

张立丹, 刘庆虎, 刘芳, 等. 控释配方肥的磷肥用量对富磷土壤香蕉产量及磷肥利用效率的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(2): 51-57.
ZHANG Lidan, LIU Qinghu, LIU Fang, et al. Effects of phosphorus application rate in controlled release formula fertilizer on yield and phosphorus use efficiency of banana in phosphorus-rich soil[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(2): 51-57.

控释配方肥的磷肥用量对富磷土壤香蕉产量及磷肥利用效率的影响

张立丹, 刘庆虎, 刘芳, 孙少龙, 樊小林
(华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】探讨土壤富磷情况下,施用磷肥的必要性和重要性,明确控释配方肥中磷肥用量对香蕉产量、磷累积量及磷肥利用率的影响,为确定控释配方肥磷的配比及富磷土壤合理施用磷肥提供理论依据。【方法】采用磷梯度大田试验,研究控释配方肥的磷肥供应水平对香蕉产期、产量、磷累积量和磷肥利用率的影响。【结果】在Bray-P 为 158 mg·kg⁻¹ 的富磷土壤上,固定氮(N)200 g·株⁻¹ 和钾(K₂O) 400 g·株⁻¹ 的供应水平下,当磷肥(P₂O₅) 用量为 80 g·株⁻¹ 时,促进香蕉提早抽蕾和提前收获效果最为明显,同期收获率较其他处理提高 5.3~31.1 个百分点;随着磷肥用量的增加,香蕉产量和肥料利用率均呈先增加后降低的趋势,其中磷肥用量为 80 g·株⁻¹ 时,香蕉产量和当季磷肥表观利用率最高,分别达到 27.7 kg·株⁻¹ 和 16.0%。【结论】在有效磷高的富磷土壤上,施磷可以提高香蕉产量和增加经济效益,建议控释配方肥的氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O) 的配比为 1.0:0.4:2.0,香蕉氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O) 推荐施肥量分别为 200、80 和 400 g·株⁻¹,其中控释氮占总氮的 20%。

关键词: 磷肥用量;磷富集土壤;香蕉;产量;磷肥利用率
中图分类号: S668.1; S147.22 文献标志码: A 文章编号: 1001-411X(2021)02-0051-07

Effects of phosphorus application rate in controlled release formula fertilizer on yield and phosphorus use efficiency of banana in phosphorus-rich soil

ZHANG Lidan, LIU Qinghu, LIU Fang, SUN Shaolong, FAN Xiaolin
(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To explore the necessity and importance of phosphorus fertilization in phosphorus-rich soil, clarify the effects of phosphorus application rate in controlled release formula fertilizer on banana yield, phosphorus accumulation and use efficiency of phosphorus fertilizer, and provide a theoretical basis for determining fertilizer formula and rational application of phosphorus fertilizer in phosphorus-rich soil. 【Method】The field experiment of phosphorus gradient was carried out to study the effects of phosphorus application rate in the controlled release formula fertilizer on banana shooting and harvest time, yield, phosphorus accumulation and phosphorus fertilizer use efficiency. 【Result】In phosphorus-rich soil with Bray-

P of 158 mg·kg⁻¹, the supply levels of nitrogen (200 g N per plant) and potassium (400 g K₂O per plant) were fixed. When the phosphorus application rate was 80 g P₂O₅ per plant, the effect of promoting bud emerging and harvest time of banana was most obvious, and the harvest rate at the same period increased by 5.3 to 31.1 percentage points than other treatments. The banana yield and phosphorus fertilizer use efficiency both increased first and then decreased with the increase of the phosphorus application rate. When the phosphorus application rate was 80 g P₂O₅ per plant, the banana yield and apparent P recovery efficiency in the current season were the highest reaching 27.7 kg·plant⁻¹ and 16.0%, respectively. 【Conclusion】 In phosphorus-rich soil, phosphorus application can increase the banana yield and economic benefit. The ratio of nitrogen (N), phosphorus (P₂O₅), and potassium (K₂O) in the controlled release formula fertilizer was recommended to be 1.0 : 0.4 : 2.0, and the recommended fertilization application rates were 200 g N, 80 g P₂O₅ and 400 g K₂O per banana plant, of which controlled release N accounted for 20% of total nitrogen.

Key words: phosphorus application rate; phosphorus-rich soil; banana; yield; phosphorus fertilizer use efficiency

磷是香蕉生长所必需的营养元素之一, 施磷不仅能促进香蕉根系和植株的生长, 而且可提高果实产量和品质^[1-4], 还可以改善果实中淀粉含量^[5]。一般认为, 香蕉适宜的土壤有效磷质量分数为 20~40 mg·kg⁻¹^[6]。然而在香蕉生产中, 为了获得较高产量, 磷的不合理施用现象仍普遍存在, 尤其是香蕉栽培生产上普遍以复合肥追肥, 导致土壤磷过量累积和大幅增高^[7]; 与全国第 2 次土壤普查值相比, 广东省的蕉园土壤有效磷最高可达 312.0 mg·kg⁻¹, 平均增加了 8.5 倍^[8]; 福建漳州 92.13% 的蕉园土壤有效磷含量处于极高水平, 质量分数平均高达 291 mg·kg⁻¹^[6]。当前对富磷土壤是否需要施用磷肥存在很大争议, 有研究认为, 当土壤有效磷含量达到一定阈值时, 继续增加有效磷不仅无法增加作物产量, 反而可能带来土壤磷流失^[9]、淋溶加剧^[10-11]。但也有研究表明, 在有效磷高的土壤上, 要实现增产仍需要施用大量的磷肥^[12-13]。生产实践中大多数蕉农坚信即使土壤富含磷, 施用磷肥仍有增产效果, 因为香蕉是需肥量大的经济作物, 磷肥不足会导致减产。前人研究表明, 使用控释配方肥是提高香蕉肥料利用率、减施化肥的有效措施, 同时也是解决农民习惯施肥模式下养分配比不协调和实现轻简施肥、节工省力的施肥模式^[14-16]。然而迄今鲜见富磷土壤施用控释配方肥中磷肥比例和用量的研究报告。在富磷土壤上推广应用控释配方肥提高肥料利用率和实现香蕉轻简施肥, 首要解决的问题之一就是确定适宜的磷肥用量和配方。本文以有效磷高的富磷土壤作为栽培地, 在氮、钾用量和控释比例一定的条件下, 研究磷肥用量对香蕉产期、产量和磷肥利用率的影响, 探讨控释配方肥中磷肥适宜用量, 为富磷土壤香蕉的合理施肥提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试香蕉品种为巴西蕉 *Musa* AAA Giant Cavendish cv. Brazil。于 2015 年 6 月移栽, 2016 年 4 月收获, 单畦双行“品”字形种植, 种植规格为: 畦宽 4.38 m, 株行距 2.24 m×2.19 m, 密度 2 505 株·hm⁻²。试验地位于海南省乐东县尖峰岭镇。土壤类型为砖红壤, 质地为砂壤, 土壤 pH6.37, 有机质、全氮、全磷和全钾分别为 8.89、0.42、0.72 和 5.89 g·kg⁻¹, 有效氮、有效磷和有效钾分别为 12.56、158.47 和 156.02 mg·kg⁻¹。

供试肥料为植物源油脂包膜控释尿素 (PCU, 氮质量分数为 43.9%, 肥效期 3~4 个月)、尿素、磷酸二铵、氯化钾、硫酸钾配制而成, 控氮占总氮 20% 的香蕉控释配方肥。

1.2 试验设计

试验采用磷肥施用量单因素 7 水平完全设计, 磷肥 (P₂O₅) 施用量为 0、25.6、53.3、80.0、106.7、133.3 和 160.0 g·株⁻¹ 共 7 个水平, 分别记做 P0、P1、P2、P3、P4、P5 和 P6 处理; 各处理的氮和钾用量相等, 氮肥 (N) 用量为 200 g·株⁻¹, 钾肥 (K₂O) 用量为 400 g·株⁻¹, 旺长期每株补充硫酸镁 100 g 和硫酸锌 50 g。每处理 3 个重复, 每个重复种植 30 株香蕉, 小区面积约 125 m²。各处理除控释配方肥以外的追肥时期及应用比例见表 1。

1.3 测定指标及方法

在香蕉抽蕾期和收获期每 7 d 观测 1 次并记录各处理香蕉的抽蕾情况、收获情况。在收获期, 将香蕉树体按照果实、果轴、球茎、假茎、叶片进行分解采样, 测定各器官生物量及磷含量, 并依次计算磷

表 1 氮、磷、钾肥的施用时期及比例
Table 1 Fertilization time and application ratio of N, P, K fertilizer

生长阶段 Growth stage	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
大田苗期(9~11片叶) Field seedling stage (9 – 11 leaves)	30	20	10
营养生长期旺盛期(16~18片叶) Fast growth stage (16 – 18 leaves)	40	40	40
孕蕾期(24~26片叶) Bud promotion stage (24 – 26 leaves)	20	30	40
幼果期 Young fruit stage	10	10	10

累积量和磷利用效率等。

磷累积量=地上部各部位生物量×植株各部位磷含量;

磷肥的表观利用率=(施磷区植株总吸磷量-无磷区植株总吸磷量)/磷肥用量×100%;

磷肥的农学利用效率=(施磷区产量-无磷区产量)/磷肥施用量;

磷肥的偏生产力=施磷区产量/磷肥施用量;
增产量=施磷区产量-不施磷区产量。

植株全磷用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 分光光度计测定; 土壤有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾的含量和土壤 pH 均参考鲍士旦^[17] 的方法测定, 其中土壤速效磷采用 Bray 法, 以 0.025 mol·L⁻¹ 的 HCl +0.03 mol·L⁻¹ 的 NH₄F 作为浸提剂。

1.4 数据统计分析

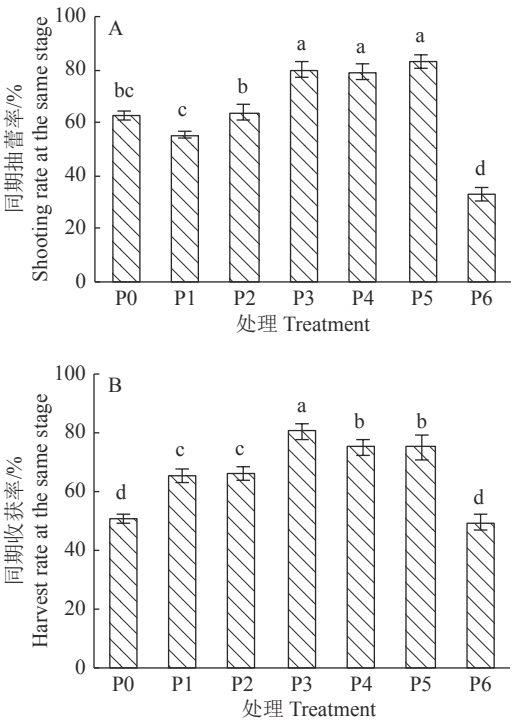
试验数据采用 SPSS17.0 系统软件进行统计分析, 多重比较采用 Duncan’s 法, 显著性差异水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 磷肥用量对抽蕾和收获的影响

参考香蕉栽培标准, 香蕉抽蕾率达到 80% 的时间点称为抽蕾结束临界点, 此后香蕉进入果实生长期。一般而言, 香蕉抽蕾早、抽蕾整齐有利于香蕉尽早进入果实生长期。由图 1A 可知, 磷肥用量处理对香蕉抽蕾结束时间有明显影响, 同一时间各处理抽蕾率(即同期抽蕾率)表现出明显差异, 在 P3~P5 处理的香蕉抽蕾率达到 80%, 抽蕾结束进入果实生长期时, 较同期的 P0~P2 处理的抽蕾率高出 15.2~27.8 个百分点; 而高磷处理 P6 的抽蕾率最低, 仅为 33.3%, 较 P3 处理低 46.7 个百分点。由此可见, 配方肥中适宜的磷用量有助于促进香蕉抽蕾, 而低磷和最高磷处理则使抽蕾推后, 抽蕾期延长。

香蕉抽蕾后, 经过 3 个月左右的生长进入采收阶段(成熟度达到 7 成时采收), 一般收获率达到 80% 时可视为收获结束临界点。研究结果表明, 适宜磷肥用量下, 有利于促进香蕉提早收获, 磷肥用



P0~P6 表示 w(P₂O₅) 分别为 0、25.6、53.3、80.0、106.7、133.0 和 160.0 g·株⁻¹; 各图中, 柱子上的不同小写字母表示差异显著 (P<0.05, Duncan’s 法)

P0 – P6 indicate the phosphorus(P₂O₅) application rates of 0, 25.6, 53.3, 80.0, 106.7, 133.3 and 160.0 g·plant⁻¹ respectively; In each figure, different lowercase letters on the columns indicate significant differences (P<0.05, Duncan’s method)

图 1 磷肥用量对香蕉抽蕾和收获的影响

Fig. 1 Effect of phosphorus fertilizer application rate on banana shooting and harvest

量对同期收获率也有显著影响(图 1B)。以 P3 处理(即磷肥用量为 80.0 g·株⁻¹) 最早达到 80% 的收获率, 较同期其他处理高出 5.3~31.1 个百分点。综上所述, 控释配方肥中适宜水平供应磷肥有利于调整香蕉生育期, 促进香蕉提早抽蕾、提前收获, 缩短香蕉的收获期, 进而促进香蕉早上市, 从而获得较高的经济效益, 其中, 最有利于香蕉抽蕾和成熟的磷肥 (P₂O₅) 用量是 80.0 g·株⁻¹。

2.2 磷肥用量对香蕉产量和经济效益的影响

表 2 结果表明, 在氮 (N) 和钾 (K₂O) 分别为 200 和 400 g·株⁻¹ 水平下, 磷肥用量对香蕉产量有显著的影响。较无磷的 P0 处理相比, 随着磷肥用量

表 2 磷肥用量对香蕉产量和经济效益的影响

Table 2 Effect of phosphorus fertilizer application rate on banana yield and economic benefit

处理编号 No. of treatment	磷肥用量/(g·株 ⁻¹) Phosphorus fertilizer application rate	产量 ¹⁾ / (kg·株 ⁻¹) Yield	增产量 ²⁾ / (kg·株 ⁻¹) Yield increment	增产幅度/% Increasing range	单株利润 ³⁾ / 元 Profit per plant	利润 ³⁾ / (元·hm ⁻²) Profit
P0	0	24.9±1.1b				
P1	25.6	25.0±0.8b	0.1	0.4	0.3	681.0
P2	53.3	25.7±0.4ab	0.8	3.2	2.9	5 712.0
P3	80.0	27.7±0.5a	2.8	10.8	10.6	21 262.5
P4	106.7	26.6±0.5ab	1.7	6.8	6.2	12 369.0
P5	133.3	26.9±0.6ab	2.0	7.4	7.1	14 208.0
P6	160.0	22.2±0.6c	-2.7	-10.0	-11.7	-23 386.5

1)该列数据为平均值±标准误,n=24,该列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05,Duncan’s法);2)增产量=施磷区产量-不施磷区产量;3)利润=增产产值-肥料成本,速效N成本为3.70元·kg⁻¹,控释N成本为8.61元·kg⁻¹,P₂O₅成本为5.42元·kg⁻¹,K₂O成本为5.67元·kg⁻¹,香蕉售价平均为4元·kg⁻¹

1) Data in the yield column are means ± standard errors, n=24; Different lowercase letters in the yield column indicate significant differences (P<0.05, Duncan’s method). 2) Yield increment = yield in phosphorus application area – yield in phosphorus-free area. 3) Profit = Production value – Fertilizer cost; Fertilizer cost: Available nitrogen fertilizer 3.7 yuan·kg⁻¹, controlled release nitrogen fertilizer 8.61 yuan·kg⁻¹, P₂O₅ 5.42 yuan·kg⁻¹, K₂O 5.67 yuan·kg⁻¹; Average selling price of banana fruit is 4.0 yuan·kg⁻¹ in orchard

从 25.6 g·株⁻¹ 增至 160.0 g·株⁻¹, 香蕉产量呈先增加后降低的规律。各个处理增产幅度为-10.0%~10.8%, 其中 P3 处理水平下香蕉产量最高, 达 27.7 kg·株⁻¹, 较不施磷肥的 P0 处理增产 11.2%, 较 P1 处理增产 10.8%, 较 P6 处理增产 24.8%; 在磷肥用量为 160.0 g·株⁻¹时, 非但不增产, 反而较不施磷肥减产 10.8%。与不施用磷肥的处理 P0 相比, 各处理中以 P3 处理, 即 P₂O₅ 用量为 80.0 g·株⁻¹ 时增产量和利润最大, 每公顷可增收 21 262.5 元。而当磷肥用量超出 80.0 g·株⁻¹时, 增施磷肥不仅未增加产量, 还会由于施肥成本增加, 造成利润下降, 并且在磷肥

施用量达到 P6 处理水平时, 利润出现负值。上述研究结果说明, 在富磷土壤上获得较高产量和经济效益, 仍需要适当地补充磷肥, 以 P₂O₅ 用量为 80.0 g·株⁻¹ 为宜, 可获得最佳经济效益。

2.3 磷肥用量对磷积累量的影响

在香蕉收获期, 地上部各器官及整株的磷积累量研究结果(表 3) 表明, 磷 (P₂O₅) 施用量在 0~160.0 g·株⁻¹ 范围内, 随着磷肥用量的增加, 香蕉的果实、果轴、球茎、叶片、假茎及整株磷积累量基本呈先增加后降低的规律。施磷香蕉的果实、果轴、球茎、假茎和叶片磷积累量较无磷处理的分别增加了

表 3 磷肥用量对香蕉各部位磷积累量的影响¹⁾

Table 3 Effect of phosphorus fertilizer application rates on phosphorus accumulation in different organs of banana

处理编号 No. of treatment	磷肥用量/(g·株 ⁻¹) Phosphorus fertilizer application rate	磷积累量/(g·株 ⁻¹) Phosphorus accumulation					
		果实 Fruit	果轴 Bunch stalk	球茎 Corm	假茎 Pseado-stem	叶片 Leaf	整株 Total plant
P0	0	5.7±0.4b	0.4±0.1cd	0.6±0.0e	4.3±0.2c	2.2±0.2b	13.3±0.6d
P1	25.6	6.2±0.1ab	0.4±0.0cd	0.6±0.0de	5.0±0.1abc	2.5±0.3b	14.6±0.1cd
P2	53.3	5.8±0.5b	0.5±0.0abc	0.8±0.1bc	6.4±0.5a	2.4±0.1b	15.9±0.8bc
P3	80.0	7.0±0.2a	0.6±0.1a	0.8±0.1cd	6.5±1.0a	4.1±0.4a	18.9±0.6a
P4	106.7	6.3±0.1ab	0.4±0.0bcd	0.8±0.0bc	5.4±0.3abc	3.3±0.7ab	16.3±1.0bc
P5	133.3	5.8±0.1b	0.5±0.0ab	1.1±0.1a	6.2±0.2ab	3.7±0.2a	17.4±0.2ab
P6	160.0	5.8±0.2b	0.3±0.0d	0.9±0.1ab	4.7±0.5bc	2.6±0.1b	14.7±0.5cd

1)表中数据为平均值±标准误,n=3;同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05,Duncan’s法)
1)Data in the table are means ± standard errors, n=3; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences (P<0.05, Duncan’s method)

1.8%~22.8%、-19.5%~39.0%、0~83.3%、9.3%~46.3% 和 9.1%~86.4%; 地上部整株磷累积总量增加了 9.8%~42.1%。其中, 磷肥用量为 80.0 g·株⁻¹ 时, 香蕉果实、果轴、假茎、叶片和整株的磷累积量最大, 分别为不施磷肥处理的 1.2、1.5、1.5、1.9 和 1.4 倍。结果还表明, 磷肥用量不影响香蕉各器官磷的分配特征, 即收获期时, 香蕉体内的磷主要分布在果穗(果实+果轴), 占全株磷素总量的 36.6% 以上, 最高可达 46.2%, 其次分配在假茎, 占全株总量的 34.6% 左右, 再次分配在叶片, 分配量在 15.0%~21.5% 范围变动, 球茎分配量最少, 仅占全株总量的 5.1% 左右。可见香蕉成熟期时, 果穗、假茎是磷素主要的分配器官。综上说明, 磷肥用量不影响香蕉各器官磷素的分配, 但适宜的磷肥用量有利于促进香蕉植株对磷的吸收。

2.4 磷肥用量对香蕉磷利用率的影响

表 4 结果表明, 磷肥用量对香蕉磷肥利用率有显著的影响。整体而言, 磷肥表观利用率和农学利用效率均随着磷肥施用量的增加呈先增加后降低的趋势, 其中, 磷肥表观利用率和农学利用效率均以 P₂O₅ 用量为 80.0 g·株⁻¹ 处理的最高, 其磷肥表观利用率较其他用量分别提高了 4.4~14.5 个百分点, 农学利用效率较其他处理提高了 2.2~6.2 倍(P6 除外); 磷肥偏生产力则与磷肥用量呈负相关, 随着磷肥用量的增加, 磷肥偏生产力下降, 其中以 P1 处理的磷肥偏生产力最高, 为 938.2 kg·kg⁻¹。综上可知, 控释配方肥中磷肥(P₂O₅) 用量为 80.0 g·株⁻¹ 时有助于香蕉高产高效, 说明即使在富磷土壤上, 施用适量的磷肥不仅可提高产量, 且能提高磷肥利用率。

表 4 磷肥用量对香蕉磷利用率的影响 ¹⁾				
Table 4 Effect of phosphorus application rate on phosphorus use efficiency of banana				
处理编号 No. of treatment	磷肥用量/(g·株 ⁻¹) Phosphorus fertilizer application rate	磷肥表观利用率/% Apparent P recovery efficiency	磷肥农学利用效率/(kg·kg ⁻¹) Agronomic P use efficiency	磷肥偏生产力/(kg·kg ⁻¹) Partial factor productivity of P
P0	0			
P1	25.6	11.6±0.6ab	5.6±4.4c	938.1±4.4a
P2	53.3	10.9±3.4ab	15.3±1.5b	482.4±1.5b
P3	80.0	16.0±1.6a	34.8±1.8a	346.1±1.8c
P4	106.7	6.5±2.1bc	15.5±0.4b	248.9±0.4d
P5	133.3	7.0±0.3bc	14.9±0.7b	201.7±0.7e
P6	160.0	1.5±0.7c	-16.7±0.6d	138.9±0.6f

1)表中数据为平均值±标准误, n=3; 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05, Duncan's法)
1)Data in the table are means ± standard errors, n=3; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences (P<0.05, Duncan's method)

3 讨论与结论

施用磷肥是获得作物高产的重要保证, 也是维持土壤生产力的主要措施^[18]。关于磷肥的增产效应存在 2 种观点, 一般认为, 土壤磷肥过量或富集后, 施入磷肥没有增产效果^[19-20]; 也有研究表明, 在有效磷含量较高的土壤上, 为保证作物产量, 仍然要施用磷肥^[13], 高磷土壤施用磷肥的增产效应也与作物品种有关^[12]。本研究供试土壤 Bray-P(P₂O₅) 为 158.47 mg·kg⁻¹, 属于富磷土壤。但是, 香蕉不同于一般的粮食作物, 而是属于喜水喜肥的草本果树。在香蕉栽培中, 蕉农几乎没有因为土壤含磷量高而不施磷或减施磷肥的操作, 反而一味追加氮、磷、钾肥以追求高产。鉴于磷易于被香蕉植株固定从而使磷的有效性降

低, 为了提高磷的有效性, 即使在富磷土壤上, 开展控释配方肥磷的量级研究, 确定合理的施磷用量对于香蕉合理施肥以及控释配方肥的推广应用也具有积极的指导意义。本研究显示, 在 P₂O₅ 供应量为 0~160.0 g·株⁻¹ 时, 随着磷肥施用量的增加, 香蕉产量呈先增加后降低的规律, 说明在适宜磷水平下, 增加磷肥用量仍可以提高香蕉产量, 其可能原因是在 80.0 g·株⁻¹ 的磷肥用量水平下, 氮、磷、钾的水平正好与香蕉的需求吻合, 达成养分平衡。适宜的养分用量有利于促进香蕉提前抽蕾和收获, 缩短生育期^[2,4], 本研究结果也验证了此结论, 即在 80.0 g·株⁻¹ 的 P₂O₅ 用量水平下, 香蕉抽蕾最早, 收获期较其他处理提早 7~21 d 结束。而进一步增加施磷水平, 产量反而降低, 抽蕾和成熟延迟的可能原因

是磷过高时,打破了香蕉的氮、磷、钾平衡。香蕉整株及各部位磷累积量的研究结果也从另一个方面印证了施磷水平对香蕉氮、磷、钾平衡的影响。

富磷土壤使用磷肥仍然增产的另一方面原因是:磷易于在土壤中被吸附固定,降低其土壤有效性。另外,相对于粮食作物和其他木本果树,香蕉的根系尽管是须根系,但是大部分根系无二级或者三级侧根,根毛更少,因此根系的养分吸收面积较小,所以香蕉在养分吸收利用特别是磷的吸收利用过程中,要求土壤磷的供应强度要高。不少研究结果证明,根系生长特征对磷的吸收至关重要,根系对磷的获取更多依赖于根系形态特征^[21-22]。Föhse 等^[23]认为不同作物对磷的需求差异与作物的根系吸收面积有关,一般来说,根吸收面积越小、分支越少的作物,占据土壤体积也小,与土壤接触面积也少,磷的获取能力也差,若要达到最高产量,则对土壤磷浓度的要求越高。香蕉根系属于须根系,无主根,由不定根、簇生根和根毛组成,尽管香蕉根系可以在水平和垂直方向延展,但是水平根系主要分布在距离蕉头 0.9 m 的范围内,垂直根系分布主要集中在地表至地下 0.5 m 内^[24]。这就是为什么即使在富磷土壤上仍需投入适量磷肥的原因。

在富磷土壤上磷肥 (P_2O_5) 施用量为 $80.0\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 时,养分的吸收利用率尚在合理范围。肥料利用率是衡量施肥量及施肥方法是否合理的一项重要指标,不同作物磷肥利用率差异较大,我国整体利用率偏低,粮食作物对磷肥的当季利用率一般只有 10%~25%^[25-27]。香蕉株形高大、产量高、生物量大,因此需肥量也大,需肥量为一般粮食作物的 5~6 倍、蔬菜作物的 3~4 倍,加之复合肥的应用,导致土壤磷的累积量逐年增加^[6,8],香蕉生育期由于追肥次数过多,导致肥料利用率较低,尤其是磷肥利用率仅为 5%~10%,远低于粮食作物的磷肥利用率;通过施用香蕉配方肥可以明显降低磷肥投入,提高磷肥利用率^[28-30]。董存明等^[28]研究结果表明,砖红壤上施用配方肥,氮 (N)、磷 (P_2O_5) 和钾 (K_2O) 用量分别为 200、95 和 $467\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 时,磷的表现利用率可较常规提高 13.9 个百分点,达到 16.6%,磷的农学利用效率为 $13.2\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Yao 等^[29]研究结果表明,在推荐施肥用量下,8 次追肥的母代和子代留芽蕉的磷肥农学利用效率分别为 10.3 和 $19.1\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 丁文^[30]研究结果表明,应用缓释肥料,香蕉 N、P、K 利用率均提高,而磷肥利用率达 17.4%,较常规肥料明显提高。本研究结果表明,在香蕉控释配方肥中,香蕉产量和磷肥利用率均随着磷肥用量增加呈先增

加后降低趋势,在 P_2O_5 用量为 $80.0\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 时,香蕉产量最高,磷肥表现利用率也最高,达到 16.0%,农学利用效率为 $34.8\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,该利用率与董存明等^[28]和丁文^[30]的研究结果相当,但产量明显高于上述研究结果。综上说明,在磷富集土壤上,施用磷肥仍然可以提高香蕉产量并获得较高的经济效益,建议控释配方肥的氮 (N)、磷 (P_2O_5) 和钾 (K_2O) 的配比为 1.0:0.4:2.0,氮 (N)、磷 (P_2O_5) 和钾 (K_2O) 推荐施肥量分别为 200、80 和 $400\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$,其中控释氮占总氮的 20%,以实现香蕉生产中氮、磷、钾平衡,达到高产高效的目标。

参考文献:

[1] ATTIA M, AHMED M A, EL-SONBATY M R. Use of biotechnologies to increase growth, productivity and fruit quality of ‘Maghrabi’ banana under different rates of phosphorus[J]. *World Journal Agricultural Science*, 2009, 5(2): 211-220.

[2] BOLFARINI A C B, LEONEL S, LEONEL M, et al. Growth, yield and fruit quality of ‘Maçã’ banana under different rates of phosphorus, fertilization[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2016, 10(9): 1368-1374.

[3] DHUTRAJ S V, DESHMUKH R V, DAMODHAR V P, et al. Effect of different levels of phosphorus on growth and yield of banana cv. Grand Naine[J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2018(6): 105-108.

[4] 黄达斌, 林芎华, 林惠环, 等. 不同施磷水平对香蕉产量与品质影响初报[J]. *亚热带植物科学*, 2011, 40(3): 25-28.

[5] DE BARROS MESQUITA C, GARCIA É L, BOLFARINI A C B, et al. Phosphate fertilization changes the characteristics of ‘Maçã’ banana starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 112: 1138-1145.

[6] 魏守兴, 黄丽娜, 谢子四, 等. 漳州主要长期蕉园土壤肥力分析与施肥建议[J]. *热带作物学报*, 2013, 34(12): 2336-2341.

[7] 廖志气, 林电, 郑丽燕, 等. 海南岛香蕉园土壤肥力现状及变化趋势分析[J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(1): 107-111.

[8] 姚丽贤, 周修冲, 李国良, 等. 香蕉园土壤养分肥力时空变化研究[J]. *土壤通报*, 2006, 37(2): 226-230.

[9] 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(1/2): 27-37.

[10] 王经纬, 王艳玲, 姚怡, 等. 长期施肥对旱地红壤团聚体磷素固持与释放能力的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1240-1250.

[11] 朱晓晖, 黄金生, 曾艳, 等. 红壤植蔗区施磷的淋溶风险评估[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(3): 532-537.

[12] 梁林洲, 沈仁芳, 伊晓云, 等. 高磷土壤施用磷肥对小白菜和苋菜产量及肥料利用率的影响[J]. *江苏农业学报*, 2010, 26(1): 70-74.

[13] FILHO A B, SILVA G S, CORTEZ J W, et al. Phosphorus fertilization of 'Fuyutoyo' cabbages in phosphorus-rich Eutrustox soil[J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2013, 73(3): 288-292.

[14] 曹明, 宋媛媛, 樊小林. 控释氮钾比例对香蕉产量及氮磷钾肥料利用率的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(11): 35-41.

[15] 刘延涛, 樊小林, 王南南, 等. 控释配方肥中不同控释养分比例对香蕉产量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(8): 165-170.

[16] 王芳, 邹青鹤, 柯佑鹏, 等. 广西产区香蕉控释配方肥技术效率研究[J]. *浙江农业科学*, 2017, 58(4): 610-614.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-114.

[18] 高静, 张淑香, 徐明岗, 等. 长期施肥下三类典型农田土壤小麦磷肥利用效率的差异[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(9): 2142-2148.

[19] MALLARINO A P, BLACKMER A M. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn[J]. *Agronomy Journal*, 1992, 84(5): 850-856.

[20] PARENT L E, MARCHAND S. Response to phosphorus of cranberry on high phosphorus testing acid sandy soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(6): 1914-1921.

[21] RAGHOTHAMA K G. Phosphate acquisition[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1999, 50: 665-693.

[22] VANCE C P, UHDE-STONE C, ALLAN D L. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource[J]. *The New Phytologist*, 2003, 157(3): 423-447.

[23] FÖHSE D, CLAASSEN N, JUNGK A. Phosphorus efficiency of plants II: Significance of root radius, root hairs and cation-anion balance for phosphorus influx in seven plant species[J]. *Plant and Soil*, 1991, 132(2): 261-272.

[24] 樊小林, 梁有良, 王孝强, 等. 香蕉营养与施肥[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 196-197.

[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): 11-13.

[26] 鲁如坤. 我国的磷矿资源和磷肥生产消费 II: 磷肥消费和需求[J]. *土壤*, 2004, 36(2): 113-116.

[27] 朱兆良. 肥料与农业和环境[J]. *大自然探索*, 1998, 17(4): 25-28.

[28] 董存明, 耿建建, 张爱华, 等. 配方肥在砖红壤上促进香蕉生长的研究[J]. *中国南方果树*, 2015, 44(1): 40-43.

[29] YAO L X, LI G L, YANG B et al. Optimal fertilization of banana for high yield, quality, and nutrient use efficiency[J]. *Better Crop with Plant Food*, 2009, 93(1): 10-11.

[30] 丁文. 缓控释肥料对香蕉产量、品质和养分利用率的影响[J]. *福建农业学报*, 2013, 28(1): 47-50.

【责任编辑 李晓卉】