

高效施肥

BETTER CROPS CHINA

2014年5月总第32期

本期文章……

我国北方玉米施肥产量效应
和经济效益分析



西北地区马铃薯施用氮磷钾
效应和经济效益分析



水分和钾素胁迫对不同基
因型棉花钾素利用效率的
影响



作物钾素营养与施肥专辑

更多文章 敬请关注

小区编号:1
施肥量 N(尿素) 1.867kg
P₂O₅(三料磷) 0.5869kg
K₂O(氯化钾) 0.6kg

 IPNI
www.ipni.net

高效施肥

国际植物营养研究所系列期刊
《BETTER CROPS》中文版专刊

2014年5月总第32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 and Africa
Group

理事会

S.R. Wilson, Chairman (CF Industries Holdings, Inc.)
J.T. Prokopanko, Finance Committee Chair
(The Mosaic Company)

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/中亚和中东项目部

Moscow, Russia
Svetlana Ivanova, Vice President, IPNI Eastern Europe
/ Central Asia and Middle East Group

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 • Belarusian Potash
Company • CF Industries Holdings, Inc. • Compass
Minerals Specialty Fertilizers • International Raw
Materials LTD • Intrepid Potash, Inc. • K+S KALI GmbH
• The Mosaic Company .OCP S.A. • PotashCorp • QAFCO
• Simplot • Sinofert Holdings Limited • SQM • Toros
Tarim • Uralchem • Uralkali.

CONTENTS

目录

我国北方玉米施肥产量效应和经济效益分析	3
何 萍 谢佳贵 李玉影 王宜伦 贾良良 崔荣宗 王宏庭 邢月华 孙克刚	
西南和华南地区几种作物施用钾肥的经济效益分析	9
涂仕华	
西北地区马铃薯施用氮磷钾效应和经济效益分析	14
李书田 段 玉 陈占全 郭天文 李友宏	
低钾胁迫对棉花光合作用和光合产物分配的影响	21
夏 颖 姜存仓 汪 霄 陈 防	
不同磷钾水平下云南旱地玉米产量和养分吸收利用研究	27
尹 梅 王贵宝 苏 帆 洪丽芳 付利波 陈 华 陈检锋 任石所 张勤斌 黄 惠	
不同基因型作物及其根际钾素高效利用机理的研究进展	33
汪 霄 张过师 陈 防	
施钾对莲藕产量形成和氮磷钾养分累积分配的影响	37
刘冬碧 陈 防 熊桂云 巴瑞先 张富林 张继铭 余延丰	
适宜的钾、氮营养改善莲藕品质	43
刘冬碧 张过师 熊桂云 范先鹏 杨 利 张富林 陈 防	
水分和钾素胁迫对不同基因型棉花钾素利用效率的影响	48
汪 霄 陈 防	
植物钾素高效利用机理研究进展	54
王 利 陈 防 万开元	

网页: <http://www.ipni.net>
<http://ipni.caas.ac.cn>

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。

我国北方玉米施肥产量效应和经济效益分析

何萍¹ 谢佳贵² 李玉影³ 王宜伦⁴ 贾良良⁵ 崔荣宗⁶ 王宏庭⁷ 邢月华⁸ 孙克刚⁹

(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. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033; 3. 黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 哈尔滨 150086; 4. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002; 5. 河北省农林科学院农业资源与环境研究所, 石家庄 050051; 6. 山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100; 7. 山西省农业科学院农业资源研究所, 太原 030006; 8. 辽宁省农业科学院环境资源与农村能源研究所, 沈阳 110161; 9. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002)

摘要: 2010–2012 年在我国北方玉米种植区开展了多点田间试验, 研究玉米施用氮、磷、钾肥的增产效应和经济效益。试验设置基于产量反应和农学效率的推荐施肥 (Nutrient Expert, 简称 NE), 同时在此基础上设置减素处理包括不施氮、不施磷和不施钾处理, 以农民习惯施肥为对照。结果表明, 玉米施用氮、磷和钾平均增产分别为 125.9、63.6 和 64.9 公斤/亩, 表明不施氮对产量影响最大、其次为钾, 不施磷对产量影响最小。经济效益分析结果表明, 施用氮、磷和钾平均产投比 (VCR) 分别为 2.8、7.8 和 4.6, 表明投入单位金额的氮、磷和钾养分可分别获得 2.8、7.8 和 4.6 倍的收益。通过预测不同肥料价格和玉米价格下的 VCR, 结果表明, 随着施肥增产效应的增加, 即使施肥量增加, VCR 也增加。收益多少随增产效应、施肥量、肥料和玉米价格而变化。与农民习惯施肥比较, 基于 NE 推荐施肥能够增产增收。

关键词: 玉米; 产量效应; 经济效益

玉米作为重要的粮饲兼用作物以及重要的工业原材料, 在保障粮食安全方面具有重要战略意义。2010 年玉米的种植面积达到约 4.9 亿亩, 占粮食作物种植面积的 29.5%, 使玉米成为我国第一大粮食作物^[1]。在我国东北地区种植的春玉米和在华北地区种植的夏玉米其种植面积已达到玉米总种植面积的 61%。

化学肥料在保障我国粮食安全中发挥重要作用。然而近年来化肥过量和不合理施用问题严重, 也有影响到生态环境安全^[2]。因此, 迫切需要一种优化的推荐施肥方法以保障粮食安全和提高农民收益。最近, 国际植物营养研究所和中国农业科学院农业资源与农业区划研究所研创了一种新的推荐施肥方法—基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法并通过田间试验证明该方法是一种能够增产、增收并提高肥料利用率的重要的推荐施肥方法^[3-7]。以往有关施氮对玉米增产效应和施肥效益的影响较多集中在单一试验点的研究^[8-12]。我国北方玉米产区因不同试验点的土壤类型、基础土壤养分供应以及肥料施用历史不同, 氮、磷、钾施用对玉米的增产效应可能会有所不同。另外, 近年来粮食和肥料价格的波动对施肥经济效益影响也很大。因此, 本研究主要研究以下三个方面: (1) 氮、磷、钾施用对玉米的增产效应; (2) 氮、磷、钾施用的经济效益; (3) 基于给定施肥效应、肥料和玉米价格情况下玉米的经济效益变化。以期通过以上研究, 为我国北方玉米科学施肥和经济施肥提供一定的借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2010–2012 年在东北和华北玉米种植区的 373 个田块上进行, 用于评价氮、磷、钾在玉米上的施肥效应以及验证 NE 专家系统。所有 373 个田块中, 分别有 43, 58, 41, 49, 112, 33 和 37 个试验是在黑龙江、吉林、辽宁、河北、河南、山东和山西进行。黑龙江、吉林、辽宁、河北、河南、山东和山西的供试土壤分别为黑土、黑土、棕壤、潮土、潮土、褐土和棕壤。在每个田块上 (每个处理小区面积 90–100 平方米, 不设重复) 设置以下 5 个处理: (1) NE: 基于 NE 专家系统推荐施肥, 施肥量为



10.4 (7.3–15.3) 公斤 N/亩, 3.7 (2.1–5.9) 公斤 P_2O_5 /亩, 以及 4.5 (1.9–7.2) 公斤 K_2O /亩; (2) 0–N: 不施氮, 磷钾肥用量同 NE 处理; (3) 0–P: 不施磷, 氮钾肥用量同 NE 处理; (4) 0–K: 不施钾, 氮磷肥用量同 NE 处理; (5) FP: 农民习惯施肥, 施肥量为 14.9 (3.2–30.7) 公斤 N/亩, 4.1 (0–16.8) 公斤 P_2O_5 /亩, 和 3.3 (0–11.8) 公斤 K_2O /亩。氮磷钾肥料品种分别采用尿素、过磷酸钙和氯化钾。玉米品种为当地主栽品种并保持每一地点密度一致。夏玉米在播种后灌水一次, 春玉米主要靠降雨。其他的农艺措施包括除草和病虫害防治主要按照高产玉米管理进行。成熟期, 收获中间 40–50 平方米小区按照 15.5% 的标准水分产^[6]。

1.2 数据分析

施肥产量效应采用 NE 推荐施肥小区产量减去减素小区的产量。施肥产投比为施肥效益与肥料投入的比值, 施肥效益为产量效应乘以玉米价格, 肥料投入为肥料用量乘以肥料价格。在设定不同产量效应的施肥效益分析中, 采用第 25 个、第 50 个和第 75 个百分位数观测数值作为产量效应低、中和高水平^[7, 13], 而把 2010–2012 年玉米最低价格、中间价格、最高价格以及最高价格的 125% 和最高价格的 150% 作为现在和将来的可能的价格变化。不同产量效应下的施肥量是根据 NE 专家进行推荐确定的。肥料价格和玉米价格来源于全国农产品成本收益资料汇编^[14]。

方差分析采用 SAS (1999) 统计软件, 图形采用 Sigmaplot 10.0 统计软件。相关性分析采用 Microsoft Excel 10.0。

2 结果与分析

2.1 施肥的增产效应

与农民习惯施肥比较, NE 专家系统显著提高了河南、黑龙江、吉林和辽宁四个省份籽粒产量 ($p < 0.05$), 七省平均籽粒产量也显著提高 ($p < 0.05$)^[6]。为便于讨论, 文中产量效应中主要依据 NE 小区产量与各减素小区产量差来计算。

田间多点试验表明 NE 小区的平均产量为 683.7 公斤/亩, 施用氮、磷、钾肥的产量效应分别平均为 125.9, 63.6 和 64.9 公斤/亩, 表明与 NE 推荐施肥比较, 不施氮、磷、钾分别平均减产玉米 125.9, 63.6 和 64.9 公斤/亩。然而, 各试验点产量效应变异很大, 氮、磷、钾

素产量效应变化范围分别为 22.7–526.7 公斤/亩, 0.73–358.7 公斤/亩 以及 0.6–273.1 公斤/亩。黑龙江、吉林、辽宁、河北、河南、山东和山西各点的施氮产量效应分别为 202.3, 154.3, 154.9, 65.4, 142.6, 78.9 和 82.9 公斤/亩 (图 1), 施磷产量效应分别为 97.5, 81.1, 95.1, 42.3, 62.9, 376 和 620 公斤/亩 (图 2), 施钾产量效应分别为 1454, 1063, 1532, 877, 910, 383 和 592 公斤/亩 (图 3)。

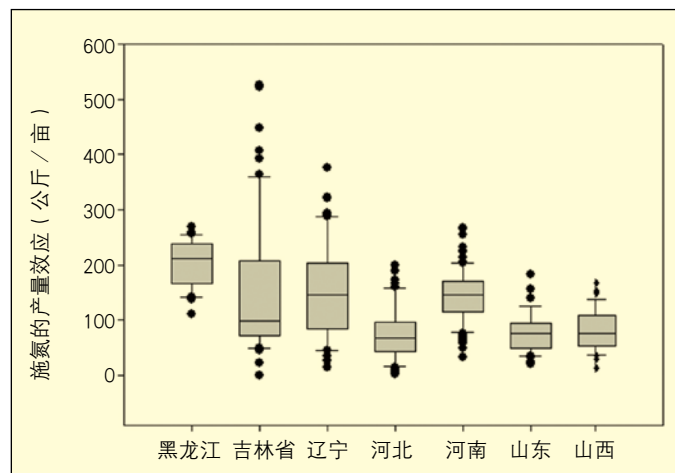


图 1 玉米七省施氮的产量效应

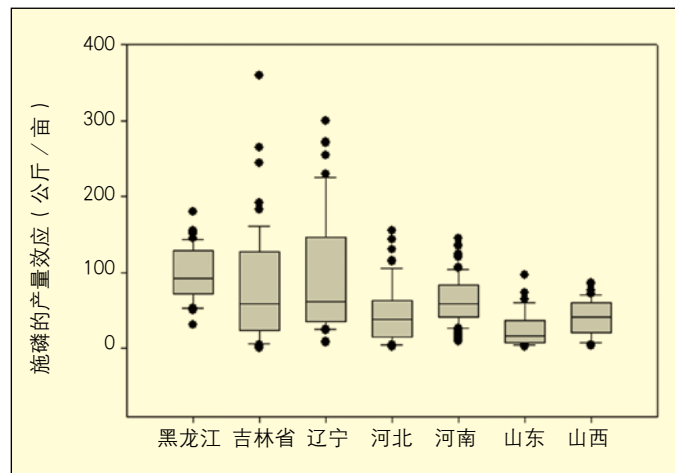


图 2 玉米七省施磷的产量效应

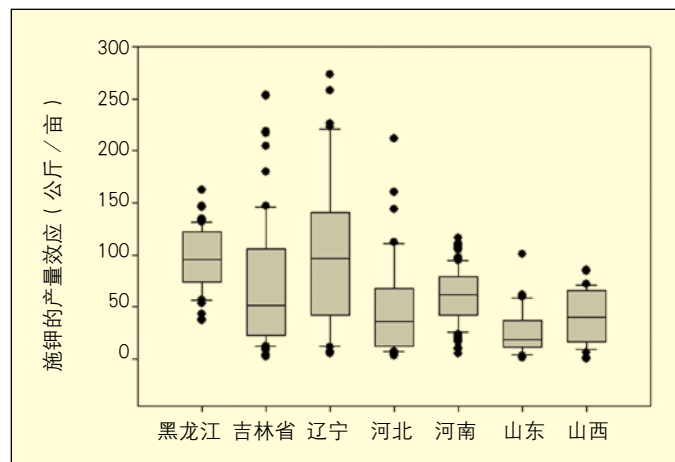


图 3 玉米七省施钾的产量效应

2.2 经济效益分析

七省 373 个试验点的经济效益分析结果表明, 肥料氮、磷、钾施用的产投比 (VCR) 分别为 2.8 (0.5-12.1), 7.8 (0.1-43.7), 和 4.6 (0-18.6), 表明每投入 1 元的氮、磷、钾肥料平均分别能够产生 2.8 元、7.8 元和 4.6 元的经济效益 (图 4-6)。虽然玉米施用氮磷钾肥料的产量效应是 $N > K > P$, 而氮磷钾施用后的经济效益则表现为施磷获得的 VCR 最大, 其次为施钾, 施氮 VCR 最低。施磷 VCR 高的原因与较低的施磷量和较低的磷肥价格有关。虽然施氮的产量效应较大, 但是较高的施氮量是施氮 VCR 低的主要原因。在 373 个试验点中, 分别有 30, 39 和 43 个试验点的 VCR 小于或等于 1.0, 其相对百分比分

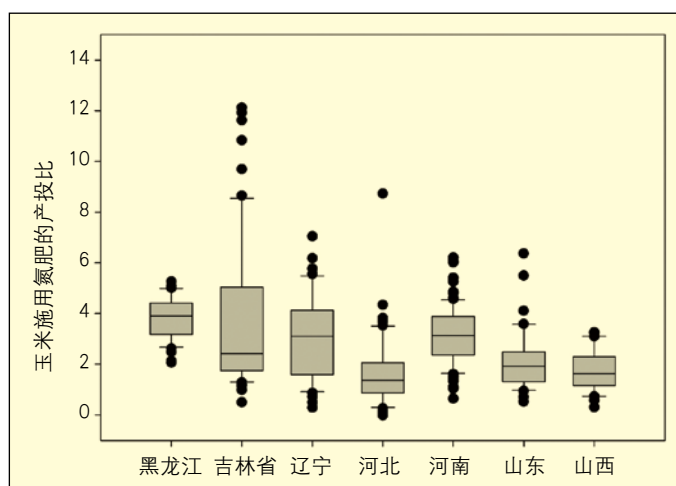


图 4 玉米施用氮肥的产投比

(氮肥价格与玉米价格以实际价格计算, 2010、2011 和 2012 年氮肥价格分别为 3.96, 4.80 和 5.28 元 / 公斤, 玉米价格分别为 1.87, 2.12 和 2.39 元 / 公斤)

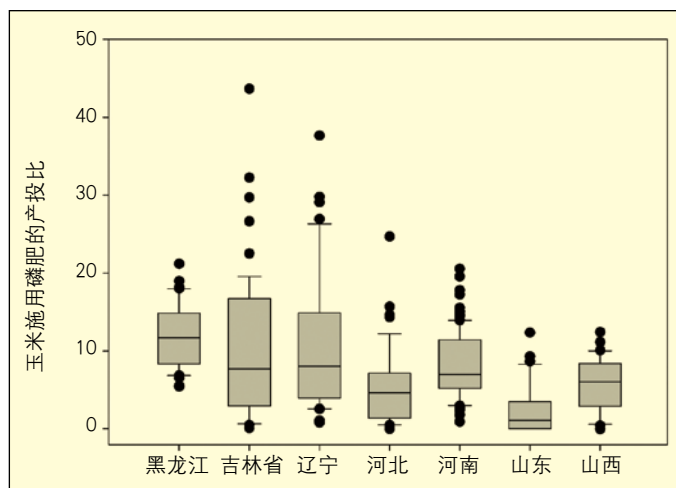


图 5 玉米施用磷肥的产投比

(磷肥价格与玉米价格以实际价格计算, 2010、2011 和 2012 年磷肥价格分别为 4.16, 4.52 和 4.91 元 / 公斤, 玉米价格同上)

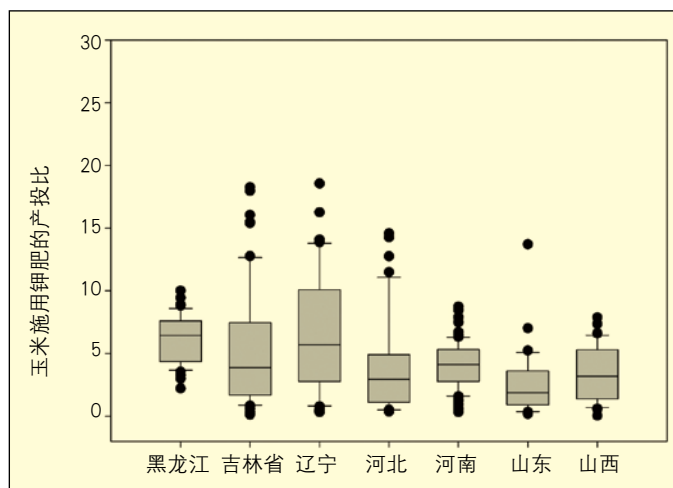


图 6 玉米施用钾肥的产投比

(2010、2011 和 2012 年钾肥价格分别为 6.43, 6.67 和 6.92 / 公斤, 玉米价格同上)

别为 8%, 10% 和 11%。表明在当前的养分管理和市场条件下, 约有 90% 的试验点施用氮、磷、钾肥料能够获得经济效益。

2.3 给定产量效应、肥料用量、肥料和玉米价格下经济效益分析

为预测将来肥料和玉米价格增加情况下玉米施肥的经济效益, 分析了不同产量效应条件下玉米的经济效益。分别用施用氮、磷、钾肥的第 25 个, 第 50 个和第 75 个百分位数下的施肥效应代表施肥的低、中、高三个施肥效应, 而相对应的施肥量则由 NE 专家系统产生, FP 施肥量则根据农民实际的施肥量确定。肥料价格分别采用 2010-2012 年的最低价格、中间价格、最高价格、最高价格的 125% 以及最高价格的 150% 来代表现在以及将来可能升高的肥料价格, 而玉米价格则采用能够覆盖当前玉米价格以及将来可能增加的玉米价格。

施氮后玉米的 VCR 变化范围为 1.9-13.5, 表明总体来讲氮肥施用能够给农民带来一定的经济效益。在 25% 的施氮产量效应和 7.3 公斤 N / 亩施氮量下, 在最高氮肥价格 (7.92 元 / 公斤) 和最低玉米价格 (1.5 元 / 公斤) 下玉米施氮的 VCR 为 1.9, 表明该条件下农民施氮能够获得 1.9 倍于肥料投入的收益。而且 VCR 随着玉米价格增加而增加。在 50% 和 75% 的施氮产量效应以及 10.0 和 12.7 公斤 N / 亩的施氮量下, 在最高氮肥价格以及最低玉米价格下的 VCR 分别为 2.2 和 2.5, 同样 VCR 随着玉米价格的增加而增加。以上结果表明, 在施氮产量效应低、

施氮产量效应 = 71.7 公斤 / 亩
施氮量 = 7.3 公斤 N / 亩

施氮产量效应 = 116.5 公斤 / 亩
施氮量 = 10.0 公斤 N / 亩

施氮产量效应 = 169.1 公斤 / 亩
施氮量 = 12.7 公斤 N / 亩

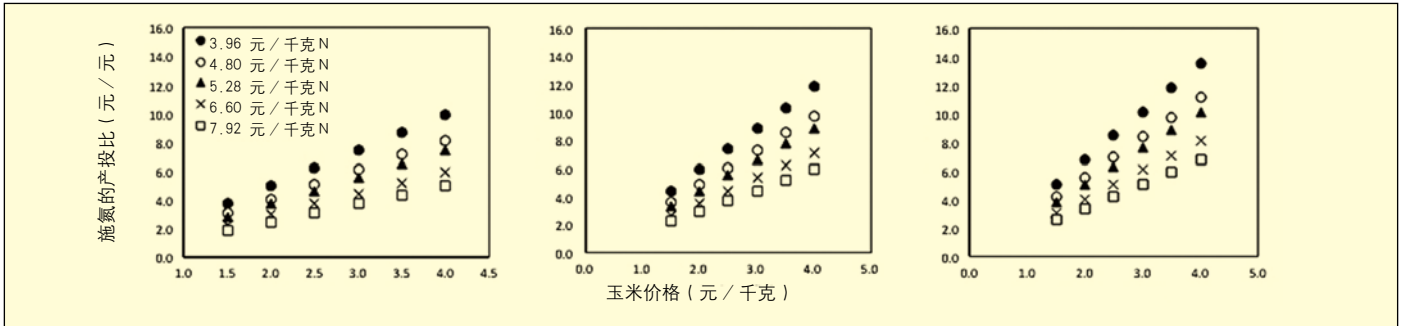


图 7 不同施氮产量效应，以及不同肥料和玉米价格下玉米施氮的产投比 (VCR)

施磷产量效应 = 30.3 公斤 / 亩
施磷量 = 3.3 公斤 P₂O₅ / 亩

施磷产量效应 = 53.7 公斤 / 亩
施磷量 = 4.0 公斤 P₂O₅ / 亩

施磷产量效应 = 86.7 公斤 / 亩
施磷量 = 4.7 公斤 P₂O₅ / 亩

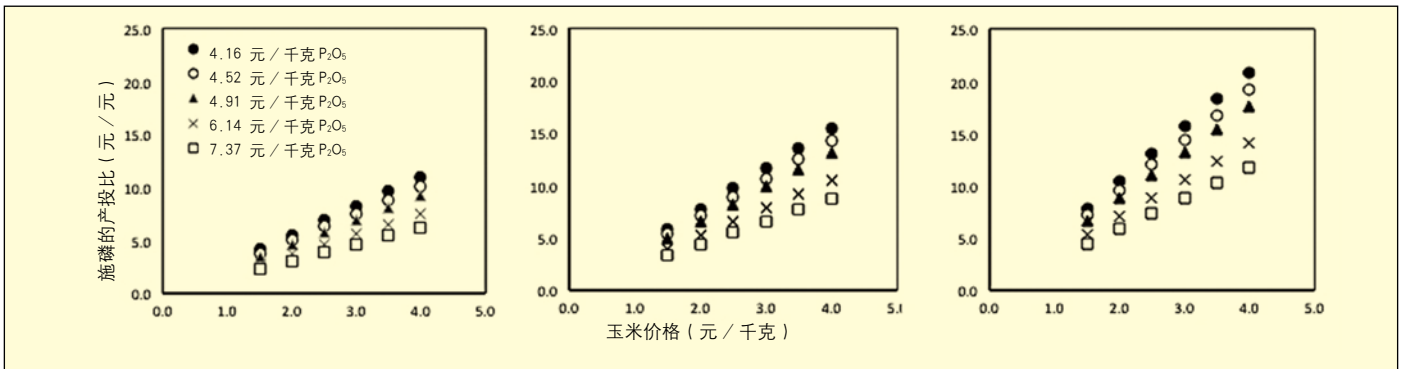


图 8 不同施磷产量效应，以及不同肥料和玉米价格下玉米施磷的产投比 (VCR)

施钾产量效应 = 26.9 公斤 / 亩
施钾量 = 4.0 公斤 P₂O₅ / 亩

施钾产量效应 = 55.7 公斤 / 亩
施钾量 = 4.7 公斤 P₂O₅ / 亩

施钾产量效应 = 88.5 公斤 / 亩
施钾量 = 5.3 公斤 P₂O₅ / 亩

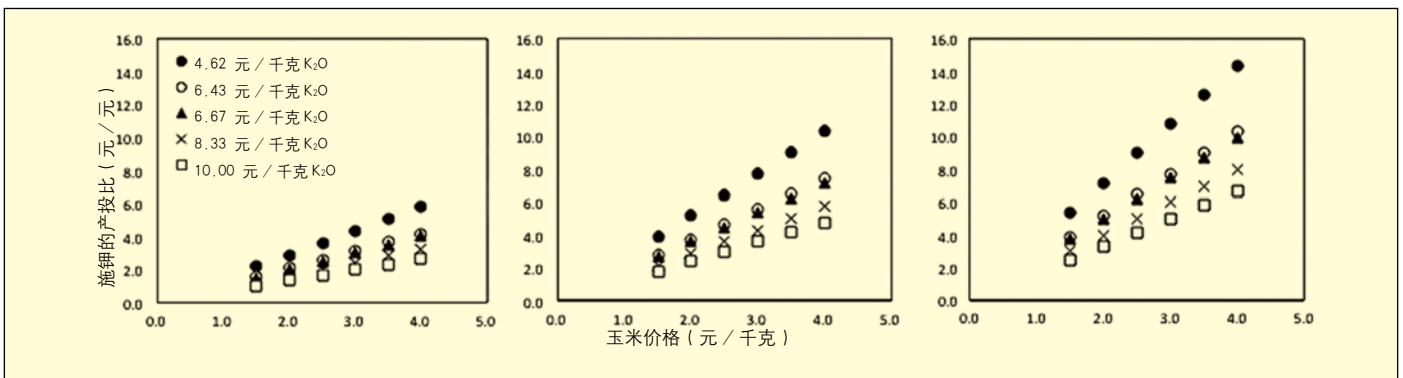


图 9 不同施钾产量效应，以及不同肥料和玉米价格下玉米施钾的产投比 (VCR)

中、高的情况下，农民施氮均能获益，而且VCR随着施氮产量效应而增加，也随着玉米价格增加而增加（图7）。

同样，在低、中、高施磷产量效应下，即在3.3公斤P₂O₅/亩对应的30.3公斤/亩产量效应，4.0公斤P₂O₅/亩对应的53.7公斤/亩产量效应，4.7公斤P₂O₅/亩对应的86.7公斤/亩产量效应下，在最高磷肥价格（7.37元/公斤）和最低玉米价格（1.5元/公斤）下的VCR分别为1.8、2.7和3.8；在低、中、高施钾产量效应下，既在4.0公斤K₂O/亩对应的26.9公斤/亩产量效应，4.7公斤K₂O/亩对应的55.7公斤/亩产量效应，5.3公斤K₂O/亩对应的88.5公斤/亩产量效应下，在最高钾肥价格（10.00元/公斤）和最低玉米价格（1.5元/公斤）下的VCR分别为1.0、1.8和2.5。表明施用磷钾肥农民可以获益，且VCR随着玉米价格增加而增加（图8和9）。

按照2010–2012年玉米最低价格（1.87元/公斤），计算了不同肥料用量和肥料价格下农民能够获得效益的施肥产量效应临界值（VCR=1）。结果显示，不同施氮量下以及不同氮肥价格下氮肥产量效应临界值变化范围为18.8–84.7公斤/亩，且其值随施氮量增加而增加。表明在施氮量较高的情况下，若想施肥获得效益其增产效应就要大。在北方玉米种植区，有些农民为盲目追求高产其施

氮量甚至达到并超过20.0公斤N/亩，这种情况下，如果按照2012年玉米价格计算则其施氮效应如果小于56.5公斤/亩则农民就不能获得收益，若按照2012年最高玉米价格基础上增长25%和增长50%情况下，若其施肥效应分别小于70.6和84.7公斤/亩则农民施氮不能获益。NE专家系统平均施氮量为10.4公斤N/亩，而农民平均施氮量为14.9公斤N/亩，而我们七省374个试验点中10%和25%的施氮效应分别为43.9公斤/亩和70.7公斤/亩，这种情况表明NE专家系统可以使90%的试验点获益，而农民习惯施肥则需要更高的施肥效应才能获益（表1）。

在不同施磷量下（2.0–10.0公斤P₂O₅/亩）施磷获益的产量效应变化范围为5.3–39.4公斤/亩。本研究中NE推荐的平均施磷量为3.7公斤P₂O₅/亩，而农民平均施磷量为4.1公斤P₂O₅/亩。由于本试验点10%的施磷产量效应为10.7公斤/亩，两种情况下均使接近90%的试验点获益。在不同施钾量下（2.0–6.0公斤K₂O/亩）获得效益的施钾产量效应变化范围为7.1–53.5公斤/亩。而试验点中25%的施钾产量反应是26.8K₂O/亩，表明若施钾量<6.0K₂O/亩，则试验中有75%的试验点施钾获益。仅从施钾量来讲，本研究中农民习惯施肥平均施钾量为3.3

表1 不同肥料用量和肥料价格下获得收益的施肥产量效应临界值（VCR=1） 公斤/亩

氮肥用量, 公斤 N / 亩	6.7	10.0	13.3	16.7	20.0
氮肥价格, 元 / 公斤 N					
2012 年价格: 5.28	18.8	28.3	37.7	47.1	56.5
增加 25%: 6.60	23.5	35.3	47.1	58.8	70.6
增加 50%: 7.92	28.3	42.3	56.5	70.6	84.7
磷肥用量, 公斤 P ₂ O ₅ / 亩	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
磷肥价格, 元 / 公斤 P ₂ O ₅					
2012 年价格: 4.91	5.3	10.5	15.7	21.0	26.3
增加 25%: 6.14	6.5	13.1	19.7	26.3	32.8
增加 50%: 7.37	7.9	15.7	23.6	31.5	39.4
施钾量, 公斤 K ₂ O / 亩	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
钾肥价格, 元 / 公斤 K ₂ O					
2012 年价格: 6.67	7.1	14.3	21.4	28.5	36.7
增加 25%: 8.33	8.9	17.8	26.7	35.7	44.5
增加 50%: 10.00	10.7	21.4	32.1	42.8	53.5
注: 玉米价格按照 2010–2012 年最低价格 1.87 元 / 公斤计算					

公斤 K_2O / 亩, 与 NE 专家系统推荐的 4.5 公斤 K_2O / 亩的施钾量相比农民习惯施肥能够使更多的试验点获益。但是与农民习惯施肥比较, 专家系统推荐的 10.5–3.7–4.5 公斤 $N-P_2O_5-K_2O$ / 亩能够获得较高的籽粒产量 (683.7 公斤 / 亩) 和经济效益 (1260.2 元 / 亩), 而农民习惯施肥 (15–4.1–3.1 公斤 $N-P_2O_5-K_2O$ / 亩) 获得的产量和经济效益分别为 666.4 公斤 / 亩和 1210.3 元 / 亩。专家系统推荐施肥多获益 49.9 元 / 亩, 其中 1/3 来自节约的肥料, 2/3 来自增产带来的效益。这些效益虽然在前的小农户经营条件下不算多, 但是随着我国生产经营规模越来越大, 这种因优化的养分管理带来的规模效益将非常可观。本研究也再次证实基于 NE 养分专家系统的推荐施肥方法是一种能够增产增收提高肥料利用率的可行的推荐施肥新方法^[3-7]。其重要的施肥原则在于采用 4R 养分管理策略, 即将合适的肥料品种采用合适的肥料用量在合适的施肥时间施在了合适的施肥位置。

3 结论

玉米施用氮、磷、钾肥料的产量效应因供试土壤类型、土壤基础养分供应和施肥历史而异。本研究结果表明, 北方七省份玉米施用氮、磷、钾肥料的平均产量效应分别为 125.9 公斤 / 亩, 63.6 公斤 / 亩和 64.9 公斤 / 亩。施肥的经济效益与产量效应略有不同, 施磷肥玉米的 VCR 最大, 施钾肥的 VCR 次之, 施氮肥玉米的 VCR 最低。不施用氮、磷、钾肥料导致产量和经济效益均降低。在给定产量效应、施肥量以及肥料和玉米价格条件下, 施肥效应随产量效应增加而增加。表明在将来肥料价格增长的情况下, 施肥仍能获得收益, 该收益随施肥产量效应、玉米价格增加而增加。在北方玉米产区开展的 373 个田间试验结果表明, 与农民习惯施肥比较, 基于 NE 专家系统的推荐施肥能够增产增收, 是一种方便使用的推荐施肥方法。未来工作应该把 4R 养分管理策略与其他的农艺措施相结合以期进一步提高产量和经济效益。

参考文献

- [1] 中国农业年鉴, 中国农业年鉴编委会 [M]. 北京: 2011.
- [2] He P, Li ST, Jin JY, et al. Performance of an optimized nutrient management system for double-cropped wheat-maize rotations in North-Central China [J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101:1489-1496.
- [3] 何萍, 金继运, Pampolino MF, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2):499-505.
- [4] Chuan LM, He P, Jin JY, et al. Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China [J]. *Field Crops Research*, 2013a, 146:96-104.
- [5] Chuan LM, He P, Pampolino MF, et al. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: Yield response and agronomic efficiency [J]. *Field Crops Research*, 2013b, 140:1-8.
- [6] Xu XP, He P, Pampolino MF, et al. Nutrient requirements for maize in China based on QUEFTS analysis [J]. *Field Crops Research*, 2013, 150:115-125.
- [7] Xu XP, He P, Pampolino MF, et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency [J]. *Field Crops Research*, 2014, 157:27-34.
- [8] 郑伟, 何萍, 沙之敏, 等. 施氮对不同土壤肥力下玉米氮素吸收和利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(2):301-309.
- [9] 叶东靖, 高强, 何萍. 施氮对土壤氮素供应和春玉米氮素吸收利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (3):552-558.
- [10] 谢佳贵, 韩晓日, 王立春, 等. 不同施氮模式对春玉米产量、养分吸收剂氮肥利用率的影响 [J]. *玉米科学*, 2013, 21(2):135-138.
- [11] 苗建国, 金继运, 仇少君, 等. 生态集约化养分管理对春玉米产量和氮素利用率的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3):571-578.
- [12] 李兆君, 杨佳佳, 范菲菲, 等. 不同施肥条件下覆膜对玉米干物质积累及吸磷量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3):571-577.
- [13] Majumdar K, Kumar A, Shahi V et al. Economic of potassium fertilizer application in rice, wheat and maize grown in the Indo-Gangetic Plains [J]. *Indian Journal of Fertilizers*, 2012, 8(5):44-53.
- [14] 国家发展和改革委员会价格司编. 全国农产品成本收益资料汇编 [M]. 北京, 中国统计出版社, 2010-2012.

西南和华南地区几种作物施用钾肥的经济效益分析

涂仕华^{1,2}

(1. 国际植物营养研究所成都代表处, 成都 610066; 2. 四川省农业科学院土壤肥料研究所, 成都 610066)

摘要: 在总结近 10 年来国际植物营养研究所在西南和华南地区开展的作物平衡施肥试验与示范的基础上, 对不同作物施用钾肥增产、增收和产投比情况进行了分析。并估算了在今后 10 年内, 水稻、马铃薯和香蕉三种作物在施用钾肥的第 25%、第 50% 和第 75% 个增产值(按过去的试验增产数据计算)时, 以及在钾肥和农产品价格不变和变化条件下, 三种作物产品产投比(VCR)的变化趋势。结果表明, 必须根据肥料和其他投入(品)的价格变化对农产品价格进行实时、适度调整, 才能保证农民的种田收入和种田积极性。

关键词: 作物; 钾肥; 经济效益

施肥的目的是为了获得高产、优质的农产品和好的经济效益, 为人类提供营养丰富和健康的食品。这些目的既是国家和社会的, 也是种植者的。但从种植者的角度出发, 好的经济效益则更为重要, 是他们以农为本的充分理由和目的。在那些种田收入太低或缺乏经济作物支撑的地方, 农民大多选择外出打工。无论是国家还是种植者, 肥料都是农业生产的必需生产资料或投入品。

随着世界人口的不断增加和耕地面积的不断减少, 在那些人均耕地拥有量很小的国家和地区, 农作物产量的增加更加依赖于不断提高单位面积的产量。这需要良好的气候条件保障和科学技术的进步来实现, 如作物品种改良、土壤培肥、肥料品种和施肥技术的不断提升、栽培技术优化、灌溉条件的改善和节灌技术的普及与应用、植物保护技术的发展与应用, 以及农业机械化水平的提高与应用。在这些影响作物单产的因素中, 肥料始终是一个举足轻重的因素, 这是因为肥料是作物的粮食, 施肥对粮食增产的贡献率达到 30%–50%^[1]。因此, 合理的养分投入也是农业可持续发展的关键。

一般来说, 农民的施肥积极性和对施肥技术的自觉应用程度则取决于肥料价格和施肥产生的经济收益。市场经济是动态的, 不断变化的环境会影响农民获得最大利润的投入水平^[2]。因此, 在肥料价格和劳动力成本不断变化和提高的情况下, 如何平衡作物高产、优质, 土壤肥力的维系或不断提高, 保护生态环境和提高农民收益与施肥之间的关系, 成为国家、社会与农民共同关心的问题。本文以西南和华南地区过去 10 年来开展的作物施用钾肥增产、

增收的试验数据为例, 探讨了在肥料、农产价格变化条件下几种作物产品的收益变化情况, 为农产品价格的调整提供参考。

1 材料与方法

本文中西南和华南地区各省、市(区)的作物播种面积、产量数据来自《中国农业统计年鉴》^[3], 主要作物施用钾肥的增产效应来自两个区域内国际植物营养研究所项目合作单位在 2002–2011 年间开展的田间试验和示范数据。各种农产品价格、肥料价格和投入成本来自 2002–2012 年《全国农产品成本收益汇编》^[4]。由于该汇编中没有香蕉价格可用, 本文采用了我国香蕉主产区广东省的香蕉价格^[6,7]。为了方便比较, 西南和华南地区各省、市(区)作物施用钾肥的增收情况均以 2011 年的农产品价格和肥料价格为准。

为了分析农产品在不同售价、肥料价格变化条件下的钾肥施用回报, 我们选择了两个区域三种代表性作物, 即香蕉, 马铃薯和水稻, 作为分析对象。根据 2002–2011 年 10 年间农产品价格的实际变化情况, 我们假定了四种情况: 即 (1) 肥料与农产品价格维持不变(即保持 2011 年的价格); (2) 在 2011 年的基础上, 今后 10 年内肥料价格增长 50%, 农产品价格按过去 10 年的实际增长百分数; (3) 在 2011 年的基础上, 今后 10 年内肥料价格增长 50%, 农产品价格按过去 10 年的实际增加绝对值; (4) 在 2011 年的基础上, 今后 10 年内肥料价格增长 50%, 农产

基金项目: 国际植物营养研究所(IPNI)项目资助

作者简介: 涂仕华, 男, 研究员, 主要从事植物营养与施肥研究, Email:stu@ipni.net

品价格保持不变。根据这三种农作物对钾肥的产量反应试验数据,用 Excel 的统计功能分别计算出每种作物的第 25%、第 50% 和第 75% 个增产值。在以上假定条件下,分别分析在三个增产百分数时,钾肥、农产品价格变化情况下每种作物的产投比(VCR)。本文未考虑在钾肥价格下跌情况下作物施肥效益,因为肥料价格下跌一般被视为短时间的市场波动,不会演变成一种趋势。

数据统计采用 Excel 中的统计功能进行计算。

2 结果与讨论

2.1 西南和华南地区主要粮经作物的种植面积与单产

西南和华南地区的粮食主产省为四川,其次为云南、广西、广东和重庆;油料主产省为四川,其次为广东、贵州、云南、广西和重庆;蔬菜大省为四川、广东和广西;而水果主产省为广东,其次为广西和四川,其中热带水果主产地为广东、广西、海南和云南^[3]。表 1 列举了西南和华南地区 2011 年一些主要粮、经作物的单位面积产量(中国农业统计年鉴 2012)。除水稻外,西藏西藏自治区的玉米、小麦、油菜和马铃薯四大粮、油作物单产为西南和华南地区最高,紧随其后的是四川省。两个区域内的水稻单产以四川省为最高,其次是重庆、贵州、云南,而华南三省的水稻产量最低,可能主要是因为这一带为双季稻种植区之故(双季稻产量一般低于一季中稻),其中以海南省为最低(304 公斤/亩)。广西小麦单产最低(95 公斤/亩),仅为西藏的四分之一。四川蔬菜单产最高,其次是西藏,最低为云南和贵州。虽然广西为全国第一大甘蔗产地,但单产却以广东为最高,紧随其后的是广西、海南和云南。广东为两个区域最大的柑橘基地,但单产却以广西为最高,其次为广东和云南,贵州的柑橘单产最低(321 公斤/亩),仅为广西柑橘单产的 28%。

近 10 年来,两个区域各省、市(区)的玉米单产基

本持续增产,增幅达到 8%—40%;绝大多数省、市的水稻单产都保持了上升趋势,增幅小于玉米;油菜单产或维持、波动或略有下降;其他粮食作物单产总体保持增长,但存在一定程度的波动。对蔬菜和水果来说,不但种植面积快速增长,而且单产和总产都有大幅度增长。蔬菜种植面积增长最快的是西藏、云南、贵州和重庆,比 2001 年增长 80%—154%;而蔬菜单产增加最大的是广西、四川、海南和西藏,增幅在 17% 左右。水果的种植面积以重庆、贵州、四川和云南增长最快(58%—138%),而单产却以云南、广西和海南增长最快,比 2001 年增长 88%—160%。

2.2 西南和华南地区主要粮经作物钾肥增产效应

表 2 是近 10 年来西南和华南地区在 7 种主要粮经作物上施用钾肥的增产结果汇总。从表 2 看出,来自试验的作物平均产量远高于农业统计年鉴的区域作物平均产量,表明我们的田间试验大多安排在肥力较高、生产力处于中高水平的田、地上,只有少部分试验安排在肥力较低的土壤上。无论施肥与否,不同土壤肥力水平对作物产量影响都很大。根据刘平等(2001)在四川紫色丘陵区不同台位(肥力水平)土壤上的玉米试验结果,在相同玉米品种、施肥和田间管理条件下,丘陵下部试验地的对照(不施肥)处理玉米产量比丘陵顶部试验地的对照(不施肥)处理玉米产量高 40 公斤/亩,在最佳施肥条件下前者比后者高 137 公斤/亩^[5],表明高肥力土壤在合理施肥后的增产效果远远高于低肥力土壤。

从不同作物的施钾增产效应来看,最好的是香蕉,其次是油菜。水稻、玉米和甘蔗施用钾肥的平均增产率相当。从增产的幅度来看,差异则非常大。同一种作物施钾增产幅度差异最大的是小麦和香蕉,最小的是玉米和甘蔗。不同作物增产率最低值以小麦、马铃薯和水稻为最低,以油菜为最高;增产率最高值以马铃薯为最低,小麦和香蕉最高。施钾增产的大小受很多因素的影响,包括土壤类型、

表 1 2011 年西南和华南地区主要粮经作物平均单产

省份	水稻	玉米	小麦	油菜	马铃薯	蔬菜	甘蔗	柑橘	香蕉
广东	377	304	200	79	331	1572	5782	871	3472
广西	348	288	95	69	224	1439	4440	1145	2749
海南	304	291	--	--	276	1390	4272	582	2959
云南	415	283	151	127	214	1215	4127	823	1410
重庆	479	367	205	119	225	1517	2327	693	--
四川	507	343	231	148	240	1976	3130	795	--
贵州	297	206	130	98	189	1176	2427	321	--
西藏	400	442	442	176	436	1788	--	--	--
平均	434	297	204	129	218	1526	4472	854	2742

表 2 近 10 年来西南和华南地区主要粮经作物施用钾肥增产情况

作物	试验数	NPK 处理产量 (公斤/亩)		NP 处理产量 (公斤/亩)		施 K 增产 (%)	
		幅度	平均	幅度	平均	幅度	平均
水稻	45	284-633	505	251-587	455	4-25	14
玉米	44	443-635	485	230-620	440	8-23	15
小麦	32	286-505	424	170-408	346	2-48	17
马铃薯	18	222-658	370	176-517	292	3-21	17
油菜	11	163-236	197	125-177	152	10-31	20
甘蔗	14	6980-12078	9074	5711-10333	7733	9-22	15
香蕉	13	2717-4800	3711	1597-3933	2923	9-41	25

缺钾程度、作物品种对钾的需求量、钾肥用量、钾肥品种、施用时间、施用方法、气候条件和田间管理等。正因为如此,在土壤、气候、作物品种差异如此巨大的西南和华南各省、市(区),不说是不同作物,就是同一作物品种,在不同地点的作物钾肥效应也相差很大。

2.3 西南和华南地区主要粮经作物钾肥增收情况

西南和华南地区不同作物施用钾肥的增收数值和产投比(VCR)列于表3。统计结果表明,不同作物施钾的增收数值及VCR值的跨度很大,例如施钾肥每亩的增收值水稻为25-405元,马铃薯为135-1131元,香蕉为904-5354元。增收数值最高为香蕉、甘蔗和马铃薯,最低为小麦和水稻。从产投比来看,最高为香蕉,其次为马铃薯和玉米。

与农产品价格维持不变(即保持2011年的价格);(2)在2011年的基础上,今后10年内肥料价格增长50%,农产品价格按过去10年的实际增长百分数;(3)在2011年的基础上,今后10年内肥料价格增长50%,农产品价格按过去10年的实际增加绝对值;(4)在2011年的基础上,今后10年内肥料价格增长50%,农产品价格保持不变。在以上假定条件下,根据试验统计数据分别计算了三种农作物对钾肥的产量反应在第25%、第50%和第75%个增产值时以及在钾肥、稻谷不同价格时的产投比(VCR)。钾是一种特殊的植物必需营养元素,主要表现在它的土壤化学和生物化学行为上。第一,无论在生物体内还是环境中,钾都以离子形态而不是有机化合物的形态存在;第二,与氮、磷不同,耕作土壤中的氮磷都会累积,特别是磷,但耕作土壤中的钾则始终处于亏损状态^[8]。因此作者认为,在正常的维持量施钾水平下,用过去施钾增产的数值来代

表 3 近 10 年来西南和华南地区主要粮经作物施用钾肥增收情况

作物	试验数	NPK 比 NP 增产 (公斤/亩)		NPK 比 NP 增收 (元/亩)		产投比	
		幅度	平均	幅度	平均	幅度	平均
水稻	45	14-151	51	25-405	137	0.7-6.6	2.7
玉米	45	35-219	109	31-465	231	1.8-16.5	6.1
小麦	26	11-181	63	24-351	131	0.9-13	4.1
马铃薯	18	84-674	298	135-1131	480	1.6-12.7	6.9
油菜	11	13-85	41	59-389	188	1.1-8.3	3.1
甘蔗	14	433-1888	1205	221-925	591	1.1-5.1	3.3
香蕉	19	238-1407	835	904-5345	3172	2.1-14.4	7.7

2.4 在钾肥用量、价格和农产品价格变化条件下三种作物的经济回报分析

为了分析农产品在不同售价、肥料价格变化条件下的钾肥施用回报情况,本文选择了三种作物:香蕉-代表大面积种植的高利润果树,马铃薯-代表区内广泛种植的粮、菜兼用作物和水稻-代表最为广泛种植的粮食作物,作为分析对象。根据《中国农业年鉴》2002-2011年10年间的实际变化情况,我们假定了四种情况:即(1)肥料

表今后可能获得的增产情况是基本可行的。计算结果列于表4、表5和表6。

在钾肥和水稻产量维持不变的条件下,在第25%个增产值(30公斤/亩)、第50%个增产值(48公斤/亩)和第75%个增产值(62公斤/亩)及相应钾肥用量的水稻产投比没有明显变化(表4)。也就是说,不同施钾量产生的回报基本是等值的。在10年内钾肥价格增长50%,水稻价格增长150%的条件下,随着时间推移,

表4 水稻施用钾肥在第25%、第50%和第75%个增产值时，以及在钾肥、稻谷不同价格条件下的产投比（VCR）

假定条件				第25%个增产值		第50%个增产值		第75%个增产值			
肥料与稻谷价格变化趋势	时间 (年)	K ₂ O (元/公斤)	水稻	产量反应	K ₂ O	产量反应	K ₂ O	产量反应	K ₂ O		
				(公斤/亩)							
				30	15	30	15	30	15		
1. 肥料与水稻价格维持不变	目前	6.67	2.69	3.1		3.2		3.2			
2. 10年内肥料价格增长	5	8.34	4.71	4.3		4.5		4.5			
50%，水稻价格增长150%	10	10.00	6.73	5.1		5.4		5.4			
3. 10年内肥料价格增长	5	8.34	3.50	3.2		3.4		3.5			
50%，水稻价格增加1.62元	10	10.00	4.31	3.3		3.4		3.5			
4. 10年内肥料价格增长	5	8.34	2.69	2.5		2.6		2.6			
50%，水稻价格保持不变	10	10.00	2.69	2.0		2.2		2.2			

注：2002年的稻谷价格为1.07元/公斤，2011年为2.69元/公斤，涨幅150%，增加1.62元/公斤。

表5 马铃薯施用钾肥在第25%、第50%和第75%个增产值时，以及在钾肥、马铃薯不同价格条件下的产投比（VCR）

假定条件				第25%个增产值		第50%个增产值		第75%个增产值			
肥料与稻谷价格变化趋势	时间 (年)	K ₂ O (元/公斤)	马铃薯	产量反应	K ₂ O	产量反应	K ₂ O	产量反应	K ₂ O		
				(公斤/亩)							
				124	4	164	6	509	8		
1. 肥料与水稻价格维持不变	目前	6.67	0.91	4.2		3.7		8.7			
2. 10年内肥料价格增长	5	8.34	1.08	4.0		3.5		8.2			
50%，水稻价格增长150%	10	10.00	1.26	3.9		3.4		8.0			
3. 10年内肥料价格增长	5	8.34	1.04	3.9		3.4		7.4			
50%，水稻价格增加1.62元	10	10.00	1.17	3.6		3.2		7.4			
4. 10年内肥料价格增长	5	8.34	0.91	3.4		3.0		6.9			
50%，水稻价格保持不变	10	10.00	0.91	2.8		2.5		5.8			

注：2002年的马铃薯价格为0.66元/公斤，2011年为0.91元/公斤，涨幅38%，增加0.25元/公斤。

表6 香蕉施用钾肥在第25%、第50%和第75%个增产值时，以及在钾肥、香蕉不同价格条件下的产投比（VCR）

假定条件				第25%个增产值		第50%个增产值		第75%个增产值			
肥料与稻谷价格变化趋势	时间 (年)	K ₂ O (元/公斤)	香蕉	产量反应	K ₂ O	产量反应	K ₂ O	产量反应	K ₂ O		
				(公斤/亩)							
				446	1205	844	40	1276	60		
1. 肥料与水稻价格维持不变	目前	6.67	3.5	11.7		11.1		11.2			
2. 10年内肥料价格增长	5	8.34	5.15	13.8		13.0		13.1			
50%，水稻价格增长150%	10	10.00	6.79	15.1		14.3		14.4			
3. 10年内肥料价格增长	5	8.34	4.35	11.6		11.0		11.1			
50%，水稻价格增加1.62元	10	10.00	5.2	11.6		11.0		11.1			
4. 10年内肥料价格增长	5	8.34	3.5	9.4		8.9		8.9			
50%，水稻价格保持不变	10	10.00	3.5	7.8		7.4		7.4			

施钾增产的产投比在前5年增加39%—40%，后5年增加19%—20%。同样，不同施钾量产生的回报基本是等值的。在10年内钾肥价格增长50%，水稻价格每公斤增加1.62元的条件下，产投比随时间推移不变，随施钾量增加而略有增加。在10年内钾肥价格增长50%，水稻价格维持不变的条件下，产投比随施钾量的增加略有增加，但随时间

推移而明显下降。这表明，如果今后10年内稻谷价格不增长或按照过去10年价格增长的绝对值来计算，稻农的收益就会不断降低，从而会影响稻农的种稻积极性。

对马铃薯来说，施钾增收的产投比变化情况与稻谷显然不同（表5）。第一，在三个增产百分数时，相应施钾量的产投比回报不等值，表现为第50%个增产值的产

投比最低,第75%个增产值的产投比最高。产生这种现象原因的归咎于马铃薯试验施钾增产的数值不属于正态分布,第50%个增产值(中数)仅为164公斤/亩,而平均数则为298公斤/亩,比平均数低134公斤/亩。第二,在不同假定条件下,马铃薯施钾增收的产投比都不断下降。在马铃薯价格10年内增加38%的条件下,施用钾肥的产投比下降最小;而在马铃薯价格维持不变的条件下,施用钾肥的产投比下降最大。所以,要维护马铃薯种植农户的利益和种田积极性,马铃薯的价格应随肥料的价格的增长而同步增长。

香蕉是一种产量很高、需钾量很大的农作物,其经济回报也显著高于很多其他农作物。在不同假定条件下香蕉施用钾肥的产投比与水稻的情况类似,但并不完全相同(表6)。

在所有条件下,香蕉施钾在第25%个增产值(446公斤/亩)时的产投比最高,在第50%个增产值(844公斤/亩)和第75%个增产值(1276公斤/亩)的产投比明显降低且降幅几乎相同。在这种情况下,确定最佳经济施钾量对农民增产增收尤为重要。在未来10年内,只有当香蕉价格按94%的比例(过去10年的实际增长率)增长,施用钾肥增长增收的产投比才有显著提高,按未来10年提高香蕉1.7元/公斤的价格(过去10年的实际增加值)来计算,产投比与目前相当。如果维持香蕉价格不变,施用钾肥的产投比则出现显著降低。当然,由于香蕉的利润比其他农产品相对较高,只要天气和市场

风险没有显著变化,施用钾肥的最低产投比仍有7.4,还是不错的。

3 小结

不同作物施用钾肥的增产、增收幅度变化很大。产量增加最高的是甘蔗,其次是香蕉,最低的是油菜、水稻和小麦。不同作物施钾增收的数值及产投比值的跨度很大,增收数值最高的作物为香蕉、甘蔗和马铃薯,最低的为小麦和水稻。产投比最高的为香蕉,其次为马铃薯和玉米。在钾肥和农产品价格不变的条件下,水稻和香蕉的产投比随着钾肥施用量的增加基本维持不变,而马铃薯的产投比则表现为先降低,然后显著增加的情况;在今后10年,如果钾肥价格增长50%,农产品价格按最近10年的增长比例增长,水稻和香蕉的产投比明显增加,并且第50%个增产值和第75%个增产值的产投比等值,马铃薯的产投比则出现下降;在今后10年,如果内钾肥价格增长50%,农产品价格按最近10年的绝对增长值,水稻和香蕉的产投比维持不变,而马铃薯的产投比则出现下降或不变;在今后10年,如果内钾肥价格增长50%,农产品价格维持不变,则三种作物的产投比则都出现显著下降。当然,如果今后钾肥价格出现下降,则有利于降低投入成本,增加农民种田收入。因此要保证农民的种田收入和种田积极性,农产品价格必须根据肥料和其他投入品的价格增长情况实时、适度进行调整。

鸣谢:作者感谢IPNI西南和华南地区各合作单位(以拼音为序):重庆市农业技术推广总站,贵州省农业科学院,广东农业科学院土壤肥料研究所,广西农业科学院资源环境研究所,海南农业科学院土壤肥料研究所,四川省农业科学院土壤肥料研究所,西南大学资源与环境学院和云南农业科学院环境与资源研究所对本文提供的资料数据。

参考文献

- [1] Stewart, W M. Fertilizer contributions to crop yield. News & Views, 2002, [http://www.ipni.net/ppiweb/ppinews.nsf/0/7DE814BEC3A5A6EF85256BD80067B43C/\\$FILE/Crop%20Yield.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/ppinews.nsf/0/7DE814BEC3A5A6EF85256BD80067B43C/$FILE/Crop%20Yield.pdf).
- [2] Stauffer M. The economics of fertilizer use in a market economy [M]. Fertilizer Economy and Marketing, Beijing: PPI/PPIC China Program, 1998.
- [3] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2001-2012.
- [4] 国家发展与改革委员会价格司. 全国农产品成本收益汇编 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2012.
- [5] 刘平, 涂仕华, 张仁绥, 等. 土壤养分系统研究法的改进及应用 [J]. 西南农业学报, 2001, 14(增): 65-69.
- [6] 姚丽贤, 周修冲, 陈婉珍. 高产巴西蕉平衡施肥技术研究. 西南地区作物平衡施肥与坡耕地管理研究 [M]. 成都: 四川大学出版社, 2006.
- [7] 杨苞梅, 黄汉森, 黄强, 等. 钾氮营养对香蕉抽蕾和产量的影响. 西南地区作物系统养分管理研究(二) [M]. 成都: 四川大学出版社, 2012.
- [8] 谢建昌. 农业持续发展中的土壤钾素养分变化及其管理. 土壤科学与农业持续发展 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.

西北地区马铃薯施用氮磷钾效应和经济效益分析

李书田¹ 段玉² 陈占全³ 郭天文⁴ 李友宏⁵

(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. 内蒙古农牧科学院植物营养与分析研究所, 呼和浩特 010031; 3. 青海省农业科学院土壤肥料研究所, 西宁 810016; 4. 甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 兰州 730070; 5. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002)

摘要: 2002-2011年在内蒙、甘肃、宁夏、青海四省进行田间试验研究马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 施用氮、磷、钾肥的增产效应和经济效益。试验设施氮(+N)、不施氮(-N)、施磷(+P)、不施磷(-P)、施钾(+K)、不施钾(-K)处理。结果表明,施用氮、磷、钾肥平均增产分别为377、264、356公斤/亩,分别有95%、75%、81%的试验增产达显著水平($P < 0.05$),说明氮是影响马铃薯产量的主要因素,其次是钾,然后是磷。氮、磷、钾肥的农学效率分别为37.6公斤/公斤N、45.0公斤/公斤 P_2O_5 和44.9公斤/公斤 K_2O 。施用氮、磷、钾肥平均分别增加收入348、246、276元/亩,平均产投比(VCR)9.3、12.7和8.8。通过分析不同肥料价格和马铃薯价格下的VCR表明,随着施肥增产效应的增加,即使施肥量增加,VCR也增加。无论现在还是将来,西北地区马铃薯上合理施用氮、磷或钾肥获得收益的概率超过75%,收益多少随增产效应、施肥量、肥料和马铃薯价格而变化。

关键词: 马铃薯; 肥料效应; 产投比; 经济效益

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 是继水稻、小麦和玉米后第四位粮食作物^[1]。全球1/3的马铃薯来自发展中国家。中国是世界上最大的马铃薯生产国,2011年产量达到8800万吨^[2]。马铃薯也是我国西北地区的主要经济作物之一,面积和产量分别占全国的37%和34%。

马铃薯吸收氮、钾远高于磷^[3-5]。氮素管理对马铃薯的产量和品质至关重要^[6,7]。氮肥不足影响马铃薯生长和产量,氮肥过量则延迟马铃薯成熟,降低养分利用率并造成环境污染^[8]。钾是植株体内糖分运输和淀粉合成所必需的营养元素,因此,马铃薯需钾量较高^[9]。虽然马铃薯需磷量低于氮和钾,但磷可增加大薯产量和马铃薯的干物质产量^[10]。因此,氮、磷、钾养分管理对马铃薯生产至关重要。然而,目前马铃薯对施用氮、磷、钾肥的增产效应和经济效益还不十分清楚,对限制西北地区马铃薯产量、效益的影响因子也不明确。因此,本研究主要包括以下两方面:1)氮、磷、钾肥对马铃薯的增产效应和养分利用效率,2)马铃薯施肥的经济效益,以期为西北地区马铃薯养分管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

2002-2011年在西北马铃薯主要种植区内蒙、甘肃、

宁夏、青海四省进行试验。氮肥试验44个,在施用磷钾基础上设施氮(+N)和不施氮(-N)处理;磷肥试验49个,在施用氮钾基础上设施磷(+P)和不施磷(-P)处理;钾肥试验80个,在施用氮磷基础上设施钾(+K)和不施钾(-K)处理。各处理重复三次,小区面积30平方米。氮、磷、钾用量根据ASI方法进行土壤测定并进行推荐^[11,12]。供试土壤理化性状和试验的详细情况请参见表1和2。其他管理措施包括中耕除草和病虫害防治等各处处理均一致。

1.2 测试方法

土壤理化性状采用ASI方法^[11,12]。土壤有机质采



用 0.2mol/L NaOH-0.01mol/L EDTA-2% 甲醇提取, 420nm 波长下紫外分光光度法测定; 矿质氮采用 1mol/L KCl 浸提, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 分别用比色法和紫外分光光度法测定; 土壤速效磷、钾用 0.25mol/L NaHCO_3 -0.01mol/L EDTA-0.01mol/L NH_4F 浸提, 溶液中的磷和钾分别采用比色法和原子吸收法测定; 土壤 pH 采用水土比 2.5:1, pH 电极法测定。土壤质地用野外速测法测定。

1.3 数据分析

施肥效应 (公斤/亩) = 施氮 (磷或钾) 处理块茎产量 (公斤/亩) - (不施氮 (磷或钾) 处理块茎产量);

养分的农学效率 (AE) (公斤/公斤) = 施肥效应 (公斤/亩) / 施肥量 (公斤/亩), AE_N 、 AE_P 、 AE_K 分别表示 N、P、K 的农学效率;

施肥效益 (元/亩) = 施肥效应 (公斤/亩) × 块茎价格 (元/亩);

肥料投入 (元/亩) = 肥料用量 × 肥料价格;

施肥纯收入 = 施肥效益 - 肥料投入;

产投比 = 施肥效益 / 肥料投入

2002-2011 年的肥料价格和马铃薯价格来源于全国农产品成本收益资料汇编^[13]。

方差分析采用 SAS(1999) 统计软件, 图形采用 Sigmaplot 10.0 统计软件。相关性分析采用 Microsoft Excel 10.0。

2 结果与分析

2.1 施肥效应

马铃薯块茎的产量范围很大 (图 1), 施氮处理的块茎产量为 604-4013 公斤/亩, 平均 1946 公斤/亩; 不施氮处理的块茎产量 475-3640 公斤/亩, 平均 1568 公斤/亩。施磷处理的块茎产量 604-4013 公斤/亩, 平均 1891 公斤/亩; 不施磷处理的块茎产量 393-3713 公斤/亩, 平均 1627 公斤/亩。施钾处理的块茎产量 604-4948 公斤/亩, 平均 2411 公斤/亩; 不施钾处理的块茎产量 529-

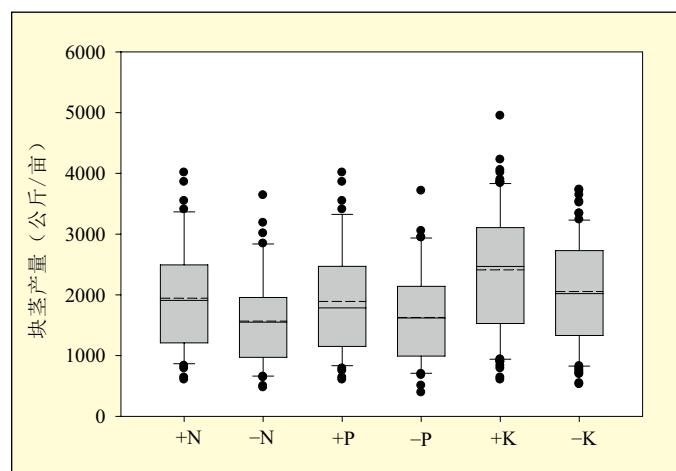


图 1 马铃薯 44 个氮肥试验、49 个磷肥试验、80 个钾肥试验的块茎产量 (图中方框下线为第 25% 个产量, 实线表示中数, 虚线表示平均数, 方框上限表示第 75% 个产量。误差线上下分别表示第 10% 和第 90% 个产量。误差线外黑点表示其他数。下同)

表 1 试验前供试土壤部分理化性状 (平均 ± 标准差)

土壤性状	N 肥试验	P 肥试验	K 肥试验
土壤质地	砂壤土, 壤土	砂壤土, 壤土	砂壤土, 壤土
pH (水: 土 2.5:1)	8.3 ± 0.3	8.2 ± 0.2	8.2 ± 0.2
有机质 (克/升)	10.0 ± 5.0	9.0 ± 5.0	9.0 ± 5.2
矿质 N (毫克/升)	29.1 ± 21.7	27.3 ± 22.1	25.8 ± 21.3
速效 P (毫克/升)	17.5 ± 8.8	17.8 ± 8.1	17.5 ± 8.2
速效 K (毫克/升)	99.0 ± 36	99.6 ± 33.5	99.4 ± 33.1

表 2 试验的详细情况

项目	内蒙古	青海	甘肃	宁夏
马铃薯品种	脱毒紫花白	下寨 -65	陇薯 -3	青薯 -168
种植时间	5 月 5-20	4 月 19-29	3 月 30-4 月 17	4 月 22
收获时期	9 月 12-15	9 月 15	9 月 22	9 月 7
种植密度 (株/亩)	2667-3333	2667-3333	3333-4000	3333-4000
养分用量 (公斤/亩)				
N	3-20	9-14.3	5-15	10
P ₂ O ₅	2-16.7	4-11.5	4-10	10-15
K ₂ O	2-15	5.6-15	4-10	10-20

3733 公斤 / 亩，平均 2055 公斤 / 亩。

氮、磷、钾肥试验中分别有 42、37、65 个试验施肥效应显著 ($P < 0.05$), 占试验总数的 95%、76% 和 81%。氮、磷、钾肥的施肥效应平均分别为 377 公斤 / 亩 (25.4%)、264 公斤 / 亩 (17.6%) 和 356 公斤 / 亩 (17.7%) (图 2)。氮和钾是限制马铃薯产量的主要因子，其次是磷。

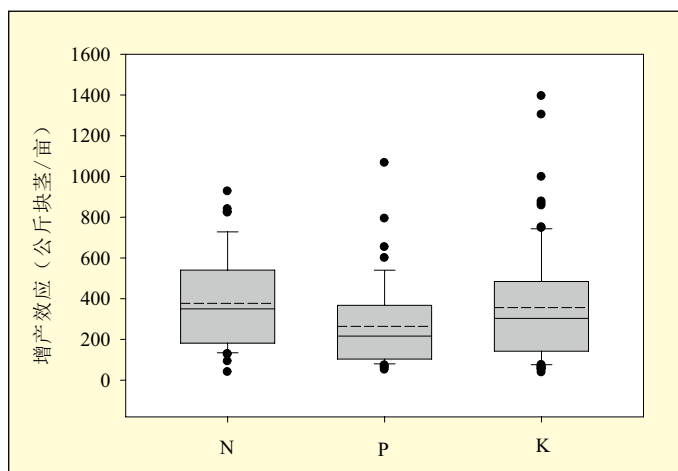


图 2 马铃薯施用氮肥、磷肥和钾肥的施肥效应

2.2 养分的农学效率

氮、磷、钾的农学效率变异范围较大 (图 3)。 AE_N 为 8.6–90.5 公斤 / 公斤 N, 平均 37.6 公斤 / 公斤 N, AE_P 为 4.1–133.3 公斤 / 公斤 P_2O_5 , 平均 45.0 公斤 / 公斤 P_2O_5 , AE_K 为 6.4–232.5 公斤 / 公斤 K_2O , 平均 44.9 公斤 / 公斤 K_2O 。

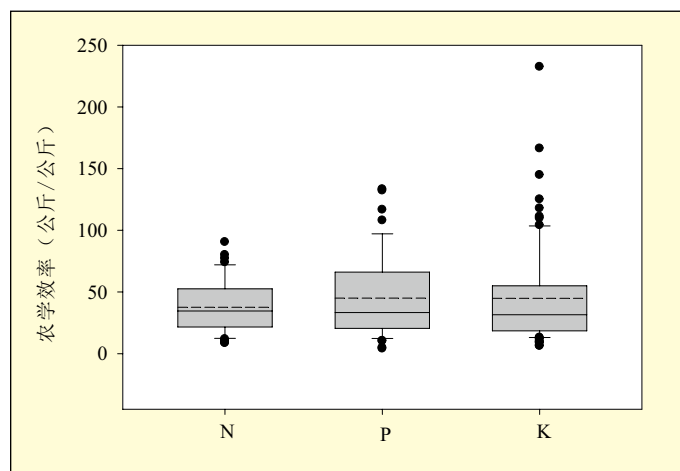


图 3 马铃薯施用氮、磷、钾肥的农学效率



2.3 施肥的经济效益分析

施用氮、磷、钾肥比相应的不施肥平均增加纯收入 348、246、276 元/亩(图 4)，氮、磷、钾肥的产投比(VCR)平均分别为 9.3、12.7 和 8.8(图 5)，说明马铃薯上施用氮、磷或钾肥可以获得较高的经济收益。施肥效应和纯收入是 $N > K > P$ ，而 VCR 是 $P > N > K$ 。

2002–2011 年肥料价格和马铃薯价格具有增加趋势，因此我们设定几个肥料价格：最低价格、中间价格和最高价格以及最高价格的 1.25 倍和 1.5 倍分别代表现在和将来的价格，以计算不同马铃薯价格下肥料投入的产投比 VCR。根据施肥效应(图 2)，把施用氮、磷、钾肥的第 25%、50% 和 75% 个施肥效应和施肥量作为低、中、高三个施肥效应进行经济分析(图 6–8)。结果表明，当氮、磷、钾肥用量低(分别为 8 公斤 N/亩、4.1 公斤 P_2O_5 /亩、6 公斤 K_2O /亩)、施肥效应低(180 公斤/亩、100 公斤/亩、140 公斤/亩)，而肥料价格最高(7.23 元/公斤 N、6.98 元/公斤 P_2O_5 、10.79 元/公斤 K_2O)、马铃薯价格最低(0.5 元/公斤)时的 VCR 分别为 1.6、1.7 和 1.1。当氮、磷、钾肥用量高(分别为 14 公斤 N/亩、7.7 公斤 P_2O_5 /亩、10 公斤 K_2O /亩)、施肥效应高(533 公斤/亩、361 公斤/亩、459 公斤/亩)，而肥料价格最高(7.23 元/公斤 N、6.98 元/公斤 P_2O_5 、10.79 元/公斤 K_2O)、马铃薯价格最低(0.5 元/公斤)时的 VCR 分别为 2.6、3.4 和 2.1。这些数据说明，在西北地区马铃薯上施用氮、磷或钾肥获得收益的概率超过 75%，并随增产效应的增加而增加，而且无论施肥效应高低，施用磷肥的 VCR 最高，其次是

施用氮肥，施用钾肥的 VCR 相对较低。

按照 2002–2011 年马铃薯最低价格(0.67 元/公斤)计算不同肥料用量和肥料价格下获得效益的施肥效应临界值(表 3)，表明施钾肥需要获得较高的施肥效应才能获得收益，而施磷获得收益所需的施肥效应最低。当肥料价格比 2011 年的价格增加 50%，并且施肥量最高时(20 公斤 N/亩、10 公斤 P_2O_5 /亩、15 公斤 K_2O /亩)，获得收益的氮、磷、钾肥最低施肥效应分别为 215 公斤/亩、101 公斤/亩和 224 公斤/亩，至少分别有 72.7%、75.5% 和 60.0% 的试验点能获得施肥收益。如果按照 2011 年的肥料价格和最高肥料用量计算，分别有 88.6%、93.9% 和 73.8% 的试验点施用氮肥、磷肥、钾肥能获得经济收益。综合以上分析可知，无论现在还是将来，西北地区马铃薯上施用氮、磷和钾肥能够增加农民收入。

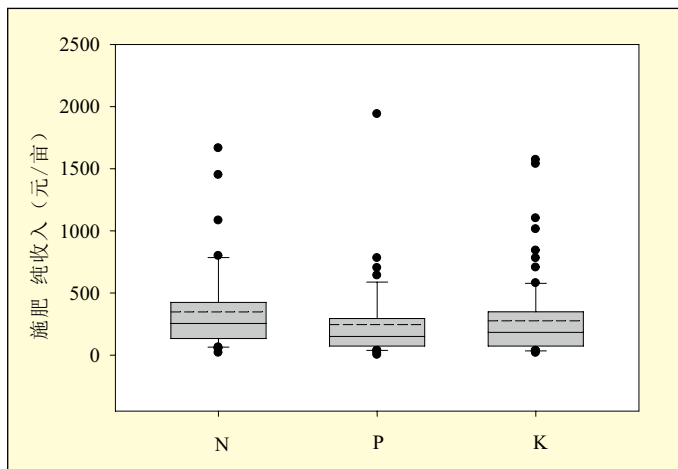


图 4 马铃薯施用氮、磷、钾肥的纯收入

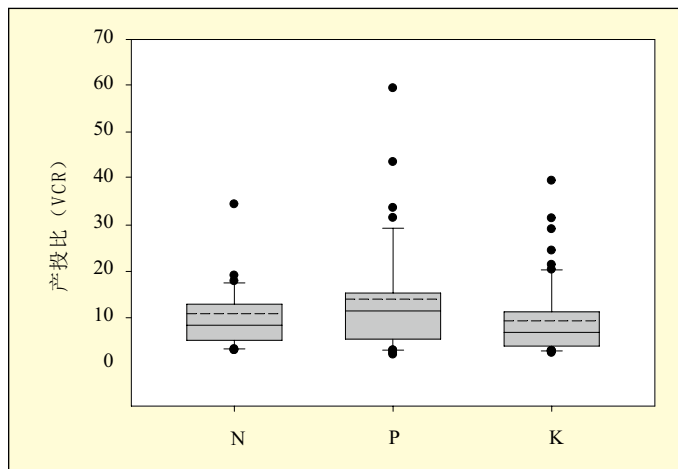


图 5 马铃薯施用氮、磷、钾肥的产投比 (VCR)

氮肥施肥效应 180 公斤 / 亩
氮肥用量 8 公斤 N / 亩

氮肥施肥效应 333 公斤 / 亩
氮肥用量 10.5 公斤 N / 亩

氮肥施肥效应 533 公斤 / 亩
氮肥用量 14 公斤 N / 亩

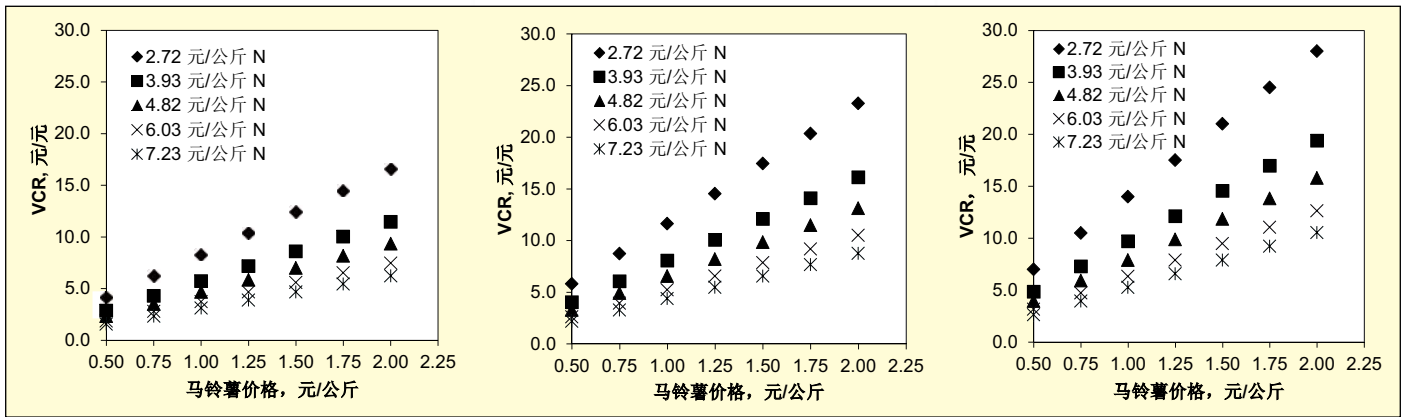


图 6 马铃薯上氮肥不同施肥效应下产投比 (VCR) 随氮肥价格与马铃薯价格的变化

磷肥施肥效应 100 公斤 / 亩
磷肥用量 4.1 公斤 P_2O_5 / 亩

磷肥施肥效应 217 公斤 / 亩
磷肥用量 6.0 公斤 P_2O_5 / 亩

磷肥施肥效应 361 公斤 / 亩
磷肥用量 7.7 P_2O_5 / 亩

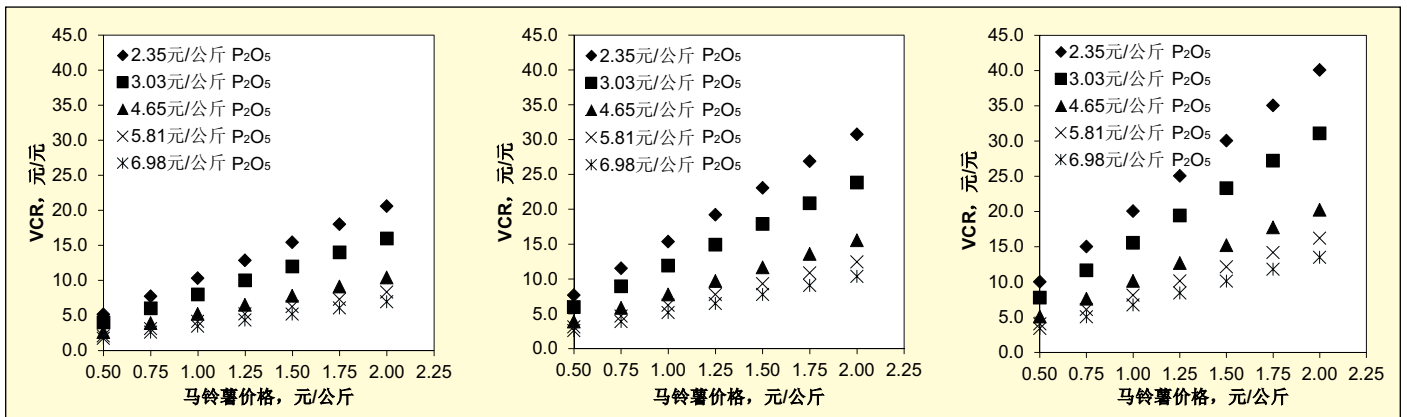


图 7 马铃薯上磷肥不同施肥效应下产投比 (VCR) 随磷肥价格与马铃薯价格的变化

钾肥施肥效应 140 公斤 / 亩
钾肥用量 6.0 公斤 K_2O / 亩

钾肥施肥效应 293 公斤 / 亩
钾肥用量 8.0 公斤 K_2O / 亩

钾肥施肥效应 459 公斤 / 亩
钾肥用量 10.0 公斤 K_2O / 亩

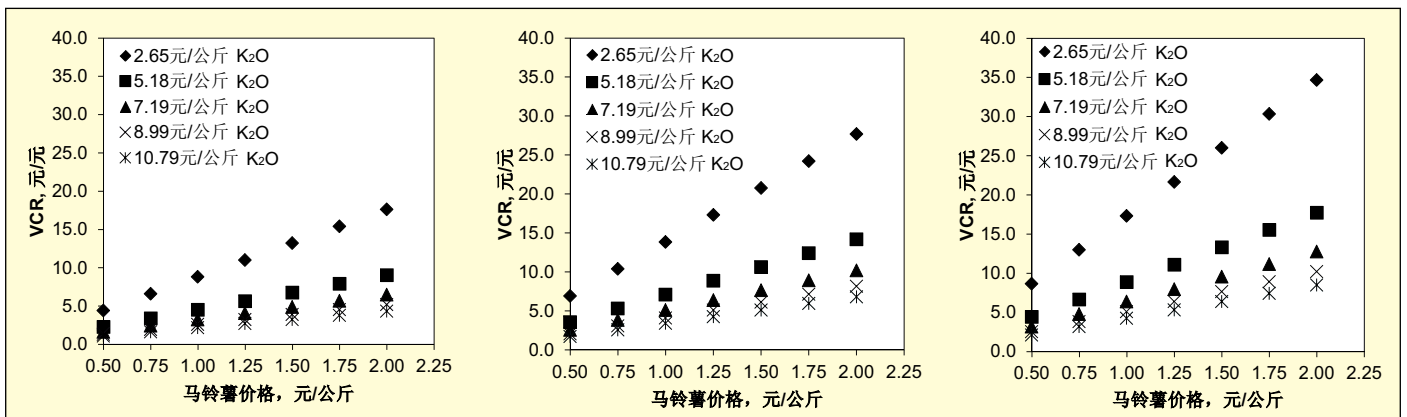


图 8 马铃薯上钾肥不同施肥效应下产投比 (VCR) 随钾肥价格与马铃薯价格的变化

表 3 不同肥料用量和肥料价格下获得效益的施肥效应临界值 (VCR=1)

						公斤 / 亩
氮肥用量, 公斤 N/ 亩		6.7	10.0	13.3	16.7	20.0
氮肥价格, 元 / 公斤 N						
2011 年价格:	4.80	47.7	71.7	95.5	119.4	143.3
增加 25%:	6.00	59.7	89.5	119.4	149.3	179.1
增加 50%:	7.20	71.7	107.5	143.3	179.1	214.9
磷肥用量, 公斤 P ₂ O ₅ / 亩		3	4	6	8	10
磷肥价格, 元 / 公斤 P ₂ O ₅						
2011 年价格:	4.52	20.3	27.0	40.5	54.0	67.5
增加 25%:	5.65	25.3	33.7	50.6	67.5	84.3
增加 50%:	6.78	30.3	40.5	60.7	80.9	101.2
钾肥用量, 公斤 K ₂ O/ 亩		6	8	10	12	15
钾肥价格, 元 / 公斤 K ₂ O						
2011 年价格:	6.67	59.7	79.7	99.5	119.5	149.3
增加 25%:	8.34	74.7	99.6	124.5	149.4	186.7
增加 50%:	10.01	89.7	119.5	149.4	179.3	224.1
注: 马铃薯价格按 2002-2011 的最低价格 0.67 元 / 公斤计算。						

3 讨论

本研究中马铃薯的施氮量为 3–20.5 公斤 N/ 亩, 平均 10.7 公斤 N/ 亩, 低于其他国家和地区的氮肥用量。如在美国密西根中部施用 13.3–20 公斤 N/ 亩使马铃薯增产, 进一步增加氮肥用量产量并不增加^[6]; 美国华盛顿州哥伦比亚盆地的马铃薯合理施氮量为 22.4–29.9 公斤 / 亩^[14,15]。磷的情况则不同, 本研究中磷肥的用量为 2–21.5 公斤 P₂O₅/ 亩, 平均 7.7 公斤 P₂O₅/ 亩, 高于其他国家和地区。如印度北部马铃薯合理的磷肥用量为 6 公斤 P₂O₅/ 亩^[16], 印度中西部平原马铃薯上磷肥最高用量为 5.3 公斤 P₂O₅/ 亩^[10]。然而, 有关马铃薯施钾效应的报道不多, 可能与马铃薯需钾量高于氮和磷而必然施用有关^[3-5], 大多数研究集中在钾肥的品种、施肥时期和施肥方法上^[17-20]。

本文阐述了不同施肥效应和肥料用量下, 产投比 (VCR) 随肥料和马铃薯价格的变化而变化的情况, 同时计算了不同肥料用量和肥料价格下马铃薯施肥能够获得效益的施肥效应临界值 (当 VCR=1 时的产量反应), 从不同侧面了解西北地区马铃薯施肥的经济效益。实际上许多因素包括市场因素、经济因素、肥料投向等也影响肥料的用量与农产品的价格。施肥效益在一定程度上取决于肥料的用量, 在相同施肥效应下施肥量越低, 收益越多,

VCR 越高。然而, 不断增长的人口对粮食的需求, 要求在集约化条件下进一步提高作物产量, 不可避免地增加肥料投入, 而肥料资源尤其是磷钾资源匮乏, 成本不断提高, 因此, 要想在作物产量增加的同时提高肥料的 VCR, 就要提高养分的科学管理水平, 并结合其他最佳农艺措施如水分管理和病虫害防治等, 提高养分利用效率, 增加收入, 减少对环境的负面影响。今后应重点研究马铃薯的 4R 养分管理策略, 用正确的肥料品种和最佳的用量, 在最佳的施肥时期, 采用正确施肥方法, 以实现经济、环境和社会效益协调发展。

4 结论

西北地区影响马铃薯生产的主要养分限制因子是氮, 其次是钾, 然后是磷。在现有推荐施肥量下, 马铃薯施用氮、磷或钾能够获得收益。施肥效应低、中、高水平下, 施用磷肥的 VCR 高于氮肥、钾肥。今后工作重点应着重研究马铃薯的 4R 养分管理策略, 并结合其他农艺措施实现更高的施肥效益。

致谢: 本研究得到国际植物营养研究所 (IPNI) 资助。

参考文献

- [1] Errebhi M, Rosen C J, Lauer F I, et al. Evaluation of tuber-bearing *Solanum* species for nitrogen use efficiency and biomass partitioning [J]. *Am J potato Res*, 1999, 76:143-151.
- [2] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [3] Perrenoud S. Fertilizing for High Yield Potato. IPI Bulletin 8 [M]. 2nd Edition. International Potash Institute, Basel, Switzerland, 1993.
- [4] Fageria N K, Baligar V C, Jones C A. Growth and Mineral Nutrition of Field Crops. 2nd Edition [M]. Marcel Dekker Inc., New York, 1997.
- [5] Westermann D T. Nutritional requirements of potatoes [J]. *Am J Potato Res*, 2005, 82:301-307.
- [6] Long C M, Snapp S S, Douches D S, et al. Tuber yield, storability and quality of Michigan cultivars in response to nitrogen management and seedpiece spacing [J]. *Am J Potato Res*, 2004, 81:347-357.
- [7] Love S L, Stark J C, Salaiz T. Response of four potato cultivars to rate and timing of nitrogen fertilizer [J]. *Am J Potato Res*, 2005, 82:21-30.
- [8] Kumar P, Pandey S K, Singh B P, et al. Effect of nitrogen rate on growth, yield, economics and crisps quality of Indian potato processing cultivars [J]. *Potato Res*, 2007a, 50:143-155.
- [9] Rhue R D, Hensel D R, Kidder G. Effect of K fertilization on yield and leaf nutrient concentrations of potatoes grown on a sandy soil [J]. *Am Potato J*, 1986, 63:665-681.
- [10] Kumar P, Pandey S K, Singh B P, et al. Optimizing phosphorus requirement of chipsona varieties for west-central plains of India [J]. *Potato J*. 2007b, 34 (3-4):199-202.
- [11] Hunter A H. Laboratory and greenhouse techniques for nutrient survey to determine the soil amendments required for optimum plant growth. Mimeograph [M]. Agro Service International, Florida, USA. 1980.
- [12] Portch S, Hunter A. A systematic approach to soil fertility evaluation and improvement [M]. Modern Agriculture and Fertilizers, PPI/PPIC China Program Special Publication No. 5. 2002.
- [13] 国家发展和改革委员会价格司编. 全国农产品成本收益资料汇编 [M]. 北京: 中国统计出版社. 2000-2012.
- [14] Roberts S, Weaver W H, Phelps J P. Effect of rate and time of fertilization in nitrogen and yield of 'Russet Burbank' potatoes under center pivot irrigation [J]. *Am Potato J*, 1982, 59, 77-86.
- [15] Lauer D A. 'Russet Burbank' yield response to sprinkler-applied nitrogen fertilizer [J]. *Am Potato J*, 1986, 63:61-69.
- [16] Grewal J S, Sud, K C. Potato response to phosphorus in northern India [J]. *Fert News*, 1990, 35:25-29.
- [17] Chadha S, Rana S S, Rameshwar, et al. Effect of split doses of N and K and FYM level on the productivity of seed potato in cold desert regions of HP [J]. *Potato J*, 2006, 33 (1-2):94-96.
- [18] Haase T, Schöler C, Heß J. The effect of different N and K sources on tuber nutrient uptake, total and graded yield of potatoes (*Solanum Tuberosum* L.) for processing [J]. *Europ J Agron*, 2007, 26:187-197.
- [19] Kumar P, Pandey S K, Singh B P, et al. Influence of source and time of potassium application on potato growth, yield, economics and crisp quality [J]. *Potato Res*, 2007c, 50:1-13.
- [20] Sasani G V, Patel C K, Patel R N, et al. Efficient use of water and fertilizers through drip fertigation in potato [J]. *Potato J*. 2006,33(3-4):131-133.

低钾胁迫对棉花光合作用和光合产物分配的影响

夏颖^{1,2} 姜存仓³ 汪霄¹ 陈防^{1,4}

(1. 中国科学院武汉植物园, 湖北武汉 430074; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 华中农业大学植物营养实验室, 湖北武汉 430070; 4. 国际植物营养研究所 (IPNI) 中国项目部, 湖北武汉 430074)

摘要: 本研究选用从 86 个棉花品种中筛选出的钾高效和钾低效棉花基因型各一个进行大田试验, 探讨低钾胁迫对棉花光合作用和光合产物的积累分配的影响。结果表明: 低钾胁迫降低了棉花叶片的净光合速率 (Pn)、蒸腾速率 (Tr)、胞间 CO₂ 浓度 (Ci) 和气孔导度 (Gs), 降低了棉花的生物量, 低钾胁迫同时促使光合产物较多地分配到营养器官, 降低了生殖器官分配的比例, 收获指数 (HI) 降低。不同棉花基因型的光合特性存在着差异, 钾高效基因型 (HG) 的 Pn、Tr、Ci 和 Gs 无论施钾与否均高于钾低效基因型 (LG)。不同棉花基因型光合产物的分配模式存在着差异, 无论施钾与否, HG 的营养器官积累的干物质相对较少, 往生殖器官分配的较多, HI 高, 而 LG 相反。2 个基因型在苗期和蕾期的生物量没有显著性差异, 而在桃期和吐絮期, HG 的生物量显著高于 LG。HG 的钾利用指数 (KUI) 在桃期和吐絮期均显著高于 LG。研究表明, 增施钾肥能够改善棉花叶片的光合功能并提高光合产物的分配效率。

关键词: 低钾胁迫; 基因型差异; 光合功能; 生物量; 钾利用指数

钾 (K) 是作物生长发育所必需的大量元素之一, 它在维持细胞内物质正常代谢调节, 促进光合作用、光合产物的运输、蛋白质合成及增强植物的抗逆性等方面发挥着重要作用。钾对棉花的营养作用在于能增加棉花的叶面积和叶绿素含量, 提高气孔导度, 有利于吸收 CO₂, 提高叶片 CO₂ 的同化率。钾对棉花的光合作用影响较大, 当钾供应充足时, 光合磷酸化效率就提高, 使棉花能够有效地利用太阳能进行同化作用, 提高叶片的光合速率并能延长光合时间, 因此对促进植株体内光合产物的积累和转移有着重要的作用。

中国钾肥消费逐年增加, 50% 以上的钾肥需依赖进口, 而国际钾肥价格的过快增长给国内钾肥市场带来了极大的影响, 可见中国钾肥资源的短缺情况非常严重。低钾处理会显著降低钾低效基因型的光合效率, 并且在植物不同钾效率基因型间存在着差异。近年来, 筛选培育和利用作物钾营养高效基因型品种以挖掘土壤钾素潜力的研究越来越受到关注。有关植物营养基因型差异的研究, 随着资源和环境问题的日益严峻而引起人们的重视, 并得到了迅速发展^[1]。目前, 关于棉花钾营养基因型光合功能差异的研究较多, 但将光合功能和不同棉花基因型的钾效率结合起来研究的较少, 本文以 2 个不同钾效率棉花基因型为材料进行田间试验, 试图探讨棉花不同钾效率基因型在不同生育期低钾胁迫下叶片光合功能的变化与钾效率的关系, 旨在弄清棉花钾高效的有关

营养生理基础, 为钾高效棉花基因型的选育和评价提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为华中农业大学植物营养实验室在 2001~2005 年间通过“两步筛选法”获得的两个棉花品种, 分别是钾“双高”(钾高效和高增产潜力) 基因型 103 (以下简称为 HG) 和钾“双低”(钾低效和低增产潜力) 基因型 122 (以下简称为 LG)。种子由中国农业科学院棉花研究所和华中农业大学作物遗传育种研究所提供。

1.2 试验设计

试验于 2011 年在武汉植物园试验田进行, 试验田土壤为黄棕壤, 土壤 pH6.5, 有机质含量 15.8 克/公斤, 碱解氮 87.3 毫克/公斤, 速效磷 16.8 毫克/公斤, 速效钾 82.5 毫克/公斤。田间试验设施钾 (K1:12 公斤/亩) 与不施钾 (K0:0 公斤/亩) 两个水平, 2 种基因型, 3 次重复, 随机排列。每小区面积 14 平方米, 施 N 16 公斤/亩, P₂O₅ 8 公斤/亩, 其中, 磷肥全部基施, 氮肥和钾肥分别基施 5.3 公斤/亩和 4 公斤/亩, 并分别在蕾期和桃期各追氮肥 5.3 公斤/亩和钾肥 4 公斤/亩, N、P、K 肥料来源分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。

1.3 测定方法

1.3.1 光合特性参数

分别于苗期、蕾期、桃期和吐絮期的晴天上午 9:00–10:00 每小区采用 Li-6400 便携式光合系统分析仪 (LI-COR, USA) 测定倒四叶的净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs)、胞间 CO₂ 浓度 (Ci) 和蒸腾速率 (Tr), 测定时使用红蓝光源, 光量子能量密度为 1000 μmol/m²/s, 每小区重复 3 次。

1.3.2 叶绿素含量

分别于苗期、蕾期、桃期和吐絮期选主茎倒 4 叶进行测定, 用液氮冷冻, 低温冰箱保存。取 0.2 克左右叶片, 用剪刀剪碎, 浸泡在丙酮乙醇 (V:V=1:1) 溶液中于暗处提取 24 小时, 浸泡液为待测液, 丙酮乙醇 (V:V=1:1) 为空白液, 在 722 型分光光度计上读取 663nm 和 645 nm 下的光密度值, 按下列公式计算出叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量:

$$\text{Chl a} = 12.71A_{663} - 2.59A_{645}$$

$$\text{Chl b} = 22.88A_{663} - 4.67A_{645}$$

1.3.3 生物量测定

在棉花的不同生育期, 分别将叶、茎、铃壳于 110℃ 杀青, 80℃ 烘干称重, 纤维晒干称重, 每小区取 3 株。

1.4 数据处理

收获指数 (HI) = 经济器官干重 / 全株生物量

钾利用指数 (KUI) = 皮棉干重 / 全株钾积累量

数据作图用 SigmaPlot 软件, 采用 LSD 做统计假设检验。

2 结果与分析

2.1 低钾胁迫对不同棉花基因型光合特性的影响

同一个棉花基因型和施钾处理相比, 钾胁迫降低了棉花叶片的净光合速率和蒸腾速率 (表 1)。缺钾时, 钾高效基因型的净光合速率和蒸腾速率除了在苗期和钾低效基因型没有达到显著性差异外, 其在蕾期、桃期和吐絮期均显著高于钾低效基因型。其中, 钾高效基因型缺钾时蕾期、桃期和吐絮期的净光合速率比钾低效基因型分别高 35.5%、24.6% 和 43.0%, 钾高效基因型缺钾时蕾期、桃期和吐絮期的蒸腾速率分别比钾低效基因型高 24.2%、27.6% 和 58.3%。施钾条件下, 钾高效基因型的净光合速率在苗期、蕾期与钾低效基因型之间没有显著性差异, 在桃期和吐絮期分别比钾低效基因型高 11.8% 和 26.6%, 钾高效基因型施钾时的蒸腾速率在苗期、蕾期和桃期与钾低效基因型相比没有显著性差异, 但在吐絮期比钾低效基因型高 38.9%。另外, 钾效率不同的棉花基因型对钾胁迫的敏感程度不一样, 钾高效基因型的相对净光合速率和相对蒸腾速率 (K0/K1) 在不同的生育期均高于钾低效基因型 (除了在苗期比钾低效基因型低外), 这说明钾胁迫降低了叶片的净光合速率和蒸腾速率, 钾高效基因型能更有效地利用体内吸收的钾, 保持相对较大的净光合速率和蒸腾速率。

气孔是 CO₂ 进入叶片胞内的途径, K⁺ 能调节其开闭, 所以钾营养对叶片气孔导度的影响很大, 从而影响光合作用。从表 2 看出, 钾胁迫条件下钾高效基因型在不同生育期的气孔导度均显著高于钾低效基因型, 而在施钾条件下除了钾高效基因型的气孔导度在桃期显著高于钾低效基因

表 1 低钾胁迫对不同钾效率棉花基因型 Pn (μmol CO₂/m²/s) 和 Tr (mmol H₂O/m²/s) 的影响

光合特性	钾处理	基因型	苗期	蕾期	桃期	吐絮期
Pn	K0	HG	8.6a	16.4a	24.3b	18.3b
		LG	8.8a	12.1b	19.5c	12.8c
	K1	HG	10.0a	19.1a	27.4a	23.3a
		LG	8.1a	16.2a	24.5b	18.4b
	K0/K1	HG	0.86	0.87	0.89	0.79
		LG	1.09	0.75	0.80	0.70
Tr	K0	HG	1.1b	4.1b	7.4a	1.9b
		LG	1.1b	3.3c	5.8b	1.2c
	K1	HG	1.8a	6.3a	8.1a	2.5a
		LG	1.5ab	5.3ab	7.2a	1.8b
	K0/K1	HG	0.67	0.81	0.92	0.75
		LG	0.76	0.64	0.81	0.67

注: K1 的施钾量为 180 公斤 / 公顷, K0 为不施钾。不同小写字母表示不同棉花基因型不同钾水平之间差异达 0.05 显著水平, 下同。

表 2 低钾胁迫对不同钾效率棉花基因型 Gs (mol H₂O /m²/s) 和 Ci (μmol CO₂ /mol) 的影响

光合特性	钾处理	基因型	苗期	蕾期	桃期	吐絮期
Gs	K0	HG	176.1a	333.3a	843.2b	332.2b
		LG	118.7b	210.4b	621.4c	223.0c
	K1	HG	214.2a	368.2a	935.1a	425.8a
		LG	190.4a	354.8a	823.8b	389.4ab
	K0/K1	HG	0.83	0.91	0.90	0.78
		LG	0.62	0.60	0.77	0.57
Ci	K0	HG	132.4b	194.6b	282.1ab	245.9b
		LG	94.0c	132.0c	218.2c	174.8c
	K1	HG	167.0a	247.2a	310.3a	311.0a
		LG	143.8ab	215.0b	273.1b	233.8b
	K0/K1	HG	0.80	0.79	0.91	0.79
		LG	0.66	0.61	0.80	0.75

型外, 2 个基因型的气孔导度没有显著性差异。无论施钾与否, 钾高效基因型的胞间 CO₂ 浓度均显著高于钾低效基因型 (施钾条件下在苗期 2 个基因型没有达到显著性差异)。在不同的生育期, 钾高效基因型的相对气孔导度和相对胞间 CO₂ 浓度 (K0 / K1) 均高于钾低效基因型。

2.2 低钾胁迫对不同钾效率棉花基因型叶绿素含量的影响

钾对 2 个棉花基因型的叶绿素含量没有显著性的影响 (表 3)。无论施钾与否, 2 个棉花基因型的叶绿素含量在相同的钾条件下没有显著性的差异 (施钾时钾高效基因型的 Chl a 和 Chl a+b 在吐絮期高于钾低效基因型)。

2.3 低钾胁迫对不同钾效率棉花基因型光合产物积累和分配的影响

钾对棉花光合产物的积累有显著性的影响。低钾胁迫

后棉花叶片光合功能下降 (净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 均下降), 生物量受到很大影响 (图 1)。2 个不同棉花基因型施钾处理的生物量均高于缺钾处理。钾在苗期和蕾期对生物量积累的影响不大, 影响最大是在桃期和吐絮期。相同的钾条件下, 不同的棉花基因型生物量的积累不同。其中, 2 个基因型在苗期和蕾期的生物量没有显著性差异, 而在桃期和吐絮期, 钾高效基因型的生物量显著高于钾低效基因型。施钾时, 高效基因型在桃期和吐絮期的生物量分别比低效基因型高 39.8% 和 36.2%; 缺钾时, 钾高效基因型在桃期和吐絮期的生物量分别比钾低效基因型高 49.3% 和 32.3%。这可能是由于在棉花生殖生长后期钾高效基因型的光合产物在营养器官和生殖器官分配效率较高, 能将较多的光合产物分配到生殖器官。

增施钾肥能促进光合产物向生殖器官转移 (表 4)。无论是在蕾期、桃期还是吐絮期, 施钾后 2 个棉花基因型的光合产物向营养器官分配的比例减少, 往生殖器官分配

表 3 低钾胁迫对不同钾效率棉花基因型叶绿素含量 (mg/g) 的影响

光合特性	钾处理	基因型	苗期	蕾期	桃期	吐絮期
Chl a	K0	HG	1.17a	0.97a	1.45a	1.49ab
		LG	1.21a	0.95a	1.55a	1.21b
	K1	HG	1.23a	1.05a	1.64a	1.70a
		LG	1.22a	1.04a	1.72a	1.25b
Chl b	K0	HG	0.41a	0.28a	0.46b	0.42a
		LG	0.37a	0.27a	0.54ab	0.48a
	K1	HG	0.39a	0.30a	0.55ab	0.56a
		LG	0.38a	0.28a	0.65a	0.42a
Chl a+b	K0	HG	1.58a	1.26a	1.91b	1.63b
		LG	1.59a	1.23a	2.09ab	1.97ab
	K1	HG	1.62a	1.36a	2.19ab	2.26a
		LG	1.60a	1.33a	2.37a	1.67b

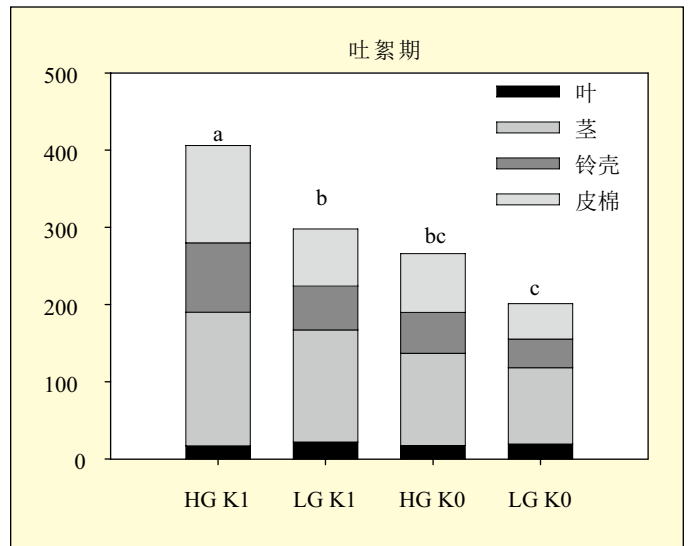
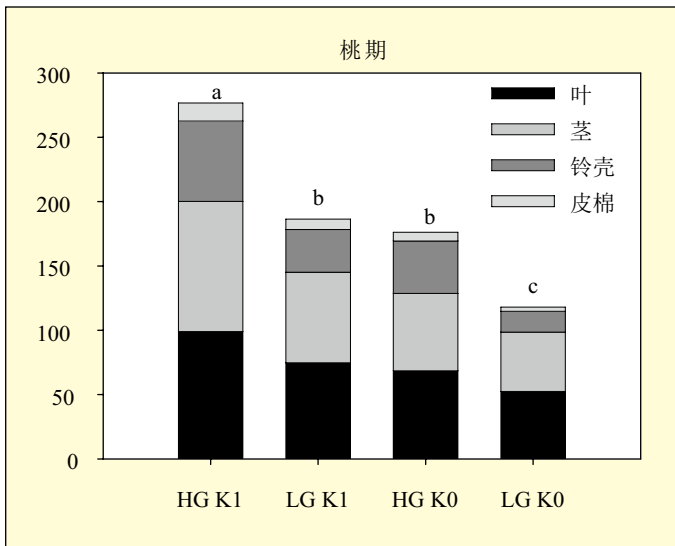
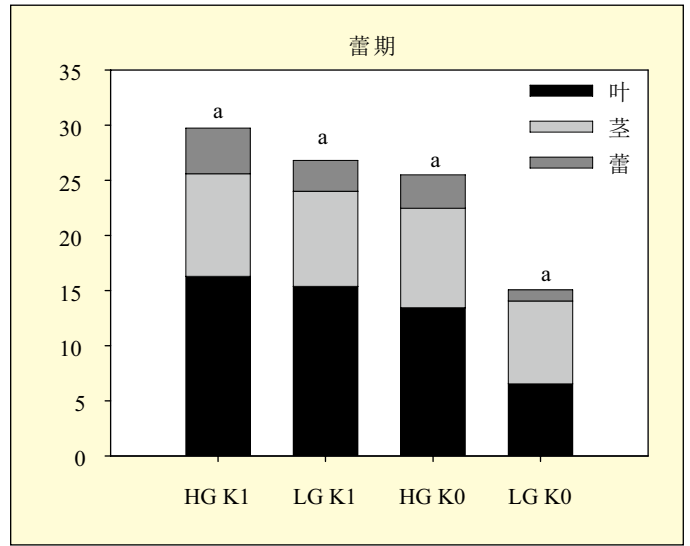
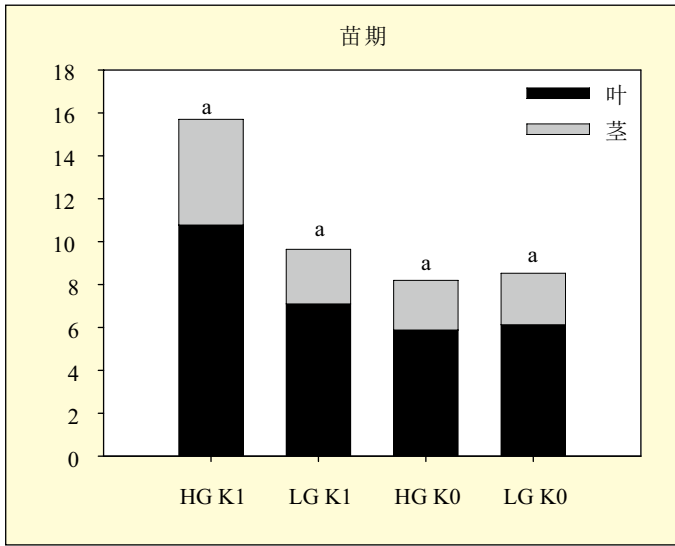


图1 低钾胁迫对不同钾效率棉花基因型生物量 (g/株) 的影响

的比例增加。不同棉花基因型的光合产物的分配模式存在着差异, 无论施钾与否, 钾高效基因型的营养器官积累的干物质相对较少, 往生殖器官分配的较多, 而低效基因型往营养器官分配的干物质较多, 往生殖器官分配的较少。另外, 棉花在不同的生育期光合产物分配的模式也存在着差异, 在棉花生育后期, 营养器官所占的比例较小, 生殖器官所占的比例较大。

低钾胁迫降低了棉花的收获指数 (表4)。不同棉花基因型的收获指数在蕾期和桃期差异不大, 在吐絮期钾高效基因型的收获指数显著高于钾低效基因型, 这说明钾高效基因型能将较多的光合产物分配到经济器官, 形成较高的产量。

表4 低钾胁迫对不同钾效率棉花基因型光合产物分配的影响

	营养器官干重占全株干重比例 (%)			生殖器官干重占全株干重比例 (%)			收获指数		
	蕾期	桃期	吐絮期	蕾期	桃期	吐絮期	蕾期	桃期	吐絮期
HGK1	86.1	72.3	46.8	13.9	27.7	53.2	0.15a	0.05a	0.31a
LGK1	89.5	77.8	56.1	10.5	22.2	43.9	0.11a	0.04ab	0.25bc
HGK0	88.1	73.0	51.5	11.9	27.0	48.5	0.12a	0.04ab	0.29ab
LGK0	93.3	83.6	58.8	6.7	16.4	41.2	0.07a	0.03b	0.23c

2.4 低钾胁迫对不同钾效率棉花基因型钾利用指数的影响

钾利用指数是评价钾高效基因型一个重要的综合指标,其数值越高,越有利于群体成铃,有利于生殖器官干物质积累。表 5 表明,无论施钾与否,钾高效基因型的钾利用指数在不同的生育期均显著高于钾低效基因型。其中,施钾时,钾高效基因型的钾利用指数在桃期和吐絮期分别是钾低效基因型的 1.6 倍和 1.3 倍;缺钾时,钾高效基因型的钾利用指数在桃期和吐絮期分别是钾低效基因型的 1.5 倍和 1.4 倍。这说明在等量钾条件下,钾高效基因型比钾低效基因型更能有效利用体内吸收的钾,以维持植株正常色生长和代谢。

钾处理	基因型	桃期	吐絮期
K0	HG	4.8a	32.8a
	LG	3.1bc	23.7b
K1	HG	4.0ab	22.9b
	LG	2.5c	17.1c

3 讨论

3.1 低钾胁迫对不同棉花基因型光合特性的影响

许大全^[2]认为当 Pn 和 Gs 持续降低时,根据 Ci 的变化方向可判断 Pn 降低是受气孔限制还是受非气孔限制,即当 Pn, Gs 和 Ci 均呈下降趋势时 Pn 降低可归结为受气孔限制,而当 Pn 和 Gs 持续下降,其 Ci 却呈增加趋势时则归结为受非气孔限制。Farquhar^[3]同样认为,只有 Ci 和 Gs 同时下降时,才能证明 Pn 的下降是由气孔限制造成的。在本试验中,Pn, Ci 和 Gs 的变化规律一致,因此,可以认为气孔限制是导致 Pn 下降的一个原因,而钾能够调节叶片气孔的开闭,钾胁迫时 Pn, Ci 和 Gs 和施钾处理相比均呈下降趋势,可能是低钾胁迫抑制了气孔开放,使 CO₂ 进入叶片受到限制,因此增施钾肥促进气孔开放,能够提高叶片的 Pn, 促进光合产物的积累。同时,气孔阻力存在着基因型差异,钾低效基因型的气孔阻力高于钾高效基因型,这说明 CO₂ 进入钾低效基因型受到限制,从而限制了酶活化和光合产物的积累。并且低钾胁迫下钾低效基因型的光合特性在蕾期、桃期和吐絮期均显著低于钾高效基因型,这说明低钾胁迫对钾低效基因型的光合能力的影响大于钾高效基因型,可能与棉花钾高效基因型的钾利用指数较高有关(表 5)。

3.2 低钾胁迫对不同棉花基因型叶绿素含量的影响

理论上,叶绿体是光合作用的场所,叶绿素作为光合色素,参与光合作用中光能的吸收、传递和转化,在植物光合作用中起着关键性的作用。叶绿素含量的高低直接关系到光合速率的大小,但此试验与这一理论相左。本试验中,钾高效基因型和钾低效基因型的叶绿素含量没有显著性差异。陈四龙等^[4]同样发现叶绿素含量与产量及生物量之间没有相关关系。戚冰洁等^[5]认为叶绿素含量指数的降低会影响光合作用,但光合效率的高低受到多种因素的综合影响,叶绿素含量仅能作为其中一个因素来解释其变化机理。可见,不能单一地以叶绿素含量多少来推断作物光合作用强弱高低,而应综合考虑各方面因素做出评价。

3.3 低钾胁迫对光合产物的积累分配和钾利用效率的影响

多数学者在水培或砂培等营养液培养条件下对不同的棉花品种筛选得出,钾利用效率较高的品种具有低钾条件下干物质积累多、钾积累能力强、钾养分效率和钾利用指数高等特点。钾利用效率与气孔导度、净光合速率呈显著相关关系,提高钾肥利用率有利于光合性状的改善。施钾能够提高棉花叶片净光合速率,有利于光合产物的生产,而叶片气孔导度和胞间 CO₂ 浓度与净光合速率关系密切。本研究发现,光合特性与钾效率的变化趋势基本一致。结果表明,低钾胁迫导致棉花叶片光合器官受到影响以致净光合速率和蒸腾速率降低(表 1),气孔阻力增加、胞间 CO₂ 浓度降低(表 2),所以棉花的光合产物的积累受到很大影响(图 1)。

Marcelis^[6]报道植物的生产力一部分取决于光合产物在不同的器官之间的分配模式。许德威^[7]根据可溶性碳水化合物分析和 C¹⁴ 示踪试验结果,认为在生殖生长和营养生长之间存在着营养物质的竞争。棉花是营养生长和生殖生长并进的作物,光合产物在不同器官的分配对棉花的产量影响很大,其在营养器官积累的干物质越多,往生殖器官分配的就越少,越不利于高产。Wells 和 Meredith^[8]认为不同棉花基因型间光合产物的积累和分配效率存在着差异。在本研究中,钾高效基因型无论是在施钾还是缺钾条件下,和钾低效基因型相比,其营养器官分配的干物质少,生殖器官分配的干物质多,这可能是其钾高效的生理机制之一,在今后的棉花生产中可以通过平衡营养器官和生殖器官之间的比例来达到高产

的目的。收获指数是作物收获时经济产量与生物量之比，又名经济系数，反映了作物群体光合产物转化为经济产量的能力，是评价作物品种产量水平和作物品种选育的重要指标，收获指数和经济产量的相关性达到显著或极显著水平。结果表明，钾高效基因型的收获指数较高，能将较多的干物质分配到经济器官形成较高的产量。总之，钾高效基因型和钾低效基因型相比，积累的光合产物较多，并且能将较多的光合产物分配到生殖器官，获得较高的收获指数，提高钾利用效率，因此这些特征可以作为判断钾高效与否的重要指标，为筛选钾高效基因型，提高钾素利用效率提供理论依据。

近年来，很多学者开展了不同钾效率作物基因型的筛选，但大多数的筛选工作是在苗期进行的。我们研究发现，钾高效基因型和钾低效基因型的各个生理指标（光合特性、光合产物的积累和分配及钾利用指数）差异较大的时期不是在苗期，而是在生殖生长期，即蕾期、桃期和吐

絮期，因而只对不同钾效率基因型进行苗期筛选势必会影响结果的准确性，因此，对筛选出的基因型进行全生育期的验证是必要的。

4 结论

低钾胁迫导致棉花叶片的 Pn、Tr、Ci 和 Gs 降低，因此低钾胁迫导致棉花的生物量降低。棉花不同基因型间对低钾胁迫的抗性存在着差异，钾高效基因型在低钾胁迫下 KUI 较高，生物量降低的幅度较小，这与钾高效基因型在低钾胁迫下能较好地维持叶片光合功能密切相关。二个棉花基因型光合功能参数、生物量及分配模式和钾利用指数差异最大的时期是在桃期和吐絮期，这对不同钾效率棉花基因型的进一步筛选与钾效率的评价有着重要的指导作用。

致谢：本文承蒙中国农业科学院棉花研究所毛树春研究员和华中农业大学作物育种研究所聂以春教授的大力支持、帮助和指导，特此深表谢意！

参考文献

- [1] 姜存仓, 高祥照, 王运华, 等. 不同钾效率棉花基因型对低钾胁迫的反应 [J]. 棉花学报, 2006, 18(2):109-114.
- [2] 许大全. 2002. 光合作用效率 [M]. 上海: 上海科学技术出版社.
- [3] Farquhar GD, Sharkey TD. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33:317-345.
- [4] 陈四龙, 孙宏勇, 陈素英, 等. 不同冬小麦品种(系)叶绿素荧光差异分析 [J]. 麦类作物学报, 2005, 25(3):57-62.
- [5] 戚冰洁, 汪吉东, 马洪波, 等. 盐胁迫对不同基因型(品系)甘薯苗期光合特性的影响 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(12):3102-3108.
- [6] Marcelis LFM. Sink strength as a determinant of dry matter partitioning in the whole plant [J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47:1281-1291.
- [7] 许德威, 郑泽荣, 汤玉玮. 棉铃脱落的激素控制 [J]. 植物学报, 1974, 16(2):124-131.
- [8] Wells R, Meredith WR. Comparative growth of obsolete and modern cotton cultivars. III. Relationship of yield to observed growth characteristics [J]. Crop Science, 1984, 5:868-872.

不同磷钾水平下云南旱地玉米产量和养分吸收利用研究

尹梅¹ 王贵宝² 苏帆¹ 洪丽芳¹ 付利波¹ 陈华¹ 陈检锋¹ 任石所² 张勤斌² 黄惠²

(1. 云南省农业科学院农业资源环境研究所, 昆明 650205; 2. 云南省曲靖市麒麟区土肥站, 曲靖 655000)

摘要: 在云南省曲靖地区开展了2组旱地玉米的田间小区试验, 研究不同磷钾施肥量对玉米生物量和养分积累、养分利用、收获期玉米的产量和经济效益的影响。结果表明: 玉米的氮磷钾养分吸收积累高峰期在抽雄期前后。磷素和钾素的供应均对玉米的产量有显著影响, 钾素的影响大于磷素的影响。NP2K2处理因为搭配合理, 其地上部分的生物量积累、籽粒产量和经济效益是所有处理中最高的, 产量比其他处理高3.90%~24.74%, 净收益高3.65%~25.97%。NP1K2处理的P肥利用率和P素农学效率较高; NP2K2处理的K肥利用率和K素农学效率较高。

关键词: 玉米; 磷钾水平; 肥料利用率; 农学效率; 产量

旱作农业是云南农业的主要形式, 玉米是云南省种植面积最大的旱地作物。近年的农业生产实践中, 为追求玉米高产, 施肥量不断增长, 使得肥料利用率低下, 养分流失严重, 对环境产生了不良影响^[1-3]。磷和钾都是植物生长中重要的营养元素, 在植物的生长发育和生理生化代谢中具有重要的作用, 合理的磷钾营养也将促进氮素营养的吸收利用。提高肥料利用率, 减少养分流失对环境造成的不良影响, 保证玉米的品质和产量, 对云南省玉米生产具有重要意义^[4-5]。

玉米是典型的C⁴植物, 具有高效的光合作用能力, 生物量较大。氮磷钾养分的管理对玉米的产出、养分利用效率具有重要的影响, 前人已开展过不少研究^[5-10], 但对高原上的旱地玉米养分管理研究较少。本文针对云南省的玉米主产区曲靖地区近年来氮肥用量过高, 氮肥利用率低

下的问题, 磷钾肥比例和用量不合理的实际情况, 在云南省玉米主产区曲靖市麒麟区开展不同磷钾水平下玉米的产量和养分吸收利用研究, 分析在相同的施氮量条件下, 不同磷钾施肥量对玉米生物量积累动态、养分积累变化、养分利用、收获期玉米的农艺性状、产量、经济效益的影响, 为云南旱地玉米的实际生产和养分管理提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地位于云南省曲靖市麒麟区越州镇大梨树村和东山镇撒玛依村, 两地海拔分别是1891m和1912m; 两个试验地均为云南省典型的山原红壤旱地。

两个试验地肥力中上等, 养分状况见表1。

表1 试验地养分状况

试验地	pH	有机质 (克/公斤)	全N (%)	碱解N (毫克/公斤)	全P (%)	有效P (毫克/公斤)	全K (%)	速效K (毫克/公斤)
越州镇大梨树村	5.73	28.63	0.12	122.37	0.10	29.22	0.67	137.08
东山镇撒玛依村	7.01	34.86	0.15	175.79	0.11	23.15	0.83	146.52

表2 试验设计

	处理	公斤/亩		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	NP2K2	20.00	8.00	5.00
2	NP0K2	20.00	0.00	5.00
3	NP1K2	20.00	4.00	5.00
4	NP3K2	20.00	12.00	5.00
5	NP2K0	20.00	8.00	0.00
6	NP2K1	20.00	8.00	2.50
7	NP2K3	20.00	8.00	7.50

两个试验点处理一致,均设7个处理,试验设计如下:
供试的氮肥为普通尿素,含氮量为46%,磷肥为含12%P₂O₅的普钙,钾肥为含60%K₂O的氯化钾。各个小区面积为20m²,3次重复,随机区组排列。

施肥时期与方法:磷钾肥作为底肥一次性施用,氮肥分3次施用,20%氮肥作为底肥同磷钾肥共同施用,40%氮肥作为苗肥施用,40%氮肥作为穗肥施用。种植密度为4200株/亩。

越州镇大梨树村试验种植玉米品种为麒单8号,2012年4月25日播种,9月7日收获。东山镇撒玛依村试验种植玉米品种为海禾69号,2012年4月30日播种,9月12日收获。试验除养分用量不同外,其他的管理措施一样。两组试验均为覆膜种植,播种后灌溉一次,其余时间靠自然降水。

1.2 测定项目与方法

试验前每个实验点采集耕作层多点混合样1个,土样重1公斤左右,风干后进行分析,分析指标主要为全N(TN)、碱解N、全P、速效P、全K、速效K、pH和有机质。其中有机质分析采用铬酸钾容量法,pH采用玻璃电位法,全N采用半微量凯氏法,土壤碱解N用碱解扩散法,全P采用碱熔-钼锑抗比色法,有效P用0.5mol/L NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法,全K采用碱熔-火焰光度计法,速效K用乙酸铵溶液浸提·火焰光度计法测定^[11-12]。

植株样品采集:在玉米生长的每个生育期取各个处理生长中等的5棵植株,测定其鲜重,105℃杀青后烘干,

称干重,并制样,进行相关项目测定;收获期,每个小区的玉米单独计产,每个小区的玉米进行生物性状的测定和取样。植株的干物质采用烘干称重法。植株和玉米籽粒的TN测定采用硫酸-过氧化氢消煮法-蒸馏法,TP测定采用硫酸-过氧化氢消煮-钼蓝比色法,TK测定采用硫酸-过氧化氢消煮-火焰光度计法^[13]。

磷素农学效率(%)=(施磷区玉米产量-对照区玉米产量)/施磷量

磷肥利用率(%)=(施磷区玉米地上部吸磷量-对照区玉米地上部吸磷量)/施磷量×100%

钾素农学效率(%)=(施钾区玉米产量-对照区玉米产量)/施钾量

钾肥利用率(%)=(施钾区玉米地上部吸钾量-对照区玉米地上部吸钾量)/施钾量×100%

数据统计分析应用EXCEL和DPS软件。

2 结果与分析

2.1 不同生育期玉米地上部分的积累

两组旱地玉米试验地上部分不同生育期的总生物量积累见表3。

两组旱地玉米生物量的变化相似,前期生物量增长缓慢,大喇叭口期后迅速增长;两组旱地玉米总生物量均是NP2K2高,而缺磷和缺钾处理的总生物量最低。在大喇叭口期,两组旱地玉米的总生物量相差不大,但抽雄期和成熟期时,东山组的玉米总生物量明显高于越州组。

表3 不同磷钾水平下的玉米生物量

		公斤/亩				
试验地	处理	苗期	拔节期	大喇叭口期	抽雄期	成熟期
越州组	NP2K2	4.47	73.33	298.67	686.67	1666.60
	NP0K2	5.40	65.33	245.33	633.33	1345.93
	NP1K2	5.47	66.67	261.33	666.67	1575.73
	NP3K2	4.47	66.67	266.67	680.00	1530.53
	NP2K0	4.87	64.00	226.67	673.33	1342.40
	NP2K1	5.60	68.67	248.00	733.33	1371.20
	NP2K3	5.13	71.87	272.00	746.67	1439.33
东山组	NP2K2	6.00	76.00	355.00	901.67	1929.73
	NP0K2	5.67	70.00	321.27	803.33	1698.93
	NP1K2	6.33	68.67	347.87	863.33	1805.87
	NP3K2	5.60	76.67	341.27	884.00	1607.07
	NP2K0	5.00	69.33	321.53	821.67	1523.27
	NP2K1	5.67	70.00	346.00	885.00	1725.73
	NP2K3	6.00	71.33	345.00	905.00	1816.07

2.2 玉米地上部分 NPK 养分的积累

两组旱地玉米地上部分各个生育期 NPK 养分积累见表 4。

试 验 地	处理	N 积累					P 积累					K 积累				
		苗 期	拔节 期	大喇叭 口期	抽雄 期	成熟 期	苗 期	拔节 期	大喇叭 口期	抽雄 期	成熟 期	苗 期	拔节 期	大喇叭 口期	抽雄 期	成熟 期
越 州 组	NP2K2	0.15	1.97	4.37	8.27	17.31	0.15	1.97	4.37	8.27	17.31	0.15	1.97	4.37	8.27	17.31
	NP0K2	0.15	1.71	3.19	6.09	13.78	0.15	1.71	3.19	6.09	13.78	0.15	1.71	3.19	6.09	13.78
	NP1K2	0.15	1.74	3.91	6.75	16.20	0.15	1.74	3.91	6.75	16.20	0.15	1.74	3.91	6.75	16.20
	NP3K2	0.15	1.83	4.05	7.31	15.29	0.15	1.83	4.05	7.31	15.29	0.15	1.83	4.05	7.31	15.29
	NP2K0	0.12	1.65	3.53	6.25	11.78	0.12	1.65	3.53	6.25	11.78	0.12	1.65	3.53	6.25	11.78
	NP2K1	0.15	1.57	3.47	8.32	12.59	0.15	1.57	3.47	8.32	12.59	0.15	1.57	3.47	8.32	12.59
	NP2K3	0.21	1.93	3.42	9.80	16.32	0.21	1.93	3.42	9.80	16.32	0.21	1.93	3.42	9.80	16.32
东 山 组	NP2K2	0.21	2.13	8.72	12.39	21.43	0.21	2.13	8.72	12.39	21.43	0.21	2.13	8.72	12.39	21.43
	NP0K2	0.21	1.40	7.89	9.65	16.59	0.21	1.40	7.89	9.65	16.59	0.21	1.40	7.89	9.65	16.59
	NP1K2	0.29	1.85	6.94	11.04	20.41	0.29	1.85	6.94	11.04	20.41	0.29	1.85	6.94	11.04	20.41
	NP3K2	0.27	2.15	8.23	12.66	17.97	0.27	2.15	8.23	12.66	17.97	0.27	2.15	8.23	12.66	17.97
	NP2K0	0.19	1.35	7.41	9.90	15.53	0.19	1.35	7.41	9.90	15.53	0.19	1.35	7.41	9.90	15.53
	NP2K1	0.23	1.63	9.73	11.91	19.09	0.23	1.63	9.73	11.91	19.09	0.23	1.63	9.73	11.91	19.09
	NP2K3	0.27	2.04	9.76	11.99	20.90	0.27	2.04	9.76	11.99	20.90	0.27	2.04	9.76	11.99	20.90

越州组的玉米 NPK 养分积累显示, 整个生育期玉米对氮的吸收最多, 其次为钾, 最后为磷。本组试验还显示玉米体内的氮素和磷素在抽雄期前积累了一半或一半不到, 而玉米体内的钾素在抽雄前就积累了大部分。NP2K2 处理的氮磷钾积累数值最高, 其次是 NP3K2 处理和 NP2K3 处理的氮磷钾积累数值高, 而缺磷和缺钾处理的氮磷钾积累数值低。

东山组的玉米 NPK 养分积累同样显示, 整个生育期玉米对氮的吸收最多, 其次为钾, 最后为磷。本组试验玉米体内的氮素在抽雄期已积累过半, 比越州组试验积累早一些, 磷素抽雄期积累不到一半的量, 钾素在抽雄期积累了大部分。NP2K2 处理的氮磷钾积累数值最高, NP2K3 处理和 NP1K2 处理的氮磷钾积累数值也较高; 无钾处理的氮磷钾积累数值低。

两组试验都表明, 虽然试验各个处理所用氮肥量一样, 但由于磷钾水平的不同而影响到玉米生物量及玉米植株氮含量, 从而各个处理的氮积累差异是明显的。

2.3 不同磷钾水平对玉米产量及构成因素的影响

表 5 显示了两组旱地玉米试验的产量及其产量构成因素的结果。

结果表明, 越州组玉米各个处理行数无显著性差异, 实粒数和千粒重差异较大, NP2K2 处理的实粒数较多, 千粒重较大。东山组玉米行粒数无显著性差异, 实粒数差异较大, 实粒数最多的处理为 NP2K2。在越州组玉米试验中, NP2K2 处理的籽粒产量最高, 达到 828.55 公斤/亩, 比其他处理的产量高出 5.4%~24.7%; 产量第二高的处理为 NP1K2 处理, 第三高的处理为 NP3K2 处理, 三个产量最高的处理均为钾适量的处理。该试验中, 产量最低的处理为无钾处理和无磷处理, NP2K1 处理和 NP2K3 处理的产量也较低。在东山组玉米试验中, NP2K2 处理的籽粒产量最高, 达到 959.66 公斤/亩, 比其他处理的产量高出 3.9%~19.1%; 产量第二高的处理为 NP2K3 处理, 第三高的处理为 NP3K2 处理和 NP1K2 处理, 产量最高的几个处理均为钾适量和高钾的处理。产量最低的处理也是无钾处理和无磷处理。

两组玉米试验的试验地土壤都属于中高肥力土壤, 在适量的施肥条件下, 两组玉米试验的产量均较高, 东山组的玉米产量更高于越州组。在两组试验中, NP2K2 处理的籽粒产量均是最高, 而无钾处理和无磷的籽粒产量是最低的。结果还显示, 钾素对玉米产量的影响大于磷素。

表 5 玉米产量及其构成因素

试验地	处理	行数	行粒数	实粒数	千粒重(克)	产量(公斤/亩)	与 NP2K2 相比(%)
越州组	NP2K2	17.3 a	30.2 b	524.3 c	309.3 a	828.55 a	--
	NP0K2	15.3 a	32.0 ab	489.0 d	267.7 c	666.54 c	-19.55
	NP1K2	16.7 a	31.2 ab	517.3 cd	288.3 abc	786.32 ab	-5.10
	NP3K2	17.3 a	31.5 ab	544.7 bc	296.7 abc	752.38 b	-9.19
	NP2K0	16.7 a	34.3 a	572.7 ab	266.7 c	664.22 c	-19.83
	NP2K1	15.3 a	34.3 a	526.0 c	275.0 bc	680.21 c	-17.90
	NP2K3	17.3 a	33.5 ab	580.0 a	308.0 ab	722.25 bc	-12.83
东山组	NP2K2	15.6 a	35.4 a	552.2 a	332.3 a	959.66 a	--
	NP0K2	14.7 ab	33.1 a	484.5 c	312.3 b	824.26 bc	-14.11
	NP1K2	14.3 b	33.0 a	492.0 c	321.0 a	859.09 b	-10.48
	NP3K2	14.9 ab	34.3 a	513.1 bc	328.0 a	855.76 b	-10.83
	NP2K0	15.1 ab	35.3 a	531.4 ab	314.7 b	805.65 c	-16.05
	NP2K1	14.8 ab	34.4 a	509.0 bc	323.3 a	845.18 bc	-11.93
	NP2K3	14.9 ab	34.3 a	514.0 bc	332.0 a	924.53 a	-3.66

注：同列标以不同小写字母的值差异达 5% 显著水平。

2.4 不同磷钾水平下玉米的经济效益分析

表 6 分析了两组旱地玉米试验的经济效益。

在越州组试验中，NP2K2 处理的产量、产值及净收益都是最高的，NP1K2 处理的净收益也较高，其他处理的收益就明显差于二者。在东山组试验中，同样也是 NP2K2 处理的产量、产值及净收益最高，NP2K3 处理的净收益次高，NP1K2 处理的净收益第三高。

2.5 不同磷钾水平下玉米 PK 养分利用

表 7 显示了两组旱地玉米试验的 PK 素利用。

在越州组试验中，NP2K2 处理的 P 吸收量最高，NP3K2 处理的 P 吸收量次高，而无磷处理的吸收量最少。NP1K2 处理的 P 肥利用率和 P 素农学效率是该组试验中最高。NP2K3 处理的 K 吸收量最高，NP2K2 处理的 K 吸收量次高，无钾处理和低钾处理的钾吸收量较少。该

表 6 经济效益分析

试验地	处理	产量	产值	成本	净收益	比 NP2K2 ±
		(公斤/亩)	(元/亩)	(元/亩)	(元/亩)	(%)
越州组	NP2K2	828.55	1657.11	204.53	1452.58	--
	NP0K2	666.54	1333.07	137.86	1195.21	-17.72
	NP1K2	786.32	1572.63	171.20	1401.44	-3.52
	NP3K2	752.38	1504.75	237.86	1266.89	-12.78
	NP2K0	664.22	1328.45	175.36	1153.08	-20.62
	NP2K1	680.21	1360.42	189.95	1170.47	-19.42
	NP2K3	722.25	1444.51	219.11	1225.39	-15.64
东山组	NP2K2	959.66	1919.31	204.53	1714.78	--
	NP0K2	824.26	1648.51	137.86	1510.65	-11.90
	NP1K2	859.09	1718.17	171.20	1546.98	-9.79
	NP3K2	855.76	1711.51	237.86	1473.65	-14.06
	NP2K0	805.65	1611.29	175.36	1435.93	-16.26
	NP2K1	845.18	1690.36	189.95	1500.41	-12.50
	NP2K3	924.53	1849.07	219.11	1629.95	-4.95

注：同列标以不同小写字母的值差异达 5% 显著水平。

表7 磷钾养分利用效率

试验地	处理	P 吸收量	P 投入量	P 肥利用率	P 素农学效率	处理	K 吸收量	K 投入量	K 肥利用率	K 素农学效率
		(公斤/亩)		(%)	(公斤/公斤)		(公斤/亩)		(%)	(公斤/公斤)
越州组	NP0K2	3.22	0.00	--	--	NP2K0	8.58	0.00	--	--
	NP1K2	4.64	4.00	35.57	29.9	NP2K1	8.76	2.50	7.47	6.4
	NP2K2	5.05	8.00	22.88	20.3	NP2K2	11.02	5.00	49.00	32.9
	NP3K2	4.73	12.00	12.60	7.2	NP2K3	11.17	7.50	34.53	7.7
东山组	NP0K2	3.87	0.00	--	--	NP2K0	11.79	0.00	--	--
	NP1K2	5.15	4.00	32.00	8.7	NP2K1	13.41	2.50	64.85	15.8
	NP2K2	5.89	8.00	25.26	16.9	NP2K2	14.13	5.00	46.67	30.8
	NP3K2	4.82	12.00	7.96	2.6	NP2K3	14.39	7.50	34.61	15.9

试验中, P 肥利用率和 P 素农学效率有随施 P 量增加而降低的趋势。NP2K2 处理的 K 肥利用率和 K 素农学效率是该组试验中最高的, 分别达到 49% 和 32.9%; NP2K3 处理的 K 肥利用率也较高, 达到 34.5%。而 NP2K1 处理的 K 肥利用率和 K 素农学效率都比较低。

在东山组试验中, 同样也是 NP2K2 处理的 P 吸收量最高, P 吸收量次高的是 NP1K2 处理, 而无磷处理的吸收量最少。该组试验中, NP1K2 处理的 P 肥利用率和 NP2K2 处理的 P 素农学效率是最高的。P 肥利用率有随施 P 量增加而降低的趋势。NP2K3 处理的 K 吸收量最高, K 吸收量次高的是 NP2K2 处理, 而无钾处理的吸收量最少。该组试验中, NP2K1 处理的 K 肥利用率和 NP2K2 处理的 K 素农学效率是最高的。K 肥利用率有随施 K 量增加而降低的趋势。

3 结论

玉米氮磷钾的吸收规律是一个研究的重要问题, 有研究认为玉米氮磷钾的吸收只有一个吸收高峰^[14], 也有研究表明为两个吸收高峰^[15], 在本试验中, 云南旱地玉米的氮磷钾养分吸收积累高峰期在抽雄期前后, 这与前人的研究结果一致^[10,14]。

在试验中, NP2K2 处理因为搭配合理, 其地上部分的生物量积累和籽粒产量是所有处理中最高的, 越州组籽粒产量比其他处理高出 5.4%~24.7%, 东山组籽粒产量比其他处理高出 3.9%~19.1%; 在产量构成因素上, 粒重是增产的主要因素。NP2K2 处理的产值和净收益也是最高

的, 越州组净收益比其他处理高出 3.7%~26.0%, 东山组净收益比其他处理高出 5.2%~19.4%。

越州组和东山组的 P 肥利用率均是 NP1K2 处理最高, 分别达到 35.6% 和 32.0%, 比我国当季作物的磷肥利用率 10%~20% 都高出不少^[16], 越州组 P 素农学效率也是 NP1K2 处理最高, 同 P 肥利用率一样, 磷肥农学效率有随 P 肥施用量增大而减小的趋势。东山组 P 素农学效率为 NP2K2 处理最高。越州组试验中 NP2K2 处理的 K 肥利用率和 K 素农学效率最高; 东山组 K 肥利用率 NP1K2 处理最高, K 肥利用率有随 K 肥施用量增大而减小的趋势, K 肥农学效率以 NP2K2 处理最高。

在云南省曲靖地区开展的这两组玉米试验土壤养分属于中上等肥力水平, 两组试验的玉米产量都较高, 东山组更高于越州组, 甚至无磷和无钾的处理玉米产量也不低, 达到了本地玉米产量的中上等水平。在合理的施肥水平下, 玉米的产量就更高, 东山组玉米试验的 NP2K2 处理达到了 960 公斤/亩, 在当地来说是很高的产量。磷素和钾素的供应均对玉米的产量有显著影响, 钾素的影响大于磷素的影响。在试验中, 所有处理的用氮量是一致的, 但氮素的积累有差异, 说明磷和钾的施用量和比例影响了玉米的产量和对氮素的吸收, 合理的磷钾量可以提高氮肥的利用率, 减少氮素的流失。研究中, 为了保证磷肥和钾肥的效果, 氮肥的用量并不低, 虽然低于本地习惯施肥的 22~32 公斤/亩, 但 20 公斤/亩的纯氮用量还是偏高的, 在磷钾用量适宜的情况下, 可以降低氮肥的用量, 以期同时达到产量、经济效益和环境效益的最佳。

参考文献

- [1] 朱兆良. 中国土壤氮素研究 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-782.
- [2] 朱兆良, 孙波. 中国农业面源污染控制对策研究 [J]. 环境保护, 2008, 394:4-6.
- [3] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略 [J]. 植物学通报, 2007, 24(6):687-694.
- [4] 杜红霞, 吴普特, 王百群, 等. 施磷对夏玉米土壤硝态氮、吸氮特性及产量的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(8):121-126.
- [5] 齐文增, 陈晓璐, 刘鹏, 等. 超高产夏玉米干物质与氮、磷、钾养分积累与分配特点 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1):26-36.
- [6] 左启华, 李会彬, 张立峰, 等. 施钾对华北高寒区饲用玉米产量与营养品质的影响 [J]. 玉米科学, 2011, 19(2):119-122.
- [7] 李明, 裴占江, 张明, 等. 寒地高肥条件下玉米氮磷钾积累规律研究 [J]. 玉米科学, 2010, 18(1):121-125.
- [8] 战秀梅, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 不同氮、磷、钾肥用量对玉米源、库干物质积累动态变化的影响 [J]. 土壤通报, 2007, 38(3):495-499.
- [9] 王宜伦, 谭金芳, 韩燕来, 等. 不同施钾量对潮土夏玉米产量、钾素积累及钾肥效率的影响 [J]. 西南农业学报, 2009, 22(1):110-113.
- [10] 何萍, 金继运, 林葆, 等. 不同氮磷钾用量下春玉米生物产量及其组分动态与养分吸收模式研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2):123-130.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000:127-129, 146-149, 302-311.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [13] 劳家桢. 土壤农化分析手册 [M]. 北京: 农业出版社, 1988.
- [14] 佟屏亚, 凌碧莹. 夏玉米氮、磷、钾积累和分配态势研究 [J]. 玉米科学, 1994, 2(2):65-70.
- [15] 郭景伦, 张智猛, 李伯航. 不同高产夏玉米品种养分吸收特性的研究 [J]. 玉米科学, 1997, 5(4):50-53.
- [16] 鲁如坤. 我国的磷矿资源和磷肥生产消费 [J]. 土壤, 2004, 36(2):113-116.

不同基因型作物及其根际钾素高效利用机理的研究进展

汪霄 张过师 陈防*

(中国科学院武汉植物园, 武汉 430074)

摘要: 近年来, 由于集约化种植、高产作物品种的应用及农民传统习惯上偏施氮肥、磷肥等原因, 造成我国土壤缺钾更加普遍。同时随着植物营养学、根系生物学及分子遗传学等学科的交叉发展, 国内外学者从多方面对钾素高效利用机理进行了研究, 并进行钾高效基因型作物种质的选育工作。本文简要综述了钾肥对作物生产的重要性、我国土壤钾素肥力及钾肥使用现状、从根际微域环境的角度对不同基因型作物钾素营养遗传学性状的差异机理、根际环境和根系分泌物对钾素有效性的影响、钾高效基因型作物种质资源的选育及存在的一些问题进行了探讨。

关键词: 基因型; 钾效率; 根际; 根际分泌物; 种质选育

1 钾对作物生产的重要作用及中国钾肥使用状况

钾是植物三要素之一, 对植物的生长、发育、代谢、抗性等生理过程都有重要影响。土壤中钾素含量一般为1-3%, 虽然显著高于氮和磷, 但绝大部分不能被植物当季吸收利用, 植物可吸收的有效钾含量一般不超过全钾量的2%。由于多年来集约化种植、高产作物品种的应用、农民传统习惯上偏施氮肥和磷肥等原因, 目前我国耕地土壤缺钾面积已达60%, 其中80%在南方地区^[1], 农田土壤缺钾已成为限制作物高产的全国性问题。因此, 目前通过施用钾肥来补充作物带走的钾素是农田土壤培肥和保持作物高产的主要措施。中国是一个钾肥资源贫乏的国家, 目前中国50%以上钾肥来自进口。然而这些昂贵的进口钾肥没有很好地被利用, 其当季利用率一般为40%左右(35-50%), 比发达国家低10%以上。因此, 如何大幅度提高钾肥的利用率是生产中的重要问题, 对我国农业的可持续发展意义重大。

钾也是土壤中含量最高的营养元素之一, 按其在土壤中的存在形态和对作物的有效性可分为矿物钾(难溶性钾), 缓效钾(非代换性钾)和速效钾(代换性钾+水溶性钾), 这些形态的钾可以互相转化, 处于动态平衡中, 但转化关系十分复杂。植物当季利用的钾主要包括水溶性和交换性钾, 外源钾的施入和土壤固定态钾的释放对土壤钾有效性有重要影响。从养分资源的角度来看, 土壤中各形态的钾都是植物钾素的重要资源, 要维持土壤钾的长期

供应, 主要靠层间钾和矿物钾, 关键是如何挖掘利用这些土壤的供钾潜力。

2 植物钾素营养遗传学性状的差异机理及其改良研究

随着植物营养遗传学和分子生物学的发展, 利用植物自身遗传资源来鉴定和筛选钾素利用高效型农作物, 再通过遗传育种和基因工程技术来培育高产、高效利用土壤养分的基因型种质材料, 以大幅提高肥料钾素利用率、充分挖掘土壤钾库中的钾素释放潜力, 是解决植物养分供应问题的一条有效途径。植物营养遗传学研究的核心问题是以植物遗传资源代替或补充改土、施肥等工程措施所需要的能源和化学资源。通过此途径可以在提高作物产量的同时, 降低能源和化学物质的投入, 从而达到良好的经济和生态效益。上世纪初人们就注意到了作物不同品种对矿质营养胁迫的反应存在差异, 到20世纪70年代以后, 随着人口、粮食、能源和环境污染等问题的日益突出, 对作物品种的营养遗传改良更提出了迫切要求, 为土壤-植物营养学同遗传学、分子生物学、环境科学等学科交叉融合发展提供了新的平台。愈来愈多的科学工作者研究利用植物营养性状的基因潜力, 筛选养分高效或逆境高抗的品种, 进而改良植物的某些营养性状以适应其生长对环境条件和营养的要求。已相继报道了抗缺铁、锌、铜、氮、磷、钾及耐铝、锰毒害等基因型差异及遗传特性的研究, 植物营养性状的遗传改良正在蓬勃开展。

基金项目: 国家支撑计划项目(2007BAD87B09)和国际植物营养研究所基金项目(IPNI-HB-37)

作者简介: 汪霄(1986-), 女, 安徽淮北人, 硕士研究生, (电子信箱) wangxiao0510237@126.com;

* 通讯作者: 陈防, 研究员, 博士生导师, (电子信箱) fchen@ipni.ac.cn。

不同植物或同一植物不同品种对钾的吸收、分配、转运和利用效率等方面存在着很大的差异。耐低钾作物品种筛选和研究在国外进行较早,并在拟南芥、大麦等作物上取得了较好的进展。国内起步虽较晚,但研究进展较快,已涉及了包括有拟南芥、水稻、小麦、玉米等主要的植物,并在耐低钾基因型的耐低钾机理、筛选及利用方面进行了较深入的研究。张志勇等^[2]和姜存仓等^[3]在棉花钾高效种质资源筛选和基因型机理差异方面做了一定的探索。吕福堂等^[4]发现低钾胁迫下不同基因型玉米吸收土壤中各种形态钾素的比例不同,其吸钾量和吸收不同形态钾的比例可以作为判定其吸钾能力强弱的重要指标。另据报道,不同钾效率棉花基因型对钾素营养的反应也存在较大的差异,这既表现为不同钾效率棉花基因型体内钾的积累、转运、分配等钾素利用效率的差异,也表现为不同钾效率棉花基因型吸收土壤钾库中速效钾或者活化缓效钾、矿物钾能力的差异。因此,提高植物钾营养效率、选择钾营养高效基因型植物将是有效利用钾素资源、缓解我国农业生产中缺钾问题的有效途径。

近年来利用钾高效和低效棉花基因型为材料进行了生理机制方面的初步探索,研究发现钾高效棉花基因型能以较低的K含量构建较多的有机物,其植物体有较强的K素利用能力和较强的吸收和活化土壤K素的能力,这或许是其钾高效机制的部分原因。另外,钾高效棉花基因型对有机物和钾素的转运、分配的协调能力强。缺钾时,钾高效棉花基因型的繁殖器官—棉桃钾素的积累量是钾低效棉花基因型的约2倍,施钾时低效棉花基因型桃的钾积累量只有高效棉花基因型的49.6%。缺钾和施钾时,低效基因型落蕾铃损失的钾分别为高效基因型的1.65倍和1.91倍。所以,高效棉花基因型座桃率高而产量较高,对钾素具有较高的利用率。现有研究表明,一般情况下,钾高效基因型具有良好的根系形态和根系分布,高根/冠比,根系纵向、侧向分布广,根多且细;理想的根系吸收动力学参数,即吸钾速率高(I_{max} 大), K^+ 亲和力强(低 K_m 、 C_{min} 值);钾向地上部的逆运转速率快,再利用、再运转效率高;细胞质对 K^+ 的功能要求低,即钾的利用效率高;钾可部分被其他元素(如Na、Ca)替代;遭受营养胁迫时根际有强烈适应性反应。相关的研究结果还表明,棉花钾高效基因型在土壤缺磷和水分胁迫的条件下,与低效基因型相比也表现出了较高的生物学和经济产量。那么这些方面的差异,是否与二者的酶学、光合效率、器官微观结构的内在机制,以及棉花吸钾后根际与非根际土壤粘土矿物类型和表面化学性质差异有关,值得进一步研

究。有不少研究表明,土壤矿物钾的有效化与作物有很大关系。植物对土壤矿物钾会产生直接的活化作用。随着现代测试技术的发展,X射线衍射仪、扫描电子显微镜、各种分光仪(红外光谱、核磁共振、电子自旋共振等)、透射电子显微镜、原子力显微镜等在土壤学领域的应用,对土壤粘土矿物中钾素的转化过程有了进一步加深认识的可能。

3 根际环境与土壤钾素有效性的关系研究

根际是植物与土壤接触的微域环境,是植物提取养分的主要区域,是植物—土壤—微生物相互作用的场所。根际微域环境由于受根系新陈代谢活动的影响,在理化性质上与土体土壤有很大差异,不仅影响土壤养分向根表的迁移和吸收,而且影响土壤养分的有效性和利用率,以及作物的产量。

研究表明,植物不同基因型活化,吸收和利用土壤中不同形态钾的能力存在着较大的差异。吕福堂等^[4]的研究结果指出,越是吸钾量大、吸钾能力强的品种,吸收来自矿物钾的比例更大,来自速效钾和缓效钾的比例更小。Lars等^[5]指出,在植物吸收K方面,不同种类存在较大差异,水稻能够比棉花、玉米、大豆等其他作物利用较多的非交换性钾。姜存仓等^[3]通过盆栽土培实验对不同钾效率基因型棉花进行研究指出,钾高效高潜力基因型棉花品种在缺钾的环境条件下具有较强的吸收土壤速效K,活化土壤缓效K的能力。

作物生长所必需的钾除由种子供给外,绝大部分来自土壤,而根系是植物连接土壤与植物地上部分的桥梁,是植物吸收养分的主要部位,也是植物从土壤中获取钾的主要途径。因而,发育良好的根系是作物从外界环境中获取养分的重要动力来源。由于根系生长在地表以下,因此土壤物理、化学和生物学环境条件的改变会影响植物根系的生长发育和养分的吸收状况,进而导致地上部分生物量的改变。但是,随着时间的发展,植物根系也会通过改变自身形态,不断适应不同的土壤环境。研究表明,植物根系与土壤的接触面积和养分利用率成正相关性。相同环境下,根系发达,表面积大的植物有可能获得更多的养分。徐国华等^[6]指出,根系的活跃吸收面积与作物吸钾量具有显著的相关性;小麦能大量吸收钾正是因其有较大的根系吸收面积。邹春琴等^[7]用6个小麦品种作为试验材料,研究了钾效率不同小麦的根系形态学和生理学特征,得出钾高效型作物具有以下特征:良好的根系形态和根系分

布，高根/冠比，根系纵向、侧向分布广，根多且长，根毛细且密；理想的根系吸收动力学参数，即吸钾速率高（ I_{max} 大）， K^+ 亲和力强（低 K_m , C_{min} 值）；根系周转速率高（形成较大的钾素浓度梯度）等。由此可见，根系的发育情况和生理活性与其耐低钾能力有关，钾高效和低效品种的根系形态和生理特征存在一定的差异，这种差异在一定程度上影响了钾的吸收效率。

4 植物根系分泌物与土壤钾素有效性的关系研究

植物获取养分的能力除了受根系形态和活力的影响外，还受到土壤母质、根系分泌物、根际微生物等对养分的活化及植物自身吸收和运输能力等因素的综合影响。相关研究已经证实，不同基因型作物在根际和土体其他部分的养分浓度、养分可利用性、土壤理化性质和微生物群落组成等方面有很大差别。

根系分泌物（RE）是植物-土壤-微生物的重要媒介，在养分循环、能量流动及有机物周转等方面起着十分重要的作用，是植物改善根际营养环境的重要手段。它的种类有 200 种以上，主要包括粘胶、外酶、有机酸、糖、酚及各种有机酸。不同营养基因型的植物，其 RE 的组分、含量明显不同。根系分泌物对植物钾素养分吸收和土壤钾素有效性及土壤肥力状况的影响，主要表现在以下几个方面：

4.1 提高土壤钾素养分有效性的作用

根系分泌物的种类繁多，质子和无机离子是根系分泌物成分之一，对根际土壤的 pH 值及氧化还原电位有一定的调节作用，进而可以影响营养元素在根际的有效性。根系钾素动态的研究结果表明，根际土壤钾呈亏缺状态，而靠近根表处却有相对富集的现象。应用分室贴根培养和地上部同位素示踪技术研究表明，根表钾的富集现象与根分泌物密切相关。根系分泌的有机酸可以通过对根际难溶性养分的酸化、螯合、离子交换作用及还原作用等提高根际土壤养分的有效性，增加植物对根际养分的吸收，从而促进植物的生长发育。李廷轩等^[8]通过模拟籽粒苋根系分泌物对土壤矿物态钾的活化作用，探明低 K 处理时，籽粒苋富 K 基因型根系分泌物含大量苹果酸，柠檬酸和草酸，尤其是草酸，约占有机酸总量的 95% 以上。进一步的研究还表明，草酸对土壤矿物钾具有超强的释放作用，从而揭示了籽粒苋的高效富钾机理。

4.2 促进土壤团聚体形成的作用

土壤的基本结构单元是团聚体或称为土壤自然结构体，良好的土壤团聚体对水土保持，提高土壤养分利用率起至关重要的作用。试验表明对土壤颗粒起团聚作用的粘合物，主要包括微生物分解有机质的产物和合成物质，以及根系分泌物，如腐殖质、多糖类和糖醛类高分子化合物，微生物的菌丝体和粘液等，其中最重要的就是腐殖质和多糖类。而多糖是作物根系分泌物主要组分之一，植物根系分泌物产生的高分子粘质多糖对土壤颗粒有很强的粘着力，高分子粘胶物质与土壤颗粒相互作用，促进团聚体的形成。当土壤干燥时，根系分泌物和微生物释放的多糖具有缓冲作用，使局部保持湿润，降低对团聚体的破坏性。团聚体的形成对保持土壤的通透性，改善土壤环境条件，进而促进根系生长发育起着重要作用，而发达的根系是植物充分吸收钾素养分的基础。

4.3 促进土壤微生物活性的作用

由于根系可以向环境中释放大量的有机化合物，因此根际及根表面的微生物种群密度和种类要明显高于非根际土壤。微生物是土壤生态系统中最具活力的组成部分，土壤微生物包括原核微生物如细菌、蓝细菌、放线菌及超显微结构微生物，以及真核生物如真菌、藻类（蓝藻除外）、地衣等，并且在养分充足或贫瘠的根际土壤中，微生物的群落结构不同。植物通过根系分泌有机营养物质，为微生物繁殖提供养分，而微生物的繁衍又可以促进土壤有机质的矿化，分解矿物质，以利于作物吸收利用，提高土壤养分利用率。根际微生物可以通过改变根际营养状况和植物体内激素含量来改变植物体内生理生化过程，从而影响根分泌物的种类和数量。根际微生物还可以通过有选择地利用根分泌物中的特定成分来改变根分泌物的组成成分及其占总量的比例。磷细菌能分解磷矿石中的磷，钾细菌能分解钾矿石中的钾。Li 等^[9]在不同基因型籽粒苋的缺钾土培和水培试验中发现，富钾基因型籽粒苋的根际真菌和细菌的数量是一般基因型的 3 倍以上。

5 钾高效基因型作物种质的选育

理想的钾高效基因型作物种质应具备三方面的优势：

- ① 植物根系对钾的高效吸收，
- ② 高效活化土壤中的钾素，
- ③ 高效利用植物体中的钾。实际上，自然界中很难找到兼具这三方面优势的种质资源。如果能够通过现代分子生

物学手段和遗传工程技术将各种优秀基因用于选育作物品种,对于解决我国农业生产中钾素匮乏的问题具有重要意义。与传统的通过改良作物生长环境提高产量的途径相比,现代分子遗传育种技术可以减少人力、资源(化肥、农药等)浪费,避免由于化肥的不当投入而引发的一系列环境污染问题,具有良好的经济、环保意义。

近年来,随着植物营养学、分子生物学、遗传学等众多学科不断发展,国内外很多学者已经在钾高效利用型转基因作物的选育工作中取得了很大的突破。研究发现,在低钾条件下,钾高效基因型的钾素利用效率和钾素经济利用效率都显著高于钾低效基因型。施卫明等^[10]通过棉花花粉管通道导入法培育出的钾高效利用型棉花新品种,已经得到分子验证,并且能在子代稳定遗传。此外,邹春琴等^[7]在研究了钾效率不同小麦的根系形态学和生理学特征后指出,筛选指标最好是将根系形态和生理特性相结合。

6 今后研究的展望

尽管理论上可以通过改良植物营养的遗传学性状来提高植物对环境中钾素养分资源的有效利用,国内外学者

也在钾高效营养基因型作物的选育和根际钾素高效利用机理的研究上取得了长足的进展,但由于不同基因型作物钾营养高效的机理和根际微域环境与钾素有效性之间相互作用关系的复杂性,不同基因型作物及其根际钾素高效利用的机理还不十分明确,将转基因技术应用于提高农作物钾素高效利用尚未能真正实现,一些关键问题还有待进一步的深入研究和解决。这些问题主要包括:

(1) 种质资源的筛选方法、评价指标尚未统一。具有可靠基因型性状差异的种质资源是植物营养遗传学研究的有利条件之一,因此,尽快确定一种快速、准确、简便易行的植物营养遗传学特性的鉴定方法和评价指标是当务之急。

(2) 研究方法和手段需要改善。目前植物营养遗传学试验多在水培条件下进行,但实践证明由于水培试验的局限性,其结果与大田试验的结果并不完全一致;但在大田试验条件下,许多影响因子又难以做到准确控制,不利于从多学科的角度深入进行机理的探讨。因此,更加可靠的植物营养遗传学研究新成果有赖于更加科学可靠的研究方法和手段的创新。

参考文献

- [1] 陈防,郑圣先.我国南方作物高效施钾技术的研究进展[J].土壤肥料,2004,6:28-32.
- [2] 张志勇,王刚卫,田晓莉,等.棉花品种间苗期钾吸收效率的差异研究[J].棉花学报,2007,19(1):47-51.
- [3] 吕福堂,张秀省,张保华,等.不同玉米基因型吸钾和耐低钾能力的研究[J].植物营养与肥料学报,2005,11(4):556-559.
- [4] 姜存仓,袁利升,王运华,等.不同基因型棉花苗期钾效率差异的初步研究[J].华中农业大学学报,2003,22(6):564-568.
- [5] Lars D Hylander, Nofiharu Ae, Tamao Hatta et al. Exploitation of K near roots of cotton, maize, upland rice, and soybean grown in all ultisol [J]. Plant and Soil. 1999, 208:33-41.
- [6] 徐国华,鲍士旦,等.不同作物的吸钾能力及其与根系参数的关系[J].南京农业大学学报,1995,18(1):49-52.
- [7] 邹春琴,李振声,李继云.小麦对钾高效吸收的根系形态学和生理学特征[J].植物营养与肥料学报,2001,7(1):36-43.
- [8] 李廷轩,马国瑞,张锡洲.富钾基因型籽粒苋主要根系分泌物及其对土壤矿物态钾的活化作用[J].应用生态学报,2006,17(3):368-372.
- [9] Li T X, Ma G R. Nutrition of potassium in rhizosphere and characteristics of roots in different grain amaranth genotypes [J]. J Soil Water Conserv, 2004, 18(3):90-93.
- [10] 施卫明,严蔚东,黄骏麒,等.钾高效利用型转基因棉花的培育[J].江苏农业学报,2001,17(3):188-189.

施钾对莲藕产量形成和氮磷钾养分累积分配的影响

刘冬碧¹ 陈防² 熊桂云¹ 巴瑞先¹ 张富林¹ 张继铭¹ 余延丰¹

(1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 武汉 430064; 2. 中国科学院武汉植物园, 武汉 430074)

摘要: 为研究钾营养对莲藕产量形成和氮磷钾养分积累与分配的影响, 于2007年采用盆栽试验, 设置不施钾(-K)和施钾(+K)处理进行全生育期试验。莲藕移栽76天后, +K处理叶片和叶柄干物质累积量明显高于-K处理, 并均在97天膨大茎成型后逐渐降低; 膨大茎干物质累积速率和累积量在早期为+K处理低于-K处理, 97天后+K处理的干物质累积速率明显加快, 其累积量于139天明显高于-K处理, 160天不同处理膨大茎干物质累积量趋于稳定, +K处理为1204克/株⁻¹, 比-K处理高19.7%。在97天-160天产量形成关键期, 膨大茎中氮、磷和钾的累积量, +K处理比-K处理分别高32.8%、10.3%和74.2%, 其中来自其它器官转移的氮、磷和钾, +K处理比-K处理分别高1.20、0.12和1.26克/株⁻¹, 来自根系直接从土壤中吸收转运的氮、磷和钾, 前者比后者高2.16、0.04和5.70克/株⁻¹。莲藕氮、磷、钾累积总量比-K处理为1:0.14:0.90, +K处理为1:0.13:1.31。钾营养促进莲藕干物质生产和累积、促进根系对养分的吸收并提高莲藕各器官尤其是叶柄中钾的含量, 在生育后期促进干物质和养分从叶片等器官转移贮存到膨大茎中并最终增产。

关键词: 莲藕; 施钾; 产量形成; 营养; 干物质积累

以膨大的地下根状茎为食用的莲藕(*Nelumbo nucifera Gaertn*), 主要分布在长江流域湖北、江苏、安徽和浙江等省, 是中国种植面积最大的水生作物, 也是我国特色水生蔬菜, 具有较高的经济价值、丰富的营养和医疗保健价值^[1]。块根(茎)类作物对钾素比较敏感, 对钾的需求量常常超过氮, 而生产中钾肥投入又往往不足^[3], 因此研究莲藕钾营养对指导莲藕生产中合理施肥具有重要意义。国外相关方面的研究主要集中在莲藕生理、莲藕各器官的保健、药理、美容作用等方面; 我国过去有关莲藕方面的理论研究主要侧重于分类与生长发育、品种资源收集、遗传育种及生理生化特性等方面^[2], 生产方面的应用研究主要为综合栽培技术、栽培模式探讨等^[1], 有关莲藕营养特性方面的研究极少。笔者曾通过农户问卷调查、土样和植株样品分析、以及田间试验, 明确了影响莲藕产量的土壤养分限制因子主要为氮、钾、磷和锌, 通过盆栽试验明确了改善钾营养可促进莲藕健康生长^[17]。本研究将在此基础上进一步探讨钾营养对莲藕产量形成和养分累积分配的影响, 以明确莲藕生育期营养特性与需肥规律, 为莲藕生产中制定合理的施肥措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

盆栽试验的供试土壤采自武汉市东西湖区走马岭农

场, 为长江冲积物母质发育的潮土性水稻土, 其属性及速效养分状况为pH值7.92, 有机质11.6克/公斤, 铵态氮20.4毫克/升, 硝态氮20.5毫克/升, 速效磷(P)6.2毫克/升, 速效钾(K)76.2毫克/升, 有效锌1.6毫克/升, 有效硼0.4毫克/升。莲藕品种为早中熟鄂莲五号。

1.2 试验处理与施肥

试验设不施钾(-K)和施钾(+K)2个处理, 试验用盆为65cm(L)50cm(W)35cm(H)的硬质塑料大盆, 每盆装粉碎风干土100公斤, 重复25次, 2处理交错排列。N、P₂O₅和K₂O用量分别为0.45、0.15和0.45克/公斤土, 大粒锌肥(Zn 30%)和硼砂均为0.05克/公斤土。氮肥用尿素(N 46%), 60%基施, 余下40%在5月底和6月下旬分2次平均追施; 磷肥用普钙(P₂O₅ 12%), 钾肥用氯化钾(K₂O 60%), 70%基施, 余下30%于6月下旬和尿素同施; 磷肥和硼肥全部基施, 基肥与土拌匀施入, 锌肥在2叶期溶于水后一次性施入。

1.3 试验方法

试验于2007年4月9日开始在湖北省农业科学院盆栽场网室内进行。将试验盆置于网室内微池土壤中, 使微池土壤成为试验大盆的“支持介质”, 然后在盆中装入已按处理拌好基肥的100公斤风干土, 浇水浸泡, 保持水层高度约5厘米, 并使盆内外土体大致水平, 最后在微池中

灌水, 让支持试验大盆的土体呈淹水状态, 使试验土体内外环境的温度一致并接近于大田。2 天后 (4 月 11 日) 每盆移栽 0.5 公斤经消毒处理、长势基本一致且已萌发的健康子藕。在网室的试验区域顶部固定透明塑料膜以防雨水进入, 自来水浇灌, 及时防病、虫、草害。

分别于移栽后 56 天 (苗期)、76 天 (块茎膨大始期)、97 天 (膨大茎成型期)、118 天 (膨大茎充实前期)、139 天 (充实中期)、160 天 (充实后期) 采取整盆植株样, 第 1-3 次每次取 3 次重复, 第 4-6 次每次取 4 次重复, 最后 4 次重复在 190 天 (10 月 18 日) 立叶完全枯黄后收获, 按荷叶叶片、叶柄、根状茎、膨大茎 4 部分 (根系很难收集完全且干重占的比例低于 3%, 不统计) 分别记录鲜、干重量, 计算含水量和干物质累积总量, 各部分干物质粉碎测定氮磷钾养分含量, 计算养分积累量。

1.4 分析方法

基础土样的分析用土壤养分状况系统研究法^[18]。植株全氮、全磷和全钾的分析用常规方法^[19]: 全氮用硫酸-过氧化氢消煮, 消煮液碱化后蒸馏定氮法测定, 全磷用磷钼蓝比色法测定, 全钾用火焰光度法测定。试验数据用 Microsoft-Excel 作图表, 采用 DPS 数据处理系统软件的两样本比较、配对两处理 t 检验法进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 钾营养对莲藕产量形成的影响

从图 1 可见, 97 天之前莲藕以地上部分生长为主, 并随生育进程推进而增加, 其中干物质积累量为叶片 >

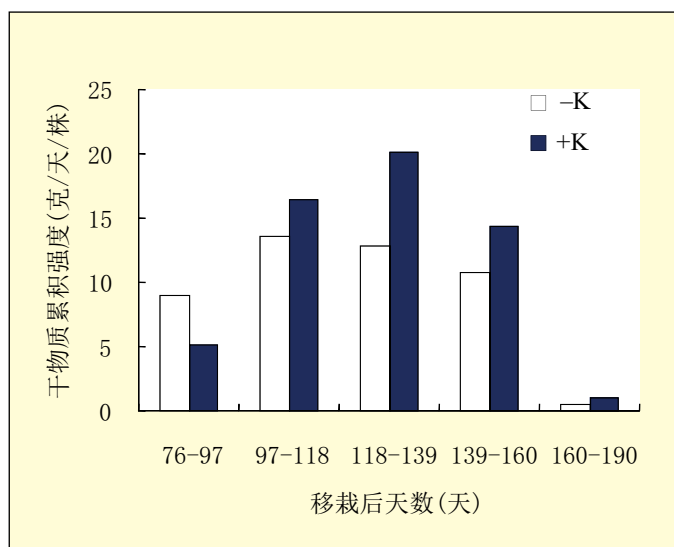


图 2 不同时期莲藕膨大茎日均干物质积累量

叶柄 > 根状茎; 膨大茎在 76 天前一周开始出现, 97 天基本成型后生长中心发生转移, 叶片、叶柄和根状茎干物质质量不断减少, 运输并贮存到膨大茎中促进产量形成, 直到 160 天膨大茎基本成熟, 干物质积累量不再明显增加^[17]。

图 1 结果还表明, 76 天以前不同处理干物质积累量的差异不明显, 以后叶片和叶柄的干物质积累量差异逐渐加大, 且不同时期 +K 处理明显高于 -K 处理; 97 天 +K 处理的膨大茎干物质积累量明显低于 -K 处理, 118 天略低于 -K 处理, 到 139 天之后膨大茎干物质积累量和整株干物质积累总量均超过并明显高于 -K 处理。从 76、97、118、139 到 160 天, 膨大茎干物质积累量占整株干物质积累量的比例, -K 处理分别为 13.4%、40.9%、59.6%、73.8% 和 80.9%, +K 处理分别为 10.3%、25.3%、55.1%、72.2% 和 81.4%, 说明膨大茎的形成以及干物质

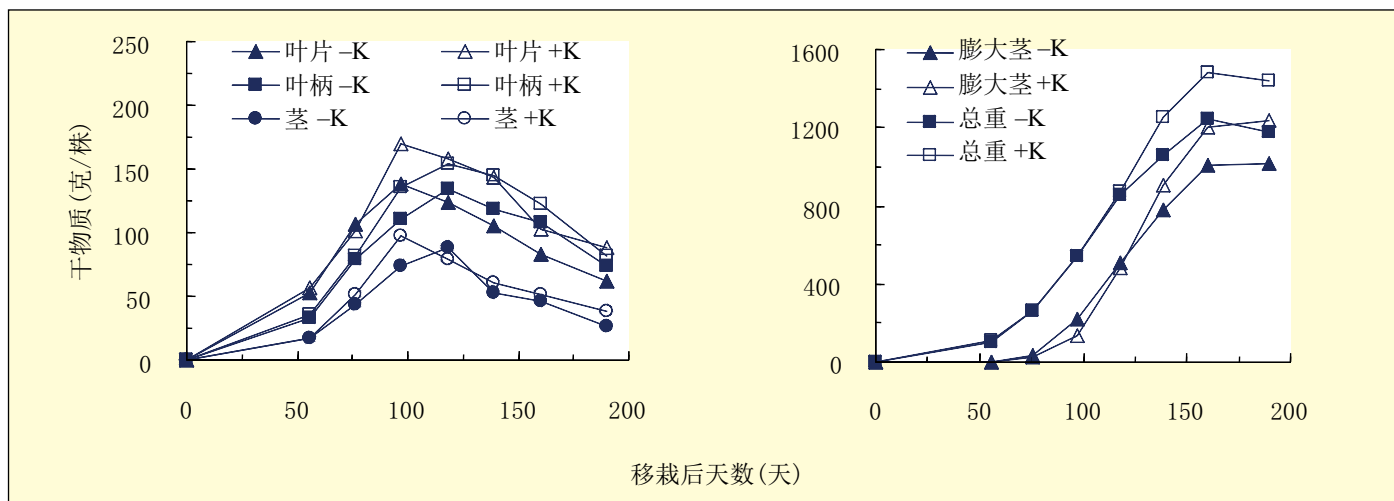


图 1 莲藕各器官及整株干物质累积动态

从叶片等器官向膨大茎中转移的进程，+K 处理稍长于 -K 处理。从图 2 膨大茎开始生长后不同时期日均干物质累积量可见，+K 处理日均干物质累积量尽管在 97-118 天（充实前期）已高于 -K 处理的最高值，其日均累积量最高值却比 -K 处理推迟 21 天，显示出 +K 处理较强的干物质生产和转化能力。160 天时 +K 处理膨大茎干物质累积量（干产量）为 1204 克/株，比后者高出 19.7%（图 1）。

综上所述，改善钾营养促进了莲藕生育前期干物质的生产和累积，并适当延长了成熟期，促进了后期干物质从叶片等器官向膨大茎的转移，最终实现增产。

2.2 钾营养对莲藕不同器官氮磷钾含量变化的影响

表 1 中结果表明，莲藕各器官氮磷钾含量均随生育期呈下降趋势。同一时期不同器官氮含量为叶片 > 膨大茎 > 根状茎 > 叶柄，磷含量在生育前期为叶片 > 膨大茎 > 根状茎 > 叶柄，在生育后期膨大茎磷含量反而高于叶片。不同处理叶片、叶柄、膨大茎氮和磷的含量在全生育期差异不明显，但 +K 处理根状茎氮和磷含量在全生育期均低于 -K 处理，并以后期为甚。钾含量的变化比较复杂，总体上看，+K 处理各器官钾含量均明显高于 -K 处理；

不同器官钾含量 -K 处理为叶片和膨大茎 > 叶柄 > 根状茎，其中生育前期叶片 > 膨大茎，生育后期则相反；+K 处理为叶柄 > 叶片和膨大茎 > 根状茎，其中生育前期膨大茎 > 叶片，后期相反。可见钾对莲藕不同器官氮和磷含量的影响较小，但明显增加各器官钾含量。叶柄在整个生育期对荷叶叶片起支撑作用，充足的钾营养对于促进莲藕健康生长，提高其抗病虫害、风害和机械损伤等抗逆能力都具有重要意义^[17]。

2.3 钾营养对莲藕氮磷钾累积与分配的影响

2.3.1 钾营养对氮磷钾累积动态的影响

比较图 3 和图 1 可见，莲藕氮磷钾累积动态与干物质总量均呈“S”型变化趋势。不同处理莲藕对氮和磷累积量的差异主要受干物质质量差异的支配，对钾累积量的差异则受干物质累积量和钾含量的双重影响，因此不同处理钾素累积量的差异更大，在生育早期 +K 处理钾素累积量就明显高于 -K 处理。相关分析表明，莲藕氮、磷和钾累积量均与干物质累积量呈极显著正相关（ r 分别为 0.989**、0.991** 和 0.895**， $n=14$ ）。莲藕氮、磷、钾累积量之比，97 天时 -K 和 +K 处理分别为 1:0.11:0.87

表 1 不同时期莲藕各器官氮磷钾养分含量

养分	移栽后天数 (天)	克/公斤							
		叶片		叶柄		根状茎		膨大茎	
		-K	+K	-K	+K	-K	+K	-K	+K
N	56	35.5a	37.0a	12.9a	12.9a	16.8a	16.5a	--	--
	76	36.1a	37.0a	11.4a	11.4a	13.5a	12.4a	17.7a	17.1a
	97	31.6a	32.8a	10.6a	10.4a	11.3a	10.3a	16.8a	16.3a
	118	27.2a	27.3a	6.88a	5.83b	8.91a	8.34a	15.5a	15.0a
	139	20.0a	20.4a	6.65a	4.72b	9.50a	5.91b	15.4a	14.2a
	160	14.4b	16.5a	5.60a	5.36a	9.79a	6.63b	13.9a	13.1a
	190	13.2b	15.0a	5.36a	5.04a	8.77a	6.69b	14.3a	13.7a
P	56	3.70a	3.52a	2.38a	2.27a	3.29a	3.13a	--	--
	76	3.02a	3.23a	1.12a	1.24a	1.54a	1.57a	2.53b	3.18a
	97	2.55a	2.73a	0.98a	1.02a	1.47a	1.34a	2.40a	2.60a
	118	1.97a	1.92a	0.63a	0.61a	1.04a	0.92a	2.18a	2.14a
	139	1.41a	1.31a	0.56a	0.52a	1.06a	0.71b	2.05a	1.78b
	160	1.06a	1.20a	0.64a	0.71a	1.23a	0.95b	2.08a	1.72b
	190	1.18a	0.98b	0.62a	0.39b	1.33a	0.90b	1.98a	1.84a
K	56	22.0b	25.1a	26.1b	36.2a	21.9b	33.4a	--	--
	76	20.4b	23.7a	17.8b	30.8a	11.6b	23.6a	19.1b	25.4a
	97	18.3b	21.8a	16.4b	28.3a	10.6b	22.5a	16.3b	25.9a
	118	18.1b	20.8a	11.0b	28.2a	5.67b	20.5a	14.1b	25.4a
	139	14.3b	20.3a	6.94b	27.9a	5.32b	20.0a	13.7b	18.5a
	160	10.2b	19.6a	4.41b	25.2a	5.59b	10.1a	12.9b	16.5a
	190	8.76b	21.0a	4.37b	23.1a	6.29b	14.3a	12.6b	15.8a

注：表中小写字母 a, b 表示不同处理之间差异达 0.05 显著水平，下同。

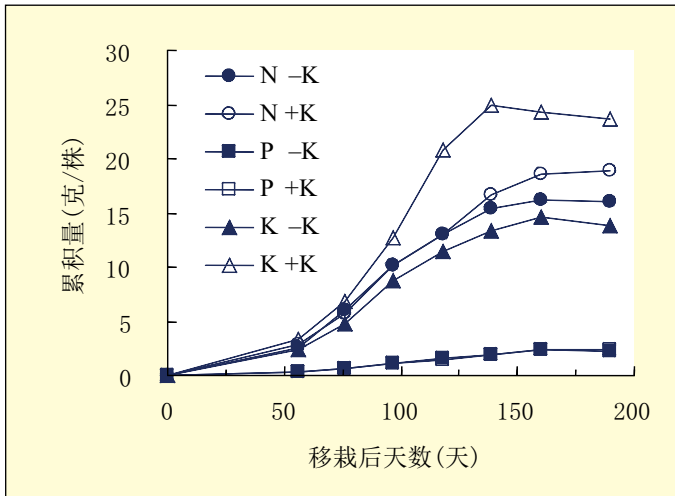


图3 莲藕全生育期氮磷钾养分累积动态

和1:0.11:1.25, 160天时分别为1:0.14:0.90和1:0.13:1.31, 说明充足的钾营养明显促进莲藕对钾素的累积, 并在总量上超过氮累积量。

2.3.2 钾营养对氮磷钾在莲藕不同器官分配的影响

莲藕氮磷钾养分前期主要积累在叶片等生长中心, 97天膨大茎形成之后, 生长中心下移, 其它各器官养分

累积量及分配比例不断减少, 随同干物质运输并贮存到膨大茎中, 促进膨大茎养分快速积累和产量形成(表2)。从养分累积量看, 在97-160天产量形成关键期, 膨大茎中氮、磷和钾的累积量, -K处理分别增加了10.3、1.56和9.39克/株, +K处理分别增加了13.6、1.72和16.4克/株, 后者比前者分别高出32.8%、10.3%和74.2%。莲藕其它器官转移(即同期叶片、叶柄和根状茎累积量的减少值)的氮、磷和钾, +K处理分别比-K处理高1.20、0.12和1.26克/株; 莲藕根系从土壤中吸收的氮、磷和钾, +K处理分别比-K处理高2.16、0.04和5.70克/株, 说明充足的钾营养不仅促进养分向生长中心的转运和贮存, 还促进根系从土壤中吸收更多的养分, 直接运输到膨大茎中参与各种物质合成和产量形成。

从养分分配比例看, 在97天及以后各时期, 叶片中氮和磷的累积比例均为+K处理高于-K处理, 膨大茎中氮和磷的累积比例与干物质变化规律一致, 为+K处理低于-K处理, 不同处理叶片和膨大茎氮、磷累积比例之差均随生育进程而降低, 这主要与+K处理生育进程较长有关; 膨大茎钾累积比例也为+K处理低于-K处理, 但变化较复杂。160天不同器官氮和磷的累积比例不同处

表2 不同时期莲藕各器官氮磷钾累积量

养分	移栽后天数 (天)	累积量(克/株)							
		叶片		叶柄		根状茎		膨大茎	
		-K	+K	-K	+K	-K	+K	-K	+K
N	56	1.87a	2.08a	0.43a	0.46a	0.30a	0.29a	0	0
	76	3.84a	3.76a	0.89a	0.92a	0.59a	0.63a	0.63a	0.46b
	97	4.35b	5.56a	1.18b	1.41a	0.83b	1.00a	3.74a	2.21b
	118	3.36b	4.30a	0.92a	0.90a	0.78a	0.66b	7.90a	7.18a
	139	2.10b	2.92a	0.79a	0.68b	0.50a	0.36b	12.0a	12.8a
	160	1.19b	1.69a	0.61a	0.65a	0.45a	0.34b	14.0b	15.8a
	190	0.82b	1.31a	0.39a	0.41a	0.23a	0.25a	14.5b	17.0a
P	56	0.19a	0.20a	0.08a	0.08a	0.06a	0.05a	0	0
	76	0.32a	0.33a	0.09a	0.10a	0.07a	0.08a	0.09a	0.09a
	97	0.35b	0.46a	0.11b	0.14a	0.11b	0.13a	0.54a	0.35b
	118	0.24b	0.30a	0.08a	0.09a	0.09a	0.07b	1.11a	1.03a
	139	0.15b	0.19a	0.07a	0.08a	0.06a	0.04b	1.60a	1.61a
	160	0.09b	0.12a	0.07b	0.09a	0.06a	0.05a	2.09a	2.07a
	190	0.07a	0.09a	0.05a	0.03b	0.03a	0.03a	2.02b	2.27a
K	56	1.16ab	1.41a	0.87b	1.30a	0.39b	0.58a	0	0
	76	2.17a	2.41a	1.40b	2.49a	0.51b	1.20a	0.68a	0.68a
	97	2.52b	3.69a	1.83b	3.29a	0.78b	2.18a	3.63a	3.53a
	118	2.23b	3.27a	1.47b	3.74a	0.50b	1.62a	7.19b	12.2a
	139	1.50b	2.90a	0.83b	3.04a	0.28b	1.21a	10.7b	16.7a
	160	0.85b	2.01a	0.48b	1.86a	0.26b	0.51a	13.0b	19.9a
	190	0.54b	1.84a	0.32b	1.87a	0.16b	0.54a	12.8b	19.4a

表3 不同时期莲藕各器官氮磷钾累积比例

养分	移栽后天数 (天)	比例 (%)							
		叶片		叶柄		根状茎		膨大茎	
		-K	+K	-K	+K	-K	+K	-K	+K
N	56	71.9	73.5	16.7	16.3	11.4	10.2	0	0
	76	64.5	65.2	15.0	16.0	9.92	10.9	10.6	7.98
	97	43.1	54.6	11.6	13.9	8.22	9.84	37.0	21.7
	118	25.9	33.0	7.10	6.90	6.03	5.05	61.0	55.1
	139	13.6	17.4	5.14	4.08	3.24	2.14	78.0	76.3
	160	7.35	9.12	3.74	3.54	2.78	1.82	86.1	85.5
	190	5.10	6.94	2.46	2.16	1.43	1.33	91.0	89.6
P	56	58.6	59.2	23.9	24.4	17.5	16.4	0	0
	76	56.8	55.2	15.5	16.9	11.9	13.4	15.8	14.4
	97	31.8	42.7	9.87	12.8	9.75	12.0	48.6	32.6
	118	15.9	20.2	5.51	6.29	5.96	4.86	72.7	68.6
	139	7.89	9.77	3.55	3.93	2.99	2.24	85.6	84.1
	160	3.82	5.30	2.99	3.72	2.45	2.07	90.7	88.9
	190	3.36	3.54	2.11	1.31	1.59	1.40	92.9	93.7
K	56	47.9	42.8	36.1	39.5	16.0	17.8	0	0
	76	45.7	35.5	29.4	36.7	10.6	17.7	14.2	10.1
	97	28.8	29.1	20.9	25.9	8.86	17.2	41.5	27.8
	118	19.6	15.7	12.9	17.9	4.36	7.78	63.1	58.6
	139	11.3	11.7	6.22	16.3	2.10	4.89	80.4	67.2
	160	5.82	8.27	3.27	7.66	1.76	2.11	89.1	82.0
	190	3.90	7.77	2.31	7.90	1.18	2.27	92.6	82.1

理相差不大,钾的累积比例为叶片和叶柄中 +K 处理均较高,因此膨大茎氮、磷和钾的累积比例, +K 处理比 -K 处理分别低 0.6、1.8 和 7.1 个百分点。

3 讨论

钾在作物生理生化过程中有着特殊功能,不仅一直被誉“品质元素”和对作物健康影响最大的元素,还是作物“肥料三要素”之一。中国钾肥资源不足,主要依靠进口,因此有关作物钾营养与合理施钾的研究一直是植物营养与施肥研究的热点之一。

钾是植物体内 60 多种重要酶的活化剂,对于促进光合作用和可食部分形成,促进块茎、块根类作物碳水化合物合成、转化、运输和贮存具有重要作用。刘芸等^[23]采用 4 种钾浓度营养液培养番红花的结果表明,随着施钾水平提高,叶片中钾含量、叶绿素含量、ATP 相对含量及叶片净光合速率也相应提高,使叶片作为“代谢源”的能力加强;同时新球茎富集钾的能力、可溶性糖含量也随施钾水平而增加,使新球茎作为“代谢库”的功能也增强。

史春余等^[3, 24]对甘薯的研究表明,适量供钾促进光合产物由叶片向块根的运输,提高块根干重与单株干重的比例,促进块根迅速膨大、提高产量。Chapman 等^[25]研究 2 种不同马铃薯品种的钾营养效应发现,马铃薯叶柄钾浓度可作为反映其钾营养状况的很好指标,并得到 Kennebec 和 Russet Burbank 这 2 个不同马铃薯品种最高产量的叶柄钾浓度分别为 12-14% 和 11-13%。姜存仓等^[26]对 2 个不同钾效率棉花基因型生长和营养特性的研究表明,无论是高效基因型还是低效基因型,收获时施钾处理不同基因型各器官钾含量均表现为叶柄 > 棉桃 > 叶片 > 主茎,不施钾处理高效基因型表现为棉桃 > 叶柄 > 叶片 > 主茎,低效基因型为棉桃 > 叶片 > 主茎 > 叶柄。

笔者近期研究^[17]和本研究结果表明,改善钾营养不仅可以增加莲藕光合作用面积、提高荷叶叶绿素值、延缓叶片衰老,进而提高干物质生产能力,同时还促进了根系对养分的吸收、促进其它各器官干物质和养分转运到膨大茎中,促进膨大茎干物质和养分快速积累并最终实现增产。这一结果与其他学者对块根、块茎类作物的研究结果是一致的^[3, 23-24]。此外,本研究与姜存仓等^[26]关于钾营养对

不同器官钾含量影响的结果也是基本吻合的,即收获期钾含量在施钾条件下为叶柄较高、叶片和收获物次之、主茎最低;不施钾条件下为收获物较高、叶柄较低。叶柄可能是植株钾素的重要贮存库,亦可作为诊断植株钾素丰缺状况的敏感器官。当钾供应不足时,作为植物体内容易移动的钾将优先运向生长旺盛的部位,满足植株生长发育需要;当钾素供应充足时,叶柄能保持较高的钾素浓度,有时甚至可以指示植株对钾产生的奢侈吸收,叶柄钾浓度能较好地体现作物钾营养状况^[25]。

参考文献

- [1] 沈康荣. 水稻与莲藕覆膜节水高效技术 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007, 162-172.
- [2] 中国科学院武汉植物研究所. 中国莲 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [3] Duan Y, Tuo D B, Zhao P Y, et al. Study on accumulation and distribution of dry matter and uptake of N, P and K in potato. Li H D ed. Plant Nutrition management in Sustainable Agriculture [M]. Jiangxi Publishing Group. Jiangxi Peoples' Publishing House, 2008, 52-58.
- [4] 刘冬碧, 熊桂云, 陈防, 等. 钾营养对莲藕生长和干物质累积的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2009.
- [5] 加拿大钾磷肥研究所北京办事处主编. 土壤养分状况系统研究法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992.
- [6] 鲍士旦主编. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000, 263-270.

4 结论

莲藕全生育期钾营养特性研究结果表明,改善钾营养在莲藕生育前期可促进干物质的生产和累积,促进根系对养分的吸收从而提高莲藕各器官尤其是叶柄中钾的含量,并适当延长膨大茎成熟时期;在生育后期可促进干物质和养分从叶片等器官转移并贮存到膨大茎中并最终增产。

- [7] 刘芸, 朱利泉, 龙云, 等. 钾对番红花球茎膨大的促进效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1):96-100.
- [8] 史春余, 王振林, 赵秉强, 等. 钾营养对甘薯某些生理特性和产量形成的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(1):81-85.
- [9] Chapman K S R, Sparrow L A, Hardman P R, et al. Potassium nutrition of Kennebec and Russet Burbank potatoes in Tasmania: effect of soil and fertiliser potassium on yield, petiole and tuber potassium concentrations, and tuber quality [J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1992, 32, 521-527.
- [10] 姜存仓, 陈防, 高祥照, 等. 低钾胁迫下两个不同钾效率棉花基因型的生长及营养特性研究 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(2):488-493.

适宜的钾、氮营养改善莲藕品质

刘冬碧¹ 张过师² 熊桂云¹ 范先鹏¹ 杨利¹ 张富林¹ 陈防²

(1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 武汉 430064; 2. 中国科学院武汉植物园, 武汉 430074)

摘要: 采用大盆试验研究了钾、氮营养对莲藕还原糖、可溶性总糖、淀粉和粗蛋白含量的影响。结果表明: 在莲藕膨大过程中, 还原糖和可溶性总糖的含量适量钾处理比不施钾处理平均分别高出 1.2 和 1.7 个百分点; 成熟后莲藕淀粉的含量, 适量钾处理比不施钾处理高出 3.2 个百分点, 适量氮处理分别比不施氮和 2 倍适量氮处理高出 5.6 和 7.8 个百分点。适宜的钾、氮营养能明显改善莲藕品质。

关键词: 钾、氮营养; 还原糖; 可溶性总糖; 淀粉; 莲藕

前言

莲藕为睡莲科莲属多年生宿根性水生草本植物, 是我国种植面积最大的水生蔬菜, 多种植于长江流域生态条件较好的水网地区, 具有较高的经济价值、丰富的营养价值和医疗保健价值^[1-2]。莲藕较易达到无公害要求, 莲藕及其加工产品不仅具有广阔的国内市场, 而且还大量出口到日本、东南亚等地^[3]。莲藕还是一种没有明显收获季节的蔬菜, 每年 6 月中下旬即可收获青荷藕, 莲藕成熟后常根据市场需求分期分批采收至次年萌芽前, 采收期长达 9-10 个月。干物质、可溶性糖、淀粉、蛋白质和维生素 C 是莲藕的主要营养品质指标^[4], 不同加工产品对莲藕品质的要求不尽一致, 以淀粉为主的碳水化合物的含量是影响莲藕加工品质的主要因素^[5]。钾、氮是影响莲藕产量的主要养分限制因子^[6], 但关于莲藕钾、氮营养条件对莲藕膨大过程中碳水化合物变化动态的研究, 国内外尚未见报道。本研究以鄂莲 5 号为材料, 探讨钾、氮营养对其根状茎膨大过程中还原糖、可溶性总糖、淀粉、粗蛋白变化动态的影响, 为制定合理的施肥措施进行营养调控, 从而提高莲藕产量和改善品质提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

莲藕钾和氮营养试验分别在 2007 和 2008 年度同一时间段进行。供试土壤采自武汉市东西湖区走马岭农场的不同地块, 均为长江冲积物母质发育而成的潮土, 采用土壤养分状况系统研究法^[7]分析其属性及有效养分含量(表 1)。供试莲藕品种均为鄂莲 5 号, 由武汉市东西湖区柏泉农场提供。

1.2 试验处理与施肥方法

2007 年度莲藕钾营养试验设不施钾(-K)和适量钾(K)2 个处理, 2008 年度莲藕氮营养试验设不施氮(-N)、适量氮(N)和 2 倍适量氮(2N)3 个处理。试验用盆钵均为硬质塑料大盆, 每盆装粉碎风干土 100 公斤, 重复 18 次, 重复间顺序排列, 处理间交错排列。适量钾和适量氮处理的养分用量相同, 每公斤土分别施 0.45 克氮、0.15 克五氧化二磷、0.45 克氧化钾、0.05 克大粒锌(锌含量为 30%)和 0.05 克硼砂; 不施钾处理除钾肥外, 不施氮和 2 倍适量氮处理除氮肥外, 其它养分用量与适量钾

表 1 供试两种土壤的基本属性和有效养分含量

年份	土壤质地	pH 值 (H ₂ O)	有机质 (%)	有效养分含量(毫克/升)								
				NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	P	K	S	Fe	Cu	Mn	Zn
2007	重壤	7.92	1.19	11.4	17.9	7.2	84.6	26.6	9.6	5.5	31.4	1.3
2008	中壤	7.92	1.28	15.9	32.5	19.1	100.8	82.4	29.4	7.4	24.1	2.5

基金项目: 国际植物营养研究所(IPNI-HB-24)项目和湖北省农业科技创新项目(2011-620-003-03-05)。

作者简介: 刘冬碧(1971-), 女, 湖北恩施人, 副研究员, 主要从事作物营养与优化施肥技术研究。Email: dblu@ipni.ac.cn。

(氮)处理相同。氮肥用尿素(含氮量46%),60%基施,余下40%在6月17日和7月10日分2次平均追施;磷肥用普钙(五氧化二磷含量12%);钾肥用氯化钾(氧化钾含量60%),70%基施,余下30%于7月10日和尿素同施;磷肥和硼肥全部基施,基肥与土拌匀,锌肥在2叶期溶于水后一次性施入。

1.3 试验方法

试验在湖北省农科院盆栽场网室内进行。将网室内微池(1.3米×1米×0.7米)中的土壤由中心向四周分开,形成与试验大盆尺寸相当(0.65米×0.5米×0.35米)的方形凹槽,把洗净的试验大盆置于凹槽中,使微池土壤成为试验大盆的“支持介质”。装入已按处理拌好基肥的100公斤风干土,浇水浸泡,使水层高度约为5厘米,并使盆内外土体大致水平。在微池中灌水,让支持试验大盆的土体呈淹水状态,使试验土体的环境温度一致并接近于大田。2天后(4月11日)每盆移栽0.5公斤经消毒处理、长势基本一致且已萌发的健康子藕。在网室的试验区域顶部固定透明塑料膜以防雨水进入,自来水浇灌,及时防病、虫、草害。

分别于移栽后76天(块茎膨大始期)、97天(膨大茎成型期)、118天(膨大茎充实前期)、139天(充实中期)、160天(充实后期)、190天(成熟后)立叶完全枯黄后收

获膨大茎,每次取3次重复,立即洗净沥干明水后记录鲜产量,然后采集代表性样品称重,105℃杀青、65℃恒温烘干,折算干产量,最后将样品粉碎过筛分析备用。2007年莲藕钾营养试验中,190天收获记录鲜产量后在完整主藕的第三节切取代表性样品,福尔马林-醋酸-酒精固定并做淀粉粒形态显微观察。

莲藕还原糖、可溶性总糖和淀粉含量的测定均采用国标GB 5009.7-85方法,结果以干基计算。全氮含量用硫酸-过氧化氢消煮,碱化后蒸馏定氮法测定^[8],粗蛋白含量=全氮含量×6.25。试验数据用Microsoft 2003-Excel作图,采用DPS软件单因子因素法进行统计分析。

2 结果分析

2.1 适宜钾营养改善莲藕品质

由图1可见,莲藕膨大成型期(97天)还原糖含量较高,然后迅速降低,此后又逐渐回升,139天以后稳定在一个较低的水平;可溶性总糖含量变化趋势与还原糖类似,但其数值较高,成熟期可溶性总糖含量约为还原糖含量的2.7倍;在莲藕整个膨大过程中,淀粉含量呈缓慢上升的趋势,190天含量略有下降,粗蛋白含量则相反,从一开始就呈缓慢下降的趋势,139天以后趋于稳定。

从图1结果还可看出,在莲藕膨大过程中(97-160

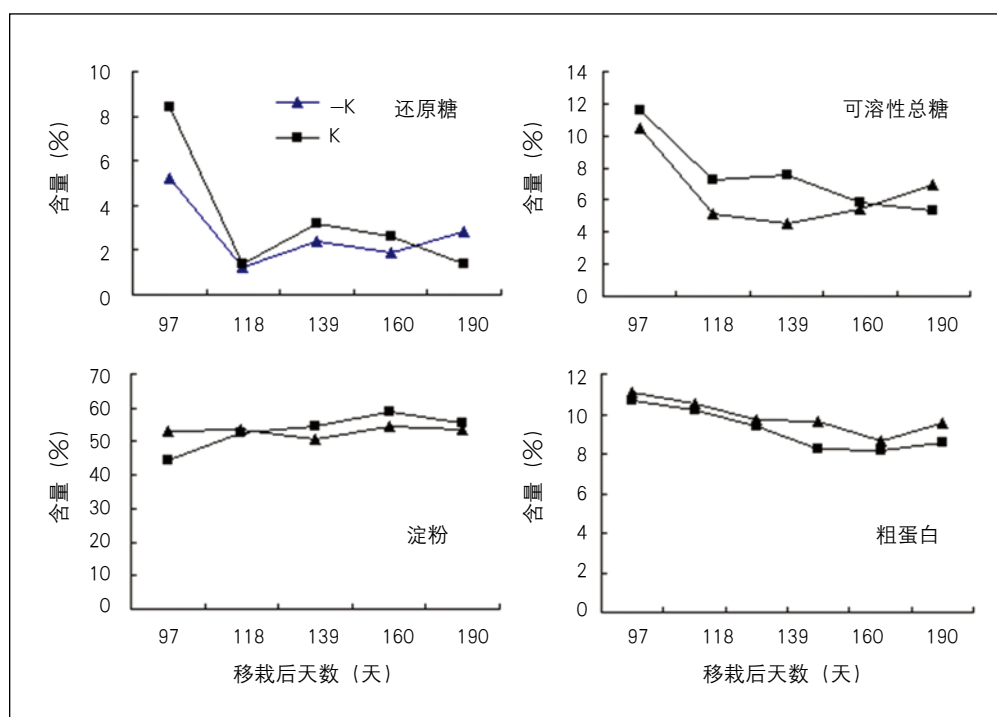


图1 钾营养对莲藕碳水化合物和粗蛋白含量动态的影响

天, 76 天因样品量不够未测) 适量钾处理的还原糖和可溶性总糖含量均高于不施钾处理, 还原糖和可溶性总糖含量分别比不施钾处理高出 0.2–3.2 个百分点和 1.1–5.1 个百分点, 平均高出 1.2 和 1.7 个百分点; 适量钾处理的淀粉含量在 97–118 天低于不施钾处理, 以后高于不施钾处理, 成熟后适量钾和不施钾处理的淀粉含量分别为 57.2% 和 54.0%, 前者比后者高出 3.2 个百分点; 适量钾处理的粗蛋白含量在莲藕整个膨大过程中一直低于不施钾处理, 在中后期表现更为明显。从最终产量来看, 适量钾处理的还原糖、可溶性总糖、淀粉和粗蛋白分别为 24.3 克/盆、67.6 克/盆、697.3 克/盆和 102.2 克/盆, 分别比不施钾处理高出 1.97%、8.51%、27.5% 和 10.5%。还原糖和可溶性总糖的含量是影响以炒食和生食为主的青荷藕品质的重要因素, 淀粉等碳水化合物的含量是影响莲藕等块根、块茎类作物加工品质的主要因素^[5]。由此可见, 适宜钾营养能提高莲藕膨大过程中还原糖和可溶性总糖含量, 以及成熟后淀粉的含量, 因而明显改善莲藕品质。

莲藕成熟期根状茎中淀粉粒主要有两种形态, 一种体积较大, 呈长椭球形或马铃薯状; 另一种体积较小, 呈圆球形, 它们或单独游离在细胞中, 或通过网状膜系统连接在一起, 形成半复粒淀粉^[9]。从图 2 发现, 不施钾处理的马铃薯状淀粉粒数量较少、体积较大、排列疏散、间隙较大, 而适量钾处理的马铃薯状淀粉粒数量较多、体积稍小、常多个成簇排列在一起, 细胞充实度较高, 这与成熟期淀粉含量测定结果也是一致的。史春余等^[10]对甘薯的研究结果也表明, 适量供钾增加单位体积块根内的淀粉粒数, 提高块根淀粉含量。据报道, 淀粉粒的形态特征可能

会直接影响不同莲藕品种间淀粉的糊化特性如崩解值、消减值和回复值等^[9], 但通过营养的调控能在多大程度上影响同一品种莲藕的品质特性, 值得深入研究。

2.2 适宜氮营养改善莲藕品质

比较图 3 和图 1 可见, 不同年度莲藕膨大过程中还原糖、可溶性总糖、淀粉和粗蛋白含量的变化动态是基本一致的(118 天还原糖含量除外), 可能由于小气候和供试土壤的不同, 不同年度间同一施肥处理(适量氮处理和适量钾处理)同一取样日期还原糖、可溶性总糖、淀粉和粗蛋白的含量有一定差异。

图 3 结果表明, 不同氮处理莲藕的还原糖含量为 139 天以前不施氮 > 适量氮 > 2 倍适量氮, 139 天以后三个处理相差不明显; 可溶性总糖含量在整个莲藕膨大过程中均为不施氮 > 适量氮 > 2 倍适量氮; 不同氮处理对淀粉含量的影响比较复杂, 97 天为 2 倍适量氮 > 适量氮 > 不施氮, 118 天三个处理的淀粉含量大致相当, 139 天及以后为适量氮 > 不施氮 > 2 倍适量氮, 成熟后不施氮、适量氮和 2 倍适量氮处理的淀粉含量分别为 56.1%、61.7% 和 53.9%, 适量氮处理分别比不施氮和 2 倍适量氮处理高出 5.6 和 7.8 个百分点; 莲藕粗蛋白的含量除在 76–97 天适量氮处理和 2 倍适量氮处理大致相等之外, 在莲藕整个膨大过程中均为 2 倍适量氮 > 适量氮 > 不施氮处理。从最终产量看, 适量氮处理的还原糖、可溶性总糖、淀粉和粗蛋白分别为 16.4 克/盆、60.4 克/盆、591.3 克/盆和 86.9 克/盆, 分别是不施氮处理的 3.0 倍、2.7 倍、3.6 倍和 8.0 倍, 分别是 2 倍适量氮处理的 2.3 倍、2.8 倍、2.6

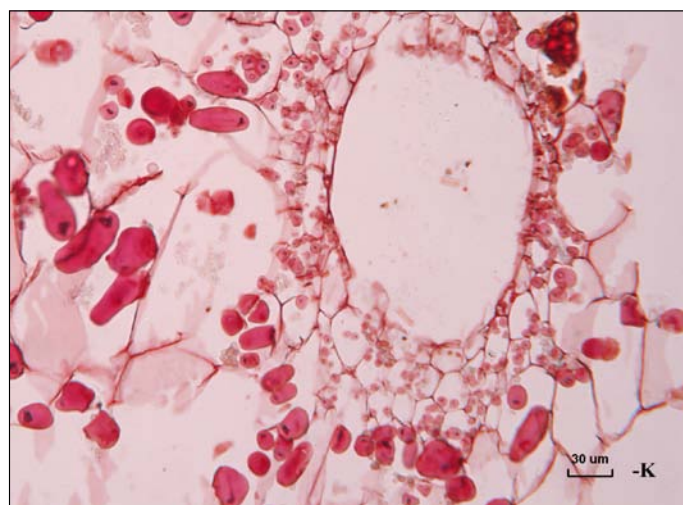
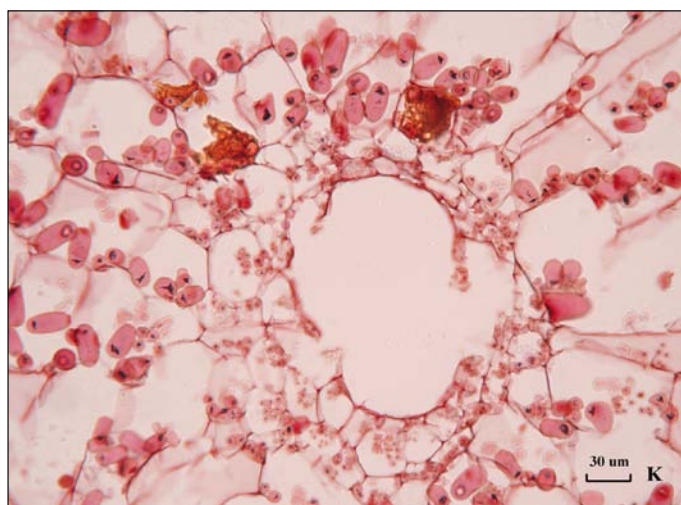


图 2 钾营养对成熟期莲藕淀粉粒形态的影响

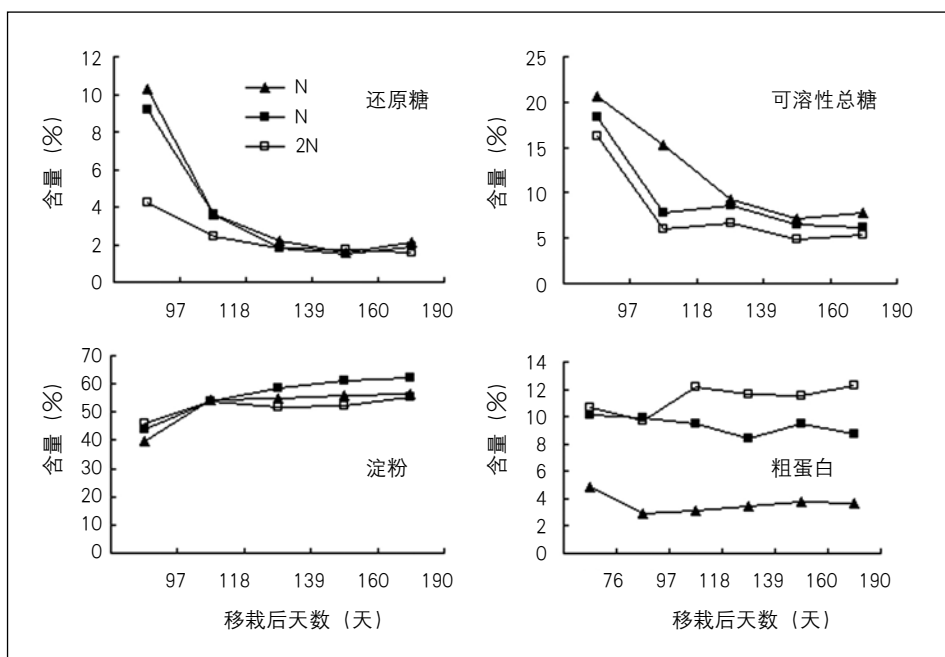


图3 氮营养对莲藕碳水化合物和粗蛋白含量动态的影响

倍和 1.7 倍。上述结果表明，不施氮处理在一定程度上提高了膨大茎中可溶性总糖的含量，但这是以大大降低产量为代价的“浓缩效应”产生的，而作物产品品质的改善首先必须建立在高产或至少是适产的基础上才能被接受；过量施氮促进了莲藕膨大茎对氮素的吸收，明显提高了粗蛋白的含量，却不利于膨大茎中碳水化合物的累积、尤其是后期淀粉的累积，从而不利于改善莲藕的品质，因此，氮素缺乏或施氮过量均对莲藕品质有不利影响。

2.3 钾、氮营养对块茎（根）类作物品质的影响

还原糖主要包括葡萄糖和果糖，是合成蔗糖和淀粉的原料，可溶性总糖包括还原糖和蔗糖，但以蔗糖为主，淀粉是莲藕膨大茎成熟后的主要储藏物质。钾是植物体内 60 多种重要酶的活化剂，对于促进光合作用和可食部分形成，促进块茎、块根类作物碳水化合物的合成、转化、运输和贮存具有重要作用，且已被大量试验研究结果所证实^[10,11]。宋春风等^[11]研究结果表明，单施氮肥或者钾肥，芋头产量、可溶性糖、淀粉和纤维素含量增加，粗蛋白含量降低，且钾肥的影响大于氮肥，粗脂肪含量施氮后降低、

施钾后增加，氮钾肥适量配施芋头产量和以上各品质指标均显著增加，氮、钾肥之间存在显著的正交互效应，当氮、钾肥超过一定用量，产量和以上各品质指标均降低，并以可溶性糖、淀粉和纤维素含量下降最明显。块茎、块根类作物氮、钾比列过高，无论是对其生长发育、产量、还是品质均有不利影响^[12-14]，这类作物对钾素比较敏感，对钾的需求量常常超过氮，而实际生产中又往往存在着钾肥投入不足、氮肥施用过量的情况，因此莲藕等块茎、块根类作物钾肥、氮肥的合理施用应引起重视。

3 结论

在莲藕膨大过程中还原糖和可溶性总糖的含量，适量钾处理比不施钾处理平均分别高出 1.2 和 1.7 个百分点；成熟后莲藕淀粉的含量，适量钾处理比不施钾处理高出 3.2 个百分点，适量氮处理分别比不施氮和 2 倍适量氮处理高出 5.6 和 7.8 个百分点。适宜的钾、氮营养能明显改善莲藕品质。

参考文献

- [1] 沈康荣. 水稻与莲藕覆膜节水高效技术 [M]. 中国农业科学技术出版社. 2007, 162-172.
- [2] 中国科学院武汉植物研究所. 中国莲 [M]. 科学出版社, 1987.
- [3] 赵有为. 中国水生蔬菜 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1999, 18-39.
- [4] 柯卫东, 黄新芳, 傅新发, 等. 莲藕主要营养品质和农艺性状的遗传分析 [J]. 武汉植物学研究, 2000, 18(6):519-522.
- [5] 李良俊, 张晓冬, 谢科, 等. 莲藕田间越冬过程中碳水化合物代谢的研究 [J]. 中国蔬菜, 2006, (4):11-13.
- [6] 熊桂云, 刘冬碧, 陈防, 等. 莲藕土壤养分限制因子的田间试验研究 [A]. 见: 李华栋主编, 农业持续发展中的植物养分管理 [C]. 南昌: 江西出版集团. 江西人民出版社, 2008, 555-560.
- [7] 加拿大钾磷肥研究所北京办事处主编. 土壤养分状况系统研究法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992.
- [8] 鲍士旦主编. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000, 263-270.
- [9] 李良俊, 张晓冬, 沈新平, 等. 莲藕淀粉 RVA 谱特征和淀粉粒形态的研究 [J]. 园艺学报, 2006, 33(3):534-538.
- [10] 史春余, 王振林, 赵秉强, 等. 钾营养对甘薯块根薄壁细胞微结构、 ^{14}C 同化物分配和产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3):335-339.
- [11] 宋春风, 徐坤. 氮钾配施对芋头产量和品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2):167-170.
- [12] 杨暹, 关佩聪, 李宝庆. 氮钾互作对马铃薯产量、品质与氮磷钾吸收的影响 [J]. 华南农业大学学报, 1993, 14(1):28-32.
- [13] 宋志荣. 不同氮钾比例对马铃薯产量和品质的影响 [J]. 中国马铃薯, 2009, 23(3):55-157.
- [14] 林琪, 石岩, 位东斌, 等. 不同氮、钾比对夏甘薯生长发育及产量形成的影响 [J]. 土壤肥料, 1996, 5:42-44.

水分和钾素胁迫对不同基因型棉花钾素利用效率的影响

汪霄^{1,2} 陈防¹

(1. 中国科学院武汉植物园, 武汉 430074; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 作物钾效率和作物基因型、土壤特性、水肥施用量等因素紧密相关。作物基因型间钾效率的差异, 国内外学者做了大量的研究, 但有关土壤湿度和施钾量对棉花钾效率影响方面的研究甚少。为此, 实验选取钾高效和钾低效基因型棉花(简称为 HEG 和 LEG)为材料, 设置水分和钾素胁迫处理(OPT-W, OPT-K, OPT-W-K)和对照处理(OPT), 研究结果表明: 两种棉花钾效率均受到水分和钾素胁迫的抑制作用。水分胁迫显著影响棉花的产量、干物质重、钾素利用率及脱落率, 土壤含水量下降降低钾素的吸收利用率。土壤缺钾抑制光合产物及钾素在产量器官的累积和转运。相比 LEG 棉花品种, HEG 在低钾处理下表现出良好的生长特性。

关键词: 胁迫; 不同基因型棉花; 钾素利用率; 钾吸收; 钾分配



中国是世界主要的棉花生产国之一, 中国棉花产业在全球经济市场中占据主要地位。棉花是典型的喜钾作物, 具有缺钾敏感、需钾量高等特性^[1], 每生产 1 公斤皮棉约需要吸收 12–15 公斤 N, 5–6 公斤 P₂O₅, 12–15 公斤 K₂O^[2]。但是, 随着农业的迅速发展, 新型耕作制度、钾高效作物品种的应用, 以及农民传统习惯上偏施氮肥和磷肥等原因, 打破了原有的土壤钾素平衡, 农田土壤缺钾成为限制作物高产的全国性问题。且我国钾肥资源匮乏, 2012 年钾肥年生产量为 455 万吨, 钾肥进口依赖度高达 50%^[3]。因而, 随着钾肥价格和农业需求量的日益飙升, 如何充分挖掘土壤供钾能力, 提高缺钾环境下作物的钾素利用效率, 追求产量最大化, 成为当前研究的重要课题。

钾是作物生长必需的大量营养元素, 在改善棉花品质, 提高棉花产量中起着重要作用。钾肥的合理使用具有改善土壤性状, 调节光合产物的分配, 提高水分利用效率, 增强棉花抗逆性的效果^[4,5]。在过去的几十年里, 农业生产中往往通过使用大量的钾肥, 以追求高产。但是由于其他限制因素(如土壤湿度、pH、土壤理化特性、其他养分离子)的影响, 高投入并不一定等同于高产量。钾素的生物有效性受作物品种、土壤环境、耕种模式等多种因素的影响。

土壤水分和肥料是作物生长发育的物质基础, 其利用效率的高低是制约农业生产的主要因素。研究发现, 土

壤水分和养分有效性有着紧密的联系。土壤水分直接影响养分有效性, 适宜的水分可加速肥料的溶解和有机肥料的矿化, 促进养分的释放。水分缺乏时, 养分的截获和扩散受到抑制, 导致作物生长过程中的营养不良; 作物生长缓慢, 又使有限的水分得不到充分利用。同时, 棉花也是一种耐旱性作物, 但是土壤水分是否适宜, 直接影响到棉花的长势、植株光合产物的合成及其分配, 决定着棉花根系的活力, 进而影响到棉花根系吸收养分的能力以及养分在植株体内的运输。

前期研究发现, 缺钾条件下两种基因型棉花存在显著的生理学和形态学差异^[6,7]。但是未曾深入探究不同钾效率基因型的棉花品种在水分和钾素胁迫环境条件下做出的生理学响应, 以及土壤水分对棉花钾效率的影响。因此, 我们拟通过盆栽实验来探明水分和钾素胁迫对两种基因型棉花的产量、干物质重、钾素吸收和分配等方面产生的影响, 为提高棉花水分和钾素的利用效率, 实现高产稳产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试棉花品种为钾高效基因型棉花和钾低效基因型棉花(简称为 HEG 和 LEG)。种子由中国农业科学院棉

花研究所种质资源室和华中农业大学作物遗传育种研究所提供。

1.2 实验设计

采用盆栽试验，完全随机区组排列，分为2个区组：HEG和LEG组，每组设置4个处理：对照处理（OPT），水胁迫处理（OPT-W），钾胁迫处理（OPT-K），水与钾共同胁迫处理（OPT-W-K），每个处理重复5次。

风干土壤过3mm筛后装钵，每钵装土4公斤。化学试剂为肥源，具体施肥量见表1。每钵尿素基施1.04克，现蕾期、盛花期、桃期分别追肥0.7克，其余肥全部基施。OPT-W和OPT-W-K处理土壤湿度控制为25%的土壤含水量，其余处理土壤湿度控制为35%的土壤含水量。采用手持式土壤湿度计（Delta-T Devices Ltd.），每隔3-4天进行土壤含水量的测定和控制，夏季温度较高时，每隔一天测定一次。

处理	OPT	OPT-W	OPT-K	OPT-W-K
尿素	3.13	3.13	3.13	3.13
过磷酸钙	9.33	9.33	9.33	9.33
氯化钾	3.86	3.86	0.00	0.00
硼酸	0.47	0.47	0.47	0.47
硫酸锌	0.88	0.88	0.88	0.88
硫酸镁	1.23	1.23	1.23	1.23

1.3 测定指标及方法

棉花成熟期，将棉花各器官分开收集，放在85℃烘箱中烘干（72h），称重后磨碎。样品采用H₂SO₄-H₂O₂法消煮，植物各器官含钾量用火焰光度计（FP6400，上海分析仪器厂）测定^[8]。

1.4 统计分析

所有的数据用SPSS进行统计分析，用Sigmaplot软件绘图。

2 结果与分析

2.1 产量和生物量

从图1中可以看出，四种处理条件下，籽棉、铃壳、根系及总干重均表现为HEG大于LEG，而茎、叶、凋

落物干重均为LEG大于HEG。对比HEG和LEG各器官干重发现，LEG营养生长较好，营养物质更多地分配到了营养器官，但是较好的营养生长耗费了大量的养分，造成后期生殖生长养分供给不足，加速了棉花早衰，形成了更多的凋落物，经济效益反而不高。

图1还表明，水分和钾素互作显著地影响了棉花的生长和产量的形成。缺水条件下HEG和LEG棉花植株各器官干重均显著小于缺钾条件下HEG和LEG棉花植株各器官干重。说明水分控制在棉花产量和干物质积累上起主要作用。这是因为钾素在土壤中主要以质流、扩散的方式被植物根系吸收利用，且以离子形态存在于植株体内，较低的土壤湿度降低了土壤钾素的有效性，阻碍植物对K⁺的吸收、运转，以及光合产物的形成，严重抑制了棉花的产量和生物量。

许多学者认为，高效品种应该是在逆境条件下既能完成正常的生长发育，又能形成较高的产量。所以，产量的高低常被作为评价品种优劣性的一项重要指标。图1数据表明：不同处理条件下，HEG籽棉产量显著高于LEG，这可能是因为HEG良好的根系吸收能力，保证了胁迫条件下充足的水分和养分供给。因而，HEG棉花品种被认为是高效品种，更具经济价值。

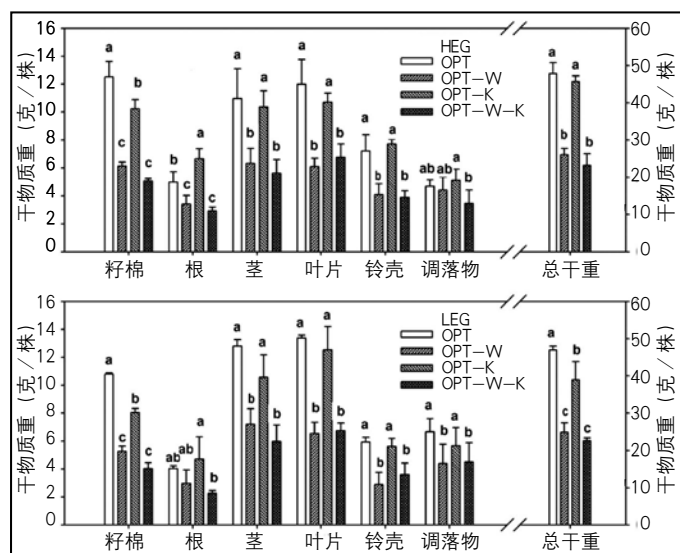


图1 水钾胁迫下两种棉花基因型的干物质重

2.2 钾浓度和钾积累量

表2数据显示，棉花各器官钾浓度随着施钾量的增大而增大。供钾充足条件下，棉花叶片及繁殖器官（籽棉、铃壳）钾浓度较高；缺钾条件（OPT-K，OPT-W-K），

表 2 不同处理下两基因型棉花各器官 K 含量							毫克 / 克
处理	基因型	根	茎	叶	籽棉	铃壳	总干重
OPT	HEG	5.91	5.21	9.79	14.78	14.90b	10.28
	LEG	5.99	6.30	9.07	11.17	22.73a	10.24
OPT-W	HEG	6.70	4.44	6.74	16.74	12.81b	9.48
	LEG	6.55	5.68	8.90	15.56	20.68a	10.52
OPT-K	HEG	2.74	1.80	1.11b	15.78	9.63b	6.21
	LEG	2.89	2.64	1.26a	14.86	14.42a	6.69
OPT-W-K	HEG	3.51a	2.73	0.95b	14.75	11.03b	6.20
	LEG	3.45b	3.20	1.28a	12.81	15.60a	6.29
主效应							
处理	OPT	5.95a	5.76a	9.43a	12.98b	18.82a	10.26a
	OPT-W	6.63a	5.06a	7.82b	16.15a	16.75a	10.00a
	OPT-K	2.82b	2.22b	1.19c	15.32a	12.03b	6.45b
	OPT-W-K	3.48b	2.97b	1.12c	13.78b	13.32b	6.25b
基因型	HEG	4.72	3.55b	4.65	15.51a	12.09b	8.04
	LEG	4.72	4.46a	5.13	13.60b	18.36a	8.44
方差分析							
基因型		NS	**	NS	**	**	NS
处理		**	**	**	**	**	**
基因型 * 处理		NS	NS	NS	NS	NS	NS
数据采用二因素方差分析进行统计分析 (** 差异极显著, P<0.01; * 差异显著 P<0.05; NS 差异不显著), 采用 Turkey 法进行多重比较, 同一列中数字后不同字母表示差异达 5% 显著水平, 下同。							

棉花叶片及繁殖器官钾浓度显著下降。这可能是因为钾素供给充足时, 棉花根系吸收大量的钾素运输到叶片中, 用于叶绿素的形成, 提高光合速率, 维持叶片的基本功能; 并将养分大量输送到繁殖器官中去, 形成较高的产量。当钾素匮乏时, 根系不能够吸收足够的钾素, 并运输到繁殖器官中去, 造成了大量的落花落果现象, 最终导致棉花减产。

表 3 数据显示, HEG 棉花产量、繁殖器官钾积累量 (RKA) 及总钾积累量 (TKA) 均高于 LEG。两种棉花基因型的产量、RKA 及 TKA 均遵循 OPT>OPT-K>OPT-W>OPT-W-K 的规律。由此可见, 土壤干旱 (25% 的土壤含水量) 显著抑制棉花的生长、产量的形成, 以及钾素的积累。在无外源钾肥施入的条件下 (OPT-K 和 OPT-W-K), OPT-W-K 处理下 TKA 和 RKA 的含量小于 OPT-K 处理下 TKA 和 RKA 的含量。这些结果表明, 土壤干旱不仅抑制钾素在植株体内的运输, 而且抑制植株根系对土壤固有钾素的吸收利用, 降低了土壤钾素的有效性。

2.3 钾素及生物量的分配

土壤含水量和钾肥用量不仅影响棉花的光合效率, 而且影响钾素和光合产物在各器官的分配格局。表 3 和图 2 显示, 不同处理下棉花繁殖器官 (籽棉和铃壳) 钾积累量约占植株总钾积累量的 53.0% - 82.9%。OPT,

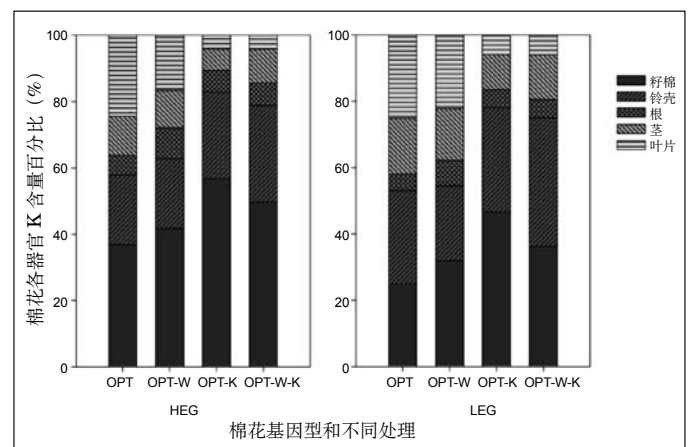


图 2 水钾胁迫下两棉花基因型各器官钾素配置百分比

OPT-W, OPT-K 和 OPT-W-K 处理下, HEG 繁殖器官钾积累量与植株总钾积累量的比值 (RKA / TKA) 分别为 57.8%, 62.7%, 82.9%, 78.8%; LEG 棉花的 RKA / TKA 值分别为 53.0%, 55.5%, 78.0%, 75.0%; OPT-K 条件下, RKA / TKA 最大。说明逆境胁迫条件下, 两个棉花品种为了保证生长, 表现出某些适应机制。低水分和钾素胁迫条件下, 尤其是钾素胁迫条件下, K^+ 以较大的比例向生殖器官转运和积累, 提前进入成熟期, 为延续下一代 (棉籽) 提供了物质基础, 保证整个生育期的完成。

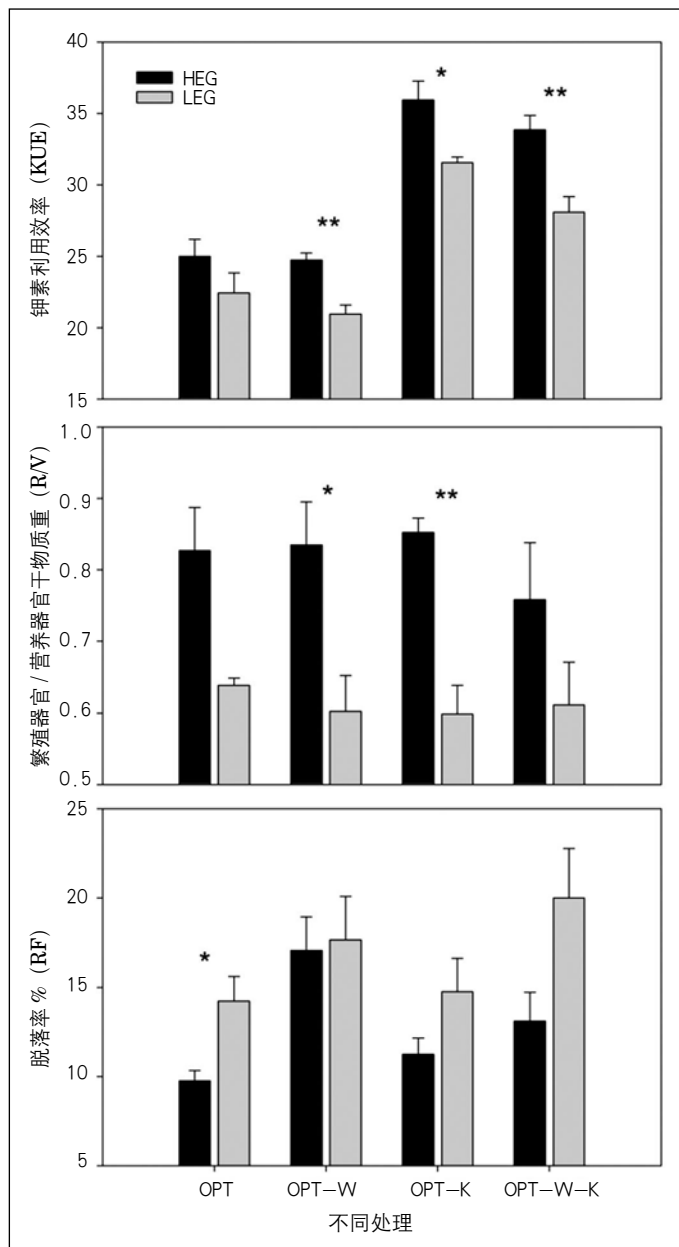


图 3 水钾胁迫下两棉花基因型的 KUE、RF 和 R/V 值

从 RKA / TKA 值还可以看出, 相比 LEG 来说, HEG 转移能力更强, 不同处理条件下 HEG 的 RKA / TKA 值依次比 LEG 大 4.8%, 7.2%, 4.9%, 3.8%, OPT-W 条件下两棉花品种差异最大。这说明高钾素利用效率的棉花品种在胁迫条件下, 不仅体现出抗低钾胁迫能力, 还表现出较强的抗旱性。这或许与钾素对植株水分利用效率的调控有关。

此外, R / V (繁殖器官与营养器官干物质重的比值) 和 RF (脱落的叶、蕾、桃与植株总干物质重的比值) 等参数也清晰地体现了植株养分的输送和分配趋势。不同处理条件下, HEG 棉花的 R / V 和 KUE 值较 LEG 高, 而 RF 值较 LEG 低 (图 3)。OPT-W, OPT-K 处理下, HEG 棉花的 R / V 值不断增大, 而 LEG 棉花的 R / V 值不断减小。由此可见, HEG 在 OPT-W, OPT-K 处理下能够将养分较多地输送到繁殖器官, 胁迫条件下表现出较好的生物学特性。

2.4 钾素利用效率

钾素利用效率 (KUE, potassium utilization efficiency) 一般指植株体内单位钾所生产的生物量或经济产量, $KUE = \text{干物质重 (或产量)} / \text{钾吸收量}$, 反映了植物对钾素的运输, 分配及积累能力。表 3 数据显示, HEG 棉花各处理条件下 KUE 值为 25.0, 24.9, 36.1, 33.8; LEG 棉花的 KUE 值为 22.6, 20.9, 31.3, 28.3; 四种处理条件下, HEG 棉花各处理钾素利用效率比 LEG 棉花高 2.4, 4.0, 4.8, 5.5。OPT-K 条件下, 两棉花品种 KUE 均最高。KUE 在评价钾素利用效率时正好验证了养分定律中的报酬递减定律, 即随着施钾水平的提高, 钾素利用效率反而下降。方差分析结果表明, 基因型间和处理间差异极显著 ($P < 0.01$)。

表 3 不同处理下两基因型棉花产量及钾素积累量

处理	基因型	产量 (克/株)	干物质重 (DMW) (克/株)	总钾积累量 (TKA) (毫克/株)	繁殖器官钾积 累量 (RKA) (毫克/株)	繁殖器官钾积累量 / 总钾积累量 (RKA/TKA) (%)	钾素利用 效率 (KUE)
OPT	HEG	12.5a	48.8	500.1	288.9	57.8	25.0
	LEG	10.8b	46.9	481.4	255.2	53.0	22.6
OPT-W	HEG	6.1a	26.1	246.7	154.6	62.7	24.9a
	LEG	5.3b	24.9	253.0	140.3	55.5	20.9b
OPT-K	HEG	10.2a	45.7	283.8a	235.1a	82.9	36.1a
	LEG	8.1b	39.0	256.8b	200.3b	78.0	31.3b
OPT-W-K	HEG	5.1a	24.4	150.6	118.6	78.8	33.8a
	LEG	4.0b	22.6	142.4	106.7	75.0	28.3b
主效应							
处理	OPT	11.8a	48.0a	492.1a	274.5a		24.0c
	OPT-W	5.7c	25.5c	249.8b	147.5c		22.9c
	OPT-K	9.0b	42.0b	268.8b	215.8b		33.5a
	OPT-W-K	4.5d	23.4c	146.0c	112.0d		30.7b
基因型	HEG	8.5	36.3	295.3	199.3		30.0
	LEG	7.1	33.4	283.4	175.6		25.8
方差分析							
基因型		**	**	NS	**		**
处理		**	**	**	**		**
基因型 * 处理		*	NS	NS	NS		NS

3 讨论

3.1 水分和钾素胁迫下两棉花品种的响应差异

作物 K 素效率是指植物在一定的 K 素供给条件下, 良好生长繁殖和获得产量的能力^[9]。一般认为, 作物 K 素效率依赖于吸收效率和利用效率两个方面。研究发现, 不同作物在低土壤水分和缺钾条件下响应程度不同^[10,11]。此次实验首次比较了两个不同钾效率基因型棉花在低土壤水分和缺钾条件下的响应差异, 以及两棉花品种在干旱条件下的钾吸收能力及调控干旱胁迫的能力。实验结果显示: 不同处理条件下, HEG 具有较高的产量、DMW、TKA, 以及较强的抗胁迫能力, 特别是在缺钾条件下表现出良好的生长特性。但是实验还未能确定两个棉花品种 K 素效率差异的主要来源, 能否将钾素吸收效率和钾素利用效率二者进行量化分析, 还有待于进一步的探究。

实验发现, 土壤水分和施钾量的多少显著影响棉花各器官的钾素含量及其分配(表 2, 图 2)。从图 2 中可以

清晰地看到棉花叶片及繁殖器官钾素含量最高; 表 2 中钾素浓度数据显示, 缺钾处理下叶片中钾素浓度迅速下降, 繁殖器官中钾素浓度变化不大。由此可见, 当供钾充足时, 钾素大量积累于棉花叶片, 进行光合作用, 并将养分和光合产物运输到繁殖器官中去; 当钾素匮乏时, 钾素由叶片向繁殖器官转运, 用于产量的形成和子代的发育, 也是作物应对胁迫环境产生的某种适应机制。

3.2 钾素有效性与土壤水分的关系

钾素在提高作物的抗旱性起着重要的作用。K⁺ 通过调节细胞的渗透势, 气孔的关闭等方式调控植株体内水分的运输。土壤水分也影响钾素的吸收利用。土壤干旱抑制植株根系的生长, 降低土壤微生物的活性, 同时增大了土壤分离子的浓度, 产生了离子毒害作用, 也增大了其他养分离子与 K⁺ 的竞争作用。总而言之, 土壤水分与钾素有效性间存在着紧密的联系, 其相互作用机理也很复杂, 土壤干旱抑制植株根系对土壤钾素的吸收, 以及植株体内钾素的运移。

我们的实验结果表明：两个棉花品种的产量，DMW, TKA, RKA 以及 KUE 等指标均随着土壤含水量的降低而降低。土壤干旱显著抑制棉花生物量的形成以及土壤钾素的吸收利用效率，棉花基因型间存在响应差异，土壤水分与钾素有效性间紧密相关。研究结果告诉我们在提高作物钾素利用效率，寻求最大产量的可持续农业发展道路上，不仅要了解作物基因型间的钾效率差异，掌握土壤水分与钾素有效性间的相互关系，以及作物基因型间对土壤水肥的响应差异也很重要。

参考文献

- [1] Adeli, A., and J. J. Varco. Potassium management effects on cotton yield, nutrition, and soil potassium level [J]. *Journal of plant nutrition*, 2002, 2:2229-2242.
- [2] 鲁剑巍, 李荣, 等. 棉花常见缺素症状图谱及矫正技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [3] 陈丽. 2012 年化肥供需形势分析与 2013 年展望 [J]. *中国化肥信息*, 2013, 1:6-8.
- [4] Reddy KR, Zhao DL. Interactive effects of elevated CO₂ and potassium deficiency on photosynthesis, growth, and biomass partitioning of cotton [J]. *Field Crops Research*, 2005, 94:201-213.
- [5] 姜存仓, 高祥照, 王运华, 等. 不同钾效率棉花基因型对低钾胁迫的反应 [J]. *棉花学报*, 2006, 18:109-114.
- [6] Xia Y, Jiang C, Chen F, Lu J, Wang Y. Differences in Growth and Potassium-Use Efficiency of Two Cotton Genotypes [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42:132-143.

4 结论

产量，钾素利用效率，棉花各器官钾素积累量和钾素分配是评估钾素利用率的主要指标。实验结果表明：两种棉花基因型均受到土壤水分和低钾的抑制作用，但基因型间响应程度不同，HEG 比 LEG 更耐干旱和低钾胁迫。良好的根系生长及较高钾素利用效率，保证 HEG 具有较好的根系吸收和养分供应能力，因而干旱和低钾条件下 HEG 能够正常的生长，保证稳定的产量。

- [7] Wang L, Chen F. Genotypic variation of potassium uptake and use efficiency in cotton (*Gossypium hirsutum*) [J]. *Journal of plant Nutrition and soil science*. 2012, 175:303-308.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [9] Rengel Z, Damon PM. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use [J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 133:624-636.
- [10] George MS, Lu GQ, Zhou WJ. Genotypic variation for potassium uptake and utilization efficiency in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) [J]. *Field Crops Research*, 2002, 77:7-15.
- [11] Damon PM, Ma QF, Rengel Z. Wheat genotypes differ in potassium accumulation and osmotic adjustment under drought stress [J]. *Crop and pasture science*, 2011, 62:550-555.

植物钾素高效利用机理研究进展

王利 陈防 万开元

(中国科学院武汉植物园, 武汉 430074)

摘要: 植物对钾素的吸收和利用是一个复杂的过程。近年来, 科学工作者在钾素高效机理方面做了大量研究工作, 有关钾素效率的研究取得了长足的进展。本文简要综述了植物钾素效率的概念、钾素吸收效率的差异及其生理机制, 讨论了土壤钾库、根系特征、根系分泌物和根际微生物、钾素在植株和细胞水平的分配和再分配、其它离子对钾离子的替代作用、收获指数、研究中常用的钾素效率的判断指标及存在的一些问题。

关键词: 钾素; 土壤; 吸收效率; 利用效率; 生理机制

据统计, 全世界 13 亿公顷的土壤中, 无各种胁迫或胁迫很小的只占 10.1%, 受矿质养分胁迫的占 22.5%, 在养分胁迫中, 大约 40% 的土壤缺钾^[1,2]。近年来, 随着作物产量的提高和土壤钾素收支不平衡的加剧, 农田缺钾面积有扩大的趋势。Sheldrick 等^[3] 根据中国肥料投入和农产品产出的匡算, 认为我国农田钾素亏缺每年约有 7.7×10^6 吨。严小龙等对我国土壤根土层内钾的平均储量进行了估计, 认为根土层内钾的平均储量可达 25000~250000 公斤/公顷, 土壤中钾素资源潜力巨大, 只是生物有效性低, 作物不能很好的利用^[4]。目前中国农业生产中面临的一个突出问题是在钾肥资源短缺的形势下, 较低的农田土壤钾素及钾肥利用效率限制了作物产量潜力的发挥和产品品质的进一步改善。因此, 通过研究植物钾素高效的生理机制, 提高植物钾素利用效率具有重要的理论和实践意义。笔者根据国内外钾素高效机理研究的成果, 尤其是近年来相关科研工作取得的新进展, 对植物吸收和利用钾素的主要影响因素进行了归纳总结。

1 植物钾素效率的概念

在长期的进化过程中, 植物形成了各自吸收和利用钾素的机制。植物不同种间、不同品种间钾素效率存在着一定差异, 有些品种间的差异还很明显。钾素效率是指植物在土壤可利用性钾含量低的环境中良好生长和繁殖的能力^[5]。也有学者把钾素效率描述为低钾胁迫下, 植物获得的产量占最大产量潜力的比例。杨肖娥则把钾素效率定义为植物在中度供钾和缺钾的条件下, 通过内部和

外部的一些利用机制, 获得更高干物质产量和(或)谷物产量的能力^[6]。Zou 等认为钾素效率包括农学养分效率和相应度两个方面。农学养分效率只指某一特定养分供应量下, 植物产量或生物量的高低。养分相应度是指随养分浓度的提高或下降, 植物产量增加潜力或减少幅度的大小^[7]。一般认为, 植物钾素效率依赖于相互关联的两个方面: ①植物从土壤里吸收钾素的效率(吸收效率); ②植物利用钾素获得产量的效率(利用效率)。高效吸收只是高效利用的一个基本前提条件。高的钾素吸收效率并不一定意味着高的干物质产量^[8,9]。Shea 对菜豆钾素效率的研究发现, 在介质中的钾素耗竭之前, 菜豆存在明显的奢侈吸收的现象^[10]。农业生产的目的是获取经济产量, 钾素利用效率高的作物和品种在土壤钾素供应有限的情况下, 可以更有效地形成经济产量, 获得较高的收获指数, 减少植物体内钾素向其他部分的输送^[11]。综上所述, 钾素农学利用效率主要包括三种含义: ①介质中钾素浓度较低时, 植物正常生长的能力, 即植物耐低钾胁迫的能力; ②介质中钾素浓度增加或减少时, 植物生物量的反应状况, 即植物对钾素的敏感性; ③在介质中钾素浓度相同时, 可以形成更多的经济产量, 即收获指数高。

2 钾素吸收效率的差异

植物对钾素的吸收是植物和土壤相互作用的结果, 因此不同的土壤条件, 植物不同种间、不同栽培品种间存在钾素吸收效率的差异。Lu 等通过研究成土母质及土壤质地对油菜施钾效果的影响发现, 受母质的影响, 施钾效果高低顺序为: 花岗岩 > 小河冲击物 > 红砂岩 >

页岩 > Q3 母质 > 长江冲击物 > Q2 母质；质地愈粗钾素吸收效果愈好，粘粒含量愈高钾素吸收效果愈差^[15]。Pettersson 等通过向日葵、黄瓜、桦、越橘、松、小麦、大麦七种植物的水培试验发现，大麦的钾素吸收效率最高，其次是小麦，而松的钾素吸收效率最低^[9]。Tiwari 等人通过对小麦、鹰嘴豆、芥菜、埃及车轴草等不同植物对钾素需求的研究发现，在相同处理下钾素吸收总量的高低顺序为：埃及车轴草 > 鹰嘴豆 > 小麦 > 芥菜^[12]。有关同一植物不同栽培品种间钾素吸收效率差异的报道更多，前人对小麦^[7,8,11,13,14,21]、棉花^[16,17]、水稻^[6,18,20,22,23,24]、烟草^[25]、桑叶^[26]、油菜^[15,27]、番茄^[19,28]、大豆^[29]、甘薯^[30,31]、菜豆^[10]等植物的不同栽培品种间钾素吸收效率的差异做了大量的研究工作，在此就不一一列举。总的来说，甜菜、甘薯等块茎块根类作物钾素吸收效率较高，油菜及豆科作物的吸钾效率高于禾谷类作物。禾谷类作物中，玉米和大麦的吸钾效率明显高于小麦。同种植物，小麦不同品种在高钾条件下相差不大，在低钾条件下，高效品种的吸收效率是低钾品种的 2 倍；大麦不同品种在高钾条件下相差可达 4 倍，而在低钾条件下相差不大；水稻不同品种在高钾条件下相差不大，而在低钾条件下相差 2 倍多。

2.1 土壤钾库

有研究者把钾素在土壤中存在的形态归结为三种：固定态钾、交换性钾和土壤溶液中的钾，此后的几十年又有很多学者对钾素形态做了分类。谢建昌认为钾素以四种形态存在：结构钾、非交换性钾、交换性钾和水溶性钾。黄绍文等在此基础上把交换性钾按其存在位置及可交换性的不同将其分为特殊吸附钾和非特殊吸附钾两种有效性不同的形态^[32]。钾素的各形态之间存在动态的平衡，土壤溶液中的钾与交换性钾处于最直接的平衡状态，而非交换性钾和交换性钾之间的化学平衡则非常复杂，而且取决于各相总的钾素状况。矿物钾需要经过风化才能进入土壤溶液中，这是一个极其缓慢的过程，对植物当季钾素营养供应意义不大。土壤溶液中的钾可通过截获、质流和扩散三种方式被植物直接吸收，被认为是土壤供钾能力的强度因素。但其浓度很低，只占土壤总钾量的一小部分^[33]。当土壤溶液中钾浓度降低时，交换性钾就会从吸附位点上释放出来，补充到土壤溶液中。研究发现，除苜蓿、牧草或豆科与禾本科混播的高产饲料作物以及马铃薯类的块茎作物较大多数其他作物需要较高水平的钾外，大部分作物的高产所需的交换性钾的足量水平 (KSL) 与成熟作物所含

的全钾量大致相同。一般当土壤中交换性钾低于该土壤特有的某一水平时，植物就不可能再取走交换性钾，因为当交换性钾水平低时，剩下部分就被更强的吸持着，钾进入溶液减少，作物吸收也减少。这时低浓度的溶液钾、交换性钾或两者就启动了非交换性钾的释放机制^[34]。非交换性钾与土壤溶液中的钾或交换性钾的转化过程缓慢，用常规的离子交换方法难以测定。Munson 报道有人将生长 7 天的植物的根系藉一片尼龙网与土块分开，形成根垫的根系在表面吸收钾。将土块与根分离，冰冻并切片，获得离根不同距离的土样然后测定，证明了在根表 2 毫米的土壤之内，当溶液中 K^+ 减少至 2 微摩尔 / 升时就有非交换性钾释放^[34]。国内外也有一些学者用阳离子树脂交换法对非交换性钾释放的机制作过详细的研究。不同植物或同种植物的不同栽培品种促进非交换性钾释放的能力不同。Steingrobe 等做了水培和土培试验来研究小麦、甜菜和马铃薯的钾素效率。他们发现，同小麦和马铃薯相比，甜菜更容易使非交换性钾释放到根际的土壤溶液中^[36]。因此，在粘粒含量高的土壤中，能有效利用非交换性钾的植物具有更高的钾素吸收效率。

2.2 根系特征

植物根系从土壤中吸收钾素的过程是根系与土壤相互作用的过程，不同的土壤条件对根系的生长产生不同的影响；根系也会通过自身的变化，采用不同的方式适应不同的土壤环境。一般认为钾素高效吸收基因型所具有的根系特征是：高根 / 冠比，根系纵向、侧向分布广，大的根长和根半径，细根量大，多且长的根毛，大的根系吸收面积和活跃吸收面积；理想的根系吸收动力学参数，即吸钾速率高 (V_{max} 值大)， K^+ 亲和力强 (K_m , C_{min} 值小)；大的根系阳离子交换量 (CEC)。Silberbush 等^[37]利用数学模型对大豆在低钾条件下根系参数对钾素吸收的影响做了敏感性分析并发现根的生长率和根半径是影响钾素吸收的最敏感因素。Mengel 比较了草和豆类作物吸收钾素的状况并得出结论：根长和根鲜重是影响钾素吸收的重要因素^[38]。Jiang 在对番茄的钾素吸收效率的研究中也得出了类似的结论^[17]。崔国贤比较了苎麻不同基因型吸钾能力和根系参数的关系，他认为，根系总吸收面积和活跃吸收面积和细根量是影响钾素吸收的关键因素^[35]。Jia 在对不同基因型的水稻钾素效率的差别进行的研究中发现，在钾素胁迫条件下，钾高效品种比钾低效品种具有更大的根长、根表面积、体积和总根数^[18]。Zhang 利用盆栽试验

对小麦的不同品种钾素吸收效率的差异进行了研究,他认为根长不是钾素吸收效率差异的影响因素^[8]。除此之外还有一些学者也得出了根长不是钾素吸收效率影响因素的结论。在根系动力学参数(V_{max} 、 K_m 、 C_{min})和根系阳离子交换量(CEC)对钾素吸收效率的影响方面有不少学者做过研究,且意见比较一致:吸钾速率高(V_{max} 值大), K^+ 亲和力强(K_m 、 C_{min} 值小)^[8,35,36],大的根系阳离子交换量(CEC)^[19,35,40]利于钾素的高效吸收。在研究当中亦得出了不一致甚至是完全相反的结论,这可能是因为研究的植物和试验条件的不同造成的结果。而且植物钾素吸收效率的差异是根系诸多特征综合作用的结果,不能用单一的某项指标作为判断的依据。

2.3 根系分泌物和根际微生物

根际是植物与土壤进行物质交换的重要场所,根系分泌物是物质交换的重要媒介。微生物在根际分布密集,活性强,对根际营养有重要影响。有关根系分泌物和根际微生物对植物吸收钾素的影响已有不少研究报道。根际分泌物中的一种重要成分是低分子量的有机酸,常见的主要有柠檬酸、酒石酸、马来酸、苹果酸、甲酸、乙酸、草酸、富马酸、丙酸等。不同的植物分泌特定的有机酸^[39]。涂书新等发现,籽粒苋根系分泌物中的有机酸主要是草酸,占有有机酸总量的95%以上,且钾高效品种草酸分泌量明显高于一般品种。利用根系分泌物进行进一步的矿物释钾试验,发现籽粒苋对不同矿物均有显著的净释钾效应,且根系分泌物中草酸的含量与矿物释钾量有显著的相关关系^[42]。涂丛等用盆栽和根袋法观察了小麦和绿豆在不同的施钾处理下根际分泌物的特征,发现小麦根际的脯氨酸、谷氨酸、酪氨酸和亮氨酸含量明显升高,并推测这可能是小麦耐低钾能力强的原因之一^[43]。李廷轩等在不同基因型籽粒苋的缺钾土培和水培试验中发现,富钾基因型根际分泌物中可溶性糖和游离氨基酸的含量远高于一般基因型,差异达极显著水平,并且富钾基因型根际真菌和细菌数量是一般基因型的三倍以上^[40]。盛下放等发现硅酸盐细菌NBT菌株发酵液中含有大量的有机酸、氨基酸、荚膜多糖,三者都具有较强的分解钾长石的能力,且三者间有明显的协同作用^[44]。可开发成细菌肥料来施用。在后续土培试验中观察了NBT菌株对棉花和油菜吸收钾素的影响,发现NBT菌株可扩殖到根际土壤中,且对钾素的吸收有明显促进作用^[41]。因此,进一步研究根系分泌物、根际微生物对根际营养的影响,在生产上采用相应技术措

施,改善土壤微域环境,对于提高钾素和别的营养效率具有重要意义。

3 钾素利用效率的差异

研究表明,钾素利用效率和吸收效率是相互关联的,但是高吸收效率并不一定意味着高利用效率。钾素利用效率是指植物利用吸收到体内的钾素所产生的植物产量,侧重于体内钾素的利用、转化能力。植物钾素利用效率高低的生理机制主要依赖于:①钾素在植株和细胞水平的分配和再分配;②其它离子对钾离子的替代作用;③收获指数(harvest index)。

3.1 钾素在植株和细胞水平的分配和再分配

K^+ 在植物体中具有很好的移动性。植物在细胞和植株水平的钾素分配能力是影响钾素利用效率的重要因素。植物细胞通过膜外 K^+ 的流入和液泡中 K^+ 的补充把细胞质中的 K^+ 浓度严格控制在80–100毫摩尔/升。一些细胞器也可以在一定范围内维持其自身 K^+ 浓度的稳定,如叶绿体浓度一般在50–100毫摩尔/升浓度范围内^[45,46]。这些都是以牺牲液泡中 K^+ 浓度为代价实现的。研究表明:在不同钾素供应水平下,液泡中的 K^+ 浓度有较大波动。在钾饱和状态下,液泡中钾离子浓度通常在200–250毫摩尔/升,而在钾耗竭条件下会降低到10毫摩尔/升。Walker研究了植物细胞中 K^+ 的动态平衡,发现液泡 K^+ 浓度随植物组织中 K^+ 浓度的降低呈现线形降低的趋势^[47]。Memon研究了不同品种大麦之间钾效率的差别,发现钾高效品种液泡中的 K^+ 往细胞质的移动性显著高于钾低效品种^[48]。

钾素在植物器官之间的移动和分配也是钾素利用效率产生差异的重要机制。钾高效植物可以将钾素从茎和叶柄等非光合器官移动到叶片和繁殖器官,从而获得高的经济产量。Jiang研究了两个钾素效率不同的棉花基因型的生长状况和营养特性,发现钾低效品种吸收的钾素较多的分配到主茎和叶柄等器官。钾高效品种吸收的钾素则较多的分配到形成产量的器官(棉桃)中,棉桃钾素积累量是钾低效品种的1.98倍,由于成桃较多,其钾素利用效率显著高于钾低效品种^[17]。

3.2 其它离子对钾离子的替代作用

液泡中积累的 K^+ 可以产生细胞生长必需的渗透势,

而且细胞的快速生长要求渗透调节物质具有很好的移动性。加上 K^+ 还具有其它一些特殊的功能, 因此只有很少一些离子在某些植物中能部分地替代 K^+ 。目前报道较多的是 Na^+ 对 K^+ 的替代作用。Figdore 研究了不同品种番茄中 Na^+ 对 K^+ 的替代作用, 发现与不施 Na 处理相比, 每钵施入 10 毫克 Na 的处理中, 两个番茄品种的平均钾素效率增加了 35–37%; 每钵施入 160 毫克 Na 的处理中, 三个番茄品种钾素效率增加了 40–51%, 而另两个番茄品种钾素效率增加了 16–22%^[49]。这说明在番茄不同品种当中, Na^+ 对 K^+ 具有替代作用, 而且不同的番茄品种中, 这种替代作用对钾素效率的影响不同。Liu 研究了钾素效率不同的水稻基因型间 Na^+ 对 K^+ 替代作用的差异, 发现在低钾胁迫的条件下, NaCl 的施用虽然能提高水稻的钾素利用效率, 但不同基因型的水稻在不同生育期对 NaCl 的反应不同。在钾素充足的条件下, Na^+ 对 K^+ 的替代作用不明显, 甚至会产生毒害作用^[50]。

3.3 收获指数

收获指数也称为经济系数, 是指作物收获时的经济产量与收获量之比, 在一定程度上反映了作物把资源(包括钾)分配到收获器官中的能力。收获指数的高低作为影响钾素利用效率的重要机制被广泛报道。George 从 84 个甘薯品种筛选出 8 个优良品种, 并对其钾素吸收和利用效率进行了研究, 发现钾素利用效率和收获指数之间存在明显的相关关系^[30]。Yang 研究了 134 个水稻品种钾素利用效率的差异, Zhang 研究了 58 个小麦品种间钾素吸收和利用效率的差异, 都得出了同样的结论^[6,8]。由于收获指数对植物钾素利用效率的影响较大, 当植物不同品种收获指数不同, 且收获指数与总生物量之间没有明显的相关关系时, 用植物营养生长的钾素利用效率来反映其钾素的经济利用效率是不可靠的。

4 钾素效率的一些相关指标

目前对于植物钾素高效的含义还没有统一的认识, 其相关指标的使用比较混乱。一般意义上的钾高效是指作物从生长介质中获取钾素并将其转运到经济产量中的能力, 包括两方面的内容: 一是具有较高的钾素吸收效率, 也有人称之为体外钾素利用效率 (External K Use

Efficiency, EKUE), 即植物根系从生长介质中吸收钾素并向地上部分转运钾素的能力较强, 其大小主要与植物根土界面的物质转化、转运过程及钾向地上部运输的过程有关, 其计算方法是: $EKUE = \frac{\text{吸收的钾}}{\text{施用的钾} - \text{吸收的钾}}$; 二是具有较高的钾素利用效率, 也被称为体内钾素利用效率 (Internal K Use Efficiency, IKUE), 即单位养分吸收量(积累量)所获得的作物经济产量(或生物量)较高, 其大小主要与植物体内 K^+ 参与的物质合成和“源”向“库”的转运过程有关, 其计算方法是: $IKUE = \frac{\text{籽粒产量(生物量)}}{\text{吸钾量}}$ 。在钾素效率的相关指标使用中存在的一个常见问题是, 计算钾素利用效率时往往只考虑了植物营养生长的情况, 而忽略了其经济产量。虽然这样得出的结果有时也是有意义的, 特别是针对收获枝叶的植物(如饲料作物、烟草和一些蔬菜等), 但对于一些收获籽粒的作物(如禾谷作物等)来说, 这种方法就不可靠。在品种间收获指数差异较大, 且收获指数与生物量间无明显相关关系的情况下, 这显然是不合适的。有些学者在评价小麦不同品种的钾素利用效率差异时, 就使用了营养生长的钾素利用效率。另外, 有些学者提出用苗期的钾素营养状况作为筛选钾高效基因型的指标, 这虽然缩短了筛选的时间, 但从作物的整个生长发育过程中植株对钾的反应来看, 前期的表现与后期并不完全一致。如果在苗期筛选, 只能作为初选的结果, 还应该研究其在整个生育期内钾素利用效率的情况, 尤其是其经济产量的钾素利用效率。笔者认为, 钾素效率的相关指标要根据不同植物的实际情况, 灵活使用。

5 展望

中国在钾肥资源有限的条件下要实现农业持续发展, 必须节约资源, 提高钾素利用效率。因此, 在今后的研究中, 应注意从植物根系高效吸钾机制、植物吸钾效率与土壤环境因素(如土壤水分、有机质、其他营养元素、微生物、酶等)关系、植物体内钾素高效运输与合理分配机制等方面入手, 进一步深入探讨植物钾素高效利用的机理。在此基础上有针对性地采取相应的农艺措施, 改良和培育钾高效品种, 并结合全国正在开展的测土配方施肥和农田地力培肥工程, 提高土壤钾素供应能力, 用适合的钾肥品种在适时、适量、适当部位对农作物进行高效施肥。

参考文献

- [1] 杨肖娥. 植物无机营养遗传特性研究的理论与实践 [J]. 土壤通报, 1988, 19(6):284-287.
- [2] 姜存仓, 王运华, 鲁剑巍, 等. 植物钾效率基因型差异机理的研究进展 [J]. 华中农业大学学报, 2004, 23(4):483-487.
- [3] Sheldrick W F, Syers J K and Lingard J. Soil nutrient audits for China to estimate nutrient balances and output/input relationships [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, 94(3):341-354.
- [4] 严小龙, 张福锁. 植物营养遗传学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1997:1-17.
- [5] Rengel Z and Damon P M. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use [J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 133:624-636.
- [6] Yang X E, Liu J X, Wang W M, et al. Genotypic differences and some associated plant traits in potassium internal use efficiency of lowland rice (*Oryza sativa* L) [J]. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 2003, 67:273-282.
- [7] Zou C Q, Li Z S, Li J Y. Characteristics of potassium nutrition of six wheat cultivars at different growth stages [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(3):340-344.
- [8] Zhang G P, Chen J X and Eshetu A Tirore. Genotypic variation for potassium uptake and utilization efficiency in wheat [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54:273-282.
- [9] Pettersson S and Jensen P. Variation among species and varieties in uptake and utilization of potassium [J]. *Plant and Soil*, 1983, 72:231-237.
- [10] Shea P F, Gerloff G C, and Gabelman W H. Differing efficiencies of potassium utilization in strains of snapbeans, *Phaseolus Vulgaris* L [J]. *Plant and Soil*, 1968, 28:337-346.
- [11] 鲁剑巍, 陈防, 刘冬碧, 等. 成土母质及土壤质地对油菜施钾效果的影响 [J]. 湖北农业科学, 2001, 6:42-43.
- [12] Tiwari K, Nigam V and Pathak A. Studies on the potassium requirements of different crops [J]. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 1985, 8(1):91-96.
- [13] 韩燕来, 刘新红, 王宜伦, 等. 不同小麦品种钾素营养特性的差异 [J]. 麦类作物学报, 2006, 26(1):99-103.
- [14] 李见云, 谭金芳, 介晓磊. 黄淮麦区钾高效小麦品种的筛选麦 [J]. 麦类作物学报, 2003, 23(3):49-52.
- [15] Woodend J J and Glass A D M. Genotype-environment interaction and correlation between vegetative and grain production measures of potassium use-efficiency in wheat (*T. aestivum* L.) grown under potassium stress [J]. *Plant and Soil*, 1993, 151:39-44.
- [16] 姜存仓, 袁利升, 王运华, 等. 不同基因型棉花苗期钾效率差异的初步研究 [J]. 华中农业大学学报, 2003, 22(6):564-568.
- [17] Jiang C C, Chen F, Gao X Z, et al. Study on the nutrition characteristics of different K use efficiency cotton genotypes to K deficiency stress [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(6):740-745.
- [18] Jia Y B, Yang X E, Feng Y, et al. Jilani. Differential response of root morphology to potassium deficient stress among rice genotypes varying in potassium efficiency [J]. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2008, 9(5):427-434.
- [19] Chen J J, Warren H G. Morphological and physiological characteristics of tomato roots associated with potassium-acquisition efficiency [J]. *Scientia Horticulturae*, 2000, 83:213-225.
- [20] 宋桂云, 徐正进, 陈温福, 等. 田间低钾对不同穗型水稻钾的吸收和利用效率的影响 [J]. 华北农学报, 2006, 21(6):89-94.
- [21] 赵学强, 介晓磊, 谭金芳, 等. 钾高效小麦基因型的筛选指标和筛选环境研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2):277-281.
- [22] 贾彦博, 杨肖娥, 王为木. 不同供钾水平下水稻钾素吸收利用与产量的基因型差异 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(2):64-67.
- [23] Wang W M, Yang X E, Wei Y Z, et al. Studies on the differences in uptake and utilization of soil potassium between different rice genotypes [J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2005, 31(1):52-58.
- [24] 刘国栋, 刘更另. 籼稻不同基因型钾素吸收利用效率的调控 [J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2):47-53.
- [25] 颜丽, 关连珠, 栾双, 等. 土壤供钾状况及土壤湿度对我国北方烤烟烟叶含钾量的影响研究 [J]. 土壤通报, 2001, 32(2):84-87.
- [26] 鲁剑巍, 陈防, 万运帆. 钾肥用量和品种对桑叶生产及蚕茧质量的影响 [J]. 土壤学报, 2004, 41(5):780-788.
- [27] Damon P M, Osborne L D, Rengel Z. Canola genotypes differ in potassium efficiency during vegetative growth [J]. *Euphytica*, 2007, 156:387-397.
- [28] Scott S Figdore, Gerloff G C and Gabelman W H. The

- effect of increasing NaCl levels on the potassium utilization efficiency of tomatoes grown under low-K stress [J]. *Plant and Soil*, 1989, 119:295-303.
- [29] 王伟, 曹敏建, 蔡左莹, 等. 不同大豆品种对钾素吸收和利用效率差异的比较研究 [J]. *大豆科学*, 2007, 26(4):561-564.
- [30] George Melvin Sidikie, Lu G Q, Zhou W J. Genotypic variation for potassium uptake and utilization efficiency in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) [J]. *Field Crops Research*, 2002, 77(1):7-15.
- [31] 陆国权, 丁守仁. 甘薯钾素利用效率的基因型差异研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 7(3):357-360.
- [32] 黄绍文, 金继运. 土壤钾形态及其植物有效性研究进展 [J]. *土壤肥料*, 1995, 5:23-29.
- [33] 金继运. 土壤钾素研究进展 [J]. *土壤学报*, 1993, 30(1):94-101.
- [34] Munson R D. Potassium in agriculture [C]. *American Society of Agronomy*, 1985:235-260.
- [35] 崔国贤, 李宗道. 苕麻不同基因型的吸钾能力及其与根系参数的关系 [J]. *农业现代化研究*, 2000, 21(6):371-375.
- [36] Steingrobe B and Claassen N. Potassium dynamics in the rhizosphere and K efficiency of crops [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1999, 163(1) :101-106.
- [37] Silberbush M and Barber S A. Prediction of phosphorus and potassium uptake by Soybeans with a mechanistic mathematical model [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47:262-265.
- [38] Mengel K and Steffens D. Potassium uptake of rye-grass (*Lolium perenne*) and red clover (*Trifolium pratense*) as related to root parameters [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1985(1):53-58.
- [39] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants [M]. London:Academic Press, 1986.
- [40] 李廷轩, 马国瑞. 籽粒苋不同富钾基因型根际钾营养与根系特性研究 [J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3):90-93.
- [41] Sheng X F. Growth promotion and increased potassium uptake of cotton and rape by a potassium releasing strain of *Bacillus edaphicus* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005(37):1918-1922.
- [42] 涂书新, 郭智芬, 孙锦荷. 富钾植物籽粒苋根系分泌物及其矿物释钾作用的研究 [J]. *核农学报*, 1999, 13(5):305-311.
- [43] 涂丛, 袁吕江, 魏世强, 等. 土壤钾营养状况对作物分泌物的效应研究 [J]. *西南农业大学学报*, 1996, 18(3):276-280.
- [44] 盛下放, 黄为一. 硅酸盐细菌 NBT 菌株解钾机理初探 [J]. *土壤学报*, 2002, 39(6):863-871.
- [45] Pier P A, Berkowitz G A. Modulation of water-stress effects on photosynthesis by altered leaf K⁺ [J]. *Plant Physiol*, 1985, 85:655-661.
- [46] Cuin T A, Shabala S. Potassium homeostasis in salinized plant tissues [J]. *Springer Berlin Heidelberg*, 2006, 287-317.
- [47] Walker D J, Leigh R A and Miller A J. Potassium homeostasis in vacuolate plant cells [J]. *Plant Biology*, 1996, 93, 10510-10514.
- [48] Memon A R, Siddiqi M Y and Class A D M. Efficiency of K⁺ utilization by barley varieties:activation of pyruvate kinase [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1985, 36(1):79-90.
- [49] Figdore S S, Gabelman W H and Gerloff G C. The accumulation and distribution of sodium in tomato strains differing in potassium efficiency when grown under low-K stress [J]. *Plant and Soil*, 1987, 99:85-92.
- [50] Liu J X, Yang X E, Ni W Z, et al. Sodium and potassium absorption and distribution in relation to growth and internal potassium use efficiency of K-efficient and-inefficient rice genotypes [J]. *Pedosphere*, 2001, 11(3):235-242.

钾肥资源与钾肥施用

我国钾肥资源匮乏，长期依赖进口。据资料，我国钾肥产量从1990年的3.6万吨（ K_2O ，下同）增加到2012年的377.4万吨。据中国钾盐（肥）分会统计，我国钾肥产能已经达到514万吨，未来产能还会增加。虽然我国钾肥进口依存度逐年下降，但钾肥产量依然不能满足消费，进口量依然很大。

从20世纪50年代到上世纪70年代我国农业中钾肥的消费量一直很低，到1978年也只有20多万吨，此后迅速增长。到2012年我国化肥消费量已达5839万吨，若复合肥中的氮磷钾比例按1:0.5:0.3计算，则钾肥消费量达949万吨，占目前世界钾肥消费的1/3以上。

不同区域化肥钾的消费量差异明显，以长江中下游地区最高，其次是华北地区和东南地区，西北和西南地区相对较低，东北最少。按单位种植面积计算，东南高达100 kg K_2O/ha 以上，华北和长江中下游为50–60 kg K_2O/ha ，东北、西北、西南不到30 kg K_2O/ha 。从土壤钾的输入/输出平衡看，只有西南和东南地区有盈余，其他地区均处于产出大于投入的耗竭状态，东北地区耗竭最严重，相当于亏缺44 kg K_2O/ha ，华北、西北和长江中下游有少量耗竭，投入产出基本平衡。

钾素的投入/产出平衡直接影响土壤的钾素含量状况。IPNI大量土壤样品分析数据表明，土壤有效钾含量极低（ $<40\text{ mg/L}$ ）和低（ $40\text{--}60\text{ mg/L}$ ）的样品占32%左右，高于第二次土壤普查约20个百分点，说明有些地方土壤有效钾含量下降。而有效钾含量较高（ $>100\text{ mg/L}$ ）的比例提高约8个百分点，但有效钾为 $60\text{--}100\text{ mg/L}$ 的中等含量的比例显著降低。这些数据说明钾肥的施用存在不合理现象，有些地方钾肥用量不足，而有些地区则施用量。

钾在作物的生理生化代谢和产量、品质的形成中具有重要作用。钾是多种酶的活化剂，参与糖和淀粉的合成、运输和转化；促进蛋白酶的活性，增加对氮的吸收；增强原生质胶体的亲水性，提高作物的抗旱能力；增强体内糖的储备和细胞渗透压，可提高作物的抗寒性；提高作物的纤维含量，使机械组织发达，从而提高抗病虫害和抗倒伏能力。因此，充足的钾素营养对增加作物产量和提高品质至关重要，尤其对需钾高的经济作物如水果、蔬菜、马铃薯、棉花、向日葵等。

不断增长的人口对粮食的需求，要求在集约化条件下进一步提高作物产量，不可避免地增加化肥的投入，钾肥的投入也随之增加。此外，随着经济作物面积的增加和人们对农产品品质的重视，加上近年来平衡施肥和测土配方施肥的推动作用，钾肥的施用越来越受到重视。实践证明，合理施用钾肥不仅增加作物产量，改善产品品质，增加收入，还能提高氮、磷养分的利用效率，减少其对环境的负面影响。

钾是不可再生资源，要合理利用国内外钾肥资源，实现钾肥的可持续供应。在农业生产中鼓励施用有机肥特别是秸秆还田，提高钾的循环利用率，减少对化肥钾的依赖。据估算，我国有机肥资源可提供2951万吨 K_2O ，其中秸秆提供1190万吨，若将秸秆还田比例从目前的1/3提高到2/3，就可以减少约400万吨的化学钾肥投入，资源环境效益相当可观。在钾肥的施用上要采用4R钾素管理策略，即用正确的钾肥品种和最佳的用量，在最佳的施肥时期，施在正确位置，以实现经济、环境和社会效益协调发展。

李书田 何萍