

DOI: 10.11766/trxb202202030044

彭懿, 杨国江, 国秀丽, 王晓凤, EREL Ran, 冯固. 基于输入-输出平衡的施磷方法可实现作物高产和磷肥高效——以新疆水肥一体化棉花体系为例[J]. 土壤学报, 2023, 60 (5): 1480–1492.

PENG Yi, YANG Guojiang, GUO Xiuli, WANG Xiaofeng, EREL Ran, FENG Gu. Input-Output Balance-Based P Fertilization Approach for Achieving Target Crop Yield and High P Use Efficiency: A Case Study of Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) with Mulched Fertigation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (5): 1480–1492.

基于输入-输出平衡的施磷方法可实现作物高产和磷肥高效——以新疆水肥一体化棉花体系为例*

彭懿¹, 杨国江², 国秀丽³, 王晓凤⁴, EREL Ran⁵, 冯固^{1†}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所, 新疆石河子 832000; 3. 石河子大学农学院, 新疆石河子 832003; 4. 和布克赛尔蒙古自治县农业技术推广站, 新疆塔城 834400; 5. 以色列农业部吉拉特农业研究中心, 以色列 7505101)

摘要: 探讨了通过目标产量需磷量确定磷肥用量并在棉花生长早期集中施用的磷肥管理方法以维持适宜的土壤供磷强度、实现作物高产和磷肥高效利用目标的可行性, 为磷肥减施增效提供依据。在新疆石河子选择中等供磷强度的农田 (有效磷 $23.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 以覆膜水肥一体化棉花 (*Gossypium hirsutum*) 种植体系为对象, 根据该区域 $2.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 皮棉产量的需磷量确定试验的磷肥用量 ($52.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 以 P 计), 开展了两年田间试验。试验选用三种不同性质的水溶性磷肥, 设置不施磷肥 (CK)、滴施磷酸一铵 (MAP)、滴施磷酸脲 (UP) 和滴施聚磷酸铵 (APP) 4 个处理。通过测定不同处理棉花的产量与磷吸收量, 计算磷肥偏生产力 (PFP)、磷肥农学效率 (AE_p)、磷肥当季利用率 (PUE) 与当季磷肥回收率 (即作物吸磷量与磷肥施用量的比值); 通过棉花不同生育期分层取样, 分析了不同磷肥品种处理引起的土壤有效磷供应强度和无机磷形态组成的变化, 以期阐明不同磷肥的空间有效性与棉花生长需求的匹配程度。研究结果表明: (1) 施磷处理两年的皮棉产量平均为 $2.73 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 达到了高产水平, MAP、UP 和 APP 处理分别较 CK 增产 21%、25% 和 11%; (2) 施磷处理的磷盈余为 $2.2 \sim 4.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 磷肥当季利用率平均为 24%, 当季磷肥回收率为 91%~96%; (3) 磷肥在棉花蕾期和花铃期集中滴施, 其垂直移动距离可达到 20 cm 土层, 能保证棉花生育期内的土壤供磷强度。与 CK 相比, 施磷处理根区 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm 土层的有效磷分别提高了 94%~302%、104%~144% 和 42%~67%。综上所述, 将土壤有效磷供应强度维持在农学阈值附近、根据目标产量需磷量确定磷肥施用量, 石灰性土壤上选择强酸性、缓释磷肥于作物生育前期集中施用能够在磷素输入-输出平衡的条件下实现作物高产和磷肥高效。根据平衡法计算的当季磷肥回收率能较好地反映磷肥的实际利用情况。

关键词: 产量; 聚磷酸铵; 磷酸脲; 磷肥利用率; 棉花

中图分类号: S147.5 **文献标志码:** A

* 国家自然科学基金项目 (U1703232) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U1703232)

† 通信作者 Corresponding author, E-mail: fenggu@cau.edu.cn

作者简介: 彭懿 (1990—), 男, 陕西商洛人, 博士, 研究方向为作物磷高效利用。E-mail: pengyi0914@126.com

收稿日期: 2022-02-03; 收到修改稿日期: 2022-07-11; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-08-24

Input-Output Balance-Based P Fertilization Approach for Achieving Target Crop Yield and High P Use Efficiency: A Case Study of Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) with Mulched Fertigation

PENG Yi¹, YANG Guojiang², GUO Xiuli³, WANG Xiaofeng⁴, EREL Ran⁵, FENG Gu^{1†}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Research Institute of Farmland Water Conservancy and Soil Fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Sciences, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 3. Agricultural College of Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 4. Agricultural Technology Extension Station of Mongolian Autonomous County of Hoboksar, Tacheng, Xinjiang 834400, China; 5. Gilat Research Center, Agricultural Research Organization of Israel's Ministry of Agriculture, 7505101, Israel)

Abstract: 【Objective】 Maintaining moderate soil phosphorus (P) supply intensity and determining the P application rate based on the P requirement of the crop target yield, and combining with acid, slow-release water-soluble P fertilizers and applied in the early stages of crop growth is a novel P management approach in cotton. Here we test the feasibility and effectiveness of this method and provide a basis for reducing the P fertilizer application amount and increasing its use efficiency. 【Method】 A two-year field experiment was employed using cotton (*Gossypium hirsutum*) in the moderate Olsen-P soil (23.6 mg·kg⁻¹) in Shihezi, Xinjiang. Based on the P requirement of the target lint yield of 2.7 t·hm⁻², 52.4 kg·hm⁻² was selected as the P application rate. Four treatments were set-up with three types P fertilizers: (1) no P fertilizer (CK); (2) monoammonium phosphate (MAP); (3) urea phosphate (UP); and (4) ammonium polyphosphate (APP). It was analyzed that the lint yield, P uptake and above-ground biomass of cotton in different treatments. The partial productivity of P fertilizer (PFP), agronomic efficiency (AE_P), P utilization efficiency (PUE) and P recovery index (the ratio of shoot P uptake to the amount of P fertilizer application, PRI) were calculated. Through stratified sampling, soil Olsen-P and P fractions in different soil layers were tested. Those allowed us to clarify the relationships between the P spatial availability and cotton growth requirements with different P fertilizers. 【Result】 The significant results were: (1) The average lint yield of P applied treatments in two years was 2.73 t·hm⁻², which was classified as the high yield level in northern Xinjiang. Compared with the CK treatment, the lint yield of MAP, UP, and APP treatments were increased by 21%, 25%, and 11%, respectively. (2) The P surplus was 2.2–4.8 kg·hm⁻² and the P use efficiency was 24% across P applied treatments. The P recovery index of MAP, UP, and APP treatments was 91.7%, 95.6%, and 94.8%, respectively. (3) P fertilizer applied by drip irrigation in the cotton bud and boll stages can move to the 10–20 cm soil layer, which may maintain the soil P supply intensity during the cotton-growing period. Compared with the CK treatment, the mean Olsen-P in P applied treatments were increased by 94%–302%, 104%–144%, and 42%–67% in the 0–5 cm, 5–10 cm, and 10–20 cm soil layers, respectively. 【Conclusion】 In summary, our results indicate that maintaining soil available P near the agronomic thresholds and determining the P application rate according to the P requirement of the target yield, and combining with acid, slow-release P fertilizer and applied in the cotton bud and boll stages can improve lint yield and P use efficacy under balanced P input-output conditions. Furthermore, the P recovery index based on the balanced P input-output can better reflect the real P use efficiency.

Key words: Yield; Ammonium polyphosphate; Urea phosphate; Phosphorus use efficiency; Cotton

我国土壤-作物体系的磷肥当季利用率很低,其主要原因是土壤铁、铝、钙、镁离子含量高,施入的磷肥很快被化学固定,黏土矿物、碳酸钙和铁铝氧化物等构成的土壤胶体颗粒对正磷酸根的物理吸附降低了肥料磷素在土壤溶液中的活度^[1-2];同时磷肥性质与土壤类型-作物体系的不匹配以及过量施磷肥导致土壤磷素大量累积,在提高土壤有效磷含

量的同时也抑制了作物高效吸收利用磷的生物学潜力的发挥^[3-5]。

提高磷肥利用率有多种途径。根区集中施磷,通过磷肥条施或者应用水肥一体化进行根区施肥、磷肥与生理酸性肥料(例如硫酸铵)混合条施、磷肥在土壤孔隙度最大的阶段通过滴灌分期施用等,可以提高水肥利用效率^[6]。通过磷肥与土壤-作物体

系匹配, 在碱性土壤中选择酸性磷肥或在酸性土壤上选用碱性磷肥^[3]; 对于根系活化磷能力强的作物(如澳洲坚果、油菜、豆科作物)配施钙镁磷肥等枸溶性磷肥^[7-8]。施用生物有机肥, 强化有机物料和解磷微生物、菌根真菌菌剂的综合效应, 在磷肥中添加螯合剂或酸性物质减小正磷酸根在土壤中有有效性的降低。然而, 采用上述方法时如果不考虑减少磷肥用量是难以大幅度提高磷肥利用率的。

土壤供磷强度高、过低均不利于作物磷高效活化吸收利用的生物学潜力发挥, 仅有在适宜的供磷强度下(即有效磷的农学阈值附近, 大多数旱作粮食作物为 $15\sim 20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)作物根系形态、生理、解磷微生物的功能、菌根真菌菌丝生物量等磷吸收利用相关的性状才能达到相对最佳状态, 此时作物可实现 $85\%\sim 90\%$ 的产量潜力^[4-5, 9-10]。在过去的 40 年间, 由于过量施肥我国农田土壤磷素肥力有了极大提升(有效磷平均为 $24.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[11], 当前 35%的农田土壤有效磷较低(低于 $15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、45%的农田土壤有效磷处于适宜水平($15\sim 25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 另有约 20%农田土壤有效磷较高(大于 $25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。这意味着我国通过大量施用磷肥提升土壤磷素肥力的阶段性任务已基本完成, 当前农田的磷肥用量推荐应当在考虑作物目标产量需磷量和将土壤有效磷供应强度维持在 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 这两个前提下来进行总量控制, 从而大幅度提高磷肥利用效率^[12]。当前农业生产中磷肥用量远远大于作物目标产量的需磷量, 如果上述假设能够获得验证, 就有可能大幅度降低作物生产中的磷肥用量、提高磷肥利用效率。

磷酸一铵($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)是应用最广泛的高浓度磷肥之一, pH 为 $3\sim 5$, 在石灰性土壤上的肥效通常高于过磷酸钙、磷酸二铵等磷肥^[13-14]。磷酸脲($\text{CO}(\text{NH}_2)_2\cdot\text{H}_3\text{PO}_4$)易溶于水, pH $1.6\sim 2.4$, 呈强酸性, 施入土壤后可降低土壤 pH、减少石灰性土壤对磷的固定。聚磷酸铵($(\text{NH}_4)_{(n+2)}\text{P}_n\text{O}_{(3n+1)}$)施入土壤后能逐步水解为正磷酸盐, 避免了土壤对磷的快速固定, 能增加磷肥在土壤中的移动距离^[15-16]。因此, 本文以中等供磷强度(有效磷 $23.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的灰漠土-膜下滴灌棉花体系为具体场景, 通过两年的田间试验验证如下假设: 在土壤供磷强度处于农学阈值附近时, 通过施用移动性与土壤固定率不同的高浓度水溶肥磷酸一铵、强酸性肥料磷酸脲和缓释肥聚磷酸铵, 将棉花生育期内根区的供磷强度维持在适

宜范围, 控制磷素输入-输出基本平衡, 维持收获后土壤磷素肥力不降低, 从而实现作物高产和磷肥高效利用的目标。

1 材料与方 法

1.1 试验概况

试验于 2018 年和 2019 年在新疆石河子新疆农垦科学院试验田($44^\circ 31' 33''\text{N}$, $85^\circ 99' 16''\text{E}$)进行。试验区海拔 450 m, 属典型的温带大陆性干旱气候, 年均 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 $3\ 650^\circ\text{C}$, 年均降水量 166 mm。供试土壤为壤质灰漠土, 耕层土壤有机质 $13.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 铵态氮 $3.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 硝态氮 $7.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 $0.90\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷(Olsen-P) $23.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $378\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 8.20, 电导率 $242\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。供试棉花品种为新石 K18(*Gossypium hirsutum*, var. Xinshi K18), 以“干播湿出”的方式分别于 2018 年 4 月 21 日和 2019 年 4 月 25 日播种。种植模式为膜下滴灌, 一膜 6 行 3 条滴灌带, 株距 10 cm, 播幅内宽、窄行距配置为 $(20+55+20+55+20\text{ cm})$ 。滴灌带滴头流量为 $2.0\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, 播种后滴出苗水, 6 月 10 日左右滴第 2 水, 之后视棉花长势每 $7\sim 10$ 天灌溉 1 次, 8 月下旬停水, 全生育期灌溉 10 次, 单次灌水量 $300\sim 450\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, 生育期总灌溉量 $4\ 500\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。棉花化控、打顶及其他管理措施按照生产实际进行。

1.2 试验设计

皮棉目标产量为 $2.7\sim 3.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 棉花地上部吸磷量为 $43.2\sim 64.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以 P 计, 下同)^[17], 前期研究发现皮棉产量 $2.7\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时地上部吸磷量约 $48.0\sim 50.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。本研究的目标产量为 $2.7\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 根据磷素输入-输出平衡原则, 磷肥施用量设为 $52.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P_2O_5 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。试验设 4 个处理, 重复 4 次, 共 16 个试验小区, 小区面积 72 m^2 。4 个处理分别为: 不施磷肥(CK); 滴施磷酸一铵 $52.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (MAP, 含氮 12%, 含 P_2O_5 61%, 湖北祥云(集团)化工股份有限公司); 滴施磷酸脲 $52.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (UP, 含氮 17%, 含 P_2O_5 44%, 四川胜丰磷化工有限责任公司); 滴施聚磷酸铵 $52.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (APP, 含氮 18%, 含 P_2O_5 58%, 云南天耀化工有限公司)。根据李青军^[18]的研究结果, 蕾期和花铃期滴施磷肥能够提高磷肥在土壤中的迁移距离、提高磷肥当季利用率, 因此, 本研究施磷处理的磷肥在

棉花蕾期（1次，50%）和花铃期（1次，50%）分两次随水滴施，磷肥带入的氮素计入总的施氮量。棉花整个生育期内，施氮肥 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ （以 N 计），施钾肥 $75 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ （以 K_2O 计），试验所用氮肥为尿素，钾肥为硫酸钾。棉花蕾期滴施 15%氮肥，初花期滴施 15%氮肥，盛花期滴施氮肥 20%，花铃期滴施氮肥 30%、滴施钾肥 50%，盛铃期滴施氮肥 20%、滴施钾肥 50%。

1.3 取样与分析方法

为评价基于作物需求与磷肥用量平衡的磷肥管理能否保障棉花根区土壤供磷强度，开展了动态采样。（1）基础土样：2018年5月20日（开始施磷肥前）在每个小区采集基础土壤，每个小区随机取3个点混合为一个样品，取样深度分为0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm和20~30 cm四个土层。（2）生育期取样：分别于2018年棉花花铃期（7月11日）和2019年棉花花铃期（7月24日）取地上部样品测定植株生物量，同时在每个小区取土壤剖面样品测定有效磷，在每个小区棉花窄行间随机取3个点混合为一个样品，取样深度分为0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm和20~30 cm四个土层。（3）成熟期采样：为了更加细致地研究磷在表层土壤中的移动特征，于2019年棉花吐絮期，在滴头位置下方分4层取0~2 cm、2~4 cm、4~6 cm和6~10 cm土壤样品（取样位置见图1）；同时取滴头对应位置（图1A点和图1D点）和远离滴头位置（图1B点和图1C点）棉花植株上部未衰老的叶片，测定磷浓度。

测产方法：棉花成熟期（2018年9月23日和2019年9月25日），在每个小区随机采集5株棉花地上部样品，按照器官分开烘干称重；同时在各试验小区调查 6.67 m^2 内棉花株数和铃数，并随机采收小区内植株上、中、下层棉花共100朵，测单铃生

物量和衣分，计算产量。

土壤和植株样品测量方法：所有土壤样品风干，过孔径1 mm筛后待测。土壤有效磷用 pH 8.5 的 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提，钼锑抗比色法测定。植株样品 105°C 杀青后， 70°C 烘干至恒重。植物样品粉碎后过孔径 0.5 mm 的筛，用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮，钒钼黄比色法测定样品磷含量，根据成熟期棉花各器官的生物量和磷含量计算作物吸磷量。2018年花铃期所取土壤样品，按照 Guppy 法^[19]进行磷分级，测定土壤中树脂磷（Resin-P）、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、 NaOH-Pi 、 HCl-Pi 和残渣磷（Residual-P）的含量。

1.4 磷肥效率计算

磷素表观平衡用于表征磷肥在农田的盈余状况。用收获时作物地上部磷素吸收量与磷肥用量的百分比反映农田磷素输入与输出的平衡状况，将此指标定义为当季磷肥回收率（P recovery index, PRI）。PRI 等于 100% 表示农田磷素输入与输出处于平衡状态，小于 100% 代表存在磷盈余，大于 100% 则表示土壤磷素存在耗竭。在维持土壤供磷强度稳定的前提下，PRI 越接近 100% 表示作物对磷肥的当季利用率越高^[20]，PRI 数值越低则说明作物对磷肥的回收率越低。PRI 同时受作物吸磷量和施磷量影响，能够反映作物产量水平、磷肥吸收效率和利用效率等综合效应。磷肥当季利用率（PUE）是磷肥利用效率最常用的一个综合评价指标，受磷肥性质、施肥区和空白区作物产量水平、吸磷量以及施磷量等因素影响。磷肥偏生产力（PFP）反映了施用磷肥的作物生产率，受产量水平和施磷量的影响。磷肥农学效率（ AE_P ）是施肥增产效应的综合体现，磷肥施用量、管理措施均会影响磷肥的农学效率。上述各指标的计算公式如下：

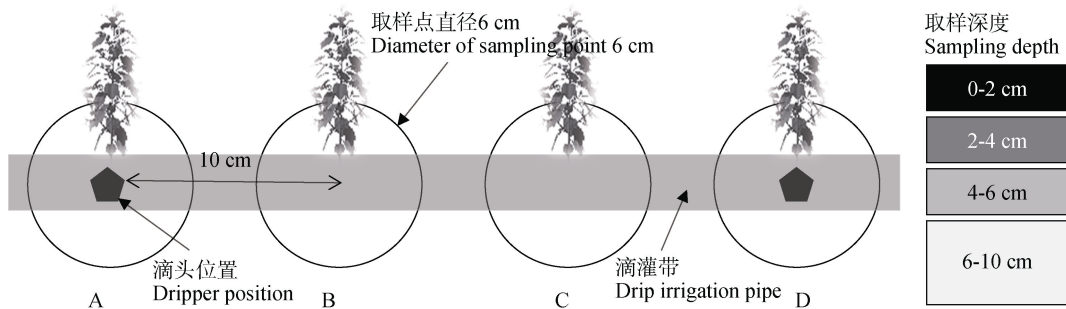


图1 滴头下土壤分层取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil layer sampling under the dripper

磷素表观平衡/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) = 施磷量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) - 作物吸磷量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$);

当季磷肥回收率/ % = 施磷区作物吸磷量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) / 施磷量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) $\times 100$;

磷肥当季利用率/ % = (施磷区作物吸磷量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) - 不施磷区作物吸磷量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)) / 施磷量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) $\times 100$;

磷肥偏生产力/ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) = 施磷区皮棉产量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) / 施磷量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$);

磷肥农学效率/ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) = (施磷区皮棉产量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) - 不施磷区皮棉产量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)) / 施磷量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

1.5 数据处理与统计分析

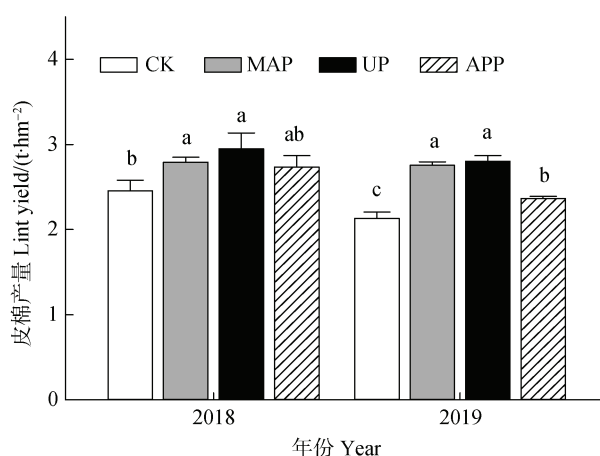
数据用 Microsoft Excel 2016 进行整理, 用 SAS 9.4 软件进行统计分析, 所有结果作图采用 SigmaPlot (Version 14.0) 软件完成。用单因素方差分析和多重比较 (最小显著差异法, LSD) 分析各年份不同施肥处理对棉花产量、地上部生物量、地上部吸磷量、磷肥利用效率等指标的影响。使用配对数据 *T* 检验分析滴头对应位置和远离滴头位置棉花叶片磷浓度的差异, 确定有效磷空间分布对棉花磷营养的影响。使用 SigmaPlot 对耕层土壤有效磷分布及磷分级进行可视化, 据此分析棉花根区土壤供磷强度的变化。将不同处理滴头下 0~10 cm 土层同一深度和同一位置 4 个重复的有效磷取平均值, 根据平均值和空间位置 (水平位置和土层深度), 在 SigmaPlot 中做有效磷分布的 2D 图像, 图像中横轴代表取样点和滴头的位置关系, 纵轴代表不同土层深度, 颜色表示有效磷值的大小。

2 结果

2.1 不同磷肥品种对皮棉产量和地上部生物量的影响

施磷肥显著提高了皮棉产量, 不同磷肥处理的皮棉产量有显著差异 ($P < 0.001$)。2018 年, MAP、UP 和 APP 处理的皮棉产量较 CK 处理分别提高

13.7%、20.1%和 11.5%, 其中 UP、APP 处理与 CK 不施磷肥之间差异显著, 而 APP 处理与 CK 之间无显著差异。2019 年, MAP、UP 和 APP 处理的皮棉产量较 CK 处理分别提高 29.1%、31.3%和 10.9%, MAP 和 UP 处理的皮棉产量显著高于 CK 和 APP 处理 (图 2)。



注: CK: 不施磷肥; MAP: 施用磷酸一铵; UP: 施用磷酸脲; APP: 施用聚磷酸铵。不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: CK: without P fertilizer; MAP: mono ammonium phosphate; UP: urea phosphate; APP: ammonium polyphosphate. Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments in the same year ($P < 0.05$). The same as below.

图 2 不同磷肥品种处理皮棉产量的比较
Fig. 2 Lint yield in different P fertilizer type treatments

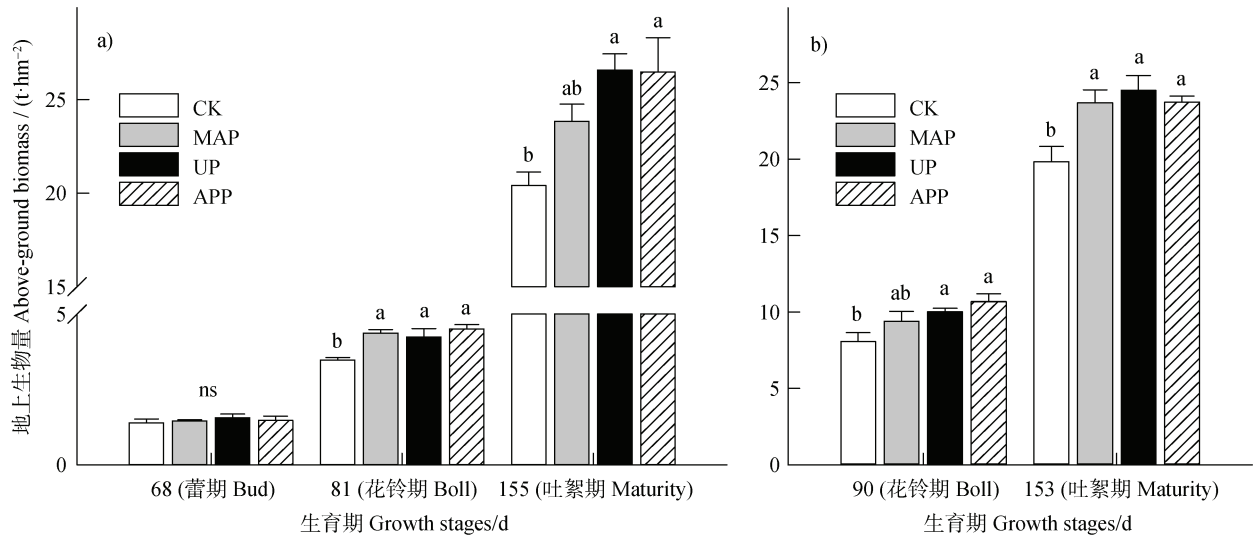
在 2018 年播种后 68 d, 不同磷肥品种处理的棉花地上部生物量无显著差异 ($P = 0.77$), 短时间内 (第一次施肥一周后) 施用不同磷肥对棉花的生长无显著影响; 播种后 81 d, 施磷肥处理的生物量显著高于不施磷肥处理 ($P = 0.006$, 图 3a); 播种 155 d 后, 与 CK 相比, MAP、UP 和 APP 处理的地上部生物量分别增加了 16.7%、30.2%和 29.7% ($P = 0.009$, 图 3a)。2019 年播种 90 d 后, UP 和 APP 处理的地上部生物量显著增加, 较 CK 提高了 24.1%和 32.4% ($P = 0.024$, 图 3b); 播种后 153 d, 与 CK 相比, MAP、UP 和 APP 处理的地上部生物量分别增加了 19.5%、23.6%和 19.7% ($P = 0.009$, 图 3b)。

2.2 不同磷肥品种对棉花磷吸收和磷肥效率的影响

施用磷肥显著提高了棉花的地上部吸磷量 ($P <$

0.001)。2018 年,与 CK 相比,MAP、UP 和 APP 处理的地上部吸磷量增加了 31.4%、36.0%和 35.2%,不同磷肥品种处理的地上部吸磷量之间无显著差异

(图 4)。2019 年,MAP、UP 和 APP 的地上部吸磷量分别较 CK 显著增加 30.0%、36.3%和 35.1%,UP 处理的地上部吸磷量显著高于 MAP 处理(图 4)。



注:不同小写字母表示相同生长阶段不同处理间差异显著($P<0.05$), ns 表示无显著差异。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$), ns mean no significant differences.

图 3 不同磷肥品种处理 2018 年 (a) 和 2019 年 (b) 地上部生物量的比较

Fig. 3 Above-ground biomass in different P fertilizer type treatments in 2018 (a) and 2019 (b)

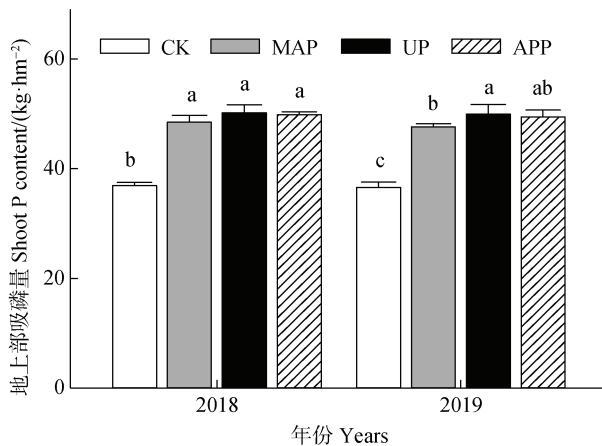


图 4 不同磷肥品种处理地上部吸磷量的比较

Fig. 4 Shoot P content in different P fertilizer type treatments

滴施不同磷肥处理的磷素表观平衡无显著差异(表 1),磷盈余量在 2.2~4.8 kg·hm⁻²。2018 年,UP 处理的磷肥偏生产力显著高于 MAP 和 APP 处理 7.6%和 8.5%;2019 年 MAP 和 UP 处理的磷肥偏生产力相当,分别高于 APP 处理 14.0%和 15.3%(表 1)。2018 年,UP 处理磷肥的农学效率最高,较 MAP 和

APP 处理高 66%和 79%;2019 年 MAP 和 UP 处理磷肥的农学效率分别较 APP 处理高 1.4 倍和 1.5 倍。2018 年和 2019 年,UP 处理的磷肥当季利用率均最高,分别为 25.5%和 25.6%,MAP 的磷肥当季利用率平均较 UP 处理低 3.9 个百分点,APP 处理的磷肥当季利用率介于 UP 和 MAP 处理之间。2018 年,三种肥料处理的当季磷肥回收率为 92.6%~95.8%,2019 年当季磷肥回收率为 90.0%~95.3%(表 1)。

综合 2018 年和 2019 两年的结果,UP 处理的磷盈余为 2.3 kg·hm⁻²,低于 MAP 处理(4.4 kg·hm⁻²);MAP、UP 和 APP 处理的磷肥偏生产力分别为 53.0、54.9 和 48.7 kg·kg⁻¹;UP 处理的磷肥农学效率最高,为 10.8 kg·kg⁻¹,MAP 为 8.5 kg·kg⁻¹,APP 最低,仅有 5.0 kg·kg⁻¹;UP 处理的磷肥当季利用率最高,为 25.6%,MAP 处理最低,为 21.7%,APP 处理为 24.8%;UP 处理的当季磷肥回收率最高,达到 95.6%,APP 处理为 94.8%,MAP 处理最低,为 91.7%。

表 1 不同处理的磷表现平衡、磷肥偏生产力、磷肥农学效率、磷肥当季利用率和当季磷肥回收率

Table 1 Phosphorus balance, partial productivity of P fertilizer, agronomic efficiency, P use efficiency, and P recovery index in different treatments

年份	处理	磷表现平衡	磷肥偏生产力	磷肥农学效率	磷肥当季利用率	当季磷肥回收率
Year	Treatment	P balance/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	Partial productivity of P fertilizer/ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Agronomic efficiency/ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	P use efficiency/ %	P recovery index/ %
2018	CK	-36.9±0.6b	—	—	—	—
	MAP	3.9±1.3a	53.3±1.3b	6.1±1.3b	22.3±2.4a	92.6±1.8a
	UP	2.2±0.7a	56.3±1.7a	9.9±1.7a	25.5±1.4a	95.8±1.4a
	APP	2.5±0.3a	52.2±0.4b	5.6±0.4b	24.9±0.5a	95.2±0.5a
2019	CK	-36.6±1.0b	—	—	—	—
	MAP	4.8±0.6a	52.6±0.4a	11.0±0.4a	21.1±1.2b	90.9±0.5b
	UP	2.4±0.9a	53.5±0.7a	11.8±0.7a	25.6±1.7a	95.3±1.1a
	APP	2.9±0.6a	45.2±0.3b	4.5±0.3b	24.7±1.2ab	94.4±0.6a

注：不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments in the same year ($P<0.05$).

2.3 不同磷肥品种对土壤有效磷及不同形态磷含量的影响

施磷肥显著提高了 0~20 cm 土层的有效磷。试验开始前 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层有效磷分别为 26.1、26.6、27.9 和 25.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 5a)。2018 年, 第二次施磷肥 2 周后, MAP、UP 和 APP 处理 0~5 cm 土层的有效磷较 CK 提高了 148%、117%和 275%; 5~10 cm 土层的有效磷较 CK 提高了 157%、126%和 92%; 10~20 cm 土层的有效磷较 CK 提高了 35%、32%和 10%; 在 MAP 处理中, 20~30 cm 土层的有效磷较 CK 提高了 24%, 而 UP 和 APP 处理中, 20~30 cm 土层的有效磷分别降低了 2.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 3.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 5b)。2019 年, 第二次施磷肥 2 周后, MAP、UP 和 APP 处理 0~5 cm 土层的有效磷较 CK 提高了 87%、69%和 330%; 5~10 cm 土层的有效磷较 CK 提高了 132%、81%和 116%; 10~20 cm 土层的有效磷较 CK 提高了 68%、51%和 125%; 在 MAP 和 APP 处理中, 20~30 cm 土层的有效磷较 CK 提高了 38%和 62%, 而 UP 处理中 20~30 cm 土层的有效磷降低了 5.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 5c)。

在 2018 年第二次施磷肥 2 周后, 测定了 0~30 cm 土层不同形态无机磷的含量。在 0~5 cm 土层, UP 和 APP 处理的 Resin-P 比例显著高于 CK; MAP、UP 和 APP 处理中, $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、 NaOH-Pi 均显著高

于 CK, 而三个施肥处理之间无显著差异; HCl-Pi 的比例在 CK 处理中最高, 在 APP 处理中最低。在 5~10 cm 土层中, MAP 和 APP 处理的 Resin-P 高于 UP 和 CK 处理; $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 和 NaOH-Pi 的变化规律与 0~5 cm 土层一致; HCl-Pi 的比例在 CK 处理中最高。在 10~20 cm 土层, UP 处理的 Resin-P 比例显著高于 APP 和 CK, 而 MAP 处理的 Resin-P 比例介于 UP 和 APP 之间。总之, 滴施磷肥能够提高 0~10 cm 土层的 Resin-P、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 和 NaOH-Pi , 磷肥在垂直迁移过程中仍能保持较高的有效性, 说明田间条件下基于作物需求与磷肥用量平衡的磷肥管理能够保障棉花根区土壤供磷强度(图 5, 图 6)。

2.4 滴头下方 10 厘米土层有效磷的空间分布及其与棉花叶片磷浓度的关系

在 2019 年棉花吐絮期, 分析了滴头下方 10 厘米土层有效磷的空间分布。结果表明, 不施磷肥处理 6~10 cm 土层出现了磷消耗区, 有效磷降低 6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。MAP 处理磷素主要累积在 0~4 cm 土层, 其有效磷较 CK 处理增加了 13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而 6~10 cm 土层的有效磷仅增加了 5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。滴施磷酸脲在土壤中的垂直移动距离大于磷酸一铵, 6~10 cm 土层有效磷增加了 9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。聚磷酸铵在土壤中的移动性最好, 6~10 cm 土层有效磷较 CK 增加了 13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 7e~图 7h)。表层土壤有效磷的空间

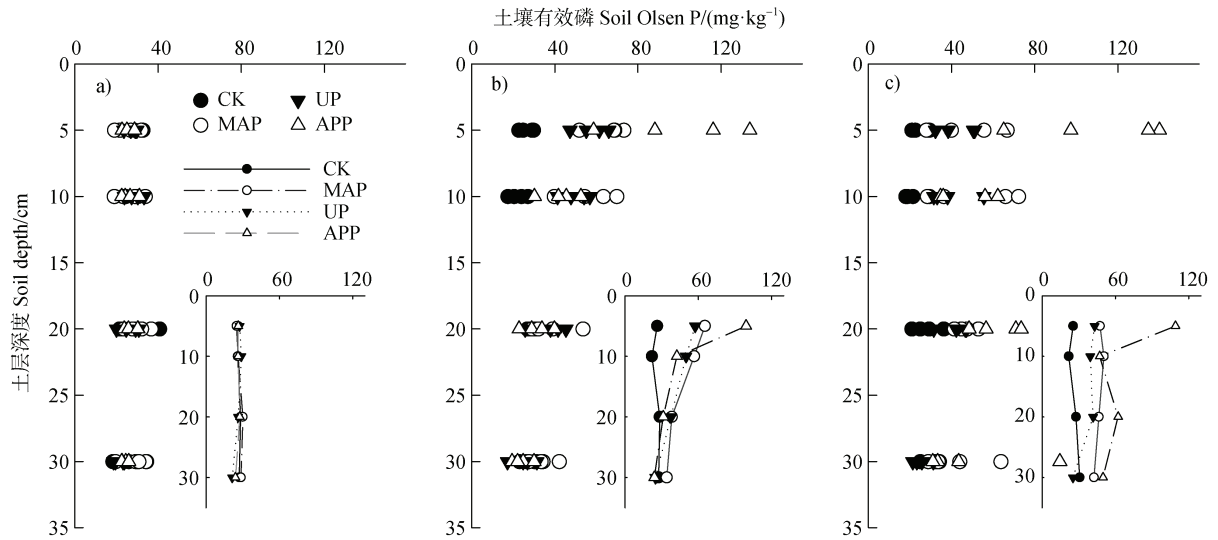
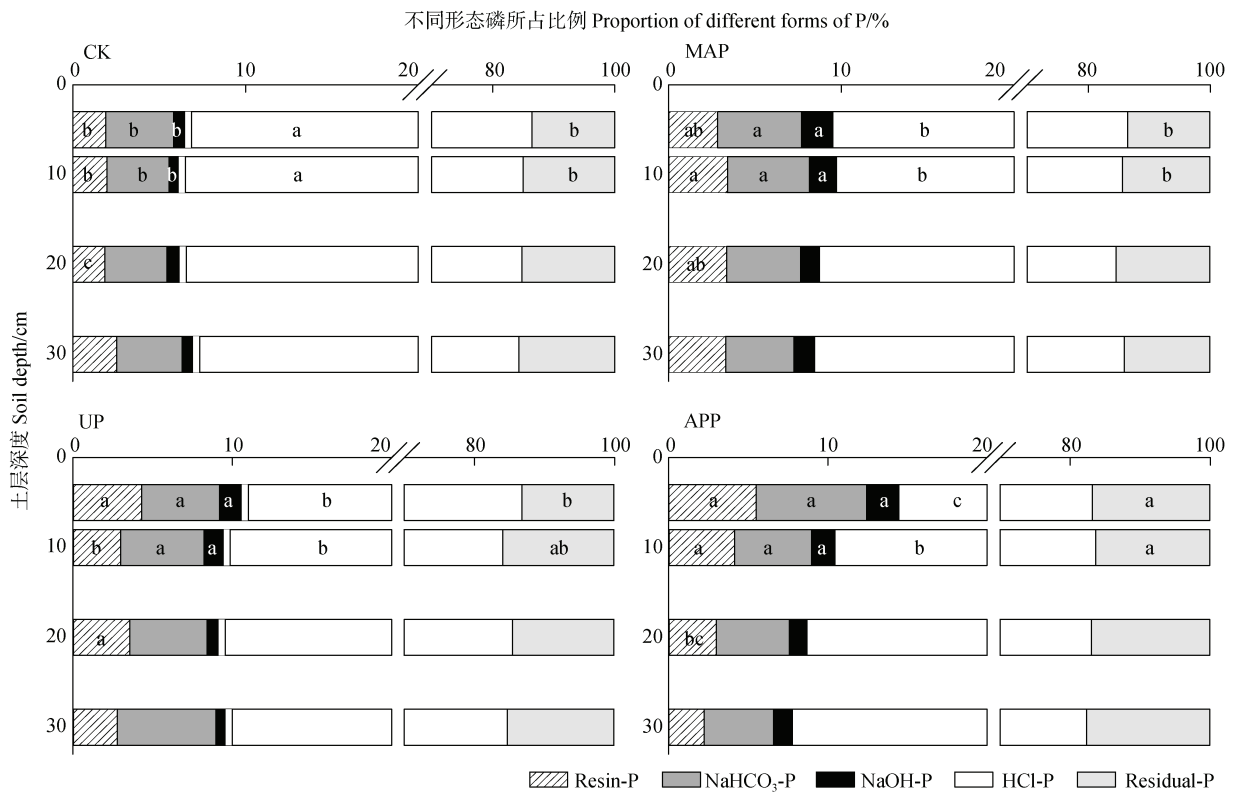
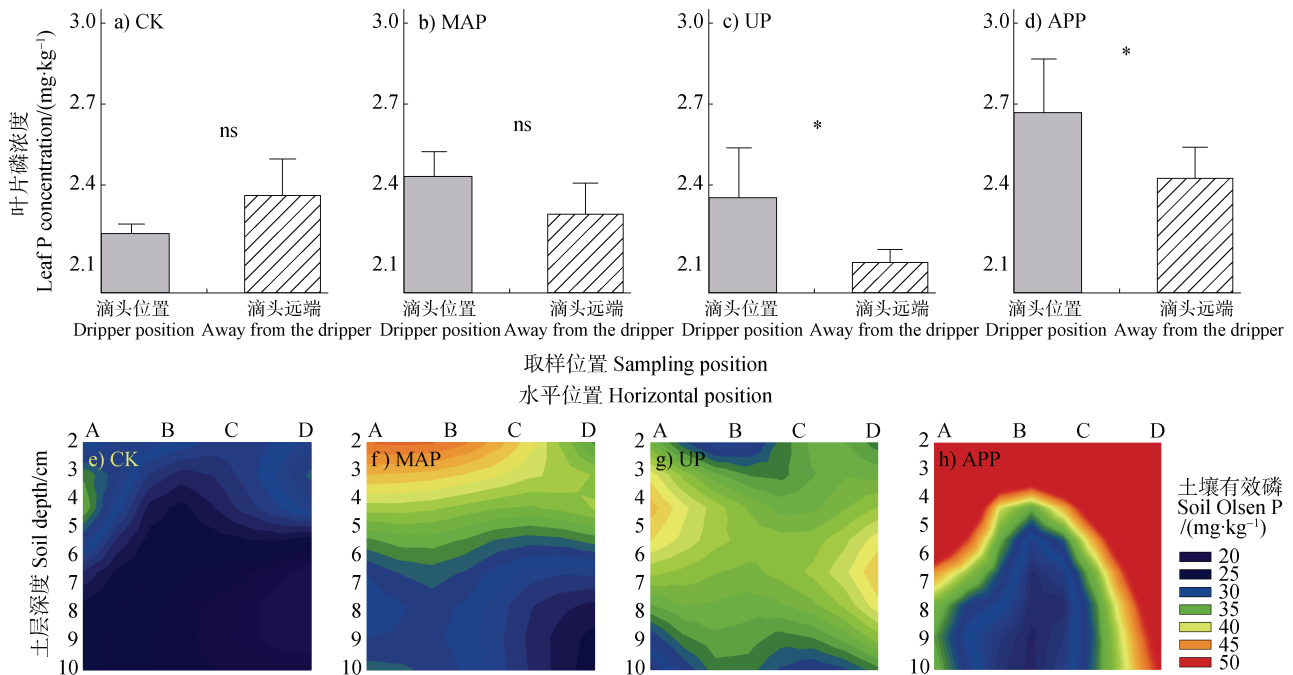


图 5 施肥前 (a)、2018 年 (b) 和 2019 年 (c) 不同处理土壤有效磷的垂直分布
Fig. 5 The vertical distribution of soil Olsen-P before fertilization (a), 2018 (b) and 2019 (c)



注：不同小写字母表示同一土层相同形态磷的比例在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Resin-P: 树脂提取态磷; NaHCO₃-Pi: 碳酸氢钠提取态无机磷; NaOH-Pi: 氢氧化钠提取态无机磷; HCl-Pi: 盐酸提取态无机磷; Residual-P: 残渣磷。Note: Different lowercase letters indicate significant differences in P fertilizer type treatments in the same P forms under the same soil layer ($P < 0.05$). Resin-P: resin-extracted P, NaHCO₃-Pi: sodium bicarbonate-extractable inorganic P, NaOH-Pi: inorganic P extracted in sodium hydroxide, HCl-Pi: inorganic P extracted in hydrochloric acid, Residual-P: residual P fraction.

图 6 不同处理各土层不同形态磷所占的比例
Fig. 6 The proportion of different P forms in each soil layer under different P fertilizer type treatments



注: A 和 D 代表滴头位置, B 和 C 代表远离滴头位置。Note: A and D: dripper position; B and C: away from the dripper.

图 7 不同位置棉花叶片的磷浓度 (a~d) 以及不同处理滴头下 0~10 cm 土层有效磷的空间分布 (e~h)

Fig. 7 Cotton leaf P concentration at different locations (a~d) and under different P fertilizer treatments the spatial distribution of Olsen-P in the 0~10 cm soil layer (e~h)

分布与滴头位置密切相关 (图 7)。UP 处理滴头正下方 4~6 cm 区域出现了明显的有效磷富集区; APP 处理形成了以滴头位置为中心的有效磷富集区, 在两个滴头中间的位置 6~10 cm 土层有效磷增加幅度较小 (图 7)。通过测定滴头位置 (图 7, 位置 A 和 D) 和远离滴头位置 (图 7, 位置 B 和 C) 棉花叶片的磷浓度发现, CK 和 MAP 处理中, 滴头位置和滴头远端位置棉花叶片磷浓度比较接近, UP 和 APP 处理中, 滴头位置的叶片磷浓度分别较远离滴头位置提高了 11.3% 和 10.5% (图 7a~图 7d)。上述结果说明, 磷的空间有效性能影响棉花的磷营养。

3 讨论

3.1 基于作物需求与磷肥用量平衡的磷肥管理能显著提高磷肥利用效率

有效磷接近农学阈值的土壤上, 根据皮棉目标产量的吸磷量施用 52.4 kg·hm⁻² 磷肥, 既能维持土壤的供磷强度、满足棉花需求, 也能在保证高产的同时实现磷素的输入-输出平衡并提高磷肥利用效率。

有效磷 23.6 mg·kg⁻¹ (略高于农学阈值) 土壤上施用 52.4 kg·hm⁻² 磷肥, 棉花花铃期 (施肥两周后) 根区 (窄行间滴灌带下方) 0~30 cm 土层的平均有效磷达到了 42 mg·kg⁻¹, 能够保证作物生长季土壤的供磷强度 (图 4, 图 5, 图 6)。MAP、UP 和 APP 处理的皮棉产量分别达到了 2.77、2.88 和 2.55 t·hm⁻², 平均为 2.73 t·hm⁻², 高于 2019 年新疆平均皮棉产量 (1.97 t·hm⁻²) [21], 这说明基于磷素输入-输出平衡的磷肥管理能满足作物生长对磷素的需求, 皮棉产量处于较高水平。皮棉目标产量 2.7~3.0 t·hm⁻² 水平下棉花地上部吸磷量在 43.2~64.2 kg·hm⁻² [17], 前期研究发现皮棉产量 2.7 t·hm⁻² 时棉花地上部吸磷量为 48.0~50.2 kg·hm⁻², 与本文的结果 (49.3 kg·hm⁻², 图 4) 相近, UP 和 APP 处理基本实现了磷的输入-输出平衡 (表 1)。李青军等 [10] 利用新疆测土配方施肥的数据计算表明, 滴灌条件下新疆棉花的磷肥利用率为 17.1%; 袁芳等 [22] 发现, 皮棉产量 2.5 t·hm⁻² 水平下, 施磷 32.7 kg·hm⁻² 时磷肥利用率为 21.9%, 施磷 65.5 kg·hm⁻² 时磷肥利用率仅为 14.5%。在本研究中基本实现了磷素的输入-输出平衡,

MAP、UP 和 APP 处理的磷肥当季利用率为 21.1%~25.6% (平均 24.0%)，当季磷肥回收率达到 90.9%~95.8% (表 1)。

3.2 滴施强酸性、缓释磷肥能在磷素输入-输出平衡条件下维持土壤供磷强度

增加滴施磷肥的移动距离、降低磷肥有效性的损失是磷素输入-输出平衡条件下保证棉花生育期内根区磷素供应的基础。棉花根系和菌根主要分布在 5~30 cm 范围，而传统的观点认为滴施磷肥主要聚集在土壤表层、很难到达根系和菌根的主要生长区域，导致磷肥利用率难以提高^[4-5, 23-24]。最近有研究表明，滴灌条件下水溶性磷肥随饱和流从土壤孔隙向下移动，最远可到达 15~20 cm 土层^[18, 25]，石灰性土壤上滴施酸性肥料或者缓释磷肥，磷的移动距离还能进一步增加^[26]。本研究在棉花蕾期和花铃期集中滴施强酸性/缓释磷肥磷酸脲或聚磷酸铵，磷的垂直移动距离可达到 20 cm 土层 (图 5, 图 6, 图 7)，能保证棉花生育期内的土壤供磷强度。

连续滴施磷酸脲 2 年后，根区 0~20 cm 土层有效磷显著增加 (图 5c)，滴施聚磷酸铵可显著提高根区 0~30 cm 土层有效磷的含量，耕层 Resin-P 和 NaHCO₃-Pi 比例也大幅度提高 (图 6)。在滴头下方 0~10 cm 土层中，UP 处理 5~10 cm 土层的有效磷更高，APP 处理在滴头下方形成了一个有效磷富集区且 5~10 cm 土层 Resin-P 的比例也显著提高 (图 7)。上述结果说明滴施强酸性肥料磷酸脲或缓释肥料聚磷酸铵均能使磷肥移动到棉花根系分布的主要土层，提高了有效磷分布和棉花根系分布的匹配程度^[4-5, 18, 23-24]。磷酸脲施入土壤后能降低局部 pH^[27]，减少 Ca²⁺对磷酸根的固定，增加磷肥在土壤中的移动距离、保证棉花根区养分供应。以往的研究也证明，滴施磷酸脲可促进作物根系生长、增加磷吸收^[28]，减少棉铃脱落、增加单铃重，促进棉花增产^[29]。聚磷酸铵施入土壤后当季并不能完全分解^[30]，这减少了土壤黏粒和金属离子对磷素的吸附与沉淀^[31-32]，提高磷在土壤中的迁移距离、维持棉花生育期内耕层土壤的供磷强度 (图 5, 图 6)。以往的研究中施用聚磷酸铵能促进作物生长和磷吸收^[33]，但是本研究中 APP 处理的增产效果不理想 (图 2, 图 3, 图 4)。可能是蕾期和花铃期滴施的聚磷酸铵短时间内不会完全分解^[31]，导致后期供磷过多 (图 5, 图 7) 延迟了棉

花的生育进程^[34]，降低了棉花产量。

3.3 磷肥利用率的评价方法

在本研究基于作物需求与磷肥用量平衡的磷肥管理中，根据皮棉目标产量吸磷量确定磷肥施用量，通过磷肥性质与土壤类型-作物体系的匹配并调整磷肥的施用时间和频率，基本实现了磷素的输入-输出平衡，磷肥当季利用率为 21.1%~25.6%，当季磷肥回收率达到 90.9%~95.8% (表 1)。该结果表明，在磷肥输入-输出平衡条件下施入土壤的磷肥绝大部分已被作物地上部回收，但是差减法计算的磷肥当季利用率仍然不超过 26% (表 1)。实际上施磷肥处理的地上部吸磷量已接近施磷量，在这种情况下磷肥的当季利用率如此之低，显然是不合理的。

目前对作物磷肥利用率的评价主要有两种方法，即差减法计算的当季利用率^[35]和磷素输入-输出比值计算的回收率^[20, 36]。利用差减法计算的磷肥当季利用率通常仅有 10%~15%^[35]，其原因有以下几点。首先，差减法计算磷肥当季利用率高度依赖于不施磷肥处理的吸磷量。土壤有效磷较高时，不施磷肥处理的产量与吸磷量也较高，差减法计算的磷肥当季利用率会随着土壤有效磷浓度的增加而降低^[10]，低产田的磷肥当季利用通常要高于高产田^[35]。其次，差减法计算磷肥当季利用率时，作为分母的施磷量越高则磷肥利用率越低^[22]。用差减法计算磷肥当季利用率并据此确定磷肥施用量是低肥力条件下以培肥土壤为目标的一种磷肥管理策略，有利于通过磷肥的累积提高土壤有效磷水平。然而，在我国农田土壤有效磷普遍提升至农学阈值附近甚至高于农学阈值的背景下，再继续采用该方法评价磷肥的利用效率将不利于作物磷高效吸收利用的生物学潜力发挥，也不利于磷肥绿色增效和磷资源的可持续利用。

利用磷肥输入与作物磷素吸收输出平衡的原则计算的当季磷肥回收率能在更大程度上反映磷肥在土壤中的固定和累积，在磷肥的管理中应该得到更广泛的应用^[20, 36]。首先，平衡法计算当季磷肥回收率并据此确定磷肥推荐用量能够兼顾作物产量水平、磷肥吸收效率和利用效率等综合效应^[20]。本研究根据作物产量水平和养分吸收量确定磷肥用量能够实现磷肥的投入量与作物的吸收量基本保持平衡，当季磷肥回收率达到 90.9%~95.8% (表 1)，较好地反映了磷肥的实际利用效率。其次，用平衡法计

算当季磷肥回收率并据此进行磷肥管理能将土壤有效磷维持在有利于作物磷高效利用的生物学潜力发挥的水平,这将大幅度提高磷肥利用效率。在本研究施肥处理根区 0~20 cm 土层的有效磷均有不同程度增加(图 5),棉花成熟期远离施肥位置(滴头)的土壤有效磷也并未降低(图 7),说明基于作物需求与磷肥用量平衡的磷肥管理能较好地维持土壤磷素肥力。此外,基于平衡法计算的当季磷肥回收率确定磷肥推荐用量可降低磷肥施用量,减少磷盈余,减轻磷资源和环境污染的压力。本研究中磷肥的施用量降至 $52.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较新疆棉田的平均施磷量^[37]减少了 $18.6 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,能将土壤磷素盈余控制在 $2.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以内,极大地降低了环境风险。

综上所述,磷肥高效管理中应该使用多个磷肥效率评价指标,综合考虑目标产量水平、土壤供磷强度、磷素输入-输出平衡、磷肥农学效率、当季磷肥回收率等因素,全面评价磷肥效率。未来的磷肥管理策略应该以维持土壤有效磷供应水平处于农学阈值附近,即以满作物生长和维持土壤供磷能力、发挥作物磷高效吸收利用的生物学潜力的需求为依据确定施磷量,在石灰性土壤上选择强酸性、缓释或者生理酸性磷肥并在作物生育前期集中施用^[10,20,38],将有助于实现土壤磷的输入-输出平衡和磷肥高效利用。

4 结 论

将土壤有效磷维持在农学阈值附近、根据棉花目标产量的需磷量确定磷肥施用量,在石灰性土壤上选择强酸性、缓释磷肥磷酸脲或者聚磷酸铵,并于作物生育前期集中施用,可维持土壤供磷强度并发挥作物磷高效吸收利用的生物学潜力,能在磷素输入-输出平衡的条件下实现作物高产和磷肥高效。根据平衡法计算的当季磷肥回收率可达到 96%,较好地反映了磷肥的实际利用效率。

参考文献 (References)

- [1] Shen J B, Yuan L X, Zhang J L, et al. Phosphorus dynamics: From soil to plant[J]. *Plant Physiology*, 2011, 156 (3): 997—1005.
- [2] Gao S, Yang J S, Yao R J, et al. Effects of different management on phosphorus fractions in coastal saline soil and phosphorus absorption and utilization by crops[J]. *Soils*, 2020, 52 (4): 691—698. [高珊, 杨劲松, 姚荣江, 等. 调控措施对滨海盐渍土磷素形态及作物磷素吸收的影响[J]. *土壤*, 2020, 52 (4): 691—698.]
- [3] Li Q J, Zhang Y, Harlhax Y, et al. Phosphorus utilization efficiency and yield responses of drip irrigated cotton under plastic film mulching to three types of water soluble phosphorus fertilizers[J]. *Cotton Science*, 2018, 30 (2): 172—179. [李青军, 张炎, 哈丽哈什·依巴提, 等. 膜下滴灌棉花对 3 种水溶性磷肥的利用效率和产量响应[J]. *棉花学报*, 2018, 30 (2): 172—179.]
- [4] Mai W X, Xue X R, Feng G, et al. Simultaneously maximizing root/mycorrhizal growth and phosphorus uptake by cotton plants by optimizing water and phosphorus management[J]. *BMC Plant Biology*, 2018, 18 (1): 334.
- [5] Mai W, Xue X, Feng G, et al. Can optimization of phosphorus input lead to high productivity and high phosphorus use efficiency of cotton through maximization of root/mycorrhizal efficiency in phosphorus acquisition?[J]. *Field Crops Research*, 2018, 216: 100—108.
- [6] Wang X X, Liu S, Zhang S, et al. Localized ammonium and phosphorus fertilization can improve cotton lint yield by decreasing rhizosphere soil pH and salinity[J]. *Field Crops Research*, 2018, 217: 75—81.
- [7] Dong Q Q, Zhao X, Ni S B, et al. Nutritional characteristics and fertilization management of *Macadamia*[J]. *South China Fruits*, 2020, 49 (1): 149—154. [董倩倩, 赵鑫, 倪书邦, 等. 澳洲坚果的营养特性与施肥管理途径[J]. *中国南方果树*, 2020, 49 (1): 149—154.]
- [8] Li H M, Wang R, Zhong Y M, et al. Rhizosphere communication and its effects on improving phosphorus utilization in high-input vegetable production system: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (4): 924—934. [李慧敏, 王瑞, 仲月明, 等. 高投入蔬菜种植体系磷素高效利用的根际对话及效应研究进展[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (4): 924—934.]
- [9] Peng Y, Duan Y S, Huo W G, et al. Soil microbial biomass phosphorus can serve as an index to reflect soil phosphorus fertility[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57 (5): 657—669.
- [10] Li Q J, Zhang Y, Harlhax Y, et al. Abundance index and critical level of phosphorus in cotton soils under flooding and drip irrigation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24 (4): 927—934. [李青军, 张炎, 哈丽哈什·依巴提, 等. 漫灌和滴灌棉花土壤有效磷丰缺指标与临界值研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (4): 927—934.]
- [11] 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): 149—154.

- 157—167.
- [12] Feng G. Ways to improve efficient utilization of phosphate fertilizer in soil-crop system in China [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2021, 36 (2): 4. [冯固. 提高我国土壤-作物体系磷肥高效利用的途径[J]. 磷肥与复肥, 2021, 36 (2): 4.]
- [13] Wang Y K, Cai Z J, Feng G. Effects of different phosphorus application techniques on phosphorus availability in a rape system in a red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, DOI: 10.11766/trxb202104210207. [王一锟, 蔡泽江, 冯固. 不同磷肥调控措施下红壤磷素有效性和利用率的变化[J]. 土壤学报, DOI: 10.11766/trxb202104210207.]
- [14] Chen J J, Guan Y, Wang J, et al. The long-term evolution of phosphate fertilizer application amount, efficiency and types on main crops in Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2016, 53 (10): 1858—1866. [陈家杰, 关钰, 王静, 等. 新疆农田施磷量, 磷肥效率及磷肥品种长期演变[J]. 新疆农业科学, 2016, 53 (10): 1858—1866.]
- [15] Wang F J. Synthesis of ammonium low-polyphosphate fertilizer and its transformation in soil[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2014. [王方进. 低聚磷酸铵肥料的合成及其在土壤中的转化研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2014.]
- [16] Shi J S, Zhang Y C, Wang L Y, et al. Effects of soluble ammonium polyphosphate fertilizer on yield, quality and phosphorous uptake of tomato in a plastic greenhouse[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31 (S1): 36—40. [史建硕, 张彦才, 王丽英, 等. 聚磷酸铵水溶肥对设施番茄产量品质以及磷素吸收的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31 (S1): 36—40.]
- [17] Zhang F S, Chen X P, Chen Q. Fertilization guidelines for major crops in China[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009. [张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.]
- [18] Li Q J. Diffusive gradients in thin film based soil phosphorus supply index and evaluation in Xinjiang cotton region[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. [李青军. 基于薄膜梯度扩散法的新疆棉区土壤供磷指标与评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.]
- [19] Guppy C N, Menzies N W, Moody P W, et al. A simplified, sequential, phosphorus fractionation method[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2000, 31 (11/14): 1981—1991.
- [20] Syers J K, Johnston A E, Curtin D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* 18[M]. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008.
- [21] Lou S W, Dong H Z, Tian X L, et al. The “short, dense and early” cultivation of cotton in Xinjiang: History, current situation and prospect[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54 (4): 720—732. [娄善伟, 董合忠, 田晓莉, 等. 新疆棉花“矮、密、早”栽培历史、现状和展望[J]. 中国农业科学, 2021, 54 (4): 720—732.]
- [22] Yuan F, Ma D, Zhao K, et al. Effect of phosphorus fertilization rate on cotton field phosphorus condition, yield and phosphorus balance in Xinjiang[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34 (5): 1033—1041. [袁芳, 马丹, 赵库, 等. 磷肥用量对新疆棉田磷素状况、籽棉产量和磷平衡的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34 (5): 1033—1041.]
- [23] Ye Z P, Bai X M, Chen B L. Effects of different years of continuous cropping on cotton root morphology and yield[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38 (2): 135—141. [叶祖鹏, 白旭明, 陈波浪. 不同连作年限对棉花根系形态和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38 (2): 135—141.]
- [24] Zhang S M, Baidengsha M, Liu S L, et al. Banding superphosphate and ammonium sulfate as starter fertilizer improve phosphate fertilizer efficiency and cotton yield[J]. *Cotton Science*, 2020, 32 (2): 121—132. [张少民, 白灯莎·买买提艾力, 刘盛林, 等. 根际启动肥能够提高棉花磷效率和产量[J]. 棉花学报, 2020, 32 (2): 121—132.]
- [25] Yang G J, Peng Y, Yin F H, et al. Phosphorus migration of monoammonium phosphate via drip-irrigation in gray desert soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020 (6): 138—146. [杨国江, 彭懿, 尹飞虎, 等. 滴灌磷肥在灰漠土中运移的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2020 (6): 138—146.]
- [26] Kang L F, Wang J, Zhu L N, et al. Mobility and availability of phosphate under different phosphate sources and application methods in calcareous soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26 (7): 1179—1187. [亢龙飞, 王静, 朱丽娜, 等. 不同形态磷酸盐及施用方式对石灰性土壤磷移动性和有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (7): 1179—1187.]
- [27] Zhang H Y, Zhang J, Zhang F L, et al. Effects of different phosphorus fertilizers on soil phosphorus availability and maize yield under drip irrigation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33 (2): 189—195. [张皓禹, 张君, 张凤麟, 等. 滴灌条件下不同磷肥品种对土壤磷有效性及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (2): 189—195.]
- [28] Huang Z H. Effect of acidulant on soil phosphorus availability and nutrient uptake of maize[D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2017. [黄致华. 酸化剂对土壤磷及玉米养分吸收的影响[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2017.]
- [29] Liu J, Du J W, Zhang W X. Effect of urea- phosphate on the quality and yield of cotton by drip irrigation under plastic film[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006 (4): 37—39. [刘健, 杜建卫, 张卫星. 磷酸脲对

- 膜下滴灌棉花品质和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2006 (4): 37—39.]
- [30] Torres-dorante L O, Claassen N, Steingrobe B, et al. Fertilizer use efficiency of different inorganic polyphosphate sources: Effects on soil P availability and plant P acquisition during early growth of corn[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2006, 169 (4): 509—515.
- [31] Philen O D, Lehr J R. Reactions of ammonium polyphosphates with soil minerals[J]. Soil Science Society of America Journal, 1967, 31 (2): 196—199.
- [32] Gao Y J, Wang X W, Shah J A, et al. Polyphosphate fertilizers increased maize (*Zea mays* L.) P, Fe, Zn, and Mn uptake by decreasing P fixation and mobilizing microelements in calcareous soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20 (1): 1—11.
- [33] 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. [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.]
- [34] Matocha J E, Coker D L. Organic and inorganic blended materials for use as pop-up fertilizer for cotton seedlings[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2012, 43 (10): 1482—1489.
- [35] Cheng M F, He P, Jin J Y. Advance of phosphate recovery rate in Chinese main crops[J]. Crops, 2010 (1): 12—14. [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.]
- [36] Roberts T L, Johnston A E. Phosphorus use efficiency and management in agriculture[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2015, 105: 275—281.
- [37] Lai B, Tang M Y, Chai Z P, et al. Investigation and evaluation of the chemical fertilizer application situation of farmland in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2014, 31 (6): 1024—1030. [赖波, 汤明尧, 柴仲平, 等. 新疆农田化肥施用现状调查与评价[J]. 干旱区研究, 2014, 31 (6): 1024—1030.]
- [38] Chen F, Zhang G S. Research progress of “4R” nutrient stewardship in sustainable agricultural development[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31 (23): 245—250. [陈防, 张过师. 农业可持续发展中的“4R”养分管理研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31 (23): 245—250.]

(责任编辑: 陈荣府)