

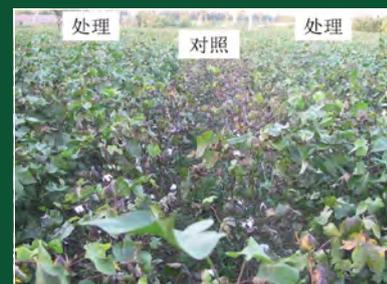
高效施肥

BETTER CROPS CHINA

2015年10月总第35期

本期文章……

利用植物生长调节剂提高棉花钾素吸收和利用效率



长期不同施肥对双季稻产量及土壤基础地力的影响



减氮量尿素、控释氮肥配施紫云英对早稻产量及氮素吸收利用的影响



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

2015年10月总第35期

主 编 何 萍
编 辑 陈 防 涂仕华 李书田
孙桂芳

国际项目总部

Saskatoon, Saskatchewan, Canada
A.M. Johnston, Vice President, IPNI Asia, Africa, and
Middle East Group

理事会

Mostafa Terrab, Chairman (OCP Group)
Oleg Petrov, Vice Chairman (Uralkali)
Tony Will, Finance Committee Chair (CF Industries)

行政办公室

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

美洲和大洋洲总部

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 • LUXI Fertilizer Industry Group • OCP S.A. •
PhosAgro • PotashCorp • QAFCO • Shell Sulphur
Solutions • Simplot • Sinofert Holdings Limited • SQM •
The Mosaic Company • Toros Tarim • Uralchem, JSC •
Uralkali.

CONTENTS

目录

中国土壤速效钾的时空变化 (1990 - 2012) 何 萍 杨俐苹 徐新朋 赵士诚 陈 防 李书田 涂仕华 金继运 Adrian M. Johnston	3
西南地区玉米 4R 养分管理 涂仕华 何 萍	11
钾肥用量和施用时期对苹果产量品质和果园钾素平衡的影响 李书田 崔荣宗 同延安 汪 仁	15
利用植物生长调节剂提高棉花钾素吸收和利用效率 杨富强 田晓莉 何 萍	22
华北地区长期施钾和秸秆还田对土壤钾素和作物产量的影响 赵士诚 贾良良 何 萍	25
长期不同施肥对双季稻产量及土壤基础地力的影响 廖育林 鲁艳红 聂 军 周 兴 谢 坚 杨曾平 吴浩杰	29
长期施钾对春玉米土壤钾素状况的影响 侯云鹏 谢佳贵 仇少君 何 萍 金继运	36
水稻移栽不同基本苗数的施肥效果试验 屈佳君 马自波 李 荣 罗和清 丁平刚	40
减氮量尿素、控释氮肥配施紫云英对早稻产量及 氮素吸收利用的影响 鲁艳红 廖育林 聂 军 谢 坚 周 兴 杨曾平 吴浩杰	45
磷在农业中的有效利用 Johnny Johnston, Paul Fixen 和 Paul Poulton 著 谢 玲 译 涂仕华 校	51
新老玉米杂交种氮素利用率比较 Johnny Johnston, Paul Fixen 和 Paul Poulton 著 谢 玲 译 涂仕华 校	54
玉米最佳施氮肥量更多取决于气候而不是玉米价格 Bill Deen, Ken Janovicek, John Lauzon, Tom Bruulsema 著 谢 玲 译 涂仕华 校	57
2015 年 IPNI 研究生奖学金评选结果揭晓	60

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。

中国土壤速效钾的时空变化 (1990–2012)

何萍^{1,2,3,*} 杨俐苹^{2,*} 徐新朋² 赵士诚² 陈防⁴ 李书田^{1,2,3} 涂仕华⁵ 金继运²

Adrian M. Johnston^{3,6}

(1. 国际植物营养研究所北京办事处, 北京 100081; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 中国农业科学院与国际植物营养研究所植物营养创新研究联合实验室, 北京 100081; 4. 国际植物营养研究所武汉代表处, 武汉 430074; 5. 国际植物营养研究所成都代表处, 成都 610066; 6. International Plant Nutrition Institute (IPNI), 102–411 Downey Road, Saskatoon, SK, S7N 4L8, Canada)

摘要: 钾肥是不可再生资源, 并且不能通过其他化学物质合成。因此, 了解中国土壤钾素的时空变化状态, 对于土壤钾素资源的有效利用、粮食安全和资源的可持续性至关重要。我们分析了全国 58,559 个土壤样本中速效钾的时空变化, 并用国际植物营养研究所 (IPNI) 中国项目数据库 (1990–2012 年) 中的 2,055 个田间试验进行验证。结果表明, 土壤速效钾含量由 1990s 的 79.8 毫克/升增加到 2000s 的 93.4 毫克/升, 经济作物土壤增速高于粮食作物土壤。土壤速效钾的增加主要是由于经济作物的施钾量较高 (粮食作物的 1.4–2.6 倍), 在土壤中形成一定的盈余。另外, 我国土壤速效钾含量具有较大的时空变异性。东北、华北、西北、东南和西南地区土壤速效钾平均含量分别为 76.8、99.8、118.0、83.9、81.3 毫克/升。过去 20 年东北地区的土壤速效钾含量未出现显著变化, 但华北、东南和西南地区分别增加了 34.8%、17.9% 和 30.2%, 而西北地区则下降了 75.9%。相对产量也存在着很大的时空变化, 并与土壤速效钾变化规律一致。由于粮食作物土壤速效钾含量一般低于土壤临界值, 而经济作物施钾增产效应高于粮食作物, 因此不管是粮食作物还是经济作物均需推荐合理施用钾肥。然而, 由于我国土壤速效钾含量空间变异较大, 所以迫切需要根据不同土壤和试验地点的具体情况有针对性地施用钾肥。

关键词: 土壤速效钾; 产量反应; 钾素管理

1 前言

钾 (K) 是高等植物必需的三大营养元素之一, 参与植物许多重要的生理过程, 有改善农作物品质和提高抗逆性等功能^[1–3]。而且对于钾素贫瘠的土壤来说, 施钾肥是为其提供钾素最有效的方法。但钾是不可再生资源, 并且不能通过其他化学物质合成。所以合理的钾素养分管理对于有效利用钾素资源尤为重要。

了解土壤钾素状态对于合理实施养分管理措施很重要。据报道, 钾素亏缺是一个世界性问题^[4], 目前全球耕地土壤钾素含量不断降低^[5–8]。上世纪 70 年代中国南部首次报道土壤缺钾问题^[9–10]。80 年代我国农业部、加拿大磷钾肥研究所 (PPIC) 和国际钾肥研究所 (IPI) 等开始在我国开展施钾效应的田间试验研究。结果显示, 我国南方地区和北方的部分地区表现土壤缺钾。随后国内学者也陆续开展了作物施钾效应的田间试验^[11]。2005 年, 我国农业部启动了测土配方施肥计划, 推动了作物合理施肥。最近研究表明我国农业生产中氮肥和磷肥普遍施用过^[12–14], 而钾肥施用不足, 缺钾现象有进一步加剧的

趋势^[15–16]。随着农业机械化的发展和我国作物秸秆还田及施用有机肥政策的实施, 更多的作物残茬将被归还到土壤中, 从而减缓了土壤缺钾的速率^[17]。然而, 关于土壤速效钾含量变化有些相悖的一些报道已经引起了科学家和化肥行业的关注。有研究指出, 1980–2000 年华东地区^[18]和 1980–1999 年华北地区^[19]的土壤钾含量显著降低。而其他的报告表明, 除了我国西北 1986–2006 年土壤速效钾含量出现了下降趋势, 其他地区均显示稳定或增加趋势^[20–21]。这些相互矛盾的结果可能是由于土壤采样点、样品数量、取样时间和分析方法等不同而引起的。到目前为止, 钾肥还没受到像氮肥和磷肥那样的关注^[22–26], 而且我国上世纪 80 年代初进行的全国土壤普查结果已不能真实地反映目前的土壤钾素状态。由于土壤钾素平衡不仅受到氮肥和磷肥过量施用的影响, 同时也受作物新品种和高产基因型的影响, 所以迫切需要关注我国土壤钾素状况和土壤钾素平衡, 该研究可为农业可持续发展中钾素合理养分管理提供科学指导。

自 1990 年国际植物营养研究所 (IPNI) 中国项目部

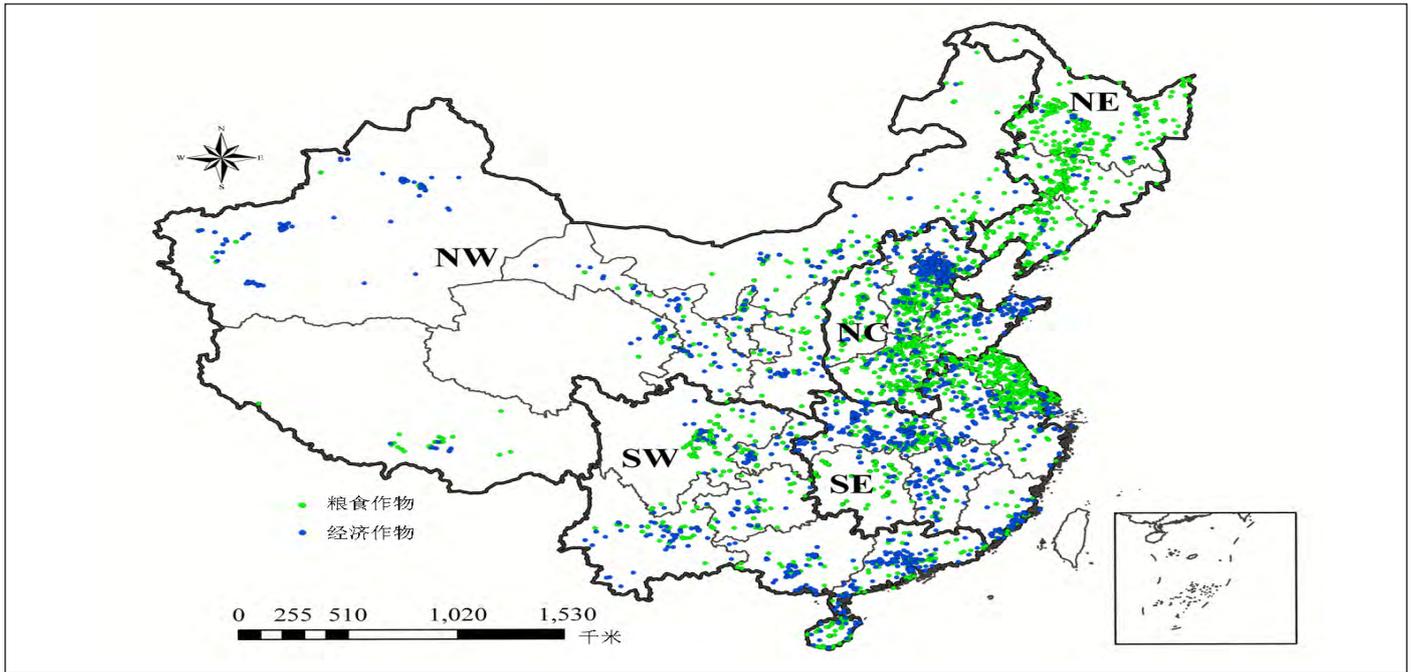


图1 1990–2012年试验点在五个区的分布 (NE、NC、NW、SE和SW分别代表东北、华北、西北、东南和西南)

就已在国家范围内展开钾肥管理研究，并且积累了大量的土壤测试数据（图1）和相关的作物产量数据。本研究的目的是评价1990–2012年中国土壤速效钾的时空变化和作物的施钾效应。

2 材料和方法

2.1 数据来源

土壤速效钾和作物产量数据来自1990–2012年国际植物营养研究所中国项目数据库，共计58,559个土壤速效钾测试数据（图1）和2,055个田间试验产量记录。所有土壤速效钾的数据都来源于田间试验，播前采集0–20厘米的土层，用Portch和Hunter^[27]推荐的Superfloc 127溶液提取土壤样品后，采用火焰光度计测定土壤速效

钾含量。试验均在田间进行，作物产量效应数据由第一季作物收获后通过测定氮磷钾肥小区（NPK，氮磷钾施肥量根据土壤测试推荐）和只施氮磷肥小区获得（NP，在NPK处理基础上不施钾）。

为分析我国土壤速效钾的空间变化，基于地理位置和行政区划将全国分为五个区：包括东北（NE）、华北（NC）、西北（NW）、东南（SE）和西南（SW）（表1）。

另外，基于土地利用方式，对每个区进一步划分为两个类型区，分别为粮食作物和经济作物类型区。依据中国农业年鉴，粮食作物类型区主要包含小麦、玉米、水稻、马铃薯和大豆，经济作物主要包含蔬菜、果树、油菜籽、向日葵、棉花和糖类作物，其具有较高的施肥量和经济附加值。

表1 我国不同地区和不同时期的试验观测数

项目	地区	全部作物		粮食作物		经济作物	
		1990s	2000s	1990s	2000s	1990s	2000s
		土壤测试	435	6887	417	6,887	18
土壤测试	华北	2,446	17,896	2,233	17,896	213	4,394
	西北	295	6,752	74	6,752	221	2,136
	东南	549	16,099	373	16,099	176	4,992
	西南	701	6,499	616	6,499	85	2,378
	相对产量	86	427	63	399	23	28
相对产量	华北	90	754	56	700	34	54
	西北	51	263	31	136	20	127
	东南	42	152	13	77	29	75
	西南	59	131	19	67	40	64

表 2 中国五个区试验点情况总结

地区	省份	主栽作物	主要土壤类型	降水量	纬度	经度	样本数	pH	有机质
				(毫米)	(北纬:度)	(东经:度)			(%)
东北 地区	吉林、辽宁、 黑龙江	玉米、水稻、黄豆、 番茄、白菜、黄瓜、 胡麻	黑土、褐土、 草甸土	400-1,000	37.74-53.53	118.86-135.07	7,322	3.66-9.54	0.10-9.97
华北 地区	北京、天津、 河北、河南、 山东、山西	小麦、玉米、棉花、 白菜、黄瓜、花生、 南瓜、茄子、番茄、 花椰菜	褐土、潮土、 棕土、盐碱土	350-900	31.41-42.67	111.25-122.63	20,342	3.44-9.98	0.05-6.12
西北 地区	陕西、宁夏、 甘肃、新疆、 内蒙古、青海、 西藏	玉米、小麦、马铃薯、 棉花、白菜、菠菜、 洋葱、胡萝卜、黄瓜、 辣椒、番茄、油菜籽	黄土、灌淤土、 栗钙土、灰钙 土、潮土、荒 漠土	100-600	27.23-53.35	73.45-126.04	7,047	5.01-9.91	0.01-6.80
东南 地区	湖北、湖南、 江苏、安徽、 上海、江西、 浙江、福建	小麦、玉米、水稻、 棉花、白菜、大豆、 甘蔗、柑橘、香蕉、 油菜籽、芝麻	黄棕壤、潮土、 红壤、水稻土	700-1,600	23.58-28.28	108.38-122.20	16,648	3.55-8.82	0.05-6.80
西南 地区	重庆、贵州、 云南、四川、 广西、广东、 海南	玉米、小麦、水稻、 油菜、番茄、甘蔗、 油菜籽、香蕉、木薯、 辣椒、菠萝、茶	黄棕壤、红壤、 紫土、水稻土	600-2,000	18.17-34.30	97.39-117.06	7,200	3.39-8.53	0.10-7.96

试验点地理分布数据如图 1 所示，不同区域的土壤采样数列于表 1，五个区的试验点信息列于表 2。

2.2 数据处理

$$\text{相对产量} = \left(\frac{\text{氮磷处理产量}}{\text{氮磷钾处理产量}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{钾的偏因子养分平衡 (PKB)} = \frac{\text{作物地上部钾移走量}}{\text{施钾量}} \quad (2)$$

用 SPSS 13.0 对数据进行方差分析，并由 SigmaPlot 12.0 作出相应的箱型图。用最小显著差数法 (LSD) 计算 0.05 水平下不同时期的平均值差。

3 结果

3.1 1990-2012 年农田速效钾变化情况

数据显示，1990-2012 年土壤速效钾含量均呈增长趋势，而且根据线性模型得，其增长率为 1.307 (图 2)。

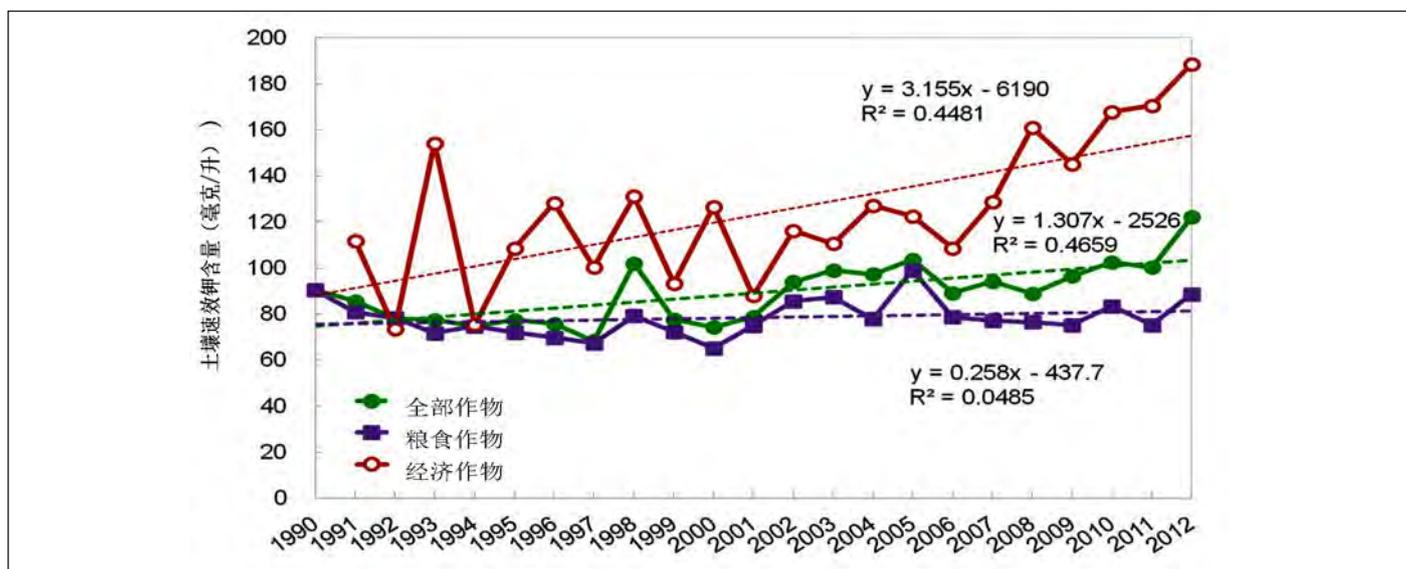


图 2 土壤速效钾含量随时间变化趋势

为了进一步分析影响速效钾增长趋势的主要因素，我们根据种植作物将土样分为两种：粮食作物和经济作物。结果显示，1990–2012年粮食作物和经济作物的土壤速效钾含量随时间均呈增加趋势。基于线性模型，粮食作物土壤速效钾含量增长率仅为0.258（图2），然而，经济作物同期大幅增加，其增长率为3.155（图2）。粮食作物的 K_2O 施用量平均为7.3公斤/亩（变化范围为1.0–124.5公斤/亩），而经济作物的 K_2O 施用量平均为17.0公斤/亩（变化范围为1.0–124.5公斤/亩）（图6）。进一步分析发现，经济作物较高的钾含量是由于大量的钾肥投入引起的，这也直接导致了1990–2012年土壤速效钾含量出现增加趋势。

3.2 土壤速效钾的时空变化

上世纪80年代开始中国引进了平衡施肥（Balance fertilization）概念，90年代钾肥合理施用受到广泛关

注。然而，不同地区土壤钾含量存在很大差异，东北、华北、西北、东南和西南地区的测试平均值为76.8、99.8、118.0、83.9、81.3毫克/升。为了评价1990–2012年中国不同地区土壤速效钾的变化，我们比较了1990年代（1990–1999年）和2000年代（2000–2012年）两个时期的土壤速效钾含量。数据显示土壤速效钾均值从1990年代的79.8毫克/升增加到2000s的93.4毫克/升，东北地区两个时期的土壤速效钾含量没有变化，华北、东南、西南地区的土壤速效钾分别增加了34.8%（76.4–103.0毫克/升）、17.9%（71.5–84.3毫克/升）和30.2%（68.8–82.7毫克/升）。而西北地区的土壤钾含量却下降了75.9%（153.5–116.5毫克/升）（图3A）。

进一步分析表明，粮食作物土壤速效钾的变化趋势同全部作物土壤速效钾变化趋势相似，但不同区间存在很大差异（图3B）。1990年代土壤速效钾在华北、东南和西南地区分别为72.2、65.1和66.4毫克/升，2000s分别

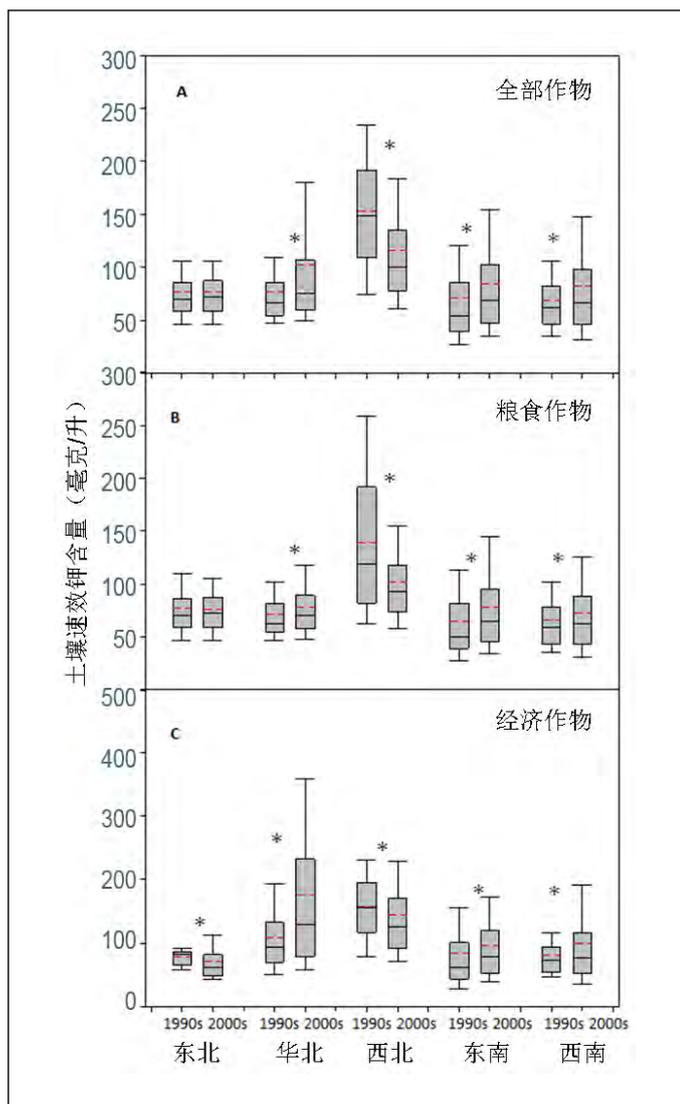


图3 土壤速效钾含量的时空变化

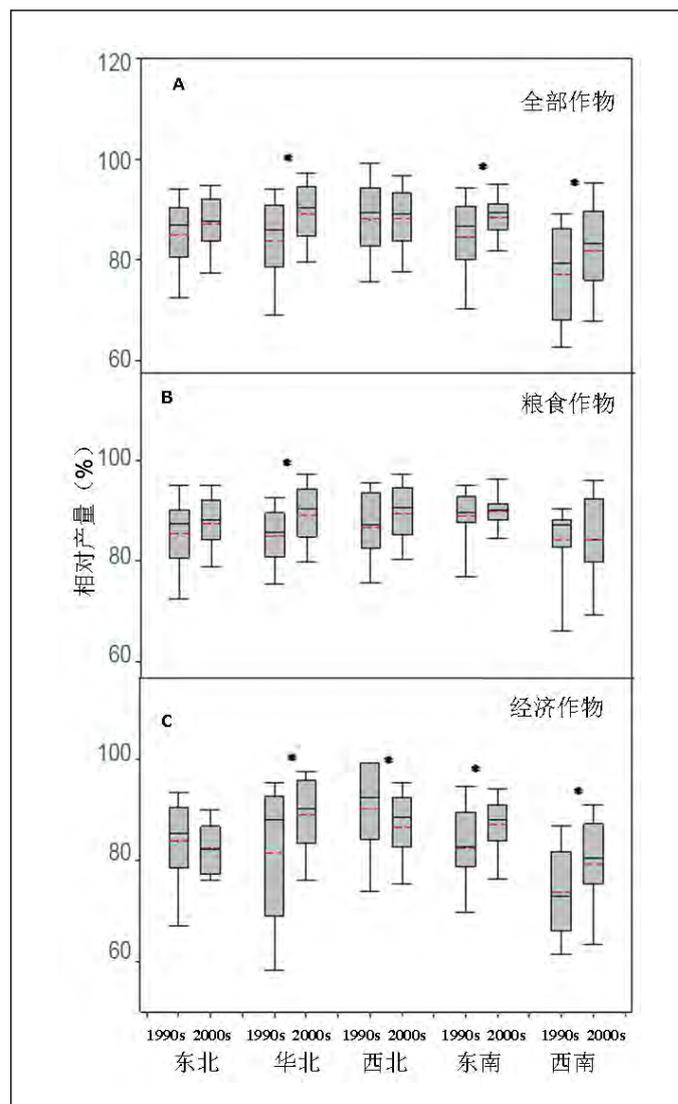


图4 相对产量的时空变化

增加了8.7%、21.0%和8.7%。相反，西北地区土壤速效钾含量下降了73.5%（图3B）。

2000年代华北、东南和西南地区经济作物的土壤速效钾含量与1990年代相比，分别增加了59.7%、12.4%和22.2%，但东北和西北地区却下降了92.5%和91.7%。结果显示，华北、西南地区土壤速效钾含量增加主要归因于经济作物钾肥的大量投入，而东南地区则主要是因为粮食作物土壤速效钾含量升高。西北地区土壤速效钾降低主要是由于粮食作物土壤速效钾含量大幅降低（图3C）。

3.3 不同地区作物的施钾效应

相对产量，由氮磷处理小区产量除以氮磷钾处理小区产量计算得到，用来评价作物的施钾效应。相对产量越大，土壤基础钾养分供应量越高。东北、华北、西北和东南地区作物的相对产量相差不大，分别为86.8%、88.6%、88.1%和87.6%，西南地区相对产量为80.4%，

相比其他地区较低，说明西南地区的土壤基础钾养分供应量较低。从时间上进一步分析，相对产量由1990年代的83.7%（77.2–88.1%）增加到2000年代的87.9%（81.9–89.2%），然而地区之间存在一定差异：东北、西北地区的相对产量在两个时期无显著差异，但华北、东南和西南地区的相对产量从1990s到2000s分别增加了6.6%、4.9%和6.1%（图4A），表明这三个地区的土壤基础钾养分供应量有所增加。

不同地区粮食作物的相对产量（东北、华北、西北、东南和西南地区分别为87.1%、88.9%、89.0%、89.7%和84.3%）与全部作物无显著差异。除华北地区外（图4B），各地区两个时期的相对产量无显著差异，表明这些地区的土壤基础钾养分供应量在22年中并没有增加或只是略有增加。1990年代到2000年代华北地区粮食作物的相对产量增加了4.9%，可能与该地区秸秆还田量增加有关。

经济作物的相对产量存在很大差异，东北、华北、东

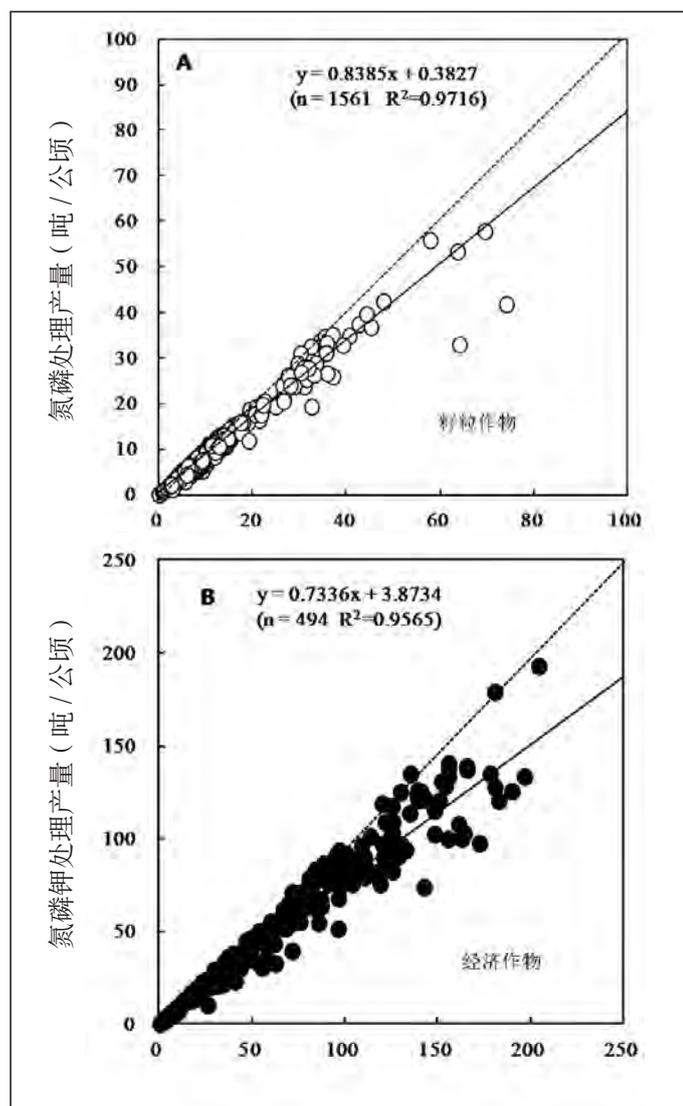


图5 粮食作物与经济作物氮磷处理产量与氮磷钾处理产量相关性比较。(A)粮食作物；(B)经济作物。虚线为1:1界限

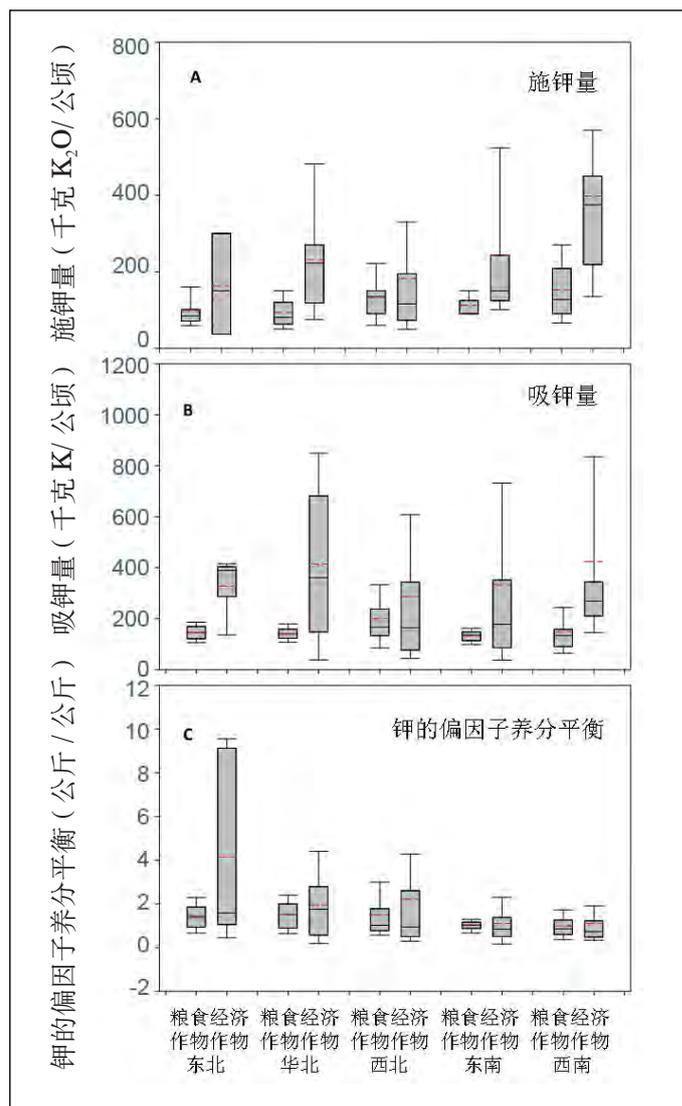


图6 不同地区粮食作物和经济作物的施钾量(A)、吸钾量(B)和钾的偏因子养分平衡(C)

南和西南地区的相对产量分别为 83.1%、86.1%、87.1%、85.8% 和 77.2%。经过多年,东北、西北地区的相对产量分别增加了 1.8% 和 4.0%,但是华北、东南和西南地区却分别增加了 9.1%、5.6% 和 7.6% (图 4C)。相对产量的变化与土壤测试结果相吻合(图 3)。

4 讨论

数据显示,1990–2012 年粮食作物土壤速效钾含量略微增加,但是经济作物土壤速效钾含量却显著增加。这与经济作物施钾量较高有关。东北、华北、西北、东南和西南地区经济作物的 K_2O 施用量平均为 10.9、15.4、13.7、16.0 和 26.1 公斤/亩,这分别是粮食作物 K_2O 施用量的 1.7、2.1、1.7、2.1 和 2.8 倍(图 6)。施钾量越高,经济作物的土壤速效钾含量越高。这些数据显示,全国土壤钾平均含量有所增加主要是由于经济作物土壤钾含量的增加。然而,分析 2000 年代粮食作物的土壤钾含量,东北、华北、西北、东南和西南地区分别为 76.5、78.5、102.1、78.8 和 72.2 毫克/升,除西北地区外都低于 80 毫克/升(缺钾临界值)^[28]。在华北、东南和西南地区,尽管 2000 年代的粮食作物土壤速效钾含量与 1990 年代相比有所增加,但两个时期的相对产量却无差异。进一步分析,虽然我国实行农业机械化以来,大量作物还田到土壤,但随着产量不断提高,大量钾素被作物移走,土壤速效钾含量仍呈持续降低趋势。而且粮食作物的土壤钾含量低于临界最低值,土壤基础钾养分供应量也并无增加,因此,种植粮食作物的土壤仍要增加施钾量。我们可以通过相对产量和大量的田间定位试验数据来支持这些结果^[29–33]。尽管农业机械化有所发展、秸秆还田量增加,但是数据显示,仅靠秸秆还田不能保持土壤钾平衡^[30,34],施钾肥对于保持高产和土壤钾平衡都是必不可少的^[35–36]。

尽管经济作物的土壤钾含量高于粮食作物,但其相对产量(东北、华北、西北、东南和西南分别为 83.1%、86.1%、87.1%、85.8% 和 77.2%)在一定程度上却低于粮食作物(东北、华北、西北、东南和西南分别为 87.1%、88.9%、89.0%、89.7% 和 84.3%)。这与经济作物(0.7336)氮磷处理产量与氮磷钾处理产量之间的斜率低于粮食作物(0.8335)相吻合(图 5)。进一步分析,粮食作物土壤基础钾养分供应量对产量的贡献高于经济作物,即经济作物对钾肥有较大的增产效应,所以经济作物要获得最佳产量,就需要适量增施钾肥。钾的偏因子养分平衡系数(PKB)(由作物地上部钾移走量除以施钾量计算得),经济作物和

粮食作物钾均超过了 1.0(图 6),表明作物吸收的钾多于通过化肥施入的钾,这已被很多研究证实^[17,33,37–38]。经济作物钾的偏因子养分平衡为 2.1(变化范围为 1.1–4.2),高于粮食作物的 1.3(变化范围为 1.0–1.5)(图 6),表明经济作物带走的养分高于粮食作物。此外,南方地区土壤含钾量低可能是与钾素淋洗、风化还有降雨量大有关^[32]。有限的报道显示,虽然蔬菜地土壤钾素含量为 100–142 毫克/升,也仅达中等水平^[39–40]。而 2000 年代东北、东南和西南地区经济作物的土壤测试钾含量分别为 72.3、95.8 和 98.9 毫克/升,低于经济作物的土壤钾素临界值。

本研究中不同地区的土壤速效钾含量有很大的空间变化,这就强调施肥量及管理措施都要因地制宜。西北地区的土壤速效钾含量在五个区中最高,其次是华北、东南、西南和东北。西北地区的土壤钾含量之所以高,是因为其土壤母质中含有钾矿石,例如云母和长石,所以土壤钾养分供应能力也高^[17,41–42]。然而,经过 22 年的种植历史,西北地区土壤钾含量却有所降低。西北地区全部作物、粮食作物、经济作物中土壤钾含量在 1990 年代分别为 153.5、139.0 和 158.3 毫克/升,在 2000 年代则分别为 116.5、102.1 和 145.5 毫克/升。西北地区经济作物的相对产量呈下降趋势,这也说明土壤钾养分供应能力降低(图 3C)。因此及时有效地施钾对于西北地区长期保持土壤钾素平衡非常必要。此外,我国北方也要重视钾肥施用,尤其是东北和西北地区,因为这些地区作物带走的养分过大,而且还田率较低^[43]。尽管我国南部农业机械化有所发展,秸秆还田量增加,但是由于降雨造成了钾淋洗和风化,这也影响了土壤钾素平衡。因此,钾肥管理需要考虑土壤钾素平衡,以增加土壤钾库积累量,从而保证高产和钾肥的高效利用。

5. 结论

总体而言,1990–2012 年中国的耕地土壤速效钾含量呈增加趋势,这主要是因为经济作物施钾量较大造成。相对产量结果对土壤测试数据变化给予了支持,经济作物施钾效应大于粮食作物。因此,不仅粮食作物在较低土壤钾水平下需要施钾,而且经济作物由于施钾增产效应显著,也需要合理施钾。需要针对特定区域和特定地块的施肥策略才能应对这一挑战。本文的结论有利于对未来的研究方向提供指导,如在农业机械化条件下对经济作物土壤钾临界值、钾养分循环和 4R 养分管理策略等的研究。

参考文献

- [1] Marschner, H. Mineral Plant Nutrition of Higher Plants [M], second ed. Academic Press, 1995, London.
- [2] Liu, J.P., Zhu, J.K. An Arabidopsis mutant that requires increased calcium for potassium nutrition and salt tolerance [J]. Proc. Natl. Acad. Sci., 1997, U.S. A. 94:14960–14964.
- [3] Pettigrew, W.T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. Physiol. Plant, 2008, 133:670–681.
- [4] Dobermann, A., Cassman, K.G., Mamaril, C.P., et al. Management of phosphorus, potassium, and sulfur in intensive, irrigated lowland rice [J]. Field Crop Res., 1998, 56:113–138.
- [5] Fagerberg, B., Salomon, E., Jösso, S. Comparisons between conventional and ecological farming systems at Öebyn [J]. Swed. J. Agric. Res., 1996, 26:169–180.
- [6] Wortmann, C.S., Kaizzi, C.K. Nutrient balances and expected effects of alternative practices in farming systems of Uganda [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 1998, 71:115–129.
- [7] Wijnhoud, J.D., Konboon, Y., Lefroy, R.D.B. Nutrient budgets: sustainability assessment of rainfed lowland rice-based systems in northeast Thailand [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2003, 100:119–127.
- [8] Malo, D.D., Schumacher, T.E., Doolittle, J.J. Long-term cultivation impacts on selected soil properties in the northern Great Plains [J]. Soil Till. Res., 2005, 81:277–291.
- [9] Liang, D.Y., Xu, M.D., Wang, X.Q. Potassium role in yield increase in China [J]. In: Proceeding of International Symposium on Balanced Fertilization. Chinese Agriculture Press, 1989, Beijing.
- [10] Lin, B., 1989. Application of chemical fertilizers in China [M]. Beijing Science and Technology Press, Beijing.
- [11] Xie, J.C., Zhou, J.M. Advance in soil K research and K fertilizer application in China [M]. Soils, 1999, 31:244–254.
- [12] Xu, X., He, P., Qiu, S., et al. Estimating a new approach of fertilizer recommendation across small-holder farms in China [J]. Field Crops Res., 2014a, 163:10–17.
- [13] Xu, X.P., He, P., Pampolino, M.F., et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency [J]. Field Crops Res., 2014b, 157:27–34.
- [14] Zhao, S.C., He Ping, Qiu, S.J., et al. Responses of soil properties, microbial community and crop yields to various rates of nitrogen fertilization in a wheat–maize cropping system in north-central China [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2014, 169:116–122.
- [15] 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.
- [16] Wang, H.J., Huang, B., Shi, X.Z., et al. Major nutrient balances in small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas in China [J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2008, 81:203–218.
- [17] Tan, D.S., Jin, J.Y., Jiang, L.H., et al. Potassium assessment of grain producing soils in north China [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2012, 148:65–71.
- [18] Yu, H., Huang, J.K., Rozelle, S., et al. Soil fertility changes of cultivated land in Eastern China [J]. Geogr. Res., 2003, 22:380–389 (Chinese with English abstract).
- [19] Kong, X.B., Zhang, F.R., Wei, Q., et al. Influence of land use change on soil nutrients in an intensive agricultural region of North China [J]. Soil Till. Res., 2006, 88:85–94.
- [20] Ren, Y., Zhang, S.X., Mu, L., et al. Change and difference of soil nutrients for various regions in China [J]. China Soils Fertil., 2009, 6:13–18 (Chinese with English abstract).
- [21] Zhang, J.T., Lu, C.A., Wang, J.Z., et al. The change of farmland soil fertility in fluvo aquic soil district of China [J]. China Soils Fertil., 2010, 5:6–11 (Chinese with English abstract).
- [22] Guttierrez, R.A. Systems biology for enhanced plant nitrogen nutrition [J]. Science, 2012, 336:1673–1675.
- [23] MacDonald, G.K., Bennett, E.M., Potter, P.A., et al. Agronomic phosphorus imbalance across the world's cropland [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 2011, 108:3086–3091.
- [24] Pinder, R.W., Davidson, E.A., Goodale, C.L., et al. Climate change impacts of US reactive nitrogen [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 2012, 109:7671–7675.
- [25] Liu, J.G., You, L.Z., Amini, M., et al. A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland [J]. Proc. Natl. Acad. U.S.A., 2010, 107:8035–8040.
- [26] Zhang, W.F., Dou, Z.X., He, P., et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous

- fertilizer in China [J]. PNAS, 2013, 110:8375–8380.
- [27] Portch, S., Hunter, A. A systematic approach to soil fertility evaluation and improvement [M]. In: Special Publ. No. 5. PPIC China Program, 2002, Hong Kong.
- [28] Jin, J.Y., Bai, Y.L., Yang, L.P. High efficient Soil Testing Techniques and Instrument [M]. China Agricultural Press, 2006, Beijing, 152.
- [29] Yu, W.T., Jiang, Z.S., Zhou, H., et al. Effect of nutrient cycling on grain yield and potassium balance [J]. Nutr. Cycl. Agro-ecosyst., 2009, 84:203–213.
- [30] Tan, D.S., Jin, J.Y., Huang, S.W., et al. Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems [J]. Sci. Agric. Sin., 2007, 6:200–207.
- [31] Tan, D.S., Jin, J.Y., Huang, S.W., et al. Effect of long-term application K fertilizer and wheat straw to soil on potassium fixation capacity of selected soils from Northern China [J]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43:2072–2079.
- [32] Xie, J.C., Zhou, J.M. History and prospects of potash application in China [M]. In: IPI 60 Anniversary Issue. E-ific., 2012, 32:19–27.
- [33] Niu, J.F., Zhang, W.F., Chen, X.P., et al. Potassium fertilization on maize under different production practices in the North China Plain [J]. Agron. J., 2011, 103:822–829.
- [34] Wang, H.T., Jin, J.Y., Wang, B., et al. Effect of long-term potassium application and wheat straw return to cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi [J]. Plant Nutr. Fertil. Sci., 2010, 16:801–808 (Chinese with English abstract).
- [35] Xing, S.L., Liu, M.C., Han, B.W. Effect of 12-year continuous application of straw and K fertilizer on soil potassium concentration and distribution in Fluvo-aquic soil [J]. Chin. J. Soil Sci., 2007, 38:486–490 (Chinese with English abstract).
- [36] Xing, S.L., Liu, M.C., He, P. Evaluating stability of durative yield increasing effect of potassium fertilization and straw recycling on crop yield by yield increase stability coefficient [J]. Agric. Res. Arid Areas, 2010, 28:47–51 (Chinese with English abstract).
- [37] Liao, Y.L., Zheng, S.X., Huang, J.Y., et al. Effect of K application on potassium efficiency and soil K status in K deficient paddy soil [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2008, 24:255–260, Chinese with English abstract.
- [38] Zhang, H.M., Yang, X.Y., He, X.H., et al. Effect of long-term potassium fertilization on crop yield and potassium efficiency and balance under wheat–maize rotation in China [J]. Pedosphere, 2011, 21:154–163.
- [39] Huang, S.W., Jin, J.Y., Wang, Z.L., et al. Native potassium forms and plant availability in selected soils from northern China [J]. Plant Nutr. Fertil. Sci., 1998, 4:156–164, Chinese with English abstract.
- [40] Yang, L.P., Jin, J.Y., Liang, M.Z., et al. Correlation study between ASI based soil testing of available P, K, Zn Cu and Mn and those with standard method in China [J]. Chin. J. Soil Sci., 2000, 31:277–279 (Chinese with English abstract).
- [41] Huang, S.W., Jin, J.Y., Cheng, M.F., et al. The supplying capability of potassium during the period of crops growing on main soils of northern China [J]. China Soils Fertil., 1999, 3:3–7 (Chinese with English abstract).
- [42] Huang, S.W., Jin, J.Y., Wang, Z.L., et al. Native potassium forms and plant availability in selected soils from northern China [J]. Plant Nutr. Fertil. Sci., 1998, 4:156–164, Chinese with English abstract.
- [43] Li, S.T., Jin, J.Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China [J]. Sci. Agric. Sin., 2011, 44:4207–4229 (Chinese with English abstract).

西南地区玉米 4R 养分管理

涂仕华¹ 何萍²

(1. 国际植物营养研究所成都代表处, 四川省农业科学院土壤肥料研究所, 成都 610066; 2. 国际植物营养研究所北京办事处, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 中国西南玉米种植区的地貌、气候、土壤类型等自然条件差异较大, 以雨养为主。玉米主要种植在坡耕地上, 其生长季节与雨季同季, 水土和养分流失较为严重。因此, 该区的 4R 玉米养分管理应以玉米最佳经济效益和最大生态环境效益为目标, 结合具体的自然生态条件与农耕农艺措施来实施。

关键词: 玉米; 4R 养分管理; 西南地区

玉米是西南地区的主要粮食作物之一, 主要分布在云南、四川、贵州和重庆, 在西藏的种植面积很小。四川和重庆的玉米播种面积仅次于水稻, 而在云南和贵州玉米的播种面积则大于水稻^[1]。2012年, 西南地区的玉米播种面积为 408 万公顷, 平均单产为 327 公斤/亩, 相当于全国单产水平的 84%, 绝对产量差距为 64 公斤/亩。区内地貌以山地、丘陵为主, 玉米大多种植在坡耕地上, 属于雨养农业、水土流失严重、多数土壤肥力较为低下。由于区域经济相对落后, 目前的施肥技术和其他栽培技术都还存在很大提升空间。根据各地玉米高产栽培试验报道, 四川省 2011 年在盐源县创建了 1218.0 公斤/亩的玉米高产纪录^[2]; 云南省 2012 年在大姚县创建了玉米百亩高产片, 平均亩产量达到 1014.95 公斤/亩^[3]; 贵州省翁安县 2012 年大面积玉米产量超过 800 公斤/亩^[4]。因此, 通过使用新的高产品种, 配合新的施肥技术和其他农艺措施, 可使玉米产量在现有平均产量的基础上翻 2-3 番。本文在对多年来玉米栽培研究的基础上, 总结出了玉米 4R 养分管理技术, 为区域玉米高产栽培提供技术参考。

适合玉米种植的肥料品种

玉米对肥料品种的适应性较为广泛, 包括尿素、碳酸氢铵、硫酸铵、氯化铵、控释尿素、氯化钾、硫酸钾、过磷酸钙、磷酸一铵、磷酸二铵、钙镁磷肥、硫酸锌、以及各种玉米专用肥、水溶肥和有机肥等。但在酸性土壤上应优先选用碱性或中性肥料, 在碱性土壤上则应优先选用酸性或中性肥料。玉米对硝态氮肥的喜爱优于铵态氮肥, 追

施硝酸铵钙比尿素或碳酸氢铵提高了春玉米的产量、氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥利用率^[5]。玉米属于耐氮作物之一, 可施用各种含氮肥料。西南地区的雨季与玉米生长同季, 因此使用氯化铵作追肥是可行的, 除非土壤墒情较差或久旱无雨时则应避免施用。玉米是对缺锌最为敏感的作物之一, 在石灰性土壤上缺锌现象十分普遍^[6]。据估计, 我国约有 40% 的土壤缺锌, 这也是西南地区玉米生产中常见的植物营养障碍问题。缺锌时玉米的生长发育受阻, 叶片脉间失绿, 茎节间缩短, 果实发育受阻, 导致产量低下, 品质降低。在缺锌条件下, 敏感型玉米品种的生长和产量影响较大, 而中间型和不敏感型品种所受影响较小或无影响^[7]。因此, 种植敏感型品种时应特别注意土壤有效锌含量情况, 以防止玉米缺锌。

适合玉米种植的肥料用量

西南地区以山地、丘陵为主, 其间镶嵌着一些平坝或小平原, 地形地貌的起伏升降悬殊, 营造出不同的小气候或立体气候, 土壤肥力和生产水平在不同地貌区域差异很大。根据不同区域的玉米定位试验结果, 在同一施肥水平下不同区域的玉米产量水平不同; 在同一地点相同施肥处理玉米产量因年度间气候变化差异也大; 在某些年度间, 同一试验中因气候变化造成的产量起伏变化差异甚至大于肥料处理^[8-10]。除气候条件外, 土壤条件(土壤肥力、土层厚度、坡度等)和玉米品种决定了玉米产量和施肥效果。因此, 适宜各种玉米品种的最佳肥料用量因土壤而异。陈庆瑞等^[11]研究了四川省紫色丘陵区不同台位的玉米肥料

用量(图1),表明不同地形台位上玉米对氮肥用量的反应差异很大。玉米产量水平依次为一台地 > 二台地 > 坡顶地。在一台地,即丘脚或山麓的平地上,每亩施氮12公斤时玉米产量达到最高水平;在二台地,即丘陵或山地中部,每亩施氮16公斤时玉米产量达到最高水平;而在坡顶地上,即使每亩24公斤的施氮量玉米产量仍未达到最高水平。说明不同地形台位的施肥量应根据的土壤肥力水平与玉米目标产量或生产潜力来决定。当然,就生产潜力较低的坡顶地来说,虽然玉米产量随施氮量的增加而增加,但施氮量从每亩16公斤增加到24公斤时,玉米产量仅仅增加了21公斤,产生的玉米籽粒产量和经济效益微不足道,加上多施入氮肥对环境的不利影响,是不划算的。因此,在生产力水平较低的坡耕地上,玉米的施肥量不能按最高产量来确定,最佳经济产量才是施肥量确定的目标和依据。

根据西南地区山地地貌普遍的特点,尹梅等^[12]提出了在云南省按海拔高度的土壤养分含量水平对玉米推荐施肥的建议,这对不同农业气候和生态区的作物养分管理更有针对性。经过农业部测土配方施肥项目多年的试验研究与示范,西南各省(市、区)都各自提出了以农业生态区为基础大配方的玉米测土配方施肥指导建议,区内的各县市再根据各自具体的土壤条件、玉米品种、灌溉条件、轮作制度等细化调整。

适合玉米种植的肥料施用时间

目前,西南地区玉米肥料的最佳施用时间与次数已得到基本统一和认可。在生产实践中,有机肥、磷肥、钾肥和锌肥一般做底肥一次施用,而氮肥则是根据玉米生育期分次使用,即大多采用底肥、苗肥和攻苞肥(穗肥或大喇

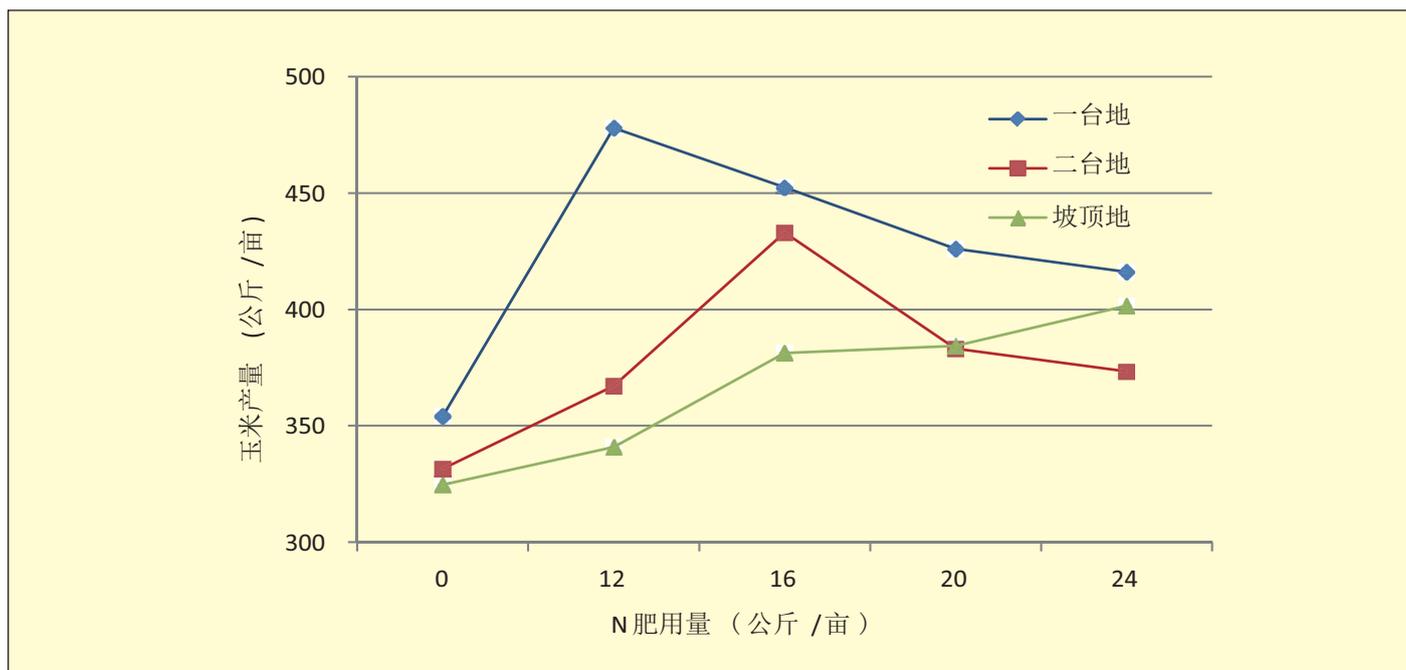


图1 四川紫色丘陵区不同台位氮肥用量对玉米产量的影响

处理	产量	与普通尿素 100% 比		氮肥利用率
	(公斤/亩)	(公斤/亩)	(%)	(%)
普通尿素 100%	617 c	--	--	26.4
控释尿素 100%	714 a	97	15.6	37.2
普通尿素 75%	598 c	-19	-3.1	25.5
控释尿素 75%	673 ab	55	9.0	42.9

叭口施肥)。当然,在降雨量偏高、土壤质地较轻的土壤上,钾肥采用底肥加追肥分次施用,以减少钾素流失,提高肥料利用率,至关重要。但是,如果在缺钾土壤上把全部钾肥作为追肥用在玉米生长的中后期,会导致玉米严重减产^[13]。不同区域氮肥在不同生育期的分配比例虽有不同,但采用底肥:苗肥:攻苞肥为20:30:50的施肥比例在该区较为普遍,也基本与玉米生育期中的吸肥规律一致。近年来,随着缓控释氮肥的问世和应用,给施肥技术带来了一次革命。玉米的氮肥施用可以从传统的3次施肥改为1次施肥,这既节省了施肥次数,又提高了氮肥利用率。表1是云南农业科学院在云南省开展的控释尿素对玉米产量和氮肥利用率的影响的部分数据结果。施肥处理为普通尿素75%和100%用量分3次施用,控释尿素75%和100%用量做底肥1次施用。结果显示,等氮量的控释尿素比普通尿素都显著增加了玉米产量和氮肥利用率,罗付香等^[14]在四川的坡耕地上也获得了相似的结果。

适合玉米种植的肥料施用方法

长期以来,玉米的施肥方法较为固定。种肥或玉米苗移栽肥多为窝施,苗肥为侧施灌水,攻苞肥则结合中耕培土。但近年来,随着玉米抗旱节水覆膜技术的广泛应用,给传统的玉米施肥技术带来了挑战。由于玉米覆膜后苗期不宜过早破膜施肥,因此通常把传统的苗肥前移与底肥一起深施或使用注肥器施用苗肥。在玉米覆膜栽培中,用控释尿素做底肥一次施入根区土壤,能减少施肥次数,提高玉米产量和氮肥利用率,并有效破解玉米覆膜施肥的技术难题(表1)。同理,控释尿素也可用于秸秆覆盖的玉米田,以解决追肥难的问题。但是,用包膜技术生产的控释尿素必须在土壤含水量充足的条件下使用才能发挥作用,在雨养和缺乏灌溉条件的地区,使用包膜控释尿素则难以充分发挥肥效。因此,正确的施肥方法必须考虑气候、玉米不同生育期以及具体耕作栽培措施,因地、因时制宜,才能充分发挥作用。



小结

西南地区以山地、丘陵为主,玉米大多种植在坡耕地上。区内水土流失严重,土层浅、土壤较为瘠薄,土壤肥力水平和玉米生产力水平都相对较低。但是,玉米高产水平和平均产量之间差异巨大,存在很大提升空间。由于水土资源禀赋差和生态环境较脆弱,限制了区域内的玉米生

产不能一味追求高产/超高产的目标。因此,应根据玉米种植区的气候生态特点、玉米品种、种植制度和栽培方式,根据不同地形地貌的土壤肥力水平,因地制宜开展养分管理,在正确的玉米生育期把正确的用量和肥料品种施在正确的位置,从而获取最佳经济效益和最大生态环境效益的玉米产量。

参考文献

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [2] 四川日报. 四川玉米超高产技术再创纪录. 2011年10月24日, <http://sichuandaily.scol.com.cn/2011/10/24/20111024704244029062.htm>.
- [3] 云南省农业厅. 大姚县玉米亩产超千斤创新高纪录. 2012, <http://www.ynagri.gov.cn/news16/20121030/3576565.shtml>.
- [4] 贵州电视台. 贵州省玉米高产示范区亩产超过800公斤. 2012年10月, <http://www.tudou.com/programs/view/wfBmlyj2Xzw/>.
- [5] 王激清, 刘社平. 追施不同氮肥对春玉米生长特性和氮肥利用效率的影响[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2009, 25(6):24-28.
- [6] 于佃平. 高产创建为农业技术推广搭起新平台第六届中国农业推广研究征文优秀论文集[C]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009, 256-258.
- [7] 郭启飞. 不同基因型玉米苗期缺锌敏感性差已研究[D]. 山西农业大学, 硕士学位论文, 2012.
- [8] 陈一兵, 张庆玉, 林超文, 等. 麦-玉-苕三熟制施钾效果的研究. 西南地区作物平施肥与坡地管理研究[M]. 四川大学出版社, 2006.
- [9] 李伟, 戴亨林. 旱地麦-玉-苕三熟制条件下平衡施肥定位试验初报. 西南地区作物平施肥与坡地管理研究[M]. 四川大学出版社, 2006.
- [10] Bill Deen, Ken Janovicek, John Lauzon, et al. Optimal rates for corn nitrogen depend more on weather than price[J]. Better Crops, 2015, 99(2):16-18.
- [11] 陈庆瑞, 冯文强, 涂仕华, 等. 四川盆中丘陵区不同台位旱坡地土壤养分状况研究[J]. 西南农业学报, 2002, 15(1):74-78.
- [12] 尹梅, 洪丽芳, 付利波, 等. 不同施肥时期对玉米产量和质量的影响[J]. 云南农业大学学报, 2012, 27(1):123-128.
- [13] 张超男. 不同施肥方式对超高产夏玉米群体质量和源库代谢的影响[D]. 河南农业大学, 硕士学位论文, 2008.
- [14] 罗付香, 林超文, 涂仕华, 等. 氮肥形态和地膜覆盖对坡耕地玉米产量和土壤氮素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):12-16.

钾肥用量和施用时期对苹果产量品质和果园钾素平衡的影响

李书田¹ 崔荣宗² 同延安³ 汪仁⁴

(1. 国际植物营养研究所北京办事处 / 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 4. 辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 沈阳 110161)

摘要: 在辽宁盖州、山东栖霞、陕西凤翔开展田间试验研究了氯化钾 (KCl) 用量和施钾时期对苹果产量、品质的影响, 并与硫酸钾 (K_2SO_4) 比较。辽宁、山东、陕西试验点经济最佳 KCl 用量分别为 0.79、0.45、0.35 公斤 K_2O /株, 最高产量 KCl 用量分别为 0.81、0.50、0.35 公斤 K_2O /株。适量施用 KCl 提高可溶性固形物含量, 增加果实硬度, 减低果实酸度。在 0.3 公斤 K_2O /株用量下, KCl 与 K_2SO_4 对苹果产量和品质影响相当。施钾降低果实 Ca、Mg 含量, 施钾量越高降低越明显。施钾处理果园钾素均有盈余。与 100% 钾肥基施相比, 50% 钾肥或 100% 钾肥在开花期或果实膨大期施用提高苹果果实产量, 但降低果实硬度和果实钙、镁含量。合理用量和施用时期下 KCl 可增加苹果产量和品质, 提高果园钾肥力, 但施钾尤其开花后施钾时应注意补充 Ca、Mg 营养。

苹果主要分布在陕西、山东、河北、河南、辽宁、甘肃, 面积和产量分别占全国的 80% 以上, 是这些地区农民增收的主要经济作物之一。肥料的正确选择和准确施用是苹果高产优质的保证。在苹果需要的多种养分中, 钾起着至关重要的作用。对产量为 6 吨/亩高产苹果园, 每年需要从土壤中吸收 N、 P_2O_5 、 K_2O 的数量大约为 8、3.1、16 公斤/亩, 比例为 1 : 0.38 : 2.0^[1]。因此, 苹果对钾素的需求量较多, 充足的钾素营养可增加苹果含糖量, 提高品质, 对果面着色度、香味、果实风味和耐贮性均有显著提高^[2-3]。一些研究指出, 苹果施肥效应中钾肥的增产效应最大, 其次为氮肥, 磷肥最小^[4-5]。合理的钾肥用量能提高叶片光和速率, 增加叶片矿质养分含量^[6], 钾素营养比氮磷营养对苹果果实品质指标如硬度、可溶性固形物、可滴定酸含量的影响更大^[7]。

钾肥的种类很多, 但常用的有氯化钾 (KCl) 和硫酸钾 (K_2SO_4), KCl 比 K_2SO_4 价格低廉, 相同的用量下, 可降低成本、提高效益。苹果钾肥管理研究多集中在施钾的增产效果上, 如山东滨州 15 年富士苹果上春季基施 KCl (0.6 公斤 K_2O /株) 增产 16.7%^[8]; 陕西合阳县 13 年富士苹果园秋季基施 KCl (0.25 公斤 K_2O /株) 5 年平均增产 22.5%, 并增加果实可溶性固形物和硬度^[9]; 辽宁瓦房店 15 年树龄富士苹果园施 K_2SO_4 (1.2 公斤 K_2O /株) 2 年平均增产 67%, 提高果实可溶性糖、降低可滴定酸含量^[4]。江苏连云港市 10 年富士苹果施 K_2SO_4 (0.25 公斤 K_2O /株) 平均增产 43.1%, 并提高果实硬度和可溶性固形物含量^[10]。郭全恩等 (2001) 进行 K_2SO_4 用量试验指

出, 在土壤速效钾含量 430 毫克/公斤下, 苹果上经济最佳 K_2SO_4 用量为 10 公斤 K_2O /亩, 最高产量施钾量为 13 公斤 K_2O /亩^[11]。但有关钾肥尤其是 KCl 在苹果上的用量研究鲜有报导。

在钾肥的施肥时期上大多采用春季发芽前“一炮轰”施肥, 然而在年周期内苹果树体对钾素的吸收主要在花期—果实膨大期和秋冬季, 而生长季内果实中钾素累积速率最高则出现在果实快速膨大期^[12], 这说明了果树后期钾素营养的重要性。但在钾肥施用时期的研究方面只有零星报导证明后期补钾对苹果产量提高和品质改善的重要性, 但以后期叶面喷施硫酸钾为主^[2,13-14]。关于氯化钾施用时期的研究未见报导。

由此可见, 研究氯化钾在苹果上的用量与施肥时期对实现苹果最佳养分管理, 提高产量和改善品质, 增加农民收入具有重要的实际价值。本研究目的: 1) 不同用量的 KCl 对苹果产量、品质和果园钾素平衡的影响, 确定 KCl 合理用量, 并与等钾量下的 K_2SO_4 比较; 2) KCl 的不同施肥时期对苹果产量、品质的影响, 确定 KCl 正确的施用时期。

1 材料与方 法

1.1 试验设计和实施方案

2012—2013 年在苹果主产区陕西凤翔、山东栖霞、辽宁盖州开展钾肥用量和施肥时期试验研究。供试土壤理化性状见表 1。

表 1 供试土壤理化性状

项目	陕西	山东	辽宁
地点	凤翔县糜杆桥镇太相寺村	栖霞市观里镇筐里村	盖州市仙人岛化工园区正黄旗村
土壤类型	娄土	棕壤	棕壤
pH	8.2	5.1	4.1
有机质(克/公斤)	6.9	8.4	9.4
矿质氮(毫克/升)	13.4	14.4	26.9
有效磷(毫克/升)	55.9	34.5	192.6
有效钾(毫克/升)	159.6	69.9	77.1

钾肥用量试验设 6 个处理：1) 对照不施钾(-K)；2) KCl, 0.15 公斤 K_2O /株；3) KCl, 0.30 公斤 K_2O /株；4) KCl, 0.45 公斤 K_2O /株；5) KCl, 0.60 公斤 K_2O /株；6) K_2SO_4 , 0.30 公斤 K_2O /株。各处理重复 3 次，随机排列。各处理氮(尿素)、磷(普通过磷酸钙)用量相同。所有养分在苹果秋季收获后以基肥施用。期间记录灌水量，收集灌溉水样品，记录树叶、枝条、苹果产量，并采集样品、烘干、粉碎后分析含钾量。2013 年收获时随机从果树不同部位选取 5 个果实样品测定可滴定酸、硬度、可溶性固形物和 K、Ca、Mg 含量。

钾肥施用时期试验设 6 个处理：1) 对照不施钾(-K)；2) 钾肥全部基施；3) 50% 的钾肥基施 + 50% 的钾肥果实膨大期施；4) 50% 的钾肥开花期施 + 50% 的钾肥果实膨大期施；5) 钾肥全部在果实膨大期施；6) 果农习惯施肥

(陕西： $N-P_2O_5-K_2O=0.3-0.12-0.3 K_2O$ /株，K 肥全部在 6 月底施用；山东： $N-P_2O_5-K_2O=0.64-0.32-0.3 K_2O$ /株，50% K 基施，25% K 花期施，25% K 果实膨大期施；辽宁： $N-P_2O_5-K_2O=0.7-0.92-0.3 K_2O$ /株，全部钾秋季基施)。各处理重复 3 次，随机排列。各处理氮(尿素)、磷(普通过磷酸钙)、钾(氯化钾)用量相同。氮、磷肥在苹果秋季收获后以基肥施用，钾肥按照处理要求施用。期间记录灌水量，收集灌溉水样品，收获期测定树叶、枝条、苹果产量，并采集样品、烘干、粉碎后分析其含钾量。2013 年收获时随机从不同部位选取 5 个果实样品测定可滴定酸、硬度、可溶性固形物和 K、Ca、Mg 含量。

三个试验地点果园的栽培品种均为红富士，连续试验 2 年。试验详细情况见表 2。



1.2 分析测试

土壤有机质、pH、矿质氮、有效磷、有效钾含量采用高效土壤养分测试方法(ASI法)^[15],植物样品中钾、钙、镁含量测定采用常规分析方法^[16]。可溶性糖含量用蒽酮比色法;可溶性固性物用WYT-4型糖量计;果实硬度用GY-1型硬度仪;可滴定酸含量用酸碱滴定法测定。

1.3 统计方法

方差分析采用SAS统计软件,显著性检测概率值为0.05。

2 结果与分析

2.1 KCl用量对苹果产量品质的影响

2012-2013连续两年的研究表明,施钾比不施钾增加苹果产量,尤其在第二季2013年更明显(表3)。

在陕西和山东试验点,施KCl 0.3和0.45公斤K₂O/株获得较高产量,而在辽宁施KCl 0.6公斤K₂O/株时产量较高。三个地点的结果都表明,施钾量0.30公斤K₂O/株时,K₂SO₄和KCl的增产效果相当。

根据辽宁、山东、陕西试验点两年平均产量(y)与K₂O用量(x)关系: $y = -24.9x^2 + 40.2x + 56.0$ ($R^2 = 0.9851$), $y = -0.5x^2 + 10.5x + 45.9$ ($R^2 = 0.915$), $y = -198.3x^2 + 138.5x + 65.8$ ($R^2 = 0.9827$),计算出经济最佳施钾量分别为0.79、0.45、0.35公斤K₂O/株,最高产量施钾量分别为0.81、0.50、0.35公斤K₂O/株。

施钾对苹果品质具有一定影响(表4)。与不施钾相比,施钾对果实可滴定酸含量影响不显著或有降低作用。在山东施用KCl 0.45公斤K₂O/株和辽宁施用KCl 0.6公斤K₂O/株显著降低可滴定酸含量,而陕西KCl用量对可滴定酸没有显著影响。在辽宁试验点施用KCl或K₂SO₄ 0.3公斤K₂O/株可增加果实硬度,但在山东和陕西试验点钾

表2 试验详细信息

项目	陕西凤翔	山东栖霞	辽宁盖州
树龄(年)	9	11	15
株距×行距(米)	2×3	2.5×4.5	3×4
各处理株数	6	5	3
2012年肥料用量、施肥时期与施肥方法	N-P ₂ O ₅ =0.3-0.12公斤/株 氮肥:基施50%,果实膨大期追施50%; 磷、钾肥:秋季全部基施。 施肥方法:肥料沿树旁开沟条施。	N-P ₂ O ₅ =0.32-0.16公斤/株 有机肥:全部基施; 氮肥和磷肥:基施50%,开花期和果实膨大期各25%; 钾肥:全部秋季基施。 施肥方法:肥料围绕树旁开沟条施。	N-P ₂ O ₅ =0.6-0.36公斤/株 有机肥:全部春季基施; 氮肥和磷肥:75%基施,25%果实膨大期施; 钾肥:全部秋季基施。 施肥方法:肥料树旁放射状开沟条施。
2013年肥料用量、施肥时期与施肥方法	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O=0.3-0.12-0.3公斤/株 氮肥:基施50%,果实膨大期追施50%; 磷肥:秋季全部基施。 施肥方法:肥料沿树旁开沟条施。	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O=0.32-0.16-0.3公斤/株 有机肥:全部基施; 氮肥和磷肥:基施50%,开花期和果实膨大期各25%。 施肥方法:肥料围绕树旁开沟条施。	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O=0.6-0.36-0.6公斤/株 有机肥:全部春季基施; 氮肥和磷肥:75%基施,25%果实膨大期施。 施肥方法:肥料树旁放射状开沟条施。
灌溉(毫米)	2012: 700; 2013: 75	2012: 120; 2013: 270	2012: 41.2; 2013: 61.9
降雨(毫米)	2012: 602; 2013: 650	2012: 754; 2013: 694	2012: 636; 2013: 600
年均温(℃)	2012: 11.5; 2013: 11.4	2012: 11.3; 2013: 13.6	2012: 9.5; 2013: 9.5
无霜期(天)	2012: 207; 2013: 209	2012: 207; 2013: 209	2012: 189; 2013: 189

表3 KCl用量对苹果产量的影响

钾肥用量 (公斤K ₂ O/株)	钾肥品种	陕西		山东		辽宁	
		2012	2013	2012	2013	2012	2013
0		49.3c	84.1d	46.4a	45.8b	48.9a	64.1d
0.15	KCl	57.9bc	102.7abc	47.3a	46.1b	50.3a	70.3c
0.30	KCl	70.4a	109.6ab	48.4a	48.4a	56.7a	76.3ab
0.45	KCl	66.4ab	112.1a	48.5a	48.7a	60.5a	78.2ab
0.60	KCl	56.7c	97.0bcd	48.0a	48.6a	62.0a	79.8a
0.30	K ₂ SO ₄	65.8ab	94.3bcd	48.8a	48.6a	58.4a	73.8bc

注:同一列中数字后不同字母表示差异显著(p<0.05)。

肥对果实硬度没有影响。与不施钾相比, 适量施钾增加可溶性固形物含量, 辽宁试验点施 KCl 0.3 公斤 K_2O / 株, 山东和陕西试验点施 KCl 0.45 公斤 K_2O / 株可获得较高的可溶性固形物含量。相同 K_2O 用量下, K_2SO_4 比 KCl 降

低可溶性固形物含量, 对其他品质的影响差异不明显。因此, 适量施用 KCl 提高可溶性固形物含量, 增加果实硬度, 减低果实酸度。另外, 施钾显著降低果实 Ca、Mg 含量, 钾肥用量越高降低越多。

表 4 KCl 用量对苹果品质指标的影响

地点	钾肥 品种	钾肥用量 公斤 (K_2O / 株)	可滴定酸 (%)	硬度 (公斤/厘米 ²)	可溶性固形物 (%)	K Ca Mg		
						(克/公斤)		
辽宁		0	0.37ab	7.90d	11.30cd	7.07a	1.03a	0.50a
	KCl	0.15	0.40a	8.10cd	11.70b	7.03a	1.00a	0.50a
	KCl	0.30	0.37ab	8.40ab	12.60a	6.73a	0.90b	0.50a
	KCl	0.45	0.34bc	8.20bc	11.60bc	7.00a	0.90b	0.50a
	KCl	0.60	0.32c	8.10cd	11.00d	6.80a	0.86b	0.40b
	K_2SO_4	0.30	0.36abc	8.60a	11.50bc	6.93a	0.90b	0.40b
山东		0	0.83a	7.22a	10.80c	4.45e	0.44ab	0.54a
	KCl	0.15	0.78ab	7.19a	10.91c	4.53de	0.47a	0.52ab
	KCl	0.30	0.78ab	7.41a	12.04ab	5.18bc	0.43b	0.48ab
	KCl	0.45	0.74b	7.30a	12.64a	4.88cd	0.36c	0.37c
	KCl	0.60	0.76ab	7.19a	12.29ab	6.71a	0.29d	0.29d
	K_2SO_4	0.30	0.78ab	7.17a	11.88b	5.47b	0.43b	0.46b
陕西		0	0.27ab	11.08a	12.70ab	6.63a	1.17a	0.58a
	KCl	0.15	0.28ab	10.02a	12.6ab	6.97a	0.73b	0.36b
	KCl	0.30	0.30ab	9.84a	12.30b	7.46a	0.81b	0.41b
	KCl	0.45	0.31a	10.64a	13.80a	7.41a	0.69b	0.41b
	KCl	0.60	0.27ab	10.95a	13.46ab	6.12a	0.75b	0.35b
	K_2SO_4	0.30	0.24b	9.42a	11.46b	6.74a	0.88b	0.39b

注: 同一地点同一列中数字后不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。

表 5 施钾对苹果园钾素投入/产出平衡的影响 (2012-2013)

地点	处理		钾投入			钾产出			平衡	
	钾肥 品种	钾肥用量 (公斤 K_2O / 株)	(公斤 K_2O / 亩)						(公斤 K_2O / 亩)	(公斤 K_2O / 株)
			化肥	有机肥	灌溉水	果实	叶片	修剪枝条		
辽宁		0.00	0.0	73.6	0.3	8.7	10.2	8.9	46.1	0.83
	KCl	0.15	16.7	73.6	0.3	9.9	12.5	9.4	58.7	1.06
	KCl	0.30	33.3	73.6	0.3	9.4	11.1	10.7	75.9	1.37
	KCl	0.45	50.0	73.6	0.3	9.5	12.1	11.5	90.8	1.64
	KCl	0.60	66.7	73.6	0.3	10.1	13.8	12.5	104.1	1.88
	K_2SO_4	0.30	33.3	73.6	0.3	10.1	11.7	9.7	75.7	1.36
山东		0.00	0.0	3.1	0.8	4.9	4.5	0.5	-5.9	-0.10
	KCl	0.15	17.8	3.1	0.8	5.1	4.9	0.5	11.2	0.19
	KCl	0.30	35.5	3.1	0.8	5.7	4.6	0.6	28.6	0.48
	KCl	0.45	53.3	3.1	0.8	5.4	4.9	0.5	46.5	0.79
	KCl	0.60	71.1	3.1	0.8	6.1	4.4	0.6	63.9	1.08
	K_2SO_4	0.30	35.5	3.1	0.8	5.7	4.1	0.5	29.2	0.49
陕西		0.00	0.0	0.0	0.6	9.8	4.5	1.1	-14.7	-0.13
	KCl	0.15	33.3	0.0	0.6	11.4	5.0	0.9	16.6	0.15
	KCl	0.30	66.7	0.0	0.6	13.3	5.1	0.9	48.1	0.43
	KCl	0.45	100.0	0.0	0.6	12.8	5.7	1.1	80.9	0.73
	KCl	0.60	133.3	0.0	0.6	9.7	5.5	0.9	117.9	1.06
	K_2SO_4	0.30	66.7	0.0	0.6	10.6	4.8	0.9	51.0	0.46

对两年试验后果园钾素投入 / 产出平衡进行估算 (表 5), 在陕西和山东试验点不施钾对照处理果园土壤钾素亏缺, 而辽宁试验点因为施用较多有机肥的缘故虽不施钾仍有盈余。三个地点所有施钾处理果园土壤钾素均有盈余, 并随用量增加盈余增加。但这种盈余不能简单地认为钾的投入过量, 因为有多少钾贮存在树体中, 多少钾残留在土壤中还不清楚, 有待进一步研究。

2.2 KCl 施用时期对苹果产量品质的影响

陕西两年的试验表明, KCl 施用时期显著影响苹果产量, 开花后或果实膨大期施用 50% 或全部 KCl 比全部基施和果农习惯施肥显著提高果实产量 (表 6), 果农习惯施肥产量相对较低, 低于或相当于钾肥全部基施, 除与氮、磷用量高有关外, 还与钾肥施用不合理有关,

如辽宁果农习惯把全部钾肥基施, 陕西果农习惯把全部钾肥施在果实膨大期。在山东和辽宁, 50% 钾肥基施和 50% 钾肥果实膨大期施比钾肥全部基施增加苹果产量, 但差异不显著 (表 6)。

钾肥施用时期对果实可滴定酸的影响不明显, 但果实硬度随钾肥的后移而降低, 尤其在辽宁和陕西试验点更明显。对可溶性固形物的影响各地不一, 随钾肥后移而下降或影响不显著。而钾肥后移有降低果实钙、镁含量的趋势, 后期施钾越多, 钙、镁含量降低越明显 (表 7)。

综合 KCl 施用时期对苹果产量、品质的影响, 辽宁和山东钾肥适宜的施用时期是基施 50% 钾肥 + 果实膨大期施 50% 钾肥, 陕西钾肥适宜的施用时期是花期施 50% 钾肥 + 果实膨大期施 50% 钾肥。

表 6 KCl 施用时期对苹果产量的影响 (公斤 / 亩)

KCl 施用时期	陕西		山东		辽宁	
	2012	2013	2012	2013	2012	2013
- K	3287	5640	3093	2953	3260	4467
100% B	3400	5673	3267	3153	4147	4973
50% B+50% FE	4327	6027	3413	3213	4180	5467
50% FL+50%FE	4380	6827	3240	3173	4120	5247
100% FE	4133	6873	3227	3047	4187	4887
FP	3633	5547	3340	3193	3473	4827

B: 基施; FE: 果实膨大期; FL: 开花期; FP: 习惯施肥, 下同。

表 7 KCl 施用时期对苹果品质指标的影响

地点	钾肥施用时期	可滴定酸 (%)	硬度 (公斤 / 厘米)	可溶性固形物 (%)	K Ca Mg (克 / 公斤干重)		
					K	Ca	Mg
辽宁	- K	0.37a	7.90d	11.30c	7.07a	1.03a	0.50a
	100% B	0.34b	9.00a	12.33a	6.80b	0.93a	0.43ab
	50% B+50% FE	0.32bc	8.80ab	12.10a	7.03a	0.93a	0.43ab
	50% FL+50%FE	0.33bc	8.60bc	11.80b	7.03a	0.97a	0.43ab
	100% FE	0.34b	8.57c	10.93d	6.83b	0.50b	0.40b
	FP	0.31c	8.43c	10.93d	6.70b	0.50b	0.40b
山东	- K	0.83a	7.26a	10.94b	5.07c	0.47ab	0.55a
	100% B	0.78ab	7.30a	12.05a	5.33ab	0.43bc	0.52ab
	50% B+50% FE	0.78ab	7.30a	12.02a	5.48a	0.43ab	0.55a
	50% FL+50%FE	0.74b	7.30a	12.65a	5.26bc	0.39cd	0.50b
	100% FE	0.86a	7.32a	12.49a	5.27b	0.38d	0.50b
	FP	0.78ab	7.33a	12.10a	5.36ab	0.48a	0.50b
陕西	- K	0.27a	11.08ab	12.70a	7.63a	1.17a	0.58a
	100% B	0.31a	10.95ab	12.07a	9.01a	0.97ab	0.48a
	50% B+50% FE	0.33a	11.31a	12.66a	7.52a	1.02a	0.51a
	50% FL+50%FE	0.30a	10.13ab	12.16a	8.01a	1.15a	0.56a
	100% FE	0.34a	8.97b	12.63a	8.56a	0.71c	0.41b
	FP	0.29a	11.04ab	13.33a	8.64a	0.78bc	0.44ab

3 讨论

本研究表明, 适量施用钾肥不仅增加苹果产量, 而且可改善果实品质, 但不同地点最高产量和最佳经济施肥量不同, 原因可能与果树树龄和种植密度有关。陕西、辽宁、山东试验点树龄分别为 9、15、11 年, 密度分别为 111、56、59 株/亩, 钾肥经济最佳施用量分别为 0.35、0.79、0.45 公斤 K_2O /株, 按照面积计算则为 38.9、43.9、70.5 公斤 K_2O /亩。对三个试验点周围果农调查结果表明(数据未列出), 陕西果园钾肥平均用量为 25.5 公斤 K_2O /亩, 有机肥平均投入 7.3 公斤 K_2O /亩, 共 32.8 公斤 K_2O /亩。辽宁果园钾肥平均用量 12 公斤 K_2O /亩, 有机肥投入 10.4 公斤 K_2O /亩, 共 22.4 公斤 K_2O /亩。山东钾肥平均用量 51.5 公斤 K_2O /亩, 有机肥投入 2 公斤 K_2O /亩, 共 53.5 公斤 K_2O /亩。相比陕西、辽宁、山东试验点钾肥经济最佳施用量, 陕西果园的钾肥投入略显不足, 辽宁果园的钾肥投入不足, 而山东果园钾肥投入过量。因此, 确定合理的施钾量应综合考虑树龄、密度和其他来源投入等。

在相同 K_2O 用量下, K_2SO_4 与 KCl 的增产作用相当, 在品质影响上除在辽宁试验点 K_2SO_4 比 KCl 降低可溶性固形物含量外, 对其他品质的影响差异不明显。这一点与其他研究有异同。有研究表明, 在等量钾肥下, K_2SO_4 在提高苹果产量, 改善外观和内在品质上优于 KCl ^[17]。但有研究指出, 虽然 K_2SO_4 对产量的增加效果优于 KCl , 但与等当量氯化钾相比降低一级果率、可溶性糖含量和糖酸比^[8]。因此, 只要 KCl 用量合理, 就不会影响产量和品质。

从果园钾素平衡结果看三个地点所有钾肥用量下果园钾素投入大于产出, 造成表观钾盈余, 尤其在有机肥投入多的辽宁试验点更明显(表 6)。这种多余的钾素对提高果园土壤钾素肥力水平具有一定作用, 有研究指出^[1], 连续 8 年施用钾肥 0.25 公斤 K_2O /株(27.8 公斤 K_2O /亩), 使得 0-20、20-40、40-60 厘米土壤速效钾含量分别增加 50.9, 61.8 和 31.2 毫克/升。但多少年能使土壤速效钾含量达到优质高产所需的土壤有效钾水平, 还要结合果园土壤现有的速效钾含量、土壤质地以及有机肥投入多少等因素综合判断。有研究指出^[18], 土壤有效钾在

583-600 毫克/公斤范围内富士苹果就可以达到理想品质。还有研究指出^[19], 当土壤有效钾含量大于 300 毫克/公斤时可以不施钾肥。因此, 通过施用钾肥提高土壤有效钾含量是苹果园钾肥管理的重点。另外, 有机肥的投入能否替代部分钾肥, 在施用有机肥的前提下能否减少钾肥用量等还有待进一步研究。

本研究表明, 三个地点钾肥的适宜施用时期是 50% 或 100% 的钾肥在花期后施用。这一结果与豫西地区富士苹果树(树龄 5-7 年, 密度 83 株/亩)施钾效应相似, 施钾量为 0.29-0.43 公斤 K_2O /株时, 施钾时期以当年果实膨大期(6-8 月)追施为好^[2]。还有研究指出^[13], 收获前 40 天用 0.5% K_2SO_4 叶面喷施可提高苹果产量, 增加果实可溶性固形物含量。

施钾降低苹果果实钙、镁含量, 而且随钾肥用量增加和钾肥后移降低更明显, 同时果实硬度也有降低趋势。这预示着施用钾肥尤其施用高量钾肥有引起果实缺钙、缺镁, 引起生理病害的风险, 从而影响果实的外观品质和贮藏品质^[20]。研究发现, 果实硬度与钙含量呈正相关^[21-22], 而与果实中氮、钾含量呈负相关^[23], 施钾提高果实钾含量和 $K:Ca$ 比, 减低 Ca 含量^[24]。一些研究人员也发现结球甘蓝上施钾肥可降低叶球中 Ca 、 Mg 含量^[25]。但也有研究指出, 在土壤有效钾含量低的果园, 采收前 2-6 周叶面喷施钾有助于提高果实硬度和可溶性固形物含量^[14]。因此, 合理的钾肥用量和正确的施用时期对苹果的高产优质非常重要, 注意在施钾的同时补充钙、镁营养, 从而协调产量与品质。

4 结论

1) 辽宁、山东、陕西试验点施钾比不施钾增加苹果产量, 经济最佳 KCl 用量分别为 0.79、0.45、0.35 公斤 K_2O /株, 最高产量 KCl 用量分别为 0.81、0.50、0.35 公斤 K_2O /株。

2) KCl 的适宜施用时期是 50% 或 100% 的钾肥在开花期后施用。

3) 适量施钾改善果实品质, 但施钾尤其后期施钾降低果实 Ca 、 Mg 含量, 应注意补充 Ca 、 Mg 营养。

参考文献

- [1] 高义民, 同延安, 路永莉, 等. 长期施用氮磷钾肥对黄土高原地区苹果产量及土壤养分累积与分布的影响 [J]. 果树学报, 2012, 29(3):322-327.
- [2] 王勤, 何为华, 郭景南, 等. 增施钾肥对苹果品质和产量的影响 [J]. 果树学报, 2002, 19(6):424-426.
- [3] 张立新, 张林森, 李丙智, 等. 旱地苹果矿质营养及其在生长发育中的作用 [J]. 西北林学院学报, 2007, 22(3):111-115.
- [4] 王春枝, 朱福磊, 刘丽杰, 等. 氮磷钾肥对红富士苹果产量品质和叶片矿质元素含量的影响 [J]. 中国果树, 2009, (2):14-17.
- [5] 孙霞, 柴仲平, 蒋平安. 氮磷钾配比对南疆红富士苹果产量和品质的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6):130-134.
- [6] 郭雯, 李丙智, 张林森, 等. 不同施钾量对红富士苹果叶片光合特性及矿质营养的影响 [J]. 西北农业学报, 2010, 19(4):192-195.
- [7] 张东, 赵娟, 韩明玉, 等. 黄土高原富士苹果叶片矿质养分与果实品质相关性分析 [J]. 园艺学报, 2014, 41(11):2179-2187.
- [8] 唐旭日. 密植苹果园施钾肥对产量及品质的影响 [J]. 北方园艺, 2007, (10):38-39.
- [9] 赵佐平, 同延安, 高义民, 等. 不同肥料配比对富士苹果产量及品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5):1130-1135.
- [10] 孙小波. 沼液配施钾肥对苹果产量和品质的影响 [J]. 落叶果树, 2012, 44(3):07-09.
- [11] 郭全恩, 郭天文, 再生斌. 苹果施用钾肥的肥效试验研究 [J]. 甘肃农业科技, 2001, (9):36-37.
- [12] 樊红柱, 同延安, 吕世华, 等. 苹果树体钾含量与钾累积量的年周期变化 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(5): 168-172.
- [13] DOROSHENKO T N, OSTAPENKO V I, RYAZANOVA L G. Formation of the quality of apple fruits under the effect if the foliar application of potassium [J]. Russian Agricultural Sciences, 2005, (5):29-32.
- [14] WOJCIK P. Effect of foliar potassium sprays on apple tree yielding, and fruit quality under conditions of low soil potassium availability [A]. LIBEK A, KAUFMANE E, SASNAUSKAS A. Proceedings of the international scientific conference: Environmentally friendly fruit growing. Polli, Estonia, 7-9 September 2005, 44-50.
- [15] 金继运, 白由路, 杨俐苹. 高效土壤养分测试技术与设备 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006, 74-84.
- [16] 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, 315-318.
- [17] 陈卫平, 渠慎春, 陈国强, 等. 配方施肥对苹果产量及品质的影响 [J]. 江苏农业科学, 2006, (5):165-166.
- [18] 张强, 魏钦平, 刘惠平, 等. 苹果园土壤养分与果实品质关系的多元分析及优化方案 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1654-1661.
- [19] JAFARPOUR M. 2010. Effect of two potassium fertilizers with balanced requirement of other nutrients on quantitative and qualitative characteristics of apple fruit trees ("Red Delicious") [J]. Acta Horticulturae, 877: 229-234.
- [20] 张新生, 周卫, 陈湖. 不同钙处理对苹果贮藏品质的影响 [J]. 河北果树, 2005, 1:15-16.
- [21] FALLAHI E, SIMONS B R. Interrelations among leaf and fruit mineral nutrients and fruit quality in "Delicious" apples [J]. Journal of Tree Fruit Production, 1996, 1(1):15-25.
- [22] FALLAHI E, CONWAY W S, HICKEY K D. The role of calcium and nitrogen in post harvest quality and disease resistance of apples [J]. HortScience, 1997, 32 (5):831-835.
- [23] 张强, 魏钦平, 蒋瑞山, 等. 富士苹果矿质营养含量与几个主要品质指标的相关性分析 [J]. 园艺学报, 2011, 38(10):1963-1968.
- [24] NAVA G, DECHEN A R. Long-term annual fertilization with nitrogen and potassium affected yield and mineral composition of "Fuji" apple [J]. Scientia Agricola, 2009, 66(3):377-385.
- [25] 郭熙盛, 叶舒娅, 王文军. 不同氮钾水平对结球甘蓝养分吸收和分配的影响 [J]. 安徽农业大学学报, 2004, 31(1):62-66.

利用植物生长调节剂提高棉花钾素吸收和利用效率

杨富强^{1,2} 田晓莉¹ 何萍²

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193; 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: 目前植物生长调节剂已经在世界范围内被广泛应用于农业生产, 对于调控作物生长发育过程、提高其生理抗逆能力、增加产量和改善品质均起到了积极的作用。我们在棉花田间试验过程中发现, 调节剂具有提高棉花钾素吸收和利用的作用, 可提高钾肥利用效率。调节剂可作为施肥技术的辅助手段, 提高作物的养分吸收和利用, 同时降低肥料的用量和成本。

关键词: 植物生长调节剂; 棉花; 钾肥; 吸收; 利用

棉花属于喜钾作物, 一生需要的钾素量比较大, 与氮素相当或更高^[1]。然而, 在中国许多地方, 农民很少施用钾肥, 施用量也远远低于氮肥。近年来, 随着棉花品种的不断改良和产量水平的不断提高, 我国棉田缺钾现象越来越普遍和严重。一方面是因为土壤中的钾被大量移走而没有得到补偿, 另一方面是因为现代转基因抗虫棉品种根系吸钾能力降低, 对土壤钾素水平要求较高, 需要施用更多的钾肥^[2]。

作为一种方便有效的化学调控手段, 植物生长调节剂已被广泛应用于各种作物。它不仅可提高作物产量和改善产品品质, 而且被认为是提高作物抗逆能力的有效措施^[3]。棉太金(25%甲哌鎓+2.5%胺鲜酯)是一种目前被大面积应用于棉花的调节剂, 具有控制棉花株高, 促进早熟和提高产量的作用。上世纪80年代有研究报道称, 调节剂(甲哌鎓)可提高棉花根系对矿质养分的吸收和分配, 但棉太金对棉花矿质营养生理的调控作用至今未见有报道。本研究目的就是研究棉太金对棉花钾素吸收和利用的调控作用, 以期生产中钾肥和调节剂的合理施用提供参考。

1 材料与方法

试验于2010-2011年在河北省河间市国欣农研会农场进行, 土壤质地为潮土, 耕层土有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾和pH分别为14.8克/公斤, 1.20克/公斤, 68.7毫克/公斤, 10.3毫克/公斤, 169.0毫克/公斤和7.9。材料选择当地主推品种国欣棉3号, 为转双价基因(Bt+CpTI)抗虫棉。

调节剂处理设棉太金处理和清水对照。整个生育期内喷施4次, 每次按试验方案药剂用量兑水30升/亩, 选择晴朗无风的下午均匀喷洒于植株叶片上(药剂用量和喷施时间详见表1), 药后12小时内未遇雨; 钾肥处理设0(不施钾肥)和90(施钾肥)公斤K₂O/公顷处理。采用完全随机区组设计, 4次重复, 小区面积30平方米。其他栽培管理措施按当地常规方法进行。

2 结果与分析

2.1 调节剂对棉花产量及其构成因素的影响

调节剂对产量具有一定的提高作用, 调节剂处理皮

表1 棉太金施用剂量和时期

年份	处理	时期				合计
		蕾期	始花期	盛花期	打顶后	
2010	对照					
	棉太金	3.2	6	12	18	39.2
2011	对照					
	棉太金	4.0	6	12	18	40

表 2 调节剂对棉花产量及其构成因素的影响

肥料	调节剂	铃数 (个/平方米)	铃重 (克)	衣分 (%)	皮棉 (公斤/公顷)
不施钾	对照	61.6c	4.72b	41.0a	1181b
	棉太金	63.5b	4.84b	40.5a	1229b
施钾	对照	66.7ab	5.29a	40.5a	1413a
	棉太金	71.2a	5.52a	39.9a	1476a

注：同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同

棉产量、铃数和铃重均有所增加，但对衣分没有影响（表 2）。调节剂处理铃数、铃重和皮棉产量，在不施钾肥条件下分别提高 3.1%、2.5% 和 4.1%；在施钾肥条件下分别提高 6.7%、4.3% 和 4.5%；但差异均未达到显著水平（表 2）。说明调节剂具有提高棉花产量的趋势，但产量增幅可能与调节剂种类、有效成分含量、药剂用法用量和施药时期有很大关系，这些方面均有改善的空间。

2.2 调节剂对棉花钾素吸收和分配的影响

调节剂显著提高了棉花对钾素的吸收，并促进了钾素向皮棉中分配（表 3）。调节剂处理茎秆、种子、皮棉和整株钾的积累量，在不施钾肥条件下分别提高 6.5%、10.8%、13.7% 和 7.5%；在施钾肥条件下分别提高 10.2%、6.7%、20.3% 和 10.1%。调节剂处理茎秆、皮棉和整株钾积累量与对照的差异均达到显著水平。同时，钾收获指数在不施钾和施钾肥条件下分别提高 7.1% 和 9.3%（表 3）。说明调节剂不仅具有提高棉花根系吸钾能力，还能有效促进钾素在体内的转运和分配，使更多的养分进入到产量器官中，这可能是调节剂提高作物产量和改善产品品质的物质基础。

在本文中，我们用钾肥偏生产力、农学效率和表观回收率来表示钾肥的利用效率。由表 4 可见，调节剂显著提高了钾肥的农学效率和回收率，但对钾肥偏生产力影响不显著。调节剂处理钾肥农学效率和回收率分别较对照提高 5.9% 和 21.1%，钾肥偏生产力也有一定幅度的提高（4.2%），但差异未达显著水平。Khan 等^[4]也得到了类似的结果，他们发现调节剂（赤霉素）有提高作物氮肥和硫肥利用效率的作用。这些结果说明，调节剂的合理应用可以提高肥料的利用效率。

结论

调节剂具有提高棉花产量的趋势，可能是因为调节剂具有提高棉花钾素吸收和利用的作用。在本研究中，调节剂（棉太金）处理显著提高了棉花对钾素的吸收量、钾肥农学效率和表观回收率，同时促进了钾素向皮棉中的分配，提高了钾素养分收获指数，从而有利于产量的增加和品质的改善。因此，作为肥料施用技术的一种辅助手段，调节剂的应用可为进一步提高我国肥料利用效率起一定的促进作用，可用于实际生产，以提高作物养分吸收能力，减少肥料养分损失，降低肥料投入成本。

表 3 调节剂对棉花钾素吸收和分配的影响

肥料	调节剂	茎秆钾	种子钾	皮棉钾	整株钾	钾收获指数
		(公斤/亩)				
不施钾	对照	6.0d	1.07b	0.32d	7.4d	0.042b
	棉太金	6.4c	1.23b	0.36c	8.0c	0.045b
施钾	对照	0.46b	1.50a	0.43b	8.8b	0.049ab
	棉太金	7.6a	1.60a	0.51a	9.7a	0.053a

表 4 调节剂对钾肥利用效率的影响

调节剂	钾肥偏生产力	钾肥农学效率	钾肥回收率
	(公斤/公斤)		(%)
对照	23.6a	3.9b	28.5b
棉太金	24.6a	4.1a	34.5a



参考文献

- [1] Rochester IJ. Nutrient uptake and export from an Australian cotton field [J]. *Nutr. Cycl. Agroecosyst*, 2007, 77:213–223.
- [2] 田晓莉, 王刚卫, 杨富强, 等. 棉花不同类型品种耐低钾能力的差异 [J]. *作物学报*, 2008, 34:1770–1780.
- [3] Akram NA, Ashraf M. Regulation in plant stress tolerance by a potential plant growth regulator, 5-aminolevulinic acid [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2013, 32:663–679.
- [4] Khan NA, Mobin & Samiullah M. The influence of gibberellic acid and sulfur fertilization rate on growth and S-use efficiency of mustard (*Brassica juncea*) [J]. *Plant and Soil*, 2005, 270:269–274.

华北地区长期施钾和秸秆还田对土壤钾素和作物产量的影响

赵士诚¹ 贾良良³ 何萍^{1,2}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 国际植物营养研究所北京办事处, 北京 100081; 3. 河北省农林科学院农业资源与环境研究所, 石家庄 050051)

摘要: 利用长期(20年)定位试验研究了施钾和秸秆还田对土壤钾水平和作物产量的影响。试验处理包括: 氮磷肥(NP), 氮磷肥+小麦秸秆(NPS), 氮磷钾肥(NPK), 氮磷钾肥+小麦秸秆(NPKS)。结果表明, 土壤钾平衡随钾投入总量(肥料钾和秸秆钾)的增加而增加。NP和NPS处理0-30厘米土层的土壤速效和缓效钾含量均较试验开始前降低, 施钾和秸秆还田可缓解土壤钾消耗和提高土壤钾水平。施钾和秸秆均可提高作物产量, 且玉米对钾肥的产量反应高于小麦。

关键词: 长期定位试验; 钾肥; 秸秆还田; 产量; 钾平衡

充足的土壤钾素供应是作物高产的保证。全球土壤钾水平在不断降低, 土壤钾缺乏也成为世界性难题^[1]。在中国, 不平衡施肥导致了严重的土壤钾消耗, 土壤钾缺乏也成为作物高产的限制因素之一。推广平衡施肥提高了钾肥投入, 但我国钾肥主要靠进口, 近年升高的钾肥价格增加了农业生产成本。因此, 高效施用钾肥在我国资源限制条件下意义重大。作物秸秆是重要的有机肥资源, 秸秆还田能返回农田大量的钾素。最近随秸秆还田机械的推广, 我国华北冬小麦-夏玉米轮作区域作物秸秆全量还田的比例越来越高。秸秆在田间的分解和养分释放较慢, 其对作物产量和土壤肥力、质量的影响短期很难显现^[2], 而长期定位试验能较好的反应不同养管理措施对作物产量和土壤肥力、质量的影响^[3]。几位学者研究了长期施肥和秸秆还田下表层土壤的养分变化^[4-5], 而 Breulmann 等^[6]认为研究深层土壤能得到更多的关于土壤养分变化的信息。我们通过定位试验研究了长期施钾和秸秆还田对华北土壤钾水平和作物产量的影响。

1 材料与方法

1.1 试验点和试验设计

长期定位试验位于河北省马兰农场(37°55'N, 115°13'E), 于1992年10月建立。试验点土壤为潮土, 轻质壤土, 基本理化性状为(0-20厘米土层): pH 8.6, 有机质 14.1 克/公斤, 碱解氮 69.7 毫克/公斤, Olsen-P 19.1 毫克/公斤, 速效钾 99.6 毫克/公斤, 缓效钾 1072 毫克/公斤, 全钾 23.4 克/公斤。试验采用冬小麦-夏玉

米轮作体系, 四个施肥处理为氮磷肥(NP)、氮磷肥+小麦秸秆(NPS)、氮磷钾肥(NPK)和氮磷钾肥+小麦秸秆(NPKS)。

在每一作物季节, 各处理的氮肥用量均为 15 公斤 N/亩(尿素, 46% N)。在小麦季, 三分之一的氮肥基施和三分之二的氮肥拔节期追施; 在玉米季, 三分之一的氮肥三叶期做基肥条施, 三分之二的氮肥在十叶期追施。两作物所有处理的磷肥以 6 公斤 P₂O₅/亩(过磷酸钙, 12% P₂O₅)用量基施, 钾肥仅在 NPK 和 NPKS 处理以 10 公斤 K₂O/亩(氯化钾, 60% K₂O)用量基施。NPS 和 NPKS 处理的小麦秸秆在玉米播前全部粉碎后还田, 其他处理的全部移出小区。自 1993 至 2006 年, 所有小区的玉米秸秆全移走, 自 2007 年玉米收获后, 所有处理小区的玉米秸秆全部还田。试验中选用当地高产品种, 田间管理参照高产田管理措施。

1.2 作物收获与采样

在每年作物成熟期各处理单收计产并取样分析。2012 年小麦收获后, 每处理小区选 5 点分 0-10、10-20、20-30、30-40、40-60、60-80 和 80-100 厘米取样, 同层 5 个土样组成混合样, 风干过筛后分析。

1.3 植株和土壤分析

植株和籽粒全钾用 H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮, 土壤全钾用 NaOH 熔融法, 土壤速效钾用 1M 醋酸铵浸提, 非交换钾用热硝酸浸提, 所有消煮和浸提液的钾含量用原子吸收法测定, 其中缓效钾为非交换钾与速效钾之差^[7]。

1.4 数据分析与统计

作物钾吸收根据作物生物量及其钾含量计算，每年土壤钾平衡根据下式计算：

土壤钾平衡 (公斤 K_2O / 亩) = 钾总投入 (肥料钾 + 秸秆钾) - 作物钾移走

数据利用 SPSS 13.0 软件进行方差分析，并根据 LSD 进行多重比较 ($p < 0.05$)，表格采用 Excell 2007 制作。

2 结果与分析

2.1 作物钾吸收和土壤钾平衡

各施肥处理间，每年的小麦钾吸收在 1993 - 1997 和 1998 - 2002 间变化趋势为：NP < NPS ≤ NPK ≤ NPKS，在 2003 - 2007 和 2008 - 2012 间为：NP < NPS < NPK = NPKS (表 1)。同一处理的玉米钾吸收随试验的进行逐年增加，在不同试验阶段处理间变化一致，为 NP < NPS < NPK = NPKS。

对于任一处理，1993 - 2007 年的年土壤钾平衡值低于 2008 - 2012 年，因为 2008 年后秸秆钾投入显著增加 (表 2)。在不同试验阶段，四个处理间钾平衡值变化为：NP < NPS < NPK < NPKS。在 1993 - 1997，1998 - 2002 和 2003 - 2007 年间，NP、NPS 和 NPK 处理每年的钾平衡值为负，而同期 NPKS 处理的值分别为 0.35、0.28 和 0.086 公斤 K_2O / 亩。结果说明秸秆还田在提高土壤钾肥力方面有重要作用，施钾和秸秆还田均可缓解土壤钾耗竭，且高量钾投入能较好提高此效果。

表 1 不同试验阶段各施肥处理的每年作物地上部钾吸收量 (公斤 K_2O / 亩)

试验阶段	NP	NPS	NPK	NPKS
小麦				
1993-1997	10.9a C	14.0a B	15.9a AB	16.7a A
1998-2002	11.6a C	15.3a B	16.1a AB	16.7a A
2003-2007	11.0a C	15.1a B	16.5a A	17.3a A
2008-2012	11.7a C	14.8a B	16.2a A	17.4a A
玉米				
1993-1997	6.5b C	9.4c B	11.2b A	12.0b A
1998-2002	7.3ab C	10.8b B	12.1b A	13.0b A
2003-2007	7.2ab C	12.3a B	15.3a A	16.4a A
2008-2011	8.0a C	13.6a B	16.4a A	17.7a A

不同小写字母表明同一作物不同试验阶段差异显著，不同大写字母表明同一试验阶段处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

表 2 不同试验阶段各施肥处理的每年田间钾平衡 (公斤 K_2O / 亩)

试验阶段 / 处理	年钾投入		年作物钾移走	年土壤钾平衡
	肥料钾	秸秆钾 ^a		
1993 - 1997				
NP	--	--	17.5c	-17.5d
NPS	--	11.7b	23.4b	-11.1c
NPK	20	--	27.1a	-7.1b
NPKS	20	13.9a	28.7a	52a
1998 - 2002				
NP	--	--	18.9c	-18.9d
NPS	--	12.7b	26.1b	-13.4c
NPK	20	--	28.3a	-8.3b
NPKS	20	14.0a	29.8a	4.2a
2003 - 2007				
NP	--	--	18.2c	-18.2d
NPS	--	12.5b	27.4b	-14.9c
NPK	20	--	31.8a	-11.8b
NPKS	20	15.0a	33.7a	1.3a
2008 - 2012				
NP	--	6.2d	19.6c	-13.5d
NPS	--	22.7b	28.4b	-5.7c
NPK	20	13.3c	32.6a	0.6b
NPKS	20	27.3a	35.1a	12.2a

不同字母表明同一试验阶段处理间差异显著 ($p < 0.05$)。
^a 1993-2007 年秸秆钾投入来自小麦秸秆，2008-2012 年秸秆钾投入来自小麦和玉米秸秆。

2.2 土壤钾变化

NP 处理的土壤速效钾从 30 - 40 厘米至 0 - 10 厘米土层逐步降低，而 NPK 和 NPKS 处理呈现相反趋势 (表 3)。除 NPKS 处理 30 - 40 厘米土层速效钾显著高于 60 - 80 和 80 - 100 厘米土层外，土层深度对其它处理 30 厘米以下速效钾没有影响。在 0 - 10 和 10 - 20 厘米土层，所有处理间速效钾差异显著，变化趋势为 NP < NPS < NPK < NPKS；在 20 - 30 厘米，处理间速效钾变化趋势为 NP ≤ NPS ≤ NPK = NPKS > NPS；而 30 厘米土层以下各处理间差异不显著。

对同一处理，30 厘米土层以下各层土壤缓效钾没有显著差异 (表 4)。NP 处理 0 - 30 厘米土层的缓效钾显著低于 30 厘米以下各层的含量。对于 NPS 和 NPK 处理，除 NPS 处理 10 - 20 和 20 - 30 厘米土层缓效钾含量较低和 NPK 处理 0 - 10 厘米较高外，其它土层的缓效钾相似。NPKS 处理的缓效钾自 30 - 40 厘米至 0 - 10 厘米土层逐步增加。在 0 - 10 厘米土层，处理间缓效钾显著变化为：NP < NPS < NPK < NPKS；在 10 - 20 和 20 - 30 厘

表3 不同施肥处理下不同土层土壤有效钾(毫克 K/公斤)

土层(厘米)	NP	NPS	NPK	NPKS
0-10	83.8c D	96.1b C	138.7a B	194.7a A
10-20	84.5cD	98.2b C	119.2b B	150.7b A
20-30	92.4bc B	99.8ab AB	113.4b A	118.5c A
30-40	102.3ab A	110.6ab A	115.8b A	114.9c A
40-60	114.0a A	114.2a A	114.0b A	109.8cd A
60-80	111.1a A	112.4a A	116.2b A	105.3d A
80-100	106.6a A	111.4ab A	117.2b A	104.2d A

不同小写字母表明同一作物不同土层间差异显著,不同大写字母表明不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同

表4 不同施肥处理下不同土层土壤缓效钾(毫克 K/公斤)

土层(厘米)	NP	NPS	NPK	NPKS
0-10	657.9b D	756.2ab C	1234.2a B	1516.7a A
10-20	663.1b C	672.1b C	867.5b B	1099.9b A
20-30	624.9b C	667.90b C	768.0b B	881.8c A
30-40	823.0a A	790.1a A	835.6b A	876.2cd A
40-60	778.6a A	768.1ab A	831.3b A	838.9cd A
60-80	768.9a A	784.6a A	790.0b A	788.7d A
80-100	782.3a A	795.0a A	823.5b A	809.7cd A

表5 不同施肥处理下不同土层间土壤总钾(毫克 K/公斤)

土层(厘米)	NP	NPS	NPK	NPKS
0-10	22.4a A	22.6a A	23.3a A	24.0a A
10-20	23.1a A	23.4a A	23.3a A	23.9a A
20-30	24.0a A	23.4a A	23.4a A	24.0a A
30-40	24.1a A	22.5a A	23.3a A	23.4a A
40-60	24.0a A	22.8a A	23.8a A	23.9a A
60-80	24.2a A	24.0a A	23.7a A	23.57a A
80-100	24.3a A	23.4a A	24.0a A	23.8a A

米土层,处理间变化为:NP = NPS < NPK < NPKS。而30厘米以下各土层的缓效钾含量没有显著差异。

施肥处理和土层均没有显著影响土壤全钾含量(表5)。而与试验起始土壤相比较,NP、NPS和NPK处理0-10厘米土层的全钾含量分别降低了4.3%、3.4%和0.4%,而NPKS处理增加了2.6%。

2.3 作物产量

从1993至2012年,NP处理每年小麦产量相似;而NPS和NPK处理2008-2012年的年小麦产量显著高于2003-2007年,NPKS处理2008-2012年的年小麦产量显著高于1993-1997年和2003-2007年(表6)。在1993-1997年,各处理的年小麦产量没有差异,而自

表6 不同试验阶段不同处理下每年小麦和玉米产量(公斤/亩)

试验阶段	NP	NPS	NPK	NPKS
小麦				
1993-1997	385.5a A	402.3ab A	423.5ab A	425.4b A
1998-2002	411.5a B	431.7a A	440.3ab A	455.3ab A
2003-2007	381.1a B	396.3b AB	418.7b AB	426.0b A
2008-2012	416.8a B	444.8a AB	458.9a A	472.1a A
玉米				
1993-1997	372.2c B	386.0c B	420.7d A	424.2d A
1998-2002	390.1c B	415.8c B	465.5c A	470.7c A
2003-2007	459.3b C	512.6b B	568.3b A	578.3b A
2008-2011	492.7a C	562.3a B	623.2a A	634.1a A

不同小写字母表明同一作物不同试验阶段差异显著,不同大写字母表明同一试验阶段处理间差异显著($p < 0.05$)。

1998年后,NP处理的年小麦产量较其它处理显著降低。所有处理的年玉米产量均随试验的进程逐年增加。在1993-1997和1998-2002年,各处理年玉米产量变化为NP = NPS < NPK = NPKS,在2003-2007和2008-2012年,各处理年玉米产量变化为NP < NPS < NPK = NPKS。

3 讨论

施肥不平衡是导致土壤速效钾耗竭的主要原因,本研究NP和NPS处理0-30厘米土层速效钾较试验前显著降低,年土壤钾平衡为负值,是因为每年总的钾投入量低于总的作物钾移走量。2008年玉米秸秆还田后,NPK处理的土壤钾平衡开始为正值,其它处理的钾平衡值也显著增加。结果表明秸秆还田在提高土壤钾素肥力方面具有重要作用,施用钾肥和秸秆还田均可提高土壤钾水平和缓解土壤钾消耗,而高量钾素投入可提高此效果。土壤速效钾和缓效钾间存在一个相互转化的动态平衡,当速效钾含量低于一定阈值后,部分缓效钾就会转化为速效钾供作物吸收利用^[2,8]。NP和NPS处理0-20厘米土层缓效钾较试验前显著降低,可能因为长期植物耗竭下土壤速效钾显著降低,部分缓效钾转化为速效钾。同时,华北石灰性潮土富含云母和高岭石,风化程度较高^[9],矿物钾或难溶性钾也可转化和释放出速效钾。Sheldrick等^[10]发现低肥力条件下植物吸收的钾很大一部分来自土壤固持态钾。因此,长期负的钾平衡导致NP和NPS处理0-10厘米土层全钾较试验前出现稍降趋势,且其土层全钾在持续不平衡

施肥下将会随试验的进展进一步降低。此外, NPKS 处理土壤钾平衡为盈余, 部分速效钾可转化为缓效钾和难溶性钾, 导致其表层含量较试验前增加。

尽管 1993–1997 和 2003–2007 年间各处理间小麦产量差异不显著, 钾肥施用和 / 或秸秆还田提高了小麦产量。而 NPS 和 NPK 处理的玉米产量分别较 NP 处理增加了 3.7–14.1% 和 13.0–26.5%, 表明施钾和秸秆还田均可提高作物产量。钾肥施用下玉米的增产速率显著高于小麦, 一是因为玉米季的秸秆还田量高于小麦季, 二是玉米对钾肥的产量反应较小麦敏感^[11], 因此有限的钾肥资源应优先施用于玉米。

整个试验过程中 NPS 处理的土壤钾平衡值均为负, 说明仅秸秆还田不能维持土壤钾平衡和实现作物高产, 仍需补施一定量的钾肥。NPKS 处理土壤钾平衡显著高于 NPK 处理, 但其作物产量并没有显著增加, 说明双作

物秸秆还田下每年施钾 20 公斤 K_2O / 亩是不经济的, 根据本研究各处理的土壤钾平衡和作物产量变化, 在我国华北地区小麦–玉米轮作体系秸秆全量还田下年施钾 8 公斤 K_2O / 亩对于维持作物高产和土壤钾平衡是可行和合理的。

4 结论

本研究表明施钾和秸秆还田缓解了土壤钾消耗和提高了土壤钾肥力, 且高量钾投入提高了此效果。与试验前土壤相比较, 不同施肥措施主要影响 0–30 厘米土层的速效钾、缓效钾和 0–10 厘米土层全钾。施钾和秸秆还田均可提高作物产量, 而仅秸秆还田不能满足作物高产和维持土壤钾平衡, 有限的钾肥应优先用于玉米以提高其产量和钾肥效率。

参考文献

- [1] Malo DD, Schumacher TE, Doolittle JJ. Long-term cultivation impacts on selected soil properties in the northern Great Plains [J]. *Soil Till. Res.*, 2005, 81:277–291.
- [2] Wang HY, Shen QH, Zhou JM, et al. Plants use alternative strategies to utilize nonexchangeable potassium in minerals [J]. *Plant soil.*, 2010, 343:209–220.
- [3] 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]. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 2012, 92:21–33.
- [4] 曹彩云, 李科江, 崔彦宏, 等. 长期定位施肥对夏玉米子粒灌浆影响的模拟研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14:48–53.
- [5] Zhang WJ, Wang XJ, Xu MG, et al. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China [J]. *Biogeosciences.*, 2010, 7:409–425.
- [6] Breulmann M, Schulz E, Weißhuhn K, et al. Impact of the plant community composition on labile soil organic carbon, soil microbial activity and community structure in semi-natural grassland ecosystems of different productivity [J]. *Plant Soil*, 2012, 352:253–265.
- [7] 鲁如坤. 土壤农化分析 [M]. 中国过农业技术出版社. 北京.
- [8] Martin HW, Sparks DL. On the behavior of nonexchangeable potassium in soils [J]. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.*, 1985, 16(2):133–162.
- [9] Tan DS, Jin JY, Jiang LH, et al. Potassium assessment of grain producing soils in North China [J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2012, 148:65–71.
- [10] Sheldrick WF, Syers JK, Lingard J. Soil nutrient audits for China to estimate nutrient balances and output/input relationships [J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2003, 94:340–345.
- [11] Sharma A, Jalali VK, Arora S. Non-exchangeable potassium release and its removal in foot-hill soils of North-west Himalayas [J]. *Catena.*, 2010, 82:112–117.

长期不同施肥对双季稻产量及土壤基础地力的影响

廖育林 鲁艳红 聂军* 周兴 谢坚 杨曾平 吴浩杰

(湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125)



摘要: 利用长期定位施肥试验并结合盆栽试验, 研究长期不同施肥模式对双季稻产量和土壤基础地力的影响, 并分析水稻产量和肥料贡献率对土壤不同基础地力的响应。结果表明: 长期施用氮磷钾肥 (NPK) 或氮磷钾肥配施稻草 (NPKS) 有利于双季稻产量的增加。NPK 处理的早稻产量、晚稻产量和年总产量分别较对照 (CK) 处理增产 100.7%、67.0% 和 81.9%, NPKS 处理分别增产 113.8%、77.7% 和 93.7%。CK 处理早稻基础地力产量随试验年限的增加呈极显著下降趋势 ($p < 0.01$), 晚稻基础地力产量在试验的前 9 年随年限增加呈极显著下降 ($p < 0.01$), 之后基本维持稳定。长期施用氮磷钾肥或氮磷钾肥配施稻草有利于土壤基础地力的提升。土壤基础地力产量和基础地力贡献率均表现为 NPKS > NPK > CK。NPK 和 NPKS 处理早稻基础地力产量分别较 CK 提高 38.5% 和 68.1%, 晚稻分别提高 25.8% 和 49.0%。NPK 和 NPKS 处理早稻基础地力贡献率分别较 CK 提高 21.4% 和 54.9%, 晚稻分别提高 12.8% 和 22.8%。无论施肥或不施肥, 早晚稻产量均随土壤基础地力产量提高而增加; 肥料对早晚稻产量贡献率随基础地力产量提高而极显著降低。土壤有机质、全氮、速效钾是影响土壤基础地力的主要养分因子, 土壤全磷、全钾、碱解氮、有效磷对土壤基础地力也产生重要影响。

关键词: 长期施肥; 红壤性水稻土; 水稻产量; 土壤基础地力

中国是世界上最大的水稻生产国和消费国, 保证稻谷产量对国家粮食安全具有重大意义^[1]。然而, 近年来由于城市化的快速发展和人口数量的急剧增加, 总耕地面积和人均耕地面积均呈“刚性”减少的趋势, 且在有限的耕地资源中, 中低产田比例大, 约占 70%, 严重制约我国粮食持续增产^[2]。因此, 加强农田基础地力培育和挖掘农田生产潜力成为农业生产中急需探索和解决的科学问题。

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^[3]。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^[4-5], 然而长期不施肥处理土壤处于一种长期养分消耗状态, 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。利用长期施肥的土壤, 采用盆栽试验, 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, 才能更加准确地表征长期不

同施肥模式下的基础地力状况。因此, 通过采集长期不同施肥措施下的土壤进行施肥与不施肥的对比盆栽试验, 研究长期不同施肥措施下土壤基础地力。

本文以红壤性水稻土长期定位施肥试验为基础, 研究不施肥 (CK)、施用氮磷钾肥 (NPK) 和氮磷钾肥与稻草配施 (NPKS) 三种长期施肥模式下双季稻产量和土壤基础地力产量的演变规律; 并采集三种施肥模式下长期定位施肥试验的土壤进行盆栽试验, 研究长期不同施肥模式下当季不施肥基础地力产量和基础地力贡献率的差异; 并进一步探讨不同基础地力对水稻产量效应和肥料贡献率的影响, 以及影响土壤基础地力的关键养分因子, 以期为红壤性水稻土的地力提升与培育提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 长期定位试验区概况

长期定位施肥试验位于湖南省望城县黄金乡 (北纬

基金项目: 国际植物营养研究所 (IPNI) 资助项目 (Hunan-19)。

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工作。

28° 16′ 24″，东经 112° 49′ 24″)。试验区年均降雨量为 1385 毫米，年平均气温 17℃，年均无霜期约 300 天。供试土壤为第四纪红土发育的水稻土（粉质轻黏土，土壤系统分类名称为普通筒育水耕人为土）。

1.2 长期定位施肥试验设计

本研究选择长期定位施肥试验中的 3 种处理：不施任何肥料（CK）、施氮磷钾化肥（NPK）和氮磷钾化肥 + 稻草（NPKS）。各处理设 3 次重复，随机区组排列。小区面积为 66.7 平方米，小区间用 30 厘米宽水泥埂隔开，区组间的排水沟宽度为 50 厘米，区组间用水泥埂隔开，以避免灌溉水串灌和处理之间的交叉污染。N、P、K 化肥品种分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。在 1981—2013 年期间，氮肥按早稻 10 公斤 N/亩和晚稻 12 公斤 N/亩施入；磷肥按早稻、晚稻各 2.58 公斤 P/亩施入；钾肥按早稻、晚稻各 6.64 公斤 P/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。稻草在耕田时撒施，并混入土壤。磷肥、钾肥全部

做基肥于插秧前一天施入。70% 的氮肥于插秧前一天做基肥施入，余下 30% 在分蘖期做追肥施入。

供试水稻品种：早稻为常规水稻品种，晚稻为常规水稻品种或杂交水稻组合。早稻于 4 月底移栽，7 月中旬收获；晚稻于 7 月中下旬移栽，10 月下旬收获。移栽前秧苗生长期为 30—35 天，常规稻每穴栽 4—5 株秧苗，杂交稻每穴栽 1—2 株秧苗，株行距 20 厘米 × 20 厘米。晚稻收获后冬闲。其他田间管理措施与当地农民的大田管理相同。1981—2013 年每年早稻和晚稻成熟期对长期定位施肥试验每个小区进行测产，小区单打单晒，分别称重测产。

1.3 盆栽试验设计

盆栽试验在湖南省农业科学研究院盆栽试验场进行。2011 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）用于基本理化性状的测定。土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾含量采用常规分析法测定^[6]。盆栽试验的土壤基本理化性状见表 1。



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 ¹⁾	有机质	全氮	碱解氮	全磷	有效磷	全钾	速效钾
	(克/公斤)			(毫克/公斤)			
CK	33.14	2.29	115.5	0.51	3.80	13.7	86.5
NPK	36.02	2.46	119.7	1.08	23.65	14.0	105.0
NPKS	38.55	3.02	136.6	1.16	24.35	14.1	136.5

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

盆栽试验是在长期施肥处理土壤基础上设置施肥 (NPK 化肥) 和不施肥处理, 3 次重复。试验采用的陶瓷钵钵高 32.0 厘米, 直径 20.0 厘米, 每钵装土 10.0 公斤。盆栽土壤均过 5 毫米筛, 混合均匀装钵后, 浸水两天使土壤完全湿润后再施基肥。插秧时每钵 3 穴, 水稻品种、农事操作方式和时间与长期定位施肥试验一致。试验采用早稻-晚稻-冬闲模式。2012 年早稻和晚稻成熟后每钵钵水稻分别测产。

1.4 数据计算与处理

基础地力产量和基础地力贡献率是反映农田基础地力的综合性指标^[7]。

基础地力产量 = 当季不施肥处理产量;

基础地力贡献率 (%) = 当季不施肥处理产量 / 当季施肥处理产量 × 100%;

肥料贡献率 (%) = (当季施肥处理产量 - 当季不施肥处理产量) / 当季施肥处理产量 × 100%。

数据处理及分析采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7.5 等数据处理软件进行。

2 结果

2.1 长期不同施肥处理对水稻产量的影响

长期定位施肥试验各处理早稻、晚稻产量及年总产量年间变化较大 (图 1)。从各处理产量随年份变化趋势来看, 33 年间早稻 CK 处理产量随试验年限增加呈极显著下降趋势 (回归方程为: $y = -0.0317x + 3.2705$, $R^2 = 0.240^{**}$), NPK 处理和 NPKS 处理早稻产量随试验年份增加变化不显著。33 年间晚稻 CK 处理产量随试验年份增加变化不显著, 而 NPK 和 NPKS 处理晚稻产量随试验年限增加呈极显著增加趋势 (回归方程分别为: $y = 0.0418x + 5.0417$, $R^2 = 0.2562^{**}$; $y = 0.0454x + 5.3483$,

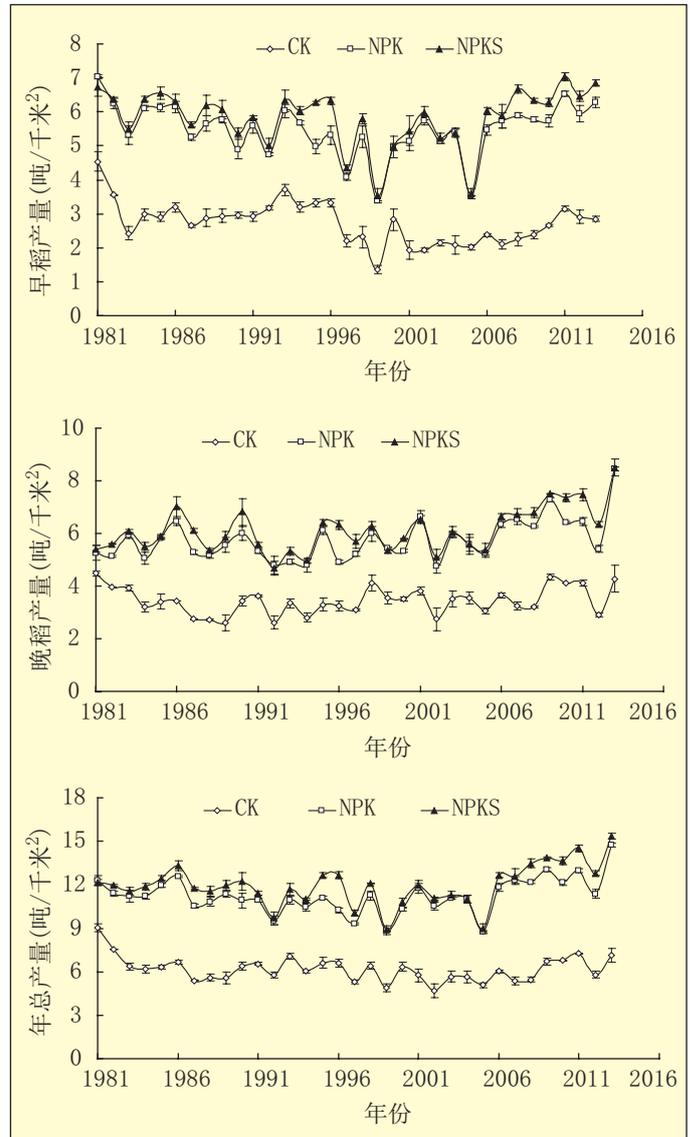


图 1 不同施肥处理水稻产量随试验年限的变化

$R^2 = 0.2729^{**}$)。33 年 CK、NPK 和 NPKS 处理稻谷年总产量总体上随试验年份增加变化均不显著。

33 年间所有年份 NPK 和 NPKS 处理的早稻、晚稻及年总产量均极显著高于 CK 处理 ($p < 0.01$)。NPK 和 NPKS 处理 33 年平均产量也极显著高于 CK 处理 ($p < 0.01$), 其中, NPK 处理早稻、晚稻和年总产量分别较

CK 处理增产 100.7%、67.0% 和 81.9%，NPKS 处理分别较 CK 处理增产 113.8%、77.7% 和 93.7%。NPKS 处理 33 年平均早稻、晚稻和年总产量较 NPK 处理分别增产 6.5%、6.4% 和 6.5%，达到极显著水平 ($p < 0.01$)。试验结果表明氮磷钾化肥配合施用及化肥氮磷钾与稻草配合施用是维持红壤性稻田持续高产的有效途径。

2.2 长期不施肥土壤基础地力产量的演变

长期不施肥处理 (CK) 产量的变化反映了长期不施肥条件下土壤基础地力的变化。由图 2 可见, 33 年长期不施肥土壤早稻基础地力产量 (y) 随试验年限 (x) 的

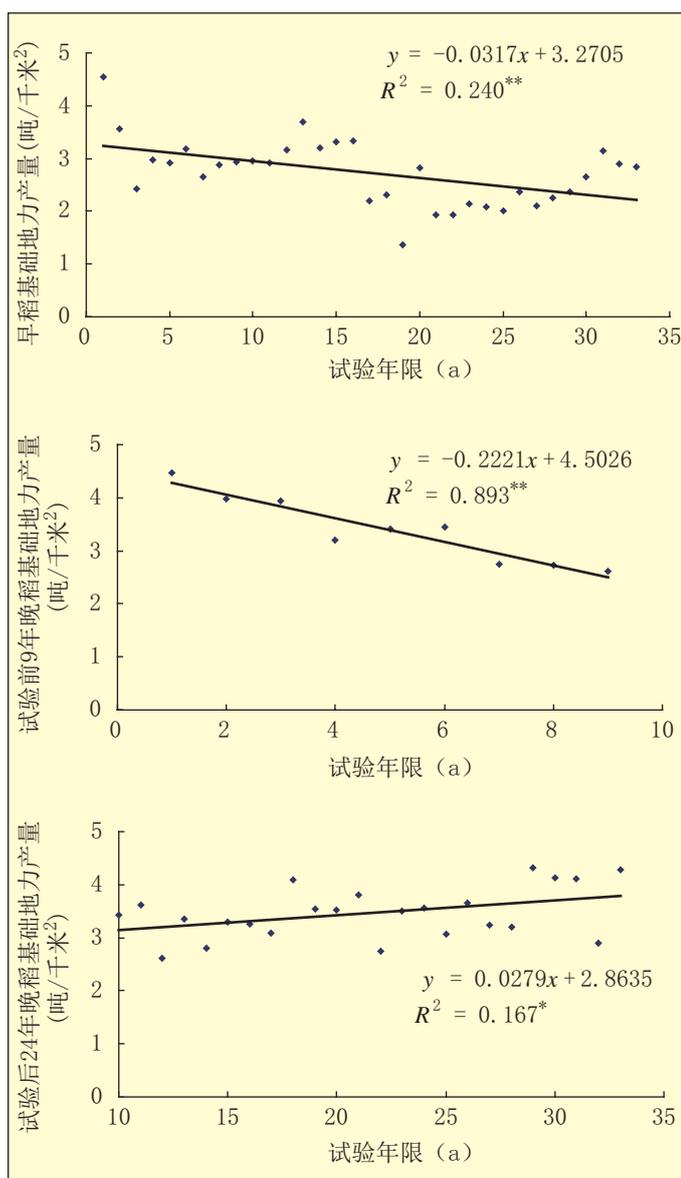


图 2 长期不施肥处理早稻、晚稻土壤基础地力产量变化

变化方程表明长期不施肥导致早稻土壤基础地力产量按 0.0317 吨 / 公顷 · 年的速率下降, 且随试验年限增加达到极显著水平 ($p < 0.01$)。

33 年长期不施肥土壤晚稻基础地力产量总体上随试验年限增加无显著变化。但进一步分析发现, 试验的前 9 年不施肥土壤晚稻基础地力产量随试验年限增加呈极显著下降 ($p < 0.01$); 之后的 24 年不施肥土壤晚稻基础地力产量基本维持稳定。长期不施肥处理的晚稻基础地力产量在试验前期 (前 9 年) 随年份急剧下降, 之后晚稻基础地力产量即使在不施肥的条件下也基本维持稳定, 说明长期不施肥导致晚稻土壤基础地力产量下降主要发生在试验的前期。

2.3 长期不同施肥处理对基础地力产量和施肥产量的影响

基于盆栽试验的长期不同施肥处理对基础地力产量 (不施肥产量) 的影响结果如图 3 所示, 早稻、晚稻三种长期不同施肥处理的土壤基础地力产量均表现为: $NPKS > NPK > CK$, 说明长期氮磷钾肥配合施用或氮磷钾化肥与稻草配施有利于维持或提高土壤基础地力产量, 长期不施肥则会导致土壤基础地力产量降低。经过 1981-2011 年 31 年 62 季水稻种植后, 长期施氮磷钾肥早稻基础地力产量较长期不施肥提高 38.5%, 长期氮磷钾肥与稻草配施较长期不施肥提高 68.1%; 长期施氮磷钾肥晚稻基础地力产量较长期不施肥提高 25.8%, 长期氮磷钾肥与稻草配施较长期不施肥提高 49.0%。

长期氮磷钾肥与稻草配施 (NPKS)、长期施氮磷钾肥 (NPK) 和长期不施肥 (CK) 三种不同基础地力土壤上, 施肥或不施肥的早晚稻产量均表现为: $NPKS > NPK > CK$ (图 3)。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, 说明土壤基础地力越高, 作物的产量潜力就越大, 越容易获得高产。施用相同用量肥料对不同基础地力土壤上的早晚稻增产幅度不同。长期定位试验 CK 处理土壤上施用氮磷钾肥较其基础地力产量早晚稻分别提高 265.3% 和 139.5%; NPK 处理土壤上施用氮磷钾肥较其基础地力产量早晚稻分别提高 180.1% 和 110.7%; NPKS 处理土壤上施用氮磷钾肥较其基础地力产量早晚稻分别提高 136.6% 和 89.6%。施肥对基础地力低的土壤的增产幅度大于基础地力高的土壤, 这一现象可能主要与基础地力低的土壤其基础地力产量过低有关。

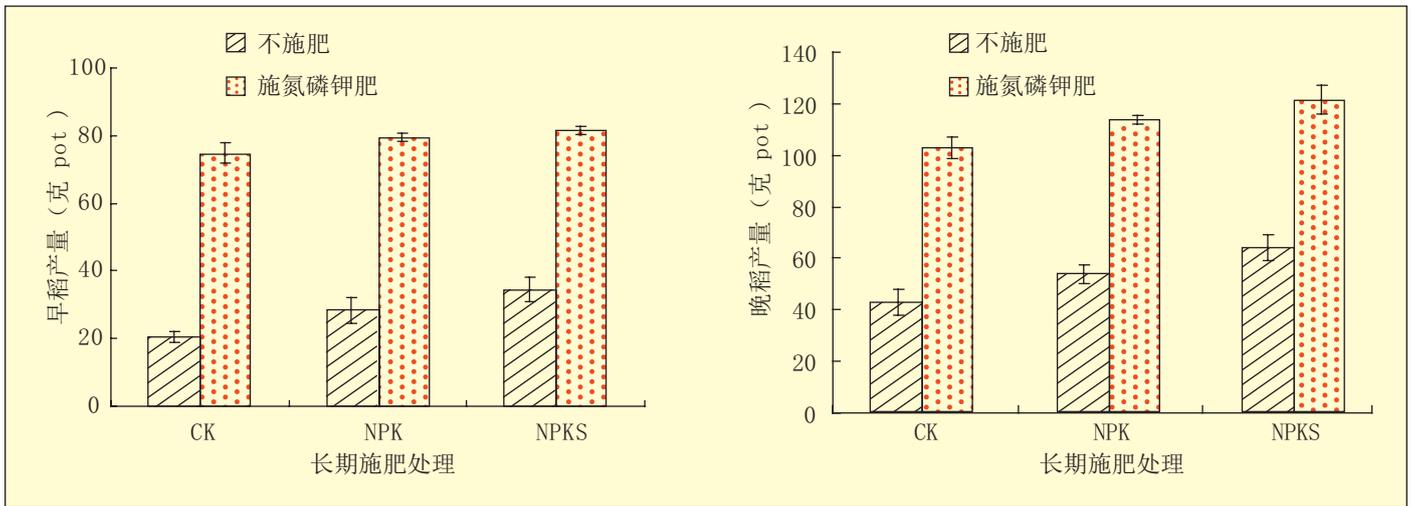


图3 长期不同施肥处理对土壤基础地力产量和施肥产量的影响

2.4 长期不同施肥处理对基础地力贡献率和肥料贡献率的影响

经过31年62季水稻种植后,长期不同施肥处理对红壤性水稻土壤基础地力贡献率的影响有明显差异(图4)。早稻、晚稻土壤基础地力贡献率均表现为: NPKS > NPK > CK。其中, NPK早稻基础地力贡献率较CK提高21.4%, NPKS较CK提高54.9%; NPK晚稻基础地力贡献率较CK提高12.8%, NPKS较CK提高22.8%。说明长期氮磷钾肥配施或长期氮磷钾肥配施稻草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。

分析不同基础地力土壤的肥料贡献率(图4)可知,基础地力越高,早晚稻肥料对产量的贡献率越低。长期定位试验CK处理、NPK处理和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

肥料贡献率分别为58.3%、52.5%和47.3%,肥料贡献率均表现为: CK > NPK > NPKS。

肥料贡献率(y)随土壤基础地力产量(x)的提高呈极显著($p < 0.01$)降低,回归方程 $y = -0.5227x + 80.082$, $R^2 = 0.920^{**}$,表明提高土壤基础地力可以降低水稻产量对肥料的依赖,从而适当降低肥料施用量。因此,中低产田基础地力的培育和提升不但对保障粮食高产、稳产具有十分重要的意义,同时基础地力的提升还可以适量降低肥料用量,提高肥料利用效率。

2.5 双季稻田基础地力的主要影响因素

盆栽试验前土壤养分含量与早晚稻基础地力贡献率的相关性分析(表2)表明,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土壤有机质、全氮、速效钾含量的相关性达到极显著水

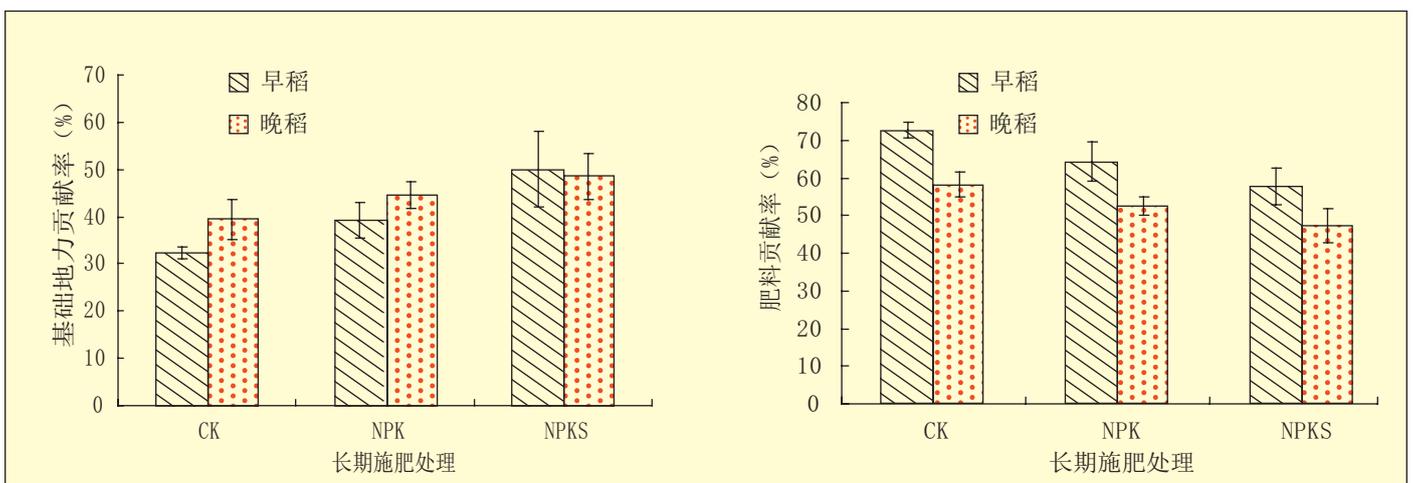


图4 长期不同施肥对土壤基础地力贡献率和肥料贡献率的影响

平 ($p < 0.01$), 与土壤全磷、全钾、碱解氮、有效磷含量的相关性达显著水平 ($p < 0.05$)。表明土壤有机质、全氮、速效钾是影响土壤基础地力的主要养分因子, 土壤全磷、全钾、碱解氮、有效磷也是影响土壤基础地力的次要养分因子。

表 2 基础地力贡献率与土壤养分因子关系模型

土壤养分因子	拟合模型	显著性检验
有机质	$y = 0.3267x + 22.066$	$R^2 = 0.804^{**}$
全氮	$y = 0.045x + 0.6831$	$R^2 = 0.767^{**}$
碱解氮	$y = 1.3055x + 68.661$	$R^2 = 0.753^*$
全磷	$y = 0.0383x - 0.7052$	$R^2 = 0.644^*$
有效磷	$y = 1.2028x - 33.677$	$R^2 = 0.586^*$
全钾	$y = 0.0238x + 12.926$	$R^2 = 0.720^*$
速效钾	$y = 3.0544x - 20.031$	$R^2 = 0.806^{**}$

注: **表示在 1% 水平相关性显著, *表示在 5% 水平相关性显著。

3 结论与讨论

长期不同施肥对南方双季水稻产量具有显著影响, 长期施用氮磷钾肥或氮磷钾肥配施稻草有利于双季水稻产量的提高, 尤其是长期氮磷钾肥配施稻草的增产效果更为明显。长期不施肥处理土壤早稻基础地力产量随试验年限推移呈极显著下降趋势, 晚稻基础地力下降主要发生在试验前 9 年, 之后基本维持稳定。长期施用氮磷钾肥或氮磷钾肥配施稻草有利于土壤基础地力的提升, 尤其是长期氮磷钾肥配施稻草。无论施肥或不施肥, 早晚稻产量均随土壤基础地力提高而增加, 且施用相同用量肥料基础地力低的土壤的增产幅度大于基础地力高的土壤。肥料对水稻产量贡献率随基础地力产量提高而极显著降低。在南方双季稻生产实践中, 化肥与稻草配施



不仅有利于水稻产量的稳产高产，还可培育和提升土壤基础地力，是南方水稻种植区一种较好的施肥模式。

本文利用长期定位并采集长期不同施肥处理土壤开展盆栽试验，将长期不同施肥模式土壤作为一个整体研究土壤基础地力，使水稻产量随基础地力“水涨船高”效应现象变得直观和容易理解，规避了土壤基础地力变化的复杂化学行为，探讨了三种施肥模式下土壤基础地力变化特征、土壤基础地力和肥料贡献率与产量和施肥量之间的变

化关系，可以预测肥料施入后土壤基础地力的变化和不同基础地力土壤供给作物养分的本质特征。本文仅就三种施肥模式对水稻产量、土壤基础地力和肥料贡献率等的影响进行了初步探讨，对于促进南方双季稻区科学合理培肥具有一定的现实意义。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] Peng S, Tang Q, Zou Y. Current status and challenges of rice production in China [J]. *Plant Production Science*, 2009, 12:3-8.
- [2] 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.
- [3] 贡付飞. 长期施肥条件下潮土区冬小麦-夏玉米农田基础地力的演变规律分析 [M]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- [4] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥方式对南方黄泥田水稻产量及基础地力贡献率的影响 [J]. *福建农业学报*, 2010, 25(5):631-635.
- [5] 李实焯, 王胜佳. 稻田多熟制中的地力贡献 [J]. *土壤通报*, 1988, 19(4):145-147.
- [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] 汤勇华, 黄耀. 中国大陆主要粮食作物地力贡献率和基础产量的空间分布特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(5):1070-1078.

长期施钾对春玉米土壤钾素状况的影响

侯云鹏¹ 谢佳贵¹ 仇少君² 何萍^{2,3} 金继运^{2,3}

(1. 吉林农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130124; 2. 农业部植物营养与肥料重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 国际植物营养研究所与中国农业科学院植物营养创新联合实验室, 国际植物营养研究所北京办事处)

摘要: 本研究探讨了 20 年每亩长期施用 7.5 公斤 K_2O 和 15 公斤 K_2O 对吉林春玉米雨养区典型黑土产量、土壤钾库和钾平衡的影响。研究表明, 尽管 20 年间春玉米产量变异较大, 但土壤内在钾养分供应(对照处理)能维持 466.7 公斤/亩的平均产量。与对照处理相比, 在 7.5 公斤 K_2O /亩和 15 公斤 K_2O /亩两个处理分别使平均产量增加 15.1% 和 13.8%。经过 20 年的钾肥施用, 由于过量施钾或钾肥施用与作物钾养分吸收时间不同步, 两个钾肥处理较对照处理显著增加 0–100 厘米的土壤剖面中速效钾, 但对缓效钾和全钾没有影响。因此, 钾肥增加籽粒产量和保持土壤速效钾方面具有重要作用。

关键词: 长期施钾玉米产量土壤钾素状况

钾(K)是植物必需营养元素之一。钾在细胞合成、养分摄取和转运、抗逆性和作物品质等方面扮演重要角色^[1]。当前, 为满足我国当前人口的粮食需求, 促进农作物产量持续高产, 需要包括钾肥合理施用在内的综合的肥料管理措施。

测土能有效评价土壤养分的有效性并相应的决定施肥量, 进而保持作物较高的产量和土壤生产力^[2]。目前, 根据“目标产量氮素需求量”和“0–90 厘米土壤无机氮贮存量”差异的土壤无机氮测试法成功应用于我国华北平原^[3]。那么, 该方法是否能做效地指示土壤钾库或指导的钾肥施用呢? 通常, 土壤速效钾和缓效钾是作物养分利用的重要库^[4], 钾肥施用后, 它们两个可以相互调节和补充, 且钾肥施用后可以在土壤中保留数年, 因此, 结合长期钾肥定位试验可以监测钾肥对谷物产量的影响和不同土层深度土壤钾素变化状况。

吉林春玉米生产区位于“黄金玉米带”, 在中国的总玉米产量中占 12.6%^[5]。该地区主要是旱作农业, 农民很少施用钾肥, 这对土壤钾素储存和缓冲能力产生潜在降低的影响。因此, 为了发展钾肥推荐施用和维持土壤的肥力, 本研究旨在根据长期钾肥定位试验探讨的钾肥施用对产量和农田钾平衡影响, 以及 0–100 厘米土壤剖面钾素变化。

1 材料与方法

1.1 试验设计与样品测定分析

该试验从 1993 年开始, 位于中国东北吉林省公主岭县刘房子村(43°34' N 124°53' E, 海拔 200 米)。在试验的二十年里, 超过 500 毫米的降水有七年, 少于 400 毫米的降水量有六年, 其余七年介于 400–500 毫米之间。土壤是典型黑土土壤(FAO), 1992 年玉米收获后采取的表层土壤(0–20 厘米)基本理化性质分别为: 有机质 22.4 克/公斤, pH 6.4(1:2.5 土水比), 全氮 1.23 克/公斤, 全磷 1.14 克/公斤, 全钾 20 克/公斤, 碱解氮 97.2 毫克/公斤, 速效磷 32.4 毫克/公斤, 速效钾 156.5 毫克/公斤, 缓效钾 1065.4 毫克/公斤。

试验采用完全随机区组, 三次重复, 三个处理。三个处理分别为(1)对照, 不施钾(K_0); (2) 7.5 公斤 K_2O /亩($K_{7.5}$); (3) 15 公斤 K_2O /亩(K_{15}), 钾肥基施, 钾肥种类为氯化钾。氮素施用总量为 15 公斤 N/亩, 四分之一的氮基施, 其余 3/4 在玉米 8–9 叶期施入, 氮肥种类为尿素; 磷肥施用量为 7.5 公斤 P_2O_5 /亩, 基肥施用, 磷肥种类为重过磷酸钙。春玉米垄耕, 播种在五月初, 收获在九月末。小区面积为长 10 米和 6 行春玉米, 行距 65 厘米, 株距为 23–34 厘米。其它的管理措施按农民习惯管理方法。

在收获时，以每个小区的三行进行采样，以确定玉米穗和秸秆产量、以及植株数。随机取五株地上部植株，分为玉米秸秆和籽粒二部分，在 60℃ 温度下烘干的重量。产量由三行玉米产量和五株玉米小样的比例计算而得。

土壤样品取自 2012 年各小区收获玉米后，土壤剖面中 100 厘米以上的土壤，分为 0-10、10-20、20-30、30-40、40-60、60-80、80-100 厘米，每个小区随机采集七点，每层土壤充分混匀。相应地，每层的土壤容重为 1.39、1.48、1.39、1.39、1.39、1.33 和 1.39 克/立方厘米，从保护行采集。植株样品钾含量分析采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消化法，原子吸收仪测定。土壤基本理化性质、速效钾、缓效钾和全钾分析方法见鲍士旦 (2000)。

1.2 数据处理

数据处理采用 SPSS 11.0 单因素方差分析法，5% 水平的 LSD 法检验。

2 结果分析

2.1 不同施钾处理玉米产量

1993-2012 年期间 (图 1)，两个钾肥施用处理增加粮食产量只有三年与对照处理不显著 ($p > 0.05$)。20 年间平均粮食产量增加约 66.7 公斤/亩，平均增长率为 15.1-13.8%，且两个钾肥处理对粮食增产率影响不显著 ($p > 0.05$)。在试验 20 年间，土壤内在钾素供应使每年平均产量保持在 466.7 公斤/亩 (K_0 处理)。

2.2 不同施钾处理土壤不同形态钾素含量变化

土壤速效钾随土壤深度的增加而增加 (图 2)，特别是 K_0 和 $K_{7.5}$ 处理。在 60 厘米以上每层土壤 (除 30-40 厘米外)， K_{15} 处理土壤速效钾显著 ($p < 0.05$) 高于 K_0 和 $K_{7.5}$ 处理。在 40 厘米以上，所有处理每层土壤缓效钾 (图 2) 保持稳定 ($p > 0.05$)，在 40 厘米以下土层随土壤

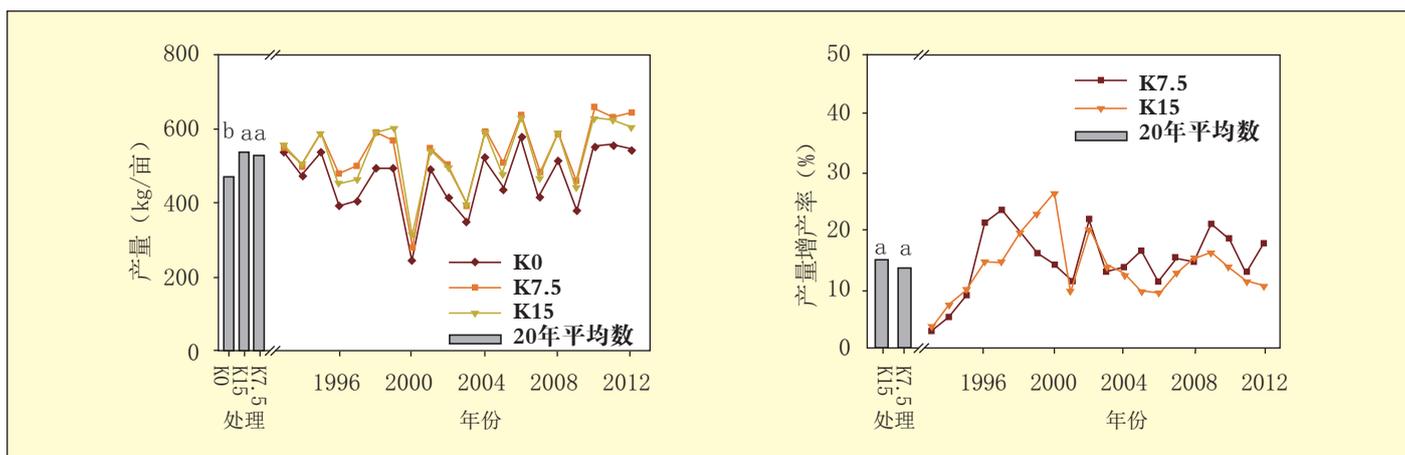


图 1 1993-2012 年不同处理籽粒产量及其增产率

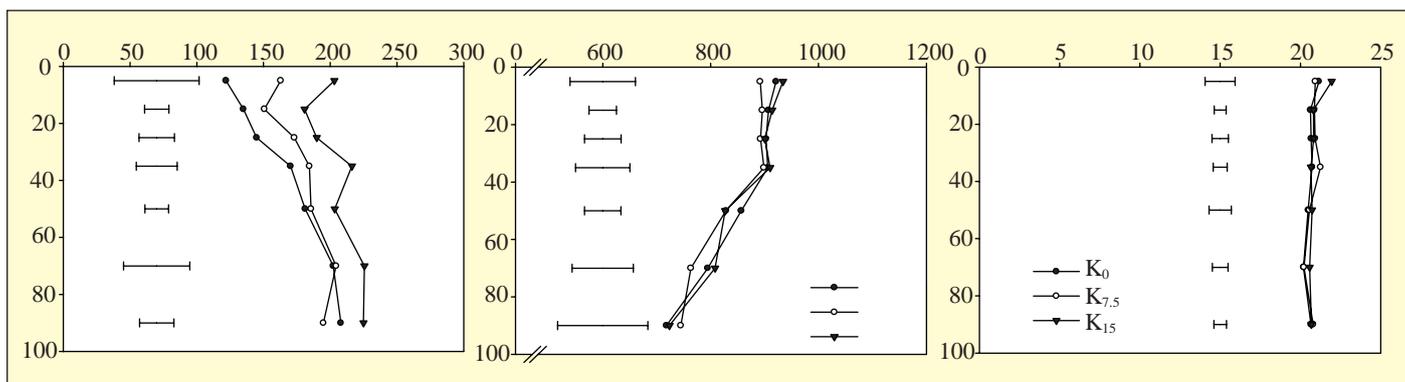


图 2 20 年钾肥施用后 0-1m 土壤剖面不同土层速效钾、缓效钾和全钾浓度 (2012 年春玉米收获后)

表 1 20 年钾肥施用后 0-1 米土壤剖面速效钾、缓效钾和全钾含量 (2012 年春玉米收获后) 单位: (公斤/亩)

处理	速效钾	缓效钾	全钾 ($\times 10^3$)
K ₀	160.0 b	766.7 a	19.0 a
K _{7.5}	166.7 b	773.3 a	19.2 a
K ₁₅	193.3 a	773.3a	19.3 a

注: K 下标代表不同处理 K₂O 量; 三次重复。每列不同字母表示 0.05 水平 LSD 检验。

深度有下降的趋势。土壤全钾 (图 2) 在 0-100 厘米土层稳定在 20 克/公斤, 虽然表层土壤 (0-10 厘米), K₁₅ 处理比其他两处理有略高, 但三个处理的每层土壤全钾差异不显著 ($p > 0.05$)。

经过 20 年钾肥施用 (表 1), 0-1 米土壤 K₁₅ 处理土壤速效钾含量显著 ($p < 0.05$) 高于其它两处理。但 K_{7.5} 处理与 K₀ 处理比较土壤速效钾含量接近。钾肥施用没有显著增加土壤缓效钾含量和全钾含量 ($p > 0.05$)。

2.3 不同施钾处理土壤钾素收支平衡

20 年钾肥施用后 (图 3), K₀、K_{7.5}、K₁₅ 处理地上部钾吸收量 (输出) 分别为 6.0, 8.3 和 9.6 公斤/亩·年。K₀ 和 K_{7.5} 处理显示钾的损失量分别为 6.0 和 2.0 公斤/亩·年; K₁₅ 处理盈余量为 2.8 公斤/亩·年。根据 1992 与 2012 年间在 0-20 厘米土层的速效钾含量的差值比较显示 (表 2), K₀ 处理土壤速效钾表现为亏缺, K₁₅ 处理土壤速效钾表现为盈余, 而 K_{7.5} 处理土壤速效钾基本保持平衡。相似的, 在缓效钾 K 损失为 K₀ > K_{7.5} > K₁₅。

讨论与结论

玉米对钾元素是比较敏感的。相对于不施钾, Niu

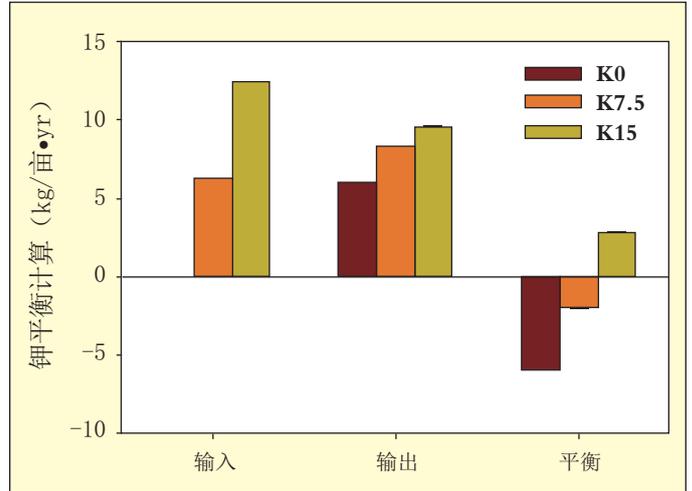


图 3 20 年间钾素年投入、年产出及钾平衡计算

注: 投入为钾肥施用量; 产出为地上部吸钾量; 钾平衡为投入减去产出。

等^[6]报道在华北平原钾肥施用能提高夏玉米常规生产产量 9.9% - 14.9%, 在我们的研究中 (图 1) 玉米产量的平均增长率, 与上述的研究结果非常接近。

土壤速效钾和缓效钾调节和补充作物地上部钾吸收^[7]。过量施钾与作物需求之间不同步导致 0-100 厘米土层速效钾淋洗 (图 2), Kolahchi 等^[8]对钾淋洗也有相关报道。在 0-30 厘米土层土壤速效钾的差异 (图 2) 是由于根系钾吸收和土壤对肥料钾素固定造成的。0-100 厘米土壤剖面的土壤缓效钾的变化趋势 (图 2) 是作物根系引的土壤风化起或土壤微生物造成的^[9], 因为大多数作物根集中在 30-40 厘米土壤深度, 并随土壤深度增加而减少^[10]。

根据 K 平衡计算, K₀、K_{7.5} 和 K₁₅ 处理分别表现为钾不足和盈余 (图 3); K₀ 处理 0-20 厘米土层速效和缓效钾损失的总和 (图 3) 低于地上部钾吸收量 (数据未显示), K_{7.5} 处理钾肥用量接近地上部钾的吸收 (数据未显示), K₁₅ 处理在 0-20 厘米表现为土壤速效钾盈余和缓效钾损

表 2 20 年钾肥施用后 0-20 厘米速效钾、缓效钾总损失和年损失量 (2012 年春玉米收获后)

处理	速效钾		缓效钾	
	总量 (公斤/亩)	Δ (公斤/亩·年)	总量 (公斤/亩)	Δ (公斤/亩·年)
K ₀	5.4	0.3	0.0	33.5
K _{7.5}	0.1	0.0	0.0	29.7
K ₁₅	-6.6	-0.3	0.0	27.8

注: 1992 年玉米收获后, 用 NH₄Ac 提取的 0-20 厘米土层速效钾、缓效钾浓度分别为 156.5 毫克/公斤和 1065.4 毫克/公斤。0-20 厘米土壤容重为 1.44 克/立方厘米, 该值为 2012 年 0-10 和 10-20 厘米土壤容重的平均值。负值表示钾剩余。

失(表2), Bhattacharyya 等^[9]也有类似的报道。这种现象是主要是由以下原因造成的:(1)根能吸收利用20厘米以下土层的速效和缓效钾;(2)从根区分泌的 H^+ 、根系和微生物呼吸过程中 H_2CO_3 形成、尿素的水解和酸化作用、以及酸性肥料(KCl)施用促进了土壤中 Ca^{2+} 释

放,并进一步增加 K^+ 的淋洗^[8-9];(3)与在土壤氮素相似,作物可能更喜欢同化土壤钾素,而不是肥料钾。

总之,钾肥施用可以显著($p < 0.05$)增加玉米产量,但当钾肥用量超过作物钾的需求或与作物生长不同步,不仅产量不增加,而且速效钾会发生淋洗现象。

参考文献

- [1] Pettigrew WT. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton [J]. *Physiol. Plant*, 2008, 133:670-681.
- [2] Slaton NA, Golden BR, Norman RJ, et al. Correlation and Calibration of Soil Potassium Availability with Rice Yield and Nutritional Status [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2009, 73:1192-1201.
- [3] Chen X, Zhang F, Römhild V, et al. Synchronizing N supply from soil and fertilizer and N demand of winter wheat by an improved Nmin method [J]. *Nutr. Cycl. Agroecosyst*, 2006, 74:91-98.
- [4] Garcia RA, Crusciol CAC, Calonego JC, Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system [J]. *Euro. J. Agron.*, 2008, 28:579-585.
- [5] 中华人民共和国农业部. 中国农业年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [6] Niu J, Zhang W, Chen X, et al. Potassium fertilization on maize under different production practices in the North China plain [J]. *Agron. J.*, 2011, 103:822-829.
- [7] Sharma, A., Jalali, V.K., Arora, S. Non-exchangeable potassium release and its removal in foot-hill soils of north-west Himalayas [J]. *Catena*, 2010, 82:112-117.
- [8] Kolahchi Z and Jalali M. Effect of water quality on the leaching of potassium from sandy soil [J]. *J. Arid Environ.*, 2007, 68:624-639.
- [9] Bhattacharyya R, Prakash V, Kundu S, et al. Potassium balance as influenced by farmyard manure application under continuous soybean-wheat cropping system in a Typic Haplaquept [J]. *Geoderma*, 2006, 137:155-160.
- [10] Peng Y, Niu J, Peng Z, et al. Shoot growth potential drives N uptake in maize plants and correlates with root growth in the soil [J]. *Field Crops Res.*, 2010, 115:85-93.

水稻移栽不同基本苗数的施肥效果试验

屈佳君 马自波 李 荣 罗和清 丁平刚

(麻城市土肥站, 麻城 438300)

摘要: 通过田间小区试验, 研究水稻在不同的移栽基本苗数下施用不同用量配方肥所产生的效果, 探索实现水稻高产所需要的移栽基本苗数及相应的施肥数量, 为水稻高产稳产提供科学指导。结果表明: 在相同施肥水平下, 不同的移栽基本苗数对水稻产量没有显著性影响。在相同基本苗数下, 不同施肥用量对水稻产量有显著影响, 达到极显著差异水平。

关键词: 水稻; 基本苗数; 配方肥; 产量; 效果

水稻是湖北麻城主要种植作物, 常年种植面积 75 万亩, 通过探索水稻高产所需要的移栽基本苗数及配方肥施用数量, 为水稻高产稳产提供科学指导, 为此, 我们进行了水稻移栽不同基本苗数的施肥效果试验。

1 试验方法

1.1 试验地点与田块种植情况

试验安排在阎家河镇桃林河村丁平武的责任田, 地处东经 115.0954 度, 北纬 31.17096 度, 海拔 67.2 米。

1.2 试验田块供试作物和土壤

试验田所种植作物为中稻, 品种为丰两优 4 号。土壤为潴育型水稻土沙泥田, 试验施肥前, 采集土壤农化样, 按土壤常规测试方法进行测试^[1-2], 测试结果为有机质

15.6 克/公斤, 碱解氮 192 毫克/公斤, 有效磷 9.7 毫克/公斤, 速效钾 83 毫克/公斤, pH 值 5.4。

1.3 试验设计

1.3.1 A、B 两因素随机区组试验

A 因素为配方肥施用量: 设 4 个水平, A₀ 为不施肥、A₁ 为亩施用配方肥 20 公斤、A₂ 亩施用配方肥 40 公斤、A₃ 亩施用配方肥 60 公斤。

B 因素为移栽基本苗数: 设 3 个水平, B₁ 为每亩 6 万左右 (小区移栽 22 行 × 35 蔸 × 3.5 茎蘖苗)、B₂ 为 10 万左右 (22 行 × 35 蔸 × 5.8 茎蘖苗)、B₃ 为 14 万左右 (22 行 × 35 蔸 × 8.2 茎蘖苗)。各处理及对应的代号见表 1。

1.3.2 小区设计

采用随机区组试验, 用长 18 米、宽 5 米, 面积为 90

表 1 试验设计及施肥方案

区组	代号	处理	配方肥 (26-15-10) (51% 丰源肥) 公斤/亩			小区施肥 (公斤/90 平方米)
			用量	N	P ₂ O ₅	
I	1	A ₀ B ₁	0	0	0	0
	2	A ₀ B ₂				
	3	A ₀ B ₃				
II	4	A ₁ B ₁	20	5.2	3.0	2.0
	5	A ₁ B ₂				
	6	A ₁ B ₃				
III	7	A ₂ B ₁	40	10.4	6.0	4.0
	8	A ₂ B ₂				
	9	A ₂ B ₃				
IV	10	A ₃ B ₁	60	15.6	9.0	6.0
	11	A ₃ B ₂				
	12	A ₃ B ₃				

平方米的小区组试验，小区组间用宽30厘米、高30厘米的土埂隔开，上覆盖薄膜，防止串水串肥。每个小区内施肥水平相同，平分三等分，分别亩移栽6万、10万、14万的秧苗，每种类型移栽30平方米。同时整个试验区外围用土埂围起，与保护行隔离，有独立的灌/排水沟，防止保护区肥水串进试验各小区。区组设两次重复。

1.3.3 配方肥用法

试验采用麻城市丰源配方肥(N-P₂O₅-K₂O = 26-15-10)作为试验肥料，肥料全部作基肥施用，施肥方案见表1。

1.4 其它管理

试验实施管理、调查、测试等信息数据均按《湖北省测土配方施肥试验统一记载表》进行记载。田间操作管理如整地、栽培、灌溉、有害生物防治等均按当地习惯一致进行。试验播种2014年5月2日、移栽5月27日，移栽前调查50株秧苗，平均株高24.7厘米、叶片数5.9叶、单株茎蘖数2.3，收获9月18日。

1.5 试验调查及取样

1.5.1 生育调查

在5月30日、7月7日、9月9日，进行了试验田基本苗、最高苗、有效穗数调查，每个小区随机调查三点15蔸苗(穗)数，折算成亩苗(穗)数，结果见表2。

1.5.2 产量测定及取样

1.5.2.1 取植株样调查产量构成因素。收获前，每个处理取样5兜调查产量构成因素，结果见表3。

1.5.2.2 产量测定。收获时均按小区单收单打，记录小区鲜重产量，同时采集稻谷样，称重记录样品重量，待样品风干后扬净称重，计算出各小区产量的折净率，以此测算小区稻谷的干重，最后折算出亩产量，见表4。

2 试验结果与分析

2.1 试验不同处理对水稻生育的影响结果

从表2可以看出，按试验设计，在移栽密度一致的情况下，在同一施肥区组内均表现随着移栽基本苗增加，最高苗数、有效穗数增加，成穗率没有明显的规律，说明适当密植，有利于有效穗数增加。在不同施肥区组间，随着施肥量的增加，最高苗数、有效穗数、成穗率增加，说明施肥能促进水稻生育，增加有效成穗数。试验田块在收获时取样测考主要生育性状，结果见表3。从表3看出，在同一施肥区组内，株高、穗长、穗平总粒数、穗平实粒数表现均以移栽基本苗最少处理为最好，说明稀植有利于促进水稻个体生长发育。在不同施肥区组间，株高、穗长都是以不施肥区的表现最差，随着施肥量加大，株高、穗长增加。而穗平实粒数、结实率、千粒重均以不施肥区最高，随着施肥量加大，呈现下降趋势。

表2 试验处理生育调查

区组	代号	处理	密度	基本苗	最高苗	有效穗		成穗率		
			(万兜/亩)			(万/亩)		(%)		
I	1	A ₀ B ₁	1.7077	6.15	12.12	9.22		76.1		
	2	A ₀ B ₂	1.7077	10.59	14.86	14.29	10.93	10.70	73.6	75.0
	3	A ₀ B ₃	1.7077	12.98	15.88		11.95		75.3	
II	4	A ₁ B ₁	1.7077	7.34	15.88		12.30		77.4	
	5	A ₁ B ₂	1.7077	10.42	17.59	17.93	14.17	14.00	80.6	78.2
	6	A ₁ B ₃	1.7077	13.66	20.32		15.54		76.5	
III	7	A ₂ B ₁	1.7077	7.51	16.56		11.78		71.1	
	8	A ₂ B ₂	1.7077	10.76	19.30	18.67	15.03	14.80	77.9	78.8
	9	A ₂ B ₃	1.7077	14.00	20.15		17.59		87.3	
IV	10	A ₃ B ₁	1.7077	6.83	16.74		14.34		85.7	
	11	A ₃ B ₂	1.7077	10.25	20.32	18.79	15.03	15.20	74.0	81.2
	12	A ₃ B ₃	1.7077	13.49	19.30		16.22		84.1	

表3 产量构成因素调查结果

区组	代号	处理	株高(厘米)		穗长(厘米)		穗平总粒数		穗平实粒数		结实率(%)		千粒重		有效穗数		产量 (公斤/亩)
I	1	A ₀ B ₁	108.5		25.1		187.3		148.6		79.3		29.8		9.22		408.3
	2	A ₀ B ₂	104.8	106.3	23.0	22.9	158.8	163.1	140.9	142.5	88.8	87.5	30.2	29.5	10.93	10.70	465.1
	3	A ₀ B ₃	105.6		20.2		163.5		143.5		87.7		28.5		11.95		488.7
II	4	A ₁ B ₁	110.5		23.4		168.5		140.1		82.8		29.3		12.30		504.9
	5	A ₁ B ₂	109.5	109.0	22.8	23.0	128.4	151.3	143.4	129.8	86.1	85.7	29.1	28.9	14.17	14.00	591.3
	6	A ₁ B ₃	107.5		23.0		142.1		125.9		88.3		28.4		15.54		555.6
III	7	A ₂ B ₁	116.8		25.0		198.3		164.3		82.8		28.2		11.78		545.8
	8	A ₂ B ₂	111.4	114.1	23.1	23.8	137.8	162.8	121.7	140.1	88.3	86.4	28.9	28.5	15.03	14.80	528.6
	9	A ₂ B ₃	114.1		23.3		152.4		134.4		88.1		28.3		17.59		669.0
IV	10	A ₃ B ₁	122.7		25.6		203.0		157.9		77.7		27.6		14.34		624.9
	11	A ₃ B ₂	121.9	120.7	24.5	24.7	183.7	181.4	133.6	139.9	74.3	77.3	27.4	27.4	15.03	15.20	550.2
	12	A ₃ B ₃	117.7		24.1		157.6		128.2		80.0		27.2		16.22		565.6

2.2 试验不同处理对水稻产量的影响结果

2.2.1 试验各处理产量差异显著性分析

试验田各处理产量见表4。从表4可见,在同区组内产量相近,在不同区组间,以不施肥区组产量最低,随着施肥量加大,产量增加,与不施肥区组比,分别增产127.7公斤/亩、158.3公斤/亩、173.8公斤/亩,增产率分别为28.1%、34.8%、38.2%,对试验田各处理产量进行方差分析,分析结果见表5。表5结果表明,本试验中,在同一施肥区组内,移栽不同基本苗数,对水稻产量没有明显影响;在移栽相同基本苗数下,不同配方肥施用量对水稻产量有显著影响,达到极显著差异水平。在保证其它

条件相同的情况下,移栽不同的基本苗和施用不同配方肥量,对水稻产量无明显影响。

2.2.2 产量回归分析

对表4产量结果数据,分别提取处理1、4、7、10数据、取处理2、5、8、11及取处理3、6、9、12数据,按 $Y = aX^2 + bX + c$ 一元二次回归模型,对试验田数据进行回归分析,分别拟合试验田块移栽相近基本苗数情况下,水稻产量(Y)与配方肥施用量(X)的一元二次效应方程^[3]。回归结果见表6。依据一元二次效应方程,最高产量施肥量按 $b+2aX=0$ 方程求取,继而预测最高产量。最佳施肥

表4 水稻实际产量结果

区组	代号	处理	小区水稻产量(公斤/小区)			水稻产量 (公斤/亩)	比区组I增产量 (公斤/亩)	增产率 (%)
			重复1	重复2	平均			
I	1	A ₀ B ₁	20.4	20.2	20.3	451.1		--
	2	A ₀ B ₂	19.9	20.8	20.4	452.2	455.2	--
	3	A ₀ B ₃	20.2	21.4	20.8	462.2		
II	4	A ₁ B ₁	25.8	26.3	26.0	578.7		28.1
	5	A ₁ B ₂	26.1	25.9	26.0	577.8	582.9	127.7
	6	A ₁ B ₃	26.1	27.2	26.7	592.2		
III	7	A ₂ B ₁	26.9	28.6	27.7	616.6		34.8
	8	A ₂ B ₂	26.1	28.4	27.2	605.4	613.7	158.3
	9	A ₂ B ₃	27.5	28.2	27.9	619.1		
IV	10	A ₃ B ₁	27.4	31.6	29.5	655.7		38.2
	11	A ₃ B ₂	26.8	28.4	27.6	613.3	629.0	173.8
	12	A ₃ B ₃	27.6	28.0	27.8	617.9		

表5 试验各处理产量差异显著性分析

差异源	SS	df	MS	F	F _{0.05}	F _{0.01}
密度	794.086	2	397.043	0.581	3.885	6.927
配方肥	112411.560	3	37470.520	54.813	3.490	5.953
交互	1989.053	6	331.509	0.485	2.996	4.821
内部	8203.243	12	683.604			
总计	123397.942	23				

表6 不同移栽基本苗数下配方肥施用量与水稻产量的一元二次效应方程拟合结果

移栽基本苗	处理代号	一元二次效应方程	R ²	目标产量取值范围
6-8万	1、4、7、10	$Y = -0.055x^2 + 6.577x + 455.6$	0.982	$456 \leq Y \leq 652$
10-12万	2、5、8、11	$Y = -0.073x^2 + 6.966x + 456.2$	0.981	$457 \leq Y \leq 622$
13-15万	3、6、9、12	$Y = -0.081x^2 + 7.358x + 466.5$	0.983	$467 \leq Y \leq 633$

量按 $b+2aX=Px / Py$ 方程求取, 继而预测最佳产量, 预测结果如下表7。表7结果表明, 随着移栽基本苗数增加, 获得最高产量和最佳经济效益产量所需要的配方肥用量减少。

2.3 试验不同处理经济效益分析结果

2.3.1 不同施肥区组间效益分析结果

表8结果表明, 配方肥施肥比不施肥区, 新增产值344.79-469.26元/亩, 产投比2.79-6.16:1, 新增纯收288.79-315.95元/亩, 以区组Ⅲ为最优, 效益最高, 与推荐施肥结果一致。

2.3.2 移栽不同基本苗下施肥效益分析结果

表9结果表明, 移栽基本苗为6-8万/亩的各处理, 与不施肥处理比, 新增产量344.52-552.42元/亩, 产投比3.29-6.15:1, 新增纯收288.52-384.42元/亩, 效益随着施肥量增加而增加, 最优处理为处理10。移栽基本苗为10-12万/亩的各处理, 与不施肥处理比, 新增产量339.12-434.70元/亩, 产投比2.59-6.06:1, 新增纯收266.7-301.37元/亩, 效益以处理8为最高。移栽基本苗为13-14万/亩各处理, 与不施肥处理比, 新增产量349.38-422.01元/亩, 产投比2.49-6.24:1, 新增纯收250.77-310.01元/亩, 效益以处理9最高。

表7 试验一元二次效应方程预测结果

处理		预测	
		配方肥用量(公斤/亩)	水稻产量(公斤/亩)
处理1、4、7、10	最高	59.8	652.2
	最佳	50.4	647.3
处理2、5、8、11	最高	47.7	622.4
	最佳	40.9	619.0
处理3、6、9、12	最高	45.4	633.6
	最佳	39.0	630.3

注: 稻谷价格(P_y)2.7元/公斤, 配方肥(P_x)2.8元/公斤。

表8 不同施肥区组间经济效益结果

区组	产量 (公斤/亩)	亩产值	新增产值 (元/亩)	投肥成本	产投比	新增纯收入 (元/亩)
I	455.2	1229.04	--	--	--	--
II	582.9	1573.83	344.79	56.00	6.16	288.79
III	613.7	1656.99	427.95	112.00	3.82	315.95
IV	629.0	1698.30	469.26	168.00	2.79	301.26

表9 不同施肥区组间经济效益结果

基本苗数	处理代号	产量 (公斤/亩)	亩产值	新增产值 (元/亩)	投肥成本	产投比	新增纯收入 (元/亩)
	1	451.1	1217.97	--	--	--	--
6-8万	4	578.7	1562.49	344.52	56.00	6.15	288.52
平均 6.96	7	616.6	1664.82	446.85	112.00	3.99	334.85
	10	655.7	1770.39	552.42	168.00	3.29	384.42
10-12万	2	452.3	1221.21	--	--	--	--
平均 10.76	5	577.9	1560.33	339.12	56.00	6.06	283.12
	8	605.4	1634.58	413.37	112.00	3.69	301.37
	11	613.3	1655.91	434.70	168.00	2.59	266.70
13-14万	3	462.8	1249.56	--	--	--	--
平均 14.17	6	592.2	1598.94	349.38	56.00	6.24	293.38
	9	619.1	1671.57	422.01	112.00	3.77	310.01
	12	617.9	1668.33	418.77	168.00	2.49	250.77

3 试验结论

3.1 在相同施肥水平下，不同的移栽基本苗数对水稻产量没有显著性影响

本试验采用每亩6-15万移栽基本苗与不同施肥水平处理的施肥效果研究表明，在同一施肥区组内，移栽不同基本苗数，对水稻产量没有显著影响。主要原因是稀植更有利于促进水稻个体生长发育，表现在同一施肥区组内，株高、穗长、穗平总粒数、穗平实粒数均以移栽基本苗数最少处理为最好。

3.2 在移栽相同基本苗数下，不同施用量对水稻产量有显著影响，达到极显著差异水平

试验结果表明，获得最高产量和最佳经济效益产量所需要的配方肥用量，随着移栽基本苗数增加而减少。

3.3 推荐配方肥作基肥施用指标

依据试验结果，及参考其它成果资料，推荐配方肥(51%)作基肥施用指标，见下表10。

表10 配方肥作基肥施用指标(公斤/亩)

移栽基本苗	6万≤基本苗<8万	8万≤基本苗<13万	13万≤基本苗
基肥施用配方肥(公斤/亩)	40-45	35-40	30

参考文献

- [1] 杜森等. 土壤分析技术规范(第二版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006, 6.
- [2] 鲍士旦. 土壤化学分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [3] 郝艳芬等. Excel 2003 统计与分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006, 8.

减氮量尿素、控释氮肥配施紫云英对早稻产量及氮素吸收利用的影响

鲁艳红 廖育林 聂军* 谢坚 周兴 杨曾平 吴浩杰

(湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125)



摘要: 通过田间小区试验, 研究减量尿素或控释氮肥配施紫云英对早稻产量、农艺性状、植株干物质积累量、氮素养分吸收利用及土壤氮素养分的影响。结果表明, 在减氮量 20% 和 40% 条件下, 尿素或控释氮肥配施紫云英促进早稻稻谷增产, 增加有效穗数、千粒重和每穗实粒数。80% 尿素配施紫云英和 60% 控释氮肥配施紫云英处理的氮素养分持续供应优势在水稻生长中后期得到体现, 有利于促进植株氮素养分吸收积累和提高氮肥利用效率, 同时提高了水稻生长中后期土壤碱解氮含量。

关键词: 紫云英; 控释氮肥; 早稻产量; 氮素吸收利用

氮素是影响水稻生长发育最重要的营养元素, 在现代农业生产中发挥着重要作用^[1]。近几十年来, 我国氮肥施用量快速增加^[2]。长期大量施用氮肥提高稻谷产量的同时, 产生的问题也日益凸显, 如我国氮肥利用率较低、施用氮肥造成的环境风险增加等^[3-4]。

施肥的最终目的除了提高作物产量、改善作物品质和培肥土壤同时, 还要考虑养分资源的高效利用及施肥对环境的影响^[5]。适当减少化肥氮施用量、施用缓控释氮肥及有机无机氮合理配施都是提高作物产量和氮肥利用率的良好途径^[6-7]。本试验研究了紫云英与减氮量尿素和缓控释氮肥的配合施用对早稻产量、产量构成因素、不同生育期植株干物质积累动态变化、不同生育期植株氮素养分含量和积累量动态变化、稻谷和稻草氮素养分吸收积累特性、氮素吸收利用效率和不同生育期土壤碱解氮的动态变化的影响, 现将试验结果总结如下。

1 材料和方法

1.1 试验地点及材料

试验于 2013 年在湖南省华容县万庾镇塌西湖村进行。试验区属亚热带湿润气候, 年均降水量 1232 毫米, 年均

气温 17.8 °C。供试土壤为河湖沉积物母质发育的潮泥田。试验前 0-20 厘米耕层土壤 pH 5.7, 有机质 51.2 克/公斤, 全氮 3.09 克/公斤, 全磷 0.89 克/公斤, 全钾 23.1 克/公斤, 碱解氮 275 毫克/公斤, 有效磷 1.9 毫克/公斤, 速效钾 200 毫克/公斤。

1.2 试验设计

试验共设 6 个处理: (1) GM (不施化肥氮条件下翻压紫云英鲜草 1000 公斤/亩); (2) 100% Ur (施用尿素, 施氮量 10 公斤/亩); (3) 80% Ur (施用尿素, 施氮量 8 公斤/亩); (4) GM+80% Ur (施氮量 8 公斤 N/亩的尿素配施紫云英鲜草 1000 公斤/亩); (5) 60% CRNF (施氮量 6 公斤 N/亩的控释氮肥); (6) GM+60% CRNF (施氮量 6 公斤 N/亩的控释氮肥配施紫云英鲜草 1000 公斤/亩)。各处理磷肥、钾肥施用量均相同, 施磷 (P_2O_5) 5 公斤/亩, 施钾 (K_2O) 6 公斤/亩。紫云英于早稻抛秧前一周异地还田翻压; 尿素 50% 做基肥施入, 余下 50% 做分蘖肥于抛秧后 10 天施用; 控释氮肥做基肥一次性施入; 磷肥用过磷酸钙, 做基肥一次性施入; 钾肥用氯化钾, 50% 的钾肥做基肥施入, 余下 50% 做分蘖肥于抛秧后 10 天施用。各处理基肥部分均于抛秧前 1 天施入, 基肥施入后, 立即

基金项目: 国际植物营养研究所 (IPNI) 资助项目 (Hunan-19)。

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施肥方面的研究。

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

用铁齿耙耖入 5 厘米深的土层内。通过紫云英投入的养分分别为 N 3.2 公斤 / 亩, P₂O₅ 0.6 公斤 / 亩、K₂O 3.1 公斤 / 亩。每处理 3 次重复, 小区面积 20 平方米, 随机区组排列。小间距用高 20 厘米、宽 30 厘米的泥埂覆膜隔离, 实行单独排灌。早稻品种 (组合) 为湘早籼 45 号, 于 4 月 18 日抛秧, 每公顷抛 37.5 万株, 7 月 11 日收获。为获得的数据与实际生产情况相一致, 试验田采用大田常规管理模式。

1.3 样品采集与测定方法

试验开始前采集 0-20 厘米土层基础土样用于基本理化性状测定。分别采集早稻 5 个生育期 (分蘖期、拔节期、孕穗期、乳熟期和蜡熟期) 的植株样品, 测定各时期的植株干物质产量、植株全氮含量。成熟期取植株样考种并测定各小区的稻草产量、稻谷产量及样品中的全氮含量。采集早稻 5 个生育期的 0-20 厘米土层土壤样品用于碱解氮含量测定。土样和植株样品均采用常规方法分析测定^[8]。

1.4 计算方法与数据处理

氮肥利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮收获指数计算方法^[9]如下:

氮肥利用率 (NUE, %) = (施肥区作物地上部氮素积累量 - 对照区作物地上部氮素积累量) / 施肥区施氮量 × 100。

氮肥偏生产力 (PFP, 公斤 / 公斤) = 施肥区作物经济产量 / 施氮量。

氮肥农学效率 (ANUE, 公斤 / 公斤) = (施肥区作物经济产量 - 对照区经济产量) / 施氮量。

氮收获指数 (NHI, %) = 籽粒氮素积累量 / 植株氮素积累量 × 100。

在本试验中由于没有设置既不施氮肥也不施紫云英的处理, 计算氮肥利用效率和氮肥农学效率时均以 GM 处理为对照。

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 产量和产量构成因素

产量结果表明不同施肥对早稻稻谷产量有明显的影响 (表 1)。GM+80% Ur 处理获得最高产量, 其次是 GM+60% CRNF 处理, 分别较 100% Ur 处理增产 7.5% 和 6.7%, 产量差异分别达到极显著 (p < 0.01) 和显著水平 (p < 0.05); 无机氮配施紫云英的 GM+80% Ur 和 GM+60% CRNF 处理较相应的单施无机氮肥 80% Ur 和 60% CRNF 处理分别增产 9.9% 和 7.3%, 差异均达到极显著水平 (p < 0.01); 80% Ur 和 60% CRNF 处理较 100% Ur 处理有所减产, 但 60% CRNF 处理稻谷产量略高于 80% Ur 处理; 产量最低的是 GM 处理, 较 100% Ur 减产 14.0%。

稻草产量最高的是 100% Ur 处理, 其次是 GM+80% Ur 和 GM+60% CRNF 处理, 其差异均未达到显著水平。100% Ur 处理的稻草产量最高, 但其稻谷产量低于 GM+80% Ur 和 GM+60% CRNF 处理, 其原因可能是由于该处理水稻生长前期氮素养分释放过多, 产生了较多的损失导致后期氮素养分供应相对不足。

稻谷产量较高的 GM+80% Ur 和 GM+60% CRNF 处理单位面积有效穗、每穗实粒数和千粒重均较高, 其水稻株高也较高 (表 1)。不施化肥氮仅翻压紫云英的 GM 处理早稻株高和单位面积有效穗数均极显著低于其它施肥处理 (p < 0.01), 每穗实粒数也低于其他施肥处理,

表 1 不同处理的早稻产量和产量构成因素

处理	株高 (厘米)	单位面积有效穗数 (万穗 / 公顷)	每穗实粒数 (粒 / 穗)	结实率 (%)	千粒重 (克)	稻谷产量	
						(公斤 / 亩)	
GM	81.3bB	20.12dC	74.1cB	83.4aA	23.3bB	372.3cD	286.4cB
100% Ur	84.1aA	25.42abA	74.4cB	79.1cC	23.4abAB	432.7bBC	373.1aA
80% Ur	83.9aA	24.84bAB	74.2cB	81.1bB	23.3bB	423.3bC	352.7bA
GM+80% Ur	84.3aA	25.67aA	75.5bA	81.2bB	23.5abAB	465.3aA	372.2aA
60% CRNF	83.9aA	24.12cB	75.9abA	81.5bB	23.5abAB	430.2bC	349.8bA
GM+60% CRNF	84.1aA	24.86bAB	76.2aA	81.8bAB	23.6aA	461.6aAB	357.9abA

注: 同列不同大小写字母表示处理间差异分别达 1% 和 5% 显著水平。下同

说明当季仅翻压紫云英鲜草 1000 公斤 / 亩而不施化肥氮抑制了水稻生长, 降低了稻谷和稻草的产量。80% Ur 和 60% CRNF 处理的单位面积有效穗和每穗实粒数显著 ($p < 0.05$) 低于相应的配施紫云英的 GM+80% Ur 和 GM+60% CRNF 处理, 说明这两种施肥模式也不能完全满足水稻作物生长对氮素营养的需求。

2.2 地上部干物质积累量

从不同生育期早稻地上部干物质积累量来看(表 2), 早稻分蘖期干物质积累量以 100% Ur 处理最高, 其次为 GM+80% Ur 和 80% Ur 处理; 孕穗期水稻地上部干物质积累量以 GM+80% Ur 处理最高, 其次为 100% Ur 和 80% Ur 处理; 乳熟期的干物质积累量以 GM+80% Ur 处理最高, 其次为 100% Ur 和 GM+60% CRNF 处理; 蜡熟期地上部干物质积累量以 GM+80% Ur 处理最高, 其次为 GM+60% CRNF 和 100% Ur 处理; GM+80% Ur 处理地上部干物质积累量在分蘖期低于 100% Ur 处理, 但孕穗期后地上部干物质积累量以该处理最高; GM+60% CRNF 处理在早稻分蘖期至孕穗期植株干物质积累量低于 100% Ur 处理和 80% Ur 处理, 至水稻生长中后期也显现出紫云英和控释氮肥养分释放的持续性的优势, 至蜡熟期成为仅次于 GM+80% Ur 处理的处理。GM+80% Ur 和 GM+60% CRNF 处理各生育期地上部干物质积累量均大于相应的单施化学氮肥处理; 说明紫云英与化学氮肥配施能促进水稻生长, 从而增加植株干物质的积累。所有处理中在早稻各生育期均以单施紫云英 GM 处理的地上

部干物质积累量最低, 其干物质积累量与 100% Ur 处理的比值范围为 0.53 - 0.82, 说明早稻不施氮肥, 仅靠翻压 1000 公斤 / 亩紫云英鲜草中的氮素营养不能满足水稻作物生长对氮素的需要。

2.3 不同生育期植株氮素养分含量和氮素养分积累量

水稻养分吸收受不同品种、肥料结构和管理方式等影响, 通常水稻产量高其养分吸收量也高。从早稻不同生育期植株氮含量结果(表 3)可以看出, 分蘖期至孕穗期植株全氮含量最高的为 100% Ur 处理, 最低的为不施化肥氮的 GM 处理; 分蘖期至拔节期 GM+80% Ur 处理植株全氮含量也较高, 仅次于 100% Ur 处理, 而 60% CRNF 处理植株全氮含量较低, 仅高于 GM 处理。由于尿素为速效氮肥, 而施入的紫云英、控释氮肥的氮素释放速率与尿素不同, 随着生育期的推进水稻植株的氮含量状况也发生了变化, 至孕穗期由于控释氮肥的氮素在水稻中后期的释放和紫云英腐解氮素营养的释放, GM+60% CRNF 处理植株氮素含量与 100% Ur 处理之间的差距减小, 到早稻生长后期, 控释氮肥和紫云英绿肥的养分释放对水稻中后期养分持续供应的优势进一步得到体现: 早稻乳熟期 GM+60% CRNF 处理植株氮素养分含量最高, 其次为 GM+80% Ur 处理; 蜡熟期 GM+80% Ur 处理最高, 其次为 GM+60% CRNF 处理。

从表 4 可见早稻不同生育期植株氮素积累量的变化, 分蘖期至孕穗期每蔸水稻植株氮素积累量均以 100% Ur 处理最高, 极显著高于其他处理 ($p < 0.01$); 至乳

表 2 不同施肥处理早稻不同生育期地上部干物质积累量 (克 / 蔸)

处理	分蘖期	拔节期	孕穗期	乳熟期	蜡熟期
GM	0.31cC	6.88bB	15.24cC	20.81dE	26.38dC
100% Ur	0.58aA	10.51aA	19.78aA	27.73aAB	32.28bAB
80% Ur	0.42bBC	9.79aA	18.42bB	24.56cCD	31.08cB
GM+80% Ur	0.51aAB	9.92aA	20.05aA	28.62aA	33.49aA
60% CRNF	0.35bcBC	9.71aA	17.94bB	23.38cD	31.17cB
GM+60% CRNF	0.38bcBC	9.77aA	18.06bB	26.13bBC	32.80abA

表 3 各施肥处理早稻不同生育期植株中全 N 含量的动态变化 (克 / 公斤)

处理	分蘖期	拔节期	孕穗期	乳熟期	蜡熟期
GM	35.6	21.7	14.8	12.2	10.8
100% Ur	44.5	30.9	23.4	13.4	12.7
80% Ur	42.6	25.2	18.8	13.1	11.3
GM+80% Ur	43.4	27	21.4	13.7	12.9
60% CRNF	38.4	22.5	20.5	13.3	11.2
GM+60% CRNF	40.2	24.2	22.5	14.4	12.8

表4 各施肥处理早稻不同生育期植株氮素积累量的动态变化(克 N/ 莖)

处理	分蘖期	拔节期	孕穗期	乳熟期	蜡熟期
GM	0.01cC	0.15eD	0.22fE	0.25eC	0.28dD
100% Ur	0.03aA	0.33aA	0.46aA	0.37bA	0.41bB
80% Ur	0.02bB	0.25cBC	0.35eD	0.32cB	0.35cC
GM+80% Ur	0.02bB	0.27bB	0.43bB	0.39aA	0.43aA
60% CRNF	0.01cC	0.22dC	0.37dC	0.31dB	0.35cC
GM+60% CRNF	0.02 bB	0.24cdBC	0.41cB	0.38abA	0.42abAB

熟期和蜡熟期植株氮素积累量最高的为 GM+80% Ur 处理, 极显著高于 100% Ur 处理 ($p < 0.01$); GM+60% CRNF 处理植株氮素积累量也高于 100% Ur 处理, 但二者之间差异不显著。GM+80% Ur 和 GM+60% CRNF 处理在早稻全生育期的植株氮素积累量均高于相应的无机氮肥处理(80% Ur 和 60% CRNF 处理), 但在早稻生长前期差异不显著, 随着生育期的推移差异变得显著。早稻不同生育期水稻植株氮素养分积累量的这种变化可能还是与尿素为速效肥料, 而紫云英、控释氮肥的养分释放特性与尿素不同有关, 到早稻生长中后期, 控释氮肥和紫云英绿肥的养分持续供应的优势得到体现。结合早稻的产量状况分析, 可能孕穗期至成熟期氮素供应是水稻高产的关键时期之一。

2.4 不同施肥处理对植株氮素养分含量及吸收积累量的影响

不同施肥处理对早稻成熟期稻草和稻谷中全氮含量有明显影响(表5)。稻谷全氮含量以 100% Ur 和 GM+60% CRNF 处理最高, 其次是 GM+80% Ur 处理, 仅翻压紫云英不施化肥氮的 GM 处理最低; 稻草全氮含量以 GM+80% Ur 处理最高, 其次为 GM+60% CRNF 处理, GM 处理最低。

不同处理间稻谷、稻草和植株总氮素积累量有明显差异(表6)。稻谷氮素养分积累量最高的是 GM+80% Ur 和 GM+60% CRNF 处理, 其次是 100% Ur 处理; GM 处

理稻谷氮素养分吸收量极显著低于其他处理 ($p < 0.01$)。稻草氮素养分吸收量最高的为 GM+80% Ur 处理, 其次为 100% Ur 处理, GM 处理稻草氮素养分吸收量也极显著低于其他处理 ($p < 0.01$)。各处理植株氮素养分总吸收量顺序与稻谷氮素养分积累量一致, 从高到低为: GM+80% Ur > GM+60% CRNF > 100% Ur > 80% Ur > 60% CRNF > GM。

2.5 不同施肥处理对氮素养分吸收利用效率的影响

减量施用化肥、施用控释氮肥及有机无机氮肥配施均能提高氮肥利用率(表6)。与 100% Ur 处理相比, 80% Ur 处理的氮肥利用率提高 2.8%, 60% CRNF 处理的氮肥利用率提高 16.7%, 减氮量尿素配施紫云英和减氮量控释氮肥配施紫云英处理的氮肥利用率提高程度更显著, GM+80% Ur 和 GM+60% CRNF 处理氮肥利用率较 100% Ur 处理分别提高 51.9% 和 87.1%, 差异均达到极显著水平 ($p < 0.01$)。

不同施肥处理间氮肥偏生产力差异均达到极显著水平 ($p < 0.01$)。减氮量氮肥、减氮量氮肥配施紫云英处理的氮肥偏生产力均较 100% Ur 处理极显著提高 ($p < 0.01$); GM+80% Ur 和 GM+60% CRNF 处理的氮肥偏生产力分别较施用相应的无机氮肥 80% Ur 和 60% CRNF 处理极显著提高 ($p < 0.01$)。表明适当降低氮肥用量、施用控释氮肥或尿素配施紫云英均可以提高单位氮肥对产量的贡献。

表5 各施肥处理早稻氮素养分吸收利用

处理	全氮含量(克/公斤)		氮素养分吸收量(克/亩)		植株氮素养分总吸收量(克/亩)
	稻谷	稻草	稻谷	稻草	
GM	12.5dD	9.2dD	4.65dD	2.63eD	7.28dD
100% Ur	15.1aA	9.7bcBC	6.53bAB	3.62bAB	10.15bAB
80% Ur	14.7bAB	9.7bcBC	6.22cBC	3.42cdBC	9.64cBC
GM+80% Ur	15.0aAB	10.2aA	6.98aA	3.79aA	10.77aA
60% CRNF	13.9cC	9.5cCD	5.98cC	3.32dC	9.30cC
GM+60% CRNF	15.1aA	9.9bAB	6.97aA	3.55bcBC	10.51abA

表 6 不同施肥处理对早稻氮素养分吸收利用效率的影响

处理	氮肥利用率 (%)	氮肥偏生产力 (公斤稻谷 / 公斤 N)	氮肥农学效率 (公斤稻谷 / 公斤 N)	氮收获指数 (%)
GM	--	--	--	63.9aA
100% Ur	28.7cC	43.3eE	6.0dC	64.4 aA
80% Ur	29.5cC	52.9dD	6.4cdC	64.5 aA
GM+80% Ur	43.6bAB	58.2cC	11.6abAB	64.8aA
60% CRNF	33.5cBC	71.7bB	9.6bcBC	64.3aA
GM+60% CRNF	53.7aA	76.9aA	14.9aA	66.3aA

不同施肥处理间氮肥农学效率有明显差异 (表 6), 3 个无机氮肥处理中氮肥农学效率高低顺序为: 60% CRNF > 80% Ur > 100% Ur, 相邻 2 处理间差异不显著, 但 60% CRNF 处理氮肥农学效率显著高于 100% Ur ($p < 0.05$)。GM+80% Ur 和 GM+60% CRNF 处理的氮肥农学效率较相应的 80% Ur 和 60% CRNF 处理极显著提高 ($p < 0.01$), 表明无机氮肥与紫云英配施有利于提高单位氮肥用量的增产效果。

GM+60% CRNF 处理氮收获指数高于其他处理 (表 6), 表明该施肥方式在本试验条件下有利于氮素在籽粒中的分配; GM 处理氮收获指数最低, 表明不施化肥氮仅翻压 1000 公斤 / 亩紫云英不利于氮素从植株叶片转移到籽粒中; 各处理间氮收获指数差异不显著。

2.6 不同施肥处理对土壤养分含量的影响

早稻不同生育期土壤碱解氮结果表明 (表 7) 从分蘖期至乳熟期, 100% Ur 处理土壤碱解氮含量最高, 蜡熟期土壤碱解氮含量下降, 仅高于不施化学氮肥的 GM 处理; GM+80% Ur 处理的土壤碱解氮含量在早稻全生育期一直较高, 生长前期至中期 (分蘖期至孕穗期) 仅低于 100% Ur 处理, 蜡熟期仅低于 GM+60% CRNF 处理; GM+60% CRNF 处理在早稻生长前期至中期 (自分蘖期至孕穗期) 土壤碱解氮含量较低, 但随生育期的推延, 至乳熟期该处理土壤碱解氮含量仅低于 100% Ur 处理, 至

蜡熟期其土壤碱解氮含量在所有处理中最高。在早稻各生育期, 不施化学氮肥仅翻压紫云英的 GM 处理土壤碱解氮含量始终最低, 说明在此模式下氮素营养供应在早稻生长的整个生育期均是不够的。

3 结论

(1) 本试验在常规施氮量基础上减 20% 尿素氮或减 40% 控释氮与紫云英配合施用均能显著增加早稻稻谷产量, 稻谷产量的增加主要通过提高单位面积有效穗数、千粒重和每穗实粒数实现。

(2) 减 20% 尿素氮与紫云英配合施用能持续供氮, 有利于早稻整个生育期水稻生长, 促进植株氮素吸收; 减 40% 控释氮肥与紫云英配合施用在早稻生长中后期氮素养分供应充分, 有利于水稻生长和氮素养分向籽粒中转运, 从而也获得较高产量。100% Ur 分蘖期至乳熟期氮素供应较高, 尤其在早稻生长前期氮素供应显著高于其他处理, 而乳熟期后氮素供应相对较低, 造成前期营养生长过旺而后期生殖生长不足, 导致该处理稻草产量较高而稻谷不高。

(3) 减 20% 尿素氮或减 40% 控释氮与紫云英配合施用由于增加了早稻产量、促进了植株氮素吸收同时降低化肥氮用量, 从而提高氮肥利用率和氮肥农学效率。减 40% 控释氮与紫云英配合施用由于早稻生育后期供氮充足有利于氮素向籽粒转运从而提高氮素收获指数。

表 7 早稻不同生育期各处理土壤碱解氮含量 (毫克 / 公斤)

处理	分蘖期	拔节期	孕穗期	乳熟期	蜡熟期
GM	291	244	230	220	218
100% Ur	379	315	273	284	261
80% Ur	351	276	267	250	266
GM+80% Ur	379	293	272	266	276
60% CRNF	328	261	259	263	269
GM+60% CRNF	333	266	265	272	287

综上所述, 在本试验条件下减 20% 尿素氮或减 40% 控释氮与紫云英配合施用提高了早稻产量和氮素利用效率。但是, 施用过程中阻控氮素损失和其对环境的影响

的最适紫云英用量及其与尿素或缓控施肥氮肥的最适配比等尚不清楚, 均有待于进一步研究。



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] 张卫峰, 马林, 黄高强, 等. 中国氮肥发展、贡献和挑战 [J]. 中国农业科学, 2013, 46(15):3161-3171.
- [3] 赵宏伟, 沙汉景. 我国稻田氮肥利用率的研究进展 [J]. 东北农业大学学报, 2014, 45(2):116-122.
- [4] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 等. 农田氮素的气态损失与大气氮湿沉降及其环境效应 [J]. 土壤, 2005, 37(2):113-120.
- [5] 巨晓荣. 理论施氮量的改进及验证——兼论确定作物氮肥推荐量的方法 [J]. 土壤学报, 2015, 52(2):1-13.
- [6] 向秀媛, 刘强, 荣湘民, 等. 有机肥和无机肥配施对双季稻产量及氮肥利用率的影响 [J]. 湖南农业大学学报 (自然科学版), 2014, 40(1):72-77.
- [7] 鲁艳红, 纪雄辉, 郑圣先, 等. 施用控释氮肥对减少稻田氮素损失和提高水稻氮素利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3):490-495.
- [8] 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.
- [9] 战秀梅, 李亭亭, 韩晓日, 等. 不同施肥方式对春玉米产量、效益及氮素吸收和利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4):861-868.

磷在农业中的有效利用

Johnny Johnston, Paul Fixen 和 Paul Poulton 著

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《Better Crops》2014 第4期 P22 - P24)

本文汇总了欧洲和北美洲完全不同土壤上的试验数据，用于评估磷肥利用效率。英国的数据来自控制试验，而美国的数据则是由州级聚合数据衍生而来。这些数据表明，土壤中的植物有效磷行为存在一个潜在的“简单规则”，即与土壤中的四个无机磷库相关。

磷(P)是所有生物体中必需和不可替代的元素，而全球易于采挖的磷矿资源(PR)是有限的。磷矿经加工后，每年有超过80%的P用于食品生产。因此，延长全球资源的磷矿使用期限依赖于提高农业中P肥利用效率，尤其是因为随着不断增长的人口对食品需求的增加，磷肥的用量也会不断增加。P的有效施用能够满足不断上升人口的需求。农业中P的低效利用直接导致农民的损失。

土壤和肥料中的磷

作为提高农业中P肥利用率的一个贡献，Syers等^[1]人回顾了人们对土壤和肥料行为的理解，发现一个长期持有的观点——认为P是不可逆地被固定在土壤中的观点是没有证据支持的。这些学者认为，土壤中的植物可利用无机磷存在于四个库中，与植物根系的吸收利用性及土壤分析中试剂的可提取性相关(图1)。前两个库是土壤溶液P(库1，含量非常少)和植物易利用的有效磷(库2)。虽然这两个库只占土壤全磷的一小部分，但其数量能被所接受的、广泛使用的常规土壤分析方法测定出来。

在这四个库中，P的有效性和可提取性在很大程度上取决于无机P与被吸持土壤间键的性质和强度。图1显示的重要特性是，在前三个库中P可以相互可逆地转移，正如Syers等^[1]举例详议的那样。从这个概念出发，在库1和库2中存在一个植物有效磷的临界值，低于该值时难以获得作物最佳产量，而高于该值时则不需要施用P肥(施P是无效的)。

P肥的有效使用

直接测定植物中来自磷肥的数量只能用³²P肥料标记法，但这种肥料非常昂贵且半衰期短。因此，磷肥回收率通常使用差值法测定：

$$(U_p - U_o) / F_p$$

其中 U_p 和 U_o 分别为作物从施P土壤中和不施P土壤中吸收的P， F_p 是P肥施用总量，用百分数表示。

通常所说的磷肥百分数利用效率，报道的数值一般为10% - 15%，很少超过25%。

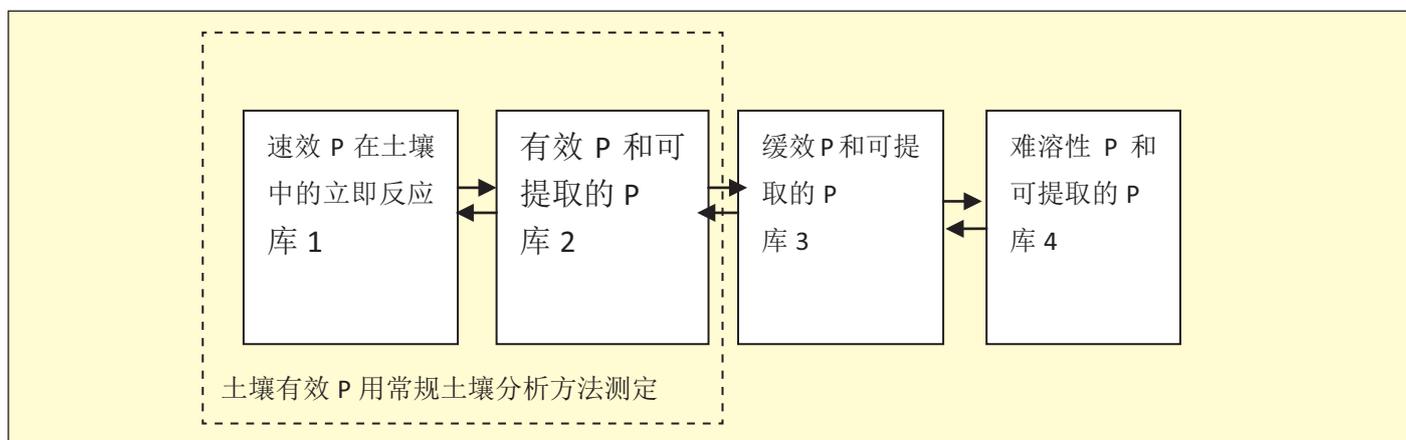


图1 土壤中植物可利用和可提取的无机P形态示意图

如果作物吸收的 P 仅有少量来自磷肥或有机肥，其余则一定来自土壤 P 库。这一 P 库中的 P 要么是天然的，要么是过去所施 P 肥或有机肥的残留。Syers 等^[1]认为，作物从土壤磷库中吸收的磷与从肥料中直接吸收的磷同等有效。这个概念是基于对许多土壤的观测，即施入的 P 肥量与作物收获时摄走的 P 量相当时，库 1 和库 2 中 P 的总量保持恒定（图 1）。因此，P 的摄走 / 施入率（有时指偏养平衡）是一个有用的 P 效率度量标准，尤其是当它与植物有效土壤磷的数据结合时。

磷肥对土壤中植物有效磷临界水平的效率

施入土壤中磷肥的利用效率通常可超过 80%，这是基于 P 摄走 / 施入率计算的，当施入的 P 是用于维持土壤 P 的临界值水平。在英国洛桑试验站的粉质粘性壤土上开展了一个“维持性”磷肥用量试验（连续 4 年秋季施入 1.3 公斤 / 亩），供试作物为冬小麦，土壤中植物可利用 P（Olsen P）含量为 0.6–2.1 毫克 / 公斤。年均小麦籽粒产量和 P 摄走量（籽粒 + 秸秆）随 Olsen P 的增而增加；因此 P 平衡下降。在接近最高产量时，作物摄走的 P 几乎与施入量相等，这时 P 肥利用率超过 90%（基于 P 的摄走 / 施入率计算）（表 1）。MoCollum^[2]和 Halvorson 和 Black^[3]也做了类似试验和报道，在土壤临界值水平时补充作物收获摄走的那部分 P。

摄走 / 施入率与土壤中作物有效磷变化的关系

作物收获时带走的 P 与肥料磷（化肥或者有机肥）的比率应该与土壤中的植物有效磷变化相关。比率为 1 时意味着带走和输入平衡，土壤有效磷几乎不变。比率大于 1 时意味着带走超过输入，土壤磷的储备库正在减少；当土壤 P 处在或低于临界值时，获得最佳产量的风险增加。在大多数土壤中，比率小于 1（即带走小于输入）使得土壤磷累积。一旦达到或略超过临界值水平，通常应减少 P 肥施用来保持土壤 P 维持量。

国际植物营养研究所利用养分施用地理信息系统（NuGIS）（<http://www.ipni.net/nugis>）得到养分平衡数据，并把它们与土壤中植物有效磷的变化相关联^[4]。例如，美国北部大平原的 IPNI 数据（表 2）表明，在那些每一个 P 摄走 / 施入率接近 1 的州，三年采集并提交给各土壤化验室的 340,000 个土样中的 Bray-1 有效 P 中值几乎没有变化。从表 1（洛桑）和表 2（美国）数据得出的结论是，在 P 摄走 / 施入率大约为 1 和土壤中植物有效磷变化很小或没有变化的地方，磷肥的利用率则非常高，正如 Syers 等^[1]最初在论文中讨论的那样。

P 摄走 / 施入率（主要小于 1）和洛桑试验站两个长期定位试验的土壤 Olsen P 的变化如图 2a 所示。二者存在很好的曲线关系，可用多项式函数拟合，决定系数 r^2 等于 0.84。

表 1 2005–2008 年在英国洛桑试验站补充冬小麦 * 收获时摄走 P 量来维持土壤 Olsen P

	2004 年土壤 Olsen P, 毫克 / 公斤 ***				
	9	14	20	23	31
年平均产量 (公斤 / 亩)	507	553	540	567	567
P 总用量 (公斤 / 亩)**	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
P 总摄走量 (公斤 / 亩)	3.7	4.5	4.4	5.1	5
P 平衡 (公斤 P / 亩)	1.6	0.8	0.9	0.2	0.3
2008 年 Olsen P (毫克 / 公斤)***	8	13	18	24	31
P 摄走 / 施入比例 (%)	70	85	82	96	94

* 冬小麦连作, ** 秋天施用 1.3 公斤 P / 亩, *** 秋天采样测定土壤 Olsen P。

表 2 在美国三个州中 P 摄走 / 施入率和 Bray-1 等值水平

州	P 摄走 / 施入率 *			Bray-1 中值 (毫克 / 公斤)		
	2002	2007	平均	2001	2005	2010
蒙大纳	0.97	1.04	1.01	12	14	14
北达科他州	1.07	0.94	1.01	10	11	11
南达科塔	1.02	0.91	0.97	11	14	13

注: * 输入 = 施入的磷肥加粪便中作物可利用的 P, 数据由 IPNI NuGIS 数据整理得出, 2012 年 12 月 1 日, 详见正文。

图2显示了P摄走/施入率与美国12个玉米带州用NuGIS计算出的土壤植物有效磷变化之间的关系。在这种情况下,一个估算的“可利用有机肥P”包括在总

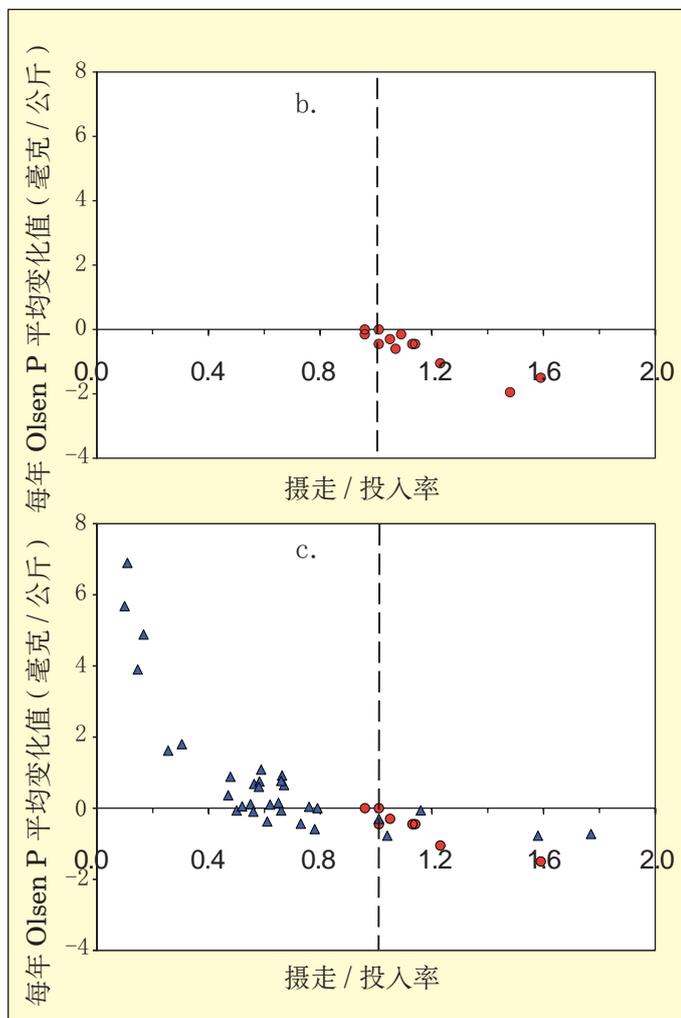


图2: P摄走/施入率(作物带走的P除以P肥用量)和土壤中植物有效磷的关系(a)英国两个长期定位试验[P44等表示每年磷肥平均施用量;(M)表示维持施用量];(b)美国的12个州;(c)●美国数据,▲英国数据。

施P量中;此图中,把Bray-1的数值乘以0.75转换为Olsen-P数值。虽然每一观测值的精确性(因为必须做出假设)存在不确定性,但图2b中的每个点是许多个体观测值的平均值,这表明这是一个可接受的近似值,也是每一个州的实际情况。利用这些数据可以建立一个决定系数 r^2 为0.84的直线函数。大多数比率均大于1(即有一个负的P平衡,土壤P库正在亏损)。

通过肉眼观察图2a和2b可以看出,当把这两组数据放在同一基础上时,可以组合形成图2c,并存在一定程度的共性,而且很有意义。我们并没有选择用一条线把每个数据点连接起来,因为这样可以允许我们从两个方面来考虑分析数据。第一,可用对数函数来拟合,其决定系数 r^2 为0.84;或者第二,可以用一条直线来拟合那些每年施P量很小的土壤,决定系数 r^2 为0.63,另一条直线来拟合六个施P量很高的土壤,决定系数 r^2 为0.84。无论使用什么方法,该组合图显示的数据是来自两个洲完全不同的土壤,在英国数据来自控制试验,而在美国则是由州级聚合数据衍生而来。用一个简单函数可以描述合并后的数据,显示出它功能强大,令人信服。这表明,就获得这些数据的农业土壤而言,其植物有效磷行为存在一个潜在的“简单规则”,即与Syers等^[1]提出的土壤四个无机磷库相关,也正如Johnston等^[5]详细讨论过的那样。

Johnny Johnston是劳斯信托高级研究员,Paul Poulton是英国哈彭登罗斯目斯坦德研究中心访问科学家,该中心资金来自生物技术与生物科学研究委员会(BBSRC)。Fixen博士是IPNI资深副总裁和研究主任;E-mail: pfixen@ipni.net。

参考文献

- [1] Syers, J. K., A.E. Johnston, and D. Curtin. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, 2008, 18. FAO-UN. 107.
- [2] McCollum, R.E. Agron. J., 1991, 83:77-85.
- [3] Halvorson, A.D. and A.L. Black. Soil Sci. Soc. Am. J., 1985, 49:933-937.
- [4] Fixen, P.E., T.W. Bruulsema, T.L. Jensen, R. Mikkelsen, T.S. Murrell, S.B. Phillips, Q. Rund, and W.M. Stewart. Better Crops with Plant Food, 2010, 94(4):6-8.
- [5] Johnston, A.E., P.R. Poulton, P.E. Fixen, and D. Curtin. Adv. Agron., 2014, 123:177-228.

新老玉米杂交种氮素利用率比较

Johnny Johnston, Paul Fixen 和 Paul Poulton 著

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《Better Crops》2014 第4期 P19 - P21)

通过对现有已知相关玉米产量、施氮量、种植密度和全株氮素吸收研究(来自世界各地的100项研究)数据进行分析,比较了“老”(1940-1990)玉米杂交种和“新”(1991-2011)玉米杂交种产量与氮吸收量及氮肥利用率(NUE)的关系。结果证实了“新”杂交种的氮素利用率的增加主要依靠增加成熟期单位植株N的玉米籽粒产量来实现的。玉米籽粒中氮浓度随时间推移而降低,表明将来在提高玉米氮肥利用率的研究上,不应该忽视玉米籽粒的营养品质。

在上个世纪以来,玉米产量逐渐攀升,归因于遗传和管理措施的综合转变。在大多数玉米生产国中,过去60年玉米产量不断攀升的同时也提升了养分利用率,虽然每年的产量信息非常多,但实际上却缺少相应文件来记载这些进展。本研究的主要目的是总结以前发表的科学数据,提高人们理解“旧时期”和“新时期”玉米杂交种产量对氮素吸收量和与之相关的氮肥利用率(NUE)的明显变化关系。

我们从过去研究中搜集的数据(a)从1940起至2011止,以保证涵盖了各个年代广泛的基因型,覆盖了(b)各大洲玉米种植地区,(c)考虑了广泛施氮量范围(从0到37.4公斤N/亩)和种植密度(从741到7248株/亩)。本文只使用了试验数据的平均值。其次,使用的“N吸收”这个专业术语仅限于植株地上部分的吸N量,没有包括根系吸收。其他的玉米性状包括养分利用率及其组成因素。用下面的公式计算N肥利用率NUE(有时称为N素农学效率):

$$NUE = \Delta Y / \Delta N_{\text{肥料}} \quad (1)$$

ΔY 为施N处理(蒲式耳/英亩(bu/A)),1蒲式耳(bu)玉米籽粒=25.4公斤,1英亩(A)=6.07亩)的玉米产量与无N处理的玉米产量(蒲式耳/英亩(bu/A))之差, $\Delta N_{\text{肥料}}$ (lb N/A)指N肥用量(1磅(lb)=0.453公斤)。N肥利用率(NUE)项的组成因素之一是N内部效率(NIE),被定义为

$$NIE = Y / N_{\text{吸收量}} \quad (2)$$

NIE是按单位面积计算的(蒲式耳/磅(bu/lb)N吸收),Y为玉米产量。

另外一个评估氮素利用效率的参数是氮肥回收率(NRE):

$$NRE = \Delta N_{\text{吸收}} / \Delta N_{\text{肥料}} \quad (3)$$

$\Delta N_{\text{吸收}}$ 指施氮处理(磅/英亩(lb N/A))与无氮处理植株氮素吸收量的差值。设定了最大和最小边界值,以限定可能出现的NRE数值($0 < NRE < 1$),从而使计算得出的NRE结果更具有生物学意义^[2]。

籽粒产量和植株氮吸收: 老玉米基因型

表1是新时期和旧时期高产玉米杂交种的产量和全株氮素吸收量比较。N素内部效率为二次曲线模型(图1),随着N肥用量的增加,新品种的平均产量(1004公斤/亩或240 bu/A)明显高于老品种(837公斤/亩或200 bu/A)。

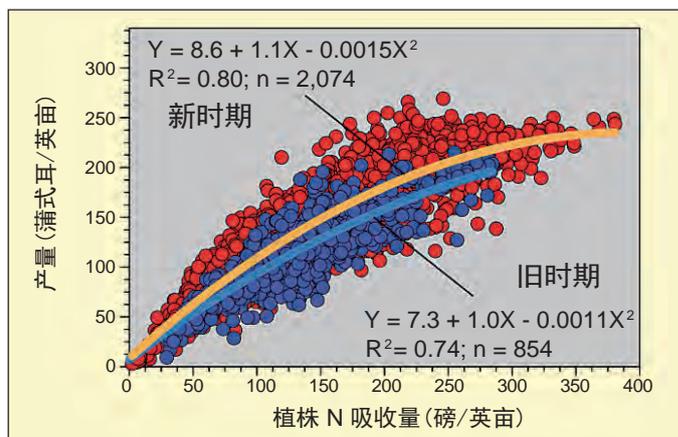


图1 1940-2011玉米成熟期籽粒产量与植株氮吸收量的关系,蓝圈代表1940-1990旧时期的观察值(n=854),红圈代表1991-2011新时期的观察值(n=2074)。(1蒲式耳(bu)玉米籽粒=25.4公斤,1英亩(A)=6.07亩,1磅(lb)=0.453公斤,文中所有图、表中的单位换算相同)

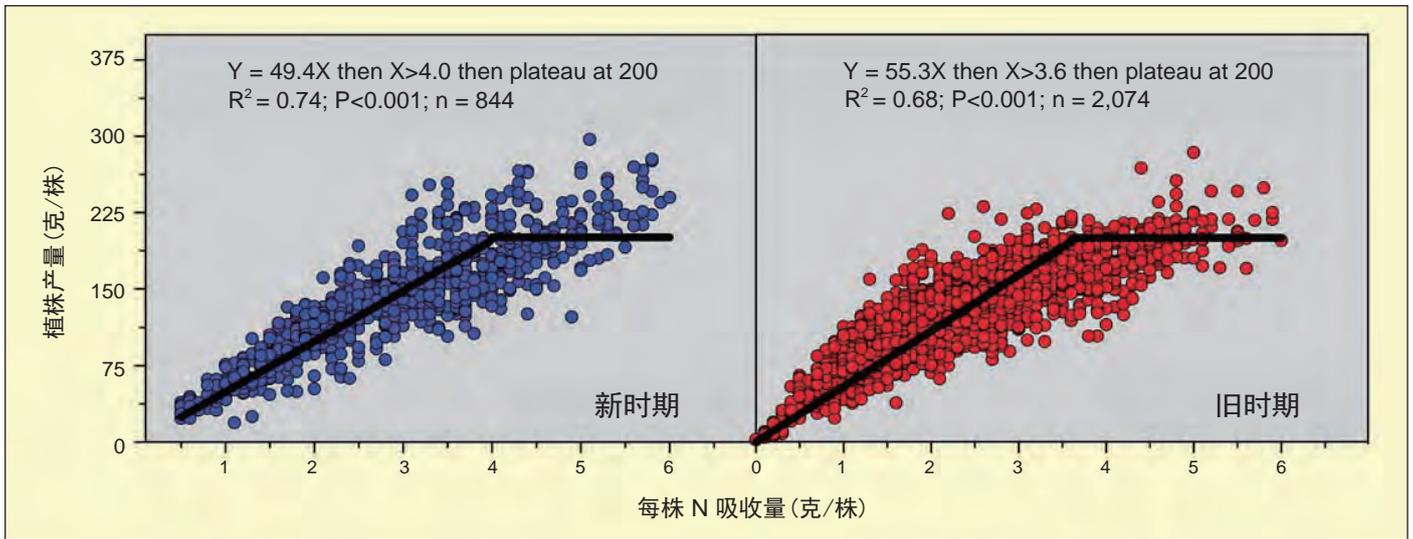


图2 老(蓝色:1940-1990)、新(红色:1991-2011)基因型玉米单株籽粒产量与植株含氮量的关系。

表1 新老玉米杂交种的变量总结

变量	旧时期	新时期
平均施氮量(公斤 N/亩, 括号内单位为 bl N/A)	9.4 (126)	9.3 (125)
种植密度(株/亩, 括号内单位为株/A)	3756 (22800)	3756 (22800)
氮吸收量(公斤 N/亩, 括号内单位为 bl N/A)	10.1 (136)	10.7 (143)
产量(公斤/亩, 括号内单位为 bu/A)	481 (115)	603 (144)
氮素利用率(公斤籽粒/公斤 N, 括号内单位为 bu/bl N)	32.5 (0.58)	37.0 (0.66)
氮素内部效率(公斤/公斤 N 括号内单位为 bu/bl N)	49.9 (0.89)	56.1 (1.00)
粮食收获指数 ¹ (HI)(%)	48	50
N 收获指数 ² (NHI)(%)	63	64
籽粒 N (%)	1.33	1.2
秸秆 N (%)	0.77	0.69
占玉米吐丝(R1)后植株新吸收 N 的百分比	31%	36%
占玉米吐丝(R1)后籽粒新吸收 N 的百分比	52%	56%

¹籽粒收获指数指籽粒重占地上部分干物重的百分比; ²N 收获指数指籽粒 N 占地上部分 N 累计量的百分比。来源: Campitti 和 Vyn, 2012。

通过对每个试验种植密度的调整(表1),可以非常清楚地看到新基因型的N素内部效率高于老基因型(图2)。此外,尽管新基因型的种植密度有所增加,但成熟期单株玉米的最大吸氮量(6克N/株)并没有改变。

氮利用效率的组成部分: NIE 和 NRE

以前记录的NIE改变主要是由于籽粒N浓度改变(%N,图3)。从旧基因型到新基因型,籽粒中的N%下降了约10%(植株中也减少同样的%N)。在分析不同代表性时期玉米杂交种籽粒蛋白质含量后,Duvick^[4]和Scott等^[5]也记录了同样的递减模式。

新旧玉米基因型的NRE值相似,平均值为0.46。土壤氮素供应和作物氮需求之间同步(以下称为N同步)是确定N回收率项(NRE)的关键^[1]:

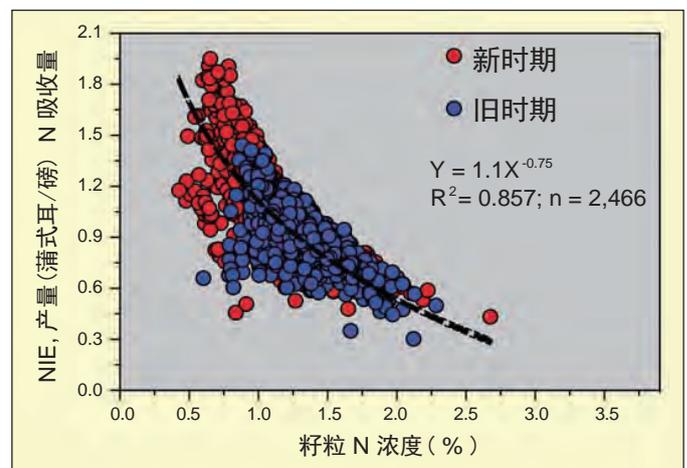


图3 老时期(蓝色,1940-1990年的研究)和新时期(红色,1991-2011年的研究)NIE(基于单位面积的计算结果)与成熟期测定的籽粒N浓度之间的关系。

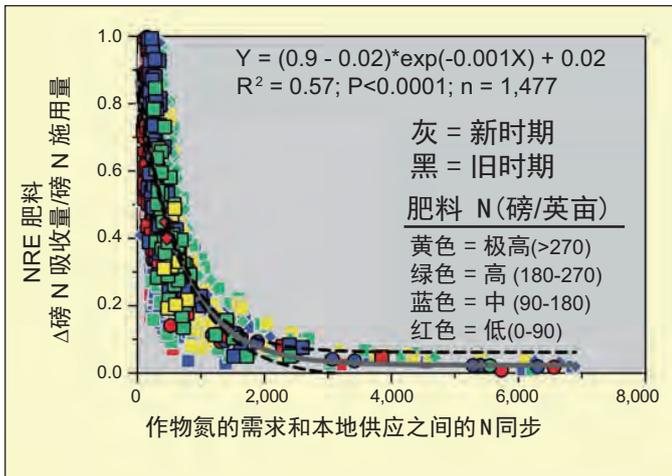


图4 N同步与氮肥的利用效率的关系。新时期=1991-2011试验, 旧时期=1940-1990试验。

$N_{同步} (N_s) = N_{施用} / (1 - N_{无N处理吸收量} / N_{施N处理吸收量})$
NS值越小, N同步性越大。

N_s 和NRE的关联性表明, 好的N同步性可以获得0.4-1.0范围内的NRE值, 这主要对应于低、中施N水平(0-13.4公斤/亩(0-180lb/A))(图4)。当氮肥施用过量时(>20.2公斤/亩(270lb/A)), 平均NRE急剧下降(通常为0.3-0.1)。降低NRE值增加了N损失的环境风险, 并降低了农民的效益。

氮肥用量对产量和N吸收量影响: 新型和旧型杂交品种

为了综合评估不同施N水平下玉米产量与N吸收量的关系, 把试验数据人为地分成7个施氮量范围, 从3.4公斤/亩(45lb N/A)开始, 随后每两级施氮水平间的差值均为3.4公斤/亩(45lb N/A)。

图5中的分析指出 i) 当不施N时, 新玉米基因型比老玉米基因型(ΔGY_{0N})增产~54.4公斤/亩(13bu/A); ii) 随着施氮量的增加, 玉米产量差距增大; iii) 在最大施氮水平(>16.0公斤/亩(215lb/A))时, 增产优势(ΔGY_N)提高到133.9公斤/亩(32bu/A); iv) 在整

参考文献

- [1] Cassman, K.G., A. Dobermann, and D.T. Walters. *Ambio*, 2002, 31:132-140.
[2] Ciampitti, I.A., H. Zhang, P. Friedemann, and T.J. Vyn. *Crop Sci.*, 2012, 52:2728-2742.
[3] Ciampitti, I.A., and T.J. Vyn. *Field Crops Res.*, 2012, 133:48-67.

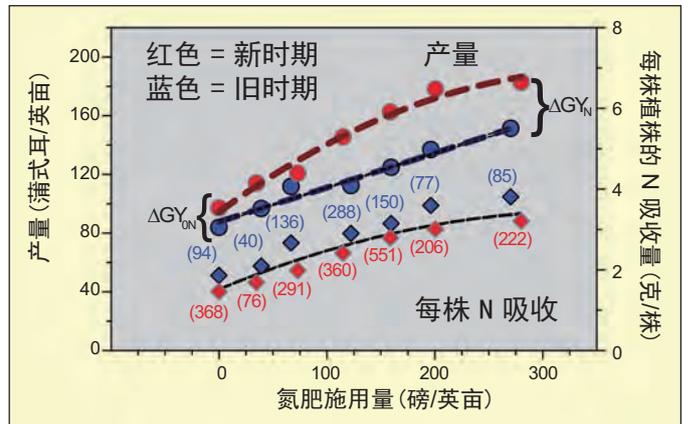


图5 玉米产量和成熟期单株吸氮量与总施氮量的关系。红色和蓝色标识分别代表新时期和旧时期。菱形符号代表N吸收量, 圆形符号代表产量。数值代表每一施氮量新、老时期数据点的总数。 ΔGY_{0N} 为不施N时新、老杂交种籽粒产量的差值。同样, ΔGY_N 为施N时新、老杂交种籽粒产量的差值。

个N肥用量范围内, 新、旧时期单株吸N量非常相似。该分析使我们得出这样的结论, 从1940以来, 单株吸氮量没有改变; 尽管如此, 就单位面积来看, 新玉米杂交种对缺N胁迫的忍耐性更强, 对N肥的反应也更好。

小结

在过去的数十年间, NUE的提高主要是通过增加N素内部效率, 以牺牲籽粒氮浓度为代价来实现的。未来NUE的提高应该尝试同时增加N素利用效率和玉米产量, 而不应再牺牲籽粒的氮浓度。从管理的角度来看, 进一步优化最佳管理措施(“四正确”, 即正确的肥料品种、用量、时间和位置)需要更多研究, 以提高全球食品安全, 同时最大限度地减少全球玉米生产体系中的氮“足迹”。

这篇文章是一篇综述论文的摘要, 最初发表于田间作物研究学报^[3]7月/8月刊。Ciampitti博士是位于美国堪萨斯州曼哈顿市堪萨斯州立大学的助理教授, E-mail: Ciampitti@ksu.edu。Vyn博士是位于美国印地安那州西拉斐特普渡大学的耕作制教授, E-mail: tvyn@purdue.edu。

- [4] Duvick, D.N. CIMMYT, El Batan, Mexico, D.F., 1997, 332-335.
[5] Scott, M.P., J.W. Edwards, C.P. Bell, et al. Smith. Maydica, 2006, 51:417-423.

玉米最佳施氮量更多取决于气候而不是玉米价格

Bill Deen, Ken Janovicek, John Lauzon, Tom Bruulsema 著

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《Better Crops》2015 第二期 P16 – P18)

由于气候变化，玉米产量对氮肥 (N) 的反应出现年际间变化。最佳施氮量取决于玉米产量效应，同时也取决于化肥与玉米的价格比。在加拿大安大略省埃洛拉镇开展的田间试验表明，6 年间玉米最佳施 N 量因天气而变的数值是价格比的 3 倍。尽管可根据价格比来调整施 N 量获取小的利润，但是根据天气情况来调整氮肥则具有更大潜在利润优势和环保优势。

过去 10 年中玉米价格波动很大。在 2011 – 2013 年间，安大略省的农户获得了最高玉米市场价格，然而接下来的 2014 年和 2015 年价格却跌到近 5 年来的最低点。这种市场价格下跌令许多农户不得不重新考虑氮肥施用量。最佳经济施氮量 (EONR) 取决于氮肥与玉米的价格比。玉米售价下降也使最佳施 N 量下降，但是农户缺少信息来回答这样的问题，即“到底应该减多少氮肥呢”？我们在这份研究报告中使用了两个数据源来量化最佳经济施 N 量和价格之间的关系，一个是安大略省的玉米氮肥数据库，另一个是长期施氮试验，同时比较了天气对最佳经济施 N 量的影响。

2013 年的极佳玉米生长条件带来了高产和高最佳施 N 量

安大略省的玉米氮肥数据库含括 1962 – 2013 年玉米产量的田间 N 肥效应试验数据。较早的版本由 Janovicek 和 Steward^[1] 编写。该数据库用于查询生成一个子集，涵盖了 1990 – 2013 年间开展的 213 个田间试验 (这些田间试验的前季作物为大豆，食用干豆，牧草 (无豆科) 和小粒谷物 (大多数为冬小麦)，不包括后作 (含红车轴草)) — 试验至少有 4 个氮肥用量，非缺 N 处理的玉米籽粒产量都高于 493 公斤 / 亩。为了描述 N 肥的产量效应特征，

表 1 加拿大安大略省一般农场的平均支出与收入价格

	2009	2010	2011	2012	2013	2014
氮肥价格 (元 / 公斤)	8.20	5.30	6.23	7.68	6.96	6.44
玉米价格 (元 / 公斤)	0.77	0.98	1.15	1.23	1.09	0.87
价格比 (公斤玉米 / 公斤氮)	10.7	5.5	5.4	6.3	6.3	7.4

数据来源: McEwan (2015) 和 Kumuduni (2015)。

表 2 最佳经济施 N 量随玉米和氮肥的价格比上升而下降。但该变化不大，除非氮肥价格比玉米价格高得多

价格比 ¹ (公斤玉米 / 公斤氮)	低产试验 ² 460 – 669 (公斤 / 亩)		高产试验 ² 669 (公斤 / 亩)	
	最佳施 N 量	产量	最佳施 N 量	产量
	(公斤 / 亩)			
4.5	8.95	577.21	11.11 (149)	773.80
5.4	8.65	573.03	10.74 (144)	773.80
6.7	8.20	568.85	10.22 (137)	769.62
10.7	6.79	560.48	8.88 (119)	761.25
13.7	5.89	547.93	8.06 (108)	748.70

注: ¹ 2009 – 2014 年安大略省玉米氮肥的平均价格比是 6.7; 年平均比值的范围是 5.4 – 10.7。
² n=113 和 100, 分别指安大略省玉米 N 数据库中 113 个低产玉米效应试验和 100 个高产玉米效应试验。

表 3 不同 N 肥用量下的利润比较

对比情况	2009	2010	2011	2012	2013	2014
实际与平均价格比相比较 ¹	1.51	0.21	0.02	0.02	0.02	0.06
实际 EONR 与 111.2 公斤 N/ 亩 ² 相比	5.21	6.95	6.86	6.77	46.08	20.91

¹ 表 1 中每年实际价格比与试验期间的平均价格比 6.7 相比较。

² 11.2 公斤 N/ 公顷的施氮量是加拿大艾大略省玉米 N 计算器根据能获取的平均产量计算器推荐的。

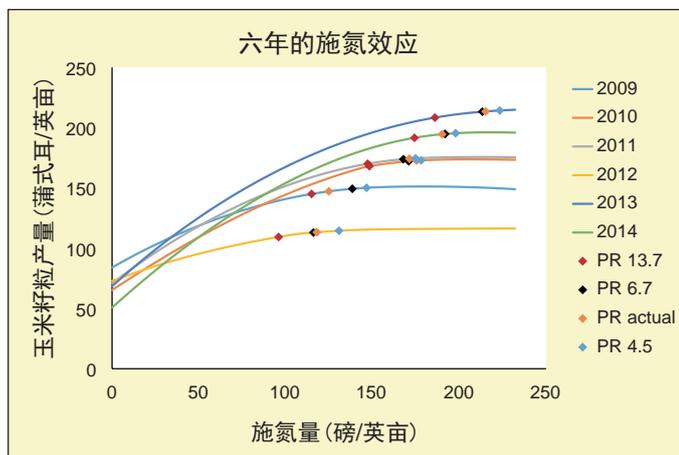


图 1 该图是安大略省埃洛拉镇玉米施氮效应的产量拟合曲线。图中的点代表不同价格比的玉米最佳经济施 N 量，其变化范围在 4.5 - 13.7 公斤玉米 / 公斤 N。1 磅 = 0.454 公斤，1 英亩 = 6.069 亩，1 蒲式耳玉米 = 25.401 公斤。

来自安大略省玉米氮肥数据库的数据使用了二次平台反应模型来拟合。

2009 年在加拿大省埃洛拉镇上开展了一个玉米长期连作试验。试验土壤为圭尔夫壤土，pH 7.7，其中粉沙 48%，粘粒 20%，有机质为 4.5%。在 6 年试验期间农艺管理措施保持不变，除 2010 年秋天用板犁代替了耢刀耕作外。前 5 年试验使用的玉米杂交品种是先锋 38B14，2014 年换成了 Delcalb DKC39-97。试验期间天气是年际间变化的主要因子。播种时所有试验小区都施用 2 公斤 N/ 亩作为启动肥。每年施用额外的 N 肥，使四个试验小区的年施 N 总量达到 5.82, 9.63, 14.56 和 17.32 公斤 N/ 亩。这些氮肥在施用时间上包括播种前的基肥和播种后的追肥，并且记录了前作玉米的不同施 N 量。将 N 肥效应的产量数据按时间和历史进行平均。试验重复 4 次，每年的产量曲线图都有 160 个数据点作支撑。产量曲线采用“作物养分效应工具 V4.5” (Bruulsema, 2015) 来拟合，该工具使用了五个反应函数的 R² - 加权平均值，提供了各种情况下更精确，更详细的效益比较。

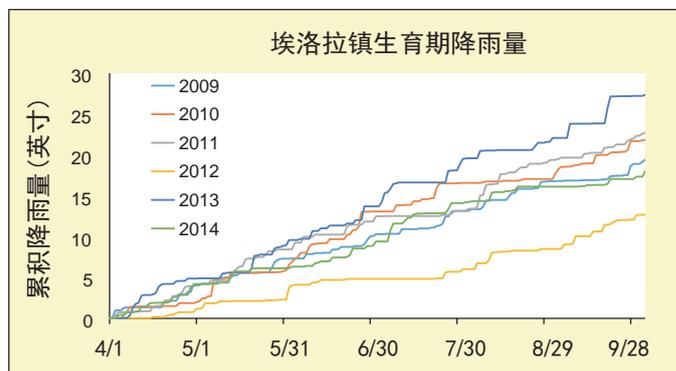


图 2 不同年份玉米生长期降雨累计量的差异说明了玉米产量和最佳施氮量的主要变化。1 磅 = 0.454 公斤，1 英亩 = 6.069 亩，1 蒲式耳玉米 = 25.401 公斤。

价格比 (PR) 被定义为玉米价格除以化肥价格。最佳经济施 N 量被定义为最后一次 N 肥增量产生的玉米产量在价值上与施用的氮肥的成本等值，这一施 N 量被称作最佳经济施 N 量。

结果

年度间的价格比变化很大 (表 1)，即使是基于年平均价格。2009 - 2014 年平均玉米价格除以平均氮肥价格得出的价格比为 6.7 公斤玉米 / 公斤 N。考虑到在每一年中，有些农户会比其他农户投入更多的肥料而获得较少的收益，因此在表 2 中我们把价格比扩展到了更宽的范围，即基于市场肥料报价变化的一半，而假定玉米价格波动为 ±10%。最佳施氮量的变化，相对于价格比 6.7，当价格比增加到最高值时变为最大 (仅 2009 年出现)。这些变化在低产试验和高产试验中的反应相似。减少最佳经济施 N 量带来的是玉米产量降低。针对高肥料价格和低玉米价格的情况，农户减少肥料用量时预见到了 3% - 5% 的减产 (参见表 2 的价格比)。

在埃洛拉镇的田间试验中，玉米产量对 N 肥用量的反应每年都大不相同 (图 1)。每年玉米产量对水分利用

率的反应可以相差 448.33 公斤 / 亩 (100 蒲式耳 / 英亩) (图 2)。2012 年最干旱, 玉米的产量和最佳经济施 N 量都最低。2013 年产量最高, 因为在 6 月下旬和 7 月上旬出现了罕见的高降雨量。尽管上一年 (2012 年) 干旱, 2013 年的最佳施 N 量最高。

6 年来最佳施 N 量的变化范围为 8.80 – 16.07 公斤 N / 亩 (118 – 215 磅 N / 英亩) (图 1)。年际间产量变化为一年内因调整极值而形成的平均价格比的三倍。因为年际间变化由天气所致, 因而很难预测。尽管如此, 还是可以通过查询每年 6 月中旬的降雨量而看出一些产量变化的端倪 (图 2)。另一方面, 利用模型工具也可以预测这段时间的氮素矿化和损失量。农户就可以在除 6 月中旬外的其它生长季节施用氮肥。这些数据指出, 还有很大潜在的机会来改善最佳 N 肥用量, 即使用模型工具把实际和预报的天气数据相结合, 从而做出玉米季中氮肥使用决策。

在实施实际最佳经济施氮量的情况下, 不同 N 肥用量下的利润比较列于表 3, 并与安大略省玉米氮肥计算器

推荐的 11.2 公斤 N / 亩 (150 磅 N / 英亩) 用量相比较。这些潜在利润数值是通过图 1 的效应曲线和表 1 价格计算出来的。强调年际间变异得到的利润增值远远大于仅根据每年实际价格比而做出调整的利润。

当环境因素的影响也被纳入施肥决策时, 强调氮肥效应与天气关联变化产生的效益将会进一步增加。测定土壤硝态氮及其对土壤有机氮的长期影响将在今后的文章中逐一报道。Roy^[4] 等人报道了两年来对土壤氧化亚氮释放的监测情况。如何使氮肥用量满足每年作物需求, 减少土壤中过剩有效 N 的损失, 还存在很大的探索空间。

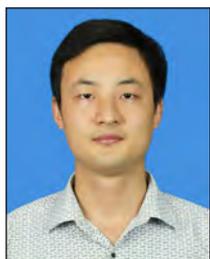
Deen 博士 (E – mail: bdeen@uoguelph.ca) 和 Janovicek 博士任职于加拿大圭尔夫大学植物农业学院。Lauzon 博士任职于加拿大圭尔夫大学环境科学研究学院。

参考文献

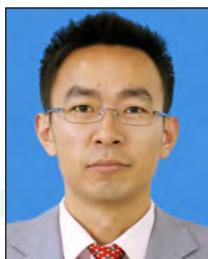
- [1] Janovicek, K.J. and G.A. Stewart. In Proceedings of the 34th North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference. Des Moines, IA, USA., 2004, 12–19.
- [2] Kumuduni, 2015. Historical Provincial Estimates by Crop, Ontario Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs, http://www.omafra.gov.on.ca/english/stats/crops/estimate_hist_metric.htm#Grain_Corn, Accessed October 20, 2014.
- [3] McEwan, K. 2015. Ontario Farm Input Monitoring Project, University of Guelph, Ridgetown, ON, Canada. [http://www.ridgetownc.uoguelph.ca/research/research-reports-profile.cfm?profile=mcewan&name=Ken McEwan](http://www.ridgetownc.uoguelph.ca/research/research-reports-profile.cfm?profile=mcewan&name=Ken%20McEwan) Accessed 30 March 2015.
- [4] Roy, A.K., C. Wagner-Riddle, et al. Can. J. Soil Sci., 2014, 94:563–573.

2015 年 IPNI 研究生奖学金评选结果揭晓

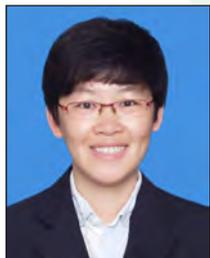
为鼓励在植物营养和养分管理相关学科取得优异成绩的优秀研究生，2015 年国际植物营养研究所 (IPNI) 研究生奖学金获得者已揭晓。经过评审委员会严格按照标准对每一位申请者的学术业绩和其他各方面进行评价，结果有 37 位来自不同国家和地区的在读研究生获得 2015 年度 IPNI 研究生奖学金。中国有 4 位研究生获得了这项奖励，每位获得者得到 2000 美元资助。



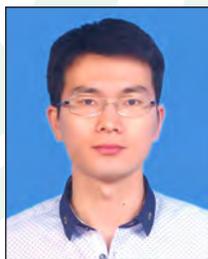
李继福，华中农业大学植物营养学硕博连读研究生。主要从事秸秆还田替代化学钾肥的效果和机理研究。通过多年多点的田间试验和借助原子力显微镜技术进行的室内模拟来探寻秸秆还田对土壤-植物体系钾素释放、固定和循环的影响。现任教于长江大学农学院，继续从事农业科学研究和教学工作，为农业的可持续发展贡献自己的一份力量。



汪吉东，中国科学院南京土壤研究所植物营养学专业博士研究生（江苏省农业科学院委托培养），主要从事甘薯钾效率的生理机制及其植株诊断研究。通过探讨不同钾效率甘薯基因型在钾吸收、利用上的差异，筛选出钾效率不同甘薯品种，以此探讨钾效率差异的根系特征、库源关系，最终建立钾的植株诊断指标。毕业后将继续从事土壤酸化机理及修复和甘薯的养分管理研究，为可持续农业发展贡献自己的力量。



金可默，中国农业大学植物营养学博士研究生（已毕业）。主要研究根系对于养分异质性和土壤机械阻力的响应及其调控机制研究，为深入理解通过挖掘作物自身生物学潜力及根系的形态和生理可塑性，提高作物养分和水分的吸收利用效率具有重要的理论和实践意义，也为指导作物生产提供了重要的科学依据。未来，会在高校中继续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生产及安全做出自己的贡献。



周子军，中国科学院南京土壤研究所植物营养学专业硕博连读研究生。主要从事水基聚合物包膜控释肥料的研制及其应用。其研究揭示了几种水基聚合物改性材料和热后处理技术影响包膜肥料控释效果的机制；同时通过评价该材料在土壤中的环境友好性及该包膜肥料在大田作物上的综合收益，初步证明了水基聚合物包膜控释肥料具有广阔的应用前景。毕业后希望继续从事缓控释肥料相关的研究工作，为农业简便、高效及可持续发展贡献自己的力量。

IPNI 研究生奖学金自 2008 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 2015 年已有 30 位来自中国研究生获得此项殊荣。请符合条件的研究生请于每年 1 月 1 日至 4 月 30 日提交申请。详情请随时关注 www.ipni.net/awards。