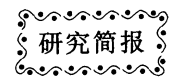


DOI: 10.3724/SP.J.1006.2014.00563



养分专家系统推荐施肥对潮土夏玉米产量及肥料效率的影响

王宜伦¹ 苏瑞光¹ 刘 举¹ 韩燕来¹ 卢艳丽² 白由路^{2,*} 谭金芳^{1,*}

¹河南农业大学资源与环境学院 / 河南省粮食作物生理生态与遗传改良重点实验室, 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 / 农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081

摘 要: 为实现潮土区夏玉米科学施肥, 通过 2 年田间试验研究了玉米养分专家系统推荐施肥对夏玉米产量、收益、养分积累量及肥料利用效率的影响。结果表明, 沙壤质潮土夏玉米施肥两年增产 6.55%~39.32% 和 5.53%~21.19%, 玉米养分专家系统和 Agro Services International Inc 推荐施肥较农户习惯施肥分别增产 4.06% 和 5.04%, 增收 21.90% 和 27.44%。基于玉米养分专家系统推荐施肥的氮、磷、钾肥农学效率分别为 11.46、25.89 和 9.93 kg kg⁻¹, 氮、磷、钾肥料利用率分别为 41.13%、31.48% 和 50.35%, 化肥偏生产力平均为 36.62 kg kg⁻¹。玉米养分专家系统推荐施肥提高了沙壤质潮土区夏玉米叶片叶绿素含量, 促进了氮磷钾的吸收利用, 增加了干物质积累量, 具有增产增收效应, 肥料利用效率较高, 可作为该地区夏玉米推荐施肥方法推广应用。

关键词: 夏玉米; 潮土; 养分专家系统; 推荐施肥; 产量; 肥料效率

Effects of Nutrient Expert Recommend Fertilization on Yield and Fertilizer Efficiency of Summer Maize in Fluvo-Aquic Soil

WANG Yi-Lun¹, SU Rui-Guang¹, LIU Ju¹, HAN Yan-Lai¹, LU Yan-Li², BAI You-Lu^{2,*}, and TAN Jin-Fang^{1,*}

¹ College of Resources and Environmental Sciences, 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 / Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

Abstract: Maize (*Zea mays* L.) is the largest grain crop, and plays an important role in ensuring the food security in China. However, there exist some problems in summer maize production such as excessive or unreasonable N, P₂O₅ and K₂O ratios, which hinders the realization of high-yield. In order to realize the scientific fertilization of summer maize in the fluvo-aquic soil region, field experiments were 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 yield was increased by 6.55%–39.32% and 5.53%–21.19% in 2010 and 2011 respectively in the treatment of applying fertilizer. Compared with conventional fertilizer application, the nutrient expert and Agro Services International Inc recommend fertilization increased grain yield by 4.06% and 5.04%, and economic benefit by 21.90% and 27.44%. The agronomic efficiency of N, P₂O₅, and K₂O was 11.46, 25.89, and 9.93 kg kg⁻¹, and fertilizer use efficiency was 41.13%, 31.48%, and 50.35%, respectively, the partial factor productivity from applied fertilizer was 36.62 kg kg⁻¹, based on the nutrient expert recommend fertilization. Fertilizer application recommended by the nutrient expert increased the content of leaf chlorophyll, the accumulation of N, P, K, and dry matter in summer maize. In conclusion, the nutrient expert can be used to recommend fertilizer application in this area and increase production and fertilizer use efficiency.

Keywords: Summer maize; Fluvo-aquic soil; Nutrient expert; Recommend fertilization; Yield; Fertilizer efficiency

玉米是食品、饲料和工业等重要原料, 已发展为中国播种面积最大的粮食作物, 玉米生产对保障国家粮食安全具有重要意义^[1-3]。施肥是玉米高产的关键技术措施, 但玉米生产中仍普遍存在重氮肥, 轻磷、钾肥等不

合理施肥现象, 造成施肥成本高、玉米产量和肥料利用率低, 经济效益下降。因此, 实现夏玉米科学施肥对于提高夏玉米产量和肥料利用效率具有重要意义^[4-6]。

国内外推荐施肥研究主要有以土壤测试为基础的测

本研究由中国-国际植物营养研究所(IPNI)合作项目(NMBF-HenanAU-2010)和河南农业大学博士基金项目(30300195)资助。

* 通讯作者(Corresponding authors): 谭金芳, E-mail: tanjf@henau.edu.cn; 白由路, E-mail: ylbai@caas.ac.cn

第一作者联系方式: E-mail: wangyilunrl@163.com, Tel: 13271550221

Received(收稿日期): 2013-07-16; Accepted(接受日期): 2013-12-09; Published online(网络出版日期): 2014-01-16.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20140116.1609.007.html>

土推荐施肥(如目标产量法、养分丰缺指标法和地力分级/区法等)和以作物反应为基础的推荐施肥(如叶色卡法/SPAD 仪/高光谱遥感分析/植株养分含量分析等作物营养诊断法和肥料效应函数法等)两类方法^[7-8]。针对不同土壤进行测土配方施肥可促进玉米对养分的吸收利用,提高了玉米产量和经济效益^[9-11]。Agro Services International Inc (ASI, 国际农化服务中心, 中国引入后称为“土壤养分系统研究法”)法采用通用浸提剂可测定 15 个土壤肥力指标, 实现高效的土壤养分测定系列化操作, ASI 推荐施肥主要根据土壤养分测试值、养分分级指标和目标产量养分需求推荐施肥量^[12], 已在全国 20 多个省市广泛应用, 在提高作物产量和增加农民收入等方面效果明显^[13-16]。

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要素, 通过玉米氮肥农学效率和估测氮肥响应计算施氮量, 从上季磷钾肥施用量和秸秆还田量考虑磷钾素平衡的角度推荐磷钾肥用量, 应用计算机软件技术发展为玉米养分专家系统(nutrient expert for maize), 可用于区域和田块尺度

推荐施肥^[8,17-18]。

潮土大面积分布在黄淮海平原, 是中国重要的粮食生产基地和夏玉米主产区。玉米养分专家推荐施肥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因素, 快速推荐玉米氮磷钾施肥量和施肥时期等施肥方案, 当前潮土区夏玉米养分专家系统推荐施肥效应鲜见报道。本文研究了玉米养分专家推荐施肥对沙壤质潮土区夏玉米产量、经济效益、养分吸收积累及肥料效率的影响, 明确玉米养分专家系统推荐施肥增产效果、氮磷钾肥效应和肥料利用效率, 以期为潮土区夏玉米科学施肥提供理论和技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

河南省郑州航空港区寺下里村供试土壤为沙质潮土, 前茬作物为冬小麦, 土壤基本养分性状见表 1。

1.2 试验设计

共设 7 个处理, OPT 为养分专家系统推荐氮磷钾肥用量, OPT-N 为在 OPT 基础上不施氮肥, OPT-P 为在 OPT 基础上不施磷肥, OPT-K 为在 OPT 基础上不施钾肥, OPTs 为基于 ASI 法推荐氮磷钾肥用量; FP 为农民习惯施肥(复混肥料小喇叭口期一次施用); CK 为不施任何肥料(表 2)。

表 1 供试土壤基本养分状况
Table 1 Basic nutrient characters of the tested soils

年份 Year	试验地点 Experimental site	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	碱解氮 Available N (mg kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)
2010	34.51157° N, 113.88991° E	10.42	35.45	28.80	81.76
2011	34.50572° N, 113.89410° E	12.85	49.62	28.16	80.20

表 2 不同处理的施肥量
Table 2 Fertilizer rate of different treatments (kg hm⁻²)

处理 Treatment	2010			2011		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
OPT	150	43	66	182	56	70
OPT-N	0	43	66	0	56	70
OPT-P	150	0	66	182	0	70
OPT-K	150	43	0	182	56	0
OPTs	240	60	105	270	30	90
FP	113	113	113	229	56	56
CK	0	0	0	0	0	0

OPT: optimum nutrient application treatment; OPT-N: nitrogen deficient treatment; OPT-P: phosphorous deficient treatment; OPT-K: potassium deficient treatment; OPTs: optimum nutrient application treatment by soil tested; FP: farmers practice; CK: without fertilizer.

氮肥 40%在苗期施用, 60%在大喇叭口期追肥(穴施); 磷钾在苗期施用, 施肥时将不同肥料混匀后开沟均匀施入土壤并覆土。供试肥料品种为尿素、过磷酸钙和氯化钾, 玉米品种均为浚单 20。2010 年 6 月 10 日播种, 9 月 20 日收获, 种植密度为 60 000 株 hm⁻², 小区面积为 32 m², 3 次重复, 随机区组排列。2011 年 6 月 12 日播种, 9 月 24

日收获, 种植密度为 67 500 株 hm⁻², 小区面积为 36 m², 3 次重复, 随机区组排列。

1.3 样品采集与分析

在玉米播种前采集 0~20 cm 土壤样品, 送中国农业科学院中加合作实验室采用 ASI 法测试并推荐施肥量。用重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质, 碱解扩散法分

析测定土壤碱解氮, 0.5 mol L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼蓝比色法测定土壤速效磷, NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定土壤速效钾。

收获时取每个小区的 3 株玉米(穗轴算入植株部分), 于 105℃ 下杀青 15 min, 65℃ 烘干, 籽粒与非收获物分别烘干称重, 粉碎后用于测定氮磷钾含量。采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 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, 火焰光度法测定植株全钾含量^[19]。

1.4 调查与计产

在吐丝期用 SPAD 计测定穗位叶 SPAD 值, 每个小区测 20 片叶, 取其平均值。

完全成熟后随机收获中间两行玉米的 30 穗, 装入尼龙网袋, 晒干, 脱粒称重, 以含水量 14% 折算小区产量。取 10 穗调查穗粒数和百粒重。

1.5 数据处理与统计分析

产投比=施肥增产收益/施肥投入值

养分积累量(kg hm⁻²) = 非收获物干重×非收获物养分含量+收获物干重×收获物养分含量

肥料利用率(%) = (施肥区植物地上部分养分积累量-

不施肥区植物地上部分养分积累量)/施肥量×100

农学效率(kg kg⁻¹) = (施肥区植株产量-不施肥区植株产量)/施肥量

化肥偏生产力(kg kg⁻¹) = 施肥产量/施肥量

采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7.05 软件处理和统计分析数据。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对夏玉米产量及其构成因素的影响

从表 3 可以看出, 夏玉米施肥两年分别增产 6.55%~39.32% 和 5.53%~21.19%, 均是 OPTs 产量最高, 其次是 OPT。OPT 较 FP 分别增产 4.78% 和 3.34%, 平均 4.06%; OPTs 较 FP 分别增产 5.76% 和 4.31%, 平均 5.04%; OPT、OPTs 与 FP 三个处理产量均无显著差异。基于养分专家系统推荐施肥, 2010 年氮、磷和钾肥分别增产 29.53%、15.74% 和 9.41%, 2011 年分别增产 13.77%、11.26% 和 4.32%, 氮肥增产最大, 其次是磷肥; 氮是夏玉米增产的主要限制因子, 合理施用氮肥及氮磷钾肥平衡施用是实现夏玉米高产稳产的关键。

表 3 不同处理对夏玉米产量及其构成因素的影响
Table 3 Effect of different treatments on yield and yield component of summer maize

处理 Treatment	2010			2011		
	百粒重 100-grain weight (g)	穗粒数 Grain number per ear	平均产量 Average grain yield (kg hm ⁻²)	百粒重 100-grain weight (g)	穗粒数 Grain number per ear	平均产量 Average grain yield (kg hm ⁻²)
OPT	34.35 ab	527.44 a	10863.59 a	27.79 a	495.33 a	9641.17 a
OPT-N	32.31 bc	432.51 bc	8386.71 d	27.28 c	443.33 cd	8474.17 c
OPT-P	33.55 bc	483.21 ab	9386.15 c	27.00 bc	459.67 bc	8665.50 bc
OPT-K	33.99 ab	478.56 ab	9929.52 bc	28.01 ab	468.67 b	9241.50 ab
OPTs	35.69 a	528.81 a	10965.48 a	27.79 a	499.67 a	9732.00 a
FP	34.04 ab	507.96 a	10367.79 ab	27.45 ab	479.00 ab	9330.00 ab
CK	31.75 c	396.88 c	7870.80 d	26.86 c	428.33 d	8030.33 c

同列不同字母表示差异在 0.05 显著水平。

Values within a column followed by different letters are significantly different at the 0.05 probability level. OPT: optimum nutrient application treatment; OPT-N: nitrogen deficient treatment; OPT-P: phosphorous deficient treatment; OPT-K: potassium deficient treatment; OPTs: optimum nutrient application treatment by soil tested; FP: farmers practice; CK: without fertilizer.

表 3 还表明, 夏玉米穗粒数和百粒重变化趋势与产量趋势基本一致, 氮磷钾平衡施肥可协同提高穗粒数和百粒重, 进而提高产量。2011 年百粒重和穗粒数均低于 2010 年, 年际间气候等环境因素导致产量差异, 各施肥处理产量及其构成因子变化规律基本一致。

2.2 不同施肥处理对经济效益的影响

从表 4 可以看出, 各施肥处理均能使夏玉米增收, 其中 OPTs 收益最大, 其次是 OPT, 两年的 OPT 纯收益较 FP 分别增加 19.86% 和 23.94%, 平均增收 21.90%; OPTs 纯收益较 FP 分别增加 23.94% 和 30.93%, 平均增收 27.44%。OPT 产投比高于 OPTs, 两者均高于 FP。可见, 沙壤质潮土夏玉米养分专家系统推荐施肥较农户习惯施肥有较好的增收效果。

2.3 不同处理对夏玉米叶片 SPAD 值的影响

SPAD 值与叶绿素含量呈极显著正相关, 可用来反映叶绿素含量^[20]。图 1 表明, 夏玉米吐丝期 OPTs 叶片 SPAD 值最高, 与 OPT、OPT-P 和 OPT-K 无显著差异。OPT 与 OPTs 叶片 SPAD 值均高于 FP, 氮肥和氮磷钾合理配施可提高夏玉米叶片 SPAD 值, 玉米养分专家系统与 ASI 推荐施肥提高了夏玉米吐丝期叶片叶绿素含量。

2.4 不同处理对夏玉米干物质积累量的影响

从图 2 可以看出, 各施氮处理显著提高了夏玉米干物质积累量, 两年分别增加了 24.25%~49.23% 和 13.66%~35.94%, OPTs 干物质积累量最大, 其次是 OPT。2010 和 2011 年 OPT 干物质积累量较 FP 分别增加了 1.27% 和 8.02%, 平均为 4.64%; OPTs 较 FP 分别增加了 8.63% 和 10.93%,

表 4 不同处理对夏玉米经济效益的影响
Table 4 Effect of different treatments on economic benefit of summer maize

处理 Treatment	2010			2011		
	肥料投入 Fertilizer input (Yuan hm ⁻²)	玉米增收 Corn income (Yuan hm ⁻²)	产投比 Output ratio	肥料投入 Fertilizer inputs (Yuan hm ⁻²)	玉米增收 Corn income (Yuan hm ⁻²)	产投比 Output ratio
OPT	1278	6285	4.92	1511	3383	2.24
OPT-N	633	1083	1.71	728	932	1.28
OPT-P	882	3182	3.61	1203	1334	1.11
OPT-K	1041	4323	4.15	1091	2543	2.33
OPTs	1992	6499	3.26	1866	3574	1.92
FP	1785	5244	2.94	1629	2729	1.68

玉米价格为 2.1 Yuan kg⁻¹; N、P₂O₅ 和 K₂O 价格分别为 4.3、5.5 和 6.0 Yuan kg⁻¹。
Maize price is 2.1 Yuan kg⁻¹; N, P₂O₅ and K₂O prices are 4.3, 5.5, and 6.0 Yuan kg⁻¹ respectively. OPT: optimum nutrient application treatment; OPT-N: nitrogen deficient treatment; OPT-P: phosphorous deficient treatment; OPT-K: potassium deficient treatment; OPTs: optimum nutrient application treatment by soil tested; FP: farmers practice.

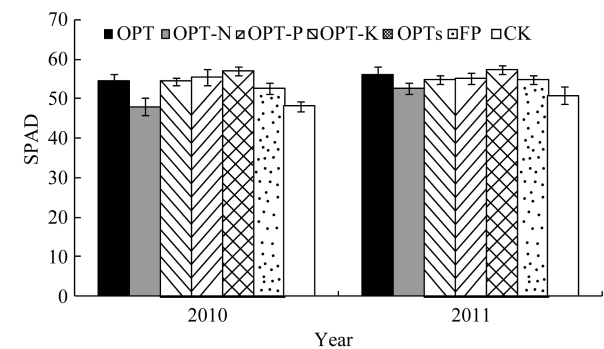


图 1 不同处理对夏玉米吐丝期叶片 SPAD 的影响
Fig. 1 Effects of different treatments on leaf SPAD of summer maize at the silking stage

平均为 9.78%。玉米养分专家系统和 ASI 推荐施肥增加了夏玉米干物质积累量。

2.5 不同处理对植物养分积累量的影响

从表 5 可以看出, 施肥提高了夏玉米氮磷钾养分积累量, OPTs 养分积累量最大。2010 年 OPT 氮、钾养分积累量较 FP 分别增加了 9.45% 和 3.12%, 磷积累量略有降低; OPTs 氮、磷和钾养分积累量分别增加了 22.09%、6.18% 和

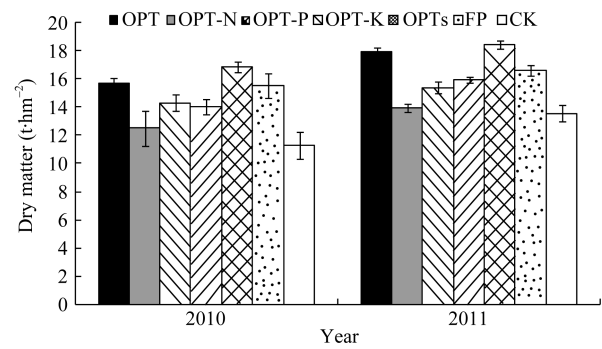


图 2 不同处理对夏玉米干物质积累量的影响
Fig. 2 Effects of different treatments on dry matter accumulation of summer maize

15.48%。2011 年 OPT 氮、磷和钾养分积累量较 FP 分别增加了 16.83%、8.48% 和 9.59%, OPTs 氮、磷和钾养分积累量分别增加了 20.82%、10.47% 和 12.91%。推荐施肥氮磷钾均衡供应促进了夏玉米对氮磷钾养分的吸收利用。

2.6 基于养分专家系统推荐施肥的肥料利用效率

由表 6 可以看出, 基于养分专家系统推荐施肥的磷肥农学效率最高, 平均 25.89 kg kg⁻¹; 其次是氮肥, 平均

表 5 不同处理对成熟期夏玉米植株养分积累量的影响
Table 5 Effects of different treatments on plant nutrient accumulation at the maturity stage (kg hm⁻²)

处理 Treatment	2010			2011		
	N	P	K	N	P	K
OPT	180.90 b	35.41 a	167.46 b	195.46 a	41.18 a	199.58 a
OPT-N	113.27 e	27.51 b	125.48 d	127.82 c	31.25 e	135.32 d
OPT-P	154.16 cd	29.22 b	147.82 c	158.20 b	33.85 d	165.55 c
OPT-K	152.90 d	29.63 b	141.27 c	163.79 b	35.46 c	168.87 bc
OPTs	201.80 a	37.92 a	187.54 a	202.13 a	41.94 a	205.63 a
FP	165.29 c	35.72 a	162.39 b	167.30 b	37.96 b	182.11 b
CK	100.60 f	23.00 c	108.87 e	132.32 c	24.80 f	135.51 d

同列不同字母表示差异在 0.05 显著水平。
Values within a column followed by different letters are significantly different at the 0.05 probability level. OPT: optimum nutrient application treatment; OPT-N: nitrogen deficient treatment; OPT-P: phosphorous deficient treatment; OPT-K: potassium deficient treatment; OPTs: optimum nutrient application treatment by soil tested; FP: farmers practice; CK: without fertilizer.

表6 基于养分专家系统推荐施肥的肥料利用效率
Table 6 Fertilizer efficiency of recommended fertilization based on nutrient expert

肥料效率指标 Fertilizer efficiency index	2010			2011		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
农学效率 Agronomic efficiency (kg kg ⁻¹)	16.51	34.36	14.15	6.41	17.42	5.71
肥料利用率 Fertilizer use efficiency (%)	45.09	32.99	47.83	37.17	29.97	52.87
偏生产力 Partial factor productivity (kg kg ⁻¹)		41.94			31.30	

11.46 kg kg⁻¹; 钾肥最低, 平均为 9.93 kg kg⁻¹; 本区适当增施磷肥有较好的增产效应。钾肥利用率最高, 平均为 50.35%; 其次是氮肥, 平均为 41.13%; 磷肥最低, 平均为 31.48%。化肥偏生产力平均为 36.62 kg kg⁻¹。

3 讨论

科学的推荐施肥方法是实现作物高产高效生产的重要技术措施, 国内外围绕科学施肥研究提出了不少推荐施肥方法。目标产量法、养分丰缺指标法和地力分级法等以土壤测试为基础的推荐施肥法很大程度上实现了平衡施肥, 但也存在着土壤测试值和校正系数等较难准确获得、某些速效养分稳定性与产量相关性差、针对性不强等问题。作物营养诊断法和肥料效应函数法等基于作物反应的施肥推荐方法对于科学施肥有一定的指导意义, 亦存在诊断营养元素单一、施肥指导迟滞以及耗时耗力的局限性^[8,21]。玉米养分专家系统是基于作物产量反应和农学效率的新推荐施肥方法, 综合考虑了土壤性质、产量目标、气候条件及养分管理措施等因素, 通过玉米生产相关信息, 利用后台已有的数据库, 能快速生成基于农户个性信息的施肥营养套餐(如推荐的种植密度、可获得的目标产量和肥料最佳用量、施用时间和次数等), 较好地克服了上述推荐施肥方法的一些缺点。王贺等^[13]研究东北地区玉米 ASI 法推荐施肥表明, 平均增产 8.9%, 增收 630 元 hm⁻²; 常建智等^[22]在超高产夏玉米上采用 ASI 法推荐施肥较农户习惯施肥增产 6.62%, 增收 1659 元 hm⁻²。本试验条件下, 玉米养分专家系统推荐施肥与 ASI 法推荐施肥产量无显著差异, 效益较好。玉米养分专家系统推荐施肥优化了氮磷钾肥用量, 较 ASI 推荐施肥节约成本、方便快捷, 具有较好的增产增收效果。

提高肥料利用效率是科学施肥的重要目标之一^[23]。张福锁等^[24]研究表明中国夏玉米氮磷钾的肥料利用率分别是 26.1%、11.0% 和 31.9%, 农学效率分别为 9.8、7.5 和 5.7 kg kg⁻¹; 李红莉等^[25]报道全国玉米化肥偏生产力平均为 11.5 kg kg⁻¹, 本试验条件下的肥料利用效率均高于全国平均水平, 说明养分专家推荐施肥提高了肥料利用效率。氮磷钾肥优化配比可促进夏玉米对养分的吸收利用, 实现增产增收, 进而提高肥料利用效率; 适当降低肥料用量是提高肥料利用效率的有效措施, 玉米养分专家系统根据土壤性状、产量目标及养分管理措施等因子推荐的氮磷钾肥用量相对较低, 且优化氮磷钾配比是实现夏玉米高

产高效的主要原因。玉米养分专家系统推荐施氮量 150~182 kg hm⁻², 与 Gao 等^[26]和 Cui 等^[27]报道基本一致, 但在当前土壤高强度利用情况下, 养分专家系统推荐施肥能否实现土壤养分平衡或盈余, 维持土壤较高肥力以满足粮食增长需求, 其长期推荐施肥效应需进一步研究明确。

玉米养分专家系统推荐施肥作为一种增产增收和提高肥料利用效率的方法, 操作相对简便易行, 亦适合于分散的农户田块, 但当前农村劳动力转移, 简化生产是今后农业发展的趋势和要求, 玉米养分专家系统推荐施肥应与化肥企业结合, 针对区域土壤类型、产量目标和养分管理措施等, 推荐夏玉米施肥配方, 结合肥料缓释技术生产夏玉米专用缓释配方肥, 将技术进一步物化和简化, 对于实现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 2007 级宋莹丽、贵会平、张晓佳、王进涛和王首敬, 2008 级孟彩霞、张倩、李沙莉和李盼等同志在本论文的样品采集与分析中做了大量工作, 特此致谢。

References

- [1] 郭庆法, 王庆成, 汪黎明. 中国玉米栽培学. 上海: 上海科学技术出版社, 2004. pp 1-3
Guo Q F, Wang Q C, Wang L M. Maize Cultivation Science of China. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2004. pp 1-3 (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2012. 北京: 中国统计出版社, 2012. p 473
National Bureau of Statistics of China. Chinese Statistics Yearbook in 2012. Beijing: National Bureau of Statistics of China, 2012. p 473 (in Chinese)
- [3] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 张许, 刘天学. 氮肥后移对超高产夏玉米产量及氮素吸收和利用的影响. 作物学报, 2011, 37: 339-347
Wang Y L, Li C H, Tan J F, Zhang X, Liu T X. Effect of postponing N application on yield, nitrogen absorption and utilization in super-high-yield summer maize. *Acta Agron Sin*, 2011, 37: 339-347 (in Chinese with English abstract)
- [4] 李丹, 孙志梅, 王艳群, 李婷, 薛世川, 王小雪. 氮磷钾和微肥对高肥区夏玉米养分积累、分配及产量的影响. 中国土壤与肥料, 2009, (6): 32-36
Li D, Sun Z M, Wang Y Q, Li T, Xue S C, Wang X X. Effect of NPK and microelement fertilizers on nutrient accumulation, distribution and yield of maize on high-fertility soil. *Soil Fert Sci*

- China, 2009, (6): 32–36 (in Chinese with English abstract)
- [5] 陈祥, 同延安, 杨倩. 氮磷钾平衡施肥对夏玉米产量及养分吸收和累积的影响. 中国土壤与肥料, 2008, (6): 19–22
Chen X, Tong Y A, Yang Q. Effect of balanced fertilization on the yield, nutrients absorption and accumulation of summer maize. *Soil Fert Sci China*, 2008, (6): 19–22 (in Chinese with English abstract)
- [6] 王宜伦, 李慧, 张晓佳, 韩燕来, 谭金芳. 不同质地潮土夏玉米推荐施肥方法研究. 中国生态农业学报, 2012, 20: 402–407
Wang Y L, Li H, Zhang X J, Han Y L, Tan J F. Studies on recommended fertilization methods of summer maize in different fluvo-aquic soil texture. *Chin J Eco-Agric*, 2012, 20: 402–407 (in Chinese with English abstract)
- [7] 谭金芳. 作物施肥原理与技术(第 2 版). 北京: 中国农业大学出版社, 2011. pp 39–125
Tan J F. Principles and Technology for Crop Fertilization, 2nd edn. Beijing: China Agricultural University Press, 2011. pp 39–125 (in Chinese)
- [8] 何萍, 金继运, Mirasol F P, Adrian M J. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法. 植物营养与肥料学报, 2012, 18: 499–505
He P, Jin J Y, Mirasol F P, Adrian M J. Approach and decision support system based on crop yield response and agronomic efficiency. *Plant Nutr Fert Sci*, 2012, 18: 499–505 (in Chinese with English abstract)
- [9] 邓良佐, 李艳杰, 史纪明, 井旭源, 栗艳霞, 侯新华, 王明君, 傅永政, 毕淑华. 黑龙江省旱作玉米测土配方平衡施肥技术研究. 玉米科学, 2004, 12(4): 79–80
Deng L Z, Li Y J, Shi J M, Jing X Y, Li Y X, Hou X H, Wang M J, Fu Y Z, Bi S H. Studies on technology of balanced fertilization by soil testing of rain-fed maize in Heilongjiang Province. *J Maize Sci*, 2004, 12(4): 79–80 (in Chinese)
- [10] 黄国斌, 李家贵. 测土配方施肥对玉米养分吸收、产量及效益的影响. 贵州农业科学, 2010, 38(1): 23–25
Huang G B, Li J G. Effects of formulation application on nutrition absorption, yield and benefit of maize. *Guizhou Agric Sci*, 2010, 38(1): 23–25 (in Chinese with English abstract)
- [11] 赖丽芳, 吕军峰, 郭天文, 杨文玉, 胡志桥. 平衡施肥对春玉米产量和养分利用率的影响. 玉米科学, 2009, 17(2): 130–132
Lai L F, Lü J F, Guo T W, Yang W Y, Hu Z Q. Effects of balanced fertilization and phosphor on spring corn yield and nutrients utilization rate. *J Maize Sci*, 2009, 17(2): 130–132 (in Chinese with English abstract)
- [12] 金继运, 白由路, 杨俐苹. 高效土壤养分测试技术与设备. 北京: 中国农业出版社, 2006. pp 74–88
Jin J Y, Bai Y L, Yang L P. Technology and Equipment of Soil Nutrient Efficient Test. Beijing: China Agriculture Press, 2006. pp 74–88 (in Chinese)
- [13] 王贺, 白由路, 杨俐苹, 卢艳丽, 王磊. 基于 ASI 方法的推荐施肥在东北玉米上的应用. 中国土壤与肥料, 2010, (5): 31–37
Wang H, Bai Y L, Yang L P, Lu Y L, Wang L. Application of fertilizer recommendation based on ASI systematic approach in maize in Northeast China. *Soil Fert Sci China*, 2010, (5): 31–37 (in Chinese with English abstract)
- [14] 王宜伦, 韩燕来, 张许, 谭金芳. 氮磷钾配比对高产夏玉米产量、养分吸收累积的影响. 玉米科学, 2009, 17(6): 88–92
Wang Y L, Han Y L, Zhang X, Tan J F. Effects of different fertilizers on yield and plant nutrient accumulation of high-yield summer maize. *J Maize Sci*, 2009, 17(6): 88–92 (in Chinese with English abstract)
- [15] 沙之敏, 边秀举, 郑伟, 李文娟, 何萍. 最佳养分管理对华北冬小麦养分吸收和利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16: 1049–1055
Sha Z M, Bian X J, Zheng W, Li W J, He P. Effects of optimum nutrient management on nutrient uptake and utilization of winter wheat in North China Plain. *Plant Nutr Fert Sci*, 2010, 16: 1049–1055 (in Chinese with English abstract)
- [16] He P, Li S T, Jin J Y, Wang H T, Li C J, Wang Y L, Cui R Z. Performance of an optimized nutrient management system for double-cropped wheat-maize rotations in North-central China. *Agron J*, 2009, 101: 1489–1496
- [17] Janssen B H, Guiking F C T, Van der Eijk D, Smaling E M A, Wolf J, van Reuler H. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*, 1990, 46: 299–318
- [18] Witt C, Pasuquin J M, Pampolino M F, Buresh R J, Dobermann A. A Manual for the Development and Participatory Evaluation of Site-Specific Nutrient Management for Maize in Tropical Favorable Environments. Penang, Malaysia: International Plant Nutrition Institute, 2009. <http://seap.ipni.net>
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000. pp 30–33, 56–57, 81–83, 106–107
Bao S D. Soil Agro-Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 30–33, 56–57, 81–83, 106–107 (in Chinese)
- [20] 苏云松, 郭华春, 杨雪兰. 甘薯、薯蓣和魔芋叶片 SPAD 值与叶绿素含量的相关性研究. 西南农业学报, 2009, 22: 64–66
Su Y S, Guo H C, Yang X L. Study on correlations between SPAD readings and chlorophyll content in leaves of sweet potato, dioscorea and konjaku. *Southwest Chin Agric Sci*, 2009, 22: 64–66 (in Chinese with English abstract)
- [21] 徐新朋. 基于产量反应和农学效率的玉米推荐施肥方法研究. 中国农业科学院硕士学位论文, 2012
Xu X P. Methodology of Fertilizer Recommendation Based on Yield Response and Agronomic Efficiency for Maize. MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing, China, 2012
- [22] 常建智, 张国合, 李彦昌, 朱自宽, 李保峰. 推荐施肥对超高产夏玉米产量及经济效益的影响. 江西农业学报, 2011, 23(7): 105–107
Chang J Z, Zhang G H, Li Y C, Zhu Z K, Li B F. Effects of recommended fertilization on growth, yield and economic benefit of super-high-yielding summer maize. *Acta Agric Jiangxi*, 2011, 23(7): 105–107 (in Chinese with English abstract)
- [23] 闫湘, 金继运, 何萍, 梁鸣早. 提高肥料利用率技术研究进展. 中国农业科学, 2008, 41: 450–459
Yan X, Jin J Y, He P, Liang M Z. Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency. *Sci Agric Sin*, 2008, 41: 450–459 (in Chinese with English abstract)
- [24] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45: 915–924
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, Cui Z L, Ma W Q, Chen X P, Jiang R F. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China

- and measures for improvement. *Acta Pedol Sin*, 2008, 45: 915–924 (in Chinese with English abstract)
- [25] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 杜芬, 李亮科. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16: 1136–1143
- Li H L, Zhang W F, Zhang F S, Du F, Li L K. Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China. *Plant Nutr Fert Sci*, 2010, 16: 1136–1143 (in Chinese with English abstract)
- [26] Gao Q, Li C L, Feng G Z, Wang J F, Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Understanding yield response to nitrogen to achieve high yield and high nitrogen use efficiency in rainfed corn. *Agron J*, 2012, 104: 165–168
- [27] Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Current nitrogen management status and measures to improve the intensive wheat-maize system in China. *AMBIO*, 2010, 39: 376–384