

养分专家系统推荐施肥对超高产夏玉米产量及养分吸收利用的影响

王宜伦^{1,2}, 苏瑞光¹, 刘 举¹, 王 磊², 白由路^{2*}, 谭金芳^{1*}

(1. 河南农业大学 资源与环境学院/河南粮食作物协同创新中心, 河南 郑州 450002;

2. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 为推动超高产夏玉米科学施肥, 采用田间试验研究了养分专家系统推荐施肥对超高产夏玉米产量、经济效益、养分积累量及氮、磷、钾肥利用效率的影响。结果表明, 养分专家系统推荐施肥处理超高产夏玉米较农民习惯施肥处理增产 5.28%, 增收 6.71%, 纯收益增加 1 414 元/hm²。养分专家系统推荐施肥处理促进了超高产夏玉米对氮、磷、钾养分的吸收利用, 并实现了土壤养分平衡, 其化肥偏生产力为 38.25 kg/kg, 显著高于农民习惯施肥处理, 其 N、P₂O₅、K₂O 农学效率分别为 7.73、12.50、9.01 kg/kg, 肥料利用率分别为 28.76%、13.15%、43.31%。养分专家系统推荐施肥可作为超高产夏玉米推荐施肥方法推广应用。

关键词: 超高产夏玉米; 养分专家系统; 推荐施肥; 产量; 肥料利用效率

中图分类号: S513 文献标志码: A 文章编号: 1004-3268(2014)06-0044-05

Effects of Nutrient Expert Recommend Fertilization on Yield, Nutrient Absorption and Utilization of Super-High-Yield Summer Maize

WANG Yi-lun^{1,2}, SU Rui-guang¹, LIU Ju¹, WANG Lei², BAI You-lu^{2*}, TAN Jin-fang^{1*}

(1. College of Resource and Environment, Henan Agricultural University/Key Laboratory of Physiology, Ecology and Genetic Improvement of Food Crop in Henan Province, Zhengzhou 450002, China;

2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to realize the scientific fertilization of super-high-yield summer maize, the field experiment was conducted to study the effects of nutrient expert recommend fertilization on yield, economic benefit, nutrient accumulation and fertilizer use efficiency of summer maize. The results showed that the nutrient expert recommend fertilization increased the grain yield by 5.28%, the economic benefit by 6.71% and the net profit by 1 414 yuan/ha in comparison to the conventional fertilizer application. The nutrient expert recommend fertilization could promote the nutrient absorption and utilization of super-high-yield summer maize and maintain the soil nutrient balance. The partial factor productivity from applied fertilizer was 38.25 kg/kg. The agronomic efficiency of N, P₂O₅ and K₂O was 7.73, 12.50 and 9.01 kg/kg respectively, and the fertilizer use efficiency were 28.76%, 13.15% and 43.31%.

收稿日期: 2013-12-05

基金项目: 中国-国际植物营养研究所(IPNI)合作项目(BFDP-HenanAU-2012); 河南农业大学博士基金项目(30300195)

作者简介: 王宜伦(1976-), 男, 山东郓城人, 副教授, 博士, 主要从事植物营养与施肥研究。E-mail: wangyilunrl@163.com

* 通讯作者: 谭金芳(1958-), 男, 河南内乡人, 教授, 博士, 主要从事植物营养与施肥研究。E-mail: tanjf@henau.edu.cn

白由路同为通讯作者

respectively. The method of maize recommend fertilization was worthy of popularization and application in super-high-yield summer maize.

Key words: super-high-yield summer maize; nutrient expert for maize; recommend fertilization; yield; fertilizer use efficiency

玉米是我国播种面积最大的粮食作物,增产潜力大,大力发展超高产夏玉米($\geq 12\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$),提高玉米总产量对于保障国家粮食安全意义重大^[1-2]。前人就超高产夏玉米生长机制、光合与生理特性、根系时空分布、产量与气候生态条件关系以及栽培技术等方面进行了较多的研究^[3-12]。科学施肥是实现夏玉米超高产的重要技术措施。齐文增等^[13]研究报道了超高产夏玉米干物质和氮、磷、钾养分积累与分配特点;吕鹏等^[14-15]研究了施氮量、施氮时期对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响;王宜伦等^[2,16-18]在河南省高产田分别就超高产夏玉米养分限制因子及养分吸收积累规律、适宜的施氮量、专用缓释肥一次性施肥效果及氮肥后移效应进行了研究报道。当前,在超高产夏玉米生产中仍然采用经验施肥,存在偏施氮肥、施氮量过大以及氮、磷、钾养分配比不合理等问题。

国内外以土壤测试为基础的测土推荐施肥可促进玉米对养分的吸收利用,从而提高玉米产量和经济效益。ASI(Agro Services International Inc)法推荐施肥在提高玉米产量、增加农民收入等方面效果明显^[19-22]。近年来,国际植物营养研究所开展了基于作物产量反应和农学效率的玉米养分管理和推荐施肥研究,主要原理是基于改进的 SSNM(site-specific nutrient management)养分管理方法和基于 QUEFTS(quantitative evaluation of the fertility of tropical soils)模型的作物养分需求、土壤基础养分供应、作物产量反应和农学效率等,应用计算机软件开发为养分专家系统(nutrient expert for maize),用于区域和田块尺度推荐施肥^[23]。

养分专家系统可根据土壤质地性状、作物产量水平、养分管理措施及气候条件等参数快速推荐作物氮、磷、钾施肥量和施肥时期等施肥方案,在玉米上有较好的增产效果^[24-25]。而超高产夏玉米养分专家系统推荐施肥效应未见报道。鉴于此,探讨了养分专家系统推荐施肥对超高产夏玉米产量、经济效益、养分积累及肥料利用效率的影响,以明确养分专家系统对超高产夏玉米的推荐施肥效应,为超高产夏玉米科学施肥提供技术依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于 2012 年 6—10 月在河南省鹤壁市淇滨区刘寨村进行。供试土壤为黏壤质潮土,耕层土壤有机质 $16.4\ \text{g}/\text{kg}$ 、全氮 $1.2\ \text{g}/\text{kg}$ 、碱解氮 $68.9\ \text{mg}/\text{kg}$ 、有效磷 $16.9\ \text{mg}/\text{kg}$ 、速效钾 $134.0\ \text{mg}/\text{kg}$ 。

1.2 试验设计

共设 7 个处理:养分专家系统推荐氮、磷、钾肥施用量(OPT)、在 OPT 基础上不施氮肥(OPT-N)、在 OPT 基础上不施磷肥(OPT-P)、在 OPT 基础上不施钾肥(OPT-K)、基于 ASI 法推荐氮、磷、钾肥施用量(OPTs)、农民习惯施肥(FP)、不施任何肥料(CK)。供试肥料为尿素、过磷酸钙和氯化钾,施肥量见表 1。磷、钾肥在苗期开沟一次施入,氮肥苗期沟施 1/2,大喇叭口期穴施 1/2。小区面积 $60\ \text{m}^2$,重复 3 次,供试超高产夏玉米品种为郑单 958,种植密度为 $75\ 000\ \text{株}/\text{hm}^2$ 。田间管理按当地农民种植习惯进行。

表 1 不同处理施肥量 kg/hm^2

处理	N	P_2O_5	K_2O
OPT	182	79	90
OPT-N	0	79	90
OPT-P	182	0	90
OPT-K	182	79	0
OPTs	240	45	60
FP	191	103	103
CK	0	0	0

1.3 样品采集与分析

在玉米播种前采集 0~20 cm 混合土壤样品,分成 2 份,1 份由中国农业科学院中-加合作土壤植株测试实验室采用 ASI 法进行测试;另 1 份用重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质含量,用碱解扩散法分析测定土壤碱解氮含量,用 NaHCO_3 浸提-钼蓝比色法测定土壤速效磷含量,用 NH_4OAc 浸提-火焰光度计法测定土壤速效钾含量。

玉米收获时在每个小区采集代表性植株 3 株,称鲜质量,分器官擦洗干净,在 $105\ ^\circ\text{C}$ 下杀青

15 min, 然后于 65 °C 下烘干至恒质量, 粉碎后分析植株各器官养分含量。采用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-蒸馏定氮法测定植株全氮含量, 钼黄比色法测定植株全磷含量, 火焰光度计法测定植株全钾含量^[26]。

玉米收获时, 每个小区随机收获玉米 30 穗, 装入尼龙网袋, 晒干, 脱粒称质量, 以含水量 14% 折算小区产量。

产投比 = 施肥纯收益 / 肥料投入

养分积累量 (kg/hm^2) = 收获物干质量 × 收获物养分含量 + 非收获物干质量 × 非收获物养分含量

肥料利用率 = (施肥区植物地上部养分积累量 - 无肥区植物地上部养分积累量) / 施肥量 × 100%

农学效率 (kg/kg) = (施肥区植株产量 - 无肥区植株产量) / 施肥量

化肥偏生产力 (kg/kg) = 施肥产量 / 总施肥量

采用 Excel 2003 和 DPS 7.05 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对超高产夏玉米产量的影响

由表 2 可以看出, 超高产夏玉米各施氮处理较 CK 显著增产 7.29%~15.80%, 其中 OPT 处理产量最高, OPT-N 处理与 CK 差异不显著, 说明氮是超高产夏玉米的主要养分增产因子。养分专家系统推荐施氮增产 11.71%, 施磷增产 7.94%, 施钾增产 6.43%。OPT 较 FP 增产 5.28%, OPTs 处理较 FP 处理增产 4.50%, OPT 处理与 OPTs 处理产量差异不显著。可见, 超高产夏玉米氮、磷、钾平衡施肥增产效果最好, 养分专家系统和 ASI 推荐施肥较农民习惯施肥有显著的增产作用。

表 2 不同处理对夏玉米产量及其构成因素的影响

处理	千粒重/g	穗粒数/个	产量/ (kg/hm^2)
OPT	356.8a	575.9a	13 427.5a
OPT-N	341.5ab	527.9b	12 020.0cd
OPT-P	348.5ab	561.8a	12 440.0bc
OPT-K	345.7ab	563.6a	12 616.7b
OPTs	353.1a	577.2a	13 327.5a
FP	347.4ab	564.5a	12 754.2b
CK	336.3b	530.8b	11 595.0d

注: 同列不同字母表示差异在 0.05 水平显著, 下同。

从表 2 还可看出, 施肥对千粒重和穗粒数均有影响, 不施氮肥和对照的穗粒数较其 OPT 处理显著降低, 各施肥处理千粒重无显著差异, 氮、磷、钾平

衡施肥可协同提高穗粒数和千粒重, 进而提高产量。

2.2 不同施肥处理对超高产夏玉米经济效益的影响

表 3 表明, 超高产夏玉米施肥收益较高, 达到 24 268~26 441 元/ hm^2 , 其中 OPT 处理收益最高, 其次是 OPTs 处理。OPT、OPTs 处理较 FP 处理分别增收 6.71%、6.34%, 纯收益分别增加 1 414、1 204 元/ hm^2 , 两处理收益无显著差异。基于养分专家系统推荐施氮肥增收 8.95%、施磷肥增收 6.16%、施钾肥增收 5.04%。OPT 处理与 OPTs 处理产投比均高于 FP 处理, 超高产夏玉米养分专家系统推荐施肥较农民习惯施肥有明显的增收效应。

表 3 不同施肥处理对超高产夏玉米经济效益的影响 元/ hm^2

处理	化肥投入	玉米收益	纯收益	产投比
OPT	1 757	26 441a	3 848a	2.19
OPT-N	975	24 268c	892c	0.92
OPT-P	1 217	24 907b	1 775b	1.46
OPT-K	1 323	25 172a	2 146ab	1.62
OPTs	1 640	26 348a	3 638a	2.22
FP	2 006	24 778ab	2 434ab	1.21

注: 玉米价格为 2.1 元/kg, N、 P_2O_5 和 K_2O 价格分别为 4.3、5.5、6.0 元/kg。

2.3 不同施肥处理对超高产夏玉米养分积累量的影响

由表 4 可以看出, 超高产夏玉米植株氮、磷、钾素积累量存在较大差异。各施氮处理氮素积累量较 OPT-N 处理显著增加 16.34%~33.80%, 氮素积累量大小顺序 $\text{OPTs} > \text{OPT} > \text{FP}$; OPT、OPTs、FP 处理的磷素积累量均显著高于 OPT-P 处理, 3 个处理之间无显著差异; FP 处理钾素积累量最高, 其次是 OPTs 处理和 OPT 处理, 三者间均无显著差异, 均显著高于 OPT-K 处理。推荐施氮肥、磷、钾均衡供应促进了超高产夏玉米对氮、磷、钾养分的吸收利用。

表 4 不同施肥处理对成熟期夏玉米植株养分积累量的影响 kg/hm^2

处理	N	P	K
OPT	241.4 ± 10.5ab	56.1 ± 4.5a	278.5 ± 17.6a
OPT-N	189.0 ± 15.6d	48.2 ± 3.0cd	225.8 ± 11.3c
OPT-P	219.9 ± 19.7c	51.6 ± 4.2bc	255.7 ± 23.7b
OPT-K	231.1 ± 23.4bc	54.3 ± 5.3ab	246.1 ± 17.4b
OPTs	252.9 ± 17.1a	56.6 ± 3.5a	283.5 ± 14.6a
FP	238.8 ± 20.7ab	56.7 ± 1.7a	287.3 ± 17.9a
CK	177.5 ± 10.0d	45.4 ± 3.7d	207.0 ± 25.2d

2.4 不同施肥处理对超高产夏玉米肥料利用效率的影响

从表 5 可知,OPT 处理和 OPTs 处理化肥偏生产力均显著高于 FP 处理,推荐施肥提高了化肥效率。超高产夏玉米养分专家系统推荐施肥下,磷肥农学效率最高,为 12.50 kg/kg,其次是氮肥、钾肥,分别为 7.73、9.01 kg/kg。肥料利用率钾肥最高,其次是氮肥、磷肥,分别为 43.31%、28.76%、13.15%。

表 5 基于养分专家系统推荐施肥的肥料利用效率

处理	化肥偏生产力/(kg/kg)	OPT	农学效率/(kg/kg)	肥料利用率/%
OPT	38.25a	N	7.73	28.76
OPTs	38.63a	P ₂ O ₅	12.50	13.15
FP	32.13b	K ₂ O	9.01	43.31

3 结论与讨论

科学施肥是夏玉米实现超高产的重要保证^[2,16]。常建智等^[19]研究发现,超高产夏玉米 ASI 法推荐施肥比农民习惯施肥显著增产 6.62%,纯收益与产投比最佳。本研究发现,超高产夏玉米养分专家系统推荐施肥和 ASI 法推荐施肥效应基本一致,均较农户习惯施肥显著增产。养分专家系统根据高产田产量反应及农学效率,结合土壤肥力、秸秆还田、水利条件等栽培管理信息,利用后台已有的数据库能快速生成基于农民不同个性信息的施肥营养套餐(如推荐种植密度、可获得的目标产量和肥料最佳用量、施用时间和次数等)。本研究发现,超高产夏玉米养分专家系统推荐施肥较 ASI 法推荐施肥氮肥用量降低而磷钾肥用量增加,优化了氮、磷、钾配比,较好地协调了植株氮、磷、钾养分吸收积累,实现了增产增收,较 ASI 法推荐施肥更简便、快捷。

肥料利用率是衡量合理施肥的重要指标^[27-28]。张福锁等^[29]、李红莉等^[30]报道,我国玉米氮、磷、钾肥农学效率分别为 9.8、7.5、5.7 kg/kg。其肥料利用率分别是 26.1%、11.0%、31.9%,化肥偏生产力平均为 11.5 kg/kg,本试条件下的磷、钾肥农学效率、钾肥利用率、化肥偏生产力均高于全国平均水平,氮肥农学效率和氮、磷肥利用率与之基本一致,亦高于王宜伦等^[16-18]在同一地区研究报道的超高产夏玉米肥料利用效率,玉米养分专家系统推荐施肥在一定程度上提高了超高产夏玉米肥料利用效率。

适当降低肥料用量,优化氮、磷、钾肥配比,促进夏玉米对养分的吸收利用,是提高肥料利用效率的有效措施,玉米养分专家系统推荐施肥能否维持土壤较高肥力以满足玉米增产需求,其长期推荐施肥效应需进一步研究明确。

根据超高产夏玉米养分吸收特性,合理推荐氮、磷、钾肥用量、施肥时期及施肥方式,对于培肥土壤、节省成本、实现超高产夏玉米高效施肥具有重要意义。玉米养分专家系统推荐施肥优化了氮、磷、钾养分分配比,在超高产夏玉米生产上较农民习惯施肥有显著的节肥和增产增收效果,实现了土壤养分平衡,值得推广应用。随着农村劳动力的转移,农业发展的趋势是简化生产,玉米养分专家系统应与化肥企业结合,针对超高产夏玉米种植区土壤类型、产量目标和养分管理措施等推荐施肥配方,结合肥料缓释技术生产超高产夏玉米专用配方肥,将技术进一步物化和简化,对于实现超高产夏玉米科学施肥具有重要意义。

致谢:河南农业大学农业资源与环境专业 2009 级杨莉莉、马龙、贺美、杨弘和李新霞在样品采集与处理,2010 级孙美美、黄榆普、陶静静、李贵杰、陈松岭、王玉梅和彭亚茹等在样品分析中均做了大量工作,特此致谢。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2012[M]. 北京:中国统计出版社,2012:473.
- [2] 王宜伦,李潮海,谭金芳,等. 氮肥后移对超高产夏玉米产量及氮素吸收和利用的影响[J]. 作物学报,2011,37(2):339-347.
- [3] 谢瑞芝,李潮海,周苏玫,等. 超高产夏玉米生长机制研究[J]. 河南农业大学学报,1999,3(1):11-16.
- [4] 常建智,张国合,李彦昌,等. 黄淮海超高产夏玉米生长发育特性研究[J]. 玉米科学,2011,19(4):75-79.
- [5] 东先旺,刘树堂. 夏玉米超高产群体光合特性的研究[J]. 华北农学报,1999,14(2):1-5.
- [6] 王俊忠,张超男,赵会杰,等. 不同施肥方式对超高产夏玉米叶绿素荧光特性及产量性状的影响[J]. 植物营养与肥科学报,2008,14(3):479-483.
- [7] 黄振喜,王永军,王空军,等. 产量 15 000 kg/hm² 以上夏玉米灌浆期间的光合特性[J]. 中国农业科学,2007,40(9):1898-1906.
- [8] 杨全胜,王永军,张吉旺,等. 三个超高产夏玉米品种的干物质生产及光合特性[J]. 作物学报,2011,37(2):355-361.
- [9] 陈国庆,齐文增,李振,等. 不同氮素水平下超高产夏玉米冠层的高光谱特征[J]. 生态学报,2010,30(2):6035-6043.

- [10] 李潮海, 苏新宏, 谢瑞芝, 等. 超高产栽培条件下夏玉米产量与气候生态条件关系研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(3): 311-316.
- [11] 齐文增, 刘惠惠, 李耕, 等. 超高产夏玉米根系时空分布特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 69-76.
- [12] 张守林, 王要闯, 戚廷香, 等. 黄淮海地区夏玉米超高产栽培技术研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(14): 130-133.
- [13] 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.
- [14] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 852-860.
- [15] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮时期对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1099-1107.
- [16] 王宜伦, 李潮海, 何萍, 等. 超高产夏玉米养分限制因子及养分吸收积累规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 559-566.
- [17] 王宜伦, 刘天学, 赵鹏, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量与氮素吸收及土壤硝态氮的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2483-2491.
- [18] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 等. 超高产夏玉米植株氮素积累特征及一次性施肥效果研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3151-3158.
- [19] 常建智, 张国合, 李彦昌, 等. 推荐施肥对超高产夏玉米产量及经济效益的影响[J]. 江西农业学报, 2011, 23(7): 105-107.
- [20] 王贺, 白由路, 杨俐苹, 等. 基于 ASI 方法的推荐施肥在东北玉米上的应用[J]. 中国土壤与肥料, 2010(5): 31-37.
- [21] 沙之敏, 边秀举, 郑伟, 等. 最佳养分管理对华北冬小麦养分吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1049-1055.
- [22] He P, Li S, Jin J, *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.
- [23] 何萍, 金继运, Mirasol F, 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.
- [24] 王宜伦, 李慧, 张晓佳, 等. 不同质地潮土夏玉米推荐施肥方法研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 402-407.
- [25] 王宜伦, 苗玉红, 贵会平, 等. 不同土壤类型夏玉米推荐施肥效应研究[J]. 中国农业科技导报, 2012, 14(1): 110-115.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-33, 56-57, 81-83, 106-107.
- [27] Gao Q, Li C L, Feng G Z, *et al.* Understanding yield response to nitrogen to achieve high yield and high nitrogen use efficiency in rainfed corn[J]. *Agron Journal*, 2012, 104: 165-168.
- [28] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 450-459.
- [29] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [30] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1136-1143.