

施用常规磷水平的 80% 可实现玉米高产、 磷素高效利用和土壤磷平衡

吴启华¹, 刘晓斌¹, 张淑香^{1*}, 尹彩侠², 李桂花¹, 谢佳贵²

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081;

2 吉林省农业科学院, 吉林长春 130118)

摘要: 【目的】近年来, 黑土有效磷含量呈逐年增加趋势。研究田间条件下, 黑土的玉米产量及构成因素、磷素的吸收利用和土壤有效磷含量变化对不同施磷水平的响应, 为黑土区的磷肥合理施用和地力培育提供理论依据。【方法】在土壤有效磷初始含量较高 (30.15 mg/kg) 的吉林公主岭黑土区, 进行了 3 年的田间试验, 以不施磷肥为对照 (P0), 设置当地磷肥用量的 80% (P_2O_5 60 kg/hm², P60) 和当地施肥量 (P_2O_5 75 kg/hm², P75), 研究不同施磷水平对玉米产量及产量性状、磷素吸收分配、磷肥利用效率的影响, 并分析了土壤表观磷平衡和有效磷含量的变化。【结果】连续三年 (2009~2011 年) 不同施磷水平下, 玉米的产量随施磷水平的提高而增加, 到第三年施磷处理的玉米产量显著高于不施磷处理, 随施磷年限增加, P60 与 P75 处理的增产效应差距缩小。P75 处理吸收的磷素高于 P60, 但分配到籽粒中的磷素比例逐年下降, 说明其吸收的磷素未高效转移到籽粒中, 存在磷素奢侈吸收现象。两个施磷处理的磷肥利用率均为 P75 > P60, 磷肥偏生产力均为 P60 > P75, 说明 P60 处理中土壤基础养分和施入磷肥的综合效应更大。2009~2011 年, 土壤的表观磷平衡, P0 处理一直处于亏缺状态, P60 和 P75 处理均有盈余。P0、P60 和 P75 处理的土壤有效磷的变化量为 -15.4、-0.19 和 3.50 mg/kg。有效磷含量变化与表观磷盈余量呈极显著线性正相关, 土壤 P 盈余每增加 100 kg/hm², 有效磷含量增加 9.6 mg/kg。【结论】在有效磷含量较高的黑土区, 适当减少磷肥用量 (60 kg/hm² P_2O_5 , 比传统施肥减少 20%) 能获得与传统施磷相当的产量, 维持土壤适宜的有效磷含量和供磷水平, 并能保证磷肥的高效利用。可以考虑将 P_2O_5 60 kg/hm² 作为黑土区的推荐施磷水平。

关键词: 施磷水平; 玉米产量; 磷素利用; 土壤磷平衡

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)06-1468-09

Application of 80% of routine phosphorus rate to keep high yield and P efficiency of maize and P balance in soil

WU Qi-hua¹, LIU Xiao-bin¹, ZHANG Shu-xiang^{1*}, YIN Cai-xia², LI Gui-hua¹, XIE Jia-gui²

(1 National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2 Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130118, China)

Abstract: 【Objectives】 Soil Olsen P contents show an increasing trend in black soil in recent years. In order to provide theoretical basis for rational amount of applied phosphorus and soil fertility improvement, this study tried to investigate the response of maize yield, component factors, nutrient absorption and distribution, phosphorus use efficiency and the change of soil Olsen P to P fertilizer rates in black soil under field conditions. 【Methods】 A 3-year field experiment was conducted in Gongzhuling City, Jilin Province, where the initial soil Olsen P content was as high as 30.15 mg/kg. The change of maize yield and component factors, P absorption and distribution, P

收稿日期: 2016-01-05 接受日期: 2016-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41471249); 公益性行业 (农业) 科研专项项目 (201503120) 资助。

作者简介: 吴启华 (1987—), 女, 湖北咸宁人, 博士研究生, 主要从事植物营养研究。

* 通信作者 E-mail: zhangshuxiang@caas.cn

use efficiency, the apparent P balance and change of soil Olsen P were analyzed under the P_2O_5 application rate of 0, 60 and 75 kg/hm². **【 Results 】** The results showed that the application of phosphorus fertilizer increased the maize yields, in 2011 the yields in P60 and P75 treatments were significantly higher than in P0, but the yield gap between the P60 and P75 treatments decreased with years. More P was absorbed in P75 than in P60, but the proportion was decreased in the P75, which indicated that the P absorption was not transported to grain effectively and there was luxury absorption of P. The P use efficiency in P75 was higher than in P60, while the partial factor productivity of P was higher in P60 than in P75 in all three years, which indicated that the combined effect of basic soil nutrient and applied P was larger in the P60. From 2009 to 2011, the apparent P balance in P0 was in deficient state, while those in P60 and P75 were surplus. The change in soil Olsen P was positively linearly correlated with the P budget ($P < 0.01$), for every increment of 100 kg/km² of P surplus, the corresponding increase in soil Olsen P was 9.6 mg/kg. **【 Conclusions 】** In the black soil with relatively high Olsen P content, application of 20% less of the routine amount of P rate (P_2O_5 , 60 kg/hm²) will meet the demand for high yield, maintains the soil Olsen P content and effective supply ability of phosphorus, and increase the phosphorus utilization efficiency.

Key words: P rates; maize yield; phosphorus utilization; soil phosphorus balance

磷肥投入是保证土壤供磷能力的重要途径, 在提高作物产量方面具有不可替代的作用。但磷肥进入土壤后, 容易形成难以被植物利用的磷酸盐累积在土壤中^[1], 造成磷肥的当季利用率仅 10%~25%^[2]。为了满足日益增长的粮食需求, 农业生产上向土壤中施入大量磷肥, 明显提高了土壤有效磷含量^[3], 但也导致磷素以年均增长 11% 的速率在土壤中累积^[4-5]。合理施用磷肥可以增加土壤总磷库含量, 保证作物高产, 但过量施磷对作物增产作用不明显^[6], 还可能造成水体富营养化等环境问题^[7]。因此研究合理的施磷量对农业生产具有重要指导意义。

很多研究表明, 长期不施磷肥, 土壤有效磷含量会逐渐降低^[8-9], 周宝库等^[10]发现 23 年不施磷肥导致黑土有效磷下降了 60%。但过量施磷对作物增产作用有限, 还会造成有限磷矿资源的浪费, 我国磷肥 (P_2O_5) 施用量从 1980 到 2014 年增加了 5 倍, 但粮食综合产量增幅仅 2 倍, 磷肥产量效应偏低^[11]。合理施用磷肥, 可以提高肥料利用效率, 保证作物高产, 维持土壤肥力^[12-13]。有关磷肥适宜用量的研究很多, 一类是根据土壤的有效磷水平高低, 确定磷肥用量, 如孙克刚等^[14]在河南砂姜黑土区的研究结果表明, 有效磷含量在 6~13、13~21、21~36 和 36~60 mg/kg 水平时, 相应的磷肥推荐用量分别为 150、105、75 和 45 kg/hm²。一类是根据磷肥的利用率来调整施用量, Gergely 等^[15]综述了欧洲大陆磷肥水平对磷利用率的影响, 当施用 P_2O_5 100 kg/hm², 产量较高但利用率较低, 当施用 P_2O_5 50 kg/hm², 产量较低而利用率较高。吴良泉等^[16]提出的磷肥推荐方法综

合考虑作物高产、肥料高效和土壤培肥三方面的关系, 认为我国玉米的推荐磷肥用量为 46~123 kg/hm²。可见, 磷肥用量要根据区域特点来确定。我国不同区域的土壤有效磷水平差异较大, 针对特定的土壤类型, 找到适宜的磷肥用量, 对于提高肥料利用效率, 维持土壤肥力至关重要。

黑土地是我国重要的粮食生产基地, 土壤肥力较高, 适于作物生长。近年来, 黑土有效磷含量呈增加趋势^[10]。然而土壤有效磷含量过高时, 施用磷肥对作物增产作用不明显, 还会造成资源浪费。本研究选取了具有代表性的吉林公主岭黑土 (该试验点的土壤初始有效磷含量为 30.15 mg/kg) 进行了为期 3 年的田间试验, 分析了玉米产量及产量性状、磷素的吸收和分配、磷肥利用效率和土壤磷平衡等对不同施磷水平的响应, 从而确定适宜的磷肥用量, 旨在探索土壤有效磷水平的科学管理, 保证肥料高效利用和作物高产, 为东北乃至全国的磷肥管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

试验于 2009 年 4 月~2011 年 10 月在吉林省公主岭市陶家屯镇定点试验区进行, 位于北纬 43°39', 东经 124°59', 海拔 227 m, 年均温度 5℃~6℃, 有效积温 2600℃~3000℃, 降水量 500~650 mm, 蒸发量 1200~1600 mm。试验期间玉米生长季的降水量分别是 398、689 和 423.6 mm, 具体分布如图 1。

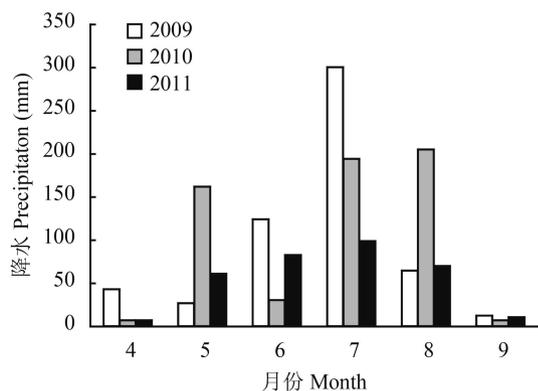


图 1 2009~2011 年玉米季公主岭市降水量

Fig. 1 Precipitation in Gongzhuling City during the maize seasons in 2009–2011

试验区黑土的基本理化性状为：有机质含量 24.63 g/kg、全氮 1.60 g/kg、全磷 0.65 g/kg、全钾 23.80 g/kg、速效氮 125.32 mg/kg、有效磷 (Olsen-P) 30.15 mg/kg、速效钾 168.76 mg/kg、pH 5.26 (水土比 5 : 1)。

1.2 试验设计

试验设 3 个处理：不施磷肥 (P0)、当地习惯磷肥用量的 80% (P_2O_5 60 kg/hm², P60)、当地习惯磷肥用量 (P_2O_5 75 kg/hm², P75)。每个处理 3 次重复，完全随机区组排列。所有处理均施用尿素 N 190 kg/hm² 和氯化钾 K_2O 90 kg/hm²。每个试验小区面积 20 m²，种植 4 行玉米，所有肥料均作基肥条施，再耕作掩埋，施肥深度大约为 10 cm。供试玉米为郑单 958，种植密度为 6×10^4 plant/hm²。

1.3 样品采集与测定

每年玉米成熟期，采集植株样本，每个小区取代表性植株 2 株，剪去根部，分为籽粒、茎、叶和穗轴几部分，均在 105℃ 下杀青 30 min，70℃ 下烘干至恒重，称重并估算小区的茎、叶和穗轴的生物量。取部分籽粒样品测定水分含量，计算玉米籽粒产量 (玉米籽粒是小区的实测值)。各部分烘干样粉碎过 0.5 mm 筛，分别测定磷含量。同时采集苗期和成熟期 0—20 cm 耕层土样，每小区 3 个点，混合后风干、过筛，用于测定土壤全磷、有效磷等指标。

样品分析：植株样品全磷采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮，钒钼黄比色法测定；土壤全磷分析用 $H_2SO_4-HClO_4$ 消煮，钼锑抗比色法；土壤有效磷含量采用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提—钼锑抗比色法^[17]。

作物吸磷量为地上部全部吸磷量，分为籽粒和秸秆 (包括茎、叶和穗轴等) 两大部分。有关计算公式如下^[18]：

作物吸磷量 (kg/hm²) = 籽粒产量 (kg/hm²) × 籽粒含磷量 (%) + 秸秆产量 (kg/hm²) × 秸秆含磷量 (%)；

表观磷素盈亏 (kg/hm²) = 施入土壤磷素总量 (kg/hm²) - 作物 (籽粒 + 秸秆) 吸磷总量 (kg/hm²)；

磷素利用率 = (施磷素区作物吸磷总量 - 不施磷素区作物吸磷总量) / 施磷素量 × 100%；

磷素农学效率 (kg/kg) = (施磷区玉米产量 - 不施磷区玉米产量) / 施磷素量；

磷素偏生产力 (kg/kg) = 施磷素区产量 / 施磷素量。

所有数据均使用 Excel 进行整理；用 SAS 9.0 软件进行单因素方差分析和回归分析，用 Duncan (SSR) 方法对不同处理 3 年间的各指标 (平均值) 进行显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果分析

2.1 不同施磷水平对玉米产量及产量性状的影响

2.1.1 玉米产量变化 从图 2 可看出，2009~2011 年不同施磷水平玉米产量变化各异。P0 处理产量在 2010 年显著高于 2009 和 2011 年，P60 和 P75 处理的产量在后两年显著高于第一年，而 3 个处理的玉米产量均在 2010 年最高，根据国家气象资料，2009~2011 年公主岭玉米生育期 (4 月 26 日至 9 月 30 日) 内积温分别是 3132.5、3184.3 和 3122.1℃，差别较小，而总降水量分别是 398、689 和 423.6 mm。东北大田是雨养农业，作物生长发育受气候 (降水量)

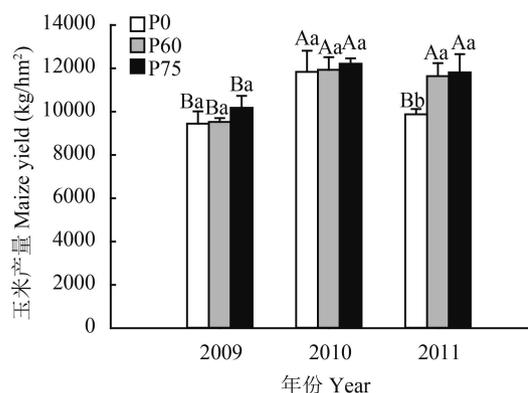


图 2 2009~2011 年不同施磷水平玉米产量

Fig. 2 Maize yields under different P_2O_5 levels from 2009 to 2011

[注 (Note): 图中小写字母表示同一年内不同处理之间差异显著，大写字母表示同一处理不同年份差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above the bars mean significant difference among treatments with a year, and different capital letters mean significant difference among the years for the same treatment ($P < 0.05$).]

影响较大, 2010 年玉米产量较高, 可能由于当年的降水量明显高于其他两年。在同一年份内 3 个处理的产量均随着磷肥用量增大而提高, 直到 2011 年施磷处理 (P60 和 P75) 的产量显著高于不施磷处理 (P0), 连续三年不施用磷肥, 黑土本身的磷养分可能已经无法满足玉米的生长需求。在 2009~2011 年, P60 处理的玉米产量相对于 P0 处理分别增产 0.83%、0.79% 和 17.85%, P75 处理增产 7.74%、3.18% 和 19.57%, 在 2010 年磷肥的增产效果最小, 可能与 2010 年的降水量较高有关。此外可以看到, 随着施肥年限的增长, P60 与 P75 处理的增产效应差距减小。

2.1.2 产量性状变化 不同施磷水平对玉米的产量性状影响不同 (表 1)。2009~2011 年间, 各处理穗粒数随施磷年限而增加; P0 处理的穗长差别很小, P60 和 P75 处理的穗长随施磷年限增长; P0 处理的百粒重呈下降趋势, P60 和 P75 处理的百粒重逐年增大, 仅 P60 处理的百粒重在后两年显著高于第一年。在同一年份内, 不同处理的穗粒数和穗长均无显著差异, 2011 年时 P60 和 P75 处理的百粒重显著高于 P0 处理。可见不同施磷水平对于百粒重的影响最大, 对穗粒数的影响最小。

对 2009~2011 年的穗粒数、穗长及百粒重在不同施磷水平下对产量的影响进行了相关性分析 (表 2),

表 1 不同施磷水平玉米产量性状

Table 1 Maize yield components under different P_2O_5 levels

年份 Year	处理 Treatment	穗粒数 (No.) Grains per ear	穗长 (cm) Ear length	百粒重 (g) 100-grain weight
2009	P0	434.0 Aa	15.5 Aa	33.9 Aa
	P60	536.7 Aa	15.4 Ba	33.7 Ba
	P75	544.0 Aa	15.5 Ba	33.8 Aa
2010	P0	598.0 Aa	17.3 Aa	36.5 Aab
	P60	559.7 Aa	16.8 ABa	37.7 Aa
	P75	575.3 Aa	16.7 ABa	35.8 Ab
2011	P0	555.6 Aa	16.5 Aa	32.3 Ab
	P60	594.0 Aa	18.4 Aa	39.1 Aa
	P75	592.4 Aa	17.7 Aa	38.1 Aa

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示同一年内不同处理之间差异显著, 不同大写字母表示同一处理不同年份差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters mean significant difference among the treatments within the same year and different capital letters mean significantly difference among years for the same treatment ($P < 0.05$).

玉米产量与百粒重呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 而与穗粒数和穗长达到显著正相关 ($P < 0.05$), 百粒重与穗长之间极显著相关, 而与穗粒数无显著相关性, 总体来看, 百粒重和穗长对玉米产量的影响较大。结合表 1 可知, 适宜的磷肥用量可以提高玉米的百粒重和穗长, 从而提高玉米产量。

2.2 不同施磷水平对玉米磷素吸收和分配的影响

表 3 为连续 3 年不同施磷水平下玉米总吸磷量、籽粒和秸秆的吸磷量变化情况。在每一年中, 玉米的吸磷量均随着施磷水平的提高而增加, 到 2011 年时施磷处理的玉米吸磷量显著高于不施磷处理。2009~2011 年, P0 处理的吸磷量不断下降, P60 处理三年间的吸磷量变化较小, P75 处理吸磷量呈逐年增加趋势。P0 处理玉米籽粒的吸磷量在 2010 年最高, P60 和 P75 处理的吸磷量逐年增加, 仅 2011 年施磷处理与不施磷处理达到显著差异。2009、2010 和 2011 年 P75 处理籽粒的吸磷量比 P60 处理分别高 6.85%、2.37% 和 1.46%, 随施磷年限增加, 二者籽粒吸磷量的差距逐渐减小。2009~2011 年间玉米秸秆的吸磷量, P0 处理逐年下降, P60 处理变化较小, P75 处理逐年增加。每一年中, 玉米秸秆的吸磷量均随施磷水平的提高而增大, 后两年 3 个处理之间差异显著。

P0、P60 和 P75 处理籽粒的吸磷量占玉米植株 (包括籽粒和秸秆) 吸磷量的比例在 2009 年分别为 60.74%、60.13% 和 60.43%, 2010 年为 79.61%、65.84% 和 57.35%, 到 2011 年时则为 83.07%、66.37% 和 55.03%。2009~2011 年, P0 处理中连续 3 年不施用磷肥, 土壤中的磷素不断耗减, 玉米吸收的磷素逐年降低, 分配到籽粒中的磷素比例从 60.74% 上升到 83.07%。对于施磷处理, 每年施用的磷肥能补充土壤磷库, 保证玉米生长的磷素需求。P60 处理玉米吸收的磷素变化较小, 分配到籽粒中磷素的比保持 65% 左右, 而 P75 处理玉米吸收的磷素逐年升高, 但分配到籽粒中的比例从 60.43% 下降到 55.03%。由此可见, 当磷素养分缺乏时, 植物吸收的磷素优先满足籽粒的需求, 在养分较高时, 则会大量供应营养生长即秸秆需求。

2.3 不同施磷水平对磷肥利用效率的影响

磷肥利用率表示的是磷素对作物生长的贡献, 排除了其他元素的交互作用; 磷肥农学效率表示每施用 1 kg 磷肥作物的增产能力; 磷肥偏生产力是指施用磷肥作物产量与施磷水平的比值, 反映当地土

表 2 穗粒数、穗长、百粒重和玉米产量相关分析

Table 2 Correlation coefficient between grains per ear, ear length, 100-grain weight and maize yield

项目 Item	穗粒数 Grains per ear	穗长 (cm) Ear length	百粒重 (g) 100-grain weight	产量 (kg/hm ²) Grain yield
穗粒数 Grains per ear	1			
穗长 Ear length (cm)	0.8342**	1		
百粒重 100-grain weight(g)	0.6318	0.8346**	1	
作物产量 Grain yield (kg/hm ²)	0.7919*	0.7754*	0.8245**	1

注 (Note): *和**分别表示相关性达 5% 和 1% 显著水平 Represents the correlation was significant at the 5% and 1% levels.

表 3 不同施磷水平下的玉米吸磷量和分配

Table 3 The phosphorous absorption and distribution under different P₂O₅ levels

年份 Year	处理 Treatment	总吸磷量 Total absorption (kg/hm ²)	籽粒 Grain		秸秆 Straw	
			积累量 (kg/hm ²) Accumulation	分配比例 (%) Distribution	积累量 (kg/hm ²) Accumulation	分配比例 (%) Distribution
2009	P0	28.00 Aa	17.01 Ba	60.74	10.99 Aa	39.26
	P60	28.52 Aa	17.15 Ba	60.13	11.37 Aa	39.87
	P75	30.32 Ba	18.32 Ba	60.43	12.00 Ba	39.57
2010	P0	26.77 Ac	21.31 Aa	79.61	5.46 Bc	20.39
	P60	32.62 Ab	21.48 Aa	65.84	11.14 Ab	34.16
	P75	38.34 Aa	21.99 Aa	57.35	16.35 Aa	42.65
2011	P0	21.41 Bc	17.78 Bb	83.07	3.62 Bc	16.93
	P60	31.58 Ab	20.96 Aa	66.37	10.62 Ab	33.63
	P75	38.64 Aa	21.26 Aa	55.03	17.38 Aa	44.97

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示同一年内不同处理之间差异显著, 不同大写字母表示同一处理不同年份差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters mean significant difference among the treatments within the same year and different capital letters mean significantly difference among years for the same treatment ($P < 0.05$).

壤基础养分水平和磷肥施用量的综合效应。P60 和 P75 处理的磷肥利用率在 2009~2011 年间逐年升高, 2009 年时仅为 0.86% 和 3.09%, 到 2011 年分别上升到 16.95% 和 22.97%, 在每一年中 P75 处理的磷肥利用率均高于 P60, 仅第三年时差异显著; 磷肥的农学利用率, P60 处理逐年提高, P75 处理在 2010 年最低, 到 2011 年时 P60 处理的农学效率高于 P75; P60 和 P75 处理磷肥的偏生产力均在 2010 年最高, 而在同一年份 P60 处理均显著高于 P75 (表 4)。总体来看, 在土壤本身有效磷水平较高的黑土区, P60 处理中土壤的基础养分和施入磷肥的综合效应更高。

2.4 不同施磷水平对土壤磷平衡和有效磷含量的影响

2.4.1 土壤表观磷平衡和有效磷含量变化 不同施磷水平下, 土壤表观磷平衡变化情况各不相同 (表 5)。

表 4 不同施磷水平下黑土玉米磷肥利用效率

Table 4 Phosphorus efficiency under different phosphate fertilizer levels during 2009 to 2011

年份 Year	处理 Treatment	磷素利用率 P use efficiency (%)	农学效率 Agronomic efficiency (kg/kg)	偏生产力 Partial factor productivity (kg/kg)
2009	P60	0.86 a	1.32 b	158.78 a
	P75	3.09 a	9.76 a	135.72 b
2010	P60	9.75 a	1.57 b	198.88 a
	P75	15.43 a	5.03 a	162.87 b
2011	P60	16.95 b	29.40 a	194.05 a
	P75	22.97 a	25.78 a	157.50 b

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示同一年内不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters mean significant difference among the treatments within the same year ($P < 0.05$).

表 5 不同施磷水平玉米吸磷量和表观磷平衡 (P_2O_5 , kg/hm²)

年份 Year	处理 Treatment	投入量 Input	吸磷量 Absorption	表观平衡 App. balance
2009	P0	0	28.00 Aa	-28.00 Ab
	P60	60	28.52 Aa	31.48 Ab
	P75	75	30.32 Ba	44.68 Aa
2010	P0	0	26.77 Ac	-26.77 Ab
	P60	60	32.62 Ab	27.38 Ab
	P75	75	38.34 Aa	36.66 Ba
2011	P0	0	21.41 Bc	-21.41 Bc
	P60	60	31.58 Ab	28.42 Ab
	P75	75	38.64 Aa	36.36 Ba

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示同一年内不同处理之间差异显著, 不同大写字母表示同一处理不同年份差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters mean significant difference among the treatments within the same year and different capital letters mean significantly difference among years for the same treatment ($P < 0.05$).

2009~2011 年, P0 处理土壤磷素一直处于亏缺状态, 由于玉米吸磷量减少, 土壤亏缺的磷素逐渐减少; P60 和 P75 处理的表观磷平衡均表现为盈余, 随着玉米携出的磷量增加, 土壤盈余的磷素逐渐减少, P60 处理的磷素盈余三年之间无显著差异, P75 处理的磷素盈余显著下降。

连续 3 年不同施磷处理后, P0、P60 和 P75 处理有效磷含量变化 (2011 年成熟期与 2009 年苗期差值) 分别为 -15.40、-0.19 和 3.50 mg/kg, 可见 P0 处理的土壤有效磷大幅度下降, P60 处理基本维持原水平, 而 P75 处理则有一定的提高。

2.4.2 表观磷平衡与有效磷含量变化的关系 P0、P60 和 P75 处理, 2009~2011 年 3 年总的表观磷盈余量分别为 -76.18、87.28 和 117.70 kg/hm²。2011 年成熟期与 2009 年苗期有效磷含量差值与表观磷盈余量之间的关系如图 3 所示, 有效磷含量变化与表观磷盈余量呈极显著线性正相关, $y = 0.096x - 8.154$ (y 为有效磷含量变化, x 为表观磷盈余量, $R^2 = 0.999$)。在本研究的黑土区, 磷素盈亏每增加 100 kg/hm², 有效磷含量增加 9.6 mg/kg。

3 讨论与结论

试验结果表明, 玉米的产量随施磷水平的提高而增加, 这与前人的研究结果一致^[19]。2009~2011

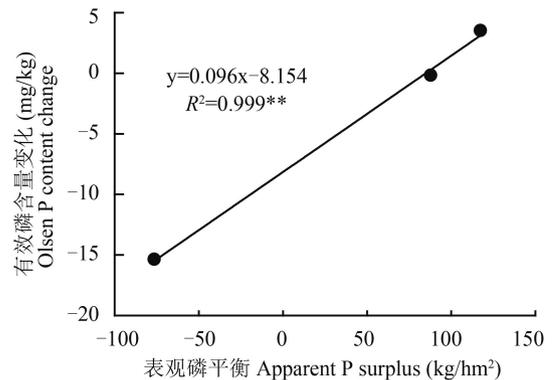


图 3 2009~2011 年土壤有效磷计算的表观磷平衡
Fig. 3 Apparent P balance dependent of soil Olsen P content during 2009–2011

的 3 年间, 仅第三年施磷处理的玉米产量显著高于不施磷处理, 而 3 年中 P60 处理的产量一直与 P75 接近, 且随着施肥年限的增长, 二者之间的增产效应差距减小。可能本试验地处黑土区, 土壤基础地力较高, 初始有效磷含量达到 30 mg/kg, 在短时间内能够维持玉米的生长需求, 但长时间不施用磷肥, 由于作物不断带走土壤磷素, 土壤的有效磷含量持续下降, 不能保证作物的生长需求, 而施磷则可以补充土壤的磷库。为了保证作物的连续高产、稳产, 应该向土壤投入一定量的磷肥。在一定范围内, 磷肥的用量可以有效提高作物产量, 但过量施磷也可能引起作物减产。柴颖等^[20]研究表明, 随磷肥用量的增加, 产量先增加后降低, 因为过量施磷会抑制养分向籽粒的转运, 进而影响玉米籽粒的发育及产量的形成。可见, 适宜的磷肥用量对于农业生产具有重要意义。本研究中, P60 和 P75 处理的产量很接近, P60 处理更为合理。有关施肥对玉米的产量性状的影响, 刘恩科等^[21]认为均衡施氮磷钾能增加穗长和千粒重等性状; 郭忠义等^[22]发现施用磷肥能提高玉米的百粒重。然而这些研究均未涉及不同施磷水平对产量性状的影响。本研究发现玉米的百粒重和穗长随施磷水平提高而增大, 说明不同施磷水平影响产量性状进而影响玉米产量。

作物的生长发育和产量形成受作物器官内氮、磷、钾等养分吸收与转运的影响^[23]。侯云鹏等^[24]的研究认为, 适宜的氮肥用量能使水稻籽粒养分比例明显提高, 而氮肥过量会使养分过多地滞留于营养器官中, 不利于籽粒中养分的积累。本研究中, 由于 2010 年降雨量明显多于 2009 和 2011 年, P0 处理玉米的产量和吸磷总量也显著增加, 虽然其在籽粒中的分配比例较施磷处理高, 但这也是作物长期适

应缺乏胁迫出现的反馈现象,不代表其磷素利用率高。两个施磷处理相比,施磷量高的处理玉米总的吸磷量也高,但从分配到籽粒中的磷素比例来看,P60 处理比较稳定,而 P75 处理逐年下降,说明 P75 处理吸收的磷素没有高效转移到籽粒中,大量的磷素供应营养体生长,存在磷素奢侈吸收现象。可见适宜的磷素水平对于养分有效转移到籽粒中非常重要。

肥料利用效率是衡量合理施肥的重要指标,其从不同方面描述了作物对磷肥的利用情况^[25-26]。本研究 2009~2011 年的 3 年中,磷肥利用率均为 P75 处理较高,偏生产力则为 P60 处理较高。到第三年时,P60 处理的农学效率高于 P75。P60 比 P75 处理施磷量小,但二者玉米产量接近,且 P60 处理的偏生产力一直较高,可见对于黑土区域,P60 处理中土壤的基础养分和施入磷肥的综合效应更高。从农业生产经济效益来看,2011 年时吉林省的玉米种植面积为 4701.33 万亩(农业部网站数据),如果将传统的施磷量 (P_2O_5 , 75 kg/hm²) 减少 20%,全省可以减少 P_2O_5 47010 t,磷肥(磷酸二铵)价格按每吨 3300 元,全省磷肥投入节省 1.6 亿元成本,玉米的产量参照本研究中 2011 年数据,P60 处理为 11643 kg/hm²,P75 为 11813 kg/hm²,玉米的收购价格按每吨 1840 元,全省玉米收入差 0.98 亿元,总体来看,吉林省玉米种植上,P60 处理比 P75 处理经济效益高出 0.62 亿元。如果将减量施肥(传统施磷量的 80%)措施推广到整个东北地区,将会产生很大的经济效益。

植物生长发育所需磷素主要来自于土壤,土壤是植物生长的养分“库”。据报道,我国约有 74% 的耕地表现出缺磷症状,酸性土壤和石灰性土壤中缺磷现象更为明显。在酸性土壤中,磷与铁、铝结合形成难溶的磷酸盐;石灰性土壤中,磷与钙结合形成难溶的 Ca_8-P 、 $Ca_{10}-P$ ^[27],因而土壤中有效磷含量很低。磷肥投入已成为改善土壤磷素含量和土壤供磷能力的重要途径。土壤有效磷含量处于较低水平时,磷肥的投入能显著提高作物产量^[28],当土壤有效磷水平超过某个值时,继续施用磷肥,对提高作物的产量作用很小,这个值被定义为“磷农学阈值”^[29],对于合理施磷具有指导意义。基于吉林公主岭中层黑土长期定位站(有效磷含量初始值为 10.2 mg/kg,磷肥用量为每年 80 kg/hm² P_2O_5)的观测数据,沈浦^[30]计算出该区的玉米阈值为 13.0 mg/kg,而氮磷钾(NPK)配施处理有效磷年增长率为 1.00 mg/kg,连续施用磷肥,土壤的有效磷含量逐渐升高,最终超过玉米的农学阈值,进一步提高则有可能造成环境风险^[31]。本

研究的试验地,有效磷的初始含量达到 30 mg/kg 以上,已经超过该地区的有效磷阈值(13.0 mg/kg),属于磷素水平较高的土壤,应该适当降低或维持土壤有效磷的水平^[32]。连续 3 年不同施磷水平下,分析了有效磷变化量与 3 年的表观磷平衡的关系,磷素盈亏每增加 100 kg/hm²,土壤有效磷含量增加 9.6 mg/kg。本研究中,每 100 kg/hm² 磷素盈亏引起的有效磷含量变化较大,可能由于黑土地区的有机质含量较高,有报道在褐土区,有机无机配施时,土壤磷每累积 100 kg/hm²,有效磷含量增加 9.1 mg/kg^[33]。可见,黑土区磷素盈余能引起有效磷含量的很大提升,在本研究中,P60 处理的有效磷含量基本维持原水平,而 P75 处理提高了土壤有效磷含量,可能加剧土壤磷素向水体流失的风险。因而在有效磷含量较高的黑土区,可以把 60 kg/hm² P_2O_5 施用量作为推荐施磷水平。

参 考 文 献:

- [1] 向万胜,黄敏,李学垣. 土壤磷素的化学组分及其植物有效性[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10 (6): 663-670.
Xiang W S, Huang M, Li X Y. Progress on fractioning of soil phosphorous and availability of various phosphorous fractions to crops in soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10 (6): 663-670.
- [2] 张宝贵,李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用[J]. 土壤学报, 1998, 36 (1): 104-111.
Zhang B G, Li G T. Roles of soil organisms on the enhancement of plant availability of soil phosphorus[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 36 (1): 104-111.
- [3] Li H, Huang G, Meng Q. Integrated soil and plant phosphorus for crop and environment in China[J]. Plant and Soil, 2011, 34 (9): 157-167.
- [4] 林葆,李家康. 我国磷肥施用量与氮磷比例问题[A]. 中国植物营养与肥料学会. 中国磷肥应用研究现状与展望学术讨论会论文集[C]. 北京: 中国植物营养与肥料学会, 2001. 13-16.
Lin B, Li J K. Phosphorus fertilizer consumption and NP ratios in China[A]. Chinese Society of Plant Nutrition and Fertilizer Sciences. Proceedings of the international symposium on phosphorus fertilizer use in China[C]. Beijing: Chinese Society of Plant Nutrition and Fertilizer Sciences, 2001.13-16.
- [5] 杨钰,阮晓红. 土壤磷素循环及对土壤流失的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10 (3): 256-258.
Yang J, Ruan X H. Soil circulation of phosphorus and its effects on the soil loss of phosphorous[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10 (3): 256-258.
- [6] He P, Li S T, Jin J Y, *et al.* Performance of an optimized nutrient management system for double-cropped wheat-maize rotations in North-Central China[J]. Agronomy Journal, 2009, 101: 1489-1496.
- [7] McDowell R W, Sharpley A N. Variation of phosphorus leached from Pennsylvanian soils amended with manures, composts or

- inorganic fertilizer[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 102: 17–27.
- [8] 曲均峰, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不施肥条件下几种典型土壤全磷和Olsen-P的变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14 (1): 90–98.
Qu J F, Li J M, Xu M G, *et al.* Total-P and Olsen-P dynamics of long-term experiment without fertilization[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14 (1): 90–98.
- [9] Katarina B, Elisabetta B, Erasmus O. Impact of long-term inorganic phosphorus fertilization accumulation, sorption and release of phosphorous in five swedish soil profiles[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 69: 11–21.
- [10] 周宝库, 张喜林. 长期施肥对黑土磷素积累、形态转化及其有效性影响的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11 (2): 143–147.
Zhou B K, Zhang X L. Effect of long-term phosphorus fertilization on the phosphorus accumulation and distribution in black soil and its availability[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11 (2): 143–147.
- [11] Ministry of Agriculture of China. *China Agriculture Yearbook*[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2014, 52(4): 802–817.
- [12] 陈新平, 张福锁. 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
Chen X P, Zhang F S. *Integrated nutrient management for wheat-maize rotation system*[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006.
- [13] Tang X, Li J M, Ma Y B, *et al.* Phosphorus efficiency in long-term (15 years) wheat-maize cropping systems with various soil and climate conditions[J]. *Field Crops Research*, 2008, 108, 231–237.
- [14] 孙克刚, 李丙奇, 李潮海, 等. 砂姜黑土区玉米田土壤有效磷施肥指标及施磷推荐-基于ASI法的土壤养分丰缺指标[J]. *中国农学通报*, 2010, 26 (21): 167–171
Sun K G, Li B Q, Li C H, *et al.* Abundance and deficiency indices of soil available P for maize and fertilization recommendation in shajiang black soil areas-Indices of soil Available P based on ASI method[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26 (21): 167–171.
- [15] Gergely T, Rannveig-Anna G, Brigitta T, *et al.* Phosphorus levels in croplands of the European Union with implications for P fertilizer use[J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 55: 42–52.
- [16] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 802–817.
Wu L Q, Wu L, Cui Z L, *et al.* Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 802–817.
- [17] 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.
Lu R K. *Agricultural chemical analysis of soil*[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [18] 王秀斌, 徐新朋, 孙刚, 等. 氮肥用量对双季稻产量和氮肥利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19 (6): 1279–1286.
Wang X B, Xu X P, Sun G, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on grain yield and nitrogen use efficiency of double cropping rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19 (6): 1279–1286.
- [19] 刘建玲, 廖文华, 张作新, 等. 磷肥和有机肥的产量效应与土壤积累磷的风险评价[J]. *中国农业科学*, 2007, 40 (5): 959–965.
Liu J L, Liao W H, Zhang Z X, *et al.* The response of vegetable yield to phosphate fertilizer and organic manure and environmental risk assessment of phosphorus accumulated in soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40 (5): 959–965.
- [20] 柴颖, 赵靛, 黄婷, 等. 不同氮、磷配施对春玉米养分吸收和产量的影响[J]. *新疆农业科学*, 2015, 52 (3) : 444–449.
Chai Y, Zhao J, Huang T, *et al.* Effects of different combination ratios of N, P fertilizer on nutrient uptake of maize and yield[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2015, 52 (3): 444–449.
- [21] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 等. 长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13 (5): 789–794.
Liu E K, Zhao B Q, Hu C H, *et al.* Effects of long-term nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer applications on maize yield and soil fertility[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13 (5): 789–794.
- [22] 郭中义, 孟祥锋, 张明, 等. 施用氮磷钾肥对夏玉米产量和品质的影响[J]. *土壤肥料*, 2004 (1): 25–26.
Guo Z Y, Meng X F, Zhang M, *et al.* Effect of N, P, K fertilizer on yield and quality of summer maize[J]. *Soil and Fertilizer*, 2004 (1): 25–26.
- [23] 景立权, 赵福成, 王德成, 等. 不同施氮水平对超高产夏玉米氮磷钾累积与分配的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39 (8): 1478–1490.
Jing L Q, Zhao F C, Wang D C, *et al.* Effects of nitrogen application on accumulation and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium of summer maize under super-high yield conditions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39 (8): 1478–1490.
- [24] 侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 等. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (4): 836–845.
Hou Y P, Han L G, Kong L L, *et al.* Nutrient absorption, translocation in rice and soil nitrogen equilibrium under different nitrogen application doses[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (4): 836–845.
- [25] 程明芳, 何萍, 金继运. 我国主要作物磷肥利用率的研究进展[J]. *作物杂志*, 2010, (1): 12–14.
Cheng M F, He P, Jin J Y. Advance of phosphate recovery rate in Chinese main crops[J]. *Crops*, 2010, (1): 12–14.
- [26] 高静, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期施肥对我国6种旱地小麦磷肥回收率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (3): 584–592.
Gao J, Xu M G, Zhang W J, *et al.* Influence of long-term fertilization on phosphorus recovery efficiency of wheat in six dry uplands soils of China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15 (3): 584–592.
- [27] 赵靛, 侯振安, 柴颖, 等. 长期施磷对灰漠土无机磷形态的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28 (3): 236–242.
Zhao J, Hou Z A, Chai Y, *et al.* Effects of P rate on inorganic phosphorus form in grey desert soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (3): 236–242.
- [28] Colomb B, Debaeke P, Jouany C, *et al.* Phosphorus management in low input stockless cropping systems: cropland soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France[J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26: 154–165.

- [29] Bai Z H, Li H G, Yang X Y, *et al.* The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types[J]. *Plant and Soil*, 2013, 372: 27–37.
- [30] 沈浦. 长期施肥下典型农田土壤有效磷的演变特征及机制[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2014.
Shen P. Evolution characteristics and mechanisms of soil available phosphorus in typical croplands under long-term fertilization[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [31] Aulakh M S, Grag A K, Kabba B S. Phosphorus accumulation, leaching and residual effects on crop yields from long-term application in the subtropics[J]. *Soil Use and Management*, 2007, 23: 417–427.
- [32] 张福锁, 江荣风, 陈新平. 测土配方施肥技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011.
Zhang F S, Jiang R F, Chen X P. Soil testing and fertilization recommendation[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2011.
- [33] 杨振兴, 周怀平, 谢文艳, 等. 长期施肥褐土有效磷对磷盈亏的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (6): 1529–1535.
Yang Z X, Zhou H P, Xie W Y, *et al.* Response of Olsen-P to P balance in cinnamon soil under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (6): 1529–1535.