

云南中、低供磷能力土壤玉米最佳施磷量研究

李海叶¹, 黄少欣¹, 朱东宇¹, 王瑞雪¹, 汤利¹, 郑毅^{1,2}, 肖靖秀^{1*}

(1 云南农业大学资源与环境学院, 云南昆明 650201; 2 云南开放大学, 云南昆明 650223)

摘要:【目的】探明不同供磷能力土壤条件下玉米对磷肥用量的反应及最佳磷肥用量, 为磷肥高效利用提供依据。【方法】玉米田间试验于 2017—2019 年在云南寻甸和小哨进行, 土壤 Olsen-P 含量分别为 15 和 4.5 mg/kg, 属于中、低供磷能力土壤。试验设施磷量 P_2O_5 0 kg/hm² (P0)、45 kg/hm² (P45)、90 kg/hm² (P90)、135 kg/hm² (P135) 和 270 kg/hm² (P270) 5 个水平处理 (寻甸) 和 P_2O_5 0 kg/hm² (P0)、60 kg/hm² (P60)、90 kg/hm² (P90) 和 120 kg/hm² (P120) 4 个水平处理 (小哨), 其中 90 kg/hm² 是当地推荐磷肥用量。分析了玉米主要生育期植株生物量、产量、磷素吸收与分配, 计算了磷肥利用率。利用线性加平台模型, 模拟了不同磷水平下玉米的籽粒产量与磷肥用量的关系。【结果】在两个试验点, 施磷均显著提高了玉米产量, 但是当施 $P_2O_5 > 90$ kg/hm² 时, 不能进一步提高玉米籽粒产量, 甚至两个最高磷处理 P270 (寻甸) 和 P120 (小哨) 的玉米产量显著低于 P90 处理。在供磷能力中等土壤上, P45 和 P90 处理最有利于玉米磷素的吸收和累积, 同时促进磷素向籽粒中转移, P45 的磷肥利用率最高。在低供磷能力土壤上, 玉米磷素吸收量随施磷量呈现抛物线趋势, 即磷素吸收累积整体表现为 P90>P120>P60>P0, P90 的磷肥利用率最高。利用线性加平台模型对玉米产量与施磷量的模拟达到极显著置信水平, 计算的最佳施磷量在供磷能力中等和较低的土壤上, 分别为 65.6 和 93.7 kg/hm²。【结论】相比于当地的磷肥推荐量 P_2O_5 90 kg/hm², 供磷能力中等的土壤条件下应减少磷肥用量至 65.6 kg/hm², 在供磷能力低的土壤上磷肥用量应适当增加至 93.7 kg/hm²。

关键词: 玉米; 磷; 产量; 线性加平台模型; 推荐施磷量

Optimizing phosphate fertilization in relation to phosphorus supply capacity of soils in Yunnan maize producing areas

LI Hai-ye¹, HUANG Shao-xin¹, ZHU Dong-yu¹, WANG Rui-xue¹, TANG Li¹, ZHENG Yi^{1,2}, XIAO Jing-xiu^{1*}

(1 College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China;

2 Yunnan Open University, Kunming, Yunnan 650223, China)

Abstract: 【Objectives】The aim of this study was to establish an optimum P application rate for maize production on the long-existing low and middle P-containing farmlands in Yunnan, in order to reduce the potential of phosphorus leaching risk to surface water environment. 【Methods】Field experiments were conducted respectively in Xundian (middle soil Olsen-P level) and Xiaoshao (low soil Olsen-P level), Yunnan Province consecutively from 2017 to 2019. The P_2O_5 treatment levels were 0, 45, 90, 135, and 270 kg/hm² in Xundian, and 0, 60, 90, and 120 kg/hm² in Xiaoshao. Maize yield, P uptake at the main growth stages, and the allocation in grains at maturation stage were investigated. The optimal P rate was calculated using lineal-plateau model. 【Results】Across the three years, P application significantly increased maize yield. P90 recorded the highest yield in both field sites. P270 in Xundian and P120 in Xiaoshao elicited significantly lower yield than P90. In Xundian, P45 and P90 recorded similar maize P uptake and accumulation, those were significantly higher than P135 and P270. In low Olsen-P soil of Xiaoshao, the maize P uptake improved at increasing P rates, however, the grain P accumulation was not significantly different between P90 and P120. The simulated yield under different P

收稿日期: 2021-10-13 接受日期: 2022-05-10

基金项目: 云南省农业联合基础专项 (2018FG001-071); 国家重点研发专项 (2017YFD0200200, 2017YFD0200207)。

联系方式: 李海叶 E-mail: 1520444794@qq.com; * 通信作者 肖靖秀 E-mail: xiaojingxiuxjx@126.com

application rates by lineal-plateau model revealed extreme significance ($P < 0.001$). The calculated optimum P_2O_5 application rates were 65.6 and 93.7 kg/hm² for moderate and low Olsen-P soil, respectively. 【Conclusions】 Compared with the recommended P_2O_5 rate for maize production in Yunnan, the optimum P_2O_5 rate should be reduced to 65.6 kg/hm² in moderate Olsen-P soil, and slightly increased to 93.7 kg/hm² in low Olsen-P soil.

Key words: maize; phosphorus; yield; lineal-plateau model; optimum phosphorus application

磷是作物生长发育所必需的营养元素之一^[1-2], 在植物生理代谢、能量转化和调节酶活性等方面扮演着重要作用^[3-5], 是限制农田生产力的重要因子^[6]。磷肥施用盲目现象在我国较为普遍^[7], 由此导致的农田土壤磷素盈余及相关环境风险问题一直是人们关注的重点^[8-10]。磷是不可再生资源, 农田生态系统中磷肥的合理施用及分配是农业可持续发展的关键, 也是近年来研究的热点。磷在土壤中移动性较小、极易被固定, 所以我国大部分农田土壤已经成为潜在磷库^[11]。与 1980 年相比, 2006 年我国农田土壤有效磷 (Olsen-P) 含量提高了 3 倍^[12]。因此, 在有效磷含量较高的黑土区^[13], 研究已经证实了玉米磷肥减施的潜力。但是, 在土壤有效磷含量中等的赤红壤分布区也证实了节磷潜力^[8]。

前人围绕肥料磷的周转和土壤磷的迁移及转化开展了大量研究, 为肥料磷的合理施用和分配奠定了理论基础^[14-15]。基于产量反应和农学效率^[16]、养分专家系统^[17]、磷肥恒量监控^[18]、土壤有效磷含量水平^[19]等, 已经建立了不同区域主要作物体系的土壤磷丰缺指标及磷肥推荐用量^[20]。但由于我国土壤类型多样、土壤磷含量变异较大^[21], 不同生态区磷肥推荐用量差异较大。吴良泉等^[18]将我国玉米主产区分为 4 个大区和 12 个施肥亚区, 各生态区平均推荐施磷量 75 kg/hm², 其中华北区最低为 46 kg/hm², 西北区最高为 123 kg/hm²。显然, 针对区域土壤磷库现状, 建立适宜的区域磷肥施用指标体系十分必要。

玉米是云南种植面积最大、产量最高的粮食作物。前人根据不同磷肥施用水平下的玉米产量反应, 建立了云南省土壤磷的丰缺指标^[22-24]。但云南海拔差异及土壤有效磷空间变异较大, 因此, 本研究在充分考虑土壤供磷水平的前提下, 基于田间定位

试验, 分析不同供磷水平下玉米的产量特征、磷素吸收累积分配特征及磷肥利用率, 明确供磷能力中等和低下的土壤条件下, 云南玉米是否具有磷肥减施潜力; 同时, 基于玉米产量对磷肥施用的反应, 建立最佳磷肥用量推荐方法。研究可为云南玉米磷肥的合理施用及实现资源节约、环境保护、节本增效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本研究基于两个田间试验来完成。

田间试验 1: 土壤供磷能力中等 (Olsen-P 为 15 mg/kg), 试验地位于云南农业大学寻甸大河桥试验基地 (23°32' N, 103°13' E, 海拔 1953.5 m), 属亚热带季风气候区, 地处昆明市东北部。年平均气温约 14.7℃, 平均降雨量为 1040 mm。田间试验于 2017 年 5 月建立, 供试土壤为熟化程度较高的红壤, 在本试验开展前长期种植玉米, 且整体经过了填土改造。供试土壤基础理化性状如表 1 所示, 本研究使用 2017—2019 年 3 年的田间试验结果。

田间试验 2: 土壤供磷能力低 (Olsen-P 为 4.5 mg/kg), 试验地位于昆明市官渡区小哨村云南农业职业技术学院 (E102°41'~103°03', N24°54'~25°13', 海拔 2098 m), 属北热带季风性气候, 年平均气温约 14℃, 平均降雨量为 1200 mm。田间定位试验开始于 2017 年 5 月, 试验前未种植农作物, 供试土壤为新开垦的山地红壤, 供试土壤基础理化性状如表 1 所示, 本研究使用 2017—2019 年田间试验结果。两个试验点能较好的代表云南山地种植玉米的土壤状况。

表 1 供试土壤理化性状

Table 1 Physico-chemical properties of test soils

试验地点 Experiment site	pH	有机质 (g/kg) Organic matter	碱解氮 (mg/kg) Alkali-hydrolyzed N	有效磷 (mg/kg) Olsen-P	速效钾 (mg/kg) Available K
寻甸 Xundian	7.04	20.00	27	13	220
小哨 Xiaoshao	4.89	6.58	24	5	125

1.2 试验设计

供试材料: 寻甸、小哨两个试验点种植的玉米品种均为‘云瑞-88号’。

试验设计: 田间试验均采用随机区组设计。在中等供磷能力土壤(田间试验1)上, 设施 P_2O_5 0、45、90、135 和 270 kg/hm² 5 个水平, 3 次重复, 共 15 个试验小区, 小区面积为 24 m² (6 m×4 m)。在低供磷能力土壤上(田间试验2), 设施 P_2O_5 0、60、90 和 120 kg/hm² 4 个水平。3 次重复, 共 12 个试验小区。小区面积均为 26 m² (6.5 m×4 m)。玉米均采用穴播, 行距 50 cm, 株距 25 cm。

两个试验点氮肥施用量均为 250 kg/hm², 钾肥施用量均为 75 kg/hm², 氮肥和钾肥用量为当地的推荐施用量。

供试肥料: 过磷酸钙(含 P_2O_5 14%)、尿素(含 N 46%)、硫酸钾(含 K_2O 50%) (两个试验点供试肥料品种均相同)。氮肥 40% 作为基肥, 并在小喇叭口期、大喇叭口期分别追施 25%、35%。磷肥以及钾肥均全部作为基肥, 以条施的方式施入。

玉米于每年 5 月 1—7 日播种, 每年 9 月 20—30 日收获。试验过程中施肥、播种都是采用人工完成。玉米小喇叭口期之前每周灌溉一次, 大喇叭口期之后田间灌溉方式主要为降雨。

1.3 样品采集与测定

田间试验 1、2 均在 2017、2018 和 2019 年对玉米成熟期籽粒产量进行了测定。2018 和 2019 年在玉米的关键生育期苗期、小喇叭口期、大喇叭口期、吐丝期、成熟期进行植株样品的采集, 将玉米的茎、叶、籽粒等器官分开, 于 105℃ 杀青 0.5 h, 70℃ 烘

干至恒重, 称量其干重, 测定各器官磷含量。产量采用称重法测定; 植株各器官磷含量采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 进行消煮—钒钼黄比色法进行测定。

1.4 数据计算

玉米磷素吸收累积量 (kg/hm²)=玉米植株地上部生物量×植株地上部磷含量 (%)

磷素分配率 (%)=植株器官磷含量/成熟期植株地上部磷含量×100

磷肥利用率 (%)=(施磷区作物吸磷总量-不施磷区作物吸磷总量)/施磷量 (kg/hm²)×100

1.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 2010 软件对数据进行处理, 采用 SPSS 20.0 软件进行方差分析, 用 Excel 2010 软件作图。采用最小显著差异法 (Duncan) 检验各处理的差异显著性 ($P=0.05$), 图和表中数据为平均值±标准误, 采用 SPSS 20.0 软件对产量数据进行线性加平台处理。

2 结果与分析

2.1 不同磷水平处理玉米的产量特征

3 年的田间试验结果 (图 1) 显示, 供磷能力中等的土壤条件 (寻甸试验点) 下, 随着施磷量的增加, 玉米产量呈现先增加后降低的趋势, 以 P90 处理玉米产量最高, 2017、2018、2019 年分别比 P0 分别增产 42%、21%、30%。2017 年, P90 处理的玉米产量显著高于 P45 处理, 但与 P135 和 P270 处理没有显著差异。2018、2019 年 P90 处理的玉米产量与 P45 和 P135 处理没有显著差异, 但显著高于 P270 处

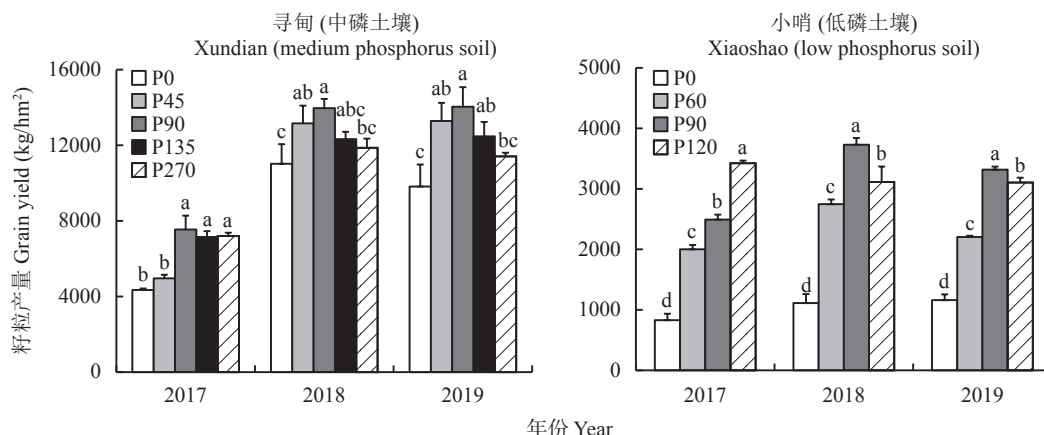


图 1 2017—2019 年中、低磷土壤施用不同水平磷的玉米产量

Fig. 1 Maize yield under different P rates in middle and low P soil from 2017–2019

注: 柱上不同小写字母表示同一年份处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different letters above the bars mean significant difference among treatments in the same year ($P<0.05$).

理。表明施磷水平超过 P90 不会进一步提高玉米产量,甚至会降低玉米产量。

在供磷能力低下的土壤上(小哨试验点),与 P0 处理相比,施磷显著提高玉米籽粒产量。第一年(2017 年),玉米产量随施磷量的增加而显著提高,2018 和 2019 年, P90 处理的玉米产量依然显著高于 P60 处理,而 P120 处理则显著低于 P90 处理。表明在低磷土壤上,磷水平也不宜超过 P90 处理。

2.2 不同磷水平处理玉米的磷素吸收累积特征

在土壤供磷能力中等的寻甸试验点(表 2),玉米的磷素吸收累积量从苗期到大喇叭口期均以 P90 处理显著高于其他处理, P135 处理在苗期与小喇叭口期显著高于 P0 和 P45 处理, P270 在苗期显著高于 P45 处理。抽雄期,不同磷水平下玉米磷素吸收累积量与 P0 无显著差异,收获期, P45、P90、P135 处理间玉米磷素吸收累积也无差异,但 P270 处理的磷素累积吸收量较这 3 个处理显著降低。

在供磷能力低下的小哨试验点,玉米全生育期磷素吸收累积量整体表现为 P90>P120>P60>P0(表 2)。同样的,当施磷量>90 kg/hm² 时,玉米磷素吸收量显著降低。

2.3 不同磷水平处理玉米的磷素分配特征

由 2018 和 2019 年两个试验地玉米收获期的磷吸收量和分配比例(表 3)可以看出,在供磷能力中等的寻甸试验点, P45 和 P90 水平处理最有利于磷素在籽粒中的累积和分配。当施磷量>90 kg/hm² 时并不

能提高籽粒磷的累积量,也不利于磷素向籽粒中转移。在供磷能力低的小哨试验点,施磷处理都提高了磷素在各个器官的累积量, P90 水平处理下,磷素在各器官中的累积量达最大值。P60 和 P90 处理降低磷素在叶片中的分配,提高磷素在茎秆和籽粒中的分配。

2.4 不同磷水平下玉米的磷肥利用率

从图 2 可以看出,在供磷能力中等的寻甸试验点,随着磷肥施用量的提高,磷肥利用率显著降低,整体表现为 P45>P90>P135>P270。P45 条件下磷肥利用率超过 80%, P270 条件下,磷肥利用率则低于 10%,较 P45 和 P90 水平下分别平均降低 93% 和 89%。

在小哨试验点,虽然年际间有差异,但 P90 水平下,磷肥利用率最高分别为 84% (2018 年) 和 42% (2019 年); P120 水平下磷肥利用率最低,尤其 2019 年, P120 下磷肥利用率仅 11%。

2.5 基于产量最佳的肥料用量推荐

采用线性加平台模型,对两个试验点不同供磷水平下玉米的籽粒产量进行拟合(图 3)。由其结果可以看出,两个试验点模拟的可信度均达到极显著水平($P<0.001$)。一般认为,首次达到平台的值即为最佳值。在寻甸试验点玉米产量首次达到平台的磷肥施用量为 65.5 kg/hm²,在小哨试验点则为 93.7 kg/hm²。

表 2 不同磷水平处理玉米全生育期磷的吸收累积量

Table 2 Total P uptake by maize during the whole growing season under different P rates

试验点 Experiment site	处理 Treatment	2018					2019				
		苗期 V3	小喇叭口期 V7	大喇叭口期 V12	抽雄期 Vt	收获期 R6	苗期 V3	小喇叭口期 V7	大喇叭口期 V12	抽雄期 Vt	收获期 R6
寻甸 Xundian	P0	0.98 c	9.33 d	26.01 c	46.76 ab	59.21 b	0.84 d	17.11 ab	26.32 b	44.78 a	55.05 c
	P45	1.08 c	10.34 cd	31.90 b	53.67 a	79.81 a	1.52 ab	15.07 c	24.41 bc	45.44 a	73.16 b
	P90	1.66 a	14.45 a	42.52 a	48.08 ab	77.79 a	1.60 a	18.78 a	31.39 a	55.30 a	81.41 a
	P135	1.40 b	12.40 b	30.64 b	45.70 b	73.75 a	1.39 b	16.53 bc	22.19 c	50.92 a	84.36 a
	P270	1.39 b	11.63 bc	31.95 b	48.95 ab	62.15 b	1.01 c	17.23 ab	32.11 a	54.58 a	67.72 b
小哨 Xiaoshao	P0	0.04 c	0.10 c	0.33 d	1.65 b	14.40 d	0.03 c	0.10 c	0.35 d	1.29 c	14.10 c
	P60	0.06 bc	0.29 b	2.53 c	7.50 a	30.40 c	0.07 b	0.34 b	2.99 c	9.03 b	20.70 b
	P90	0.19 a	0.64 a	3.85 b	8.01 a	47.30 a	0.20 a	0.78 a	4.89 b	10.60 a	30.50 a
	P120	0.07 b	0.27 b	5.59 a	7.66 a	36.90 b	0.07 b	0.36 b	5.99 a	9.04 b	20.10 b

注: 同列数据后不同字母表示同一试验点不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Values followed by different letters mean significant difference among treatments at the same experiment site ($P<0.05$).

表 3 不同施磷水平玉米各器官中磷的累积分配
Table 3 Uptake and allocation rate in each part of maize under different P application rates

试验点 Experiment site	处理 Treatment	2018						2019					
		磷累积量 (kg/hm ²)			分配比例 (%)			磷累积量 (kg/hm ²)			分配比例 (%)		
		Total P uptake			Allocation rate			Total P uptake			Allocation rate		
		叶片 Leaf	茎秆 Stem	籽粒 Grain	叶片 Leaf	茎秆 Stem	籽粒 Grain	叶片 Leaf	茎秆 Stem	籽粒 Grain	叶片 Leaf	茎秆 Stem	籽粒 Grain
寻甸 Xundian	P0	12.5 c	20.1 c	26.6 c	21 bc	34 a	45 a	16.1 b	24.9 b	18.6 c	32 a	39 a	29 b
	P45	26.5 a	40.1 a	45.2 a	24 b	36 a	40 a	28.7 a	33.6 a	31.1 b	31 a	36 a	33 b
	P90	14.1 c	26.5 b	37.2 b	18 c	34 a	48 a	16.8 b	22.6 b	40.9 a	21 b	28 b	51 a
	P135	20.8 b	23.2 bc	29.8 c	28 a	31 a	40 a	19.5 b	24.2 b	40.4 a	23 b	29 b	48 a
	P270	14.4 c	22.1 bc	25.7 c	23 b	35 a	41 a	16.1 b	20.5 b	30.8 b	24 b	30 b	46 a
小哨 Xiaoshao	P0	3.0 b	5.3 c	6.1 c	21 a	37 b	38 c	2.2 c	8.7 b	3.1 d	16 b	62 a	22 c
	P60	3.5 b	12.3 b	14.5 b	12 c	41 a	48 a	4.2 b	6.5 b	7.0 c	20 a	46 b	34 b
	P90	7.3 a	19.2 a	20.1 a	15 b	42 a	42 b	6.3 a	12.5 a	11.7 a	21 a	43 b	38 a
	P120	7.1 a	13.5 b	19.4 a	22 a	38 a	42 b	3.7 b	8.7 b	7.7 b	19 ab	41 b	38 a

注: 同列数据后不同字母表示同一试验点不同处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: Values followed by different letters in a column mean significant difference among treatments at the same experiment site ($P<0.05$).

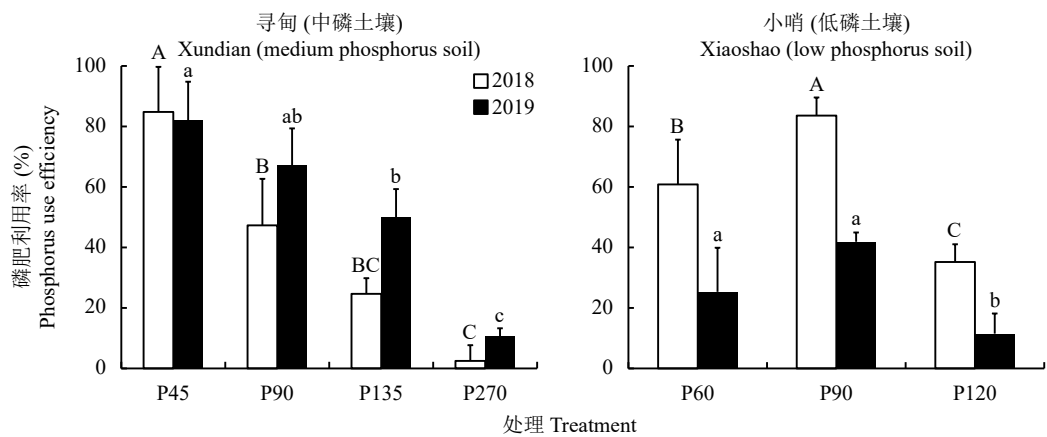


图 2 不同磷水平处理玉米的磷肥利用率
Fig. 2 Maize P use efficiency under different P rates

注: 方柱上不同大、小写字母分别表示 2018、2019 年不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different upper and lower case letters above the bars indicate significant difference among treatments in 2018 and 2019, respectively ($P<0.05$).

3 讨论

本研究发现, 在供磷能力中等和较低的红壤上, 施磷可以提高玉米的磷素吸收和累积, 但当施磷量 $>90\text{ kg/hm}^2$ 时, 不会进一步增加玉米的磷素吸收累积。在供磷能力中等的土壤上, 磷水平在 $\text{P } 45\sim 135\text{ kg/hm}^2$ 处理间, 玉米产量无显著差异, 磷水平在 $\text{P } 45\sim 135\text{ kg/hm}^2$ 处理间, 玉米抽雄期至收获期磷素吸收累积量多无显著差异, 因此, 磷肥利用率随磷施用量的增加急剧降低。玉米籽粒中约 $56.0\%\sim$

85.8% 的磷素来自于营养器官的转移^[25]。本研究发现, 在供磷能力低的小哨试验点, 施磷处理都提高了磷素在各个器官的累积量, P90 水平处理下, 磷素在各器官中的累积量达最大值。 P60 和 P90 处理降低磷素在叶片中的分配, 提高磷素在茎秆和籽粒中的分配, 促进更多的磷素分配在籽粒中, 但是当施磷量 $>90\text{ kg/hm}^2$ 时也不能进一步提高籽粒磷的累积量。按照当地的玉米施磷推荐水平 90 kg/hm^2 , 在供磷中、低等土壤条件下, 减施 30% (P60 处理) 至 50%

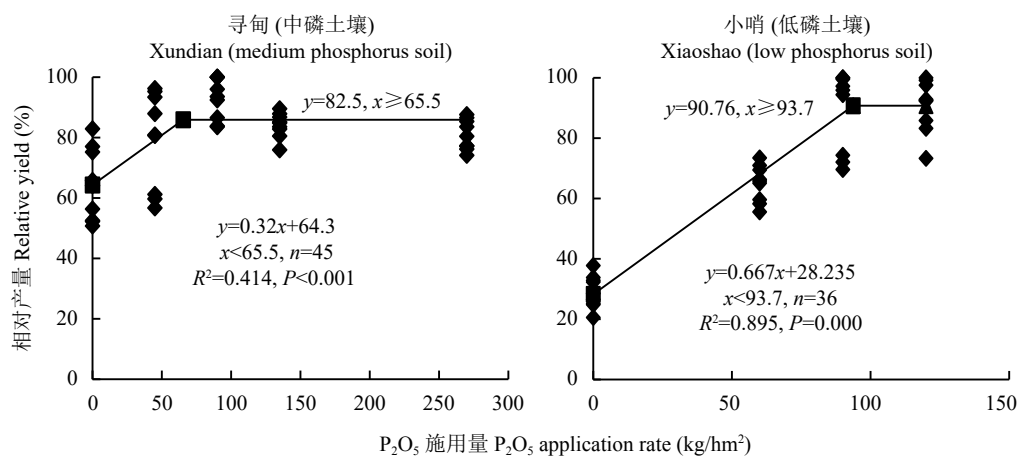


图3 不同磷水平处理玉米产量的线性加平台分析

Fig. 3 Linear-plateau analysis for maize yield responses to P rates

(P45 处理) 的磷肥不会降低玉米产量, 且能显著提高磷肥利用率。本研究还发现, 在供磷能力较低的小哨试验点, 玉米基础地力产量水平显著低于西南地区平均水平 (4.4 t/hm^2)^[26], 而提高土壤基础地力是提升玉米的产量, 维持产量稳定性和可持续性的基础。所以, 在兼顾作物产量的同时, 在供磷能力较低的云南山地玉米种植区, 培肥地力水平仍然是十分必要的。此外, 在供磷能力中等的条件下, 过量施磷 (P270) 玉米磷素吸收累积量显著降低, 产量也有降低的趋势, 这与人研究结果^[27-28]一致。

过量施磷必然伴随着土壤磷盈余, 带来潜在的环境风险。据估测, 农田土壤每盈余 P 100 kg, 表层土壤有效磷含量提高 $1.44 \sim 5.74 \text{ mg/kg}$ ^[29]。因此, 后续应依托本田间定位试验重点关注过量施磷后磷的周转及潜在环境风险问题。

一般认为, 磷肥减施潜力主要在有效磷含量丰富的土壤上^[13]。本研究则证实了在有效磷含量中等甚至偏低的红壤区, 仍然具有磷肥减施的潜力。依据线性加平台模型对供试土壤条件下的最佳施磷量进行模拟计算, 有效磷中等水平的土壤上, 最佳施磷量为 65.5 kg/hm^2 , 而有效磷低等水平土壤的最佳施磷量为 93.7 kg/hm^2 , 低磷供应能力的土壤需要的施磷水平高于中等供磷能力的土壤。从两地的玉米产量、吸磷量来看, 3 年的试验结果没有太大的波动, 这可能是由于红壤的固磷能力较强^[30], 因此, 制定适宜的施磷量对于中、低供磷能力的土壤实现高产高效, 同时减少高磷对环境的风险是十分必要的。

4 结论

与当地的推荐施磷量 P_2O_5 90 kg/hm^2 相比, 在供

磷能力中等红壤上, 玉米减施 20%~30% 的磷肥不会降低玉米产量, 适宜的施磷量为 P_2O_5 66 kg/hm^2 ; 供磷能力较低的土壤不宜于进一步降低磷肥的用量, 基于玉米产量对磷肥施用的响应, 玉米推荐磷肥施用量为 P_2O_5 94 kg/hm^2 。

参考文献:

- [1] 李若楠, 王政培, BATBAYAR Javkhan, 等. 等有机质壤土有效磷和无机磷形态的关系[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3852-3865.
Li R N, Wang Z P, Javkhan B, et al. Relationship between soil available phosphorus and inorganic phosphorus forms under equivalent organic matter condition in a tier soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21): 3852-3865.
- [2] 柴博, 李隆, 杨思存, 等. 玉米/鹰嘴豆间作条件下不同施磷量对灌耕灰钙土无机磷组分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 85-90.
Chai B, Li L, Yang S C, et al. Effects of different P applications on inorganic-P components in irrigated sierozems under maize/chickpea intercropping[J]. *Agricultural Research in Arid Regions*, 2015, 33(1): 85-90.
- [3] 郭延平, 陈屏昭, 张良诚, 等. 缺磷胁迫加重柑橘叶片光合作用的光抑制及叶黄素循环的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 359-363.
Guo Y P, Chen P Z, Zhang L C, et al. Phosphorus deficiency stress aggravate photoinhibition of photosynthesis and function of xanthophyll cycle in citrus leaves[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizings*, 2003, 9(3): 359-363.
- [4] 鲁敏. 低磷胁迫下两种柑橘砧木的磷效率特征及其根系性状差异[J]. 北方园艺, 2017, (15): 12-17.
Lu M. Differences of phosphorus efficiency characteristics and root properties between two citrus seedlings under phosphorus stress[J]. *Northern Horticulture*, 2017, (15): 12-17.
- [5] 樊卫国, 罗燕. 不同磷水平下4种柑橘砧木的生长状况、根系形态和生理特性[J]. 中国农业科学, 2015, 48(3): 534-545.

- Fan W G, Luo Y. Growth status, root morphology and physiological characteristics of four citrus rootstocks under different phosphorus levels[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(3): 534–545.
- [6] 陈露, 王秀斌, 朱瑞利, 等. 长江中下游小麦产量、土壤酶活性及微生物群落结构对磷肥减施的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(3): 392–402.
- Chen L, Wang X B, Zhu R L, *et al.* Response of wheat yield and soil microbial activity to phosphorus fertilizer reduction in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(3): 392–402.
- [7] 彭正萍, 张家铜, 袁硕, 等. 不同供磷水平对玉米干物质和磷动态积累及分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 793–798.
- Peng Z P, Zhang J T, Yuan S, *et al.* Effects of different P application rates on the dynamic accumulation and distribution of dry matter and P in maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(4): 793–798.
- [8] 颜晓军, 叶德练, 苏达, 等. 磷肥用量对甜玉米磷素吸收利用的影响[J]. *作物学报*, 2021, 47(1): 169–176.
- Yan X J, Ye D L, Su D, *et al.* Effects of phosphorus application on phosphorus uptake and utilization of sweet corn[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(1): 169–176.
- [9] 柴泽宇, 于艳梅, 张池, 等. 关中小麦-玉米轮作农田磷肥减施增效研究[J]. *西北农业学报*, 2019, 28(10): 1674–1680.
- Chai Z Y, Yu Y M, Zhang C, *et al.* Application rate reduction and use efficiency improvement of phosphate fertilizer on farmland under wheat-maize rotation system in Guanzhong area of Shaanxi[J]. *Acta Agricultura Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(10): 1674–1680.
- [10] Song C, Sarpong C K, Zhang X F, *et al.* Mycorrhizosphere bacteria and plant-plant interactions facilitate maize P acquisition in an intercropping system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 31: 127993.
- [11] 张淑香, 张文菊, 沈仁芳, 等. 我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1389–1393.
- Zhang S X, Zhang W J, Shen R F, *et al.* Variation of soil quality in typical farm lands in China under long-term fertilization and research expedition[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1389–1393.
- [12] Li H, Huang G, Meng Q, *et al.* Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review[J]. *Plant and Soil*, 2011, 349(1–2): 157–167.
- [13] 吴启华, 刘晓斌, 张淑香, 等. 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[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1468–1476.
- Wu Q H, Liu X B, Zhang S X, *et al.* Application of 80% of routine phosphorus rate to keep high yield and P efficiency of maize and P balance in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6): 1468–1476.
- [14] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 等. 我国农田磷养分平衡研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(1): 1–8.
- Ji H J, Zhang H Z, Zhang W L, *et al.* Research progress on cropland phosphorus balance in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(1): 1–8.
- [15] 吉冰洁, 李文海, 徐梦洋, 等. 不同磷肥品种在石灰性土壤中的磷形态差异[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(12): 2581–2594.
- Ji B J, Li W H, Xu M Y, *et al.* Varying synthetic phosphorus varieties lead to different fractions in calcareous soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(12): 2581–2594.
- [16] 徐新朋, 魏丹, 李玉影, 等. 基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法在东北春玉米上应用的可行性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1458–1467.
- Xu X P, Wei D, Li Y Y, *et al.* Availability of fertilizer recommendation for spring maize based on yield response and agronomic efficiency in Northeast China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6): 1458–1467.
- [17] 苑爱静, 于杰, 蒋龙刚, 等. 基于养分专家系统的西北旱地冬小麦推荐施肥效应研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(3): 480–490.
- Yuan A J, Yu J, Jiang L G, *et al.* Effects of Nutrient Expert system on yield and economic benefits of winter wheat in the dryland of Northwest China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(3): 480–490.
- [18] 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.
- [19] 邓九胜, 张炜, 朱荣松, 等. 基于土壤有效磷水稻磷肥施用推荐体系的探讨[J]. *西北农业学报*, 2011, 20(2): 81–84.
- Deng J S, Zhang W, Zhu R S, *et al.* Rice phosphorus fertilizer recommendation system study based on soil available phosphorus[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2011, 20(2): 81–84.
- [20] 徐新朋. 基于产量反应和农学效率的水稻和玉米推荐施肥方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2015.
- Xu X P. Methodology of fertilizer recommendation based on yield response and agronomic efficiency for rice and maize[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [21] Li H, Jian L, Li G, *et al.* Past, present, and future use of phosphorus in Chinese agriculture and its influence on phosphorus losses[J]. *AMBIO*, 2015, 44 (Supplement 2): 274–285.
- [22] 熊艳, 王平华, 何晓滨, 等. 云南省旱地玉米土壤养分丰缺指标及肥料利用率研究[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(1): 203–208.
- Xiong Y, Wang P H, He X B, *et al.* Research on soil nutrient rich-lack index and fertilizer using efficiency of maize in Yunnan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(1): 203–208.
- [23] 谭海燕, 童江云, 陆峻波, 等. 云南省昆明市土壤养分含量分析及玉米土壤养分丰缺指标研究[J]. *西南农业学报*, 2014, 27(5): 1995–1999.
- Tan H Y, Tong J Y, Lu J B, *et al.* Study on soil nutrient rich-lack index of corn and changes of soil nutrient content in Kunming City, Yunnan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 27(5): 1995–1999.

- [24] 尹梅, 洪丽芳, 付利波, 等. 滇东红壤区不同海拔高度带玉米的土壤养分丰缺指标研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2012, (3): 35–39.
Yin M, Hong L F, Fu L B, *et al.* Nutrient plentiful-lack index of maize on red soil at different altitudes in east of Yunnan[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012, (3): 35–39.
- [25] 范秀艳, 杨恒山, 高聚林, 等. 施磷方式对高产春玉米磷素吸收与磷肥利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 312–320.
Fan X Y, Yang H S, Gao J L, *et al.* Effects of phosphorus fertilization methods on phosphorus absorption and utilization of high yield spring maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(2): 312–320.
- [26] 徐春丽, 谢军, 王珂, 等. 中国西南地区玉米产量对基础地力和施肥的响应[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(1): 129–138.
Xu C L, Xie J, Wang K, *et al.* The response of maize yield to inherent soil productivity and fertilizer in the southwest China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(1): 129–138.
- [27] 张磊, 都钧, 孔丽丽, 等. 施磷对东北黑土区春玉米产量、磷素吸收利用及土壤磷素平衡的影响[J]. *东北农业科学*, 2020, 45(5): 38–42.
Zhang L, Du J, Kong L L, *et al.* Effects of phosphorus fertilizer application on yield, phosphorus absorption and utilization, soil phosphorus balance of spring maize in black soil region of northeast China[J]. *Chinese Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2020, 45(5): 38–42.
- [28] 赵靛, 侯振安, 李水仙, 等. 磷肥用量对土壤速效磷及玉米产量和养分吸收的影响[J]. *玉米科学*, 2014, 22(2): 123–128.
Zhao J, Hou Z A, Li S X, *et al.* Effects of P rate on soil available P, yield and nutrient uptake of maize[J]. *Chinese Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(2): 123–128.
- [29] Cao N, Chen X, Cui Z, *et al.* Change in soil available phosphorus in relation to the phosphorus budget in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94(2–3): 161–170.
- [30] 李杰, 石元亮, 陈智文. 我国南方红壤磷素研究概况[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 763–768.
Li J, Shi Y L, Chen Z W. Research on phosphorus in southern red soils of China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3): 763–768.