

磷肥用量和石灰对甜玉米产量和磷素吸收利用的影响

吴晓君, 曾子鑫, 郭佩佩, 王曙光, 李京晨, 张 丽*

海南大学热带作物学院, 海南海口 570228

摘要: 采用田间肥料定位试验研究了磷肥用量与石灰配合施用对甜玉米产量、生物量、磷素累积及磷肥利用效率的影响, 旨在为甜玉米高产及磷素高效利用途径提供理论依据。试验采用裂区设计, 主区为磷肥用量, 设置 P_0 (0 kg/hm^2)、 P_{60} (60 kg/hm^2)、 P_{120} (120 kg/hm^2)、 P_{180} (180 kg/hm^2) 4 个磷肥水平; 副区为石灰处理, 设置 L_0 (0 kg/hm^2) 和 L_1 (750 kg/hm^2) 2 个石灰水平, 研究甜玉米鲜食期产量、磷素累积、土壤速效磷及磷肥利用效率对磷肥用量和石灰施用的响应。结果表明, L_0 处理下, 与 P_0 处理相比, P_{120} 和 P_{180} 处理甜玉米鲜穗产量均显著提高, 分别增产 19.4% 和 18.5%, P_0 与 P_{60} 处理间差异不显著; L_1 处理下, P_{60} 处理较 P_0 处理甜玉米鲜穗产量显著提高, 增产 14.0%, 而 P_{60} 、 P_{120} 和 P_{180} 处理间差异不显著。且在 P_{60} 处理下, L_1 处理较 L_0 处理甜玉米鲜穗产量显著提高, 增产 12.7%。与 P_0 处理相比, 施磷处理甜玉米总生物量和磷素累积量显著提高。连续种植 2 季甜玉米后, P_{60} 处理的土壤速效磷含量较初始值无显著差异, 土壤速效磷含量基本维持平衡; P_{120} 和 P_{180} 处理的土壤速效磷含量较初始值分别增加了 103.8% 和 228.4%, 土壤速效磷在 0~20 cm 土层积累明显。施磷显著降低 1 kg 磷素生产鲜穗产量和磷素生理效率, 且随施磷量的增加磷肥利用率显著下降。在 P_{60} 处理下, 与 L_0 处理相比, L_1 处理甜玉米磷肥农学效率、磷肥利用率和磷肥偏生产力均显著提高。因此, 磷肥用量 60 kg/hm^2 配合石灰施用不仅能满足甜玉米高产需求, 同时可以达到较好的磷肥利用效率和维持土壤速效磷平衡, 可作为该地区甜玉米高产增效与环境友好的磷肥管理措施。

关键词: 甜玉米; 磷肥水平; 石灰; 产量; 磷素利用

中图分类号: S513 文献标识码: A

Effects of Phosphorus and Lime Application on Sweet Corn Yield and Phosphorus Uptake and Utilization

WU Xiaojun, ZENG Zixin, GUO Peipei, WANG Shuguang, LI Jingchen, ZHANG Li*

College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China

Abstract: The effects of phosphorus (P) and lime application on yield and biomass and P uptake and utilization of sweet corn were evaluated with a field experiment. Research on the appropriate rate of P application would provide a theoretical basis in improving sweet corn yield and P use efficiency. The field experiment was a split-plot design with main-plot randomly assigned into each of four blocks. The main-plot treatments were four P application rates (0, 60, 120 and 180 kg/hm^2 , expressed as P_0 , P_{60} , P_{120} and P_{180}). The split-plot factors were two lime levels (0 and 750 kg/hm^2 , expressed as L_0 and L_1). The responses of sweet corn yield, P uptake, soil available P and P fertilizer utilization efficiency to P fertilizer application and lime application were studied. The yield of sweet corn increased significantly under P_{120} and P_{180} treatments without lime by 19.4% and 18.5%, respectively, compared with P_0 treatment. Compared to P_0 , the yield of sweet corn increased significantly by 14.0% under P_{60} treatment with lime. Under P_{60} treatment, lime increased the yield of sweet corn significantly by 12.7%. P fertilizer application increased both total biomass and P uptake of sweet corn significantly. After two sweet corn growing seasons, soil available P under P_{60} treatment had no significant difference comparing with the original value. Soil available P basically maintained a balance under P_{60} treatment. Soil

收稿日期 2022-03-09; 修回日期 2022-05-20

基金项目 海南省自然科学基金项目 (No. 320RC497); 海南大学科研启动基金项目 (No. KYQD(ZR)1978)。

作者简介 吴晓君 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农田生态。*通信作者 (Corresponding author): 张 丽 (ZHANG Li), E-mail: lzhang@hainanu.edu.cn。

available P in P_{120} and P_{180} treatments increased by 103.8% and 228.4%, respectively, compared with the original value, and soil available P increased obviously in 0–20 cm soil layer. The fresh ear yield per P uptake and P physiological efficiency decreased significantly with P application rates. Also, the P use efficiency of sweet corn declined with P application rates. P agronomic efficiency, recovery efficiency, and partial factor productivity increased significantly under lime treatments with P_{60} treatment, compared with no-lime treatments. Together, these results indicated that the application of 60 kg/hm^2 P fertilizer combined with lime can be an efficient way to obtain high yield and P utilization efficiency of sweet corn and maintain the balance of soil available P.

Keywords: sweet corn; phosphorus application rate; lime; yield; phosphorus utilization

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.01.014

磷是玉米生长发育所需的大量营养元素之一,是构成植物体内核酸、蛋白质、酶等多种重要化合物的主要成分,对玉米的生长发育和产量形成起着重要作用,合理施用磷肥对玉米产量的提高至关重要^[1]。磷肥施入土壤中容易被固定、沉淀,导致土壤有效磷含量较低,生产中往往投入大量的磷肥以获得作物高产^[2]。磷肥的过量施用不仅使土壤磷素积累、磷肥利用率降低、环境风险加剧^[3-4],还会导致土壤酶活性降低,以及氮、磷等养分失衡,最终影响作物增产效果^[5]。因此,合理施磷是提高玉米产量和肥料利用率的重要措施。

甜玉米又被称为水果玉米、蔬菜玉米,是我国重要的特种经济作物^[6]。当前,国内外关于施磷肥对土壤速效磷、玉米产量以及磷肥利用率等影响方面开展了大量研究。赵靛等^[3]研究结果表明,施磷肥可显著提高玉米产量,不施磷肥会造成土壤速效磷含量降低,施磷量为 150 kg/hm^2 时土壤速效磷含量基本维持平衡,而施磷量为 300 kg/hm^2 时土壤速效磷积累明显。颜晓军等^[7]提出,施磷量为 37.5 kg/hm^2 时甜玉米产量和磷肥利用率较高。陈海珍^[8]研究认为,施磷量在 $0\sim 120 \text{ kg/hm}^2$ 时,甜玉米随磷肥施用量的增加而增加,而当施磷量超过 120 kg/hm^2 ,甜玉米产量开始下降。因此,不同种植区域甜玉米产量和肥料利用率对磷肥的响应存在差异。此外,海南岛属于热带地区,土壤多为 pH 较低的酸性土壤,生产上常用石灰对酸性土壤进行改良。前人研究表明,施石灰能够提高土壤 pH,影响土壤中磷的有效性和植物对磷的吸收^[9-10]。贺根和等^[11]的研究认为,石灰和磷肥共同施用能够促进氮磷养分的转化,促进作物生长。但是关于甜玉米产量和磷素利用效率响应不同磷肥用量和石灰的研究尚少见报道。

本研究旨在探索磷肥用量和石灰的施用对

甜玉米鲜穗产量、磷素累积和磷肥利用率的影响,为甜玉米的高产栽培和磷肥合理施用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

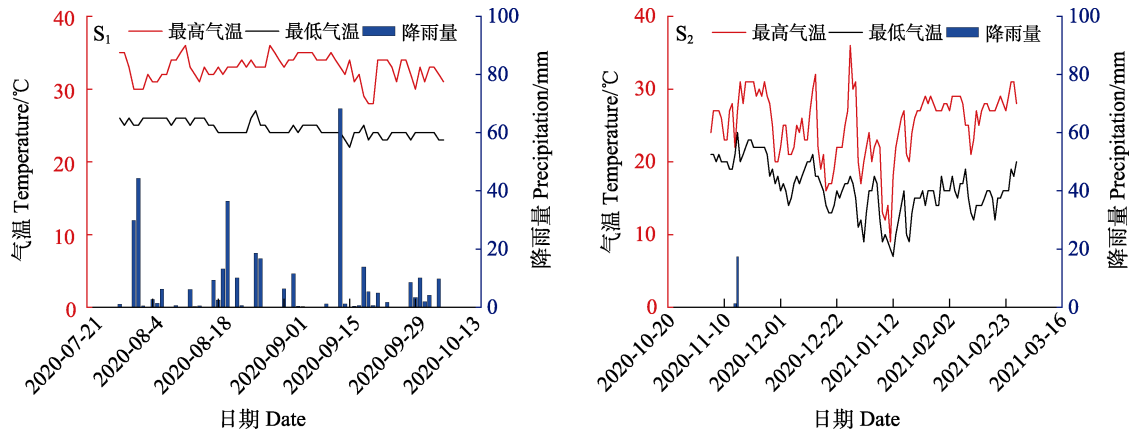
试验于 2020—2021 年在海南省昌江黎族自治县十月田镇军营新村试验基地 ($108^{\circ}97'E$ 、 $19^{\circ}40'N$) 进行,该种植区域属热带季风气候,旱雨季分明,光照充足。试验地土壤类型为砖红壤, pH 值为 5.45,有机质含量 15.30 g/kg 、全氮 2.66 g/kg 、全磷 0.46 g/kg 、速效磷 17.66 mg/kg 、速效钾 251.90 mg/kg 。

两季甜玉米生育期的最高气温、最低气温和降雨量如图 1 所示。第 1 季 (S_1) 和第 2 季 (S_2) 的总降雨量分别为 356.5 mm 和 18.0 mm ,最高气温平均值分别为 32.9°C 和 25.1°C ,最低气温平均值分别为 24.6°C 和 16.4°C 。 S_1 的灌水量为 $210 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, S_2 的灌水量为 $900 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

1.2 试验设计

本试验是磷肥定位试验,采用裂区设计,主区是磷肥处理,设置 4 个磷肥 (P_2O_5) 水平,分别是 P_0 (0 kg/hm^2)、 P_{60} (60 kg/hm^2)、 P_{120} (120 kg/hm^2) 和 P_{180} (180 kg/hm^2)。裂区是石灰处理,设置 2 个石灰水平,分别是 L_0 (0 kg/hm^2) 和 L_1 (750 kg/hm^2),每个处理 3 次重复,小区面积为 $6 \text{ m}\times 10 \text{ m}=60 \text{ m}^2$ 。氮肥 (N) 用量为 180 kg/hm^2 ,钾肥 (K_2O) 用量为 90 kg/hm^2 。磷肥和钾肥作为基肥一次性沟施,氮肥分 3 次施用,分别是基肥、拔节期追肥和大喇叭口期追肥,比例为 3 : 3 : 4。肥料种类为硝酸铵钙 (N 15.5%)、过磷酸钙 (P_2O_5 16%)、氯化钾 (K_2O 60%)。

供试甜玉米品种为‘广良甜 27 号’,采用“宽窄行距”式播种,宽行距为 60 cm ,窄行距为

图 1 S₁ 和 S₂ 大田试验气象数据Fig. 1 S₁ and S₂ field experiment meteorological data

40 cm, 株距为 40 cm, 种植密度为 50 000 株/hm²。在窄行间距铺设微喷带, 以供甜玉米对水分的需求。大田管理方式均按当地高产管理方式进行。在同一试验小区, 甜玉米分别于 2020 年 7 月 28 日播种, 2020 年 10 月 5 日收获, 为 S₁; 2020 年 11 月 5 日播种, 2021 年 2 月 27 日收获, 为 S₂。

1.3 样品采集及测量方法

甜玉米鲜食期时每小区取中间 2 行, 连续各收 10 株穗, 共 20 株, 将鲜穗 (去除苞叶) 称重, 测定鲜穗产量。甜玉米鲜食期于每个小区随机选取具有代表性的植株 5 株, 分为茎、叶和穗三部分。105℃杀青 30 min, 65℃烘干至恒重测定其干重。样品称重后粉碎, 测定各器官全磷含量。采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 全自动间断化学分析仪 (DeChem-Tech, Hamburg, Germany) 测定磷含量。

于甜玉米每季收获后, 采用五点取样法采集 0~20 cm 土壤样品。土壤风干后过筛, 备用。土壤速效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提; 土壤全磷采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 全自动间断化学分析仪 (DeChem-Tech, Hamburg, Germany) 测定。

1.4 相关计算公式

植株磷素累积量 (kg/hm²) = 生物量 × 全磷浓度^[12]

1 kg 磷素生产鲜穗产量 (kg/kg) = 鲜食期甜玉米鲜穗产量 / 植株地上部磷素累积量^[13]

磷素收获指数 = 玉米穗磷素累积量 / 植株地上部磷素累积量 × 100%^[14]

磷素生理效率 (kg/kg) = 鲜食期生物量 / 植株地上部磷素累积量^[15]

磷肥农学效率 (kg/kg) = (施磷区甜玉米鲜穗产量 - 不施磷区甜玉米鲜穗产量) / 磷肥供应量^[12]

磷肥利用率 = (施磷区植株地上部磷素累积量 - 不施磷区植株地上部磷素累积量) / 磷肥供应量 × 100%^[12]

磷肥偏生产力 (kg/kg) = 施磷区甜玉米鲜穗产量 / 磷肥供应量^[12]

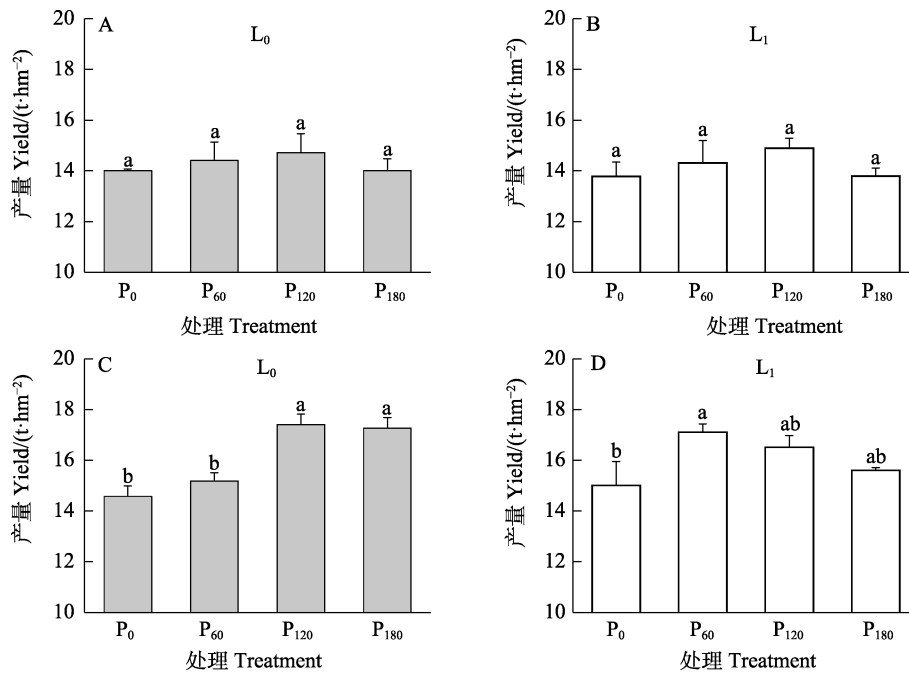
1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理, 用 DPS 9.01 统计软件进行数据统计和方差分析, 不同处理间数据结果采用 LSD 法进行多重比较, 利用 Origin pro 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 磷肥用量和石灰对甜玉米鲜穗产量的影响

如图 2 所示, 磷肥与石灰施用下, S₁ 各处理间甜玉米鲜穗产量无显著差异 (图 2A~图 2B)。S₂ 在 L₀ 处理下, P₁₂₀ 和 P₁₈₀ 处理甜玉米鲜穗产量显著提高, 较 P₀ 处理分别增产 19.4% 和 18.5%, P₆₀ 处理与 P₀ 处理间甜玉米鲜穗产量差异不显著 (图 2C); S₂ 在 L₁ 处理下, P₆₀ 处理甜玉米鲜穗产量显著提高, 较 P₀ 处理增产 14.0%, 而 P₁₂₀、P₁₈₀ 与 P₆₀ 处理间甜玉米鲜穗产量差异不显著 (图 2D)。在 P₆₀ 处理下, L₁ 处理较 L₀ 处理的甜玉米鲜穗产量显著提高, 增产 12.7%; 在 P₁₂₀ 处理下, L₁ 与 L₀ 处理间甜玉米鲜穗产量差异不显著; 在 P₁₈₀ 处理下, L₁ 处理较 L₀ 处理的甜玉米鲜穗产量显著降低, 减产 9.7% (图 2C~图 2D)。由此可见, 60 kg/hm² 磷肥用量与石灰配合施用可提高甜玉米鲜穗产量。



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同磷肥用量和石灰处理下 S₁ (A 和 B) 和 S₂ (C 和 D) 的甜玉米鲜穗产量

Fig. 2 Fresh ear yield of sweet corn in S₁ (A and B) and S₂ (C and D) under different phosphorus fertilizer and lime treatment

2.2 磷肥用量和石灰对甜玉米生物量和磷素累积分配的影响

不同磷肥用量与石灰处理下甜玉米生物量如表 1 所示。在 L₀ 处理下，与 P₀ 处理相比，S₁ 和 S₂ 施磷处理的甜玉米总生物量分别显著提高

了 5.9%~23.0%和 10.0%~20.9%，施磷处理间存在显著差异。在 L₁ 处理下，与 P₀ 处理相比，S₁ 和 S₂ 施磷处理的甜玉米总生物量分别显著提高了 5.3%~15.5%和 16.1%~25.4%，施磷处理间差异不显著。

表 1 不同磷肥用量和石灰处理下的甜玉米生物量

Tab. 1 Biomass of sweet corn under different phosphorus fertilizer and lime treatment t/hm²

季度 Season	处理 Treatment	茎 Stem		叶 Leaf		穗 Spike		总生物量 Total dry matter weight	
		L ₀	L ₁	L ₀	L ₁	L ₀	L ₁	L ₀	L ₁
S ₁	P ₀	2.67 ^c	2.67 ^b	4.45 ^b	4.53 ^b	4.03 ^b	4.12 ^a	11.15 ^c	11.32 ^b
	P ₆₀	2.86 ^b	2.82 ^b	4.77 ^b	4.87 ^{ab}	4.17 ^{ab}	4.24 ^a	11.81 ^b	11.92 ^a
	P ₁₂₀	3.72 ^a	3.16 ^a	5.57 ^a	5.25 ^a	4.44 ^a	4.67 ^a	13.72 ^a	13.08 ^a
	P ₁₈₀	2.82 ^b	3.09 ^a	5.48 ^a	5.09 ^a	4.28 ^{ab}	4.43 ^a	12.57 ^{ab}	12.60 ^a
S ₂	P ₀	3.53 ^c	3.42 ^c	4.50 ^b	3.77 ^b	3.72 ^b	4.10 ^a	11.65 ^c	11.29 ^b
	P ₆₀	4.21 ^b	3.99 ^b	4.47 ^b	4.78 ^a	4.12 ^{ab}	4.33 ^a	12.81 ^b	13.11 ^a
	P ₁₂₀	4.62 ^a	4.64 ^a	4.92 ^a	5.06 ^a	4.55 ^a	4.46 ^a	14.09 ^a	14.16 ^a
	P ₁₈₀	4.26 ^b	4.25 ^{ab}	4.84 ^a	5.07 ^a	4.67 ^a	4.39 ^a	13.77 ^{ab}	13.71 ^a

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$).

不同磷肥用量与石灰处理下甜玉米磷素累积和分配如表 2 所示。在 L₀ 和 L₁ 处理下，施磷均显著提高 S₁ 和 S₂ 甜玉米茎、叶和穗及磷素总累积量。在 L₀ 处理下，与 P₀ 处理相比，S₁ 施磷处理

下甜玉米茎、叶、穗及磷素总累积量分别显著提高 27.8%~183.3%、38.6%~119.9%、6.0%~51.6%和 17.5%~81.3%；S₂ 施磷处理下甜玉米茎、叶、穗及磷素总累积量分别显著提高 27.9%~40.3%、

表 2 不同磷肥用量和石灰处理下的甜玉米磷素累积和分配

Tab. 2 Phosphorus accumulation and distribution in sweet corn under different phosphorus fertilizer and lime treatment

季度 Season	处理 Treatment	kg/hm ²							
		茎 Stem		叶 Leaf		穗 Spike		总累积量 Total P uptake	
		L ₀	L ₁	L ₀	L ₁	L ₀	L ₁	L ₀	L ₁
S ₁	P ₀	1.32 ^d	1.36 ^b	6.12 ^c	7.35 ^b	12.50 ^c	12.13 ^c	19.94 ^d	20.84 ^b
	P ₆₀	1.69 ^c	2.00 ^a	8.48 ^b	9.26 ^a	13.26 ^b	13.96 ^a	23.43 ^c	27.24 ^a
	P ₁₂₀	3.74 ^a	2.07 ^a	13.46 ^a	10.96 ^a	18.95 ^a	15.51 ^a	36.15 ^a	28.54 ^a
	P ₁₈₀	2.05 ^b	2.01 ^a	10.60 ^b	10.52 ^a	15.53 ^b	13.60 ^a	28.18 ^b	26.14 ^a
S ₂	P ₀	2.98 ^b	2.48 ^b	5.82 ^b	7.10 ^c	11.33 ^b	13.70 ^b	20.13 ^c	23.28 ^b
	P ₆₀	4.03 ^a	3.87 ^a	9.09 ^a	9.17 ^b	13.04 ^a	15.46 ^a	26.16 ^b	28.49 ^a
	P ₁₂₀	4.18 ^a	3.79 ^a	10.98 ^a	9.45 ^b	14.61 ^a	16.92 ^a	29.78 ^a	30.15 ^a
	P ₁₈₀	3.81 ^a	4.14 ^a	9.76 ^a	12.11 ^a	15.81 ^a	16.34 ^a	29.38 ^a	32.60 ^a

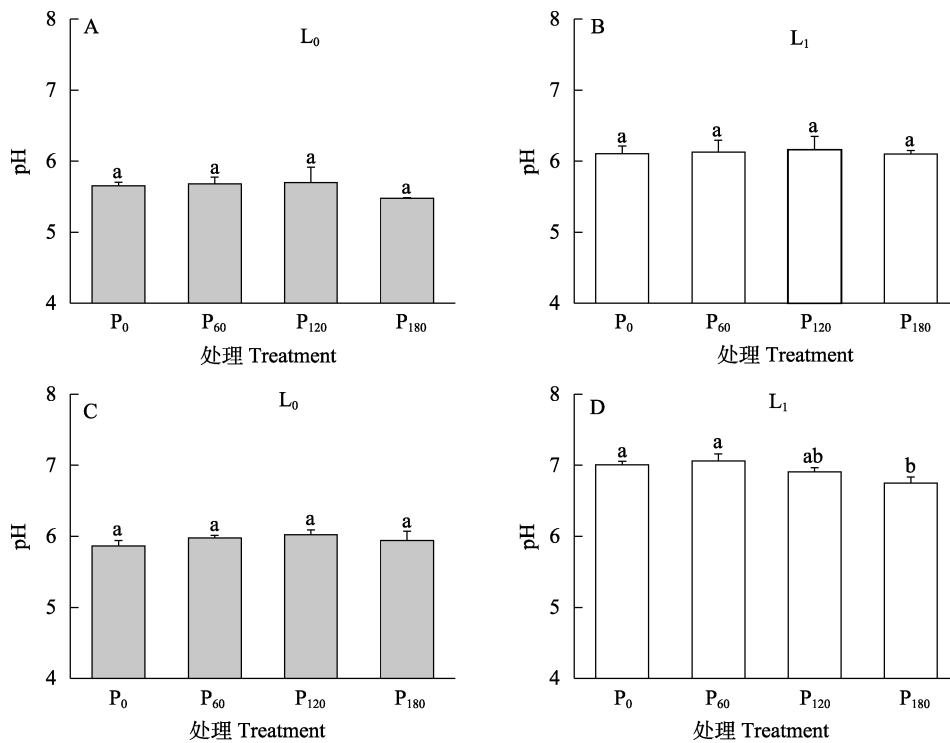
注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$).

56.1%~88.6%、15.1%~39.6%和 30.0%~47.9%。在 L₁ 处理下，与 P₀ 处理相比，S₁ 施磷处理下甜玉米茎、叶、穗及磷素总累积量分别提高 47.0%~52.2%、26.0%~49.1%、12.1%~27.9%和 25.4%~36.9%；S₂ 施磷处理下甜玉米茎、叶、穗及磷素总累积量分别提高 52.8%~67.0%、29.1%~70.6%、12.9%~23.5%和 22.4%~40.0%。磷素累积量在甜玉米各器官的分配比例表现为穗>叶>茎。

2.3 磷肥用量和石灰对土壤 pH 和速效磷含量的影响

由图 3 可知，施石灰显著提高土壤 pH，而施磷量对土壤 pH 无显著影响。与 L₀ 处理相比，S₁ 和 S₂ 的 L₁ 处理土壤 pH 分别提高 0.50 个单位和 0.98 个单位，两季平均增加 0.74 个单位。在 L₁ 处理下，除 S₂ P₁₈₀ 处理土壤 pH 较 P₀ 和 P₆₀ 处理分别降低 0.25 和 0.31 个单位外，处理间土壤 pH



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同磷肥用量和石灰处理下 S₁ (A 和 B) 和 S₂ (C 和 D) 的土壤 pH

Fig. 3 Soil pH in S₁ (A and B) and the S₂ (C and D) under different phosphorus fertilizer and lime treatment

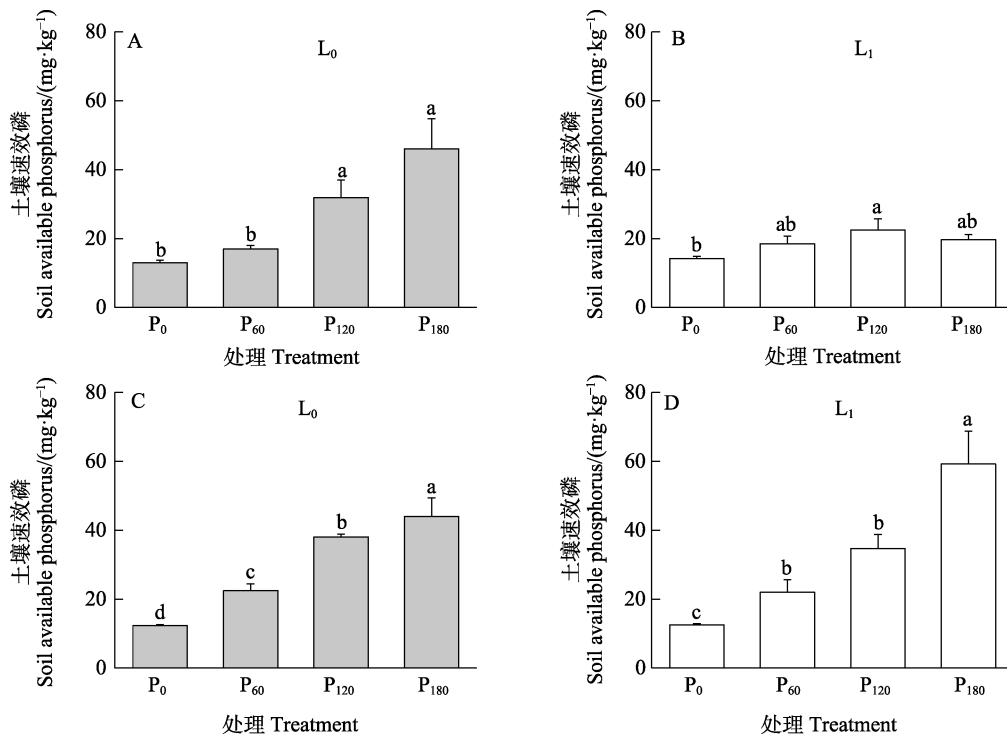
差异不显著 (图 3B, 图 3D)。

S_1 和 S_2 甜玉米收获后, 土壤速效磷含量如图 4 所示。在 L_0 处理下, 与 P_0 处理相比, S_1 施磷处理 P_{120} 和 P_{180} 土壤速效磷含量分别提高 145.3% 和 254.0%, 而 P_0 与 P_{60} 处理间土壤速效磷含量差异不显著; 施磷显著提高 S_2 土壤速效磷含量, 与 P_0 处理相比, 施磷处理土壤速效磷含量提高 81.3%~255.8% (图 4A, 图 4C)。在 L_1 处理下, 与 P_0 处理相比, P_{120} 处理显著提高 S_1 土壤速效磷含量, 较 P_0 处理提高 15.5%, P_0 、 P_{60} 和 P_{180} 处理间土壤速效磷含量差异不显著; 与 P_0 处理相比, 施磷显著提高 S_2 土壤速效磷含量, 较 P_0 处理提高 75.3%~371.7%。此外, P_0 处理 S_1 和 S_2 土壤速效磷含量较初始值均显著降低; P_{60} 处理 S_1 和 S_2 土壤速效磷含量与初始值相比差异不显著; P_{120} 和 P_{180} 处理 S_2 土壤速效磷含量显著增加, 土壤速

效磷含量表现出累积效应。

2.4 磷肥用量和石灰对磷素利用效率的影响

由表 3 可知, 施磷显著降低 1 kg 磷素生产鲜穗产量和磷素生理效率。在 L_0 处理下, 施磷显著降低 S_1 磷素收获指数。在 L_0 处理下, 与 P_0 处理相比, S_1 施磷处理的 1 kg 磷素生产鲜穗产量、磷素收获指数和磷素生理效率分别显著降低了 11.8%~29.3%、11.1%~17.5% 和 8.6%~20.2%; 与不施磷处理相比, S_2 施磷处理的 1 kg 磷素生产鲜穗产量和磷素生理效率分别显著降低了 16.1%~18.0% 和 19.8%~22.4%。 L_1 处理下, 与 P_0 处理相比, S_1 施磷处理的 1 kg 磷素生产鲜穗产量和磷素生理效率分别显著降低了 15.2%~21.1% 和 10.7%~15.6%; 与 P_0 处理相比, S_2 施磷处理的 1 kg 磷素生产鲜穗产量和磷素生理效率分别显著降低了 9.4%~28.1% 和 4.6%~14.6%。



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$).

图 4 不同磷肥用量和石灰处理下 S_1 (A 和 B) 和 S_2 (C 和 D) 的土壤速效磷含量

Fig. 4 Soil available phosphorus content in S_1 (A and B) and S_2 (C and D) under different phosphorus fertilizer and lime treatment

由表 4 可见, 在 L_0 和 L_1 处理下, S_1 和 S_2 甜玉米磷肥农学效率和磷肥偏生产力均随施磷量的增加而显著下降 (S_2 L_0 处理下甜玉米磷肥农学效率除外), 不同磷肥用量甜玉米磷肥农学效率和磷肥偏生产力均表现为 $P_{60} > P_{120} > P_{180}$ 。在 L_0 和 L_1

处理下, P_{60} 处理 S_1 和 S_2 甜玉米磷肥利用率均显著高于 P_{120} 和 P_{180} 处理 (S_1 L_0 处理下甜玉米磷肥利用率除外)。在 P_{60} 处理下, 与 L_0 处理相比, L_1 处理显著提高 S_1 甜玉米磷肥农学效率和磷肥利用率, 分别提高了 192.9% 和 84.5%; L_1 处理

表 3 不同磷肥用量和石灰处理下的甜玉米 1 kg 磷素生产鲜穗产量、磷素收获指数和磷素生理效率
Tab. 3 Fresh ear yield of yield per phosphorus accumulation, phosphorus harvest index and phosphorus internal efficiency of sweet corn under different phosphorus fertilizer and lime treatment

季度 Season	处理 Treatment	1 kg 磷素生产鲜穗产量 Yield per phosphorus accumulation/(kg·kg ⁻¹)		磷素收获指数 Phosphorus harvest index/%		磷素生理效率 Phosphorus internal efficiency/(kg·kg ⁻¹)	
		L ₀	L ₁	L ₀	L ₁	L ₀	L ₁
S ₁	P ₀	704 ^a	663 ^a	63 ^a	58 ^a	560 ^a	544 ^a
	P ₆₀	621 ^b	562 ^b	56 ^b	57 ^{ab}	512 ^b	466 ^b
	P ₁₂₀	508 ^c	523 ^b	52 ^b	54 ^{ab}	480 ^b	459 ^b
	P ₁₈₀	498 ^c	536 ^b	55 ^b	52 ^b	447 ^c	486 ^b
S ₂	P ₀	710 ^a	669 ^a	55 ^a	58 ^a	611 ^a	492 ^a
	P ₆₀	582 ^b	606 ^b	50 ^a	56 ^a	490 ^b	463 ^b
	P ₁₂₀	586 ^b	549 ^b	49 ^a	51 ^a	474 ^b	470 ^b
	P ₁₈₀	596 ^b	481 ^b	44 ^b	40 ^b	475 ^b	420 ^c

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$).

表 4 不同磷肥用量和石灰处理下的甜玉米磷肥农学效率、磷肥利用率和磷肥偏生产力
Tab. 4 Agronomic efficiency, utilization rate and partial productivity of phosphate fertilizer in sweet corn under different phosphorus fertilizer and lime treatment

季度 Season	处理 Treatment	磷肥农学效率 Phosphorus agronomic efficiency/(kg·kg ⁻¹)		磷肥利用率 Phosphorus recovery efficiency/%		磷肥偏生产力 Phosphorus partial factor productivity/(kg·kg ⁻¹)	
		L ₀	L ₁	L ₀	L ₁	L ₀	L ₁
S ₁	P ₀						
	P ₆₀	8.5 ^a	24.9 ^a	5.8 ^a	10.7 ^a	240.1 ^a	255.1 ^a
	P ₁₂₀	5.9 ^b	9.3 ^b	13.5 ^a	6.4 ^b	122.6 ^b	124.1 ^b
	P ₁₈₀	0.1 ^c	1.1 ^c	4.6 ^a	2.9 ^c	77.8 ^c	76.6 ^c
S ₂	P ₀						
	P ₆₀	10.0 ^a	35.0 ^a	9.1 ^a	8.7 ^a	252.9 ^a	285.0 ^a
	P ₁₂₀	23.6 ^a	12.5 ^b	7.5 ^b	5.7 ^b	145.1 ^b	137.6 ^b
	P ₁₈₀	15.0 ^a	3.3 ^c	4.7 ^c	5.2 ^b	95.9 ^c	86.6 ^c

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$).

显著提高 S₂ 甜玉米磷肥农学效率和磷肥偏生产，分别提高了 250.0% 和 12.7%。

3 讨论

合理施磷是满足作物磷素营养需求、促进作物生长发育和产量形成的有效途径^[16]。玉米是磷敏感作物^[17]，为提高玉米产量，农户生产实践中往往投入过量的磷肥。但过量施用磷肥不仅导致磷资源的浪费，生产成本增加，还会导致大量磷素以难溶态形式在土壤中固定，影响作物增产，甚至减产^[3, 5]。本研究结果表明，在第 2 季不施石灰处理下，施磷量 120 kg/hm² 和 180 kg/hm² 显著提高甜玉米鲜穗产量，较不施磷处理分别增产 19.4% 和 18.5%，在施石灰处理下，施磷量

60 kg/hm² 显著提高甜玉米鲜穗产量，较不施磷处理增产 14.0%。

速效磷是能够被植物直接吸收利用的磷，是土壤磷肥力的重要指标。磷肥施用是农田土壤中速效磷的重要来源。本研究结果表明，不施磷处理土壤速效磷含量较初始值显著下降；施磷量较低（60 kg/hm²）时，土壤速效磷含量与初始值相比无显著差异，土壤速效磷基本维持平衡；而施磷量为 120 kg/hm² 和 180 kg/hm² 时，0~20 cm 耕层土壤速效磷含量显著增加，土壤速效磷累积明显。区惠平等^[18]的研究发现，磷肥施用量为 126 kg/hm²，土壤速效磷增加，导致土壤磷酸盐累积和淋溶风险增加。本研究结果表明，与不施石灰相比，施用石灰后，第 1 季和第 2 季土壤 pH

分别平均增加 0.50 和 0.98 个单位,与邱全敏等^[9]研究结果一致。本研究结果表明,第 2 季施石灰处理下,施磷量为 180 kg/hm² 的土壤 pH 显著低于不施磷处理和施磷量 60 kg/hm² 处理。有研究发现,土壤磷酸盐淋溶导致土壤盐基离子含量降低,土壤酸化加重^[19]。因此,可能是施磷量较高时,土壤速效磷累积,导致土壤磷酸盐淋溶风险增加,盐基阳离子含量下降,土壤 pH 下降。

玉米对土壤酸度敏感度比较高,在酸性土壤上施石灰可提高玉米产量,土壤 pH 较低时玉米减产较为严重^[20]。储祥云等^[21]研究表明,施磷量较低时,施石灰有增产作用。本研究发现,第 2 季甜玉米产量较第 1 季显著高了 12.5%。这可能是磷积累和石灰后效作用导致第 2 季产量较高的原因;郭晓方等^[22]研究发现,磷肥与石灰混合施用显著提高玉米产量,并且磷肥和石灰对玉米生长有后效作用。也可能是第 2 季昼夜温差大以及与第 1 季气温差异造成两季产量差异。在第 2 季不施石灰处理下,施磷量为 120 kg/hm² 和 180 kg/hm² 显著提高甜玉米鲜穗产量,较不施磷处理分别增产 19.4%和 18.5%;且在施石灰处理下,低磷处理 60 kg/hm² 显著提高甜玉米鲜穗产量,较不施磷处理增产 14.0%。这可能是土壤速效磷积累、石灰后效作用以及磷酸盐淋溶等问题使得第 2 季产量处理间存在显著差异。本研究结果表明,在第 2 季中,与不施石灰相比,施用石灰显著提高了低磷处理 60 kg/hm² 的甜玉米产量 12.7%,达到较高产量。由此可见,低磷处理(60 kg/hm²)配合石灰施用不仅能达到较高的甜玉米产量,还能维持土壤速效磷含量基本平衡,节约磷资源。

生育期内生物量和养分积累是作物产量形成的关键^[7, 23-24]。边秀芝等^[25-26]研究表明,增施磷肥能增加玉米生物量。本研究表明,施磷显著提高甜玉米植株总生物量。有研究表明,施磷可显著增加玉米植株的磷素吸收^[7, 27]。本研究结果表明,施磷显著提高甜玉米植株磷素累积量。磷素在甜玉米器官的分配比例分别为穗>叶>茎,其中磷素主要分配于穗,这可能是在磷肥水平下促进了营养器官的磷素向穗转移。可见适宜的磷供应对养分有效转移到玉米穗中非常重要^[28]。

肥料生理效率、农学效率、肥料利用率和偏生产力等都是表示养分利用率的一些基础指标,可以反映出作物对肥料的利用率^[12-14]。颜晓军等^[7]

研究表明,甜玉米 1 kg 磷素生产鲜穗产量、磷肥生理效率和偏生产力均随着磷肥的施用量增加而显著下降。本研究结果表明,施磷显著降低 1 kg 磷素生产鲜穗产量、磷素生理效率和磷肥偏生产力。姚珊等^[29]研究发现,土壤速效磷的合理值为 17~40 mg/kg,磷肥推荐施用量为 60~120 kg/hm²,当土壤速效磷含量超过 40 mg/kg 时,不仅会降低磷肥利用率,并且潜在的磷损失风险急剧增大。本研究结果表明,随施磷量的增加磷肥利用率显著下降;与不施石灰相比,施磷量为 60 kg/hm² 时,施石灰显著提高第 1 季的磷肥农学效率和磷肥利用率,显著提高第 2 季的磷肥农学效率和磷肥偏生产力。可见,施磷量 60 kg/hm² 与石灰配合施用能达到较好的磷素吸收利用效率。

综上所述,施磷量 60 kg/hm² 和石灰配合施用可以满足甜玉米高产需求,同时可以达到较好的磷素吸收利用效率和维持土壤速效磷平衡,是高产增效的有效途径。

参考文献

- [1] 侯云鹏,杨建,孔丽丽,尹彩侠,李前,秦裕波,王立春,谢佳贵.不同施磷水平对春玉米产量、养分吸收及转运的影响[J].玉米科学,2017,25(3):123-130.
HOU Y P, YANG J, KONG L L, YIN C X, LI Q, QIN Y B, WANG L C, XIE J G. Effect of different phosphorus levels on yield, nitrogen, phosphorus and potassium absorption and translocation of spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(3): 123-130. (in Chinese)
- [2] 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 in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 763-768. (in Chinese)
- [3] 赵靛,侯振安,李水仙,刘立鹏,黄婷,张扬.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, LIU L P, HUANG T, ZHANG Y. Effects of P rate on soil available P, yield and nutrient uptake of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2014, 22(2): 123-128. (in Chinese)
- [4] 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[J].土壤学报,2008,45(5):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[J]. Acta

- Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- [5] 耿玉辉, 曹国军, 叶青, 其其格, 武鹏, 张鹰. 磷肥不同施用方式对土壤速效磷及春玉米磷素吸收和产量的影响[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(4): 470-474.
GENG Y H, CAO G J, YE Q, QI Q G, WU P, ZHANG Y. Effects of different phosphorus applications on soil available phosphorus, phosphorus absorption and yield of spring maize[J]. Journal of South China Agricultural University, 2013, 34(4): 470-474. (in Chinese)
- [6] 尹艳, 何黎明. 甜玉米茎腐病发生原因及防治措施[J]. 作物杂志, 2004(6): 36-37.
YIN Y, HE L M. Causes and control measures of sweet corn stem rot[J]. Crops, 2004(6): 36-37. (in Chinese)
- [7] 颜晓军, 叶德练, 苏达, 李芳, 郑朝元, 吴良泉. 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): 169-76.
YAN X J, YE D L, SU D, LI F, ZHENG C Y, WU L Q. Effects of phosphorus application on phosphorus uptake and utilization of sweet corn[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(1): 169-76. (in Chinese)
- [8] 陈海珍. 磷、钾肥对广东甜玉米抗性及其产量的影响[J]. 热带农业工程, 2018, 42(1): 1-4.
CHEN H Z. Effects of phosphorus and potassium fertilizers on the resistance and yield of sweet corn in Guangdong[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2018, 42(1): 1-4. (in Chinese)
- [9] 邱全敏, 王伟, 吴雪华, 周昌敏, 白翠华, 姚丽贤. 施用不同 pH 改良剂对荔枝园酸性土壤性质及荔枝生长的影响[J]. 热带作物学报, 2020, 41(2): 217-224.
QIU Q M, WANG W, WU X H, ZHOU M C, BAI C H, YAO L X. Effects of soil pH conditioners on soil properties of acid litchi orchards and litchi growth[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(2): 217-224. (in Chinese)
- [10] 胡敏, 向永生, 鲁剑巍. 石灰用量对酸性土壤 pH 值及有效养分含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(4): 72-77.
HU M, XIANG Y S, LU J W. Effects of lime application rates on soil pH and available nutrient content in acidic soils[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(4): 72-77. (in Chinese)
- [11] 贺根和, 王小东, 刘强. 石灰和磷肥对酸性土壤中野生油茶幼苗生长及土壤酶活性的影响[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(21): 5258-5261.
HE G H, WANG X D, LIU Q. Effects of lime and phosphorus fertilizer on wild seedlings growth of *Camellia oleifera* Abel. and enzyme activity of soil enzyme[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(21): 5258-5261. (in Chinese)
- [12] 许瑞, 徐新朋, 侯云鹏, 张佳佳, 黄少辉, 丁文成, 刘迎夏, 何萍. 生态集约化管理提高东北春玉米产量和氮素利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 461-471.
XU R, XU X P, HOU Y P, ZHANG J J, HUANG S H, DIGN W C, LIU Y X, HE P. Increasing yield and nitrogen use efficiency of spring maize in Northeast China through ecological intensification management[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(3): 461-471. (in Chinese)
- [13] 卢艳丽. 糯玉米氮磷钾养分吸收利用效率的基因型差异[D]. 扬州: 扬州大学, 2006.
LU Y L. Genetic differences of N, P, K absorption and utilization efficiency in waxy corn[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2006. (in Chinese)
- [14] 李波, 张吉旺, 靳立斌, 崔海岩, 董树亭, 刘鹏, 赵斌. 施钾量对高产夏玉米产量和钾素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 832-838.
LI B, ZHANG J W, JIN L B, CUI H Y, DONG S T, LIU P, ZHAO B. Effects of K fertilization on yield, K use efficiency of summer maize under high yield conditions[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(4): 832-838. (in Chinese)
- [15] 易镇邪, 王璞, 陈平平, 屠乃美. 氮肥类型对夏玉米氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 472-478.
YI Z X, WANG P, CHEN P P, TU N M. Effect of different types of nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization of summer maize (*Zea mays* L)[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(3): 472-478. (in Chinese)
- [16] LANG M, CHRISTIE P, ZHANG J, LI X. Long-term phosphorus application to a maize monoculture influences the soil microbial community and its feedback effects on maize seedling biomass[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 128: 12-22.
- [17] 米国华, 邢建平, 陈范骏, 刘向生, 刘燕. 玉米苗期根系生长与耐低磷的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 468-472.
MI G H, XING J P, CHEN F J, LIU X S, LIU Y. Maize root growth in relation to tolerance to low phosphorus[J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2004, 10(5): 468-472. (in Chinese)
- [18] 区惠平, 周柳强, 黄美福, 黄金生, 韦运兰, 谢如林, 曾艳, 刘昔辉, 朱晓晖, 谭宏伟. 不同施磷量下稻田土壤磷素平衡及其潜在环境风险评估[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 40-47.
OU H P, ZHOU L Q, HUANG M F, HUANG J S, WEI Y L, XIE R L, ZENG Y, LIU X H, ZHU X H, TAN H W. Phosphorus balance in paddy soils and its environmental effect under different phosphorus application rates[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(1): 40-47. (in Chinese)

- [19] 周生路, 陆春锋, 万红友. 苏南菜地土壤酸化特点及成因分析[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2005, 33(1): 69-72, 91.
ZHOU S L, LU C F, WAN H Y. Study on the characteristic and cause of vegetable soil acidification in the area of southern Jiangsu Province[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 2005, 33(1): 69-72, 91. (in Chinese)
- [20] 曾廷廷, 蔡泽江, 王小利, 梁文君, 周世伟, 徐明岗. 酸性土壤施用石灰提高作物产量的整合分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(13): 2519-2527.
ZENG T T, CAI Z J, WANG X L, LIANG W J, ZHOU S W, XU M G. Integrated analysis of liming for increasing crop yield in acidic soils[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(13): 2519-2527. (in Chinese)
- [21] 储祥云, 黄昌勇, 何振立. 磷肥和石灰对酸性土壤上一年生黑麦草生长的影响[J]. 浙江农业大学学报, 1999, 25(1): 19-22.
CHU X Y, HUANG C Y, HE Z L. Effect of phosphorus fertilizer and lime application on growth of annual ryegrass grown in acid soils[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1999, 25(1): 19-22. (in Chinese)
- [22] 郭晓方, 卫泽斌, 谢方文, 吴启堂. 过磷酸钙与石灰混施对污染农田低累积玉米生长和重金属含量的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(4): 1374-1380.
GUO X F, WEI Z B, XIE F W, WU Q T. Effect of lime and superphosphate on maize production and heavy metals uptake by low-accumulating maize[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(4): 1374-1380. (in Chinese)
- [23] 钱春荣, 王荣焕, 于洋, 徐田军, 宫秀杰, 郝玉波, 姜宇博, 李梁, 吕国依, 杨忠良, 赵久然. 不同熟期玉米品种在不同生态区的干物质积累、转运与分配特征[J]. 玉米科学, 2021, 29(2): 60-68.
QIAN C R, WANG R H, YU Y, XU T J, GONG X J, HAO Y B, JIANG Y B, LI L, LYU G Y, YANG Z L, ZHAO J R. Characteristics of dry matter accumulation, transportation and distribution of maize varieties differing in maturities in different ecological zones[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(2): 60-68. (in Chinese)
- [24] 陆大雷, 闫发宝, 陆卫平. 甜玉米磷素吸收利用的基因型差异[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2010, 31(3): 60-64.
LU D L, YAN F B, LU W P. Genotypic difference of phosphorus uptake and utilization in sweet maize varieties[J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2010, 31(3): 60-64. (in Chinese)
- [25] 边秀芝, 盖嘉慧, 郭金瑞, 阎孝贡, 任军, 赵进宝. 玉米施磷肥的生物效应[J]. 玉米科学, 2008, 16(5): 120-122.
BIAN X Z, GAI J H, GUO J R, YAN X G, REN J, ZHAO J B. Biological effects of phosphorus fertilizer application on maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(5): 120-122. (in Chinese)
- [26] 刘世红, 吴盛黎, 戴保威. 磷、钾肥对糯玉米鲜果穗产量及品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2005, 44(6): 59-61.
LIU S H, WU S L, DAI B W. Effects of P and K fertilizers on fresh fruit yield and quality of waxy corn[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2005, 44(6): 59-61. (in Chinese)
- [27] 范秀艳, 杨恒山, 高聚林, 张瑞富, 王志刚, 张玉芹. 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, ZHANG R F, WANG Z G, ZHANG Y Q. Effects of phosphorus fertilization methods on phosphorus absorption and utilization of high yield spring maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 312-320. (in Chinese)
- [28] 吴启华, 刘晓斌, 张淑香, 尹彩侠, 李桂花, 谢佳贵. 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, YIN C X, LI G H, XIE J G. 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 Fertilizer, 2016, 22(6): 1468-1476. (in Chinese)
- [29] 姚珊, 张东杰, Batbayar Javkhlan, 刘琳, 李若楠, 周江香, 张树兰, 杨学云. 冬小麦-夏玉米体系磷效率对赋土磷素肥力的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1640-1650.
YAO S, ZHANG D J, JAVKHLAN B, LIU L, LI R N, ZHOU J X, ZHANG S L, YANG X Y. Responses of phosphorus use efficiency to soil phosphorus fertility under winter wheat-summer maize cropping in loess soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(6): 1640-1650. (in Chinese)