



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

有机肥添加对不同磷肥用量新疆棉田磷素状况及棉花产量的影响

袁芳, 张凯, 马超, 张楠, 盛建东, 张文太

引用本文:

袁芳, 张凯, 马超, 等. 有机肥添加对不同磷肥用量新疆棉田磷素状况及棉花产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 118–128.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0767>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 810–819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

3种改良剂对连作川党参生长及土壤生化性质的影响

周武先, 刘翠君, 何银生, 吴海棠, 段媛媛, 魏海英, 艾伦强, 张美德

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 43–52 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0201>

有机肥替代部分化肥结合外源硒对白术的促生作用

周武先, 张美德, 王华, 段媛媛, 艾伦强, 黄东海, 罗孝荣, 张宇

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 457–465 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0228>

猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响

石纹磴, 刘世亮, 赵颖, 高焕平, 王洋洋, 李慧, 刘芳

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 431–438 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0070>

华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响

蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 刘惠芬, 杨殿林, 谭炳昌

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 503–510 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0254>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

袁芳, 张凯, 马超, 等. 有机肥添加对不同磷肥用量新疆棉田磷素状况及棉花产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 118–128.

YUAN F, ZHANG K, MA C, et al. Effects of organic fertilizer addition on field phosphorus status and yield under different amounts of phosphorus fertilization in cotton field in Xinjiang, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(1): 118–128.



开放科学 OSID

有机肥添加对不同磷肥用量新疆棉田磷素状况及棉花产量的影响

袁芳^{1,2}, 张凯^{1,2*}, 马超^{1,2}, 张楠^{1,2}, 盛建东^{1,2}, 张文太^{1,2}

(1. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要:为探究有机肥添加对不同磷肥用量新疆棉田土壤磷素有效性、植株磷吸收和分配、产量构成和棉田磷平衡的影响, 采用大田试验的方法, 在不同磷肥用量(0、50、100、150 kg·hm⁻², 以 P₂O₅ 计)基础上, 设置未施有机肥对照处理和添加有机肥处理(有机肥 4 500 kg·hm⁻²), 测定棉花不同生育时期土壤有效磷含量、植株吸磷量和磷分配比例、籽棉产量, 计算了棉田磷肥利用率和磷素平衡状况。结果表明: 棉田土壤有效磷表现出随施磷量增加而增加的趋势, 添加有机肥的处理土壤有效磷含量整体高于未添加有机肥处理。植株累积吸磷量呈现出随施磷量增加而增加的趋势, 在施磷水平为 150 kg·hm⁻² 时, 植株累积吸磷量整体较高。籽棉产量随施磷量增加表现出先增加后略有降低的趋势, 添加有机肥处理的产量总体高于未添加有机肥处理, 且在施磷量 100 kg·hm⁻² 时最高, 为 5 642 kg·hm⁻²。磷肥利用率在施磷量 100 kg·hm⁻² 并配施有机肥时达到最优, 为 37.24%; 随施磷量的增加, 棉田土壤磷素盈余量呈增加的趋势, 在施磷量 100 kg·hm⁻² 并配施有机肥时, 棉田磷素收支开始出现盈余, 盈余量为 16.82 kg·hm⁻²。综上, 在磷肥减施条件下有机肥添加可通过提高土壤磷素有效性、调节棉花磷素吸收和分配来影响棉籽产量; 在综合考虑土壤磷素有效性、棉花磷素吸收和产量、磷肥利用率和棉田磷素收支平衡的基础上, 建议新疆棉田磷肥施用量为 100 kg·hm⁻², 并配施有机肥。

关键词: 有机肥; 棉花; 累积吸磷量; 磷肥利用率

中图分类号: S562

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2022)01-0118-11

doi: 10.13254/j.jare.2020.0767

Effects of organic fertilizer addition on field phosphorus status and yield under different amounts of phosphorus fertilization in cotton field in Xinjiang, China

YUAN Fang^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2*}, MA Chao^{1,2}, ZHANG Nan^{1,2}, SHENG Jiandong^{1,2}, ZHANG Wentai^{1,2}

(1. College of Grassland and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecology, Urumqi 830052, China)

Abstract: This research aimed to study the effect of different phosphorus fertilizer rates and organic fertilizer addition on the soil phosphorus availability, plant uptake and distribution, yield composition, and field phosphorus balance of cotton fields in Xinjiang, which would help increase phosphate fertilizer use efficiency and the sustainable phosphate management of cotton field in Xinjiang. Different phosphorus fertilization rate treatments (0, 50, 100 kg·hm⁻², and 150 kg·hm⁻²), with and without organic fertilizer (organic fertilizer 4 500 kg·hm⁻²) were set under the field conditions. The contents of soil-available phosphorus and plant uptake, distribution, and yield were measured. The phosphate fertilizer use efficiency and field phosphorus balance were calculated. Results showed that: soil-available

收稿日期: 2020-12-21 录用日期: 2021-03-16

作者简介: 袁芳 (1995—), 女, 河南柘城人, 硕士研究生, 主要研究方向为磷肥高效利用。E-mail: yf13139667027@163.com

*通信作者: 张凯 E-mail: zhangkai4595241@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41761067); 国家重点研发计划课题 (2017YFD0200205-6); 新疆维吾尔自治区自然科学基金 (2017D01A37)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41761067); The Nation Key Research and Development Program of China (2017YFD0200205-6); The Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2017D01A37)

phosphorus showed an increasing tendency with the increase of phosphorus fertilization rate; soil-available phosphorus content in the treatment with organic fertilizer was higher than that in the treatment without organic fertilizer. The plants' accumulated phosphorus uptake showed an increasing trend, with the highest value found at $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. With the increase of phosphorus application, the seed cotton yield first increased and then slightly decreased. The yield of the treatment with organic fertilizer was generally greater than that of the treatment without organic fertilizer. The seed cotton yield was highest ($5\,642 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) at $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ when organic fertilizers were added. The phosphate fertilizer recovery rate was optimal (37.24%) at $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. With the increase of phosphorus fertilization rate, field phosphorus surplus showed an increasing trend, with the first positive value found at $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ($16.82 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). Organic fertilizer addition under a reduced phosphorus fertilizer application condition could change soil phosphorus availability and plant uptake, distribution, and seed cotton yield. Based on soil phosphorus availability, plant phosphorus uptake and distribution, yield and field phosphorus balance, it is recommended to add $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ organic fertilizer base on proper phosphorus fertilization rates in Xinjiang cotton fields.

Keywords: organic fertilizers; cotton; plant uptake; phosphorus fertilization rate

棉花是我国重要的经济作物之一^[1]。随着“矮、密、早”和“膜下滴灌”等栽培技术的推广应用^[2],新疆棉花种植面积不断扩大,逐渐发展成为我国棉花主产区^[3]。截至2019年,新疆棉花种植面积约占全国的76%,总产量约占全国的85%^[4]。磷素是棉花生长发育不可缺少的营养元素之一^[5],而新疆土壤属于石灰性土壤,施入土壤中的磷素易与土壤中的钙镁等物质发生反应,被吸附或固定^[6-8],仅有10%~20%可以被棉花吸收利用^[9],这不仅造成了磷肥的浪费,也可能产生潜在的生态环境风险^[10]。因此,如何提高磷肥利用率,减少化学磷肥用量,是实现新疆棉田可持续发展亟需解决的重要问题。

合理的磷肥用量是保证棉田高磷肥利用率的基础。自2005年起新疆依托国家测土配方施肥项目开展了大量的棉田肥料试验和技术推广工作,2011年统计数据显示,新疆棉田磷肥平均施用量为 $164.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 P_2O_5 计,下同),相比棉田磷肥用量研究中的推荐磷肥用量($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[11],已经达到了比较合理的水平。然而,由于新疆石灰性土壤磷素固持严重,磷肥利用率仍然较低,仅为10%~20%,有些棉田磷肥利用率甚至低于5%^[12-13]。因此,有必要采取一定的调控措施,提高新疆棉田磷肥利用率。

有机肥施用可改善土壤磷素状况^[14],提高磷肥利用率。有机肥不仅本身含有可溶性磷素(如正磷酸盐)^[15],还可以通过促进土壤微生物生长和磷素周转,提高土壤磷素有效性。另外,有机肥分解过程中产生的有机酸,可通过酸溶、络合溶解、阴离子代换和竞争吸附等作用,改变土壤对磷素的吸附-解吸过程^[16-17],提高土壤磷素有效性。研究表明,有机肥添加对小麦^[18]、水稻^[19]、玉米^[20]等作物对磷素的吸收和磷肥的利用有促进作用。

因此,本试验在不同磷肥用量条件下,研究有机肥添加对棉田土壤有效磷、植株磷吸收和分配、籽棉产量和构成、棉田磷效率和磷素收支平衡的影响,旨在为新疆棉田化学磷肥减量施用和磷肥利用率的提高提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在新疆昌吉回族自治州阜康市彭家湾村($88^{\circ}00'44.30''\text{E}$, $44^{\circ}10'21.05''\text{N}$)进行。阜康市地处天山东段北麓、准噶尔盆地南缘,属于大陆性干旱气候,年均无霜期174 d,光热资源充足,年均温度 6.6°C ,降雨量186 mm。棉花是阜康市的重要经济作物,该地区耕地土壤类型主要有灌溉灰漠土、灌耕土、潮土、退潮土、灌淤土、盐渍化潮土等。本试验区土壤背景值分别为有机质 $18.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $46.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $13.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH(水:土=5:1)8.14,电导率 $226.74 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

为明确不同磷肥用量条件下有机肥添加对棉田磷素状况和棉花产量的影响,本研究以当地测土配方施肥磷肥推荐用量($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)为上限,设置了0、50、100、 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 4个磷肥用量处理,分别记为MAP0、MAP50、MAP100和MAP150,每个磷肥用量处理下不设有机肥对照(CK)和有机肥添加处理(OF,有机肥用量为 $4\,500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),每个处理4个重复,共32个小区,小区面积为 $5 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 。有机肥(新疆保利兴农生物有限公司,有机质45%, $\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}>5\%$)于2019年5月8日均匀撒入田中,机器翻耕,深度约25 cm,平整土地。棉花种植模式为膜下滴灌,一膜一

带两行种植,棉花株距 15 cm。棉田磷肥采用磷酸一铵(云南常青树化工有限公司,N 含量 12%, P_2O_5 含量 61%),氮肥采用尿素(新疆鸿基焦化有限责任公司,N 含量 46.2%),施氮量为 $250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以 N 计,尿素与磷酸一铵中氮的总和),钾肥采用农用硫酸钾(新疆新雅泰化工有限公司, K_2O 含量 51%),施用量为 $30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以 K_2O 计),棉花各生育时期灌水量如表 1 所示,其他田间管理和农艺措施均与新疆棉田常规模式保持一致。

表 1 棉田灌水时间及灌水量

Table 1 Irrigation time and amount in cotton field

灌水次数 Irrigation frequency	灌水时间 Irrigation time	灌水量 Irrigation amount/ $(\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2})$
出苗水	2019/05/10	656.25
一水	2019/07/05	578.12
二水	2019/07/16	273.43
三水	2019/07/25	320.31
四水	2019/08/05	554.68
五水	2019/08/15	492.18
六水	2019/08/24	359.37
总计		3 234.35

1.2.2 样品采集和分析

2019 年,在棉花花蕾期(7 月 22 日)、花铃期(8 月 9 日)、吐絮期(9 月 17 日),每小区随机采集棉花 3 株,按根、茎、叶、蕾/铃(壳、絮、籽)分离,在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下杀青 1 h, $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干至恒质量后测定,计算植株生物量。植株样本粉碎后,采用硫酸-双氧水消煮法^[21],钒钼黄比色法^[21]分析植株各部位含磷量。同时,在各小区滴灌带下、种植行间采集 0~5、5~10 cm 和 10~20 cm 土层深度土壤样品,风干后,采用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ 浸提-钼锑抗比色法^[21]测定土壤有效磷含量。

2019 年 10 月 6 日对棉花进行测产,在各试验小区随机设置 1 个面积为 1 m^2 的样方,记录该样方内的棉花株数,并统计每株棉花上的铃数和单铃质量,总产量=总面积×单位面积株数×单株铃数×单铃质量。

1.2.3 计算和统计分析

磷肥利用率=(施磷区作物吸磷量-不施磷区作物吸磷量)/施磷区磷肥用量×100%

磷肥累积利用率=施磷处理的植株吸磷量/施磷量

磷肥农学利用率($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)=(施磷区籽棉的产量-不施磷区籽棉产量)/施磷区磷肥用量

磷肥偏生产力($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)=施磷区籽棉产量/施磷区磷肥用量

同一生育时期内各处理间土壤有效磷含量、植株生物量和含磷量、磷素累积吸收量和产量构成均采用双因素方差分析,多重比较采用 Duncan 法。数据整理所用软件为 Microsoft Office Excel 2010,数据分析软件为 SPSS 20.0,作图软件为 SigmaPlot 12.5。

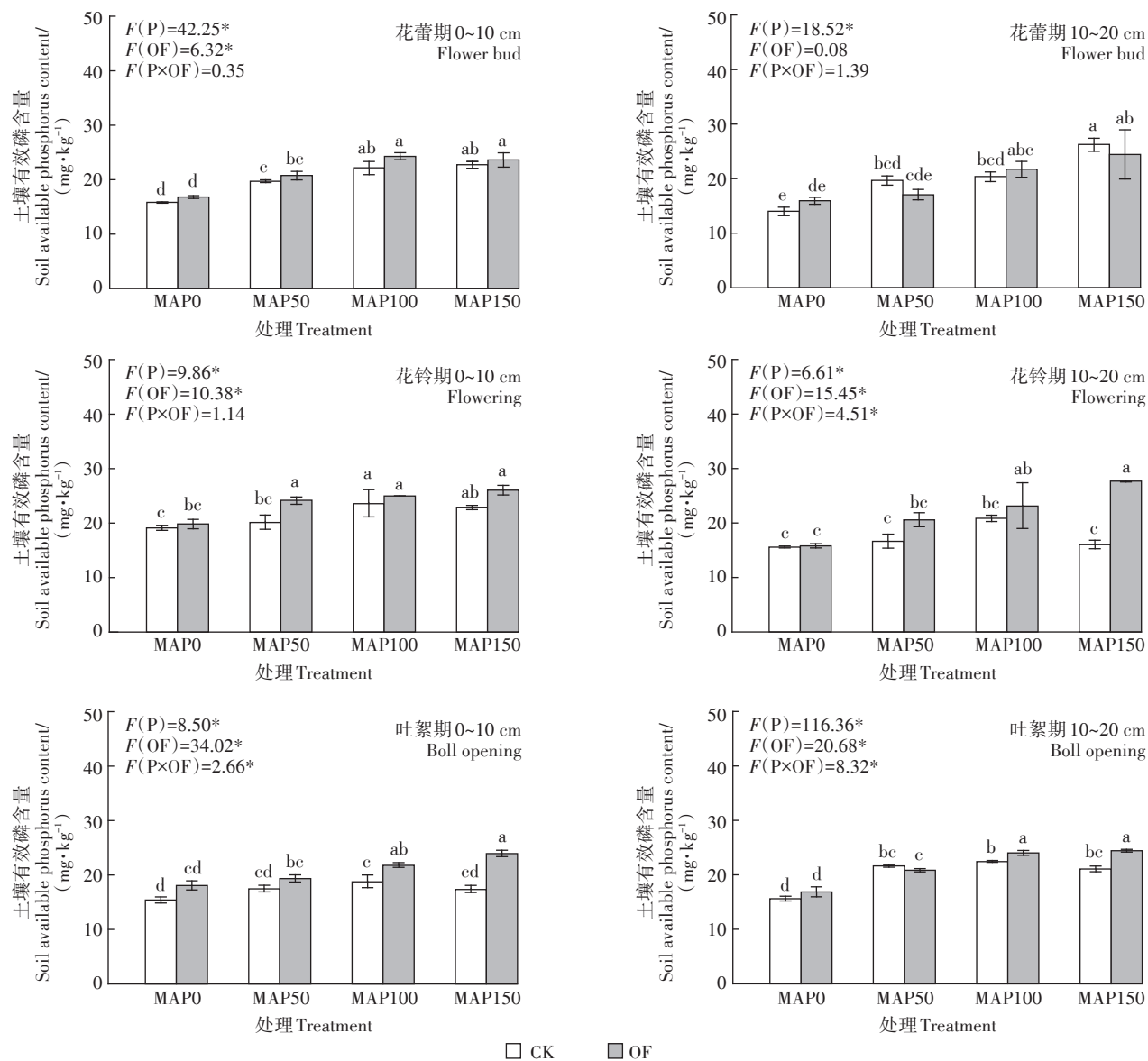
2 结果与分析

2.1 不同磷肥用量下有机肥添加对棉田土壤有效磷的影响

在棉花的整个生育期,土壤有效磷含量总体表现出随施磷量增加而增加的趋势(图 1)。在花蕾期,土壤有效磷表现出随施磷量增加而增加的趋势,有机肥添加对土壤有效磷无显著影响。在花铃期,0~10 cm 土层土壤有效磷表现出随施磷量增加而增加的趋势,在 MAP50 处理,有机肥添加显著增加了土壤有效磷含量;10~20 cm 土层土壤有效磷,在不施有机肥时随施磷量增加表现出先增加后降低趋势,MAP100 处理土壤有效磷含量最高;在施用有机肥时,表现出随施磷量增加而增加趋势,在 MAP150 处理,有机肥添加显著增加了土壤有效磷含量。在吐絮期,土壤有效磷表现出随施磷量增加而先增加后平稳或略有降低的趋势;在 MAP100 和 MAP150 处理,有机肥添加显著提高了土壤有效磷含量。

2.2 不同磷肥用量下有机肥添加对棉花不同生育时期各器官生物量和吸磷量的影响

表 2 为不同处理下棉花各生育时期植株各器官生物量。在花蕾期,根的生物量随磷肥用量的增加呈降低的趋势,有机肥添加时,随磷肥用量的增加根的生物量也增加,在 MAP100 和 MAP150 处理,有机肥添加显著提高了根的生物量;在有机肥添加时,随磷肥用量增加,茎生物量表现出增加趋势,在 MAP100 和 MAP150 处理,有机肥添加显著提高了茎生物量;不同磷肥用量和有机肥添加对叶和蕾的生物量无显著影响。在花铃期,MAP50 和 MAP150 处理中,有机肥添加显著提高了根生物量;在 MAP100 和 MAP150 处理,有机肥添加显著提高了叶生物量;磷肥用量和有机肥添加对茎和蕾生物量无显著影响。在吐絮期,有机肥添加时,随磷肥用量的增加,根、茎、叶、棉絮和籽的生物量呈先增加后降低的趋势,在 MAP100 处理,有机肥添加显著提高了根的生物量;在 MAP100 和 MAP150 处理,有机肥添加显著提高了茎生物量;在不施有机肥时,MAP50 处理棉絮生物量最高,在有机肥添加时,MAP100 处理棉絮生物量最高;MAP50+CK



P表示磷肥用量处理效应,OF表示有机肥添加处理效应,P×OF表示磷肥用量处理和有机肥添加处理的交互作用;

*表示在 $P<0.05$ 水平效应显著;不同小写字母表示同一生育时期内,各处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著。下同

P represents the effect of phosphate fertilizer rate,OF represents the effect of organic fertilizer addition,and P×OF indicates the interaction of phosphate fertilizer rate and organic fertilizer addition;* means the significant effect at $P<0.05$ level;The different lowercase letters indicate significant difference among treatments during the same growth stage at the $P<0.05$ level. The same below

图1 不同磷肥用量下有机肥添加对棉花不同生育时期土壤有效磷含量的影响

Figure 1 Effects of organic fertilizer addition on soil available phosphorus content in cotton growth stages under different amounts of phosphorus fertilization

处理时籽生物量最高。

表3为不同处理下棉花各生育时期植株各器官含磷量。在花蕾期,MAP0+CK处理的根含磷量显著低于其他处理;相比MAP0+CK处理,MAP50+CK、MAP50+OF和MAP100+OF处理的茎含磷量显著升高;叶含磷量在各处理间无显著差异;在MAP50处理,有机肥添加显著提高了蕾的含磷量。在花铃期,MAP0+OF根含磷量显著低于其他处理,其他各处理

间根、茎、叶和铃的含磷量无显著差异。在吐絮期,根、壳和絮的含磷量在各处理间无显著差异;MAP150+CK处理茎的含磷量显著高于MAP0+CK处理;不施磷肥时,有机肥添加显著提高了叶的含磷量。

2.3 不同磷肥用量下有机肥添加对棉花不同生育时期累积吸磷量的影响

随生长时间延长,棉花累积吸磷量呈升高趋势(图2)。在花蕾期,不施有机肥时,不同磷肥用量处

表2 不同磷肥用量下有机肥添加对棉花不同生育时期植株各器官生物量的影响(g·株⁻¹)Table 2 Effects of organic fertilizer addition on the biomass of various organs of cotton plants at different growth stages under different amounts of phosphorus fertilization(g·plant⁻¹)

生育时期 Growth stage	处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	蕾/铃/壳 Bud/Boll/Shell	絮 Fibre	籽 Seed
花蕾期 Flower bud	MAP0+CK	3.62±0.74bc	7.64±1.57d	7.77±1.16a	2.23±2.30a	—	—
	MAP0+OF	3.33±0.03c	7.18±0.52d	10.23±0.10a	2.33±0.12a	—	—
	MAP50+CK	4.50±0.92abc	8.41±1.64cd	8.44±1.57a	2.71±0.04a	—	—
	MAP50+OF	3.56±0.27bc	10.68±0.44bc	11.83±0.34a	2.62±0.42a	—	—
	MAP100+CK	3.97±0.81bc	7.79±0.13d	8.96±0.08a	3.13±3.58a	—	—
	MAP100+OF	4.92±0.55a	12.45±0.15ab	12.32±0.64a	3.16±0.22a	—	—
	MAP150+CK	3.77±0.74bc	7.56±0.07d	9.00±0.84a	2.55±3.63a	—	—
	MAP150+OF	5.81±0.16a	13.62±2.07a	13.13±0.72a	4.03±0.06a	—	—
花铃期 Flowering	MAP0+CK	5.75±0.91b	12.65±0.18a	12.44±0.16b	16.89±0.12a	—	—
	MAP0+OF	6.05±0.44b	12.95±0.89a	11.84±0.50b	15.73±0.88a	—	—
	MAP50+CK	6.10±1.24b	15.14±1.28a	13.35±0.67b	18.11±1.22a	—	—
	MAP50+OF	8.63±0.47a	17.44±1.20a	13.72±0.01b	15.71±3.30a	—	—
	MAP100+CK	7.25±0.74ab	12.46±0.09a	13.40±1.49b	20.31±0.54a	—	—
	MAP100+OF	6.94±0.01ab	16.28±0.01a	19.27±0.57a	19.51±0.65a	—	—
	MAP150+CK	6.10±0.54b	12.84±0.52a	14.31±0.54b	20.73±1.43a	—	—
	MAP150+OF	8.61±0.52a	14.23±0.59a	18.13±0.59a	20.43±1.88a	—	—
吐絮期 Boll opening	MAP0+CK	9.33±0.04bc	19.38±0.13c	14.60±0.16c	18.34±0.50ab	12.79±0.04c	20.30±1.91b
	MAP0+OF	9.12±0.02c	19.55±0.71c	17.12±0.02bc	17.31±0.11ab	15.12±0.29bc	21.08±0.32b
	MAP50+CK	10.85±1.05abc	22.2±1.04bc	21.44±1.02ab	22.16±1.08a	19.69±1.45a	25.65±0.82a
	MAP50+OF	10.90±1.01abc	20.61±2.34c	20.53±3.11abc	22.42±0.99a	16.03±0.95abc	23.93±2.60ab
	MAP100+CK	9.66±0.82bc	21.52±0.52bc	19.61±1.14abc	14.75±0.42b	17.47±0.68ab	23.65±1.50ab
	MAP100+OF	12.16±1.08a	26.89±0.15a	23.59±1.44a	20.51±1.22a	17.57±0.85ab	24.57±1.93ab
	MAP150+CK	10.81±0.52abc	20.88±1.84c	19.61±0.58abc	19.74±0.14ab	18.64±1.52a	22.00±2.02ab
	MAP150+OF	11.39±0.58ab	25.21±1.12ab	20.24±1.60abc	18.95±1.06ab	14.54±1.44bc	24.26±0.81ab

注:同一生育时期内不同小写字母表示各处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著。下同。Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments during the same growth stage at the $P<0.05$ level. The same below.

理的植株吸磷量之间无显著差异,而添加有机肥时,植株吸磷量表现出随施磷量增加而升高的趋势。在花铃期,植株吸磷量表现出随磷肥用量增加而先升高后降低趋势,在MAP0处理,有机肥添加显著提高了植株吸磷量。在吐絮期,不施有机肥时,植株吸磷量随施磷量增加表现出先升高后略有降低的趋势,而在有机肥添加时,随施磷量增加呈先升高后平稳的趋势,在MAP100处理达到最高;有机肥添加显著提高了植株吸磷量。

有机肥添加改变了棉花各器官中磷素累积量占比(图3)。在花蕾期和花铃期,有机肥添加处理的植株营养器官(根、茎和叶)的总吸磷量比例高于未添加有机肥的处理;而在吐絮期,添加有机肥处理植株生殖器官(籽和絮)的总吸磷量比例高于未添加有机肥处理(除MAP100处理外)。

2.4 不同磷肥用量下有机肥添加对棉花籽棉产量、磷肥利用率和棉田磷平衡的影响

籽棉产量受磷肥用量和有机肥添加的影响(表4)。在未添加有机肥时,籽棉产量随磷肥用量增加而升高;但在有机肥添加时,籽棉产量随磷肥用量增加呈先升高后降低的趋势,MAP100+OF处理籽棉产量最高,为5 642.24 kg·hm⁻²。各处理棉田的单铃质量和收获密度无显著差异;而单株铃数随磷肥用量增加表现出先升高后降低的趋势,MAP100处理单株铃数最多,且有机肥添加显著提高了单株铃数。

整体上,磷肥利用率随磷肥用量增加呈先升高后降低的趋势(表5),在MAP100+OF处理最高,达到37.24%;磷肥累积利用率、农学效率和偏生产力随着施磷量增加呈递减趋势,MAP150+OF处理磷肥农学效率和磷肥偏生产力最低,分别为0.92和23.32;添加

表3 不同磷肥用量下有机肥添加对棉花不同生育时期植株各器官含磷量的影响(g·kg⁻¹)

Table 3 Effects of organic fertilizer addition on the phosphorus content of various organs of cotton plants at different growth stages under different amounts of phosphorus fertilization(g·kg⁻¹)

生育时期 Growth stage	处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	蕾/铃/壳 Bud/Boll/Shell	絮 Fibre	籽 Seed
花蕾期 Flower bud	MAP0+CK	1.37±0.21b	1.87±0.08b	3.40±0.22a	7.38±0.25ab	—	—
	MAP0+OF	2.17±0.16a	2.24±0.20ab	3.47±0.09a	7.29±0.08abc	—	—
	MAP50+CK	2.13±0.07a	2.50±0.27a	3.46±0.10a	6.86±0.81c	—	—
	MAP50+OF	2.22±0.14a	2.67±0.20a	3.55±0.33a	7.61±0.12a	—	—
	MAP100+CK	2.17±0.05a	2.34±0.07ab	3.48±0.10a	3.13±3.58c	—	—
	MAP100+OF	2.32±0.17a	2.49±0.25a	3.69±0.26a	6.99±0.16bc	—	—
	MAP150+CK	2.00±0.07a	2.13±0.14ab	3.31±0.08a	7.02±0.59bc	—	—
	MAP150+OF	2.45±0.27a	2.47±0.16ab	3.54±0.15a	7.43±0.16ab	—	—
花铃期 Flowering	MAP0+CK	2.07±0.17a	2.52±0.15a	2.41±0.36a	3.73±0.32a	—	—
	MAP0+OF	1.42±0.15b	3.20±0.25a	2.68±0.27a	3.49±0.04a	—	—
	MAP50+CK	1.90±0.13a	2.61±0.15a	2.89±0.28a	3.68±0.08a	—	—
	MAP50+OF	2.16±0.10a	2.89±0.23a	2.69±0.12a	4.02±0.25a	—	—
	MAP100+CK	2.07±0.03a	3.14±0.28a	2.99±0.11a	3.67±0.24a	—	—
	MAP100+OF	2.05±0.15a	2.78±0.11a	3.07±0.18a	3.90±0.30a	—	—
	MAP150+CK	1.83±0.10a	2.68±0.17a	2.75±0.09a	3.34±0.21a	—	—
	MAP150+OF	1.95±0.10a	2.81±0.26a	2.90±0.07a	4.02±0.46a	—	—
吐絮期 Boll opening	MAP0+CK	1.52±0.17a	1.07±0.14b	1.74±0.14c	2.28±0.16a	1.62±0.18a	11.59±1.42b
	MAP0+OF	1.40±0.10a	1.35±0.03ab	2.20±0.18ab	1.95±0.20a	1.64±0.06a	14.58±1.06b
	MAP50+CK	1.91±0.28a	1.29±0.08ab	1.80±0.11bc	1.95±0.19a	1.66±0.09a	10.93±1.21b
	MAP50+OF	1.81±0.15a	1.24±0.06ab	2.05±0.13abc	2.09±0.16a	1.45±0.03a	13.33±1.52b
	MAP100+CK	1.75±0.09a	1.34±0.09ab	2.19±0.15abc	2.26±0.22a	1.41±0.13a	14.07±1.22b
	MAP100+OF	2.05±0.20a	1.28±0.05ab	1.82±0.05bc	2.39±0.27a	1.49±0.10a	14.2±0.95b
	MAP150+CK	1.80±0.35a	1.42±0.09a	1.92±0.05abc	2.33±0.33a	1.65±0.21a	11.5±0.50b
	MAP150+OF	1.79±0.14a	1.33±0.11ab	2.34±0.22a	1.95±0.23a	1.78±0.17a	18.26±1.71a

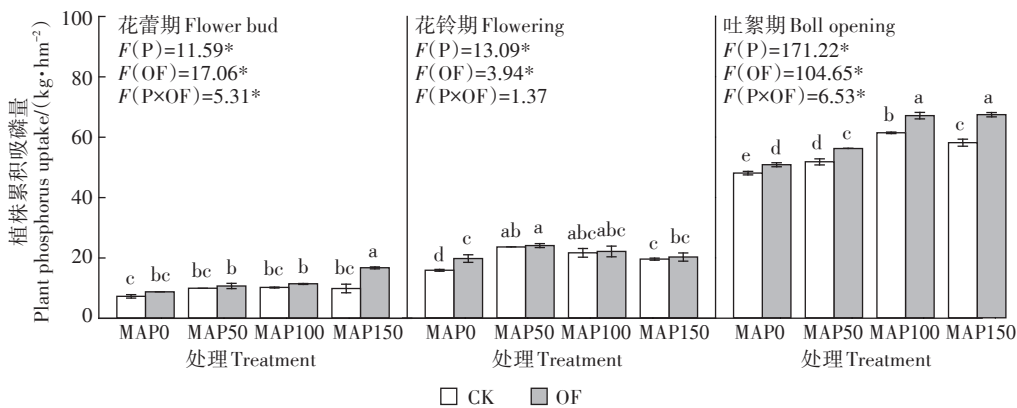


图2 不同磷肥用量下有机肥添加对棉花不同生育时期累积吸磷量的影响

Figure 2 Effects of organic fertilizer addition on plant phosphorus uptake at cotton growth stages under different amounts of phosphorus fertilization

有机肥处理的磷肥累积利用率整体高于未添加有机肥的处理(表5)。随施磷量的增加,土壤磷素盈余量

整体呈现逐渐增大的趋势,在 MAP100+CK 处理,磷素盈余基本达到平衡,为-5.31 kg·hm⁻²(以 P₂O₅ 计,下

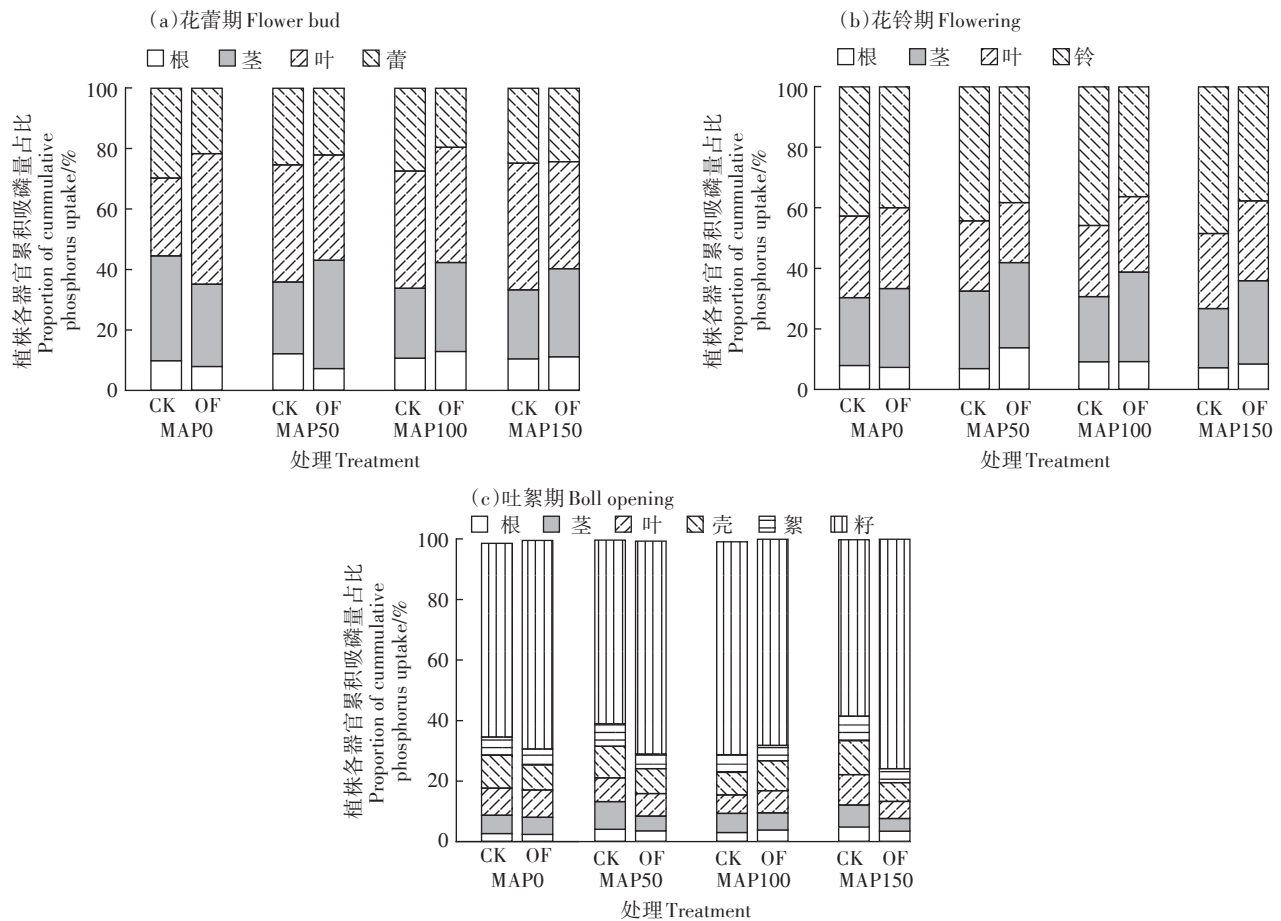


图3 不同磷肥用量下有机肥添加对棉花不同生育时期各器官累积吸磷量占比的影响

Figure 3 Effects of organic fertilizer addition on the proportion of cumulative phosphorus uptake by various organs at cotton growth stages under different amounts of phosphorus fertilization

表4 不同磷肥用量下有机肥添加对籽棉产量构成的影响

Table 4 Effects of organic fertilizer addition on the cotton yield composition under different amounts of phosphorus fertilization

处理 Treatment	单铃质量 Single boll mass/g	单株铃数 Number of bolls per plant	密度 Density/($10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	籽棉产量 Cotton yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
MAP0+CK	5.28±0.03a	6.95±0.02bc	11.75±0.96a	4 107.70±14.74d
MAP0+OF	5.50±0.10a	7.60±0.12b	12.25±0.25a	4 934.76±29.01bc
MAP50+CK	5.58±0.02a	7.20±0.06bc	12.51±0.22a	4 858.08±230.60c
MAP50+OF	6.26±0.18a	6.67±0.07c	13.00±0.58a	5 296.53±13.57ab
MAP100+CK	5.34±0.23a	7.60±0.27b	13.01±0.44a	5 154.20±228.79bc
MAP100+OF	5.33±0.11a	8.65±0.13a	12.50±0.50a	5 642.24±81.28a
MAP150+CK	5.50±0.07a	7.30±0.03b	13.76±0.67a	5 220.72±63.71bc
MAP150+OF	5.48±0.14a	7.40±0.12b	12.00±1.08a	5 312.54±50.32ab

同)(表6)。

3 讨论

3.1 有机肥添加对棉田土壤有效磷的影响

土壤有效磷是表征土壤供磷能力的重要指标^[22]。研究表明,在棉花的整个生育期土壤有效磷含量为

14~26 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,两个土层土壤有效磷含量无显著差异,这与马丹等^[7]的研究结果一致,这可能是由于膜下滴灌栽培技术使磷肥随水施用过程中磷素的扩散方向与土壤中水移动方向一致,施入土壤中的磷素分布较均匀^[23],也可能是由于分次随水滴施磷肥会减少磷肥的固定,在一定程度上提高了土壤有效磷含量。

表5 不同磷肥用量下有机肥添加对棉田磷肥利用率的影响

Table 5 Effects of organic fertilizer addition on phosphorus utilization rate in cotton fields under different amounts of phosphorus fertilization

处理 Treatment	磷肥利用率 REP/%	磷肥累积 利用率 PUE/%	磷肥农学 效率 AE/(kg·kg ⁻¹)	磷肥偏生产力 PPF/(kg· kg ⁻¹)
MAP0+CK	—	—	—	—
MAP0+OF	28.31	517.80	12.25	73.11
MAP50+CK	17.11	237.39	15.01	97.16
MAP50+OF	24.48	257.49	7.24	45.08
MAP100+CK	30.55	140.68	10.46	51.54
MAP100+OF	37.24	153.75	6.84	33.54
MAP150+CK	15.41	88.84	7.42	34.80
MAP150+OF	25.35	103.02	0.92	23.32

添加有机肥处理土壤有效磷含量整体大于未添加有机肥的处理,这与刘星等^[24]、高菊生等^[25]、刘淑英^[26]的研究结果一致。施用有机肥能够提高土壤有效磷含量^[27],这可能是由于有机肥中含有一定的有效磷,能够直接增加土壤有效磷的含量;水溶性磷肥施入土壤后,其中一部分很快转化为难溶性磷形态,很难被作物吸收利用,在施用磷肥的基础上增施有机肥,可以增加有机质含量,而有机质可减少无机磷的固定,并促进无机磷的溶解,促使土壤中有效磷含量增加^[28]。

3.2 有机肥添加对植株累积吸磷量和磷分配的影响

磷素的吸收利用直接影响作物的生长和发育。本研究表明,随施磷量增加,整个生育期植株累积吸磷量表现出增加的趋势,这与姜宗庆等^[29]、刘德平等^[30]的研究结果一致,表明施用磷肥可提高植物磷素吸收。在棉花整个生育过程中整体表现为添加有机肥处理的植株累积含磷量大于未添加有机肥的处理,这可能

是由于添加有机肥可以提高土壤有效磷含量,改善土壤理化性质与微生物群落结构,微生物对棉花根系具有刺激作用,使棉花根系长度、根表面积和根密度增加,从而促进棉花的生长^[29],进而使得棉花能够吸收更多的磷素,最终提高植株累积含磷量。

作物的生长发育和产量构成受作物器官内磷等养分吸收与转运的影响^[31]。本研究中,添加有机肥处理花蕾期和花铃期中生殖器官累积吸磷量占比比未添加有机肥处理低5~7个百分点,到吐絮期,添加有机肥处理的生殖器官累积吸磷量占比比未添加有机肥处理高7.5个百分点,说明添加有机肥的处理较明显地表现出磷素由营养器官向生殖器官转移的趋势,这可能是由于添加有机肥促进花蕾期和花铃期营养器官对磷素的吸收,促进棉花生长发育;吐絮期棉花生长趋于稳定,籽粒中已转移了大量的磷素,使生殖器官磷素占比增大^[32-33]。

3.3 有机肥添加对籽棉产量和磷肥利用率的影响

本研究中,随施磷量的增加,籽棉产量表现出先增加后略有降低的趋势,这与吴克宁等^[34]、陈书强等^[35]、王海江等^[36]的研究结果一致。合理施磷可显著提高作物单铃质量和单株铃数,从而提高产量。添加有机肥处理的产量总体大于未添加有机肥处理的产量,这与PRATAP等^[37]、施河丽等^[38]的研究结果一致。合理施磷一方面满足当季作物对养分的需求,另一方面通过提高土壤有机质含量改善土壤理化性质与微生物群落结构,提高土壤有效磷含量,增加植株累积含磷量,最终提高作物产量。从本研究产量构成来看,籽棉产量的差异主要是由单株铃数受磷肥施用量和有机肥相互影响所致,单株铃数在MAP100+OF处理中最高,可能是由于合理的磷肥用量配施有机肥调

表6 不同磷肥用量下有机肥添加对棉田磷素收支平衡的影响

Table 6 Effects of organic fertilizer addition on the cotton field phosphorus balance under different amounts of phosphorus fertilization

处理 Treatment	磷素输入 Phosphorus input/(kg·hm ⁻²)				磷素输出 Phosphorus output/(kg·hm ⁻²)			磷素盈余 Phosphorus surplus/(kg·hm ⁻²)
	磷肥 P fertilizer	有机肥 Organic fertilizer	棉种 Seed	合计 Total	棉絮 Fibre	棉籽 Seed	合计 Total	
MAP0+CK	0		1.17	1.17	5.58	63.31	68.89	-67.72
MAP0+OF	0	22.5	1.17	23.67	7.07	83.12	90.19	-66.52
MAP50+CK	50		1.17	51.17	9.34	80.32	89.66	-38.49
MAP50+OF	50	22.5	1.17	73.67	8.03	113.78	121.81	-48.14
MAP100+CK	100		1.17	101.17	7.34	99.14	106.48	-5.31
MAP100+OF	100	22.5	1.17	123.67	7.11	99.74	106.85	16.82
MAP150+CK	150		1.17	151.17	9.68	79.66	89.34	61.83
MAP150+OF	150	22.5	1.17	173.67	6.06	89.66	95.72	77.95

注:磷素输入、输出以及盈余均以P₂O₅计。

Note: Phosphorus input, output and surplus in the table is calculated in P₂O₅.

控了棉花营养生长和生殖生长^[39],促进碳水化合物的合成、运输以及棉铃的形成,使单株铃数得到提高,提升光合产物转化为经济产量的能力。

磷肥用量显著影响棉花磷肥利用率和棉田磷素。不施磷肥的MAP0+CK和MAP0+OF处理中磷素盈余分别为-67.72、-66.52 kg·hm⁻²,土壤磷库处于亏缺状态,不利于磷素的可持续管理,长期如此会使土壤肥力匮乏,作物减产。MAP150+CK处理施用常量磷肥,土壤磷素盈余为61.83 kg·hm⁻²,利用率仅为15.41%,与MAP100+CK处理相比,不仅没有提高磷肥的利用率,还造成土壤磷素过量,易被土壤吸附和固定,造成磷肥资源的浪费,增大了土壤磷素的迁移性和环境风险。因此,从培肥地力和棉花产量的角度综合考虑,种植棉花应施用适量的磷肥,MAP100+OF处理中磷肥利用率达到37.24%,其磷素盈余为16.82 kg·hm⁻²,产量为5 642.24 kg·hm⁻²,在保持较高磷肥利用率和产量的同时,可使土壤磷素维持在平衡状态,有利于棉田磷素的可持续管理。

4 结论

(1)棉田土壤有效磷含量表现出随施磷量增加而增加的趋势,添加有机肥的处理土壤有效磷含量整体高于未添加有机肥的处理。

(2)植株累积吸磷量表现出随施磷量增加而增加的趋势,添加有机肥的处理植株累积含磷量整体高于未添加有机肥的处理,且在磷肥用量为150 kg·hm⁻²时较高。籽棉产量随施磷量增加表现出先增加后略有降低的趋势,添加有机肥处理的产量总体高于未添加有机肥的处理,在磷肥用量为100 kg·hm⁻²时最高。

(3)添加有机肥处理的磷肥利用率整体高于未添加有机肥的处理,且在磷肥用量为100 kg·hm⁻²时最高,利用率为37.24%;随施磷量的增加,棉田土壤有效磷盈余量呈增加的趋势,在磷肥用量为100 kg·hm⁻²时配施有机肥棉田磷素收支开始出现盈余。

(4)在综合考虑土壤磷素有效性、棉花磷素吸收和产量、磷肥利用率和棉田磷素收支平衡的基础上,建议新疆棉田磷肥施用量为100 kg·hm⁻²(以P₂O₅计)并配施适量有机肥。

参考文献:

- [1] 原梦, 赵峥艳, 李雪林, 等. 低磷胁迫下不同基因型棉花生理和形态的响应差异[J]. 种子, 2019, 38(4): 20-23, 30. YUAN M, ZHAO Z Y, LI X L, et al. Physiology and morphological characteristics among different cotton genotypes in response to low phosphorus stress[J]. *Seed*, 2019, 38(4): 20-23, 30.
- [2] 石洪亮, 张巨松, 严青青, 等. 非充分滴灌下施氮量对棉花生长特性、产量及水氮利用率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 129-136. SHI H L, ZHANG J S, YAN Q Q, et al. Effects of different nitrogen fertilizer levels on growth, yield, water and nitrogen use efficiency of cotton under non-sufficient drip irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(4): 129-136.
- [3] 潘丽萍, 李彦, 唐立松. 局部根区灌溉对棉花主要生理生态特性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2982-2986. PAN L P, LI Y, TANG L S. Growth and allocation of photosynthetic produces in cotton under alternative partial root-zone irrigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2982-2986.
- [4] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [5] ZHAO F Y, ZHANG Y Y, DIJKSTRA F A, et al. Effects of amendments on phosphorous status in soils with different phosphorous levels [J]. *Catena*, 2019, 172: 97-103.
- [6] 王琼, 展晓莹, 张淑香, 等. 长期不同施肥处理黑土磷的吸附-解吸特征及对土壤性质的响应[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3866-3877. WANG Q, ZHAN X Y, ZHANG S X, et al. Phosphorus adsorption and desorption characteristics and its response to soil properties of black soil under long-term different fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21): 3866-3877.
- [7] 马丹, 赵库, 沙木和别克·阿咱别克, 等. 磷肥种类和施用方式对新疆棉田磷素利用及棉花产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 86-92. MA D, ZHAO K, SHAMUHEBIEKE A, et al. Effects of phosphate fertilizer types and application methods on phosphorus utilization and cotton yield in Xinjiang cotton field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(2): 86-92.
- [8] KUMAR A. Effect of green manuring on phosphorus transformation from rock phosphate in an acid soil[J]. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 1999, 47(3): 549-551.
- [9] 张梦瑶, 肖靖秀, 汤利, 等. 不同磷水平下小麦蚕豆间作对根际有效磷及磷吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1157-1165. ZHANG M Y, XIAO J X, TANG L, et al. Effects of wheat and faba bean intercropping on the available phosphorus contents in rhizospheric soil and phosphorus uptake by crops under different phosphorus levels[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(7): 1157-1165.
- [10] MACDONALD G K, BENNETT E M, POTTER P A, et al. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands[J]. *PNAS*, 2011, 108(7): 3086-3091.
- [11] 董巨河, 贾登泉. 当前新疆测土配方施肥应当注意的几个问题[J]. 新疆农业科技, 2010(5): 51. DONG J H, JIA D Q. Several problems should be paid attention to in Xinjiang soil testing and formula fertilization[J]. *Xinjiang Agricultural Science and Technology*, 2010(5): 51.
- [12] 秦永林, 田艳花, 樊明寿, 等. 磷肥种类对石灰性土壤马铃薯产量和磷肥利用率的影响[J]. 中国蔬菜, 2019, 363(5): 70-75. QIN Y

- L, TIAN Y H, FAN M S, et al. Effect of different phosphorous fertilizer kinds on potato yield and phosphorus use efficiency in calcareous soil[J]. *China Vegetables*, 2019, 363(5):70-75.
- [13] 王少仁, 夏培桢. 石灰性土壤上三种磷肥不同用量的磷肥利用率及其缓效率[J]. 土壤通报, 2008, 39(6):1363-1368. WANG S R, XIA P Z. The use efficiency and slow-release rate of various P fertilizers with different application rates on calcareous soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(6):1363-1368.
- [14] XIN X, QIN S, ZHANG J, et al. Yield, phosphorus use efficiency and balance response to substituting long-term chemical fertilizer use with organic manure in a wheat-maize system[J]. *Field Crops Research*, 2017, 208(2017):27-33.
- [15] NOACK S R, MCBEATH T M, MCLAUGHLIN M J, et al. Management of crop residues affects the transfer of phosphorus to plant and soil pools: Results from a dual-labelling experiment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 71:31-39.
- [16] 章永松, 林咸永, 罗安程, 等. 有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究 I. 有机肥(物)对土壤不同形态无机磷的活化作用[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2):145-150. ZHANG Y S, LIN X Y, LUO A C, et al. Studies on activation of phosphorus by organic manure in soils and its mechanisms I. Effect of organic manure(matter) on activation to different phosphate in soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(2):145-150.
- [17] 章永松, 林咸永, 罗安程. 有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究 II. 有机肥(物)分解产生的有机酸及其对不同形态磷的活化作用[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2):151-155. ZHANG Y S, LIN X Y, LUO A C. Studies on activation of phosphorus by organic manure in soils and its mechanisms II. Organic acids from decomposition of organic manure(matter) and their effect on activation to different artificial phosphate[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(2):151-155.
- [18] 宋晓, 黄晨晨, 黄绍敏, 等. 不同耕作和有机培肥措施对土壤理化性质及小麦产量的影响[J]. 作物杂志, 2020(3):102-108. SONG X, HUANG C C, HUANG S M, et al. Effects of tillage and organic fertilization modes on soil physical and chemical properties and wheat yield[J]. *Crops*, 2020(3):102-108.
- [19] 陈贵, 赵国华, 张红梅, 等. 长期施用有机肥对水稻产量和氮磷养分利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(1):92-97. CHEN G, ZHAO G H, ZHANG H M, et al. Effect of long-term organic fertilizers application on rice yield, nitrogen and phosphorus use efficiency[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(1):92-97.
- [20] 王琛, 林启美, 赵小蓉, 等. 有机肥替代化肥对土壤养分动态及甜玉米生产的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020, 289(5):132-140. WANG C, LIN Q M, ZHAO X R, et al. Effects of organic fertilizer substitution on soil nutrients dynamics and production of sweet corn[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020, 289(5):132-140.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京:中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing:China Agriculture Press, 2000.
- [22] 王斌. 土壤磷素累积、形态演变及阈值研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2014:25-27. WANG B. Study on the accumulation, form change and threshold values of phosphorus in soils[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014:25-27.
- [23] 王静, 叶壮, 褚贵新. 水磷一体化对磷素有效性及磷肥利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11):1377-1383. WANG J, YE Z, CHU G X. Coupling effects of water and phosphate fertilizer supply on soil P availability and use efficiency[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(11):1377-1383.
- [24] 刘星, 张影, 靳亚果, 等. 有机无机肥配施对强筋小麦产量和植株生理特征及土壤性质的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(6):220-226. LIU X, ZHANG Y, JIN Y G, et al. Effects of organic and inorganic fertilization on grain yield and physiological characteristics of winter wheat with strong gluten wheat and soil properties in north Henan Plain[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(6):220-226.
- [25] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤通报, 2014, 51(2):314-324. GAO J S, HUANG J, DONG C H, et al. Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 51(2):314-324.
- [26] 刘淑英. 有机无机肥配施对灌耕灰钙土碱性磷酸酶和土壤磷素的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3):670-675. LIU S Y. Effects of organic and inorganic fertilization on alkali-phosphatase and soil phosphates in the irrigated farming sierozem[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3):670-675.
- [27] 梁路, 马臣, 张然, 等. 有机无机肥配施提高旱地麦田土壤养分有效性及酶活性[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4):544-554. LIANG L, MA C, ZHANG R, et al. Improvement of soil nutrient availability and enzyme activities in rainfed wheat field by combined application of organic and inorganic fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4):544-554.
- [28] 章爱群, 贺立源, 赵会娥, 等. 有机酸对不同磷源条件下土壤无机磷形态的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(4):474-478. ZHANG A Q, HE L Y, ZHAO H E, et al. Effect of organic acids on inorganic phosphorus transformation in soil with different phosphorus sources[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2009, 15(4):474-478.
- [29] 姜宗庆, 封超年, 黄联联, 等. 施磷量对小麦物质生产及吸磷特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5):628-634. JIANG Z Q, FENG C N, HUANG L L, et al. Effects of phosphorus application on dry matter production and phosphorus uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5):628-634.
- [30] 刘德平, 杨树青, 史海滨, 等. 小麦/玉米套作条件下氮、磷配施的肥料效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(3):262-269. LIU D P, YANG S Q, SHI H B, et al. Effect of combined nitrogen and phosphorus fertilizer application of wheat-maize intercropping system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(3):262-269.
- [31] 王永壮, 陈欣, 史奕, 等. 低分子量有机酸对土壤磷活化及其机制研究进展[J]. 生态学杂志, 2018, 37(7):2189-2198. WANG Y Z, CHEN X, SHI Y, et al. Review on the effects of low-molecular-weight organic acids on soil phosphorus activation and mechanisms

- [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(7):2189-2198.
- [32] 王秀娟, 解占军, 何志刚, 等. 秸秆还田条件下减量施磷对玉米产量、磷素利用率及土壤磷含量的影响[J]. 河南农业科学, 2018, 47(8):39-44. WANG X J, XIE Z J, HE Z G, et al. Effects of reducing phosphorus application on maize yield, phosphorus use efficiency and soil phosphorus content under straw returning condition[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2018, 47(8):39-44.
- [33] 吕桂荣, 程亮, 曲杰, 等. 减量施肥对膜下滴灌花生生产量与肥料利用率的影响[J]. 山东农业科学, 2018, 50(9):94-96. LÜ G R, CHENG L, QU J, et al. Effects of reduced fertilization on peanut yield and fertilizer utilization rate under mulched drip irrigation[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2018, 50(9):94-96.
- [34] 吴克宁, 赵彦锋, 吕巧灵, 等. 潮土区灌浆水和施磷对冬小麦光合作用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4):428-434. WU K N, ZHAO Y F, LÜ Q L, et al. Effect of irrigation during grain filling stage and applying phosphate on the photosynthetic efficiency and yield of winter wheat in the fluvo-aquic soil area[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4):428-434.
- [35] 陈书强, 许海涛, 段翠平. 施磷量对玉米生长发育、产量构成因子及品质的影响[J]. 河北农业科学, 2011, 15(2):62-64, 95. CHEN S Q, XU H T, DUAN C P. Effects of phosphorus application amount on growth and development, yield components and quality of maize[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2011, 15(2):62-64, 95.
- [36] 王海江, 崔静, 侯振安, 等. 膜下滴灌条件下水磷效应对棉花产量和水分利用率的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2010, 28(5):551-554. WANG H J, CUI J, HOU Z A, et al. Effects of water and phosphorus on yield and water use efficiency of cotton with drip irrigation under mulch[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2010, 28(5):551-554.
- [37] PRATAP B, AMARESH K N, MOHAMMAD S, et al. Effects of 42-year long-term fertilizer management on soil phosphorus availability, fractionation, adsorption-desorption isotherm and plant uptake in flooded tropical rice[J]. *The Crop Journal*, 2015, 3(5):387-395.
- [38] 施河丽, 向必坤, 彭五星, 等. 有机无机肥料配施对植烟土壤养分及细菌群落结构的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, 282(4):58-66. SHI H L, XIANG B K, PENG W X, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on flue-cured tobacco soil nutrients and bacterial community structure[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019, 282(4):58-66.
- [39] 于小晶, 田晓飞, 张民, 等. 控释氮肥和控释钾肥对棉花产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3):313-321. YU X J, TIAN X F, ZHANG M, et al. Effects of controlled-release nitrogen and potassium fertilizer on cotton yield fiber quality and soil fertility[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(3):313-321.

