

吉林省玉米施钾增产效应及区域差异

王寅¹, 高强^{1*}, 李翠兰¹, 焉莉¹, 冯国忠¹, 王少杰¹, 刘振刚², 宋立新², 房杰²

(1 吉林农业大学资源与环境学院/吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 长春 130118;

2 吉林省土壤肥料总站, 长春 130012)

摘要:【目的】本研究利用测土配方施肥项目田间试验的大样本数据, 分析吉林省玉米施钾增产效应在生态区及县域尺度上的差异, 为促进玉米高产稳产和钾肥资源高效利用提供参考。【方法】基于 2005—2013 年吉林省玉米“3414”田间试验中推荐施钾 ($N_2P_2K_2$) 和不施钾 ($N_2P_2K_0$) 处理, 分析生态区及县域尺度上玉米施钾的产量反应、农学利用率和肥料贡献率, 建立玉米施钾产量、钾肥贡献率与基础产量之间的关系, 从而评估吉林省玉米施钾的增产效应及区域差异。【结果】不施钾条件下, 吉林东部湿润山区、中部半湿润平原区和西部半干旱平原区玉米的基础产量平均分别为 8.44 t/hm² (3.29~14.5 t/hm²)、9.45 t/hm² (3.77~15.3 t/hm²) 和 8.11 t/hm² (3.89~12.84 t/hm²)。施用钾肥显著提高三大区域玉米产量, 东、中、西部平均分别增产 1.31 t/hm² (18.1%)、1.06 t/hm² (12.2%) 和 1.30 t/hm² (17.4%)。推荐施钾条件下, 东、中、西部玉米施钾的平均农学利用率分别为 19.7、14.6 和 20.2 kg/kg, 平均肥料贡献率分别为 13.9%、10.2% 和 13.6%。统计分析显示, 三大区域之间玉米施钾的增产量无显著差异, 东部增幅显著高于中部, 农学利用率和肥料贡献率东部也显著高于中、西部。回归分析发现, 各区域玉米的施钾产量均与基础产量呈极显著正相关关系, 符合线性模型, 东部为 $y = 0.769x + 3261$ ($R^2 = 0.616^{**}$), 中部为 $y = 0.883x + 2158$ ($R^2 = 0.757^{**}$), 西部为 $y = 0.873x + 2328$ ($R^2 = 0.637^{**}$); 而钾肥贡献率均与基础产量呈极显著负相关关系, 符合对数模型, 东部为 $y = -28.4 \ln(x) + 270.1$ ($R^2 = 0.348^{**}$), 中部为 $y = -15.9 \ln(x) + 156.1$ ($R^2 = 0.172^{**}$), 西部为 $y = -16.3 \ln(x) + 160.6$ ($R^2 = 0.123^{**}$)。随土壤基础供钾能力的提高, 东部玉米施钾产量的增幅和钾肥贡献率的降幅明显高于中、西部。【结论】吉林省玉米的钾肥管理应根据区域土壤钾素状况、自然气候条件和钾肥效应进行合理配置, 现阶段应适当增加东部湿润山区玉米生产的钾肥资源配置, 提高土壤供钾能力, 促进玉米高产稳产。

关键词: 吉林省; 土壤钾素; 区域差异; 钾肥利用率; 玉米产量

Maize yield responses to potassium fertilizer and regional differences in Jilin Province

WANG Yin¹, GAO Qiang^{1*}, LI Cui-lan¹, YAN Li¹, FENG Guo-zhong¹, WANG Shao-jie¹,
LIU Zhen-gang², SONG Li-xin², FANG Jie²

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Jilin Agricultural University/Key Laboratory of Sustainable Utilization of Soil Resources in the Commodity Grain Bases in Jilin Province, Changchun 130118, China;

2 Soil and Fertilizer Station of Jilin Province, Changchun 130012, China)

Abstract: 【Objectives】In this study, maize yield responses to potassium (K) fertilizer in Jilin Province and the regional difference at the scale of ecological zones and counties were estimated, based on the big data of field experiments in Soil Testing and Formula Fertilization Project, aiming efficiently to provide references for high and stable yields and high use efficiency of K fertilizer in local maize production. 【Methods】The data were collected from the treatments $N_2P_2K_2$ (+K) and $N_2P_2K_0$ (-K) in maize “3414” field experiments carried out in Jilin Province during 2005–2013. The yield response, agronomic efficiency (AE) and fertilizer contribution rate

收稿日期: 2018-09-04 接受日期: 2018-10-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0200101); 国家现代农业玉米产业技术体系项目 (CARS-02)。

联系方式: 王寅 E-mail: wy1986410@163.com; * 通信作者 高强 E-mail: gyt199962@163.com

(FCR) of K fertilizer and their regional differences were estimated at ecological zones and county levels. The relationships between maize yield brought by K application, FCRs and the basic yields were established to determine the effects of K fertilizer on maize yield and the regional difference. 【Results】 In the -K treatment, maize yields ranged from 3.29–14.5 t/hm² and averaged 8.44 t/hm² in eastern humid mountainous area (EHMA), ranged from 3.77–15.3 t/hm² and averaged 9.45 t/hm² in central sub-humid plain area (CSPA), and ranged from 3.89–12.84 t/hm² and averaged 8.11 t/hm² in western semi-arid plain area (WSPA). The K fertilization significantly increased maize yield across the ecological zones, with averaged yield increases of 1.31 t/hm² (18.1%) in EHMA, 1.06 t/hm² (12.2%) in CSPA and 1.30 t/hm² (17.4%) in WSPA, respectively. Under current optimal K fertilizer management practices, the averaged AE of K fertilizer was 19.7 kg/kg in EHMA, 14.6 kg/kg in CSPA, and 20.2 kg/kg in WSPA. The values for FCR of K fertilizer were 13.9%, 10.2% and 13.3% in the three ecological zones, respectively. Statistical analysis results indicated that maize yield response were equal among different ecological zones, but yield increase rate was significantly higher in EHMA than that in CSPA. Both the highest AE and FCR of K fertilizer were observed in EHMA. A significant positive and linear correlation was observed in maize yields between +K and -K treatments in each ecological zone, the model equation was $y = 0.769x + 3261$ ($R^2 = 0.616^{**}$) for EHMA, $y = 0.883x + 2158$ ($R^2 = 0.757^{**}$) for CSPA and $y = 0.873x + 2328$ ($R^2 = 0.637^{**}$) for WSPA. Meanwhile, a significant negative and logarithmic correlation was observed between FCRs of K fertilizer and maize yields in -K treatment, these model equations were $y = -28.4 \ln(x) + 270.1$ ($R^2 = 0.348^{**}$), $y = -15.9 \ln(x) + 156.1$ ($R^2 = 0.172^{**}$) and $y = -16.3 \ln(x) + 160.6$ ($R^2 = 0.123^{**}$), respectively. Compared with the other ecological zones, with the increasing of soil K supply capacity, EHMA showed larger increase in maize yield in +K treatment and greater decrease in FCR of K fertilizer.

【Conclusions】 The maize K fertilizer management in Jilin Province should be optimized based on regional soil K content, natural climatic conditions and crop responses to K fertilizer. At the present stage, more K fertilizer should be applied in EHMA to enhance soil K supply capacity and ensure high and stable grain yield.

Key words: Jilin Province; soil potassium; regional difference; potash use efficiency; maize grain yield

我国土壤钾素具有南低北高、东低西高的规律性分布特征, 东北地区土壤钾素含量相对丰富^[1]。但是, 随着高产作物品种的大范围应用以及广大农户长期以来忽视施用钾肥, 近年来东北地区土壤钾普遍出现亏缺, 对作物生产造成负面影响, 并在一些区域成为养分限制因素^[2-5]。另一方面, 我国钾肥资源相对紧缺, 长期依赖进口, 并一度受到国际钾矿垄断企业联盟的高价供应限制, 严重影响了国家粮食安全与社会稳定^[6-7]。因此, 明确作物施用钾肥的增产效应及生态区差异, 对优化钾肥的区域配置与施用、提高钾肥资源利用效率及粮食生产能力具有重要意义。

玉米对钾素的需求量较大, 生产百公斤籽粒植株的钾素吸收量在 1.84~2.77 kg 之间, 远高于磷素而与氮素接近^[8-12]。大量单点试验或长期定位试验研究表明, 合理施钾可促进玉米生长发育, 提高光合作用和同化物转运能力, 增强植株抗病、抗旱和抗倒伏能力, 提高玉米产量及籽粒品质^[13-20]。区域研究方面, 20 世纪 40 年代和 60 年代的两次全国性肥效

试验均表明我国多数地区作物施用钾肥无明显增产作用^[1, 21]。1981—1983 年开展的第三次全国肥效试验中, 玉米施钾增产效应以黄淮海地区最高, 每公斤钾肥 (K₂O) 平均增产 10 kg, 其后依次为华南 (6.6 kg)、长江中下游 (3.8 kg) 和东北地区 (1.6 kg), 而西北、北部高原和青藏高原地区无增产效果^[21]。张福锁等^[22]总结 2001—2005 年河北、天津和陕西 100 个田间试验表明, 玉米平均施钾 116 kg/hm², 平均钾肥农学利用率为 5.7 kg/kg。何萍等^[23]基于 2010—2012 年间北方七省 373 个田间试验发现, 玉米施钾可增产 9~4079 kg/hm², 以辽宁最高 (1532 kg/hm²) 而山东最低 (383 kg/hm²)。单燕等^[24]分析陕西省“3414”玉米肥效试验发现, 全省平均施钾量仅 19.7 kg/hm², 土壤钾素呈严重亏缺状况。而渭北旱塬地区玉米施钾平均可增产 7.9%, 平均产量贡献率和农学利用率分别为 7.0% 和 9.5 kg/kg^[25]。综上所述, 不同地区和年代间玉米施钾的增产效应存在明显差异。吉林省作为我国玉米主产省, 尚缺乏对区域尺度上玉米施钾效应现状的了解, 不同生态区之间施钾效应的差异

也不清楚, 难以为区域钾肥的优化管理和高效利用提供指导。本研究通过分析 2005—2013 年间吉林省“3414”玉米田间试验数据, 研究生态区及县域尺度上玉米施钾的产量反应和钾肥利用效率, 分析玉米施钾效应对土壤基础供钾能力的响应差异, 为区域钾肥的优化配置与高效施用提供参考。

1 材料与方法

本研究整理 2005—2013 年测土配方施肥项目在吉林省开展的 1110 个“3414”玉米田间试验, 选取处理 6 ($N_2P_2K_2$) 和处理 8 ($N_2P_2K_0$), 分别记为施钾 (+K) 和不施钾 (-K) 处理。钾肥试验的研究范围、区域划分及试验数量与氮肥、磷肥试验一致^[26-27], 东、中、西三大区域试验田块耕层土壤平均速效钾含量分别为 116 mg/kg (24~374 mg/kg)、130 mg/kg (34~320 mg/kg) 和 123 mg/kg (42~292 mg/kg), 其他土壤理化性质详见文献^[26-27]。不同地区玉米的钾肥 (K_2O) 用量差异明显 (图 1)。中部地区施钾量整体上明显较高, 所有县市均高于 66 kg/hm², 77.8% 的县市超过 74 kg/hm², 平均达 74.4 kg/hm² (变异系数为 5%), 最高为公主岭市 (80.4 kg/hm²) 而最低为扶余市 (66.9 kg/hm²)。西部地区平均施钾量为 69.9 kg/hm² (变异系数为 13%), 县域间差异较大, 最高的前郭县达 77.0 kg/hm² 而最低的通榆县仅 47.5 kg/hm²。东部地区施钾量整体偏低, 平均为 67.6 kg/hm² (变异系数为 9%), 20% 的县市高于 74.4 kg/hm² 而 30% 的县市低于 66 kg/hm²。除施钾量差异外, 所有试验两处理的氮、磷肥用量一致, 东、中、西部地区的平均氮

肥 (N) 用量分别为 155、177 和 162 kg/hm², 平均磷肥 (P_2O_5) 用量分别为 62.2、72.0 和 72.2 kg/hm²。

钾肥试验的试验时间与地点、土壤类型与理化性质、供试品种与肥料以及施肥方法、样品采集分析与产量测定方法、参数计算与统计分析等与氮、磷肥试验一致^[26-27]。其中, 各参数的具体计算方法如下:

钾肥农学利用率 (agronomic efficiency of K fertilizer, AE, kg/kg), 指单位施钾量所增加的作物籽粒产量, 即 $AE = (Y - Y_0)/F$, Y 为施钾区作物产量, Y_0 为无钾区作物产量, F 为施钾量。

钾肥偏生产力 (partial factor productivity of K fertilizer, PFP, kg/kg), 指投入单位钾肥所生产的作物籽粒产量, 即 $PFP = Y/F$ 。

钾肥贡献率 (K fertilizer contribution rate) = $(Y - Y_0)/Y \times 100\%$ 。

2 结果与分析

2.1 吉林省不同区域玉米施钾的产量效应

吉林省玉米产量受施用钾肥和区域差异的显著影响, 但交互作用不显著 (图 2)。不论施钾与否, 各区域玉米产量高低顺序均为: 中部 > 东部 > 西部。不施钾条件下, 东、中、西部玉米平均产量分别为 8.44 t/hm² (3.29~14.5 t/hm²)、9.45 t/hm² (3.77~15.3 t/hm²) 和 8.11 t/hm² (3.89~12.84 t/hm²), 东、西部与中部的产量差分别为 1.01 和 1.35 t/hm²。施钾后三大区域玉米平均产量分别增至 9.75 t/hm² (5.27~16.90 t/hm²)、10.51 t/hm² (5.40~15.84 t/hm²) 和 9.41 t/hm²

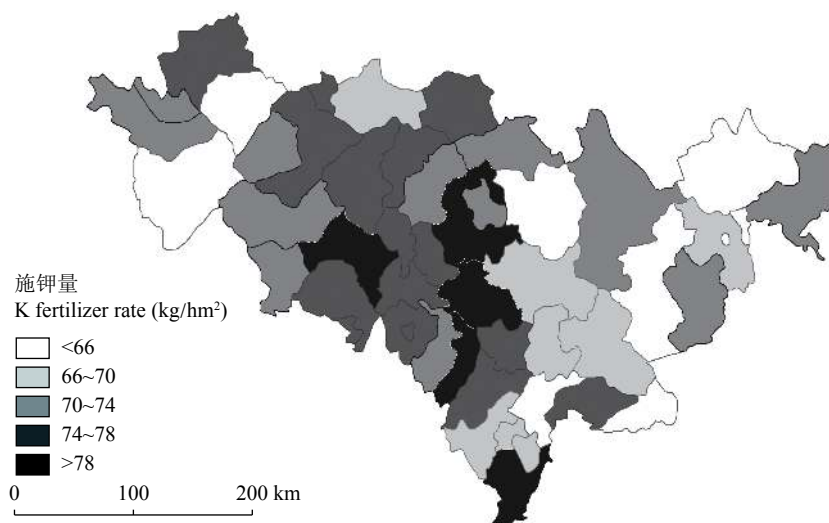


图 1 吉林省玉米施钾量的县域差异

Fig. 1 County scale differences in K fertilization rate of maize in Jilin Province

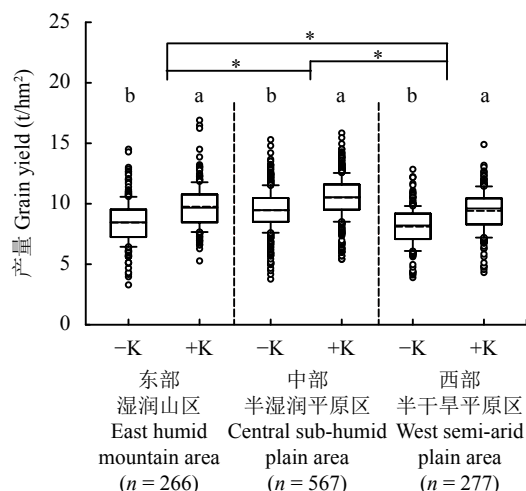


图2 吉林省不同区域玉米施钾的产量效应

Fig. 2 Maize yield responses to K fertilizer in different regions of Jilin Province

[注 (Note): 箱子不同小写字母表示施钾处理间差异显著 The different lowercase letters above boxes indicate significant differences between +K and -K treatments ($P < 0.05$). *—区域间差异显著 Significant differences among regions at 0.05 level. 每个箱子上、下线段分别表示 25% 和 75% 分位值, 箱子内部虚线和实线分别表示平均值和中值 The upper and lower limits of each box represent 25% and 75% percentiles, the horizontal dashed and solid lines inside each box indicate mean and median values, respectively.]

(4.31~14.90 t/hm²), 东、西部与中部的产量差减小, 分别为 0.75 和 1.09 t/hm²。

图3显示, 吉林省中部各县市玉米产量明显较高, 且县域间变异较小 (-K 和 +K 处理下均为 10%)。相比中部地区, 东部地区玉米产量较低、县域间变异略高 (变异系数分别为 11% 和 12%), 而西部地区产量总体偏低, 且县域间差异较大 (变异系数

分别为 14% 和 17%)。-K 处理吉林省玉米产量最高的县市为中部的前郭县 (11.9 t/hm²), 最低为东部的靖宇县 (6.5 t/hm²) (图3A)。全省范围内有 14 个县市玉米产量高于 9.3 t/hm², 其中东、中、西部分别有 3、9 和 2 个, 占各地区总县市比例分别为 15%、50% 和 20%。中部地区所有县市玉米产量均高于 8.0 t/hm², 而东、西部地区分别有 6 个和 3 个县市低于 8.0 t/hm², 占比均为 30%。+K 处理全省所有县市玉米产量均超过 8.0 t/hm², 最高为中部的吉林市 (12.7 t/hm²), 最低则为西部的长岭县 (8.2 t/hm²) (图3B)。玉米产量高于 9.3 t/hm² 的县市数量增加至 36 个, 东、中、西部分别有 12、17 和 7 个, 占比分别为 60%、95% 和 70%。分析发现, 玉米基础产量与施钾产量在县域间存在极显著的线性相关关系, 方程为 $y = 0.915x + 1881$ (y 为施钾产量, x 为基础产量), 决定系数达 0.832。

2.2 吉林省不同区域玉米施钾的增产效果

吉林东、中、西部玉米施钾的增产量平均分别为 1.31、1.06 和 1.30 t/hm², 平均增幅分别为 18.1%、12.2% 和 17.4% (表1)。协方差分析表明, 三大区域间玉米施钾的增产量无显著差异, 而增幅以东部显著高于中部。东部玉米施钾的增产量和增幅在县域间存在较大变异, 变异系数分别为 55% 和 56% (图4)。全省施钾增产反应最高和最低的县市均在东部, 分别为靖宇县 (增产 2.38 t/hm², 39.0%) 和龙井市 (增产 0.15 t/hm², 3.1%), 全区施钾增产超过 1.4 t/hm² 和增幅超过 16.0% 的县市比例均占 35%。西部玉米施钾的增产量和增幅在县域间也有较大变

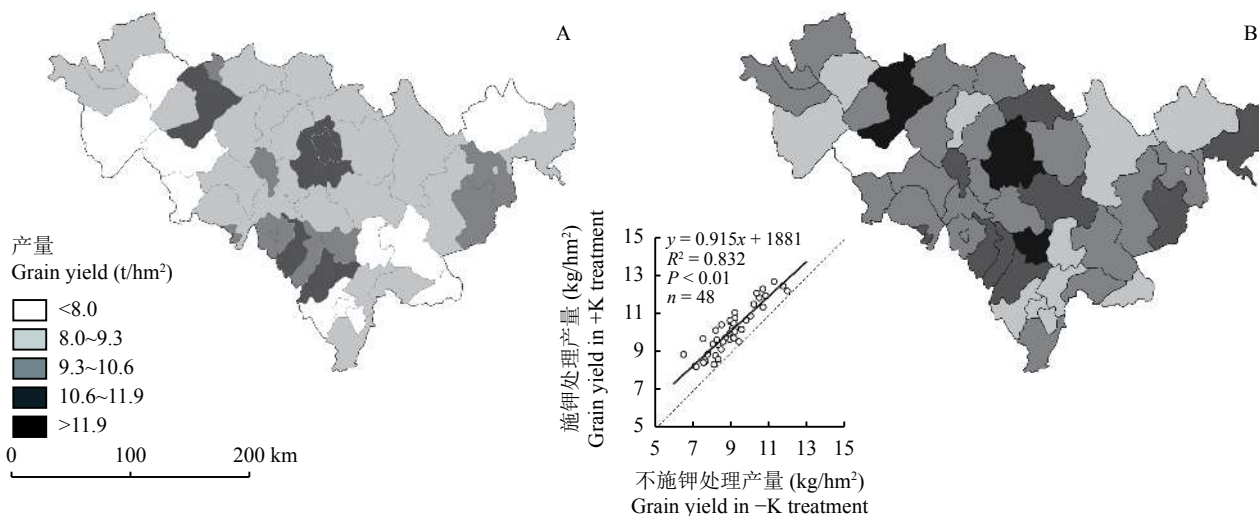


图3 吉林省玉米不同县域的不施钾产量 (A) 与施钾产量 (B) 及其相关关系

Fig. 3 Maize yields in -K (A) and +K (B) treatments and their relationship in the different counties of Jilin Province

表 1 吉林省不同区域玉米施钾的增产效果和钾肥利用率
Table 1 Maize yield increase and K fertilizer use efficiency in the different regions of Jilin Province

地区 Region	样本数 Sample number	项目 Item	增产量 Yield increase (t/hm ²)	增产率 Yield increase rate (%)	农学利用率 (kg/kg) Agronomic efficiency	肥料贡献率 (%) Fertilizer contribution rate
东部湿润山区 East humid mountain area	266	平均值 Mean	1.31 ± 1.15	18.1 ± 17.2	19.7 ± 15.0	13.9 ± 10.6
		范围 Range	-1.25~5.57	0~129.7	0~74.2	0~56.5
中部半湿润平原区 Central sub-humid plain area	567	平均值 Mean	1.06 ± 0.86	12.2 ± 9.9	14.6 ± 11.2	10.2 ± 7.3
		范围 Range	-1.19~4.62	0~65.4	0~67.9	0~39.6
西部半干旱平原区 West semi-arid plain area	277	平均值 Mean	1.30 ± 1.02	17.4 ± 16.0	20.2 ± 14.8	13.6 ± 9.3
		范围 Range	-0.43~6.42	0~165.0	0~71.2	0~62.3
单因素方差分析 (P) One-way ANOVA		自变量 Independent variable	<0.001**	<0.001**	<0.001**	<0.001**
		协变量 Concomitant variable	0.311 ^{ns}	<0.036*	<0.001**	<0.001**
协方差分析 (P) UNIANOVA		自变量 Independent variable	<0.001**	<0.001**	<0.001**	<0.001**
		协变量 Concomitant variable	0.133 ^{ns}	0.012*	<0.001**	<0.001**
多重比较 (P) Multiple comparisons		EHMA vs CSPA	0.414 ^{ns}	<0.638 ^{ns}	<0.001**	<0.001**
		EHMA vs WSPA	0.547 ^{ns}	<0.068 ^{ns}	0.961 ^{ns}	0.959 ^{ns}
		CSPA vs WSPA				

注 (Note): 协方差分析中, 增产量、增产率、农学利用率和肥料贡献率的协变量分别为不施钾产量、不施钾产量、施钾量和施钾产量 In UNIANOVA, the concomitant variables were maize yield in -K treatment for yield increase, maize yield in -K treatment for yield increase rate, K fertilization rate for agronomic efficiency and maize yield in +K treatment for fertilizer contribution rate, respectively. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ns—差异不显著 No significant difference.

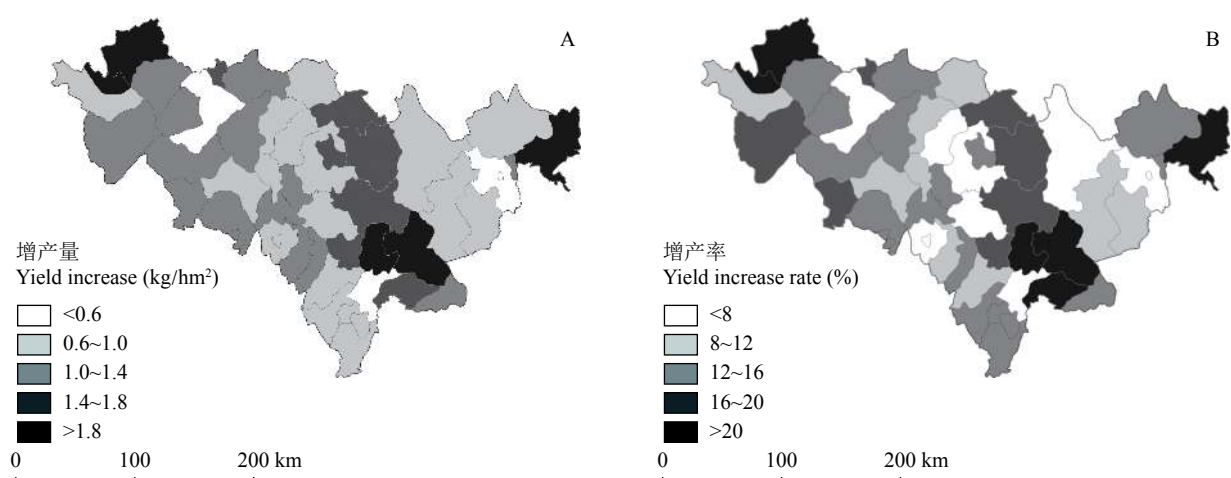


图 4 吉林省不同县域玉米施钾的增产量 (A) 与增产率 (B)
Fig. 4 Maize yield increase (A) and yield increase rate (B) of K fertilizer applied in the different counties of Jilin Province

异, 变异系数分别为 43% 和 45%, 增产效应最高为镇赉县 (增产 1.96 t/hm², 27.9%) 而最低为前郭县 (增产 0.26 t/hm², 2.2%), 施钾增产超过 1.4 t/hm² 和增幅超过 16.0% 的县市比例分别为 30% 和 50%。相比东、西部, 中部县域间玉米施钾的增产量和增幅变

异明显较小, 变异系数分别为 31% 和 30%, 增产效应最高为舒兰市 (增产 1.58 t/hm², 17.9%) 而最低为磐石县 (增产 0.61 t/hm², 8.0%)。中部施钾增产超过 1.4 t/hm² 和增幅超过 16.0% 的县市比例分别为 16.7% 和 5.6%, 均低于东、西部。

2.3 吉林省不同区域玉米的钾肥利用率

以农学利用率和肥料贡献率表征钾肥利用率, 吉林东、中、西部玉米施钾的平均农学利用率分别为 19.7、14.6 和 20.2 kg/kg, 而平均肥料贡献率分别为 13.9%、10.2% 和 13.6%。协方差分析显示, 东部玉米施钾的农学利用率和肥料贡献率显著高于中、西部。钾肥农学利用率区域差异显示 (图 5A), 全省最高、最低值分别为东部的靖宇县 (35.7 kg/kg) 和西部的前郭县 (3.4 kg/kg)。东、中、西部钾肥农学利用率在县域间的变异系数分别为 48.3%、30.2% 和 40.8%, 中部明显较低。三大区域钾肥农学利用率高于 14 kg/kg 的县市比例分别为 65%、50% 和 80%, 东、西部分别有 25% 和 40% 的县市钾肥农学利用率高于 22 kg/kg, 而中部所有县市均低于 22 kg/kg。图 5B 显示, 全省钾肥贡献率最高和最低的县市与农学利用率一致, 分别为东部的靖宇县 (26.7%) 和西部的的前郭县 (2.1%)。各区域钾肥贡献率在县域间的变异情况以中部 (27.0%) 明显低于东、西部 (分别为 48.4% 和 39.3%)。东、中、西部钾肥贡献率高于 7% 的县市比例分别为 85%、77.8% 和 90%, 而高于 13% 的县市比例分别为 35%、5.6% 和 50%, 中部均相对较低。

2.4 吉林省不同区域玉米施钾产量、钾肥贡献率与土壤基础供钾能力的关系

-K 处理玉米产量水平可表征土壤基础供钾能力。分析发现, 吉林省各生态区域玉米+K 与-K 处理产量间均存在极显著正相关关系 (图 6), 线性回归方程决定系数在 0.616~0.757 之间, 说明土壤基础供钾能力差异是玉米施钾产量主要的变异来源。随-K

处理玉米产量增加, 各区域+K 处理产量也均随之提高, 可见较高的土壤基础供钾能力是施肥后获得高产的基础。而且, 东、中、西部回归方程的斜率大小明显不同, 说明不同区域土壤基础供钾能力对玉米施钾产量的影响程度存在差异。相比中、西部, 东部土壤基础供钾能力对玉米+K 处理产量的影响相对较小。

吉林省不同区域玉米施钾的肥料贡献率与-K 处理产量间均存在显著的对数关系 (图 7)。肥料贡献率随-K 处理产量的增加而逐渐下降, 表明土壤基础供钾能力的提高减少了玉米对外源钾肥的依赖。相比中、西部, 东部钾肥贡献率与-K 处理产量间回归方程的曲线斜率明显较大, 说明随土壤基础供钾能力的提高其钾肥贡献率的降幅更大。

3 讨论

钾是土壤含量最高的大量营养元素, 但是受母质、气候等成土条件的影响, 不同地区土壤钾素的丰缺状况差异很大^[28]。一般认为, 我国东北地区土壤钾素含量普遍较为丰富, 作物施钾的增产效果较低。1980 年代全国化肥试验协作网在东北地区的试验结果显示, 玉米施用 1 kg N、P₂O₅、K₂O 可平均分别增产 15.7、13.1 和 1.6 kg, 钾肥的增产效果远低于氮、磷肥^[21]。但是, 近年来东北地区土壤钾素含量开始下降, 玉米施钾增产的相关报道也逐渐增多^[2-3, 29-30]。究其原因, 主要是由于高产作物品种的大范围施用以及农户长期以来忽视钾肥的补充施用所致^[3-4]。本研究结果显示, 吉林省东、中、西生态区目前每施用 1 kg K₂O 玉米平均分别增产 19.7、14.6 和 20.2

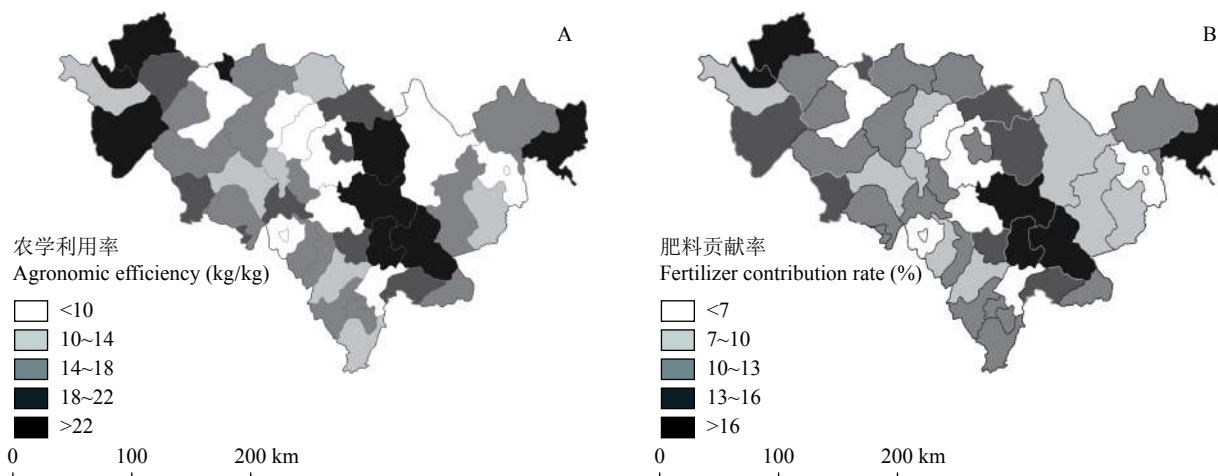


图 5 吉林省不同县域玉米施钾的农学利用率 (A) 和肥料贡献率 (B)

Fig. 5 Agronomic efficiency (A) and fertilizer contribution rate (B) of K fertilizer in the different counties of Jilin Province

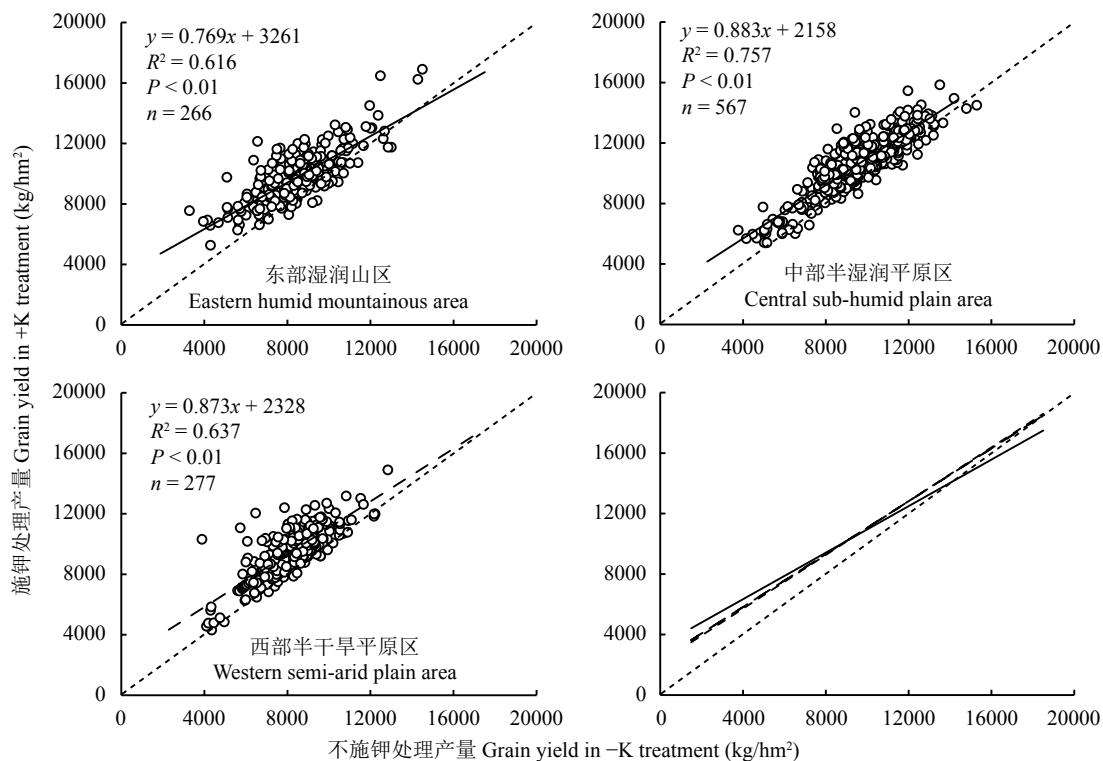


图 6 吉林省不同区域玉米施钾产量与不施钾产量的关系

Fig. 6 Relationships between maize yields in +K and -K treatments in different regions of Jilin Province

[注 (Note): 图中虚线为 1 : 1 线 The dash line indicates 1 : 1 diagonal line.]

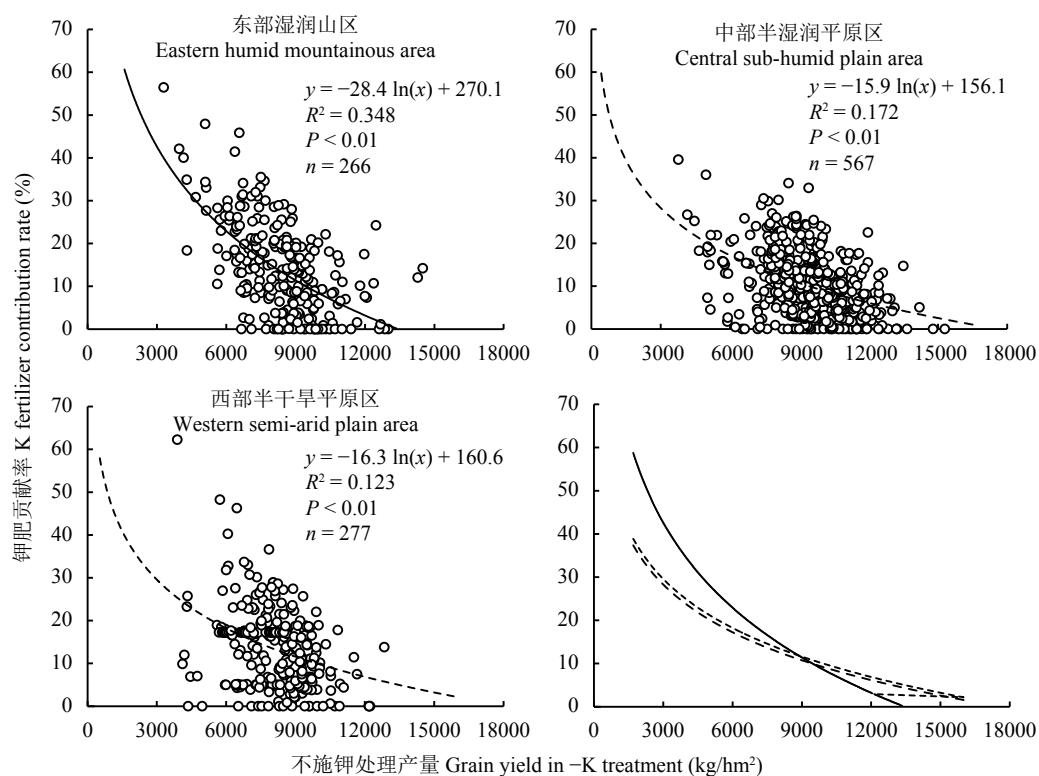


图 7 吉林省不同区域玉米钾肥贡献率与-K 处理产量的关系

Fig. 7 Relationships between K fertilizer contribution rate and maize yield in -K treatment in different regions of Jilin Province

kg, 相比 30 多年前增加了 8.1~11.6 倍^[21]。目前, 三大生态区玉米施钾的平均产量增幅分别为 18.1%、12.2% 和 17.4%, 平均产量贡献率分别为 13.9%、10.2% 和 13.6%, 已接近施用磷肥的产量增幅和产量贡献率^[27]。可见, 施用钾肥已成为保障吉林省玉米高产稳产不可忽视的重要措施。目前, 我国玉米生产提倡通过增密种植实现增产增效^[31], 因此更需重视钾肥的合理施用以提高植株抗病和抗倒伏能力。

影响钾肥肥效的因素包括气候条件、耕作制度、土壤钾素供应能力、氮磷肥施用状况以及钾肥品种与施用技术等, 其中土壤钾素肥力状况是最重要的因素^[1]。本研究发现, 吉林省东部地区土壤速效钾含量较中、西部地区略低, 而施钾量水平也相对较低, 因此其单位钾肥的增产效应相对较好, 产量增幅高于中部地区, 农学利用效率和钾肥贡献率显著高于中、西部地区。另外, 由于长白山对季风的阻挡作用, 吉林东部地区降雨较多而光照偏少, 玉米较易遭受低温、涝害及寡照的不利影响^[32]。施钾可提高玉米的光合作用及同化物运输, 并增强植株的抗逆性和抗倒伏能力^[1, 13, 18-19], 因而有助于东部地区玉米获得较高的增产效应。本研究还显示, 随着土壤基础供钾能力的提高, 东部地区玉米施钾产量的增幅和钾肥贡献率的降幅明显高于其他地区。这也反映出东部地区土壤供钾能力较弱, 而玉米产量对外源钾肥的依赖程度更高。目前, 随着复合肥及玉米专用肥的推广应用, 东部地区农户忽视钾肥施用的状况有所改善^[6, 33]。但是, 该地区仍需进一步加强平衡施肥理念和技术的宣传推广, 积极合理地施用钾肥并结合秸秆还田等措施提高土壤钾的供应能力。

施肥增产效应的高低是指导区域作物科学养分管理的重要依据^[12, 34-35]。结合已有的氮、磷肥研究^[26-27]及本研究钾肥试验的结果可见, 吉林省不同生态区及县域尺度上玉米施肥的增产效应、肥料利用效率差异显著, 而且不同养分在不同区域的效应表现也不一致。基于自然气候条件、土壤基础供肥能力及作物的肥效反应, 吉林省玉米生产应实行差异化的生态区养分管理策略。总体上, 中部半湿润平原区应以维持作物需求为标准严格控制化肥施用量, 尤其是氮、磷的投入以减少养分盈余与环境损失; 东部湿润山区应适当增加氮、钾肥用量, 并配合抗逆栽培措施以减少逆境影响, 提高光、温利用效率; 西部地区应重视磷肥的科学施用, 同时积极探索和推广高效抗旱补水与水肥一体化技术以发挥水肥耦合效应。另外, 吉林省乃至整个东北地区目前农田

有机肥的施用比例都非常低^[4], 应加强农牧系统资源的综合管理与循环利用, 研究并推广适合不同生态区的畜禽粪便与作物秸秆还田利用技术, 在培肥地力的同时减少环境污染, 促进高产高效绿色可持续农业发展。

4 结论

吉林省东、中、西部地区玉米施钾平均分别增产 1.31 t/hm² (18.1%)、1.06 t/hm² (12.2%) 和 1.30 t/hm² (17.4%), 平均农学利用率分别为 19.7、14.6 和 20.2 kg/kg, 平均肥料贡献率分别为 13.9%、10.2% 和 13.6%。不同区域之间玉米施钾的增产量无显著差异, 而增幅以东部显著高于中部, 农学利用率和肥料贡献率以东部显著高于中、西部。各区域玉米施钾产量与基础产量间均存在显著的正相关关系, 而钾肥贡献率与基础产量间均存在显著的负对数关系。随土壤基础供钾能力提高, 东部玉米施钾产量的增幅和钾肥贡献率的降幅明显高于中、西部。

参 考 文 献:

- [1] 谢建昌, 周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展[J]. 土壤, 1999, 31(5): 244-254.
Xie J C, Zhou J M. Advance in soil potassium research and potassium fertilizer use in China[J]. Soils, 1999, 31(5): 244-254.
- [2] 王秀芳, 张宽, 王立春, 等. 科学管理与调控钾肥, 实现玉米高产稳产[J]. 玉米科学, 2004, 12(3): 92-95.
Zhang X F, Zhang K, Wang L C, et al. Manage and control potash fertilizer scientifically and realize the high and stable yield for maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2004, 12(3): 92-95.
- [3] 谭德水, 金继运, 黄绍文. 长期施钾对东北春玉米产量和土壤钾素状况的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(10): 2234-2240.
Tan D S, Jin J Y, Huang S W. Effect of long-term application of K fertilizer on spring maize yield and soil K in Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(10): 2234-2240.
- [4] 高强, 冯国忠, 王志刚. 东北地区春玉米施肥现状调查[J]. 中国农学通报, 2010, 26(14): 229-231.
Gao Q, Feng G Z, Wang Z G. Present situation of fertilizer application on spring maize in Northeast China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(14): 229-231.
- [5] 焉莉, 王寅, 冯国忠, 等. 吉林省农田土壤肥力现状及变化特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4800-4810.
Yan L, Wang Y, Feng G Z, et al. Status and change characteristics of farmland soil fertility in Jilin Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23): 4800-4810.
- [6] 孙爱文, 张卫峰, 杜芬, 等. 中国钾资源及钾肥发展战略[J]. 现代化工, 2009, 29(9): 10-16.
Sun A W, Zhang W F, Du F, et al. China's development strategy on potash resources and fertilizer[J]. Modern Chemical Industry, 2009, 29(9): 10-16.

- [7] 商照聪, 刘刚, 包剑. 我国钾资源开发技术进展与展望[J]. *化肥工业*, 2012, 39(4): 5–8.
Shang Z C, Liu G, Bao J. Progress and prospect of technology for development of potassium resources in China[J]. *Chemical Fertilizer Industry*, 2012, 39(4): 5–8.
- [8] Liu M Q, Yu Z R, Liu Y H, *et al.* Fertilizer requirements for wheat and maize in China: the QUEFTS approach[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74(3): 245–258.
- [9] Xu X P, He P, Pampolono M F, *et al.* Nutrient requirements for maize in China based on QUEFTS analysis[J]. *Field Crops Research*, 2013, 150(15): 115–125.
- [10] Setiyono T D, Walters D T, Cassman K G, *et al.* Estimating maize nutrient uptake requirements[J]. *Field Crops Research*, 2010, 118(2): 158–168.
- [11] Blender R R, Haegerle J W, Ruffo M L, *et al.* Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids[J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105(1): 161–170.
- [12] 吴良泉. 基于“大配方、小调整”的中国三大粮食作物区域配肥技术研究[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2014.
Wu L Q. Fertilizer recommendations for three major cereal crops based on regional fertilizer formula and site specific adjustment in China[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2014.
- [13] Pettigrew W T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton[J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 133(4): 670–681.
- [14] 李文娟, 何萍, 金继运. 钾素对玉米茎髓和幼根超微结构的影响及其与茎腐病抗性的关系[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(4): 729–736.
Li W J, He P, Jin J Y. Effect of potassium on ultrastructure of maize stalk pith and young root and their relation to resistance to stalk rot[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(4): 729–736.
- [15] Zhang H M, Yang X Y, He X H, *et al.* Effect of long-term potassium fertilization on crop yield and potassium efficiency and balance under wheat-maize rotation in China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(2): 154–163.
- [16] 李波, 张吉旺, 崔海岩, 等. 施钾量对高产夏玉米抗倒伏能力的影响[J]. *作物学报*, 2012, 38(11): 2093–2099.
Li B, Zhang J W, Cui H Y, *et al.* Effects of potassium application rate on stem lodging resistance of summer maize under high yield conditions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(11): 2093–2099.
- [17] He C, Ouyang Z, Tian Z, *et al.* Yield and potassium balance in a wheat-maize cropping system of the North China Plain[J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(4): 1016–1022.
- [18] Radulov I, Berbecea A, Crista F, *et al.* Mineral fertilization effect on soil potassium and corn quality and yield[J]. *Research Journal of Agricultural Science*, 2012, 44(3): 108–114.
- [19] Amanullah, Iqbal A, Irfanullah, *et al.* Potassium management for improving growth and grain yield of maize (*Zea mays* L.) under moisture stress condition[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 34627.
- [20] 张玉芹, 杨恒山, 高聚林, 等. 施钾方式对春玉米根系特征的影响[J]. *玉米科学*, 2015, 23(2): 130–136.
Zhang Y Q, Yang H S, Gao J L, *et al.* Effects of potassium fertilization methods on root characteristics of spring maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(2): 130–136.
- [21] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国化肥区划[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1986.
Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Chinese chemical fertilizer planning[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1986.
- [22] 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.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915–924.
- [23] 何萍, 徐新朋, 仇少君, 等. 我国北方玉米施肥产量效应和经济效益分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1387–1394.
He P, Xu X P, Qiu S J, *et al.* Yield response and economic analysis of fertilizer application in maize grown in North China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(6): 1387–1394.
- [24] 单燕, 李水利, 李茹, 等. 陕西省玉米土壤肥力与施肥效应评估[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1430–1437.
Shan Y, Li S L, Li R, *et al.* Analysis of soil fertility and fertilizer efficiency of maize field in Shaanxi[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1430–1437.
- [25] 刘芬, 同延安, 王小英, 等. 渭北旱塬春玉米施肥效果及肥料利用率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 48–55.
Liu F, Tong Y A, Wang X Y, *et al.* Effects of N, P and K fertilization on spring maize yield and fertilizer use efficiency in Weibei rainfed highland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(1): 48–55.
- [26] 王寅, 郭昶, 高强, 等. 吉林省不同生态区玉米施氮效果与氮肥利用效率差异[J]. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1464–1475.
Wang Y, Guo D, Gao Q, *et al.* Differences in yield response and N use efficiency of maize crops in different ecological zones of Jilin province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(6): 1464–1475.
- [27] 王寅, 郭昶, 高强, 等. 吉林省不同生态区玉米施磷的增产效应差异[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(9): 1635–1645.
Wang Y, Guo D, Gao Q, *et al.* Differences in maize yield responses to phosphorus fertilizer in different ecological zones of Jilin province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(9): 1635–1645.
- [28] 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.
Huang S W, Jin J Y. Research advance in soil potassium form and its plant availability[J]. *Soil and Fertilizer*, 1995, (5): 23–29.
- [29] 侯云鹏, 张磊, 孔丽丽, 等. 施钾对不同肥力土壤玉米钾素吸收、分配及产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(11): 1333–1339.
Hou Y P, Zhang L, Kong L L, *et al.* Effect of potassium application rate on potassium absorption, distribution and yield of spring maize under different soil fertilities[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(11): 1333–1339.
- [30] 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1110–1118.
Xie J G, Hou Y P, Yin C X, *et al.* Effect of potassium application and straw returning on spring maize yield, nutrient absorption and soil potassium balance[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014,

- 20(5): 1110–1118.
- [31] 张卫建. 对我国玉米绿色增产增效栽培技术的探讨: 增密减氮[J]. 作物杂志, 2015, (4): 1–4.
- Zhang W J. On the cultivation approach to green improvement of maize yield and N use efficiency in China: dense planting with less N fertilizer[J]. *Crops*, 2015, (4): 1–4.
- [32] 闫孝贡, 刘剑钊, 张洪喜, 等. 吉林省春玉米大面积增产与资源增效限制因素评估[J]. 吉林农业科学, 2012, 37(6): 9–11.
- Yan X G, Liu J Z, Zhang H X, *et al.* Assessment of limiting factors on high yield of large-scale spring maize production and high efficiency of resource in Jilin province[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2012, 37(6): 9–11.
- [33] 冯国忠, 张强, 顾明, 等. 吉林玉米带春玉米专用肥配方的确定[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13): 225–229.
- Feng G Z, Zhang Q, Gu M, *et al.* Determination of the formulation of special fertilizer for spring maize in corn belt of Jilin[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(13): 225–229.
- [34] Simpson R J, Oberson A, Culvenor R A, *et al.* Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems[J]. *Plant and Soil*, 2011, 349(1–2): 89–120.
- [35] Jordan-meille L, Rubak G H, Ehlert P A I, *et al.* An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations[J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28(4): 419–435.