处理	有机质 (克/公斤)	全氮 (克/公斤)	碱解氮 (毫克/公斤)	全磷 (克/公斤)	速效磷 (毫克/公斤)	全钾 (克/公斤)	速效钾 (毫克/公斤)
CK	32.75	2.25	106.51	0.57	4.82	13.8	55.6
NPK	35.97	2.51	118.49	1.05	21.25	13.9	104.6
NPKS	38.49	2.96	134.26	1.21	23.36	14.0	128.5

1) CK: 不施任何肥料; NPK: 施氮磷钾化肥; NPKS: 氮磷钾化肥配施稻草, 下同。

肥料贡献率 (%) = (施肥区籽粒产量 - 不施肥区籽粒产量) / 施肥区籽粒产量 × 100%

籽粒养分吸收量 (公斤/盆) = 籽粒产量 × 籽粒养分含量

地上部某种养分总吸收量 (公斤/盆) = 籽粒产量 × 籽粒某种养分含量 + 秸秆产量 × 秸秆某种养分含量

肥料回收利用率 (%) = (施肥区地上部某种养分吸收量 - 不施肥区地上部某种养分吸收量) / 施肥量 × 100%

肥料农学效率 (公斤稻谷/公斤养分) = (施肥区籽粒产量 - 不施肥区籽粒产量) / 施肥量

氮(磷/钾)肥料偏生产力 (公斤稻谷/公斤养分) = 施肥区籽粒产量 / 氮(磷/钾)施肥量

氮(磷/钾)素生理利用率 (公斤稻谷/公斤养分) = (施肥区籽粒产量 - 不施肥区籽粒产量) / (施肥区地上部吸氮(磷/钾)量 - 不施肥区地上部吸氮(磷/钾)量)

土壤氮(磷/钾)素依存率 (%) = 不施肥区地上部吸氮(磷/钾)量 / 施肥区地上部吸氮(磷/钾)量 × 100%

氮(磷/钾)素收获指数 = 籽粒吸氮(磷/钾)量 / 地上部吸氮(磷/钾)量

数据处理及分析采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7.5 等数据处理系统。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥对土壤基础地力的影响

2.1.1 长期不同施肥对基础地力产量和施肥处理产量的影响

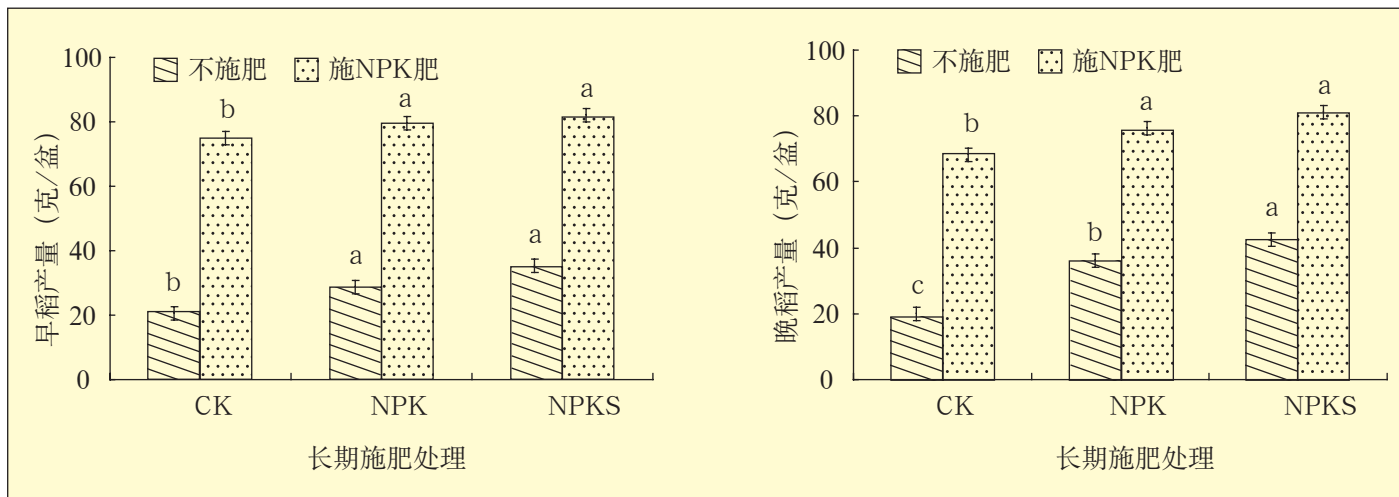
长期不同施肥模式对基础地力产量有显著影响(图 1)。3 个处理的早晚稻基础地力产量(不施肥产量)均表现为: NPKS > NPK > CK。经过 33 年 66 季水稻种植

后, 与 CK 处理相比, NPK 处理早、晚稻基础地力产量分别提高 38.5% 和 88.7%, NPKS 处理分别提高 68.1% 和 123.5%; 且 CK 与 NPK、NPKS 处理间土壤的早晚稻基础地力产量差异均达到显著水平 ($p < 0.05$)。说明长期施 NPK 肥或长期 NPK 肥配施稻草有利于维持和提高土壤基础地力产量, 长期不施肥则导致土壤基础地力产量降低。

施肥处理的早晚稻产量也表现为: NPKS > NPK > CK(图 1), CK 处理与 NPK 和 NPKS 处理间产量差异均达到显著水平 ($p < 0.05$)。说明在相同施肥条件下, 基础地力越高的土壤其作物高产潜力越大。进一步分析发现, 施用相同用量肥料时基础地力低的土壤其早晚稻增产幅度大于基础地力高的土壤, 长期定位试验 CK 处理土壤上施用氮磷钾肥早晚稻产量较不施肥分别提高 265.3% 和 259.4%; NPK 处理土壤上早晚稻分别提高 180.1% 和 110.7%; NPKS 处理土壤上早晚稻分别提高 136.6% 和 89.6%。

2.1.2 长期不同施肥对基础地力贡献率和肥料贡献率的影响

基础地力贡献率是表征土壤基础地力水平高低的另一个指标, 经过 33 年 66 季水稻种植后, 长期不同施肥对红壤性水稻土基础地力贡献率影响有明显差异(图 2)。早晚稻土壤基础地力贡献率均表现为: NPKS > NPK > CK, NPKS、NPK 与 CK 处理间差异达到显著水平 ($p < 0.05$)。与 CK 处理相比, NPK 处理早稻基础地力贡献率增加 8.4 个百分点, 提高 30.5%, NPKS 处理增加 14.9 个百分点, 提高 54.5%; 晚稻 NPK 处理增加 19.7 个百分点, 提高 70.8%, NPKS 处理增加 25.0 个百分点, 提高 90.1%。说明长期氮磷钾肥配合施用或有机无机肥长



采用 Duncan 新复极差法进行多重比较, 不同字母处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

图 1 长期不同施肥对土壤基础地力产量和施肥产量的影响

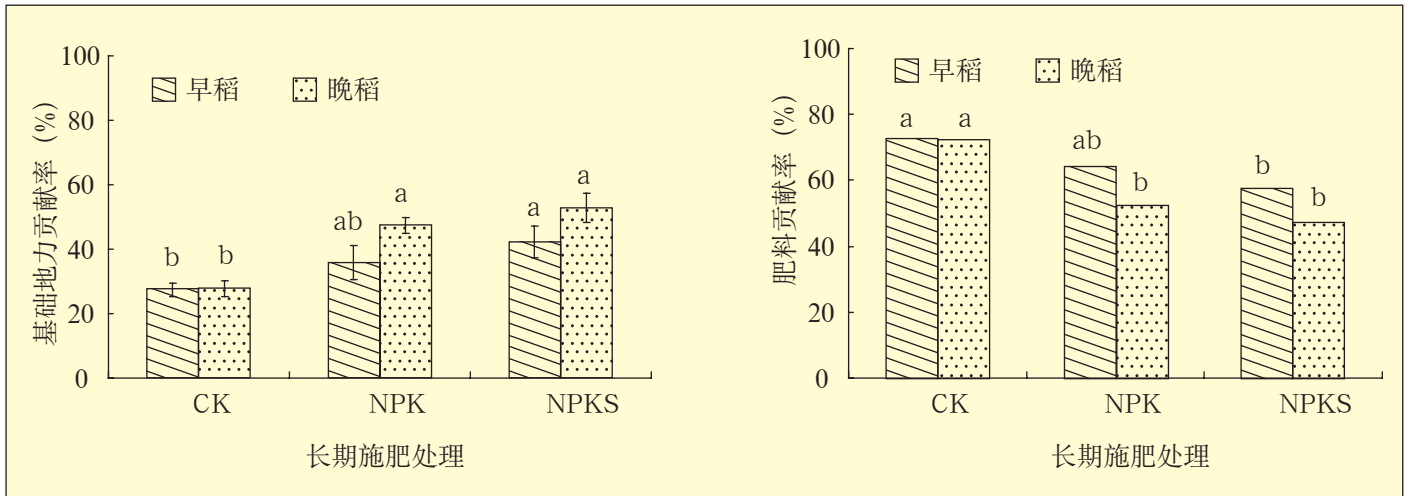


图 2 长期不同施肥对土壤基础地力贡献率和肥料贡献率的影响

期配施有利于土壤基础地力贡献率的维持或提高，而长期不施肥则导致土壤基础地力贡献率降低。

长期不同施肥处理土壤的早晚稻肥料贡献率表现为 CK > NPK > NPKS (图 2)，处理间差异均达显著水平 (p < 0.05)。CK、NPK 和 NPKS 处理土壤的早稻肥料对产量的贡献率分别为 72.6%、64.3% 和 57.7%，晚稻的肥料贡献率分别为 72.2%、52.6% 和 47.2%。早晚稻肥料对产量的贡献率随土壤基础地力的提高而降低。

2.2 长期不同施肥土壤双季水稻氮磷钾养分吸收利用

2.2.1 长期不同施肥土壤双季水稻氮素吸收量、利用效率和土壤氮素依存率

长期不同施肥对双季水稻氮素养分吸收积累量、氮素养分利用效率和土壤氮素依存率有明显影响 (表 2)。盆

栽试验条件下无论施肥或不施肥，籽粒吸氮量和地上部吸氮量均表现为 NPKS > NPK > CK。

在施肥量相同条件下，3 个处理土壤的早、晚稻氮肥农学效率均表现为 CK > NPK > NPKS，随土壤基础地力的提高而降低；早、晚稻氮肥偏生产力、土壤氮素依存率表现为 NPKS > NPK > CK，随土壤基础地力的提高而增加；早稻氮素生理利用率在 89.3 - 97.2 公斤 稻谷 / 公斤 N 之间变化，晚稻在 64.0 - 81.7 公斤 稻谷 / 公斤 N 之间变化；早稻氮肥回收利用率在 37.5% - 44.2% 之间变化，均表现为：CK > NPK > NPKS，随土壤基础地力提高有所降低，晚稻氮肥回收利用率在 35.0% - 38.4% 之间变化，CK 和 NPK 处理高于 NPKS 处理，但早晚稻不同基础地力土壤上氮肥回收利用率的差异均没达到显著水平。

在不施肥条件下，早稻氮收获指数在 0.59 - 0.68 之

表 2 长期不同施肥对双季水稻氮养分吸收利用指标的影响

长期施肥处理	盆栽试验施肥处理	籽粒吸氮量 (公斤/盆)	地上部吸氮量 (公斤/盆)	氮素收获指数	氮肥回收利用率 (%)	氮肥农学效率 (公斤/公斤)	氮素生理利用率 (公斤/公斤)	氮肥偏生产力	土壤氮素依存率 (%)
早 稻									
CK	NF	0.23e	0.39e	0.59d	--	--	--	--	--
	CF	0.70b	1.00b	0.71bc	44.2a	39.4a	89.3a	54.3b	38.9b
NPK	NF	0.34d	0.51d	0.66c	--	--	--	--	--
	CF	0.78a	1.03b	0.75a	38.5a	37.4a	97.2a	57.6a	48.9a
NPKS	NF	0.42c	0.62c	0.68c	--	--	--	--	--
	CF	0.83a	1.14a	0.73ab	37.5a	34.1a	91.9a	59.1a	54.7a
晚 稻									
CK	NF	0.19f	0.40d	0.48b	--	--	--	--	--
	CF	0.58c	1.01b	0.58a	38.0a	31.0a	81.7a	42.9b	40.0b
NPK	NF	0.29e	0.53c	0.56a	--	--	--	--	--
	CF	0.70a	1.14a	0.61a	38.4a	24.9b	64.0b	47.5a	46.2ab
NPKS	NF	0.35d	0.60c	0.59a	--	--	--	--	--
	CF	0.65b	1.16a	0.56a	35.0a	23.9b	68.7b	50.6a	51.9a

注：早稻、晚稻同列数据后不同字母表示差异达 0.05 显著水平。下同。

间变化，晚稻氮收获指数在 0.48 – 0.59 之间变化，且均随土壤基础地力的提高而提高；在相同施肥条件下早稻氮收获指数在 0.71 – 0.75 之间变化，晚稻在 0.56 – 0.61 之间变化，早、晚稻均以较高基础地力土壤上较高。

2.2.2 长期不同施肥土壤双季水稻磷素吸收量、利用效率和土壤磷素依存率

双季水稻磷养分吸收利用受长期不同施肥方式影响明显(表 3)。无论施肥与否，3 处理籽粒吸磷量和地上部吸磷量均表现为 NPKS > NPK > CK，且 NPK 和 NPKS 处理与 CK 处理间的差异显著 ($p < 0.05$)。

在施相同用量肥料条件下，3 处理土壤的早、晚稻磷肥农学效率均表现为：CK > NPK > NPKS，随土壤基础地力的提高而降低；早、晚稻磷肥偏生产力、土壤磷素依存率随土壤基础地力的提高而增加；早、晚稻均以长期 NPK 处理土壤的磷素生理利用率最高；早稻磷肥回收利用率在 29.4% – 32.0% 之间变化，晚稻磷肥回收利用率在 27.2% – 34.5% 之间变化，均以长期不施肥土壤最高。

在不施肥条件下，早稻磷收获指数在 0.74 – 0.78 之间变化，晚稻氮收获指数在 0.62 – 0.71 之间变化，早稻随土壤基础地力变化不显著，晚稻随土壤基础地力提高而提高。施用相同用量肥料时早稻氮收获指数在 0.80 – 0.86 之间变化，晚稻在 0.73 – 0.76 之间变化，早稻随土壤基础地力提高而降低，晚稻变化规律不明显。早晚稻不同基础地力土壤上施 NPK 肥处理的磷素收获指数均高于相应的不施肥处理。

2.2.3 长期不同施肥土壤双季水稻钾素吸收量、利用效率和土壤钾素依存率

由表 4 可见，长期不同施肥对早、晚稻籽粒吸钾量、地上部吸钾量均有显著影响。无论施肥还是不施肥，除早稻籽粒吸钾量外，3 处理土壤的籽粒吸钾量及地上部吸钾量均表现为 NPKS > NPK > CK。

在施相同用量肥料条件下，3 处理土壤的早、晚稻钾肥农学效率均表现为：CK > NPK > NPKS，随土壤基础地力的提高而降低；早、晚稻钾肥偏生产力、土壤钾素依存率表现为：NPKS > NPK > CK，随土壤基础地力的提高而增加；早稻钾素生理利用率在 151.1 – 162.2 公斤稻谷 / 公斤 K_2O 之间变化，晚稻在 103.9 – 120.3 公斤稻谷 / 公斤 K_2O 之间变化，不同基础地力土壤间的差异均不显著；早稻钾肥回收利用率在 34.3% – 38.5% 之间变化，晚稻在 38.0% – 46.7% 之间变化，早晚稻均表现为：CK > NPK > NPKS，钾肥回收利用率均随土壤基础地力提高而降低。

在不施肥条件下，早稻钾素收获指数在 0.17 – 0.29 之间变化，晚稻钾素收获指数在 0.16 – 0.36 之间变化，早稻以 NPK 处理钾素收获指数较高，晚稻钾素收获指数随土壤基础地力的提高而提高；施用相同用量肥料时，早稻钾收获指数在 0.28 – 0.31 之间变化，晚稻 3 处理钾素收获指数均为 0.23，早、晚稻钾素收获指数随土壤基础地力的变化规律不明显。

表 3 长期不同施肥对双季水稻磷养分吸收利用指标的影响

长期施肥处理	盆栽试验施肥处理	籽粒吸磷量 (公斤/盆)	地上部吸磷量	磷素收获指数	磷肥回收利用率 (%)	磷肥农学效率 (公斤/公斤)	磷素生理利用率	磷肥偏生产力	土壤磷素依存率 (%)
早 稻									
CK	NF	0.05e	0.06f	0.78b	--	--	--	--	--
	CF	0.15b	0.17c	0.86a	32.0a	68.0a	486.4a	93.6b	36.1b
NPK	NF	0.09d	0.12e	0.74c	--	--	--	--	--
	CF	0.18a	0.23b	0.81b	29.5a	64.4a	502.8a	99.3a	54.4a
NPKS	NF	0.11c	0.14d	0.77bc	--	--	--	--	--
	CF	0.20a	0.25a	0.80b	29.4a	58.8a	462.4a	101.9a	58.2a
晚 稻									
CK	NF	0.06f	0.09e	0.62b	--	--	--	--	--
	CF	0.16c	0.21c	0.74a	34.5a	62.0a	411.6a	85.9b	43.2b
NPK	NF	0.09e	0.14d	0.65b	--	--	--	--	--
	CF	0.17b	0.24b	0.73a	27.2b	49.9b	412.6a	95.0a	60.4a
NPKS	NF	0.11d	0.16d	0.71a	--	--	--	--	--
	CF	0.20a	0.27a	0.76a	31.4ab	47.9b	350.3b	101.3a	58.9a

表 4 长期不同施肥对双季水稻钾养分吸收利用指标的影响

长期施肥处理	盆栽试验施肥处理	籽粒吸钾量 (公斤/盆)	地上部吸钾量	钾素 收获指数	钾肥回收 利用率 (%)	钾肥农学效率	钾素生理利用率 (公斤/公斤)	钾肥偏生产力	土壤钾素 依存率 (%)
早 稻									
CK	NF	0.04e	0.25d	0.17b	--	--	--	--	--
	CF	0.17b	0.59b	0.29a	38.5a	51.0a	159.7a	70.2b	42.5b
NPK	NF	0.09c	0.30cd	0.29a	--	--	--	--	--
	CF	0.20a	0.64ab	0.31a	38.4a	48.3a	151.1a	74.5a	47.0ab
NPKS	NF	0.07d	0.35c	0.20b	--	--	--	--	--
	CF	0.18b	0.65a	0.28a	34.3a	44.1a	162.2a	76.4a	54.0a
晚 稻									
CK	NF	0.05d	0.30c	0.16d	--	--	--	--	--
	CF	0.16ab	0.71a	0.23c	46.7a	46.5a	120.3a	64.4b	42.2b
NPK	NF	0.11c	0.39b	0.29b	--	--	--	--	--
	CF	0.17a	0.77a	0.23c	43.0a	37.4b	103.9a	71.2a	50.6ab
NPKS	NF	0.16b	0.44b	0.36a	--	--	--	--	--
	CF	0.18a	0.78a	0.23c	38.0a	35.9b	116.8a	75.9a	57.0a

2.3 双季水稻氮磷钾养分利用效率及土壤养分依存率对土壤基础地力贡献率的响应

分析 2 季水稻氮磷钾养分利用效率、土壤养分依存率与早晚稻基础地力贡献率的相关性 (表 5) 表明, 氮、磷、钾肥回收利用率、氮、磷、钾肥农学效率、氮、磷、钾养分生理利用率均随土壤基础地力的提高而降低, 氮磷钾肥偏生产力、土壤氮磷钾养分依存率随土壤基础地力的提高而提高。土壤基础地力贡献率随土壤养分含量的增加而提高。其中, 土壤基础地力贡献率与氮肥回收利用率、氮肥农学效率、磷肥农学效率、钾肥农学效率、土壤氮素依存

率、土壤磷素依存率、土壤钾素依存率的相关性达到极显著水平 ($p < 0.01$), 与磷肥回收率、氮素生理利用率、钾素生理利用率、磷肥偏生产力、钾肥偏生产力的相关性达显著水平 ($p < 0.05$)。

早晚稻氮肥施用量不同, 而早晚稻磷钾肥施用量相同, 导致氮肥农学效率和偏生产力与土壤基础地力贡献率拟合方程的决定系数 (R^2) 与磷、钾肥拟合方程的决定系数不一致 (表 5)。进一步分析相同氮肥施用量条件下氮肥农学效率与土壤基础地力贡献率的关系发现, 早稻氮肥农学效率 (y) 与土壤基础地力贡献率 (x) 拟合方程为:

表 5 养分利用效率、土壤养分依存率 (y) 与土壤基础地力贡献率 (x) 的直线回归分析 (n=18)

养分利用效率	拟合模型	显著性检验
氮肥回收利用率	$y = -0.2634x + 48.823$	$R^2 = 0.4016^{**}$
磷肥回收利用率	$y = -0.2052x + 38.665$	$R^2 = 0.3178^*$
钾肥回收利用率	$y = -0.1865x + 47.065$	$R^2 = 0.0929$
氮肥农学效率	$y = -0.4816x + 50.529$	$R^2 = 0.6125^{**}$
磷肥农学效率	$y = -0.7424x + 87.36$	$R^2 = 0.827^{**}$
钾肥农学效率	$y = -0.5568x + 65.515$	$R^2 = 0.827^{**}$
氮素生理利用率	$y = -0.6774x + 108.66$	$R^2 = 0.2889^*$
磷素生理利用率	$y = -2.5423x + 538.04$	$R^2 = 0.2061$
钾素生理利用率	$y = -1.2278x + 178.82$	$R^2 = 0.3207^*$
氮肥偏生产力	$y = 0.0325x + 50.746$	$R^2 = 0.0032$
磷肥偏生产力	$y = 0.3456x + 82.696$	$R^2 = 0.3303^*$
钾肥偏生产力	$y = 0.2592x + 62.017$	$R^2 = 0.3303^*$
土壤氮素依存率	$y = 0.5034x + 27.172$	$R^2 = 0.5603^{**}$
土壤磷素依存率	$y = 0.8674x + 18.119$	$R^2 = 0.7902^{**}$
土壤钾素依存率	$y = 0.5461x + 27.629$	$R^2 = 0.5862^{**}$

注: ** 表示在 1% 水平相关性显著, * 表示在 5% 水平相关性显著。

$y = -0.4296x + 52.061$, $n=9$, $R^2=0.8502^{**}$, 晚稻拟合方程为: $y = -0.2965x + 39.272$, $n=9$, $R^2=0.9232^{**}$; 早稻氮肥偏生产力 (y) 与土壤基础地力贡献率 (x) 拟合方程为: $y = 0.21x + 49.622$, $n=9$, $R^2=0.4084^2$, 晚稻拟合方程为: $y = 0.2743x + 35.315$, $n=9$, $R^2=0.7748^{**}$ 。表明在同一施氮水平下, 氮肥偏生产力也随着土壤基础地力的提高显著或极显著提高。

3 结论与讨论

长期不同施肥模式对农田土壤基础地力的变化有着重要影响, 长期平衡施肥和长期有机无机肥配合施用有利于土壤基础地力提升, 长期不施肥则会导致土壤基础地力下降。本研究的结果表明经过连续 33 年 66 季水稻长期不同施肥后, 红壤性水稻土基础地力发生明显变化, 长期不施肥 (CK)、长期施 NPK 肥 (NPK) 和长期 NPK 肥配施稻草 (NPKS) 3 个处理土壤的基础地力产量和基础地力贡献率均表现为: $NPKS > NPK > CK$ 。长期施 NPK 肥或长期 NPK 肥配施稻草均有利于土壤基础地力的提高, 且长期 NPK 肥配施稻草的提升效果更明显。

地力因素是制约粮食单产提高的主要因素之一, 土壤地力水平不但影响不施肥产量 (基础地力产量), 对施肥条件下的产量也有很大影响。本研究表明无论施肥或不施肥, 早晚稻产量均随土壤基础地力的提高而增加。土壤基础地力高作物获得高产的潜力大。目标产量相同时基础地力高的土壤所需施肥量较低, 而基础地力低的土壤对肥料

养分的依赖性较强, 只有在较高施肥水平下才能获得较高的产量。说明通过土壤基础地力的培育和提升可以在达到保证作物产量目的的同时适量降低肥料施用量, 因此, 通过培肥土壤, 提高耕地质量和土地生产力, 实现“藏粮于地”。

通过施肥实现粮食产量高产稳产的同时, 还要兼顾考虑养分资源的优化管理及养分高效利用。长期不同施肥模式对作物养分吸收有重要影响。本研究结果表明长期施 NPK 肥或 NPK 肥配施稻草有利于促进早、晚稻植株氮、磷、钾养分吸收。氮、磷、钾肥回收利用率、农学效率、氮、磷、钾生理利用率均随土壤基础地力的提高而降低, 氮、磷、钾肥偏生产力、土壤氮、磷、钾养分依存率均随土壤基础地力的提高而提高。这表明土壤基础地力越高, 土壤本身氮磷钾养分供应能力越强, 作物对肥料养分的依赖性越小, 因此, 通过多年水肥培育, 土壤基础地力提升到较高水平后可适当减少肥料投入, 同样能达到维持作物高产稳产的目的, 同时提高肥料利用效率。

土壤在长期连续不同施肥过程中基础地力发生变化形成不同地力水平, 因此, 本文研究长期施肥管理措施下土壤基础地力演变过程中或发生变化后的作物氮磷钾养分吸收利用效率对土壤基础地力的响应, 无论对于土壤不同基础地力水平下作物施肥量的确定, 还是基础地力培育和提升适宜程度的衡量均有指导意义; 但对 33 年三种施肥模式下土壤基础地力的动态变化机制, 基础地力定向培育与合理施肥量的关系、土壤基础地力构成的土壤养分有效性时间长短或稳定性等均有待今后进一步研究。

参考文献

- [1] 沈仁芳, 陈美军, 孔祥斌, 等. 耕地质量的概念和评价与管理对策 [J]. 土壤学报, 2012, 49 (6):1210-1217.
- [2] 贡付飞, 查燕, 武雪萍, 等. 长期不同施肥措施下潮土冬小麦农田基础地力演变分析 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(12):120-129.
- [3] 曾希柏, 张佳宝, 魏朝富, 等. 中国低产田状况及改良策略 [J]. 土壤学报, 2014, 51(4):675-682.
- [4] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响 [J]. 中国农业科学, 2009, 42 (2):543-551.
- [5] 龚伟, 颜晓元, 王景燕. 长期施肥对土壤肥力的影响 [J]. 土壤, 2011, 43(3):336-342.
- [6] 曾祥明, 韩宝吉, 徐芳森, 等. 不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响 [J]. 中国农业科学, 2012, 45 (14):2886-2894.
- [7] 曹承富, 孔令聪, 张存岭, 等. 施肥对砂姜黑土基础肥力及强筋小麦产量、品质的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5):1073-1077.
- [8] 廖育林, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 长期施用化肥和稻草对红壤性水稻土钾素固定的影响 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(1):70-73, 95.
- [9] 廖育林, 郑圣先, 聂军, 等. 长期施用化肥和稻草对红壤水稻土肥力和生产力持续性的影响 [J]. 中国农业科学, 2009, 42(10):3541-3550.
- [10] Liao Y L, Zheng S X, Nie J, et al. Long-term effect of fertilizer and rice straw on mineral composition and potassium adsorption in a reddish paddy soil [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12 (4):694-710.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.

钾肥品种对加工番茄生长发育及产量品质的影响

王金鑫 李青军 张炎*

(新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 新疆 乌鲁木齐, 830091)

摘要: 研究了不同钾肥对加工番茄干物质、产量及品质的影响。试验设 3 个钾肥品种, 采用膜下滴灌种植, 在收获期测定加工番茄株数、单果重, 计算产量, 分析肥料效益。相同氮磷用量的基础上, 施用钾肥可显著提高加工番茄干物质及产量; 2 种加工番茄对 KCl 农学效率均最高。施用 KCl 时加工番茄品质无显著差异; 施用 KCl 的经济效益比 K_2SO_4 、 KNO_3 更好, 农民纯收益最高。加工番茄施用 KCl 产量最高。

关键词: 钾肥品种; 加工番茄; 干物质; 产量品质

新疆独特的气候条件非常适宜加工番茄的生长, 是我国加工番茄种植面积、加工规模和出口量最大的生产基地之一, 加工番茄产业已成为当地经济增长的一个支柱产业^[1]。经过多年的发展, 2014 年新疆加工番茄种植面积已达 105 万亩, 年生产能力已突破 734.6 万吨, 加工番茄制品产量、出口量已占全国 90% 以上^[2]。加工番茄是需钾量较大的作物, 1 吨番茄产品需吸收 5.0 公斤 K_2O , 其茎和果实内钾的含量超过了氮和磷的含量^[3-4], 但是由于新疆土壤富含钾素的观念导致多年来在加工番茄生产中, 农民不施或很少施用钾肥, 而农作物从土壤中带走了大量的钾, 使土壤钾有了较大的消耗, 农田土壤速效钾也有较大幅度的下降^[5]。因此, 缺钾已成为制约加工番茄高产优质的重要因素之一^[6-7]。钾素对加工番茄生长发育、产量形成以及抗逆稳产发挥着重要作用。研究表明加工番茄一生中需钾量最高, 氮次之, 磷的需求量远少于氮和钾^[8-10]。因此合理施用钾肥可显著提高加工番茄产量, 改善品质, 增强抗病能力^[11]。

国内关于加工番茄的合理施肥技术研究较多, 齐红岩等^[7]研究了不同氮、钾施用水平对番茄营养吸收和土壤养分变化的影响; 吴建繁^[12]、汤明尧等^[9]对加工番茄氮、磷、钾肥料效应及其吸收分配规律进行了研究。以往的研究多集中在钾肥施用的时期、用量等研究或氮磷钾配施对

加工番茄产量品质性状的影响方面, 但对滴灌条件下加工番茄的钾肥品种优化管理技术的研究较少。本研究是在膜下滴灌生产栽培条件下, 通过田间小区试验探讨不同钾肥对 2 个加工番茄品种产量、品质的影响, 为新疆加工番茄生产中钾肥合理施用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

试验安排在新疆昌吉兵团灌溉中心试验站, 加工番茄供试品种为 HYH-01 和屯河 8 号, 一膜 2 行种植, 株距为 28 厘米, 行距 60 厘米, 小区面积 32 平方米。加工番茄育苗 1 个月于 5 月 7 日移栽, 7-10 天灌溉一次, 全生育期灌溉 10 次, 总计 300 方/亩。HYH-01 试验地前茬作物为加工番茄, 屯河 8 号试验地前茬作物为棉花, 作物秸秆打碎后还田。播前土壤基础养分如表 1 所示。

表 1 0-20 cm 供试土壤基本农化状况					
	pH	有机质 (克/公斤)	速效氮 (毫克/公斤)	有效磷 (毫克/公斤)	速效钾
HYH-01	7.8	11.64	48.3	16.7	230
屯河 8 号	7.83	11.3	48.3	7.8	236

基金项目: 国际植物营养研究所 (IPNI) 资助项目 (IPNI-XJ-13)

作者简介: 王金鑫 (1985-), 男, 山东人, 助理研究员, 研究方向为作物营养与施肥。E-mail: wjxin345@sohu.com

通讯作者: 张炎 (1965-), 女, 新疆人, 研究员, 硕士生导师, 研究方向为作物营养与施肥。E-mail: yanzhangzy@sohu.com

1.2 试验设计

试验设 K-0、K-KCl、K-K₂SO₄、K-KNO₃，共 4 个处理，重复 3 次。各处理氮肥全部作为追肥，在加工番茄生育期间分数次随水滴施，磷肥及微肥全部基施，钾肥 50% 开花期滴灌追施和 50% 结果期滴灌追施。氮肥用尿素 (N 46%)、磷肥用三料磷肥 (P₂O₅ 46%)、K-KCl 处理用氯化钾 (K₂O 60%)，K-K₂SO₄ 处理用硫酸钾 (K₂O 52%)，K-KNO₃ 处理用硝酸钾 (K₂O 46.53%，N 13.86%)，有机肥 (55% ≤ OM ≤ 58%，N+P+K ≥ 5%) 施用量为 100 公斤 / 亩。微肥为 ZnSO₄、MnSO₄、FeSO₄。各处理施肥量见表 2。

表 2 各处理施肥量 (公斤 / 公顷)

处理	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	ZnSO ₄	MnSO ₄	FeSO ₄
K-0	24	14	0	0.4	1.7	2
K-KCl	24	14	8	0.4	1.7	2
K-K ₂ SO ₄	24	14	8	0.4	1.7	2
K-KNO ₃	24	14	8	0.4	1.7	2

1.3 测定方法

干物质测定: 在苗期 (5 月 10 日)、初花期 (6 月 11 日)、初果期 (6 月 27 日)、盛果期 (7 月 23 日)、成熟期 (8 月 21 日) 采取加工番茄样品, 将采集的植株按不同器官 (茎、叶、蕾 + 花 + 果) 分开, 烘干、称重, 统计各器官干物质。

加工番茄品质的测定: Vc 含量: 2, 6-二氯酚酚滴定法; β-胡萝卜素: 高效液相色谱法; 总酸: pH 电位法; 番茄红素: 分光光度法; 色差值: 色差仪; 可溶性固形物: 折光计法。

加工番茄产量测定: 加工番茄成熟期, 在每个小区内划定测产区, 收获成熟果实、称重, 计算产量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS11.5 统计分析软件对数据进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 钾肥品种对加工番茄成熟期干物质累积与分配的影响

干物质积累是产量形成的基础, 由表 3 可以看出, 成熟期两个品种加工番茄生殖器官所占比重达到 65.67% - 76.78%、55.46% - 69.10%。HYH-01 的 K-KCl 处理分配到茎、叶的干物质都是最多, 分别为 39.94 克 / 株、53.64 克 / 株, 与 K-KNO₃ 处理无显著差异, 但与其他处理均差异显著; K-K₂SO₄ 处理分配到果干物质最多, 其次是 K-KCl 处理和 K-KNO₃ 处理, K-0 处理最少,



表 3 加工番茄干物质及分配 (克/株)

处理	HYH-01				屯河 8 号			
	茎	叶	果	总计	茎	叶	果	总计
K-0	32.17ab	33.58b	140.22b	205.97b	36.34b	43.57b	117.37b	197.27b
K-KCl	39.94a	53.64a	178.98ab	272.56a	47.14ab	52.49b	159.24ab	258.87a
K-K ₂ SO ₄	27.39b	35.27b	207.15a	269.80a	55.25a	73.21a	159.95ab	288.41a
K-KNO ₃	32.38ab	49.17a	168.71ab	250.26a	37.88b	46.32 b	188.30a	272.50a

K-KNO₃、K-KCl 处理无显著差异；总干物质以 K-K₂SO₄ 处理最多，与其他处理均有显著差异，而 K-0 处理最少。屯河 8 号 K-K₂SO₄ 处理分配到茎、叶的干物质最多，分别为 55.25 克/株、73.21 克/株，K-KNO₃ 处理分配到果中干物质最多，K-K₂SO₄、K-KNO₃、K-KCl 处理之间无显著差异；K-0 处理茎、叶、果含量最低，与其他处理差异显著；施钾处理总干物质无显著差异，但显著高于 K-0 处理，以 K-K₂SO₄ 处理最大，K-0 处理最低。

2.2 钾肥品种对加工番茄生长发育的影响

表 4 可知，加工番茄干物质积累随着生育期的进展而逐渐增强，苗期积累缓慢，到盛果期时达到高峰。加工番茄 HYH-01、屯河 8 号干物质积累速率最大的时刻 t₀，各施肥处理分别比 K-0 处理推后了 2-6 天和 4-13 天。其中，均以 K-K₂SO₄ 处理的 t₀ 时刻出现最晚，为出苗后的 116 天和 97 天，而且干物质积累的旺盛时期 Δt 也最长，分别比 K-0、K-KCl、K-KNO₃ 处理延长了 4、7、6 天和 8、3、2 天，表明硫酸钾肥料有利于推迟加工番茄干物质积累速率最大的时刻，延长干物质积累的旺盛时期。K-K₂SO₄ 处理的 HYH-01 (269.8 克) 和屯河 8 号 (288.4 克) 处理每株干物质最大积累量显著高于 K-0 的

206 克和 197.3 克，经成熟期干物质数据比较 K-K₂SO₄ 处理比 K-KCl 显著增加的主要是茎叶干物质，而果实干物质无显著差异。

钾肥的施用增加了不同品种加工番茄在 Δt 时期内的干物质积累量，HYH-01 各处理干物质积累主要集中在出苗后的 84-140 天内 (盛果期到成熟期)，而屯河 8 号干物质积累主要集中在出苗后的 71-114 天内 (初果期到盛果期)；施用不同钾肥虽然对每株干物质最大积累量影响不大，但施钾可以使加工番茄干物质快速积累时间 (Δt) 变长，施用钾肥的各处理的干物质快速增长期 (Δt) 都在 32-48 天左右，而 K-0 处理的干物质快速增长期都在 27-44 天左右。综上所述，钾肥可以延长加工番茄干物质积累的时期并增加干物质积累量。

2.3 钾肥品种对加工番茄产量及构成因子的影响

从表 5 可以看出，钾肥品种对 HYH-01 和屯河 8 号的单株果数没有显著影响，但 HYH-01 不施钾肥单株果数显著降低。单果重均以 K-KNO₃ 处理最高，分别为 66.00 克/个、63.37 克/个，屯河 8 号 K-KNO₃ 处理与 K-0 处理达到了差异显著，与 K-K₂SO₄、K-KNO₃ 处理差异不显著。产量均以 K-KCl 处理最高，与 K-0 处理都达到了显著差异，与 K-K₂SO₄、K-KNO₃ 处理

表 4 加工番茄干物质积累的 Logistic 模型及其特征值

加工番茄	处理	方程	t1	t2	Δt	t0	R ²	F
HYH-01	K-0	$y=264.5337 / [1+e^{(6.3953-0.060172t)}]$	84	128	44	106	0.9954	322**
	K-KCl	$y=335.6402 / [1+e^{(6.6447-0.063758t)}]$	84	125	41	104	0.9969	481**
	K-K ₂ SO ₄	$y=509.9955 / [1+e^{(6.4231-0.055306t)}]$	92	140	48	116	0.9969	483**
	K-KNO ₃	$y=318.0180 / [1+e^{(6.6202-0.062367t)}]$	85	127	42	106	0.9985	976**
屯河 8 号	K-0	$y=196.6892 / [1+e^{(8.3633-0.099359t)}]$	71	97	27	84	0.9956	343**
	K-KCl	$y=267.3031 / [1+e^{(7.1839-0.081313t)}]$	72	105	32	88	0.9952	309**
	K-K ₂ SO ₄	$y=317.4954 / [1+e^{(7.2474-0.074944t)}]$	79	114	35	97	0.9985	1025**
Tunhe No.8	K-KNO ₃	$y=290.2778 / [1+e^{(7.5794-0.080946t)}]$	77	110	33	94	0.9994	2641**

注：t 为加工番茄出苗后的天数 (d)，y 为加工番茄干物质积累量 (g/株)，t₀ 为干物质积累速率最大时，t₁ 和 t₂ 分别为 Logistic 生长函数的两个拐，Δt=t₂-t₁，是加工番茄旺盛生长的时期 F(3, 5) 0.05=5.41，F(3, 5) 0.01=12.1。

表 5 不同钾肥品种对加工番茄产量的影响

处理	HYH-01				屯河 8 号			
	单株果数 (个/株)	单果重 (克/个)	产量 (公斤/公顷)	增产率 (%)	单株果数 (个/株)	单果重 (克/个)	产量 (公斤/公顷)	增产率 (%)
K-0	26.88 b	61.92 c	6020b	--	30.63 ab	56.89c	4983c	--
K-KCl	32.75 ab	64.72 ab	8012a	24.87	32.25 a	58.67b	6164a	19.17
K-K ₂ SO ₄	36.63 a	63.07 ab	7659ab	21.4	28.38b	61.59ab	5566b	10.49
K-KNO ₃	33.38 ab	66.00 a	7357ab	18.17	30.75 ab	63.37a	5824ab	14.44

差异不显著, K-KCl、K-K₂SO₄、K-KNO₃ 处理的加工番茄产量比 K-0 处理增产 18.17% - 24.87% 和 10.49% - 19.17%。

2.4 钾肥品种对加工番茄品质的影响

从表 6 可以看出, 钾肥品种对 HYH-01 色差、总酸含量和 β-胡萝卜素含量无显著影响, 但对 Vc 含量有显著影响, K-K₂SO₄ 处理中的 Vc 含量最多, 与 K-0、K-KCl、K-KNO₃ 处理差异显著; 可溶性固形以 K-K₂SO₄ 处理最高, K-0 处理最小, 两者相差 1.28%, 说明施用 K-K₂SO₄ 但能够提高 HYH-01 的可溶性固形物; K-KCl 处理和 K-K₂SO₄ 处理的 β-胡萝卜素含量最多, 其次为 K-KNO₃ 处理, K-0 处理最低, K-KCl 处理色差值和总酸含量最大, 而 K-KNO₃ 处理最小。

钾肥品种对屯河 8 号加工番茄的 Vc 含量、β-胡萝卜素、可溶性固形、色差、总酸、番茄红素无显著影响, K-KCl 处理中的 Vc 含量、β-胡萝卜素、可溶性固形、总酸、番茄红素最多, 分别为 30.63 毫克/100 克、0.29 毫克/100 克、6.28%、4.93 克/公斤、13.70 毫克/100 克, 而不施钾肥时加工番茄的可溶性固形和番茄红素含量最低, 这说明 KCl 肥料能够提高屯河 8 号的品质。

2.5 肥料效益分析

由表 7 可以看出, 钾肥的农学效率用每千克纯养分增产的加工番茄产量表示, 每千克 K₂O 促进 HYH-01 增产约为 167.10 - 249.05 公斤, 促进屯河 8 号增产 72.98 - 147.70 公斤, 其中 K-KCl 处理农学效率最高, 而 K-0 处理最小。

按照当年当地的加工番茄和钾肥价格计算, HYH-01 每投入 1 元的 K₂O, K-KCl 处理可增收 3.21 元, 而 K-K₂SO₄ 和 K-KNO₃ 处理分别增收 2.64 元和 2.16 元; 屯河 8 号每投入 1 元的 K₂O, K-KCl 处理可增收 1.90 元, 而 K-K₂SO₄ 和 K-KNO₃ 处理分别增收 0.94 元和 1.36 元。扣除肥料成本, K-KCl 处理收益最好, 分别为 3474 元/亩、2606 元/亩, 而 K-0 处理收益最低, 分别为 2616/亩和 2129 元/亩。以上表明, KCl 的肥料效益最好。

讨论

通常农民认为大量施用化肥, 就能获得高产, 而在加工番茄生产过程忽略了合理的肥料配比, 长期施用单一肥料品种, 不但无法获得较高的经济效益, 还破坏土壤的养分平衡, 造成了土壤结构板结^[13]。在施用相同氮

表 6 不同处理对加工番茄品质的影响

品种	处理	色差 a/b	可溶性固形物 (%)	总酸 (克/公斤)	Vc (毫克/100 克)	番茄红素 (毫克/100 克)	β-胡萝卜素 (毫克/100 克)
HYH-01	K-0	2.68 a	5.29 b	3.52 a	27.53 b	11.57 a	0.22 a
	K-KCl	2.72 a	5.50 ab	3.82 a	28.40 b	11.97 a	0.26 a
	K-K ₂ SO ₄	2.70 a	5.74 a	3.56 a	32.60 a	11.90 a	0.26 a
	K-KNO ₃	2.62 a	5.30 b	3.47 a	27.00 b	10.37 b	0.24 a
屯河 8 号	K-0	2.68a	5.71a	4.47a	27.97 a	12.33 a	0.28 a
	K-KCl	2.73a	6.28a	4.93a	30.63 a	13.70 a	0.29 a
	K-K ₂ SO ₄	2.66a	5.79a	4.42a	29.63 a	12.53 a	0.27 a
	K-KNO ₃	2.74a	5.89a	4.72a	24.13 a	13.17 a	0.25 a

表 7 不同处理下加工番茄肥料效益分析

处理	HYH-01					屯河 8 号				
	农学效率 (公斤/公斤)	增收 (元/元)	产值	肥料成本 (元/亩)	纯收益	农学效率 (公斤/公斤)	增收 (元/元)	产值	肥料成本 (元/亩)	纯收益
K-0	--	--	2829	213	2616	--	--	2342	213	2129
K-KCl	249.05	3.21	3766	292	3474	147.70	1.90	2897	292	2606
K-K ₂ SO ₄	204.83	2.64	3599	292	3308	72.98	0.94	2616	292	2325
K-KNO ₃	167.10	2.16	3458	292	3166	105.14	1.36	2737	292	2446

注: 2013 年昌吉市加工番茄 0.47 元/公斤, N: 4.89 元/公, P₂O₅: 5.65 元/公, K₂O: 9.0 元/公, FeSO₄: 0.7 元/公斤, MnSO₄: 7.8 元/公斤, ZnSO₄: 5 元/公斤.

磷肥基础上^[6], 施用不同钾肥品种均增加了加工番茄产量, 显著增加了收益, 经济效益较显著。秦鱼生^[14]等对马铃薯开展了不同钾肥品种试验, 结果表明当氯化钾的施用量为 15 公斤/亩时, 增产的效果最明显, 增产的幅度达到 29.0%; 当施钾量一样时, 氯化钾增产的效

果高于硫酸钾, 钾肥施用可以明显提高作物产量。与前人研究结果相似, 本试验 2 个加工番茄品种各处理产量均以 KCl 处理最高, 相较于不施钾处理, 增产率分别达 24.87% 和 19.17%。该结果与李彦等人的研究结果在增产率方面存在一些差异, 但均表明了氯化钾增产的效果高



于硫酸钾。钾素是加工番茄生产的关键限制因子之一,适当的钾肥品种运筹是保证钾素供应充足、提高钾素农学效率和促进作物产量形成的关键因素^[15]。在本试验中通过钾肥品种的变化,在加工番茄成熟期,施用 KCl 处理产量显著偏高,其钾素积累量明显偏高,加工番茄钾素积累量与产量呈正相关关系。

3 结论

1) 钾肥可显著提高加工番茄干物质及产量;施用 KCl 的经济效益比 K_2SO_4 、 KNO_3 更好,农民纯收益最高。

2) KCl 能提高屯河 8 号 Vc、 β -胡萝卜素、可溶性固形、色差、总酸、番茄红素含量,但差异不显著;硫酸钾能显著提高 HYH-01 可溶性固形物及 Vc 含量。

参考文献

- [1] 庞胜群,王祯丽,张润. 新疆加工番茄产业现状及发展前景[J]. 中国蔬菜, 2005, (2):39-41.
- [2] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[J]. 中国统计出版社, 2015.
- [3] 李彦,郭良进,高贤彪,等. 钾肥对大棚番茄产量和品质的影响[J]. 山东农业科学, 2004, (1):60-61.
- [4] 王明香,聂俊华,张华芳. 钾素营养研究进展[J]. 云南农业大学学报, 2000, 15(4):356-358.
- [5] 张炎,史军辉,罗广华,等. 新疆农田土壤养分与化肥施用现状及评价[J]. 新疆农业科学, 2006, 43(5):375-379.
- [6] 胡伟,张炎,王海燕,等. 几种钾肥在加工番茄上的应用效果研究[J]. 新疆农业科学, 2007, 44(4):494-497.
- [7] 齐红岩,李天来,富宏丹,等. 不同氮钾施用水平对番茄营养吸收和土壤养分变化的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(2):268-272.
- [8] 张小玲,马海刚,赵黎,等. 新疆加工番茄营养特性及专用肥最佳配方的研究[J]. 新疆农业科学, 2002, 39(5):278-282.
- [9] 汤明尧,张炎,胡伟,等. 不同施氮水平对加工番茄养分吸收、分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5):1238-1245.
- [10] 崔瑞秀,张丽敏,吴秀英. 氮钾肥配施对番茄产量及品质的影响研究初报[J]. 河北农业科学, 2005, 9(1):114-115.
- [11] 杨晓燕,卜玉山,段小柱. 施钾对番茄产量和品质效应研究[J]. 新疆农业科学, 2005, 42(4):272-275.
- [12] 吴建繁,王运华,贺建德,等. 京郊保护地番茄氮磷钾肥料效应及其吸收分配规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4):409-416.
- [13] 赵彬,郎家庆,韩晓日,等. 番茄最佳施肥量及配比研究[J]. 辽宁农业科学, 2002, (5):16-18.
- [14] 秦鱼生,涂仕华,冯文强,等. 不同钾肥品种及用量对马铃薯产量和品质的影响[J]. 西南农业学报, 2010, 23(6):1950-1954.
- [15] 史春余,王振林,赵秉强,等. 钾营养对甘薯某些生理特性和产量形成的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(1):81-85.

不同栽培方式与施肥对马铃薯产量及其水分利用效率的影响

张平良¹ 郭天文² 李书田³ 刘晓伟¹ 曾骏¹

(1 甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 甘肃 兰州, 730070; 2 甘肃省农业科学院, 甘肃 兰州, 730070; 3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京, 100081)

摘要: 采用田间试验方法, 研究了不同地膜覆盖种植方式与平衡施肥对旱地马铃薯产量及其水分利用效率的影响。结果表明, 全膜覆盖垄播种植方式有利于马铃薯碳水化合物的合成, 增加马铃薯干物质积累量, N、P、K 平衡施肥干物质积累量增加效果显著; 与裸地相比, 全膜覆盖平作和全膜覆盖垄播马铃薯块茎产量分别显著增加 43.4%–60.7% 和 18.8%–32.5%, 水分利用效率分别显著提高 59.4%–79.6% 和 38.3%–50.3%; N、P₂O₅ 和 K₂O 的用量分别为 14、7、6 公斤/亩时, 马铃薯产量和水分利用效率最高。因此, 在年均降雨量 415 毫米旱作区, 全膜覆盖垄播栽培与平衡施肥匹配可显著提高马铃薯块茎产量及其水分利用效率。

关键词: 全膜覆盖垄播; 平衡施肥; 马铃薯; 产量; 水分利用效率

自然降水是黄土高原半干旱地区旱地作物所需水分的唯一来源, 如何通过耕作与覆盖等措施蓄水保墒、提高水分利用效率一直是该区作物生产面临的主要问题^[1-3]。合理耕作、增加地面覆盖、降低无效蒸发、合理施肥等措施是提高农田降水利用效率的基本途径, 发展抗旱节水农业成为旱地农业发展的必然选择和大前提^[4]。肥和水是旱地农业生产的两大限制因子, 根据土壤水分合理施肥, 以肥调水, 以水促肥, 促进作物生长发育和提高作物产量成为农业综合发展的关键技术^[5-7]。水肥之间存在着耦合效应, 尤其在旱地农业研究中, 水肥耦合效应尤为明显, 如何在旱地水分限制条件下, 通过合理施肥提高作物产量和水分利用效率一直是国内外研究的热点^[8]。我国旱地马铃薯地膜覆盖栽培从上世纪九十年代中期迅速掀起, 历经了 20 多年的半覆盖栽培阶段。近几年甘肃省提出了马铃薯全膜覆盖垄播技术, 并在干旱半干旱地区大面积推广应用^[9], 推动了马铃薯地膜覆盖栽培进入全覆盖时代。本试

验主要研究几种覆盖种植模式及其施肥对马铃薯生长、产量及水分利用效率的影响, 以期研究该地区马铃薯高产、集水高效利用的最佳覆盖栽培模式及其配套施肥水平, 为旱作农业生产提供技术理论支撑, 对区域经济发展起到积极作用。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验设在定西市安定区团结镇唐家堡村 (E104°35', N35°36'), 于 2014 年 4 月布置。研究区境内属典型的黄土高原干旱半干旱雨养农业区, 土壤类型为黄绵土, 质地为壤土, 肥力中等, 海拔约 1932–2520 米, 近几年年均降雨量 415 毫米左右, 季节分布不均, 多集中在 7、8、9 三个月, 年蒸发量 1531 毫米, 0–200 厘米土壤容重平均为 1.26 克/立方厘米。

表 1 供试土壤养分状况

pH	OM (克/公斤)	(毫克/公斤)										
		NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Zn	B
8.12	8.5	20	14.3	28.4	138	2012.7	131.7	20.5	10.7	1.6	1.5	1.14

表 2 2014 年 1–12 月份降水量

年份	降水量 (毫米)												
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	合计
2014	0	12.2	6.6	76.3	17.2	81.9	34.1	73.0	124.6	56.3	7.5	0	489.7

1.2 试验材料

试验地耕层(0-20厘米)土壤养分状况见表1, 2014年1-12月份降水资料见表2, 马铃薯品种为陇薯10号, 肥料品种为尿素(N46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12-16%)、氯化钾(K₂O 60%)。

1.3 试验设计

试验设覆盖种植方式和施肥水平两个因子, 覆盖种植设全膜覆盖垄播(F1)、全膜覆盖平作(F2)、裸地平作(F3)3个方式; 每个覆盖种植方式下配方施肥(N₁)-N₁₄P₇K₆、农民习惯施肥(N₂)-N₁₀P₆K₀、不施肥(N₃)-N₀P₀K₀3个施肥水平, 共组成9个处理(见表3), 随机区组排列, 试验小区面积63平方米。所用肥料全部作为基肥一次性施入。

全膜覆盖平作种植是用120厘米地膜紧贴地面覆盖, 马铃薯在膜面上播种2行, 形成马铃薯宽、窄行分别为70厘米、40厘米, 播种量同上。

处理	覆盖模式	施肥水平	养分量(公斤/亩)		
			N	P ₂ O ₅	K
F1N1	全膜覆盖垄播(F1)	N1	14	7	6
F1N2		N2	10	6	0
F1N3		N3	0	0	0
F2N1	全膜覆盖平作(F2)	N1	14	7	6
F2N2		N2	10	6	0
F2N3		N3	0	0	0
F3N1	裸地平作(F3)	N1	14	7	6
F3N2		N2	10	6	0
F3N3		N3	0	0	0

注: 全膜覆盖垄播种植是用起垄覆膜机进行起垄, 形成垄高15-20厘米, 大垄宽70厘米、小垄宽40厘米的双垄, 再用120厘米地膜全地面、全生育期覆盖, 铺膜时地膜紧贴地面, 同时在膜上隔5米打一土带, 采用马铃薯点播器在大垄上按“品”字形播种2行, 株距约为33厘米, 小垄上不种植, 播种密度为3300株/亩。

处理	覆盖模式	施肥水平	干物质积累量(公斤/亩)			
			苗期	花期	块茎膨大期	收获期
F1N1	全膜覆盖垄播(F1)	N ₁₄ P ₇ K ₆	45a	136a	185a	326a
F1N2		N ₁₄ P ₇ K ₀	32b	94bc	123bc	260b
F1N3		N ₀ P ₀ K ₀	18cd	55d	74d	216bcd
F2N1	全膜覆盖平作(F2)	N ₁₄ P ₇ K ₆	42ab	119ab	130ab	291ab
F2N2		N ₁₄ P ₇ K ₀	25bc	119ab	127ab	232bc
F2N3		N ₀ P ₀ K ₀	12d	111b	120bc	197cd
F3N1	裸地平作(F3)	N ₁₄ P ₇ K ₆	9cde	83c	100bcd	199cd
F3N2		N ₁₄ P ₇ K ₀	9de	73cd	96bcd	195cd
F3N3		N ₀ P ₀ K ₀	5e	58cd	90cd	186d

裸地平作是整地后不覆膜, 玉米宽、窄行为70厘米、40厘米, 同上述种植方式同时播种, 播种量同上。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖种植方式及施肥对马铃薯地上部分干物质积累量的影响

由表4可知, 在相同施肥水平下, 不同覆盖种植方式对马铃薯各生育期干物质积累量的影响表现为: 全膜覆盖垄播(F1) > 全膜覆盖平作(F2) > 裸地平作(F3), 其中全膜覆盖垄播马铃薯收获期地上部分干物质积累量较全膜覆盖平作和裸地种植分别增加9.6% - 11.9%和16.2% - 63.7%。在相同覆盖种植方式下, 不同施肥水平对马铃薯地上部分干物质积累量的影响表现为: N₁₄P₇K₆(N1) > N₁₀P₆K₀(N2) > N₀P₀K₀(N3), 其中在全膜覆盖垄播种植方式下, F1N1较F1N2和F1N3分别增加25.4%和50.5%。上述结果表明: 全膜覆盖垄播种植方式有利于马铃薯的生长, 可显著增加马铃薯地上部分干物质积累量, N₁₄P₇K₆施肥效果尤为明显。

2.2 不同覆盖种植方式及施肥对马铃薯产量及经济效益的影响

由表5可知, F1N1处理马铃薯块茎产量和纯收益最高, 显著(p < 0.05)高于其它处理。在相同施肥水平下, 不同覆盖种植方式对马铃薯块茎产量和纯收益的影响表现为: 全膜覆盖垄播(F1) > 全膜覆盖平作(F2) > 裸地平作(F3), 与裸地相比, 全膜覆盖平作和全膜覆盖垄播马铃薯块茎产量分别增加43.4% - 60.7%和18.8% - 32.5%, 纯收益分别提高49.6% - 66.9%和19.0% - 35.9%。在相同覆盖种植方式下, 不同施肥处理对马铃薯块茎产量及经济效益的影响均表现为: N₁₄P₇K₆(N1) > N₁₀P₆K₀

表 5 马铃薯产量及经济效益分析

处理	覆盖模式	施肥水平	产量		纯收益	
			(公斤/亩)	较 F3 增产 (%)	(公斤/亩)	较 F3 增产 (%)
F1N1	全膜覆盖垄播 (F1)	N ₁₄ P ₇ K ₆	1824a	43.4	1332a	49.6
F1N2		N ₁₄ P ₇ K ₀	1719ab	60.7	1296ab	66.9
F1N3		N ₀ P ₀ K ₀	1307bcd	52.7	1045bcd	52.7
F2N1	全膜覆盖平作 (F2)	N ₁₄ P ₇ K ₆	1667abc	31.1	1207abc	35.5
F2N2		N ₁₄ P ₇ K ₀	1417bc	32.5	1055bc	35.9
F2N3		N ₀ P ₀ K ₀	1016de	18.8	813cde	19.0
F3N1	裸地平作 (F3)	N ₁₄ P ₇ K ₆	1272cd	--	890cd	--
F3N2		N ₁₄ P ₇ K ₀	1069cde	--	776de	--
F3N3		N ₀ P ₀ K ₀	856e	--	684e	--

(N₂)>N₀P₀K₀(N₃), 其中在全膜覆盖垄播(F1)方式下, F1N1比F1N2和F1N3处理马铃薯块茎产量分别增加6.1%和39.6%。上述结果表明, 全膜覆盖垄播种植方式由于覆膜和垄沟集雨模式具有显著的蓄水、抑蒸、增温效应, 改善了土壤水热条件, 水肥之间的协同效应比较突出, 肥料增产效果明显, 有利于增加马铃薯产量和经济效益, N₁₄P₇K₆施肥量下效果明显。



2.3 不同覆盖种植方式及施肥对马铃薯耗水特性及其水分利用效率的影响

由表6可知, 全膜覆盖垄播和全膜覆盖平作种植马铃薯水分利用效率明显高于裸地平作, F1N1处理最高。在相同施肥水平下, 与裸地相比, 全膜覆盖垄播和全膜覆盖平作种植马铃薯水分利用效率分别提高59.4%~79.6%和38.3%~50.3%, 其中F1N1和F2N1处理较F3N1处理分别提高59.4%和41.0%。在相同覆盖种植方式下, 不同施肥量

对马铃薯水分利用效率的影响均表现为: N₁₄P₇K₆(N₁)>N₁₀P₆K₀(N₂)>N₀P₀K₀(N₃), 其中在全膜覆盖垄播(F1)方式下, F1N1比F1N2和F1N3处理分别提高4.4%和28.3%。上述结果表明, 全膜覆盖垄播种植能够有效提高马铃薯水分利用效率, 以F1N1处理效果明显。

表 6 马铃薯水分利用效率和耗水特性

处理	覆盖模式	耗水组成 (毫米)			耗水量	水分利用效率 (公斤/毫米/亩)
		播前土壤水	收获土壤水	降水		
F1N1	全膜覆盖垄播 (F1)	405	418	385	372	4.9a
F1N2		405	423	385	366	4.7ab
F1N3		405	447	385	342	3.8cd
F2N1	全膜覆盖平作 (F2)	405	404	385	385	4.3bc
F2N2		405	429	385	361	3.9bcd
F2N3		405	450	385	340	3.0de
F3N1	裸地平作 (F3)	405	376	385	414	3.1cde
F3N2		405	381	385	409	2.6de
F3N3		405	393	385	396	2.2e

3 讨论

全膜覆盖平作种植(传统地膜覆盖)由于地膜覆盖的增温抑蒸效果,对马铃薯的生长有一定的促进作用,但由于该技术集雨效果较差,雨水不能有效地蓄集利用,导致在抗旱、蓄水集雨方面性能减弱,不能充分接纳利用自然降水供需作物生长,从而影响了地膜马铃薯的产量,影响和制约着半干旱地区农业生产的进一步发展。

全膜覆盖垄播栽培是通过大小双垄全地面地膜覆盖,可形成全方位、大面积的集雨面,并通过膜面汇集流入沟内渗水孔,充分接纳降水资源,使降水得到集中高效利用,同时最大限度地抑制了土壤水分的蒸发,保蓄了作物生育期间的自然降水,起到了抑蒸减耗、节水抗旱的作用,从而大大提高了雨水集流和保墒、增温效果。另外,马铃薯种植在大垄,有利于马铃薯块茎的膨大,双垄有利于缓解垄内土壤旱情,其集雨、增墒效果达到了最大化,满足了马铃薯适宜垄作的技术要求,其产量、薯块的商品性和水分利用效率均有较大程度的提高。本研究结果显示,全膜覆盖垄播种植由于具有显著的增温、集水保墒作用,实施 N、P、K 平衡施肥,肥料增产效果明显,有利于提高马铃薯块茎产量和水分利用效率。因此,在年均降雨量 415 毫米的生态类型区,全膜覆盖垄播栽培实现了降雨的最大化叠加、集蓄、保墒和利用,并配套响应施肥水平,可显著提升了马铃薯的生产能力,是进一步挖掘自然降水潜力和马铃薯高产田创建的有效途径。



参考文献

[1] 张树兰, Lovdahl L, 同延安, 等. 渭北旱塬不同田间管理措施下冬小麦产量及水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4):20-24.

[2] 孟晓瑜, 王朝辉, 李富翠, 等. 底墒和施氮量对渭北旱塬冬小麦产量与水分利用的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2):369-375.

[3] 邓妍, 高志强, 孙敏, 等. 夏闲期深翻覆盖对旱地麦田土壤水分及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1):132-138.

[4] 陈小莉, 李世清, 王瑞军, 等. 半干旱区施氮和灌溉条件下覆膜对春玉米产量及氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 13(4):652-658.

[5] Akinremi O O. Simulation of soil moisture and other components of the hydrological cycle using a water budget

4 小结

4.1. 在年均降雨量 415 毫米的旱作区, 全膜覆盖垄播种植更有利于马铃薯碳水化合物的合成, 增加马铃薯地上部分干物质积累量, 实施 N、P、K 平衡施肥增加效果显著。

4.2. 全膜覆盖垄播种植可显著提高马铃薯块茎产量和水分利用效率, 较裸地马铃薯产量显著增加 43.4% - 60.7%, 水分利用效率显著提高 59.4% - 79.6%。可见, 全膜覆盖垄播栽培是旱作区马铃薯高产、水分高效利用的有效途径。

4.3. 在全膜覆盖垄播种植方式下, N、P₂O₅ 和 K₂O 的用量分别为 14 公斤/亩、7 公斤/亩、6 公斤/亩(F1N1 处理), 马铃薯块茎产量和水分利用效率最高, 较 F1N3 处理分别显著提高 39.6% 和 28.3%, 可见, 全膜覆盖垄播种植由于改善了土壤水热条件, 水肥交互效应显著。

approach[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1996, 75: 133-142.

[6] Kessler J J. Usage of the human carrying capacity concept in assessing ecological sustainability of land-use in semi-arid region[J]. Agricultural Ecosystems and Environment, 1994, 48:273-284.

[7] 杨文, 周涛. 氮磷配施对旱地春小麦水分利用效率及水肥交互作用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(5):13-16.

[8] 王兵, 刘文兆, 党廷辉, 等. 黄土塬区旱作农田长期定位施肥对冬小麦水分利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5):829-834.

[9] 高世铭, 张绪成, 王亚宏. 旱地不同覆盖沟垄种植方式对马铃薯水分和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1):249-251.

两种控释氮肥养分释放特性及其在双季水稻上的应用效果

廖育林^{1, 2} 鲁艳红^{1, 2} 聂军^{1, 2*} 周兴^{1, 2} 谢坚^{1, 2} 杨曾平^{1, 2}

(1 湖南省土壤肥料研究所, 湖南长沙, 410125; 2 农业部湖南耕地保育科学观测实验站, 湖南长沙, 410125)

摘要: 研究不同控释氮肥的养分释放规律及其在减氮量施用条件下早、晚稻产量效应、氮素吸收利用和土壤氮素养分特性的差异, 为南方双季稻区控释氮肥在水稻高产节肥栽培上的应用提供参考。采用静水溶解试验和田间小区试验研究了2种控释氮肥(树脂包膜尿素和硫包膜尿素)的养分释放特性和在常规尿素施氮量基础上减氮15%和30%对早、晚稻产量、产量构成因素、氮素养分吸收利用及土壤氮素养分含量的影响。结果表明, 两种控释氮肥的氮素累积释放曲线均为“S”形, 但在培养期间硫包膜尿素氮素累积释放率均高于树脂包膜尿素。在田间条件下, 与常规尿素处理相比, 早稻减氮15%和30%施用硫包膜尿素和树脂包膜尿素均表现为增产, 而晚稻施硫包膜尿素增产, 施树脂包膜尿素减产。株高、每穗实粒数、结实率和千粒重的增加是早、晚稻增产的主要原因。施用2种控释氮肥均能促进早、晚稻水稻植株氮素养分的吸收积累, 施用相同种类控释氮肥早晚稻稻谷、稻草和植株氮素养分积累量随施氮量提高而提高。减氮15%和30%施用2种控释氮肥有利于氮肥回收利用率、氮肥偏生产力及氮肥农学效率的提高, 在同一施氮水平下, 硫包膜尿素的提高效果优于树脂包膜尿素。常规尿素处理、减15%氮的2种控释氮肥处理均能保持较高的土壤氮素水平, 减30%氮的控释氮肥处理土壤氮素肥力较试验前有所降低。适当降低氮用量施用控释氮肥, 能促进双季水稻增产、增加氮素利用效率、维持或提高土壤氮素肥力和可持续生产力, 控释氮肥养分释放规律的差异是导致其作用效应不同的主要原因。

关键词: 控释氮肥; 养分释放特性; 双季稻产量; 氮素吸收; 土壤氮素肥力

化肥氮的施用在我国农业生产中发挥了举足轻重的作用, 但近年来随着我国氮肥施用量快速增加, 氮肥增产效应呈递减趋势, 氮肥当季利用率偏低、损失率偏高, 环境风险增加等问题日益凸显^[1]。在我国耕地资源有限、人口压力大的现实国情下, 如何在提高氮肥增产效应的同时, 降低施肥对环境的负面作用、提高氮肥利用效率已成为我国农业可持续发展的必然要求。

肥料中氮素养分供应与作物吸收的同步性将促进作物高产和氮素养分高效利用, 减少氮素损失和提高氮肥利用效率^[2]。普通化肥氮如尿素, 由于其速效性特点, 施入稻田后短时间内迅速溶解, 一次性基施通常导致水稻前期养分供应过量, 中后期营养供应不足, 养分利用率低、损失率高^[3], 只有通过分次施用才能达到为作物全生育期提供养分的目的, 但分次施用方法并不适应目前农村劳动力日益紧缺的现状。控释氮肥通过各种调控机制有效控制养分

释放速度和时间, 延长植物对其养分吸收利用的有效期, 达到一次性全量基施即可满足作物全生育期对氮素养分的生理需求, 实现作物增产, 促进植株氮素的吸收利用^[4], 同时还可适当减少施氮量, 提高氮肥利用效率^[5], 减少对环境的污染。但不同类型控释氮肥养分释放速率和规律也不尽相同, 肥料效应也存在差异。因此, 在一定生态区域内, 针对不同作物筛选适合的控释肥料类型及确定适宜的肥料用量和施用方法, 对实现区域农业高效生产和生态环境保护具有重要意义。

本研究以南方双季水稻为对象, 选用树脂包膜尿素(P₂S₅)和硫包膜尿素(SCU)2种具有较好代表性的控释氮肥, 研究其减氮量施用条件下在早、晚稻上的产量效应、氮素吸收

利用和土壤氮素养分特性, 并通过静水溶解实验分析2种控释氮肥的养分释放特性差异, 比较评价2种控施氮

基金项目: 国际植物营养研究所(IPNI)资助项目(IPNI-HN-17)。

作者简介: 廖育林(1975-), 男, 湖南新化人, 博士, 副研究员, 主要从事植物营养与施肥原理研究。E-mail: ylliao2006@126.com

通讯作者: 聂军(1972-), 男, 湖南沅江人, 博士, 研究员, 主要从事土壤与施肥原理方面的研究。E-mail: junnie@foxmail.com

肥在双季水稻节氮高产、高效栽培应用的节肥增效机理、适宜施用量及施用方法, 以期为南方双季稻区水稻高产节肥栽培生产上控释氮肥的推广应用提供理论依据和数据支撑。

1 材料和方法

1.1 试验地点描述

试验于2014年在宁乡县回龙铺镇天鹅村(北纬 $N 28^{\circ}12'$, 东经 $112^{\circ}26'$, 海拔高度60米)进行, 试验区属亚热带大陆性季风湿润气候, 年均降雨量1358毫米, 年均气温 $16.8^{\circ}C$, 年均无霜期274天, 年均日照时数1739小时。供试稻田土壤为白鳢泥田。试验前耕层0-20厘米土壤基本理化性状为: pH 6.5, 有机质58.3克/公斤, 全氮2.84克/公斤, 全磷0.75克/公斤, 全钾11.2克/公斤, 碱解氮279.3毫克/公斤, 有效磷8.5毫克/公斤, 速效钾57.0毫克/公斤。

1.2 田间试验设计

试验共设6个处理。处理1: CK(不施任何肥料); 处理2: CF(常规施肥, 氮肥用普通尿素, 磷肥为过磷酸钙、钾肥为氯化钾); 处理3: 85%PSU(节氮15%, 氮肥用树脂包膜尿素, 磷钾肥同CF处理); 处理4: 70%PSU(节氮30%, 氮肥用树脂包膜尿素, 磷钾肥同CF处理); 处理5: 85%SCU(节氮15%, 氮肥用硫包膜尿素, 磷钾肥同CF处理); 处理6: 70%SCU(节氮30%, 氮肥用硫包膜尿素, 磷钾肥同CF处理)。CF处理的施肥量按早稻氮(纯氮)10公斤/亩, 磷(五氧化二磷)5公斤/亩、钾(氧化钾)6公斤/亩, 晚稻氮(纯氮)12公斤/亩, 磷(五氧化二磷)3公斤/亩、钾(氧化钾)8公斤/亩施用, 其他施肥处理的施氮量按处理设计施用, 磷、钾用量与CF处理一致。尿素分2次施用, 其中70%做基肥施入, 余下30%做分蘖肥追施, 控释氮肥做基肥一次性施入, 磷肥做基肥一次性施入, 钾肥按50%做基肥、50%做分蘖肥施入。基肥于抛秧前1d施入, 施入后立即用铁齿耙耙入5cm深的土层内, 分蘖肥于抛秧后7-10天撒施。早稻品种为常规稻湘早粳45号, 4月20日抛秧, 每亩抛2.5万株, 7月15日收获; 晚稻品种(组合)为杂交稻荆楚优148, 7月18日抛秧, 每亩抛1.8万株, 10月24日收获。试验设3次重复, 小区面积20平方米, 随机区组排列。小区间砌20厘米高、30厘米宽的泥埂覆膜隔离, 实行单独排灌。其他管理与大田相同。

1.3 静水溶解实验设计

实验室条件下采用静水溶解法测定2种控释氮肥的氮素养分初期溶出率、时段释放率和累积释放率。称取10.0克肥料放入小网袋中, 置于300毫升玻璃瓶中, 加入250毫升蒸馏水, 加盖密封在 $25^{\circ}C$ 的恒温条件下培养。前7天内分别在第1天(24小时)、第3天、第5天和第7天测定培养液中总氮含量, 以后每隔7天测定一次, 培养期共91天。测定时先将全部培养液转出, 取溶液10毫升转移至100毫升容量瓶定容, 取样时注意使溶液浓度保持一致。然后用去离子水将网袋连同袋中肥料冲洗干净后再次放入玻璃瓶中, 再向瓶中加入250毫升去离子水, 继续培养。肥料样品3次重复。

1.4 分析测定项目

1.4.1 控释氮肥氮素养分溶出率的测定

用凯氏法^[6]测定实验室静水溶解培养液含氮量。氮素养分累积释放率按下式计算:

$$\text{初期溶出率}(\%) = \frac{24 \text{ 小时溶出的氮素养分量}}{\text{试样中的氮量}} \times 100\%$$
$$\text{氮素养分累积释放率}(\%) = \frac{n \text{ 天氮的累积溶出量}}{\text{试样中的氮量}} \times 100\%$$

1.4.2 田间试验分析测定项目

田间试验开始前采集0-20厘米耕层土样, 用于测定pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾。早、晚稻成熟期各小区单打单晒, 分别测产, 并采集各小区植株样用于考种并测定稻谷和稻草的氮含量。早、晚稻成熟期采集各小区耕层土样, 用于全氮和碱解氮测定。土样和植株样品均采用常规方法分析测定^[6]。

1.5 数据处理

采用如下方法计算氮素养分吸收量及氮素养分利用效率的相关参数^[7]:

$$\begin{aligned} \text{稻谷氮吸收量}(\text{公斤}/\text{亩}) &= \text{稻谷产量} \times \text{稻谷氮含量} \\ \text{植株氮总吸收量}(\text{公斤}/\text{亩}) &= \text{稻谷产量} \times \text{稻谷氮含量} \\ &+ \text{稻草产量} \times \text{稻草氮含量} \end{aligned}$$
$$\text{氮肥回收利用率}(\%) = \frac{\text{施肥区地上部氮吸收量} - \text{对照区地上部氮吸收量}}{\text{施氮量}} \times 100\%$$
$$\text{氮肥农学效率}(\text{公斤稻谷}/\text{公斤氮}) = \frac{\text{施肥区籽粒产量} - \text{对照区籽粒产量}}{\text{施氮量}}$$
$$\text{氮肥偏生产力}(\text{公斤稻谷}/\text{公斤氮}) = \frac{\text{施肥区籽粒产量}}{\text{施氮量}}$$

氮素生理利用率(公斤稻谷/公斤氮)=(施肥区籽粒产量-对照区籽粒产量)/(施肥区地上部氮吸收量-对照区地上部吸氮量)

氮收获指数(%)=籽粒吸氮量/地上部氮吸收量×100%

在本试验中由于未设置不施氮肥仅施磷钾肥的处理,计算上述参数采用不施任何肥料处理(CK)为对照。数据处理及分析采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7.5 等数据处理系统。

2 结果与分析

2.1 2种控释氮肥的氮素静水释放特征

在 25℃ 静水溶解条件下,两种控释氮肥的氮素累积释放曲线均为“S”形,累积释放率随培养时间增加,在整个培养期间,硫包膜尿素氮素累积释放率均高于树脂包膜尿素(图 1 a)。硫包膜尿素初期溶出率为 7.7%,树脂包膜尿素初期溶出率仅为 3.6%;在培养 7 天和 14 天硫包膜尿素氮素累积释放率分别达到 19.3% 和 23.1%,树脂包膜尿素氮素累积释放率分别为 13.7% 和 16.2%;在培养 28 天硫包膜尿素氮素累积释放率为 34.0%,树脂包膜尿素仅为 22.4%;硫包膜尿素氮素累积释放率在 63 天达到 80.3%,树脂包膜尿素释放率在 77 天达到 80.1%。

由树脂包膜尿素和硫包膜尿素的氮素时段释放曲线(图 1 b)可以看出,两种控释氮肥都存在 1 个释放高峰期,硫包膜尿素的氮素释放高峰期为第 35-49 天,树脂包膜尿素的氮素释放高峰期为 56-70 天,树脂包膜尿素较硫包膜尿素大约晚 20 天。

2.2 不同施肥处理对水稻产量和产量构成因素的影响

2.2.1 不同施肥处理早晚稻产量效应

试验结果表明,2种控释氮肥在常规施氮基础上节氮 15% 和 30% 施用对早、晚稻稻谷产量和生物产量的效应有所差异(表 1)。节氮 15% 和 30% 的硫包膜尿素处理(85%CSU 和 70%CSU)早、晚稻稻谷产量和生物产量均高于 CF 处理,其中早稻稻谷产量和生物产量与 CF 处理间差异均达到显著水平($p < 0.05$),晚稻 70%CSU 处理稻谷产量与 CF 处理间差异达到显著水平($p < 0.05$),生物产量差异不显著,晚稻 85%CSU 处理稻谷产量和生物产量与 CF 处理之间差异不显著($p > 0.05$)。节氮 15% 和 30% 树脂包膜尿素处理(70%PSU 和 85%PSU)早稻稻谷产量和生物产量均高于 CF 处理,但差异均未达到显著水平($p > 0.05$),晚稻稻谷产量和生物产量则均显著低于 CF 处理($p < 0.05$)。

在本试验条件下,硫包膜尿素减量施用早晚稻均取得较好增产效应。早晚稻减量 15% 和 30% 施用硫包膜尿素均能促进水稻生长,取得较高产量,其中早稻节氮 15% 硫包膜尿素的增产效果优于节氮 30% 硫包膜尿素处理,晚稻节氮 30% 的硫包膜尿素增产效果优于节氮 15% 处理。早稻节氮 15% 和 30% 施用树脂包膜尿素也可实现一定的增产,而晚稻则表现为减产。

2.2.2 不同施肥处理对早、晚稻产量构成因素的影响

不同施肥处理对早、晚稻株高、穗长、有效穗、每穗实粒数、结实率和千粒重等产量构成因素也有一定的影响(表 1)。各施肥处理的早、晚稻株高、穗长、有效穗、每穗实粒数和千粒重均高于 CK 处理,早稻产量较

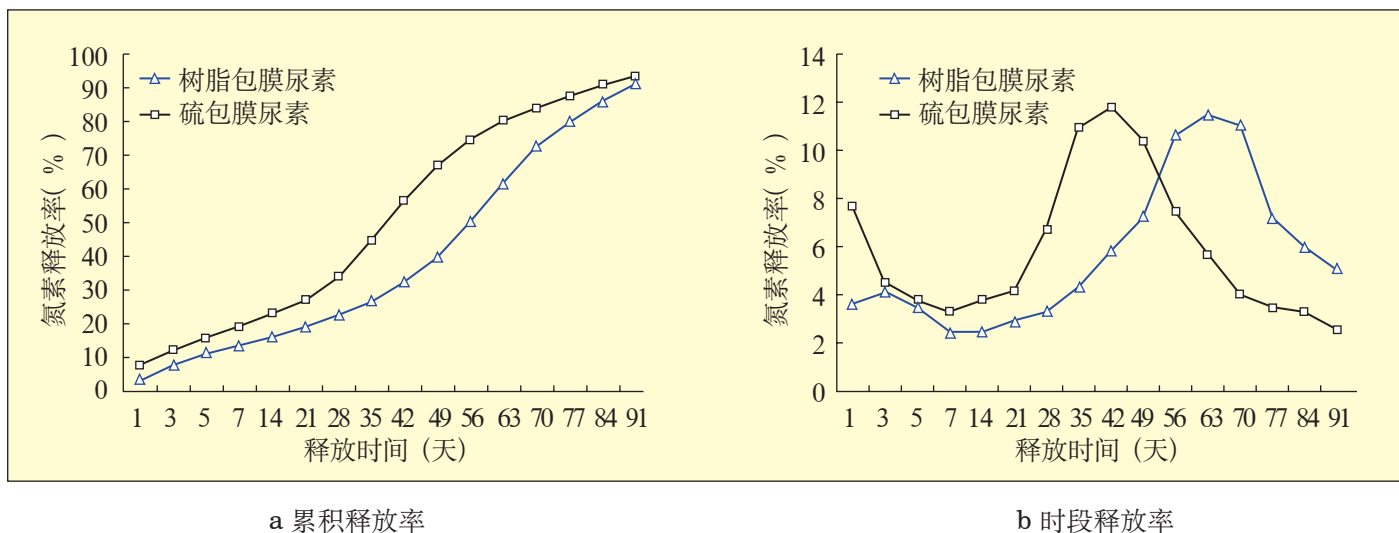


图 1 2种控释氮肥 25℃ 静水下的氮素释放率

表 1 不同施肥处理早晚稻产量及产量构成因素

处理	稻谷产量	生物产量	株高	穗长	有效穗	实粒数	结实率	千粒重
	(公斤/亩)		(厘米)		(穗/蔸)	(粒/穗)	(%)	(克)
早 稻								
CK	264.2c	490.0c	65.3b	19.5b	8.9b	50.2c	76.1d	23.5c
CF	374.9b	706.7b	79.8a	20.2a	12.4a	52.6b	75.9d	23.8bc
85%PSU	402.7ab	762.3ab	80.6a	20.3a	13.3a	52.7b	76.8c	24.1b
70%PSU	384.8b	751.2ab	80.1a	20.1a	13.1a	51.4bc	76.3cd	24.2b
85%CSU	428.1a	787.9a	81.9a	20.4a	12.5a	56.3a	78.7a	25.1a
70%CSU	423.2a	791.2a	81.2a	20.2a	12.3a	55.6a	77.9b	24.9a
晚 稻								
CK	337.5e	636.2e	91.4c	23.2b	9.5d	70.1d	73.3e	25.4c
CF	576.9b	1096.5ab	108.3ab	24.7a	12.4c	92.7ab	81.4b	27.5a
85%PSU	535.3c	1021.9c	108.6ab	23.6b	13.7a	80.1c	78.3c	26.0b
70%PSU	495.6d	926.5d	107.1b	23.9ab	13.5ab	81.1c	76.7d	26.1b
85%CSU	577.1b	1092.4b	112.6a	24.7a	12.7abc	91.1b	82.1a	27.4a
70%CSU	598.6a	1123.6a	110.8ab	24.7a	12.5bc	93.5a	82.5a	27.4a

注：采用 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验，早稻、晚稻同列数据后不同字母表示差异达 0.05 显著水平。下同。

表 2 早、晚稻产量与产量构成因素的相关系数表 (样本个数 n=6)

	株高	穗长	有效穗	每穗实粒数	结实率	千粒重
早 稻						
稻谷产量	0.945**	0.923**	0.782**	0.664*	0.437	0.680*
生物产量	0.970**	0.902**	0.862**	0.875**	0.335	0.599*
晚 稻						
稻谷产量	0.929**	0.754*	0.561	0.544	0.909**	0.743*
生物产量	0.924**	0.560	0.740*	0.864**	0.907**	0.736*

注：* 和 ** 分别表示相关性达到 0.05 和 0.01 的显著和极显著水平。

高的 85%CSU 和 70%CSU 处理的株高、每穗实粒数、结实率和千粒重均高于其他施肥处理，晚稻产量较高的 85%CSU、70%CSU 和 CF 处理的株高、穗长、每穗实粒数、结实率和千粒重也较高。这些指标的变化趋势与产量变化趋势基本一致，相关分析 (表 2) 表明早稻株高、穗长、有效穗与稻谷产量极显著正相关 ($p < 0.01$)，每穗实粒数、千粒重与稻谷产量显著正相关 ($p < 0.05$)；晚稻株高、结实率与稻谷产量极显著正相关 ($p < 0.01$)，穗长、千粒重与稻谷产量显著正相关 ($p < 0.05$)。早稻株高、穗长、有效穗、每穗实粒数与生物产量极显著正相关 ($p < 0.01$)，千粒重与生物产量显著正相关 ($p < 0.05$)；晚稻株高、每穗实粒数、结实率与生物产量极显著正相关 ($p < 0.01$)，有效穗、千粒重与生物产量显著正相关 ($p < 0.05$)。

2.3 不同施肥处理对早晚稻氮吸收利用的影响

2.3.1 不同施肥处理对植株氮养分吸收量的影响

不同施肥处理早、晚稻稻谷、稻草氮养分含量存在差

异 (表 3)。不同施肥处理对早晚稻稻谷、稻草和植株氮养分积累量存在较为明显的影响 (表 3)。早、晚稻各施肥处理稻谷、稻草及植株氮素养分积累量均显著高于 CK 处理 ($p < 0.05$)；除晚稻 70%PSU 处理，节氮 15% 和 30% 水平的 2 种控释氮肥处理早晚稻稻谷、稻草和植株氮素养分总积累量均高于常规施氮量的 CF 处理；早晚稻施用同种类型控释氮肥，施氮量较高的处理稻谷、稻草和植株氮素养分总积累也较高。

在节氮 15% 和 30% 水平下，施用树脂包膜尿素和硫包膜尿素均能提高早晚稻稻谷、稻草和植株氮素养分总积累量；相同施氮量水平下，早稻两种控释氮肥处理间的差异不明显，而晚稻硫包膜尿素处理稻谷、稻草和植株氮素养分总积累量提高效果优于树脂包膜尿素处理。

2.3.2 不同施肥处理对氮养分吸收利用效率的影响

氮肥回收利用率 (NRE) 反映作物对肥料中氮素的吸收效率。用差减法计算氮肥利用率的结果表明 (表 4)，

表 3 不同施肥处理早、晚稻稻谷和稻草的氮素养分含量及积累量

处理	全氮含量(克/公斤)		氮素养分吸收量(公斤/亩)		植株氮素养分总吸收量(公斤/亩)
	稻谷	稻草	稻谷	稻草	
早 稻					
CK	1.37c	1.05b	3.62d	2.37b	5.99c
CF	1.42bc	1.16a	5.33c	3.85a	9.17b
85%PSU	1.51a	1.13a	6.08a	4.06a	10.15a
70%PSU	1.45b	1.14a	5.58bc	4.18a	9.75ab
85%CSU	1.41bc	1.15a	6.04ab	4.14a	10.17a
70%CSU	1.37c	1.08b	5.80abc	3.97a	9.77ab
晚 稻					
CK	1.22bc	1.51a	4.12d	4.51d	8.63d
CF	1.08e	1.27c	6.23c	6.60c	12.83c
85%PSU	1.26ab	1.55a	6.75b	7.54a	14.29ab
70%PSU	1.29a	1.53a	6.39c	6.59c	12.99c
85%CSU	1.21cd	1.48a	6.98a	7.63a	14.61a
70%CSU	1.17d	1.37b	7.00a	7.19b	14.19b

表 4 不同施肥处理对早、晚稻氮素养分吸收利用效率的影响

处理	氮肥回收利用率 (%)	氮肥偏生产力	氮肥农学效率		氮收获指数 (%)
			(公斤稻谷/公斤氮)		
早 稻					
CK	--	--	--	--	60.4
CF	31.8b	37.5d	11.1b	34.8c	58.0
85%PSU	48.9a	45.3c	14.2b	29.1d	59.9
70%PSU	53.8a	57.5a	19.8a	36.9bc	57.2
85%CSU	49.2a	50.4b	19.3a	39.2ab	59.3
70%CSU	54.0a	60.5a	22.7a	42.0a	59.3
晚 稻					
CK	--	--	--	--	47.7
CF	35.0d	48.1d	19.9c	52.6a	48.6
85%PSU	55.5bc	48.6d	15.5d	28.0d	47.2
70%PSU	51.9c	63.7b	23.5b	45.5b	49.2
85%CSU	58.6a	56.6c	23.5b	40.1c	47.8
70%CSU	66.3a	71.3a	31.1a	46.9b	49.3

减氮 15% 和 30% 的 2 种控释氮肥处理均能较常规尿素处理提高氮肥回收利用率, 且硫包膜尿素的效果优于树脂包膜尿素。与 CF 处理相比, 早稻减 15% 氮量树脂包膜尿素和硫包膜尿素处理(85%PSU 和 85%CSU)较 CF 处理氮肥回收利用率分别提高 53.8% 和 54.7%, 晚稻分别提高 58.6% 和 67.4%; 早稻减 30% 氮量的树脂包膜尿素和硫包膜尿素处理(70%PSU 和 70%CSU)较 CF 处理氮肥回收利用率分别提高 69.2% 和 69.8%, 晚稻分别提高 48.3% 和 89.4%。早、晚稻控释氮肥处理氮肥回收利用率与 CF 处理间的差异均达到显著水平($p < 0.05$)。施用相同种类的控释氮肥, 除晚稻树脂包膜尿素处理(85%PSU 和 70%PSU), 其它控释氮肥处理的氮肥回收利用率均随施

氮量的减少而提高。

氮肥偏生产力(PFP)反映了单位施氮量对产量的贡献。与施用尿素相比, 减量施用不同控释氮肥对氮肥偏生产力均有提高作用(表 4), 且硫包膜尿素的提高效果优于树脂包膜尿素。与 CF 处理相比, 早稻减 15% 氮量的树脂包膜尿素和硫包膜尿素处理(85%PSU 和 85%CSU)较 CF 处理氮肥偏生产力分别提高 20.8% 和 34.4%, 晚稻分别提高 1.0% 和 17.7%; 早稻减 30% 氮量的树脂包膜尿素和硫包膜尿素处理(70%PSU 和 70%CSU)较 CF 处理氮肥偏生产力分别提高 53.3% 和 61.3%, 晚稻分别提高 32.4% 和 48.2%。除晚稻 85%PSU 处理, 其他施控释氮肥处理早晚稻氮肥偏生产力与 CF 处理间的差异均达显著

水平 ($p < 0.05$)；施用相同类型的控释氮肥，早晚稻氮肥偏生产力均随氮用量的减少而提高。

氮肥农学效率 (ANUE) 表征单位施氮量作物经济产量增加量，反映单位氮肥用量增产效果。试验结果 (表 4) 表明除晚稻 85%PSU 处理，其他控释氮肥处理早晚稻氮肥农学效率均较 CF 处理有所提高；各施肥处理早稻氮肥农学效率在 11.1–22.7 公斤稻谷 / 公斤氮之间变化，晚稻在 15.5–31.1 公斤稻谷 / 公斤氮之间变化；在相同施氮量水平下，早晚稻施用硫包膜尿素对氮肥农学效率的提高作用均优于树脂包膜尿素。

氮素生理利用率 (NPE) 是施用氮肥增加的作物经济产量与相应的植株氮素积累量增加量的比值，反映氮素的籽粒生产效率。不同施肥处理对氮素生理利用率存在明显影响 (表 4)。早稻除 85%PSU 处理外，其他控释氮肥处理氮素生理利用率均较 CF 处理有所提高；而晚稻所有控释氮肥处理的氮素生理利用率较 CF 处理均降低。在不同类型控释氮肥中，施氮量相同条件下，早晚硫包膜尿素处理的氮素生理利用率均显著高于树脂包膜尿素处理 ($p < 0.05$)；对于同一种控释氮肥，早晚稻氮素生理利用率均随氮肥施用量减少而提高。

氮收获指数 (NHI) 反映氮素在植株营养器官与生殖器官间的分配。结果表明不同处理对早晚稻氮收获指数有一定的影响 (表 4)。其中，早稻各处理氮收获指数在 57.2%–60.4% 之间变化，晚稻在 47.2%–49.3% 之间变化。

2.4 不同施肥处理对早、晚稻土壤氮素养分的影响

土壤全氮和碱解氮是表征土壤供氮能力的重要指标，土壤中碱解氮的变化直接反映了土壤的供氮强度。从表 5 可以看出，不同处理对早、晚稻后土壤全氮、碱解氮有一定的影响。早稻后土壤全氮含量最高的为 85%CSU 处理，其次为 85%PSU 和 CF 处理，碱解氮最高的为 85%CSU 处理，其次为 85%PSU 处理；晚稻后土壤全氮含量最高的为 85%CSU 处理，其次为 CF 和 85%PSU 处理，碱

解氮最高的为 85%PSU 处理，其次为 CF 和 85%CSU 处理。早稻后土壤全氮含量最低的为 70%CSU 处理，其次为 70%PSU 处理，碱解氮最低的为 CK 处理，其次为 70%CSU 处理；晚稻后土壤全氮含量最低的为 CK 处理，70%PSU 和 70%CSU 处理也较低，碱解氮最低的为 70%CSU 处理，其次为 CK 处理。表明常规尿素处理、减 15% 氮量的树脂包膜尿素和硫包膜尿素处理均能保持土壤较高的氮素肥力水平，减 30% 氮量的控释氮肥处理，尤其是减 30% 氮量硫包膜尿素处理不利于土壤氮素肥力的保持。

3 讨论与结论

氮肥合理施用是水稻生产稳产、高产的基本保证，对提高氮肥利用率和增产效果具有双重意义。合理施用氮肥包括适宜施氮量的确定和适宜肥料类型的选择等，如将普通氮肥改为施用控释氮肥就是方法之一，已有研究结果表明施用控释氮肥能明显提高氮肥利用率和水稻产量^[8]。

缓控释肥对作物产量形成和产量构成因素的影响已有较多研究，普遍认为缓控释肥作为基肥一次性施入，由于有效延缓养分释放量和释放速率，达到与作物需肥规律基本吻合，从而有利于作物产量的形成^[9]。水稻产量的形成过程其实质是干物质生产、分配、转运的过程^[10]，水稻营养生长阶段的干物质积累是后期产量形成的重要基础，因此要实现水稻高产的目标，必须满足水稻不同生长阶段对养分的需求。在此阶段提供水稻生长充足的氮素养分对水稻获得高产十分关键。在本试验中，与常规尿素处理相比，早晚稻减量 15% 和 30% 施用硫包膜尿素均显著增产，早稻节氮 15% 和 30% 施用树脂包膜尿素也在一定程度上提高了产量，但增产效果不及施用硫包膜尿素的处理，而晚稻较常规尿素处理产量下降。导致 2 种控释氮肥早晚稻产量效应差异可能与它们的氮素养分释放规律差异导致养分供应与水稻生长对养分需求的同步性和匹配性有关。硫

表 5 不同施肥处理早、晚稻土壤氮素养分含量变化的影响

处理	早稻后		晚稻后	
	全氮 (克 / 公斤)	碱解氮 (毫克 / 公斤)	全氮 (克 / 公斤)	碱解氮 (毫克 / 公斤)
CK	2.57	252.4	2.47	172.3
CF	2.85	279.2	2.87	202.6
85%PSU	2.87	298.1	2.84	206.2
70%PSU	2.50	279.2	2.54	193.3
85%CSU	3.05	317.6	2.88	199.7
70%CSU	2.43	259.2	2.54	162.1

包膜尿素静水培养 14 天的氮素累积释放率为 23.1%，较树脂包膜尿素高 6.9 个百分点，培养 28 天硫包膜尿素累积释放率为 34.0%，较树脂包膜尿素高 11.6 个百分点，硫包膜尿素的氮素释放高峰期为 35—49d，而树脂包膜尿素较其晚 20d 左右。有研究认为在水稻不同生育期中分蘖期和孕穗期是吸氮最多的时期^[11]，拔节至抽穗期是水稻的吸氮高峰^[12]，水稻移栽后 10—50 天正是作物氮素养分需求量较大的时期，硫包膜尿素的养分释放速率和释放时间可能与该种植条件下的水稻养分需要规律匹配较好，因此有利于促进水稻作物生长和产量形成；而树脂包膜尿素氮素养分前期释放较慢，释放时间较长可能造成早稻增产效果不及硫包膜尿素，晚稻期间更是由于养分释放较慢的特性，不能满足晚稻分蘖较早稻提早对氮素养分的需求，导致氮素养分供应不足，未能为后期生长和产量形成提供好的前期基础从而导致减产。

氮素是水稻产量主要影响因子，氮素的增产作用主要通过提高有效穗数与每穗粒数获得^[13]，谢春生的研究认为一次性施用控释肥增加了水稻成穗数、穗粒数从而实现增产^[14]。本研究结果表明早晚稻产量较高的 85%CSU 和 70%CSU 处理株高、每穗实粒数、结实率和千粒重也较高，可能是与硫包膜尿素的养分释放规律与水稻生长需肥规律较为同步有关。晚稻产量较低的 85%PSU 和 70%PSU 处理的穗长、每穗实粒数、结实率和千粒重也较低，可能与树脂包膜尿素前期释放率低、释放量少而未能满足水稻生长前期对氮素养分需求有关。符建荣认为将少量的速效氮肥与缓控释肥料配合后一次基施的方法可以满足作物前期对氮素的需要，保证有足够的分蘖数和较多有效穗而获得高产^[15]，因此，也可在本研究基础上进一步针对树脂包膜尿素前期释放率低的情况考虑用少量速效氮肥与其配合施用进行研究。

评价一种肥料在特定施用条件下的利用效率，不仅要有较高的回收利用率，同时还应有较高的生理效率或农学效率。氮肥回收利用率随施肥量的增加而降低，当氮肥过量施用，会造成水稻对氮的奢侈吸收，氮肥生理利用率和回收率将急剧下降^[16]。据研究，控释氮肥能促进水稻生育中、后期叶片的硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的活性，从而促进水稻孕穗后体内氮素的吸收与同化，增强水稻的

吸氮量，达到提高氮素利用效率的目的；同时，控释氮肥还可以增强水稻生育后期叶片中蛋白水解酶的活性，促进叶片中蛋白质的降解，有利于叶片中的氮素向籽粒运转，从而提高水稻氮肥农学效率或生理效率^[17]。本研究结果也表明，早晚稻在减氮 15% 和 30% 水平上施用硫包膜尿素和树脂包膜尿素均较常规尿素处理显著提高氮肥回收利用率和偏生产力，除晚稻 85%PSU 处理，其它控释氮肥处理的早晚稻氮肥农学效率均较 CF 处理有显著提高，且相同施氮水平下硫包膜尿素对氮肥回收利用率、氮肥偏生产力和氮肥农学效率的提高效果均优于树脂包膜尿素。但氮素生理利用率仅早稻 70%PSU、70%CSU 和 85%CSU 处理高于 CF 处理，早稻 85%PSU 处理和晚稻所有控释氮肥处理的氮素生理利用率均低于常规尿素处理，其原因有待进一步研究。

通过施肥调控将土壤有效养分含量控制在一个适量的水平，既可保证较高产量又不会引起环境污染风险^[18]。包膜控释肥料可根据作物生长不同时期的需肥量来调节其养分释放速率，不同包膜材料肥料其养分控制释放的特性有所差异，施用后也会导致土壤养分状况有所差异。土壤氮素养分的变化与肥料中氮素的释放特性、氮肥用量和氮素损失量等因素有关。本试验条件下，常规尿素处理、减氮 15% 树脂包膜尿素和硫包膜尿素处理均能保持早稻后土壤较高的氮素肥力水平，减氮 30% 控释氮肥处理，尤其是减氮 30% 硫包膜尿素处理不利于土壤氮素肥力的保持，可能与其氮素投入较少而植株带走较多氮素有关。尽管减氮 30% 硫包膜尿素早晚稻均取得较高产量，但从土壤肥力保持的角度看可能并不利于土壤氮素肥力和持续生产力的维持。

控释氮肥具有高肥力和长肥效的作用，其使用为既增加水稻产量又提高水稻种植中的氮素利用率提供了可行的解决手段。综合考虑作物的产量效应、养分吸收利用效率及土壤氮素肥力保持与培育，在本试验条件下或与该试验类似的生态区域，早晚稻一次性基施减氮 15% 的硫包膜尿素能取得较好的增产效应，并且有利于氮素养分吸收利用效率的提高和土壤肥力的保持；早稻施用减氮 15% 的树脂包膜尿素也可在一定程度上促进增产，但效果不及硫包膜尿素。

参考文献

- [1] 朱兆良. 中国土壤氮素研究 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
- [2] 司东霞, 崔振岭, 陈新平, 等. 不同控释氮肥对夏玉米同化物积累及氮平衡的影响 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(6):1745-1751.
- [3] 李敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对水稻产量、光合特性及氮肥利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4):808-815.
- [4] 王艳, 王小波, 王小晶, 等. 包膜缓释肥料 (CSFS) 增产机理与氮肥利用率示踪研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(5):109-111.
- [5] 冯爱青, 张民, 李成亮, 等. 控释氮肥对土壤酶活性与土壤养分利用的影响 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):177-184.
- [6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [7] 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 等. 紫云英配施控释氮肥对早稻产量及氮素吸收利用的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(3):190-195, 201.
- [8] 徐明岗, 孙小凤, 邹长明, 等. 稻田控释氮肥的施用效果与合理施用技术 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4):487-493.
- [9] 李方敏, 樊小林, 陈文东. 控释肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4):494-500.
- [10] 彭玉, 孙永健, 蒋明金, 等. 不同水分条件下缓 / 控释氮肥对水稻干物质质量和氮素吸收、转运及分配的影响 [J]. 作物学报, 2014, 40(5):859-870.
- [11] 曹洪生, 黄丕生, 缪宝山, 等. 两种类型中粳稻吸氮分析及施肥技术研究 [J]. 苏州科技学院学报 (社会科学版), 1992, 9(1):35-41.
- [12] 王秀芹, 张洪程, 黄银忠, 等. 施氮量对不同类型水稻品种吸氮特性及氮肥利用率的影响 [J]. 上海交通大学学报 (农业科学版), 2003, 21(4):325-330.
- [13] 郭晨, 徐正伟, 李小坤, 等. 不同是氮处理对水稻产量、氮素吸收与利用率的影响 [J]. 土壤, 2014, 46(4):618-622.
- [14] 谢春生, 唐拴虎, 徐培智, 等. 一次性施用控释肥对水稻植株生长及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2):177-182.
- [15] 付建荣. 控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2):145-152.
- [16] 王光火, 张其春, 黄昌勇. 稻氮素利用率、控制氮肥污染的新途径-SSNM [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2003, 29(1):67-70.
- [17] 聂军, 郑圣先, 戴平安, 等. 控释氮肥调控水稻光合功能和叶片衰老的生理基础 [J]. 中国水稻科学, 2005, 19(3):255-261.
- [18] Raun W R, Johnson G V, Westerman R L. Fertilizer nitrogen recovery in long-term continuous winter wheat [J]. Soil Sci Soc Am. J., 1999, 63(4):645-650.

基于植物营养的荔枝龙眼果实异常现象的初步诊断

姚丽贤¹ 周昌敏² 何兆桓² 姜子德¹ 白翠华¹ 涂仕华³

(1 华南农业大学资源环境学院, 广东 广州, 510642; 2 广东省农业科学院农业资源与环境研究所, 广东 广州, 510640;

3 国际植物营养研究所成都办事处, 四川 成都)

摘要: 近年来我国荔枝龙眼主产区出现这两种果实发育期果实异常的现象, 具体表现为小果和中果期内、外果皮出现黑褐色斑点/块, 但内果皮更为严重, 重者果皮开裂, 种胚坏死。大果期外果皮皱缩凸起, 果实畸形变小; 内果皮有黑褐色或淡绿色向果肉侵入的痂状物, 严重者侵入部位果肉褐变腐烂。不同时期果实异常现象均表现出由内而外更为严重的规律。作者在排除病原物侵染致病前提下, 观察对比了异常与正常果实的微观形貌, 测试了果实不同部位 N、P、K、Ca、Mg 和 B 等养分含量, 跟踪调查了果实异常果园的管理、施肥及气候情况。初步判断这些果实异常现象是由于不良气候引起的果实缺 Ca 生理性病害。对个别果园, 缺 B 可能也是一个共同影响因素。

关键词: 荔枝; 龙眼; 钙; 硼; 生理性病害

近年来我国荔枝、龙眼主产区频现成年树果实发育期生长异常现象, 对区域水果生产造成了较大影响。2014–2015 年我们收集了多个果园的异常果和正常果样本, 首先由国家荔枝龙眼产业技术体系病害防控岗位专家姜子德教授团队对异常果进行了病原物培养、分离和鉴定, 但均未发现有可疑病原物存在。然后, 利用扫描电镜对部分荔枝果实样本进行了形貌观察和能谱分析, 同时测定了 2014–2015 年所有样本的相关养分含量。综合果园管理、施肥和气候数据, 对荔枝龙眼果实异常现象进行了初步诊断。本文将诊断过程介绍如下, 希望为今后此类异常现象的诊断及进一步深入研究提供前期研究基础, 也为生产上判断和预防此类现象提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2014 年 5 月中旬分别收到广西灵山文利镇某果园草莓荔小果期的正常和异常果实样本、广东汕尾东冲镇某果园妃子笑中果期的正常和异常果实样本。将两种荔枝正常和异常果实分别分为果皮和果核样本备用。2015 年 5 月 22 日收到海南澄迈县永兴镇某果园紫娘喜大果期异常果

实样本, 但该次样本量不足以进行相关测试分析。5 月 30 日再次收到该果园寄来的足量异常和正常果实样本。将果皮分为正常果实果皮、异常果黑褐色皱缩凸起部分果皮及其他部分果皮共三种样本, 果肉和果核则仅分为正常果和异常果样本。2015 年 6 月 17 日收集了广西钦州钦北区某果园中果期龙眼正常和异常果实, 分别分为果皮、果肉 + 果核两部分样本。

1.2 样本处理及测试

将 2014 年广西灵山文利镇草莓荔和广东汕尾市东冲镇妃子笑正常和异常果果皮和果核样本分别再分为两部分, 一部分利用扫描电镜进行形貌观察和能谱分析。其中, 异常果取褐变的果皮和果核作为样本。植株样本进行以下前处理: 首先滴加 1–2 滴 2.5% 戊二醛防止样本继续褐变; 用剪刀、镊子对所选部位进行取样, 取样面积为 5×5 毫米, 然后放入已加有 1.5 毫升 4% 戊二醛的 2 毫升塑料离心管里, 静置过夜。用滴管把戊二醛吸出, 加入 0.1M 磷酸缓冲溶液 1.5 毫升, 放置 10 分钟, 重复 3 次。然后, 用 30% 乙醇脱水 10 分钟, 重复 2 次。再用 50% 乙醇脱水 10 分钟, 重复 2 次。再用 70% 乙醇脱水 1 次 10 分钟, 90% 乙醇脱水 10 分钟 1 次, 100% 乙醇脱水 10 分钟 2

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项资金(荔枝龙眼, CARS-33-10)

作者简介: 姚丽贤, 女, 博士, 研究员, 主要从事果树营养与养分管理技术研究。E-mail: lyaolx@scau.edu.cn

次。最后，样本用醋酸异戊酯过渡 15 分钟，重复 2 次，再用二氧化碳在临界点干燥 180 分钟后，送至华南理工大学分析测试中心进行场发射扫描电镜观察。所用扫描电镜为德国 LEO 公司 LEO 1530 Vp 型产品，分辨率为 1nm (20 千伏)，放大倍率为 20X-900000X，工作加速电压为 0.1 千伏-30 千伏。其主要附件能量谱仪为英国 Oxford 公司的 EDS Inca 300。另一部分正常果和异常果果皮和果核样本经杀青、烘干、粉碎，用常规方法^[1]测定不同部位 K、Ca、Mg 和 B 含量，用标准物质 GBW 07603 (GSV-2) 控制测试质量。广东汕尾东冲妃子笑果实由于样本量太少，未能进行养分含量测试。

2015 年海南澄迈永兴紫娘喜及广西钦州钦北储良龙眼果实不同部位样本经杀青、烘干、粉碎后按照常规方法测定 N、P、K、Ca、Mg 和 B 含量。用标准物质 GBW 07603 (GSV-2) 控制测试质量。2014-2015 年每种样本视样本量多少，样本重复 2-4 次进行测试。

1.3 数据处理

正常和异常果实样本养分含量用成对样本 t 检验统计其差异显著性 ($p=0.05$)，部分 3 对样本数据用 SAS 9.0 进行 LSD 显著性统计 ($p=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 荔枝龙眼果实异常现象

2014-2015 年荔枝龙眼果实异常现象随果实发育阶段有一定差别。如图 1 所示，广西灵山文利镇草莓荔小果期出现大量果实异常现象，周边数个果园荔枝也出现同样症状。异常现象症状较轻者外果皮正常或有轻微黑褐斑点，内果皮则已有明显黑褐斑，但种胚（果核）尚正常完好；稍严重者外果皮有黑褐斑，但内果皮大面积出现黑褐色；严重者则果皮开裂，露出种胚，种胚从顶部开始部分坏死，内果皮基本全部为黑褐色，也有部分果实外果皮虽未开裂，但种胚已部分坏死，内果皮大部分为黑褐色。草莓荔这种异常现象是由内而外发生，内部症状比外部严重。因草莓荔果实异常现象原因未明，该果园仍按照常规方法管理，并观察异常症状的发展。至 2015 年 6 月成熟期，小果期异常现象较轻果实变为畸形、皱缩，明显小于正常果实，内果皮有向内凸起的痂状物，与内果皮相接处为黑褐色，凸起部分为淡绿色（如图 2）。小果期种胚坏死果实则停止发育，逐渐变得干枯。

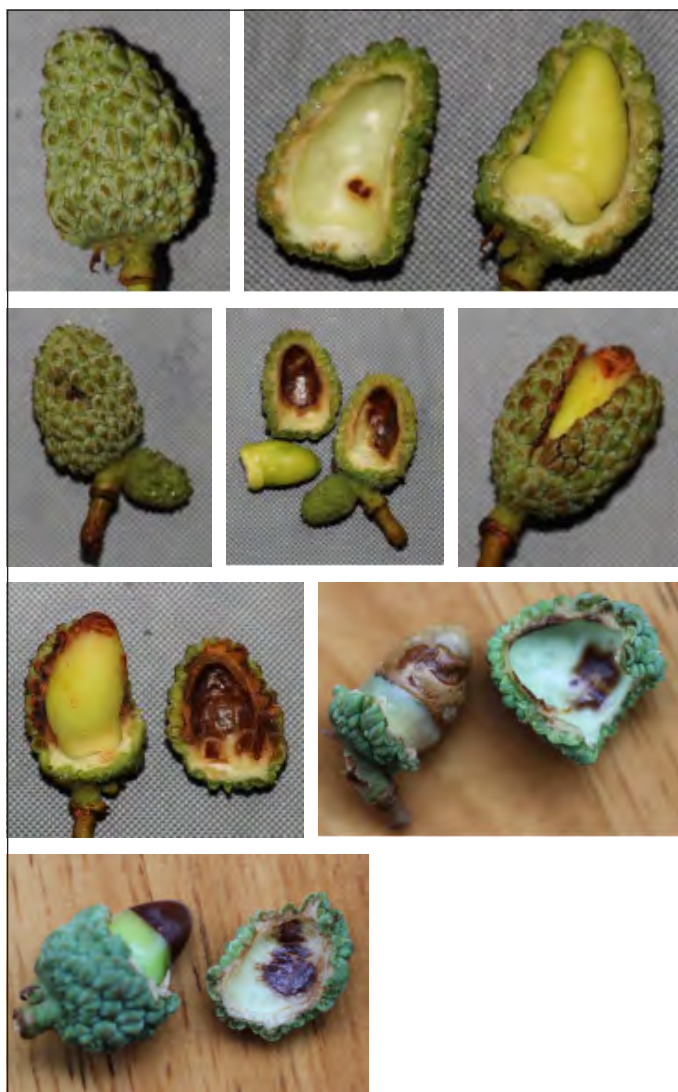


图 1 2014 年广西灵山文利草莓荔小果期果实异常症状

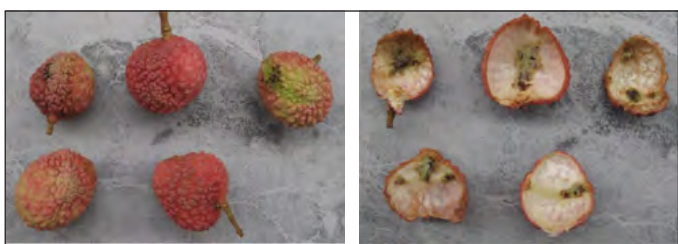


图 2 2014 年广西灵山文利草莓荔小果期异常果在成熟期果实形貌

广东汕尾东冲镇中果期妃子笑果实外果皮有轻微黑褐斑点，肉眼观察果肉及果核尚正常，但内果皮有明显黑褐斑（图 3）。

2015 年 5 月 22 日海南澄迈永兴紫娘喜异常果生长比正常果明显偏慢，果实小且硬，外果皮着色迟或难以着色，而且果蒂处内果皮有向果肉侵入的黑褐色痂状物或出现水渍状腐烂（图 4）。至 5 月 30 日，异常果外果皮虽能着色，但着色迟，而且着色不均匀或甚至出现黑褐色皱缩凸起，



图3 2014年广东汕尾东冲镇妃子笑中后期果实异常现象

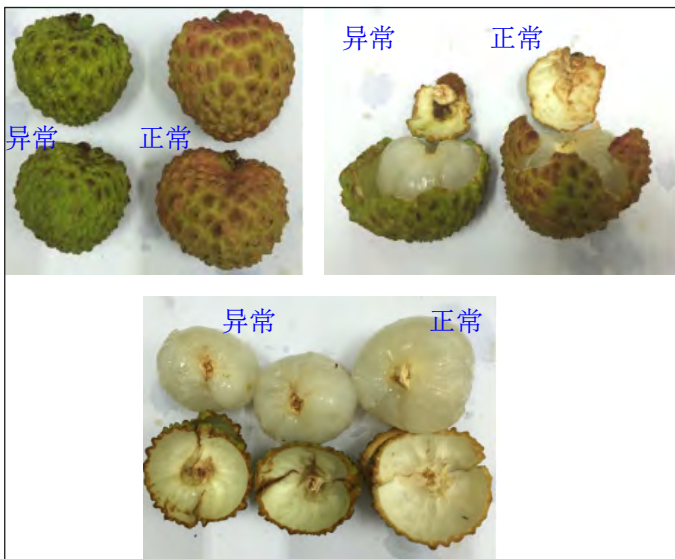


图4 2015年5月22日海南澄迈永兴紫娘喜大果期果实异常现象



图5 2015年5月30日海南澄迈永兴紫娘喜大果期果实异常现象

果蒂内部腐烂且附近内果皮黑褐色斑块明显，与果蒂相接附近果肉也出现褐色腐烂（图5）。

广西钦州钦北区储良龙眼果实在直径约为1厘米时约有40%的果实出现生长缓慢甚至停滞的异常现象，果实僵硬、外果皮有黑褐斑或整个变为褐色，严重者果皮开裂，可见坏死的褐变果核（图6）。异常果内果皮大部分或全部褐变，果肉也褐变。纵切果实，正常果果肉及果核内部呈乳白色，但异常果果肉和果核出现不同程度褐变，严重者果核完全褐变坏死。龙眼果实异常症状具有内部比外部严重的规律（图6）。



图6 2015年广西钦州钦北区储良龙眼异常现象

2.2 荔枝果实形貌观察及能谱分析

利用扫描电镜对广西灵山文利草莓荔和广东汕尾东冲妃子笑正常果和异常果果皮和果核形貌进行观察，结果分别见图7和8。可见草莓荔和妃子笑正常果果皮和果核组织纹理清晰有序，草莓荔异常果内果皮和果核组织结构破碎、散乱且有空洞，但妃子笑异常果仅果皮组织散乱无序，果核组织仍然正常。这表明妃子笑果实异常现象轻于草莓荔，这与肉眼观察结果一致。

进一步的能谱分析结果（表1）显示，与正常果果皮和果核Ca含量相比，草莓荔和妃子笑异常果Ca含量均

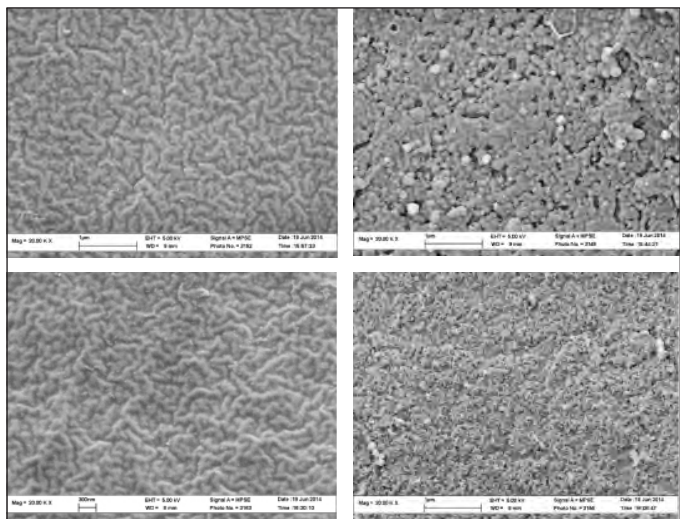


图7 广西灵山文利草莓荔正常（左）和异常（右）果皮（上）及果核（下）形貌比较（2万倍）

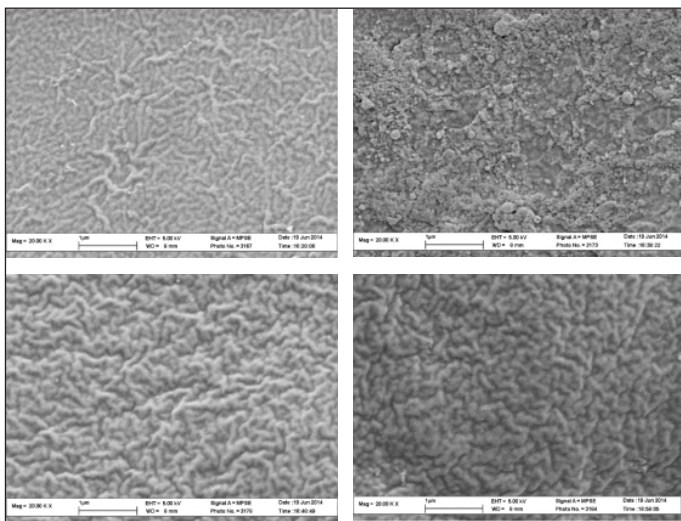


图8 广东汕尾东冲妃子笑正常(左)和褐变(右)果皮(上)及果核(下)形貌比较(2万倍)

明显偏低, 仅为正常果的 1/6 至 1/2。由于能谱分析仪对原子量 <40 的元素含量测试准确度相对较差, 果实样本的 K 含量不能全部测出。

地点及品种	部位	样本来源	K (%)	Ca (%)
广西灵山文利草莓荔	果皮	正常果	--	0.50
		异常果	--	0.23
	果核	正常果	--	0.53
		异常果	--	0.12
广东汕尾东冲妃子笑	果皮	正常果	1.35	0.76
		异常果	1.47	0.12
	果核	正常果	--	--
		异常果	--	--

2.3 荔枝龙眼果实养分含量

广西灵山文利草莓荔果实养分含量测定结果(表 2)显示, 除 Ca 外, 草莓荔正常和异常果实的果皮和果核 K、Mg 和 B 含量均没有明显差别。正常果果皮和果核 Ca 含量均显著高于异常果。然而, 与表 1 能谱分析仪测定的 Ca 含量相比, 原子吸收分光光度法测定的正常和异常果实样本间的 Ca 含量差异相对较小, 这可能是样本本身造成的差异。因为用于形貌观察的异常果样本为完全褐变的果皮和果核组织, 而原子吸收分光光度法由于所需样本量较大, 所用异常果样本中仍包含了部分绿色正常组织, 在一定程度上掩盖了正常果和异常果 Ca 含量的差异。因此, 能谱分析仪测定的 Ca 含量能更准确反映正常果和异常果 Ca 含量差异。由于 Ca 是植物细胞壁的必要组成, 维持细胞膜的结构和稳定, 缺 Ca 会导致膜结构破碎^[2]。异常草莓荔果皮及果核的微观形貌结构观察结果与该结论吻合。综上所述, 我们初步判断草莓荔果实异常现象由缺 Ca 造成。

根据海南永兴紫娘喜正常果和异常果不同部位养分含量测定结果(表 3), 与正常果相比, 异常果果皮、果肉和果核 N、P、K 含量均显著高于正常果, 而且异常果其他部分果皮 N、P、K 含量也显著高于异常果黑褐色部分果皮的含量。然而, 异常果果皮 Ca、Mg 含量则显著低于正常果, 而且异常果黑褐色部分的 Ca、Mg 含量也显著低于异常果其他部分的含量。果肉 Ca、Mg 含量则为异常果显著高于正常果。异常果果核 Ca、Mg 含量则与正常果的十分接近。对于 B 含量, 异常果其他部分果皮

部位	样本性质	K Ca Mg B			
		(克/公斤)			
果皮	正常果	14.6±0.0a	4.3±0.2a	1.7±0.0a	16.7±0.6a
	异常果	14.9±0.0a	4.0±0.0b	1.7±0.1a	18.7±0.6a
果核	正常果	16.7±0.0a	4.7±0.1a	1.8±0.1a	18.2±0.6a
	异常果	17.4±0.0a	4.0±0.0b	2.0±0.0a	16.6±0.6a

部位	样本性质	N P K Ca Mg B					
		(克/公斤)					
果皮	正常果	10.4±0.0c	1.0±0.0c	9.6±0.0c	6.8±0.1a	2.7±0.0a	19.7±0.7a
	异常果黑褐色部分	12.7±0.2b	1.4±0.0b	15.2±0.2b	4.2±0.0c	1.9±0.0c	13.5±0.5b
	异常果其他部分	15.6±0.2a	1.7±0.0a	16.9±0.0a	5.2±0.1b	2.3±0.0b	20.6±0.5a
果肉	正常果	11.8±0.2b	1.4±0.0b	14.2±0.0b	0.6±0.0b	1.1±0.0b	9.7±0.8a
	异常果	18.9±0.3a	2.3±0.0a	22.1±0.1a	0.9±0.1a	1.8±0.0a	10.8±0.1a
果核	正常果	12.7±0.2b	1.4±0.0b	8.6±0.1b	0.6±0.0a	1.4±0.0a	10.9±0.1a
	异常果	14.0±0.2a	1.6±0.0a	10.2±0.1a	0.5±0.0a	1.4±0.0a	10.8±0.5a

表4 广西钦州钦北区储良龙眼果实养分含量

部位	样本性质	N P K Ca Mg B					
		(克/公斤)					
果皮	正常果	10.6±0.1b	1.0±0.0a	9.8±0.1b	10.9±0.1a	1.5±0.0b	11.3±0.3a
	异常果	12.0±0.2a	1.1±0.0a	10.6±0.1a	7.3±0.1b	1.8±0.0a	4.2±0.2b
果肉+核	正常果	13.1±0.6a	2.4±0.0a	16.3±0.1a	3.3±0.2a	1.1±0.0a	7.8±0.0a
	异常果	15.5±0.2a	2.4±0.0a	17.6±0.4a	3.2±0.2a	1.3±0.0a	2.2±0.1b

与正常果果皮的接近,且两者均显著高于异常果黑褐色部分果皮B含量。由此推测,紫娘喜果实异常现象可能与果皮Ca、Mg含量偏低有关。

由于紫娘喜正常果果皮K含量显著低于异常果,但其Ca、Mg含量则显著高于异常果,这进一步证实了荔枝植株中K与Ca、Mg营养间存在拮抗关系^[3]。故紫娘喜异常果果皮K、Ca、Mg营养失衡应该是由过高的K营养对Ca、Mg养分的抑制或是由过低的Ca、Mg养分供应导致K累积过高造成。海南澄迈永兴紫娘喜产区土壤为火山灰土壤。该园土壤基本理化性质经测试为:pH 6.3,土壤碱解N和有效P含量分别为322.3和37.7毫克/公斤,速效K和交换性Ca、Mg含量分别为226.5、2783.9和307.6毫克/公斤,有效B含量为0.1毫克/公斤。除土壤有效B含量缺乏外,土壤整体养分配力高。另外,该果园施肥调查显示,该园按照往年常规方法施肥,并未过量施用钾肥。因此,异常果果皮K、Ca、Mg营养失衡估计是由于Ca、Mg营养供应不足而造成的K累积偏高。本文紫娘喜果实处于着色期,果实迅速膨大,累积养分能力强,但异常果生长迟缓,果小且僵硬,在Ca、Mg养分供应不足而N、P、K供应充足的情况下,N、P、K养分吸收正常,生物量浓缩作用导致了异常果N、P、K含量显著高于正常果。

从广西钦州钦北储良龙眼果实养分含量测定结果(表4)来看,异常果果皮、果肉+核的N、P、K、Mg含量与正常果的接近或甚至显著提高(大概也由生物量浓缩效应所致),但果皮Ca含量则显著低于正常果。异常果果皮及果肉+核B含量均显著低于正常果。这表明储良果实异常现象与N、P、K、Mg营养关系不大,应与Ca或B营养不足有关。

3 讨论

植株体内Ca运输主要是依靠蒸腾拉力,蒸腾作用越大,生长时间越长,经木质部运入的Ca就越多。果实中Ca含量与Ca素的运输分配有密切关系,而与土壤Ca供应水平关系不大^[4,5]。水分是植株地上部Ca分配的决定

性因素之一^[6]。果实在膨大期的蒸腾强度远小于叶片,有时会出现果实中Ca向叶片倒流而引起果实缺Ca^[6-8]。气候条件如低温^[9]、干旱^[6]和光照^[10]、营养不平衡(如氮营养过高)^[11]和土壤盐分含量高^[12]会抑制Ca的吸收和运输,树体激素水平^[13,14]对Ca的运输也有影响。因此,即使在含Ca丰富的土壤上也可观察到植物缺Ca的生理紊乱现象^[15]。另外,果实发育过程中,Ca在果实的分配并不均匀。叶片吸收的Ca很少向果实运输,即使外源喷施的Ca被果皮吸收后,也不是累积在果皮,而是向果肉转移^[7]。此外,在快速生长的器官,Ca含量往往较低,也容易出现缺Ca现象^[6]。

根据广西农科院园艺研究所科研人员提供的2014年广西灵山文利草莓荔果实异常果园的日常管理、施肥及当地天气记录数据,该果园按照常规方式管理,上年采果后至发现小果异常现象期间各种养分施入量在正常范围。气象数据显示,当地2014年2月1日至4月9日69d内,降雨天数37d,且降雨在3-4月上旬较为集中且雨量较大,期间空气相对湿度在82-93%之间且气温低于常年同期温度。该果园在5月5日开始发现果皮出现黑褐斑甚至裂果现象。周边部分荔枝园也陆续出现这种果实异常现象。这表明草莓荔果实缺Ca并不是由于管理或施肥不当造成,而应该与该地区3-4月间持续低温高湿、荔枝树体蒸腾拉力显著降低减少导致的Ca吸收不利及运输障碍有关。

广东汕尾东冲镇发生妃子笑果实异常现象的果农反映,当地2014年4月3日至4月底连续降雨20多天,在5月1日即发现妃子笑果皮出现黑褐斑,剥开果皮发现内果皮褐变更明显,以中果褐变最为明显,小果次之,大果相对较少,但均未出现裂果现象。该果园附近多个果园荔枝也出现类似情况。我们初步判断这种异常现象也是由气候因素(高湿)造成的Ca运输障碍造成的果皮缺Ca有关。

据海南省农科院热带果树研究所研究人员反映,澄迈永兴紫娘喜果实异常果园所在地区5月中下旬高温干旱(缺乏当地气象数据),也是果肉快速膨大接近成熟的时期,果农需要每天深夜灌水解旱。因此,即使在果园土壤Ca

丰富条件下, 由于高温干旱仍然会出现果实缺 Ca 而导致的异常现象。

以上显示, 上述数起荔枝龙眼果实异常现象多在低温、阴雨、潮湿或高温干旱的不良气候条件下出现, 而且症状均表现出由内而外更为严重的规律。因此, 在排除病原物侵染的前提下, 我们初步判断广西灵山文利、广东汕尾东冲和海南澄迈永兴荔枝果实膨大期异常现象是由于不良气候引起 Ca 吸收运输障碍而导致的果实缺 Ca 生理性病害。另外, 由于 Ca、B 共同维持细胞壁的稳定, 影响细胞膜的透性^[16], 而且均主要依靠蒸腾拉力作为运输动力^[17], 这可能是作物缺 Ca 和缺 B 症状相似^[18]的主要原因。目前对 Ca、B 两者互作关系虽有大量研究, 但结果并不一致^[18, 19]。根据目前已有数据及信息, 并不能确定广西钦州龙眼异常现象是由于缺 Ca、缺 B 或是由两者共同造成。虽然由于气候原因造成的植物缺 Ca 引起的生理性病害早已被人们认识^[5]并在很多植物上有所报道, 该文是国内对荔枝龙眼果实缺 Ca 相关的生理性病害的首次报道。

由于本文涉及的荔枝龙眼果实异常现象为突发事件,

缺乏预先的试验设计及人为诱导, 不能深入系统研究异常现象的发生机理, 仅能进行事后的形貌观察和营养诊断, 为将来进一步的深入研究提供思路 and 基础。

4 结论

对 2014—2015 年多起荔枝龙眼果实异常现象的果实样本, 先后进行了病原物培养观察、果实形貌结构观察及不同部位养分含量测试, 结合果园管理和施肥情况调查及当地气候条件, 我们初步认为荔枝龙眼中小果果皮从内至外黑褐变甚至果皮开裂、种胚坏死及大果期果实畸形、皱缩及内果皮出现向果肉入侵痂状物的症状是一种由于不良气候引起的果实缺 Ca 或缺 Ca 和 B 而引起的生理性病害。但还需进一步研究才能完全确诊。一旦形成异常果, 就基本散失了果实的商品价值, 严重损害了果农的种植效益。由于荔枝龙眼果实膨大期通常会遭遇低温、高湿、高温或干旱等不良气候, 今后值得对此类现象进行深入研究。

参考文献

- [1] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [2] White P J, Broadley M R. Calcium in plants [J]. *Annals of Botany*, 2003, 92:487-511.
- [3] 杨苞梅, 姚丽贤, 李国良, 等. 荔枝叶片养分含量动态及不同比例钾、氮肥施用效应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5):1212-1220.
- [4] 张新生, 熊学林, 周卫, 等. 苹果钙素营养研究进展 [J]. *中国土壤与肥料*, 1999, 4:3-6.
- [5] Scaife, M A, Clarkson, D T. Calcium-related disorders in plants - a possible explanation for the effect of weather [J]. *Plant and Soil*, 1978, 50:723-725.
- [6] Bangerth F. Calcium-related physiological disorders of plants. *Annual Review of Phytopathology* [J]. 1979, 17:97-122.
- [7] 毛节铨, 缪颖. 桔果对采前施用的 $^{45}\text{Ca}^{2+}$ 的吸收与运转 [J]. *核农学报*, 1994, 8:33-40.
- [8] 龚云池, 徐季娥, 张淑珍, 等. 鸭梨叶片和果实中钙素含量年周期变化的研究 [J]. *园艺学报*, 1987, 14(1):1-5.
- [9] Miyasaka S C, Grunes D L. Root temperature and calcium level effects on winter wheat forage: I. Shoot and root growth [J]. *Agronomy Journal*, 1990, 82:236-242.
- [10] Hepler P K, Wayne R O. Calcium and plant development [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1985, 36:397-439.
- [11] 龚云池, 徐季娥, 张淑珍, 等. 鸭梨黑心病与钙素营养的关系 [J]. *园艺学报*, 1986, 13(3):145-149.
- [12] Muhammad A, Muhammad S, Javaid A, et al. Effect of calcium on the salt tolerance of different wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes [J]. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 49:497-504.
- [13] Cutting J G M, Bower J P. The relationship between basipetal auxin transport and calcium allocation in vegetative and reproductive flushes in avocado [J]. *Scientia Horticulturae*, 1989, 41:27-34.
- [14] 周卫, 汪洪, 赵林萍, 等. 苹果 (*Malus pumila*) 幼果钙素吸收特性与激素调控 [J]. *中国农业科学*, 1999, 32:52-58.
- [15] Millaway R M, Wiersholm L. Calcium and metabolic disorders [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1979, 10:1-28.
- [16] 汪鑫, 徐建明. 硼的植物生理功能研究综述 [J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(30):9611-9613, 9693.
- [17] 何建新. 植物对硼吸收转运机理的研究进展 [J]. *中国沙漠*, 2008, 28(2):266-273.
- [18] 周卫, 林葆. 植物钙素营养机理研究进展 [J]. *土壤学进展*, 1995, 23:12-17, 25.
- [19] 梁和, 马国瑞, 石伟勇, 等. 钙硼营养与果实生理及耐贮性研究进展 [J]. *土壤通报*, 2000, 31(4):187-190.

前瞻性养殖农场项目措施—实施保护性措施对减少化肥和粪肥养分从农场流失的效果

谢玲译 涂仕华校

(国际植物营养研究所成都代表处, 原文译自 Andrew Sharpley, Mike Daniels, Larry Berry, Cory Hallmark 和 Lee Riley 著)

家畜养殖和农作物生产常被引证为主要的非点源(扩散)污染贡献者, 这些农事活动使土壤和养分流失到水体中。美国阿肯色州目前正在开展了一项不同保护性耕作和养分管理措施下的土壤和养分从代表性农田流失情况的研究, 该研究是在一个种植业—养殖业农场实施的合作项目。阿肯色州的农场主们正在帮助减少泥沙和养分流失, 其减少量远比过去很多人认为的还多。

阿肯色州发现农场项目(ADF)是一个州立的广泛合作项目, 旨在监测和证明农场采用保护措施(CPs)可以把农场的养分流失量控制到最低^[1]。类似的工作, 但处于不同实施阶段, 正在明尼苏达州、南达科他州和威斯康星州开展, 其主要目的就是集中精力研发减少养分流失的战略, 以减轻当地和区域民众对水质问题的关心。

富营养化仍然是损害美国某些指定用途的淡水和沿海水域的罪魁祸首^[2-4]。尽管养分来源多种多样, 但农业是主要来源, 尤其是集约化养殖业和种植业, 有越来越多的人认为必须从农业系统中大力减少养分流失。近来的建模工作和相关研究进一步证实了这一点, 研究结果表明农业仍然是造成地表水中养分来源的主要贡献者和水质破坏者。比如, 最近一个模型估算有85%的流入墨西哥海湾的N和P来自农业。因此, 阿肯色州被认为是第四大污染贡献州^[5]。这些估算值是在密西西比河盆地的大范围区域内模拟研究得到的, 在该盆地内, 至今几乎没有进行过农场或农田级试验来测定从农业生产系统中流失的P和N。

决定是否有必要在一个农场使用额外保护性措施或是养分管理措施的首要任务之一是要确定这里的养分流失是不是一个问题。在整个阿肯色州选择了12个农场(ADF)(图1), 用来测量从代表性农田和农场流失的泥

沙和养分。这个项目独特之处在于参与者有农业生产者、科学家和自然资源管理者, 他们协同工作, 以查明农场保护措施问题, 找到潜在的解决方案。供试农场解决农业可持续问题的途径是基于以下四个重要基石: 1) 全面科学, 2) 公正研究, 3) 养殖业主透明度, 以及4) 紧密的合作。在阿肯色州保护措施包括了对肥料用量、施肥时间和施肥位置的管理, 减少耕作, 利用覆盖作物, 缓冲带和集水措施, 以及其他措施。



图1 阿肯色州供试农场的位置分布

¹ 基金项目: 国际植物营养研究所(IPNI)云南项目; 国家水体污染控制与治理科技重大专项

作者简介: 李在凤(1978—, 云南省基层人才培养计划入选者), 女, 农艺师, 长期从事农业技术推广。E-mail: 344068237@qq.com

项目如何运作?

在该项目中只使用了那些能反映农场运作的典型作物、家畜和家禽养殖系统。在大多数情况下，我们会在3-4个点(田块)配置监测站，这会让我们在一个控制点上进行田块与田块之间或是两到三种情况之间的比较。在每个点上都安装了目前最先进的仪器设备来监测径流、养分和泥沙的迁移，以及灌溉水的利用效率。监测流量的仪器设备因具体点位而异，取决于田间大小或是否存在自然排水系统。

一般情况下，我们设计了自动取样程序来收集100毫升的综合样品，这些样品是根据过程流量的不同阶段—在每次径流事件中累计量达到10升的综合样。每一个混合径流—加权样品中径流液中的悬浮固体、N(NO_3-N ， NH_4-N 和总N)和P(溶解P和总P)都是根据美国环境保护局的标准在24小时内进采集和分析。



图2 左图是阿肯色州韦尔顿的田间径流测定装置，右图是阿肯色州迪马斯的测定装置

对于灌溉的行栽作物，用安在管内的流量计来测量灌溉水量，从而确定灌溉水流速和累积灌溉量。在一些情况下，利用水分蒸腾测量仪(ET)来测定每天的蒸腾损失。利用土壤水分传感器来估算土壤水分总量的变化。在田间出水口设置监测站，测定灌溉和降雨的尾水流失。

至今我们学到了什么?

只要简单地保持牧场的牧草生长持续良好，避免集中的水流，在天气预报大雨来临前的3-5天内避免向潮湿土壤中施肥，那么从施用化肥和粪肥养分的牧场中流失的养分就可以减少三倍。例如，在一个家禽/肉牛饲养企

业，农场主把一个从未饲养过家畜、也没有施过肥料的牧场作为一个草皮泄水道来截取从鸡舍周围流出的养分。从2013年至2016年，在一个210米×210米草场上的年平均径流量、P和N分别降低了88%、50%和71%(表1)。

位置	径流 (米 ³ /亩/年)	总P和N	
		总P (公斤/亩/年)	总N (公斤/亩/年)
流入	70.9	0.029	0.105
流出	8.2	0.015	0.029

我们从行栽农场中发现一个共同点：即每年施入到免耕玉米、棉花、水稻和大豆农田中的肥料只有一小部分的N和P流失了(表2)。这些流失量，非常具有代表性，都不超过施入量的5%。如果冬天种植了覆盖作物，则可以保护土壤表面，降低施入的养分以及杀虫剂受到径流和侵蚀力的影响，从而进一步减少养分流失。

因为在过去十年阿肯色州德尔塔地区地下蓄水层急剧下降，这些地区被州政府认定为临界地下水区域。其结果是，越来越多的农场主正在用平整土地和积蓄雨水的方法来增加水分利用率，从而保证在整个生长季节有充足的灌溉水供应。在这些农场，养分流失是最小的，因为农场主们正在想尽一切办法来积蓄雨水或农场的径流，并把它们保蓄在水

作物系统	地点	施入量和损失量		
		施入量 (公斤/亩/年)	损失量 (公斤/亩/年)	损失占比 (%)
氮				
牧场	Bkins	11.20	0.02	0.01
玉米	Atkins	8.93	0.13	0.11
棉花	Dumas	8.20	0.45	0.41
玉米	Dumas	20.00	0.33	0.12
磷				
牧场	Bkins	3.73	0.01	0.01
玉米	Atkins	1.67	0.04	0.17
棉花	Dumas	3.13	0.14	0.31
玉米	Dumas	3.07	0.07	0.17

库或池塘中。农场主开始使用阿肯色州大学合作发展服务灌溉计划项目- PHAUCET (管孔和通用齿冠评估工具), 它可以通过减少灌溉径流而明显增加灌溉水利用率(表3)。流出农场的水分越少, 流失的养分也就越少。

作物	灌溉次数	灌溉量 (公顷-厘米)	径流量	灌溉率 (%)
玉米	6	5.66	0.79	85
棉花	4	6.20	0.56	91

1 在田间持有的灌溉水部份



装置目前是安置在私人农场上, 其结果比安装在大学实验农场上的设备能产生更大影响, 安装在农村合作社的设备也比安装在大学实验农场上能产生更大共鸣。实际上, 我们已经看到了供试农场项目中农场主们具有一定程度的所有制意识, 那就是合作的农场主们正在向阿肯色州试验农场项目索取径流数据, 以便他们能在交流中呈现取得的成果。在某些情况下, 相邻农场主在看到试验农场项目的成果后, 正在志愿争相实施其他保护措施来进一步减少养分流失。更为重要的是, 该项目让农场主们能具有前瞻性地关注环境问题。想要了解更多的该项目的信息, 可以访问网址: <http://discoveryfarms.uark.edu/>。



图3 左图是自动取样机在阿肯色州阿特金斯发生径流时采集水样, 右图是阿肯色州迪马斯用于灌溉水输入的水流测试仪。

结论

在阿肯色州的私人农场已经开始实施的标准水质量监测方法证明了农业对地表水质和目前农作系统效率的真实影响, 以及对实施的保护措施的效果。由于这种径流监测

参考文献

[1] Alexander, R.B., R.A. Smith, G.E. Schwarz, E.W. Boyer, J.V. Nolan, and J.W. Brakebill. Environ. Sci. Technol., 2008, 42:822-830.

[2] Dale, V.H., C.L. Kling, J.L. Meyer, J. Sanders, H. Stallworth, T. Armitage, D. Wangsness, T.S. Bianchi, A. Blumberg, W. Boynton, D.J. Conley, W. Crumpton, M.B. David, D. Gilbert, R.W. Howarth, R. Lowrance, K.R. Mankin, J. Opaluch, H.W. Paerl, K. Reckhow, A.N. Sharpley, T.W. Simpson, C. Snyder, and D. Wright. 2010. Hypoxia in the Northern Gulf of Mexico. Springer Series on Environmental Management. New York, NY: Springer Science.

Sharpley 博士 (E-mail: sharpley@uark.edu) 是一名教授, Daniels 博士 (E-mail: mdaniels@uaex.edu) 阿肯色州大学农业学院作物、土壤和环境科学系推广水质量和养分管理专家。Berry 先生、Hallmark 先生和 Riley 先生是阿肯色州试验农场项目环境科学技术专家。

[3] Jarvie, H.P., A.N. Sharpley, D. Flaten, P.J.A. Kleinman, A. Jenkins, and T. Simmons. J. Environ. Qual., 2015, 44:1308-1326.

[4] Rebich, R.A., N.A. Houston, S.V. Mize, D.K. Pearson, P.B. Ging, and C.E. Hornig. J. Am. Water Res. Assoc., 2011, 47:1061-1086.

[5] Sharpley A.N., M. Daniels, L. Berry, C. Hallmark, and L. Riley. 2015. DiscoveryFarm Guiding Principles. Discovery Links. Fall 2015 ARDF Bulletin. University of Arkansas Division of Agriculture. Available at: <http://discoveryfarms.uark.edu/566.htm>

土壤钾素养分和理化性质对生物炭的响应

姜敏^{1, 2} 顾焯明^{1, 2} 李志国¹ 聂新星¹ 王利¹ 陈防^{1, 3*}

(1 中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态实验室, 湖北 武汉, 430074; 2 中国科学院大学研究生院, 北京, 100049; 3 国际植物营养研究所中国项目部, 湖北 武汉, 430074)



摘要: 为了探讨生物炭对土壤不同形态钾素含量的影响及其机理, 通过土壤培养试验研究施用生物炭对于我国南方两种土壤(黄棕壤和灰潮土)不同形态钾素含量及理化性质差异的影响。结果表明: 1%、2% 和 3% 的生物炭均能提高两种土壤各形态钾含量, 并且各形态钾含量有随生物炭用量的增加而增加的趋势。生物炭提高土壤中不同形态钾含量与生物炭钾的直接贡献作用和土壤理化性质、解钾菌数量的间接影响有关。

关键词: 生物炭; 钾素形态; 土壤类型; 理化性质

钾素是植物生长必需的三大元素之一, 对植物的生长, 发育, 代谢, 抗逆等生理过程都起着重要作用, 是公认的“品质元素”^[1]。按照钾在土壤中的存在形态分为水溶性钾(土壤溶液中钾)、交换性钾、非交换性钾和矿物晶格内的结构钾四种^[2]。其中, 水溶性钾和交换性钾是“易有效态钾”, 这部分钾可被植物直接吸收利用, 但其含量一般不超过全钾含量的 2%, 非交换性钾也仅占全钾的 2.7%–9.4%, 是速效钾的潜在来源, 当速效钾耗竭时释放出来补充速效钾, 是土壤供钾潜力的良好指标, 结构钾中的钾被矿物晶格束缚, 要经过相当长时间的矿化才能释放出来, 并且这种贡献对当季作物是微不足道的, 该部分钾占土壤全钾的 90%–98%^[3]。土壤中这四种形态钾含量并不是一成不变的, 而是存在着动态平衡^[2]。当施入钾肥时, 土壤溶液中钾离子浓度迅速升高, 打破了原有的平衡, 一部分钾会被土壤中 2:1 型粘土矿物固定, 成为非交换性钾^[3]。近几十年随着农业的发展以及一些高产作物品种的出现, 人们越来越倾向于施加化学肥料, 而作为钾素营养重要来源的有机肥施用量越来越少, 导致土壤中钾素的养分平衡被打破。我国是矿物钾素资源贫乏的国家, 大量的钾肥依靠进口。2014 年我国进口钾肥 730 万吨, 为全球最大进口国^[4]。我国南方地区由于高温多雨, 土壤风化淋溶作用强烈, 同时复种指数高, 作物生长量大, 作物收割从土壤中带走大量的有效养分。因此, 基于当前的实际情况, 我国农田施钾要在提高钾肥的利用效率的同时拓宽钾肥资源途径, 挖掘土壤供钾潜力。

生物炭是生物质(如作物秸秆、动物粪便、垃圾废弃物等)在完全或部分缺氧条件下, 以及相对较低的温度($<700^{\circ}\text{C}$)下经热解炭化产生的一类富碳物质, 生物炭可改良酸性土壤 pH; 改善土壤结构; 提高土壤保肥保水能力, 提高微生物丰度和数量; 其作为一种土壤改良剂、肥料缓释载体在农业生产中备受关注^[5]。前人针对于生物炭对土壤钾素养分状态和作物生长方面也开展了大量的研究。Novak 等人在生物炭与肥力较低的土壤混合培养实验中发现土壤有效钙、钾、锰和有机碳因生物炭施入而增加, 其中 2% 生物炭添加量可使土壤有效钾增加 106%^[6]。Liang Feng 等人对于生物炭施入石灰性土壤三年后的作物产量和土壤性质的研究表明, 施入生物炭之后, 土壤速效钾含量提高显著, 四个作物生长季的累计产量有显著提高^[7]。研究表明, 生物炭之所以能提高土壤养分状态主要是由于生物炭含矿质元素丰富并且大部分以可溶性态存在, 而何绪生等人^[8]则认为生物炭作为土壤改良剂提高作物产量和土壤肥力主要是由于其对土壤理化性质及微生物活性的改善有关。因此针对生物炭施入土壤后土壤中各形态钾素含量变化趋势及原因有必要开展相关研究。

黄棕壤和灰潮土是我国南方长江中下游地区农业生产两种主要的土壤类型, 两种土壤理化性质差异较大。因此, 本研究拟通过土壤培养试验来探明不同比例生物炭对两种土壤不同钾素形态含量的影响并且明确生物炭提高土壤钾素有效性可能的原因, 以期生物炭在农业中的应用提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

试验于 2015 年 9 月到 2016 年 6 月在中国科学院武汉植物园盆栽场进行。黄棕壤和灰潮土取自湖北省武汉市，其主要性状见表 1 生物炭为竹炭，由上海时科生物科技有限公司以竹子为原料 450℃ 条件下厌氧热解制备而成，其基本理化性质见表 2。

土壤类型	pH	有机质 (克/千克)	碱解氮	速效磷	水溶性钾 (毫克/千克)	速效钾	缓效钾
黄棕壤	5.7	27.26	131.6	39.98	51.90	199.88	617.52
灰潮土	7.6	13.31	36.26	11.39	12.97	87.64	457.4

pH	有机碳	N	P	K	Ca	Mg	灰分 (%)
9.48	798.1	2.2	0.6	15.6	2.8	1.7	10.3

1.2 试验设计

本试验共设置两种土壤类型即黄棕壤 (H) 和灰潮土 (G)，每种土壤设置 4 个处理，分别为①对照处理 (CK)，不施用生物炭，②施用 1% 生物炭处理 (HB1 / GB1)，即生物炭占总土壤质量的 1%，③施用 2% 生物炭处理 (HB2 / GB2)，④施用 3% 生物炭处理 (HB3 / GB3)。每个处理设置 5 次重复。试验于 2015 年 9 月 15 号开始，于试验开始后的第 15 天、30 天、60 天、90 天、120 天进行土壤样品的采集，然后进行土壤 pH、有机质、不同形态钾素含量等指标的测定。

1.3 测定项目与方法

将风干土样分别研磨、过筛进行各指标的测定。

土壤的理化性质均按照鲍士旦《土壤农化分析》^[2] 的测定方法进行。土壤 pH 值按水土比 1:2.5 混合震荡沉淀后用 pH 计测定；水溶性钾用去离子水提取、交换性钾使用醋酸铵提取，非交换性钾使用 1mol/L 的热硝酸提取，提取后均用火焰光度法进行测定。有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定；土壤水分、温度用 YZQ-310 水分测量仪测定。硅酸盐解钾细菌采用硅酸盐细菌培养基在 28℃ 条件下培养 2-3 天，采用涂布平板法计数。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 对数据进行处理，采用 SPSS 16.0 对数据进行方差分析，LSD 法进行多重比较并用 Excel 2003 作图。

2 结果与分析

2.1 生物炭施用对土壤不同形态钾素的影响

2.1.1 生物炭施用对土壤水溶性钾含量的影响

由图 1 (a) 和 (b) 可以看出，生物炭处理的黄棕壤和灰潮土水溶性钾含量显著高于对照处理。这说明施用生物炭可以显著提高土壤中水溶性钾含量，并且含量随生物炭施用的比例增加而增加。

施用 1%、2%、3% 生物炭处理的黄棕壤水溶性钾的含量与对照 (46.4 毫克/千克) 相比平均增加了 67.33%、108.56%、155.65%，分别达到了显著性差异。灰潮土施用 1%、2%、3% 的生物炭后，水溶性钾含量比对照 (12.54 毫克/千克) 平均增加了 91.07%、176.08%、263.96%，也达到了显著性差异，且增加幅度大于黄棕壤，但从水溶性钾含量增加的绝对量来看，黄棕壤要明显高于灰潮土。

从不同培养天数土壤水溶性钾含量的动态变化来看，两种土壤施用生物炭后土壤水溶性钾在不同培养时期均有不同程度增加，以在 60 天左右时含量最高，之后则缓慢下降，到 150 天基本达到最低值。产生此现象的原因还需进一步研究，可能与生物炭钾在土壤中的释放速率、土壤理化性质等变化有关。

2.1.2 生物炭施用对土壤交换性钾含量的影响

由图 2 (a) 和 (b) 可以看出，施用生物炭处理的两种土壤交换性钾含量始终要比对照处理高，并且交换性钾含量随着生物炭施用比例的增加而增加。其中，施加 1%、2%、3% 的生物炭使黄棕壤交换性钾的含量比对照 (155.22 毫克/千克) 平均增加 28.77%、45.74%、65.64%，使灰潮土比对照 (78.19 毫克/千克) 平均增加 30.23%、56.7%、80.58%，生物炭对于肥力较低的灰潮土交换性钾含量提高幅度较大但增加的绝对量小于黄棕壤，这与水溶性钾的含量变化趋势是相同的。在整个培养周期中，两种土壤各处理的交换性钾含量变化波动较大但趋势

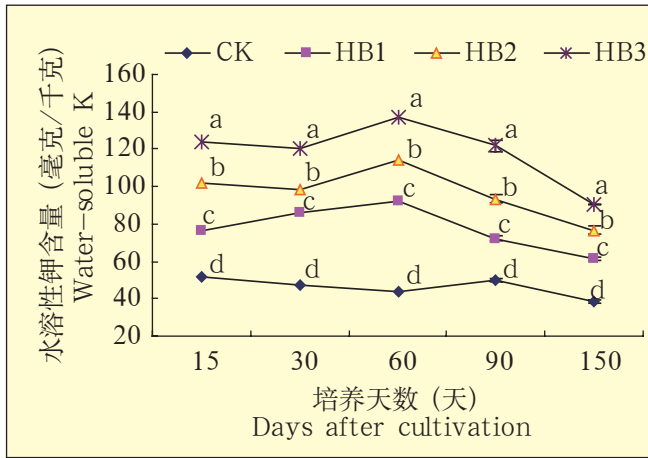


图 1 (a) 施用生物炭后不同培养时期黄棕壤水溶性钾含量

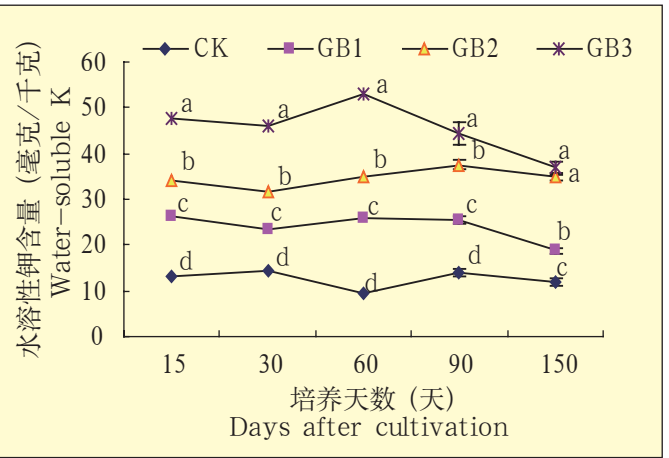


图 1 (b) 施用生物炭后不同培养时期灰潮土水溶性钾含量

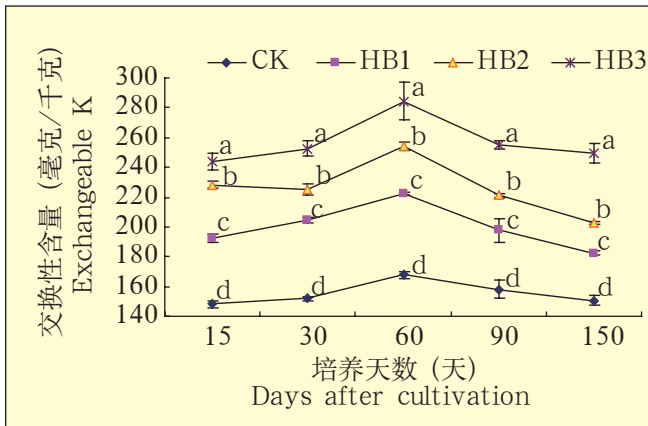


图 2 (a) 施用生物炭后黄棕壤不同培养时期交换性钾的含量

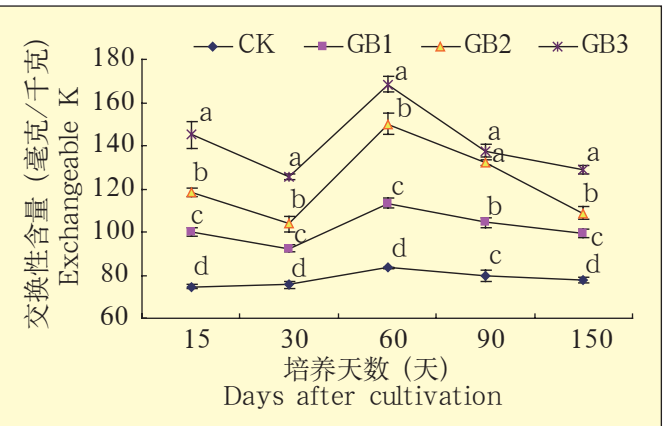


图 2 (b) 施用生物炭后不同培养时期灰潮土交换性钾的含量

基本一致，都在第 60 天时达到最高值，之后开始下降并在 150 天时达最低点，与培养开始时的含量相比，差异不大。

2.1.3 生物炭施用对土壤非交换性钾含量的影响

由图 3 (a) 可以看出，生物炭添加可不同程度地提高黄棕壤非交换性含量。施加 1%、2%、3% 的生物炭后，土壤非交换性钾的含量要比对照 (615.66 毫克/千克) 平均增加 19.65%、37.15%、56.94%。培养 150 天时，黄棕壤交换性钾含量相比于培养初期均有不同程度地下降。图

3 (b) 表明施加生物炭也可提高灰潮土非交换性钾含量，但是在灰潮土上的响应与黄棕壤不同，不同比例生物炭对灰潮土非交换性钾含量的影响趋势基本一致，并且在第 60 天时各处理非交换性钾含量均显著下降。

2.2 影响两种土壤各形态钾含量的因素

2.2.1 施用生物炭对土壤温度的影响

研究表明，土壤温度升高可以促使土壤钾素向有效态转化^[9]。本研究选取培养开始后的第 8-14 天和第 61-

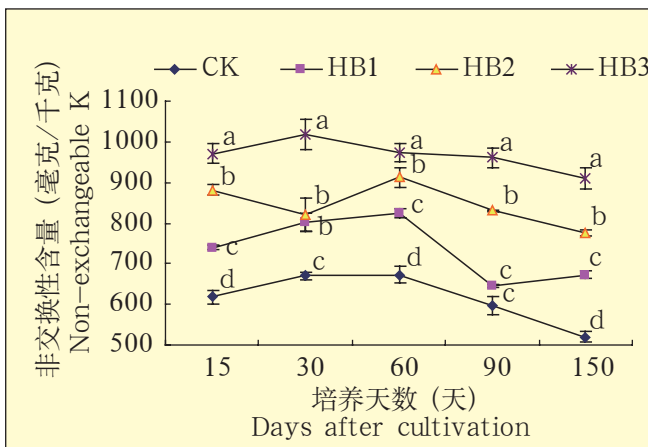


图 3 (a) 施用生物炭后不同培养时期黄棕壤非交换性钾的含量

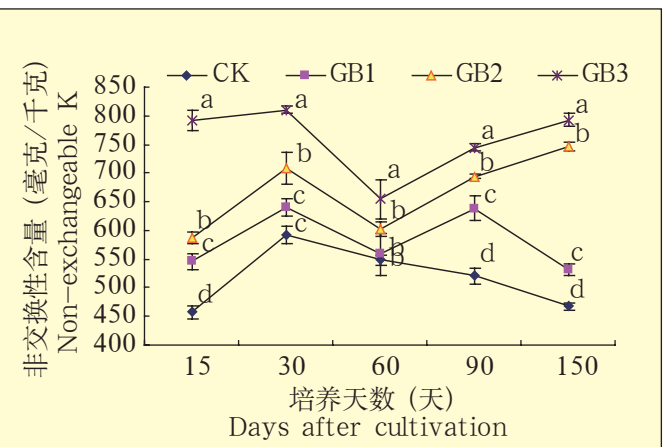


图 3 (b) 施用生物炭后不同培养时期灰潮土非交换性钾的含量

67天两段时间为研究对象研究生物炭对土壤温度的影响。

由图 6a (1) 和 6a (2) 可以看出, 培养开始后的第 8-14 天这段时间内, 施加 3% 生物炭可使黄棕壤温度与不施生物炭处理相比上升 0.75℃-1.19℃。可使灰潮土温度提高 0.5℃-1.19℃。1% 含量生物炭可使黄棕壤温度至少提高 0.38℃, 使灰潮土至少提高 0.25℃。

由图 6b (1) 和 6b (2) 可以看出, 培养开始后的第 61-67 天, 施加 3% 生物炭可以使黄棕壤温度相对于对照提高 0.69℃-1℃不等, 使灰潮土温度提高 1℃-1.5℃不等。同时可以看出该期间, 施加 1% 生物炭含量生物炭的灰潮土和对照相比, 土壤温度基本不变, 而黄棕壤温度却提高了 0.38℃-0.48℃。

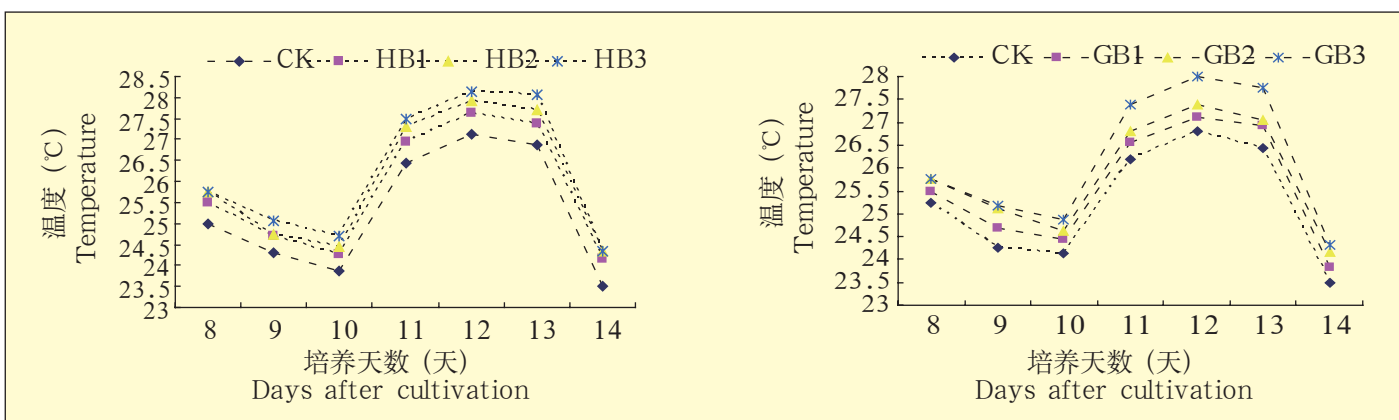


图 6a (1) 生物炭对黄棕壤土温的影响

图 6a (2) 生物炭对灰潮土土温的影响

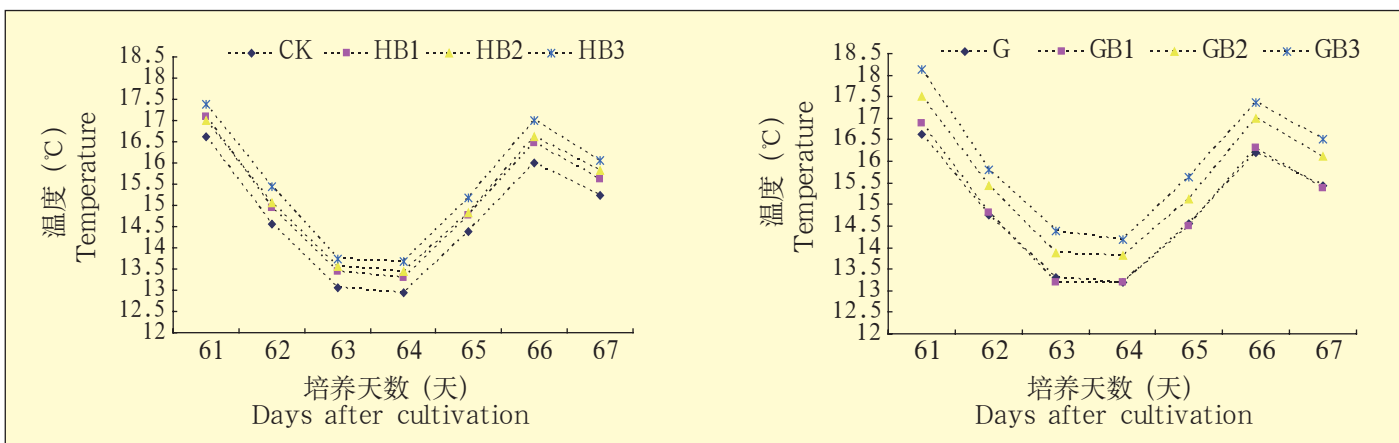


图 6b (1) 生物炭对黄棕壤土温的影响

图 6b (2) 生物炭对灰潮土土温的影响

2.2.2 施用生物炭对土壤 pH 的影响

研究表明, 土壤 pH 升高会提高土壤钾素的固定量, 使溶液中钾离子含量变低, 从而降低土壤钾素的有效性^[10]。

由表 3 和表 4 可知, 添加生物炭可以提高两种土壤的 pH 值, 并且提高程度随生物炭添加量的增加而增加。添加 3%、2%、1% 的生物炭分别使黄棕壤 pH 平均提高了 0.32、0.22、0.1 个单位。添加 3%、2%、1% 的生物炭分别使灰潮土 pH 平均提高了 0.42、0.33、0.24 个单位。只有 3% 生物炭处理使灰潮土 pH 的提高达到显著水平。

2.2.3 施用生物炭对土壤有机质水平的影响

研究表明有机质能够降低土壤的固钾强度, 使土壤中的钾素有效性提高^[9]。本研究中生物炭处理的黄棕壤和灰潮土有机质含量比对照明显提高。并且随着生物炭用量的增加, 有机质水平也随之提高。施用 1%、2%、3% 生物炭处理的黄棕壤有机质含量要比对照处理平均高出 37%、83%、117%。灰潮土有机质含量要比对照平均高出 71%、148%、237%。

2.2.4 施用生物炭对土壤硅酸盐解钾菌的影响

众多研究表明, 硅酸盐解钾菌作为土壤功能细菌的一种, 使土壤中的矿物钾变成可直接被植物利用的水溶

性钾^[11], 使土壤钾素有效性大大提高。

本试验选取整个培养时期微生物活动相对旺盛的时间点 2015 年 10 月 15 日即培养开始后的第 30 天来测定土壤各处理中解钾菌的数量, 结果如表 5 所示: 添加生物炭提高了两种土壤中的解钾菌含量, 但是 1% 生物炭处理的提高效果均不显著。施用 2%、3% 生物炭处理的黄棕壤解钾菌数量与对照相比显著提高, 3% 生物炭处理的黄棕壤解钾菌数量有所下降, 灰潮土中也有同样的趋势。可能是高量生物炭的施用导致短期内

表3 不同比例生物炭对黄棕壤(H)理化性质和硅酸盐解钾菌的影响

处理	pH	有机质(克/千克)	硅酸盐解钾菌($\times 10^3$ cfu/克)
CK	5.62 \pm 0.07c	25.53 \pm 0.57d	3.33 \pm 0.33b
HB1	5.72 \pm 0.05bc	34.87 \pm 1.13c	4.00 \pm 0.73b
HB2	5.84 \pm 0.06ab	46.82 \pm 0.98b	6.17 \pm 0.54a
HB3	5.94 \pm 0.08a	55.39 \pm 1.59a	4.50 \pm 0.85ab

表4 不同比例生物炭对灰潮土(G)理化性质和硅酸盐解钾菌的影响

处理	pH	有机质(克/千克)	硅酸盐解钾菌($\times 10^3$ cfu/克)
CK	7.55 \pm 0.07b	12.73 \pm 0.32d	9.83 \pm 0.60b
GB1	7.79 \pm 0.09ab	21.81 \pm 0.73c	12.00 \pm 1.26b
GB2	7.88 \pm 0.14ab	31.62 \pm 2.21b	16.83 \pm 0.70a
GB3	7.97 \pm 0.13a	42.92 \pm 2.17a	15.50 \pm 0.62a

土壤理化环境条件变化较大,解钾菌的生长受到一定程度的抑制。

3 结论

本研究表明添加生物炭后,两种土壤水溶性钾、交换性钾及非交换性钾的含量迅速上升,并且随生物炭添加量的增加而增加,但是各形态钾含量随时间的推移变化不大。生物炭促进两种土壤各形态钾含量的提高不仅与生物炭中营养元素的直接贡献有关,还与土壤理化性质的改善和微生物活性等间接相关,关于生物炭在不同土壤类型上作用效果差异的原因和机理还有待进一步的研究。



参考文献

- [1] 郭英,孙学振,宋宪亮,等.钾素对棉花生长发育和纤维品质形成影响的研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2006,37(1):141-144.
- [2] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2008:25-114.
- [3] 朱向东,王宏庭.土壤钾素管理研究进展[J].山西农业科学,2013,41(11):1274-1281.
- [4] 陈丽.化肥行业:艰难的2014,变革的2015[J].中国化肥信息,2015,(5),5-8.
- [5] Christopher J. Atkinson, Jean D. Fitzgerald, Neil A. Hips. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils:a review[J]. Plant Soil, 2010, 337:1-18.
- [6] Jeffrey M. Novak, Warren J. Busscher, David L. Laird, et al. Impact of Biochar Amendment on Fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil[J]. Soil Science, 2009, 174:105-112.
- [7] LIANG Feng, LI Gui-tong, LIN Qi-mei, et al. Crop Yield and Soil Properties in the First 3 Years After Biochar Application to a Calcareous Soil[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(3):525-532.
- [8] 何绪生,张树清,余雕,等.生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J].中国农学通报,2011,27(15):16-25.
- [9] 梁成华,魏丽萍,罗磊.土壤固钾与释钾机制研究进展[J].地球科学进展,2002,17(5):679-684.
- [10] 聂新星,李志国,张润花,等.生物炭及其与化肥配施对灰潮土土壤理化性质、微生物数量和冬小麦产量的影响[J].中国农学通报,2016,32(9):27-32.
- [11] Elizabeth P, Miguel S, Maria M B, et al. Isolation and characterization of mineral phosphate-solubilizing bacteria naturally colonizing a limonitic crust the south-eastern venezuelan region[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(1):2905-2914.

地表覆草对坡地表层土壤有机碳动态变化影响

顾焯明^{1, 2} 李志国¹ 聂新星^{1, 2} 姜敏^{1, 2} 陈防^{1, 3*}

(1 中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态实验室, 湖北 武汉, 430074; 2 中国科学院大学研究生院, 北京, 100049;

3 国际植物营养研究所中国项目部, 湖北 武汉, 430074)

摘要: 在湖北丹江口库区小茯苓流域坡地柑橘园进行了四年的定位试验, 设置对照, 秸秆覆盖, 生草覆盖三个处理。评价地表覆盖对 0-100 厘米土层土壤碳素的时空变化, 对有机碳及其活性组分动态变化的影响, 并根据有机碳在月份间的动态变化规律讨论了丹江口库区柑橘园坡地采用秸秆覆盖或生草种植的适宜时间。

关键词: 土壤有机碳组分; 地表覆盖; 坡耕地; 碳循环, 碳储量

引言

水土流失不仅影响山区坡耕地可持续农业生产, 更会破坏山区生态环境, 必须加以防控。而土壤有机碳能在水土流失防控中起到很重要的作用, 这就使得有关土壤有机碳的储量及其动态变化的成了当前农田土壤肥力变化及营养元素循环研究的热点。在气候变化的大背景下, 有关土壤碳素循环的研究对促进农业可持续发展, 保护生态环境有重要意义。土壤有机碳不仅在水土流失防控方面有重要作用, 而且对土壤中温室效应气体 CO₂ 的释放也有很重要的影响^[1]。而后者对地球气候变化有直接的联系。因此, 与农业生产相关的坡地水土流失过程中发生的土壤有机碳动态变化, 在全球气候变暖问题日益升温的今天颇受研究人员的关注。

合理的耕作措施和地表覆盖措施能起到减少水土流失和提高土壤有机碳储量的效果。已有研究证明覆盖措施能有效降低水土流失, 减少土壤水分散失, 土表径流, 加强水分入渗^[2]。然而, 目前关于覆盖对土壤有机碳含量和储量影响的研究结果存在很大分歧, 有的结果显示覆盖对土壤有机碳含量和储量无显著效果; 有的有促进作用, 甚至有的反而起抑制作用, 导致这些差异的原因除了具体的覆盖方法不一致外, 还可能与土壤固碳过程的复杂性有关, 特别是对一些碳组分, 例如轻组有机碳 (LOC), 水

溶性有机碳 (DOC), 颗粒态有机碳 (POC) 以及易氧化有机碳 (EOC) 动态变化。前人的研究表明虽然这些有机碳活性组分只占总有机碳的很小比例, 但却活性强, 流动率高, 容易受气候、土壤质地和土壤管理措施影响, 特别是在扰动很大的农田系统^[3]。土壤碳组分对环境的变化能比总有机碳做出更快速的反应, 因此在碳素动态变化过程中扮演着重要角色。掌握这些碳组分的特性以及它们与土壤性质以及总有机碳之间的动态变化规律, 可以对评价农艺措施、坡耕地土壤性质、养分循环、水土流失以及碳、氮、磷养分固定的研究提供理论依据。

位于我国湖北省西北部的丹江口库区, 人口的 80% 生活在山区, 92% 的土地是山地。随着农村人口与耕地之间的矛盾日益增加。坡耕地的合理开发利用变得尤为迫切。由于对丘陵坡地开发和利用中缺少水土保持措施, 坡耕地的生态环境以及水土流失状况逐渐恶化, 土壤质量逐年下降。据统计, 2005 年丹江口库区水土流失面积达到 1258 平方千米, 年表土流失量可达 900 万吨。

传统的耕作模式下, 化肥的过量使用在坡地耕作过程中很常见。作物秸秆往往被全部移走或就地焚烧。不但造成了污染, 也是对资源的极大浪费。因此, 为了研究地表覆盖措施对土壤总有机碳及其组分变化的影响, 为当地的土壤培肥和生态环境保护提供理论依据, 我们在丹江口库区小茯苓流域设置了坡耕地地表覆盖试验, 研究不同覆盖

基金项目: IPNI-HB-33

作者简介: 顾焯明 (1988-), 男, 博士研究生, 研究方向为植物营养与农业生态 E-mail: chiminggu@gmail.com

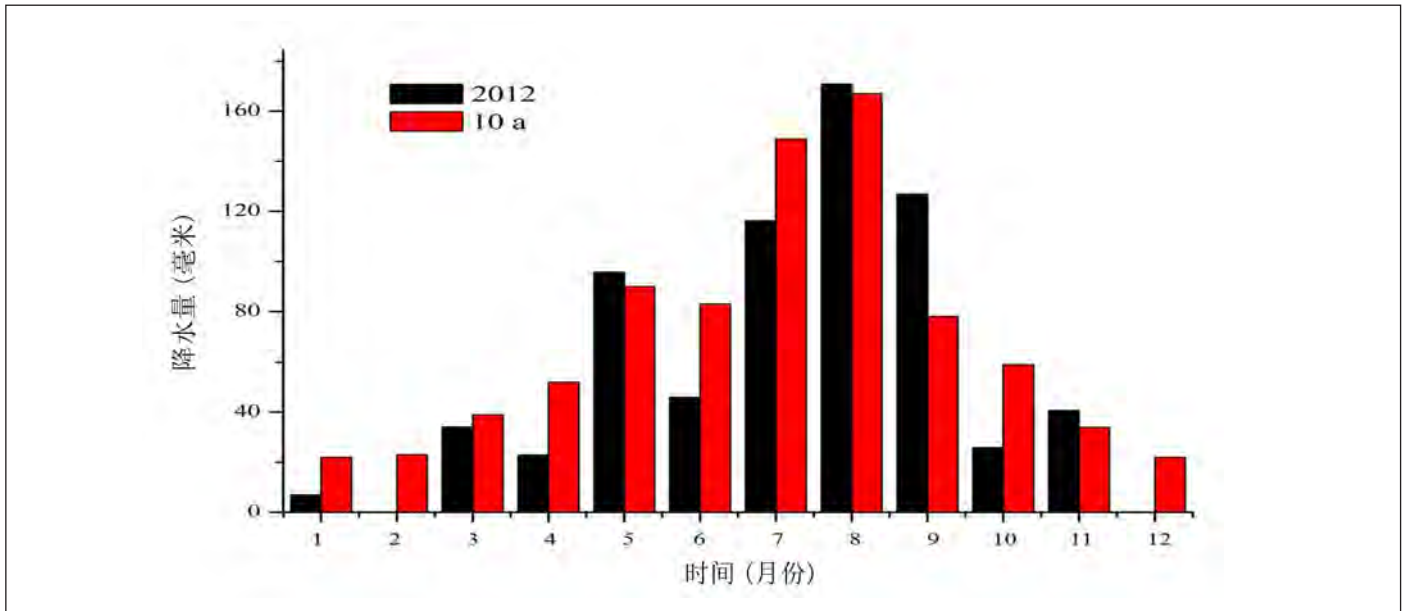


图1 试验点 2012年及近十年降雨量

措施下坡耕地：(1) 土壤有机碳含量及其储量在年度内的变化以及在不同土层的分布状况；(2) LOC, DOC, POC 和 EOC 四种碳组分的动态变化及其与土壤性状的联系。(3) 土壤有机碳含量与土壤性状的关系。

1 试验材料与方法

1.1 试验地点

试验点于 2012 年在丹江口库区习家店镇小茯苓流域 ($32^{\circ}45.9''\text{N}$, $110^{\circ}9.9''\text{E}$) 进行。该地属于北亚热带半湿润季风气候, 年平均降水量为 833.6 毫米, 降水主要集中在 5-9 月, (图 1), 年平均气温为 15.9°C 。当地土壤类型为黄棕壤, 主要农作物有柑橘, 小麦, 玉米, 油菜和水稻等。

1.2 试验设计

试验设置三个处理: 对照处理 (CK), 地表无覆盖; 秸秆覆盖处理 (ST) 地表覆盖稻草, 厚度约为 10 厘米, 覆盖量为 375 克/平方米; 生草处理 (GT) 地表种植白三叶, 三叶草干物质量大约为 360 克/平方米, 各处理重复三次, 区组随机排列, 小区面积为 40 平方米 (4 米 \times 10 米), 分布在平均坡度为 19.5° 的坡地的同一水平高度。每个小区有长势相当的 10 株柑橘树, 品种为尾张。小区间用水泥墩隔开。每株树每年施肥量为 $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}$

$=0.8:0.2:0.2$ 千克/株, 肥料种类分别为尿素, 过磷酸钙, 氯化钾。施肥方式为穴施, 果树修剪后的树枝统一移出小区, 其他管理措施各处理一致。

1.3 样品的采集及分析

每个小区分五点, 每个点分五层采集 0-100 厘米的土样, 1 月至 12 月共采集了 7 次, 共计 315 个土样。土壤样品去除动植物残体及石子后风干, 分别过 100 目和 200 目的尼龙筛保存待测。生草处理中, 选取三个 0.5 平方米生长状况有代表性的区域, 全部收获地上部, 测定白三叶草的地上部生物量。根系生物量用根钻法收集 50 厘米土层内的根系, 洗净风干测定白三叶草的总生物量。

轻组有机碳的测定采用 Janzen 等人 (1992) 的方法。易氧化有机碳测定根据 Blair 等人 1995 年提出的方法, 用岛津 TOC-SSM-5000A 碳分析仪测定。可溶性有机碳用 Lique TOC II 有机碳分析仪测定。土壤总有机碳 (TOC) 用重铬酸钾外加热法测定。土壤温度由 LI-6400 光合仪温度探针测定, 烘干法测定土壤水分含量。土壤 pH 用 pH 计测定水土比为 1:10, 土壤容重, 总氮含量, 速效磷以及速效钾含量都用常规法测定。

1.4 数据处理与统计

数据平均值比较时采用 LSD 法, 差异性比较水平为 $p < 0.05$, 数据处理软件为 SPSS 16.0 和 Excel 2010。

2 试验结果与分析

2.1 土壤基本理化性状

如表 1 所示, ST 和 GT 处理对表层土壤性质有显著影响。相较于对照, ST 和 GT 处理均降低了土壤容重 (BD), 其中秸秆覆盖处理显著降低了土壤容重, 这与 Unger (1998) [4] 等人的研究结果一致。覆盖处理降低土壤容重的主要原因是土表覆盖层减弱了降雨的冲击力, 降低了土壤紧实度。生草处理土壤表层的 pH 降低, 可能与白三叶草根分泌物中释放的 H^+ 以及酸液有关。

相较于对照处理, 覆盖处理增加了土壤总碳, 总氮含量, 降低了土壤碳氮比。这表明覆盖处理通过秸秆投入, 生草根系以及地上部凋落物的投入, 能有效增加土壤碳氮含量, 且覆盖处理增加全氮的比例要大于全碳。

处理	BD (克/立方厘米)	pH	TC		TN	C/N	有效 P (毫克/千克)	速效 K (毫克/千克)
			(克/千克)					
CK	1.45 a	6.5 a	6.70 c	0.88 b	7.61 a	16.0 b	106.3 c	
ST	1.36 b	6.4 a	7.55 b	1.21 a	6.24 b	17.2 a	148.5 a	
GT	1.41 a	5.9 b	7.91 a	1.17 a	6.76 b	14.2 c	125.2 b	

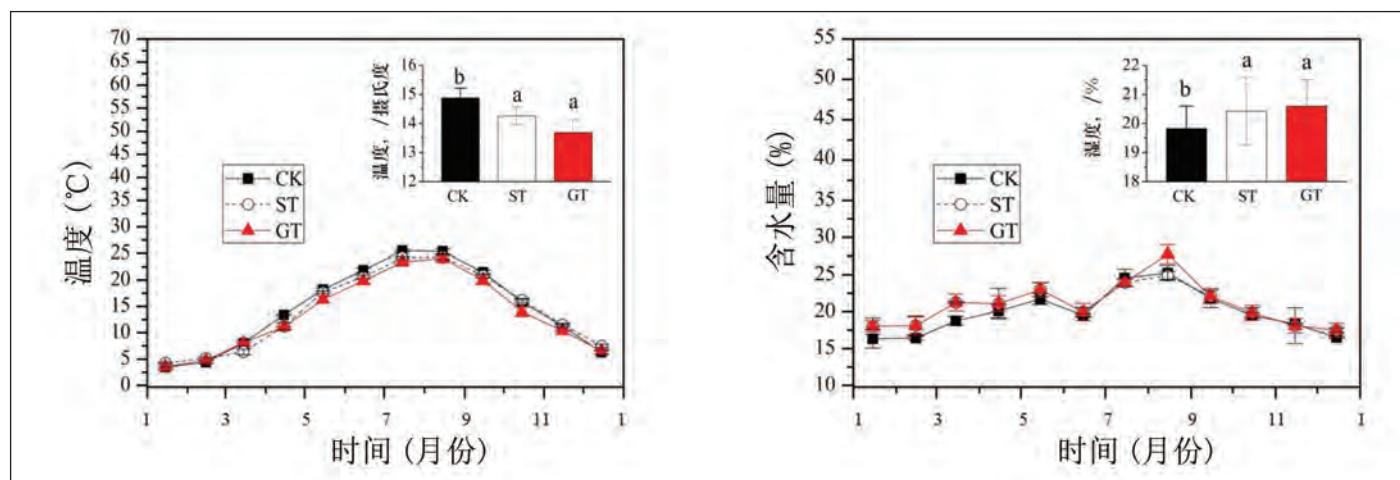


图 2 试验期间土壤温度和湿度的月动态变化

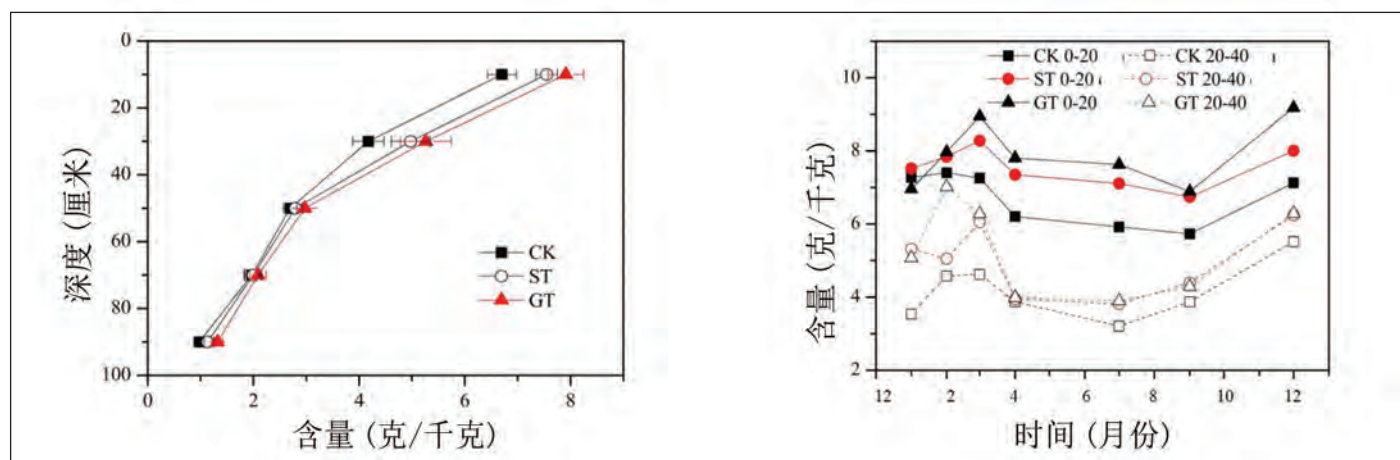


图 3 土壤总碳含量的时空变化

秸秆覆盖处理土壤速效磷钾含量显著高于对照和生草处理, 这可能是由于秸秆腐解后释放的大量有效态的磷钾素, 而 GT 处理表层土壤有效磷的降低可能是由三叶草的吸收引起的。

地表覆盖也会对土壤表层 0-20 厘米土层的土壤温度和土壤湿度产生一定影响 (图 2), 主要是对气温的变化起缓冲作用, 对土壤起保墒作用。当气温较高时土壤温度明显低于对照处理, 反之亦然。至于土壤湿度, 在整个监测期基本都是覆盖处理高于对照处理。

2.2 土壤有机碳含量覆盖处理

不同处理土壤有机碳含量在不同土层深度的变化及其随时间的动态变化如图 3 所示。各处理土壤有机碳含量随土层深度的增加而降低。不同处理土壤有机碳含量的差异

主要存在于土壤微生物活性较高的表层 0—40 厘米。ST 和 GT 处理土壤有机碳含量分别为 6.26 和 6.59 克/千克，显著高于 CK (5.44 克/千克)。相对于不覆盖，土壤有机碳含量在秸秆覆盖和生草覆盖条件下分别提高了 15.15% 和 21.14%。在整个生长季，所有处理土壤有机碳含量均随着季节的变化而变化，其最大值出现在气温低，降水少的季节，最低值出现在气温高降水多的季节。从图 3 中可以看出覆盖与否对土壤有机碳含量的季节性动态变化没有明显的影响，所有处理土壤总有机碳含量的季节性变化趋势基本一致。这说明影响土壤有机碳含量的季节性动态变化的界定性因素是土壤含水量和土壤温度。相较于对照处理，覆盖处理只是通过外源有机物料的投入增加了土壤有机碳的累积。

覆盖处理间对比，GT 处理表层 0—40 厘米的土壤有机碳含量显著高于 ST 处理，说明相较于秸秆覆盖，生草覆盖提高土壤有机碳含量的潜力更大。我国黄土高原地区以及英国的东南部研究报道过类似的结果，其他地方的研究也表明生草处理比秸秆覆盖处理更能增加土壤有机碳含量。本研究中，相对于秸秆覆盖，生草覆盖处理中表层土壤有机碳的积累可能是由于其较低的土壤温度抑制了有机物料的腐解。虽然秸秆覆盖所投入的有机物总量与生草覆盖总生物量相当，但是生草处理直接进入土壤的部分（地下部）远高于秸秆覆盖处理，而秸秆覆盖后仍旧保留在土壤表层，秸秆腐解后产生的小颗粒在坡地上很容易随风或径流转移流失，尤其是本试验所在地丹江口库区，7—9 月雨季降雨集中，雨量较大，产生大量径流。更是会导致秸秆覆盖处理地表有机物随径流损失。相比之下，生草覆

盖不仅能保持住地表的有机物料，而且根部和根部分泌物也极大地促进了表土层有机碳含量，在增加土壤碳储量的同时因地表径流导致的有机碳损失量很低

2.3 土壤有机碳活性组分的动态变化

大量研究都表明农田覆盖措施能显著影响土壤中有机碳活性组分的含量，尤其是在表土层^[5]。本试验结果也表明覆盖措施能显著影响表土层土壤中有机碳活性组分的含量。覆盖处理 LOC, DOC, POC 和 EOC 含量均显著高于未覆盖的对照处理（图 4）。这主要是得益于秸秆、植株凋落物、根毛及根系分泌物。所有处理有机碳活性组分含量均随土层深度的增加而降低（图 5）。然而，由于本试验是在坡地上进行的，坡地上水土流失情况比平地严重，因而养分流失量，以及各种有机碳活性组分的转移与其他研究结果有所不同。

土壤活性炭组分中的 LOC 在短期内是土壤养分存储库，它的主要成分是非自由态碳，由于缺少土壤胶体的保护，LOC 具有能够迅速矿化的特点，能很容易随径流移动导致损失，具有很高的腐解率和周转率，因此，LOC 受季节的影响很大^[6]。本试验中，LOC 明显受到季节的影响，其含量的最大值出现在 2—3 月，然后逐渐降低，直到 10 月份又开始有所增加（图 4）。从 4—9 月这段时期 LOC 含量较低是因为这段时间适宜的土壤温度和湿度，较高的土壤微生物活性，使得有机物料的分解速率提高，且期间频繁地降雨导致的径流带走了大量 LOC。覆盖与否没有改变 LOC 季节间的变化趋势，却可以提高其在土壤中的含量。例如，在 3 月份，相较于 CK，LOC 在 ST 和 GT

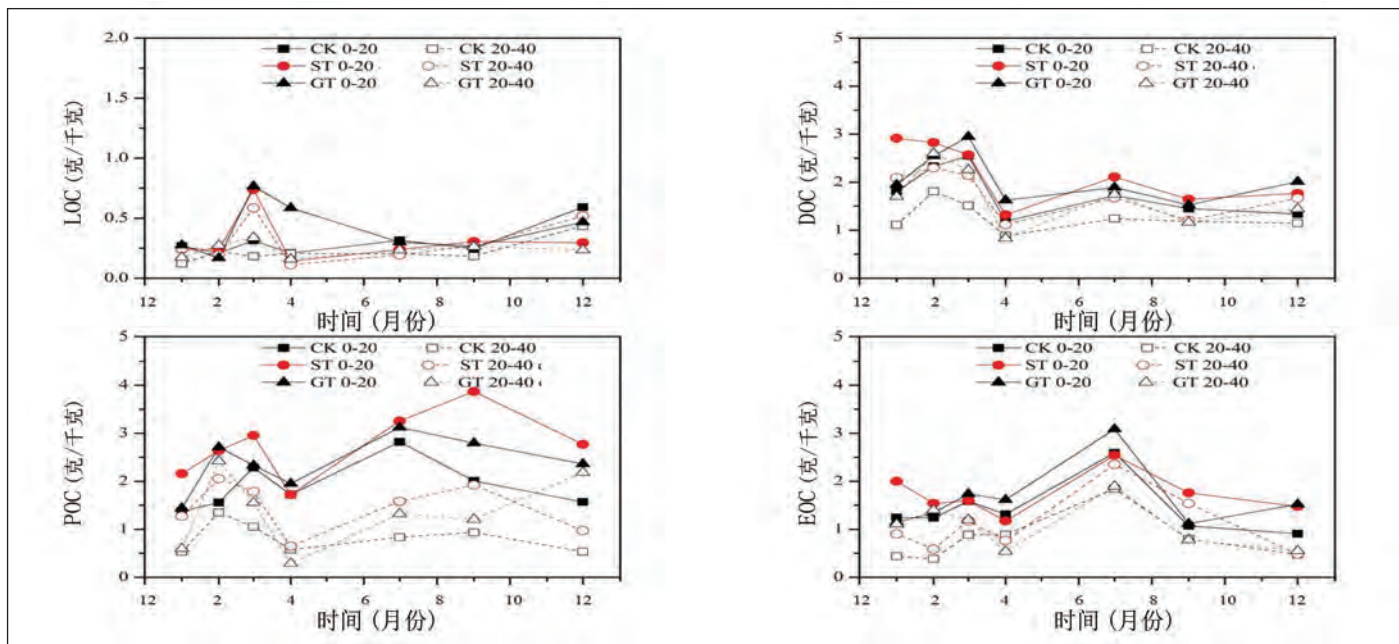


图 4 浅层土壤有机碳活性组分的时空变化

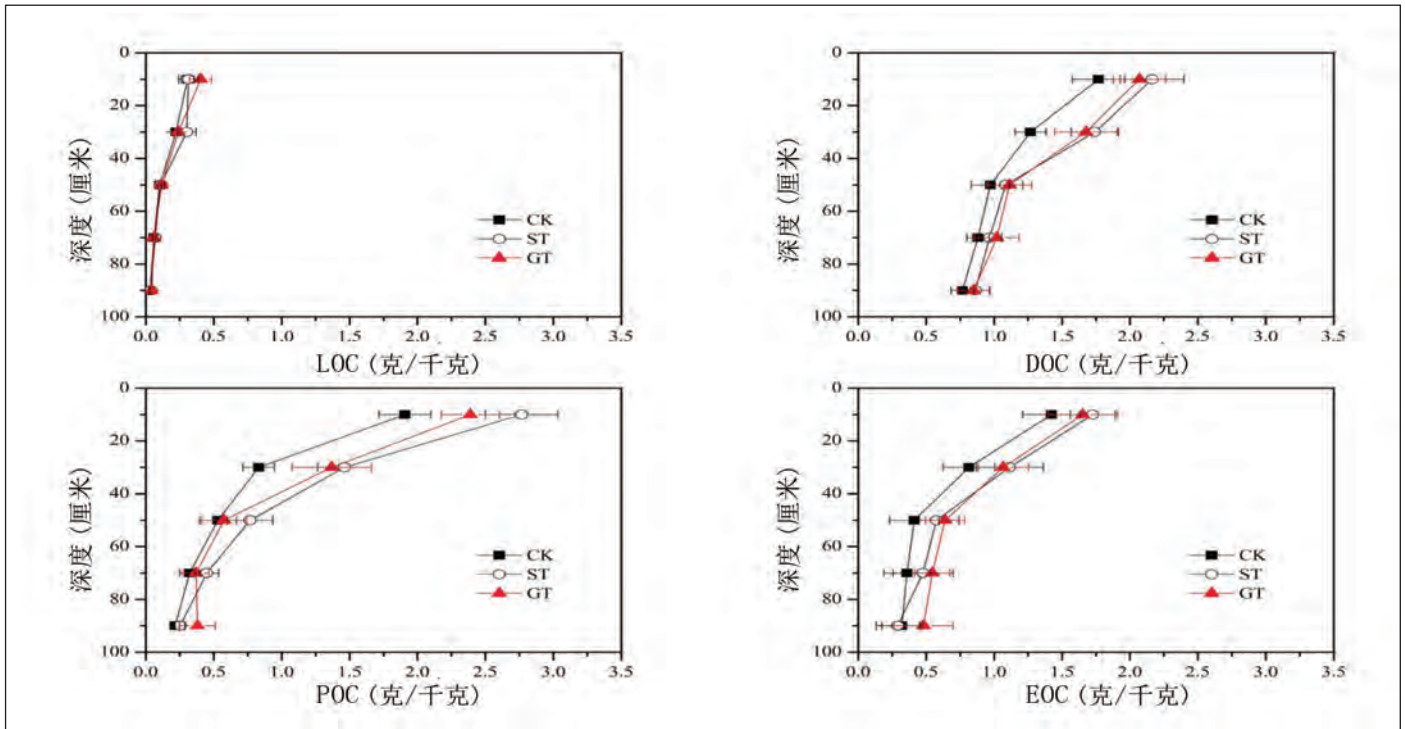


图 5 不同土层深度有机碳组分含量在处理间的差异

处理中的含量分别增加了 167% 和 122% (图 4)。

在 0-100 厘米土层中, 覆盖处理的 LOC 含量比对照增加了 0.102 克/千克和 0.136 克/千克。但单就 0-40 厘米土层而言, 增加量高达 70-80% (图 5), 这主要得益于覆盖后不仅降低地表径流, 而且覆盖携入的有机物料腐解后产生的大量 LOC 能显著增加 0-40 厘米土层 LOC 含量^[7]。

有机碳活性组分中 DOC 所占比重很小, 其含量比其他有机碳活性组分都要低很多, 一般而言 DOC 含量不高于 200 毫克/千克, 但是 DOC 却是有机碳组分中移动性最强的, 通过影响微生物群落及其活性, DOC 对养分活化和有机物质的转化起着关键性的作用。本试验中, 相较于对照, ST 和 GT 处理显著增加了 0-40 厘米土壤表层

中 DOC 含量 (28.56% 和 23.33%, 图 5), 但是覆盖处理之间不同土层中 DOC 含量差异不显著。DOC 在 ST 处理的增加可能是由于秸秆的可溶性有机物质分解产生的可溶性有机碳, 而在 GT 处理中的增加的 DOC 主要来源于生草根际和根分泌物产生的有机酸和水溶性碳水化合物。覆盖处理 DOC 含量增加的另一原因是覆盖处理减少了地表径流量, 从而降低了碳素流失。另外, 相比对照, 覆盖处理土壤容重降低, 碳素更容易向下淋溶, 并保留在较深的土壤层中 (图 5), 且较低的 pH 更能刺激腐殖酸絮凝的可溶性有机物的矿化, 释放出 DOC。然而是否覆盖对于 40-100 厘米土层中 DOC 的含量的差异不显著。

POC 是土壤活性有机碳组分中结合了土壤微粒的那部分有机碳, POC 能避免被迅速分解, 比其他有机碳组

表 2 土壤有机碳及其活性组分的储量

处理	土层深度 (厘米)	LOC (千克/平方米)	DOC (克/平方米)	POC		EOC		TOC
				(千克/平方米)		(千克/平方米)		
CK	0-40	0.15 ± 0.01 b	0.89 ± 0.04 b	0.80 ± 0.04 b	0.65 ± 0.05 b	3.19 ± 0.10 c		
	40-100	0.05 ± 0.00 a	0.76 ± 0.02 b	0.31 ± 0.02 b	0.31 ± 0.04 b	1.63 ± 0.10 a		
ST	0-100	0.21 ± 0.01 b	1.65 ± 0.03 b	1.11 ± 0.03 c	0.97 ± 0.05 b	4.82 ± 0.19 c		
	0-40	0.17 ± 0.02 a	1.10 ± 0.05 a	1.18 ± 0.06 a	0.79 ± 0.05 a	3.52 ± 0.12 b		
GT	0-100	0.23 ± 0.01 a	1.95 ± 0.04 a	1.60 ± 0.04 a	1.18 ± 0.05 a	5.24 ± 0.18 b		
	0-40	0.18 ± 0.01 a	1.08 ± 0.06 a	1.08 ± 0.07 a	0.78 ± 0.06 a	3.80 ± 0.16 a		
GT	40-100	0.06 ± 0.00 a	0.87 ± 0.04 a	0.38 ± 0.03 a	0.48 ± 0.04 a	1.85 ± 0.11 a		
	0-100	0.24 ± 0.01 a	1.95 ± 0.05 a	1.46 ± 0.05 b	1.26 ± 0.05 a	5.65 ± 0.16 a		

注: 同列内不同字母表示差异显著 (p < 0.05)。

分都更为稳定。一般认为,POC的主要成分来源于植物源微粒以及微生物残体,因此向土壤中投入大量有机物料能有效促进POC的形成。本试验中,由于覆盖处理中有大量的有机物料投入,尤其是生草覆盖处理中白三叶草根系凋落以及根际分泌物等有机物质为POC的形成提供了大量的物质基础,极大地增加了土壤中POC的含量,相对于CK处理,ST和GT处理POC含量分别增加了54.46%和37.18%。大量有机物料的投入,能促进土壤稳定性团粒结构的形成,而这又进一步促进了对POC的保护,避免其很快被分解。土壤POC含量随着土层深度的增加而降低,并且ST、GT与对照的差异主要存在于0-40厘米土层,而两个覆盖处理之间无显著差异。类似的研究结果已有报道,Wander^[7]研究发现在免耕秸秆覆盖的试验的表层土壤中POC的含量很高,且比低土层中的POC粒径较大。

土壤温度和土壤湿度的高低会影响土壤中POC含量,一般在较为寒冷、干燥的季节POC含量得到累积,而在气温和湿度较高的季节则会被腐解消耗。然而这一现象也并非绝对,如果新的POC形成速率高于其腐解消耗速率,即使是在气温较高的季节POC的净累积量也会增加。例如本试验中,由于在7-9月这段时间有大量有机物料分解,POC含量得到累积,使得ST和GT处理土壤中POC含量的峰值出现在这段时间(图4)。

EOC是有机碳活性组分中由不稳定的成分构成,最易于氧化的那部分碳素,包括容易分解的腐殖物质和多糖,EOC很容易受土壤温度和土壤湿度的影响发生转化,导致土壤中EOC含量发生变化。本试验中,EOC含量在6-9月高于其他时期(图4),这有赖于这一时期较高的土壤温度和土壤湿度(图1,图2)。这一时期较高的气温和湿度能促进有机物料的腐解,提高微生物活性,从而增加土壤中EOC含量^[6]。并且由于这一时期降雨量较大,土壤湿度高,容易在土体中形成局部的厌氧微环境,有利于EOC的累积。同样的,如图5所示,覆盖措施亦能显著提高土壤中EOC的含量(图4)。相比对照处理,覆盖处理除了提供有大量碳源外,土壤容重亦有降低(表1),土质较为疏松,降雨更容易下渗到土壤中,更有利于形成累积EOC的局部厌氧微环境。

本试验中相较于CK处理,ST和GT处理的有机碳储量均显著增加了10.34%和19.12%。因为相较于覆膜和石子覆盖,覆盖处理不仅降低了地表径流,携入大量有机物料进入土体,且覆草和种草降低了土壤表层容重,提高了水分入渗率。

2.4 土壤总有机碳及其组分储量

坡耕地的特点之一就是径流量大,碳素容易随径流失,土壤有机碳储量低,而地表覆盖措施则能显著提高坡地土壤有机碳储量。如表2所示,本试验中CK,ST和GT总有机碳的储量分别为4.82,5.24和5.65千克/平方米。覆盖处理总有机碳储量显著高于对照不覆盖处理,生草覆盖处理显著高于秸秆覆盖处理。在发达国家半干旱灌木生态系统以及发展中国家的相关研究中也有类似的报道。然而并非所有研究结果都显示覆盖措施能提高坡耕地土壤总有机碳储量。

不同土层深度而言,相较于对照,覆盖处理有机碳活性组分碳储量的增加主要表现在0-40厘米土层。相较于CK,ST和GT处理LOC,DOC,POC以及EOC四种有机碳活性组分的储量分别增加了0.02和0.03千克/平方米,0.21和0.19克/平方米,0.38和0.28千克/平方米,0.14和0.13千克/平方米。增加比例分别为13-20%,21-24%,35-48%,和20-22%。其中POC的增加量远大于其他有机碳活性组分,说明相较于其他有机碳活性组分POC更为稳定,这与Liang等^[9]人的研究结果一致。除了POC储量,LOC,DOC和EOC储量在覆盖处理之间无显著差异。

2.5 有机碳组分相关性分析

坡耕地土壤表层0-20厘米土层土壤性质和有机碳活性组分之间的相关性分析结果如表3所示。从表中可以看到TOC、DOC与土壤含水量以及土壤温度均呈现负相关,特别是与土壤温度间的负相关关系达到极显著,说明土壤温度对TOC、DOC的形成和分解起着很重要的作用。本试验中导致TOC和DOC在覆盖处理中增加的重要原因之一可能是相较于对照,覆盖处理在高温高湿的季节降低了土壤温度,而在低温干燥的季节起到了保温的作用(图1)。POC和EOC与土壤温度,土壤湿度均呈现正相关,但两者与土壤温度的相关性($r = 0.561$ 和 0.557)低于两者与土壤湿度的相关性($r = 0.594$ 和 0.636),这说明土壤含水量和土壤温度对POC和EOC的形成和分解均有影响,而土壤湿度的变化比土壤温度的变化更能影响POC和EOC在土壤中的含量。

很多已有的研究结果都表明LOC、DOC、POC和EOC与TOC之间有显著的正相关^[9],并且提出它们可以作为反映土壤质量和农业生产过程中碳素变化的指标。然而,本试验中只有LOC、DOC与TOC呈现显著的正

表3 表层0-20厘米土壤性质与土壤碳素之间的相关性

	ST	SW	TOC	LOC	DOC	POC	EOC
ST	1						
SW	0.890**	1					
TOC	-0.549**	-0.330	1				
LOC	-0.175	0.057	0.505*	1			
DOC	-0.443*	-0.209	0.568**	0.210	1		
POC	0.561**	0.594**	0.088	0.044	0.183	1	
EOC	0.557**	0.636**	0.032	0.010	0.231	0.601**	1

** 相关关系在 0.01 水平达到显著性 (2-tailed). * 相关关系在 0.05 水平达到显著性 (2-tailed).

相关, 这说明 LOC 和 DOC 比其他有机碳活性成分更敏感。Wan 等人的研究指出 LOC 和 DOC 是土壤微生物的主要能量来源, 对养分的循环以及土壤微生物群落数量有决定性的作用, 而土壤微生物群落数量又会对土壤生化过程有很大的影响。有研究者通过培养实验研究发现由于轻组有机质的高含碳率, LOC 是土壤呼吸的驱动因子^[10]。因此, LOC 和 DOC 对 TOC 影响较其他有机碳活性组分更显著。

根据有机碳在月份间的动态变化, 丹江口库区坡地采用秸秆覆盖时应在每年的 12 月至来年的 6 月初将秸秆覆于地表, 如果采取生草覆盖措施, 则应春季播种, 保证在 6 到 9 月份期间生草的长势旺盛。

参考文献

- [1] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展 [J]. 中国沙漠, 2002, 20(3), 220-228.
- [2] Lukman NM, Rattan L. Mulching effects on selected soil physical properties[J]. Soil & Tillage Research, 2008, 98, 106-111.
- [3] Mariangela D, Montemurro F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30(2), 401-422.
- [4] Unger PW, Jones OR. Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum[J]. Soil & Tillage Research, 1998, 45, 39-57.
- [5] 郑立臣, 解宏图, 何红波, 等. 秸秆还田对水溶性有机碳的影响 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 6(25), 330-332.
- [6] Gregorich EG, Monreal CM, Carter MR, et al. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils[J]. Canadian journal of soil science, 1994, 74 (4), 367-385.
- [7] Wander MM, Yang X. Influence of tillage on the dynamics of loose and occluded-particulate and humified organic matter fractions[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32, 1551-1560.
- [8] Conteh A, Blair GT, Lefroy RDB, et al. Labile organic carbon determined by permanganate oxidation and its relationships to other measurements of soil organic carbon[J]. Humic Substances Environmental Journal, 1999, 1, 3-15.
- [9] Liang Q, Chen HQ, Gong YS, et al. Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China Plain[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 92(1), 21-33.
- [10] Alvarez CR, Alvarez R, Grigera MS, et al. Associations between organic matter fractions and the active soil microbial biomass[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998, 30, 767-773.

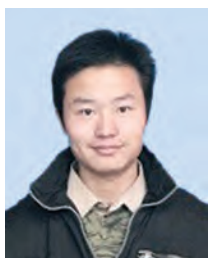
3 结论

丹江口库区小茯苓流域四年的田间定位试验结果表明, 采用生草覆盖和秸秆覆盖均能显著提高坡耕地土壤有机碳及其活性组分的含量。覆盖处理, 特别是生草覆盖是增加丹江口库区坡地土壤碳素固定的一种行之有效的措施。相对于不覆盖, 坡地柑橘园覆盖处理显著增加了 0-100 厘米土层 TOC、LOC、DOC、POC 和 EOC 储量, 其中, 生草覆盖处理有机碳及其活性组分的储量高于秸秆覆盖处理。

有机碳四种活性组分当中, DOC 和 LOC 的含量在寒冷干燥的月份较高, 而 POC 和 EOC 的含量在温暖湿润的季节较高。

2016 年 IPNI 研究生奖学金评选结果揭晓

为鼓励在植物营养和养分管理相关学科取得优异成绩的优秀研究生，2016 年国际植物营养研究所 (IPNI) 研究生奖学金获得者已揭晓。经过评审委员会严格按照标准对每一位申请者的学术业绩和其他各方面进行评价，结果有 36 位来自 14 个国家和地区的在读研究生获得 2016 年度 IPNI 研究生奖学金。中国有 5 位研究生获得了这项奖励，每位获奖者得到 2000 美元资助。



顾焯明，中国科学院武汉植物园生态学专业博士研究生，研究方向是植物营养与农业生态学，主要从事农业面源污染的发生机理及防控措施的研究。通过多年定点的田间试验来探寻坡地农田面源污染过程中土壤养分流失规律，并依此寻求有效的农业耕作措施以应对土壤养分流失导致的肥料利用率低下以及潜在环境风险。毕业后将继续从事植物营养与农业生态方面的研究，为可持续农业发展贡献自己的力量。



Khalid Mehmood，中国科学院南京土壤所博士研究生，研究题目：“使用低能耗生物炭改良酸性土壤并结合无机肥促进作物生长”，研究的重点是利用低能耗生物炭而不是直接利用农作物秸秆。将大量农业废弃物资源转化为有价值的生物炭，有利于节省财力和保护环境。博士毕业后 Khalid 将继续回到巴基斯坦从事教学和研究工作。他感谢在中国科学院学到了先进的知识和技能。



李婷，中国科学院南京土壤研究所植物营养学博士研究生（已毕业）。主要研究土壤有效钾的来源、构成及其生物有效性，其研究揭示了不同化学方法评价土壤有效钾的机制，并推荐了评估土壤有效钾的最适宜方法，同时采用室内化学化验分析和盆栽试验相结合的方法建立了土壤有效钾生物有效性分级体系。未来会在高校中继续从事土壤肥力相关的教育和科研工作，为我国肥料的合理分配及平衡施用贡献自己的力量。



张倩，中国农业科学院农业资源与农业区划研究所植物营养学硕博连读研究生。主要从事稻麦轮作体系土壤有机培肥效应及其微生物学机制研究。利用有机培肥长期定位试验，研究不同粒径土壤团聚体的碳氮和胞外酶活性分布特点，腐殖质结构特征及参与土壤氨氧化和纤维素分解的微生物多样性，从而阐明稻麦轮作体系土壤有机培肥的微生物学机制。未来希望从事植物营养相关领域的教育和科研工作，为我国农业的可持续发展和粮食安全贡献自己的力量。



梁国鹏，中国农业科学院农业资源与农业区划研究所土壤学硕士研究生（已毕业）。主要从事氮肥水平下农田土壤碳排放及其生物化学驱动机制的研究。以华北农田土壤为研究对象，通过测定施氮水平下土壤呼吸及土壤生化性质的季节性变化，为明确施氮影响土壤呼吸的机理及推荐合理的施氮量提供理论参考与依据。现正在美国俄克拉荷马大学攻读生态学博士学位，毕业后希望在校或研究院所继续从事科研工作，为农业的可持续发展贡献自己的力量。

IPNI 研究生奖学金自 2007 年设立了研究生奖学金，凡有 IPNI 项目的任何国家，在具有学位授予资格的单位从事土壤和植物营养学相关学科的在读研究生都有资格申请。截止到 2016 年已有 35 位来自中国研究生获得此项殊荣。请符合条件的研究生于每年 1 月 1 日至 4 月 30 日提交申请。详情请随时关注 [www.ipni.net / awards](http://www.ipni.net/awards)。