



# 农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊  
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>

### 磷肥有机替代、秸秆还田对棉花养分吸收和磷肥利用效率的影响

黄伟, 王西和, 贾宏涛, 杨金钰, 屈小慧, 刘盈锐, 刘晓菊

引用本文:

黄伟, 王西和, 贾宏涛, 杨金钰, 屈小慧, 刘盈锐, 刘晓菊. 磷肥有机替代、秸秆还田对棉花养分吸收和磷肥利用效率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 333–343.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0351>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 潮土区菜田土壤肥力现状评价

王倩姿, 王书聪, 张书贵, 张静芝, 孙志梅, 马文奇, 薛澄

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 645–653 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0233>

#### 三种纳米材料对水稻幼苗生长及根际土壤肥力的影响

尹勇, 刘灵

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 736–743 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0259>

#### 油菜绿肥翻压还田对新疆盐碱土壤的改良效果研究

刘慧, 李子玉, 白志贵, 刘建国

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 914–923 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0566>

#### 聚天门冬氨酸尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响

王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 隋世江, 叶鑫, 牛世伟

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 96–103 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0072>

#### 有机物料还田和减施氮肥对麦-玉周年农田碳氮水足迹及经济效益的影响

李春喜, 刘晴, 邵云, 李斯斯, 李晓波, 翁正鹏

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 527–536 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0150>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄伟, 王西和, 贾宏涛, 等. 磷肥有机替代、秸秆还田对棉花养分吸收和磷肥利用效率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 333–343.

HUANG W, WANG X H, JIA H T, et al. Effects of the organic replacement of phosphorus fertilizer and straw returned to fields on the nutrient absorption and phosphorus fertilizer utilization efficiency of cotton[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(2): 333–343.



开放科学 OSID

## 磷肥有机替代、秸秆还田对棉花养分吸收和磷肥利用效率的影响

黄伟<sup>1,2</sup>, 王西和<sup>1\*</sup>, 贾宏涛<sup>2</sup>, 杨金钰<sup>1</sup>, 屈小慧<sup>1</sup>, 刘盈锐<sup>1</sup>, 刘晓菊<sup>1</sup>

(1. 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所/国家灰漠土肥力与肥料效益监测站/国家土壤质量新市区观测实验站, 乌鲁木齐 830091; 2. 新疆农业大学资源与环境学院/新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**为探究磷肥有机替代、秸秆还田对棉花养分吸收、磷肥利用效率及棉花产量的影响,本研究基于国家灰漠土肥力与肥料效益监测站5年田间微区棉花连作定位试验,以7种施肥措施为样本,于2022年棉花成熟期开展棉田土壤田间调查研究。结果表明,磷肥有机替代和秸秆还田均能提升棉株氮磷钾养分吸收,各器官氮素平均含量在1.75~40.90 g·kg<sup>-1</sup>之间,磷素平均含量在1.46~11.28 g·kg<sup>-1</sup>之间,钾素平均含量在3.11~25.03 g·kg<sup>-1</sup>之间。综合肥料投入和养分吸收,50%的磷肥有机替代和秸秆还田最能增强棉株吸氮能力和促进干物质积累,50%的磷肥有机替代对棉株吸磷能力最强且最有利于实现棉花节肥增钾的效果。棉株各器官N:P变化范围为1.20~12.01,磷肥有机替代和秸秆还田使茎、叶、蕾/铃/壳的N:P明显降低,棉株生物量、籽棉产量随茎、叶、蕾/铃/壳N:P的降低而增加,本试验棉花生长更倾向于受N、P共同限制。磷肥利用率随有机替代量的增加从12.54%提升到33.04%,土壤磷素盈余量随有机替代量的增加从28.20 kg·hm<sup>-2</sup>降低到19.66 kg·hm<sup>-2</sup>。研究表明,在北疆灰漠土棉区采用50%磷肥有机替代,即施磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 60.0 kg·hm<sup>-2</sup>和配施羊粪9 784.8 kg·hm<sup>-2</sup>,对棉花产量、生物量、养分吸收的综合效应最优,值得推广应用。

**关键词:**棉花;磷素;有机替代;养分吸收;磷肥利用率;氮磷比

中图分类号:S562

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2024)02-0333-11

doi: 10.13254/j.jare.2023.0351

### Effects of the organic replacement of phosphorus fertilizer and straw returned to fields on the nutrient absorption and phosphorus fertilizer utilization efficiency of cotton

HUANG Wei<sup>1,2</sup>, WANG Xihe<sup>1\*</sup>, JIA Hongtao<sup>2</sup>, YANG Jinyu<sup>1</sup>, QU Xiaohui<sup>1</sup>, LIU Yingrui<sup>1</sup>, LIU Xiaoju<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil Fertilizer and Agricultural Water-Saving, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences/National Gray Desert Soil Fertility and Fertilizer Benefit Monitoring Station/National Soil Quality Observation and Experiment Station in Xinshi District, Urumqi 830091, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** The effects of organic replacement of phosphate fertilizer and straw returning to field on nutrient absorption, utilization efficiency of phosphate fertilizer and correlation of cotton yield were studied in order to provide practical guidance for determining the technical service focus of efficient application of phosphate fertilizer in gray desert cotton field in northern Xinjiang and further understanding the

收稿日期:2023-06-03 录用日期:2023-06-27

作者简介:黄伟(1992—),硕士研究生,研究方向为养分资源管理与磷素高效利用。E-mail:871191337@qq.com

\*通信作者:王西和 E-mail:wxh810701@163.com

基金项目:新疆维吾尔自治区创新环境(人才、基地)建设专项-资源共享平台建设(PT2201);新疆维吾尔自治区重大专项(2022A02007);现代农业产业技术体系专项(CARS-15-49);国家自然科学基金项目(U1703232);农业农村部“科研设施专项运行维护费”(G202109-2)

**Project supported:** Innovation Environment(Talent, Base) Construction Special Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region-Resource Sharing Platform Construction(PT2201); Major Science and Technology Projects of Xinjiang Uygur Autonomous Region(2022A02007); Special Fund of Modern Agricultural Industrial Technology System(CARS-15-49); The National Natural Science Foundation of China(U1703232); Special Operation and Maintenance Fund of Scientific Research Facilities of Ministry of Agriculture and Rural Affairs(G202109-2)

current cotton production situation. In this study, based on a 5-year field micro-cropping experiment of cotton in the National Gray Desert Soil Fertility and Fertilizer Benefit Monitoring Station, 7 kinds of fertilization measures were taken as samples, and cotton field soil and field investigation at the cotton maturity stage in 2022 were used to carry out relevant research. The results showed as follows: Both organic replacement of phosphorus fertilizer and straw returning could improve the nitrogen, phosphorus and potassium absorption of cotton plants. The average nitrogen content of each organ ranged from  $1.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  to  $40.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , the average phosphorus content ranged from  $1.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  to  $11.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , and the average potassium content ranged from  $3.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  to  $25.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Combined fertilizer input and nutrient absorption, 50% organic replacement and straw returning to the field can best enhance the nitrogen absorption capacity of cotton plants and promote dry matter accumulation, 50% organic replacement has the strongest phosphorus absorption capacity of cotton plants and is most conducive to realizing the effect of cotton fertilizer saving and potassium increasing. The N:P of each organ of cotton plant ranged from 1.20 to 12.01. Organic replacement of phosphorus fertilizer and straw returning significantly reduced N:P of stem, leaf, bud/boll/shell. Cotton plant biomass and seed cotton yield increased with the decrease of N/P ratio of stem, leaf, bud/boll/shell, and cotton growth was more restricted by N and P. The utilization rate of phosphorus fertilizer increased from 12.54% to 33.04% with the increase of organic replacement amount, and the soil phosphorus surplus decreased from  $28.20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  to  $19.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  with the increase of organic replacement amount. The application of 50% phosphorus fertilizer organic replacement technology in the grey desert cotton area of northern Xinjiang, that is, the application of phosphorus ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )  $60.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and the application of sheep manure  $9\ 784.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , has the best comprehensive effect on cotton yield, biomass and nutrient absorption, and is worthy of promotion and application.

**Keywords:** cotton; phosphorus; organic substitution; nutrient absorption; phosphate fertilizer utilization rate; nitrogen and phosphorus ratio

北疆亚区是在全国率先建设高品质棉花种植带的最佳产区,新疆棉花生产状况直接影响“三农”问题的产业前景<sup>[1]</sup>。土壤中的磷是棉花生长必需的大量矿质元素,更是农业生产中重要的养分限制因子,其利用效率直接决定了农田生产力<sup>[2]</sup>。盲目或过量施磷会导致土壤累积磷急剧增加,降低棉田的肥力自然供给力,合理施磷是改善作物磷素营养和获得高产的重要保障<sup>[3]</sup>。由于石灰性土壤磷素易被固持,其磷肥利用率仅为10%~20%,随施磷量增至一定程度,施磷肥对作物的增产效应下降<sup>[4-5]</sup>。固定于土壤中的磷通过土壤淋溶、侵蚀、地表径流等作用进入水体,降低了利用效率,造成有限磷矿资源的浪费和水体富营养化等生态环境问题<sup>[6]</sup>。研究棉田合理的施肥措施,使用有机肥替代,对指导本地区提升磷肥利用率、降低磷流失风险意义重大。

有机肥含有作物生长发育必需的多种营养元素,施用有机肥可改善土壤磷素状况<sup>[7]</sup>、改善土壤理化性质,提高作物对养分的吸收利用效率,但过量施用会对土壤环境造成一定的负面影响,单一施用则不足以支撑作物整个生长周期的养分需求<sup>[8-9]</sup>,将有机肥按一定比例替代部分化肥能协调作物对养分的需求,营造适宜的微生物环境,有利于培肥土壤、促进作物增产、提高化肥的利用效率<sup>[10]</sup>。有研究表明,在小麦、水稻、玉米等作物种植中进行适度有机肥替代处理,能促进作物磷素吸收,较好地提升磷肥利用效率和作物产量<sup>[11-13]</sup>,有利于作物农艺性状、产值的提升<sup>[14]</sup>,玉米

种植中,连续4年采用秸秆还田配施磷肥减量20%处理,在不影响玉米产量的同时,能降低磷肥用量,提高磷素利用率<sup>[15]</sup>。

以往我国对有机无机配施研究中普遍在当地推荐化肥用量的基础上添加有机肥,而忽略了有机肥自身带入的养分数量,试验周期较短,长期性定位研究较少。而新疆多数棉田属于长期棉花连作模式,对适宜新疆石灰性土壤的有机肥、秸秆还田等不同磷资源替代磷肥后作物养分吸收、磷肥利用效率的研究更为罕见。

因此,本研究在外源肥料投入的有机肥和化肥均为等量氮磷的不同磷肥有机替代比例及秸秆还田下,通过5年田间微区棉花连作定位试验,探讨其对棉花养分吸收、磷肥利用效率、生物量和棉株氮磷化学计量比的影响,以期为北疆灰漠土棉区最大潜力实现磷素养分高效施用目标提供实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地基本概况

试验地位于距乌鲁木齐市向北25 km的安宁渠镇,新疆农业科学研究院国家现代农业科技示范园区国家灰漠土肥力与肥料效益监测基地,地理位置为 $87^{\circ}28'27'' \text{ E}$ 、 $43^{\circ}56'32'' \text{ N}$ 。该区域光热资源丰富,适宜多种农作物生长,地势东高西低、南高北低,坡度1/100~1/70,海拔高度600 m,地下水位在30 m以下,常年降水量310 mm,蒸发量2 570 mm,年平均气温

7.7℃,有效积温1734℃,年均日照时数2594h,无霜期156d。耕层土壤基础养分指标见表1。

1.2 试验设计

本试验始于2018年,在膜下滴灌下设置7个施肥处理。T1:不施肥,T2:不施磷,T3:常规施化肥磷100%,T4:有机肥磷替代25%化肥磷,T5:有机肥磷替代50%化肥磷,T6:化肥磷100%+25%有机肥磷,T7:化肥磷100%+秸秆还田。各处理设置4次重复,采用完全随机区组设计,每个小区面积为2m<sup>2</sup>,小区间用80cm深混凝土板隔开,防止水肥互渗。有机肥和秸秆均在翻耕前撒施,有机肥为羊粪(全氮16.416g·kg<sup>-1</sup>、全磷6.132g·kg<sup>-1</sup>、全钾9.683g·kg<sup>-1</sup>),秸秆还田处理中将上季本田棉花秸秆(全氮22.51g·kg<sup>-1</sup>、全磷3.11g·kg<sup>-1</sup>、全钾20.75g·kg<sup>-1</sup>)粉碎后全量还田,翻耕深度约25cm,平整土地。棉花品种为新陆早53号,采取一膜两带四行种植,地膜覆盖人工点播,株距15cm,播幅内宽、窄行距配置为40、10cm,种植密度24万株·hm<sup>-2</sup>,出苗后保苗株数20万株·hm<sup>-2</sup>。有机替代和秸秆还田的外源肥料投入量(有机肥和化肥)均为等氮磷用量,钾肥只考虑化肥等量,磷肥部分利用有机肥替代,设计不同比例的替代率,氮钾不考虑有机肥替代率。有机无机配施处理中,化肥用量分别按无机化肥处理用量的75%、50%投入量计算,有机无机配施处理中,钾为自然带入,化肥氮投入以实际尿素与磷酸二铵投入之和计算。有机肥、秸秆和磷钾肥在翻地前一次性施入,化肥氮参照当地施肥习惯,按

基肥40%、追肥60%,分别于头水6月初、6月底、7月中、8月初分时期施用。各生育时期棉田灌溉及田间管理措施均与当地常规管理一致。经5年同等施肥棉花连作后,以2022年田间调查为样本,探讨不同磷肥有机替代配比和秸秆还田对棉花养分吸收、干物质积累、磷肥利用效率和棉株氮磷化学计量比的影响。磷肥有机替代长期性施肥试验设计及施肥方案如表2、表3所示。

1.3 样品采集与处理

在棉花成熟期,每个小区随机选取有代表性的棉株5株,按不同植株器官(根、茎、叶、蕾/铃/壳、籽、絮)分开,用蒸馏水清洗,于105℃杀青30min,80℃烘干24h至恒质量后分器官称量干物质量,棉絮自然风干后称质量,将烘干的棉株各器官样品粉碎过筛制样,待测。

2022年10月5日对棉花进行测产,对2m<sup>2</sup>内试验小区的全部棉花株数、总铃数进行调查,各小区内随机摘收50朵棉花(上、中、下部),自然晒干后在室内压花拷种,统计单铃质量、衣分,实收记产。

1.4 测定项目及方法

粉碎过筛的棉株各器官样品经浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮,全氮采用奈氏比色法测定,全磷采用钼锑抗比色法测定,全钾采用火焰光度法测定<sup>[16]</sup>。

1.5 数据处理

4种磷肥利用效率的计算公式<sup>[17-18]</sup>如下:

(1)磷肥利用率(*REP*,%)=(施磷处理作物吸磷

表1 试验地耕层土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of surface soil in the test plot

| 土壤类型<br>Soil type | 土壤pH<br>Soil pH | 全氮<br>Total nitrogen/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全磷<br>Total phosphorus/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全钾<br>Total potassium/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 有机质<br>Organic matter/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 速效氮<br>Available nitrogen/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效磷<br>Olsen-P/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾<br>Olsen-K/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 总盐<br>Total salt/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) |
|-------------------|-----------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 灰漠土               | 8.45            | 0.62                                           | 0.66                                             | 21.30                                           | 10.20                                           | 52.60                                                | 12.70                                     | 138.0                                     | 1.40                                       |

表2 磷肥有机替代长期性施肥试验设计(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 2 Experimental design of phosphorus organic replacement for long-term fertilization(kg·hm<sup>-2</sup>)

| 处理<br>Treatment | 处理设置<br>Processing<br>setup | 有机肥用量(羊粪)<br>Organic manure<br>(sheep manure) | 化肥氮总量<br>Total N | 化肥磷总量<br>Total P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 化肥钾总量<br>Total K <sub>2</sub> O | 尿素<br>Urea(46%) | 磷酸二铵<br>DAP<br>(46%) | 硫酸钾<br>Potassium<br>sulfate(51%) | 磷酸二铵带入N<br>N from DAP<br>(18%) |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------|---------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| T1              | 空白                          | 0                                             | 0                | 0                                            | 0                               | 0               | 0                    | 0                                | 0                              |
| T2              | 对照                          | 0                                             | 195.0            | 0                                            | 30.0                            | 423.9           | 0                    | 58.8                             | 0                              |
| T3              | 常规施肥                        | 0                                             | 195.0            | 120.0                                        | 30.0                            | 376.9           | 260.9                | 58.8                             | 21.6                           |
| T4              | 25%有机替代                     | 4892.4                                        | 114.8            | 90.0                                         | 30.0                            | 214.1           | 195.6                | 58.8                             | 16.2                           |
| T5              | 50%有机替代                     | 9784.8                                        | 34.4             | 60.0                                         | 30.0                            | 51.3            | 130.5                | 58.8                             | 10.8                           |
| T6              | 增施有机肥                       | 4892.4                                        | 114.8            | 120.0                                        | 30.0                            | 202.4           | 260.9                | 58.8                             | 21.6                           |
| T7              | 秸秆还田                        | 0                                             | 195.0            | 120.0                                        | 30.0                            | 376.9           | 260.9                | 58.8                             | 21.6                           |

表3 磷肥有机替代长期性施肥用量

Table 3 Phosphorus organic replacement long-term fertilization dosage

| 处理<br>Treatment | 处理设置<br>Processing<br>setup | 说明<br>Explanation | 翻地时施入<br>Apply when ploughing                          |                                              |                                               |                                                               |                                                                          | 头水6月初<br>Head water early<br>June                                                         | 6月底<br>Around the<br>end of June             | 7月中<br>Around mid-<br>July                             | 8月初<br>Around<br>early August                         |
|-----------------|-----------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|                 |                             |                   | 有机肥<br>Organic<br>fertilizer/<br>(kg·m <sup>-2</sup> ) | 尿素<br>Urea<br>(46%)/<br>(g·m <sup>-2</sup> ) | 磷酸二铵<br>DAP<br>(46%)/<br>(g·m <sup>-2</sup> ) | 硫酸钾<br>Potassium<br>sulfate<br>(51%)/<br>(g·m <sup>-2</sup> ) | 40%基肥尿素<br>40% base<br>fertilizer urea<br>(46%)/<br>(g·m <sup>-2</sup> ) | 5%苗期头水追尿素<br>5% head water and<br>urea in seedling<br>stage(46%)/<br>(g·m <sup>-2</sup> ) | 10%蕾期追<br>urea(46%)/<br>(g·m <sup>-2</sup> ) | 20%花蕾期<br>追尿素20%<br>urea(46%)/<br>(g·m <sup>-2</sup> ) | 25%铃期追<br>尿素25%<br>urea(46%)/<br>(g·m <sup>-2</sup> ) |
| T1              | 空白                          | 不施肥               | 0                                                      | 0                                            | 0                                             | 0                                                             | 0                                                                        | 0                                                                                         | 0                                            | 0                                                      | 0                                                     |
| T2              | 对照                          | 不施磷               | 0                                                      | 42.4                                         | 0                                             | 5.9                                                           | 17.0                                                                     | 2.1                                                                                       | 4.3                                          | 8.5                                                    | 10.6                                                  |
| T3              | 常规施肥                        | 常规施化肥磷100%        | 0                                                      | 37.7                                         | 26.1                                          | 5.9                                                           | 15.1                                                                     | 1.9                                                                                       | 3.8                                          | 7.6                                                    | 9.4                                                   |
| T4              | 25%有机替代                     | 有机肥磷替代25%的化肥磷     | 0.5                                                    | 21.4                                         | 19.6                                          | 5.9                                                           | 8.6                                                                      | 1.1                                                                                       | 2.2                                          | 4.3                                                    | 5.4                                                   |
| T5              | 50%有机替代                     | 有机肥磷替代50%的化肥磷     | 1                                                      | 5.1                                          | 13.1                                          | 5.9                                                           | 2.1                                                                      | 0.3                                                                                       | 0.5                                          | 1.0                                                    | 1.3                                                   |
| T6              | 增施有机肥                       | 化肥磷100%+25%有机肥磷   | 0.5                                                    | 20.3                                         | 26.1                                          | 5.9                                                           | 8.1                                                                      | 1.0                                                                                       | 2.0                                          | 4.1                                                    | 5.1                                                   |
| T7              | 秸秆还田                        | 化肥磷100%+秸秆还田      | 0                                                      | 37.7                                         | 26.1                                          | 5.9                                                           | 15.1                                                                     | 1.9                                                                                       | 3.8                                          | 7.6                                                    | 9.4                                                   |

量=不施磷处理作物吸磷量)/施磷量×100;

(2)磷肥累积利用率( $PUE, \%$ )=施磷处理的植株吸磷量/施磷量×100;

(3)磷肥农学效率( $AE, \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )=(施磷处理籽棉的产量-不施磷处理籽棉产量)/施磷量;

(4)磷肥偏生产力( $PPF, \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )=施磷处理籽棉产量/施磷量;

(5)棉株氮磷化学计量比( $N:P$ )=棉株全氮含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )/棉株全磷含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ );

(6)棉花各部位磷吸收量=植株各部位生物量×植株各部位磷含量。

以上施磷量、磷吸收量、棉花产量单位均为  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

数据均采用 Microsoft Excel 2019 与 SPSS 26.0 (IBM Inc.) 进行统计分析,用 Origin 2021 进行绘图,用最小显著差异法 (Least-Significant Difference, LSD) ( $P<0.05$ ) 进行多重比较确定差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 磷肥有机替代对棉花干物质质量的影响

不同施肥处理对棉花干物质质量的影响不同(表4)。各处理棉花整株干物质质量依次为  $T6>T7>T5>T4>T3>T2>T1$ , 整株平均干物质质量在  $93.72\sim 119.73 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  之间,与  $T1$  处理相比,其他处理增幅为  $12.45\%\sim 24.78\%$ 。与  $T1$  处理相比,各施肥处理均增加了棉花整株及各器官干物质质量,其中各有机替代、增施有机肥和秸秆还田处理均显著增加了棉花整株及茎、叶、蕾/铃/壳、絮、籽的干物质质量,其中  $T5$ 、 $T6$ 、 $T7$  处理的棉花整株及各器官干物质质量处于较高水平。与  $T2$  处理相比,  $T5$ 、 $T6$ 、 $T7$  处理棉花整株及茎、叶、蕾/铃/壳、籽、絮的干物质质量显著增加,而  $T3$ 、 $T4$  处理的棉花整株及各器官干物质质量均无显著差异。整体上,各施用有机肥处理下棉花整株及各器官干物质质量呈增加趋势。 $T5$ 、 $T6$ 、 $T7$  处理间棉花整株及各器官干物质质量差异不

表4 磷肥有机替代对棉花各器官干物质质量的影响( $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ )Table 4 Effects of organic replacement of phosphorus on dry matter mass of various organs of cotton plant ( $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ )

| 处理 Treatment | 根 Root      | 茎 Stem       | 叶 Leaf      | 蕾/铃/壳 Bud/boll/shell | 籽 Seed       | 絮 Fibre      | 整株 Whole plant |
|--------------|-------------|--------------|-------------|----------------------|--------------|--------------|----------------|
| T1           | 8.74±0.25b  | 18.97±0.93c  | 17.48±1.05c | 14.53±0.92c          | 20.04±0.68c  | 13.96±0.77c  | 93.72±4.30d    |
| T2           | 9.23±0.89ab | 21.90±0.88b  | 20.48±0.14b | 17.16±1.15b          | 21.07±0.78bc | 15.56±1.09b  | 105.39±4.63c   |
| T3           | 9.34±0.87ab | 22.13±0.79b  | 20.42±1.27b | 17.44±0.99b          | 21.32±0.72bc | 16.46±0.64ab | 107.10±5.02c   |
| T4           | 9.38±0.96ab | 23.03±1.04ab | 21.27±0.85b | 17.53±0.96b          | 21.59±0.56b  | 16.83±0.99ab | 109.63±5.09bc  |
| T5           | 10.19±1.14a | 23.84±1.47a  | 23.21±0.96a | 18.32±0.96ab         | 23.01±0.58a  | 17.19±0.83a  | 115.76±5.71ab  |
| T6           | 10.53±0.52a | 24.27±1.01a  | 24.19±1.13a | 19.56±1.04a          | 23.43±0.98a  | 17.75±0.77a  | 119.73±5.03a   |
| T7           | 10.25±0.97a | 24.09±0.97a  | 23.42±1.09a | 18.5±1.11ab          | 23.20±1.46a  | 17.48±1.02a  | 116.94±6.36ab  |

注:同列不同小写字母代表各处理间在  $P<0.05$  水平差异显著;数值均以平均值±标准差表示。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences among treatments at  $P<0.05$  level; Values were mean±standard deviation. The same as below.

显著,但处于较高生物量水平,均高于T1、T2、T3处理棉花干物质质量,T2、T3、T4处理的棉花整株及各器官干物质质量无显著差异。综合肥料投入分析,50%的有机替代和秸秆还田均能促进棉株干物质积累。

2.2 磷肥有机替代对棉花养分吸收的影响

2.2.1 磷肥有机替代对棉花各器官含氮量的影响

棉花各器官氮素养分含量随不同施肥处理表现出差异性(表5)。各器官氮素平均含量在1.75~40.90 g·kg<sup>-1</sup>之间,棉株各器官氮素平均含量依次为籽>蕾/铃/壳>叶>茎>根>絮,各施肥处理棉花各器官(除籽外)氮素含量均在T6处理达到最高值。与不施磷的T1、T2处理相比,各施肥处理显著提升了茎、叶含氮量,蕾/铃/壳、絮的含氮量除T1处理外,各处理间均无显著差异。与T3处理相比,T4处理的棉株各器官氮素含量均降低。T5、T7、T6处理间棉株根、茎、叶、蕾/铃/壳、絮氮素含量均无显著差异,但表现出递增趋势。综合肥料投入分析,50%的有机替代和秸秆还田最能增强棉株吸氮能力。

2.2.2 磷肥有机替代对棉花各器官含磷量的影响

不同施肥处理影响了棉花各器官对磷素养分的吸收(表6)。各施肥处理棉花各器官含磷量均显著高于不施肥处理,各处理下棉花各器官磷素平均含量在1.46~11.28 g·kg<sup>-1</sup>之间,表现出籽>叶>蕾/铃/壳>茎>根>絮的趋势。不施磷的T1、T2处理棉花茎、叶、

籽、絮磷含量均处于较低水平,且T1、T2处理间差异不显著。与T3处理相比,T5、T6、T7处理的棉花根、茎、蕾/铃/壳含磷量显著增加,对叶和絮无显著影响,对磷素含量最高的棉籽而言,T5、T6处理棉籽含磷量显著高于T3处理,T3、T4、T7处理间棉籽含磷量差异不显著,但低于T5、T6处理。随着有机替代量的增加,T4、T5处理显著增加了茎、蕾/铃/壳的含磷量。这说明一定比例的磷肥有机替代和秸秆还田均能增强棉株吸磷能力,综合整株磷素吸收分析,50%的有机替代处理棉株吸磷能力最强,且50%的有机替代和增施有机肥处理下棉籽的吸磷能力较秸秆还田处理强。

2.2.3 磷肥有机替代对棉花各器官含钾量的影响

不同施肥处理对棉花茎、叶钾素养分的吸收具有显著影响(表7)。棉株各器官钾素平均含量在3.11~25.03 g·kg<sup>-1</sup>之间,表现出叶>茎>蕾/铃/壳>根>籽>絮的趋势,各施肥处理棉花根、茎、叶、蕾/铃/壳、籽含钾量均显著高于不施肥处理,对棉絮无显著影响。随着有机替代量的增加,棉株含钾量呈递增趋势,其根、茎、叶、蕾/铃/壳的钾素含量均在T6处理下呈现最大值。T5、T6、T7处理的棉花茎、叶钾素含量均显著高于不施磷和常规施化肥处理,且T5、T6、T7处理间差异不显著,T2、T3、T4处理对棉株各器官钾素含量均无显著影响。这说明磷肥有机替代和秸秆还田对棉花钾素的吸收均有一定的促进作用,增施有机肥处理

表5 磷肥有机替代对棉花各器官含氮量的影响(g·kg<sup>-1</sup>)

Table 5 Effects of organic replacement of phosphorus on nitrogen content of cotton organs(g·kg<sup>-1</sup>)

| 处理Treatment | 根Root        | 茎Stem       | 叶Leaf       | 蕾/铃/壳Bud/boll/shell | 籽Seed       | 絮Fibre     |
|-------------|--------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|------------|
| T1          | 10.36±0.73c  | 11.14±0.53b | 29.02±0.61b | 31.98±0.91b         | 31.77±1.54c | 1.75±0.11b |
| T2          | 11.31±0.71bc | 12.03±0.62b | 29.95±0.63b | 33.01±0.48ab        | 35.98±1.49b | 2.06±0.09a |
| T3          | 11.69±0.89ab | 13.75±0.93a | 31.46±0.89a | 33.74±0.79a         | 34.22±1.47b | 2.11±0.12a |
| T4          | 11.47±0.83bc | 13.32±0.95a | 31.12±0.85a | 33.65±0.83a         | 39.51±1.45a | 2.10±0.09a |
| T5          | 12.25±0.77ab | 13.93±0.91a | 31.68±0.72a | 34.01±0.74a         | 40.90±1.49a | 2.14±0.10a |
| T6          | 12.77±0.87a  | 14.46±0.94a | 32.23±0.87a | 34.27±0.92a         | 38.98±1.36a | 2.23±0.12a |
| T7          | 12.52±0.81ab | 14.05±0.92a | 31.88±0.95a | 34.23±0.81a         | 39.57±1.39a | 2.19±0.14a |

表6 磷肥有机替代对棉花各器官含磷量的影响(g·kg<sup>-1</sup>)

Table 6 Effects of organic phosphorus replacement on phosphorus content in cotton organs(g·kg<sup>-1</sup>)

| 处理Treatment | 根Root      | 茎Stem      | 叶Leaf      | 蕾/铃/壳Bud/boll/shell | 籽Seed        | 絮Fibre     |
|-------------|------------|------------|------------|---------------------|--------------|------------|
| T1          | 1.74±0.06c | 1.89±0.06c | 2.82±0.11b | 2.73±0.06c          | 10.12±0.11c  | 1.46±0.07b |
| T2          | 1.94±0.08b | 1.92±0.10c | 2.86±0.10b | 2.75±0.09bc         | 10.12±0.10c  | 1.51±0.05b |
| T3          | 1.95±0.11b | 2.16±0.13b | 3.12±0.11a | 2.89±0.11b          | 11.06±0.13b  | 1.75±0.11a |
| T4          | 2.08±0.11a | 2.25±0.14b | 3.17±0.09a | 2.89±0.06b          | 11.12±0.10ab | 1.74±0.10a |
| T5          | 2.11±0.08a | 2.50±0.09a | 3.18±0.10a | 3.09±0.09a          | 11.28±0.11a  | 1.77±0.08a |
| T6          | 2.12±0.07a | 2.55±0.12a | 3.23±0.08a | 3.15±0.11a          | 11.25±0.11a  | 1.81±0.06a |
| T7          | 2.14±0.09a | 2.52±0.11a | 3.20±0.06a | 3.11±0.08a          | 11.23±0.12ab | 1.78±0.07a |

表7 磷肥有机替代对棉花各器官含钾量的影响( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )Table 7 Effect of organic replacement of phosphorus on potassium content in cotton organs( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 处理 Treatment | 根 Root      | 茎 Stem      | 叶 Leaf      | 蕾/铃/壳 Bud/boll/shell | 籽 Seed      | 絮 Fibre    |
|--------------|-------------|-------------|-------------|----------------------|-------------|------------|
| T1           | 17.65±0.67b | 19.53±0.71c | 19.20±0.71c | 18.36±0.47b          | 15.15±0.11b | 3.11±0.08a |
| T2           | 18.83±0.79a | 20.75±0.61b | 22.44±0.59b | 19.51±0.78a          | 15.48±0.09a | 3.14±0.12a |
| T3           | 18.86±0.60a | 20.87±0.76b | 22.62±0.70b | 19.81±0.79a          | 15.49±0.11a | 3.20±0.07a |
| T4           | 18.84±0.72a | 20.60±0.70b | 22.79±0.56b | 19.91±0.98a          | 15.51±0.12a | 3.17±0.05a |
| T5           | 19.22±0.66a | 22.22±0.68a | 22.84±0.53a | 20.06±0.79a          | 15.59±0.12a | 3.24±0.08a |
| T6           | 19.42±0.78a | 22.84±0.65a | 25.03±0.87a | 20.32±0.80a          | 15.54±0.11a | 3.22±0.07a |
| T7           | 19.03±0.65a | 22.20±0.29a | 24.62±0.41a | 20.24±0.68a          | 15.52±0.10a | 3.24±0.09a |

棉花钾素的吸收能力最强,25%的有机替代和不施磷、常规施化肥处理下的棉花吸钾能力相当,综合肥料投入分析,50%的有机替代最有利于实现棉花节肥增钾的效果。

### 2.3 磷肥有机替代对磷肥利用效率和磷平衡的影响

磷肥有机替代显著影响棉花磷肥利用率和棉田磷素平衡(表8)。有机替代、增施有机肥和秸秆还田处理均提高了棉花的磷肥利用率、磷肥累积利用率、磷肥农学效率和磷肥偏生产力,其最高值均出现在T5处理,与T4相比,T5处理棉田磷肥利用效率的四项指标值均提高,T7的棉田磷肥利用率指标值均处于T4和T5之间,且均低于T6处理。这说明有机替代、增施有机肥和秸秆还田在一定程度上均可提升棉田磷肥利用率,棉田磷肥利用率随着有机替代量的增加而提高,50%的有机替代处理最有利于实现棉花产量和磷素利用效率的同步提升,效果优于秸秆还田。

本研究中以磷盈余表征棉田土壤磷平衡,磷盈余以磷素输入、输出差值计算所得。本试验中T1~T6均为秸秆清茬处理,T7为秸秆全量还田处理,因此T1~T6磷素输出源为棉花整株,T7主要磷素输出源为棉絮和棉籽。结果(表9)显示,不施磷的T1、T2处理

磷素盈余量分别为 $-72.68$ 、 $-80.51 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,棉田处在亏磷状况,造成土壤肥力匮乏和棉花减产。其他处理的棉田磷库均处在盈溢状态,其中,T3处理棉田磷素盈余量为 $31.01 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,利用率仅为7.06%。有机替代的T4和T5处理,土壤磷素盈余量相对较低,分别为 $28.20$ 、 $19.66 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,棉田磷素盈余量随着有机替代量的增加而减少。T6和T7处理下土壤磷素盈余量相对较高,由于T7为秸秆还田处理,其相对清茬处理的T3和T6土壤磷素盈余量更高,此状态中的土壤磷素易被吸附、固持,致使磷资源浪费。综上说明50%的有机替代可促进作物对土壤磷素的吸收利用,减少其流失,能最大程度提升磷素利用效率。

### 2.4 磷肥有机替代对棉株氮磷化学计量比的影响

棉花不同器官N:P存在明显差异。结果(图1)显示,棉花各器官N:P变化范围在1.20~12.01之间,蕾/铃/壳最高,其次是叶,棉絮最低。T2处理下的叶、蕾/铃/壳、絮N:P均处于最高水平,其值分别为10.47、12.01、1.36,T3处理下的茎、蕾/铃/壳N:P均显著高于T5、T6和T7处理,其值为6.36、11.69,籽、

表9 磷肥有机替代对棉田磷素平衡的影响( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )Table 9 Effect of organic phosphorus replacement on phosphorus balance in cotton field( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

| 处理 Treatment | 磷素输入 P input    |                        | 磷素输出 P output  |          |         | 磷素盈余 P surplus |
|--------------|-----------------|------------------------|----------------|----------|---------|----------------|
|              | 磷肥 P fertilizer | 有机肥 Organic fertilizer | 整株 Whole plant | 棉絮 Fibre | 棉籽 Seed |                |
| T1           | 0               | 0                      | 72.68          | 4.09     | 40.56   | -72.68         |
| T2           | 0               | 0                      | 80.51          | 4.71     | 42.65   | -80.51         |
| T3           | 120             | 0                      | 88.99          | 5.77     | 47.17   | 31.01          |
| T4           | 90              | 30                     | 91.80          | 5.88     | 48.00   | 28.20          |
| T5           | 60              | 60                     | 100.34         | 6.08     | 51.91   | 19.66          |
| T6           | 120             | 30                     | 103.94         | 6.41     | 52.71   | 46.06          |
| T7           | 120             | 0                      | 101.38         | 6.22     | 52.10   | 61.68          |

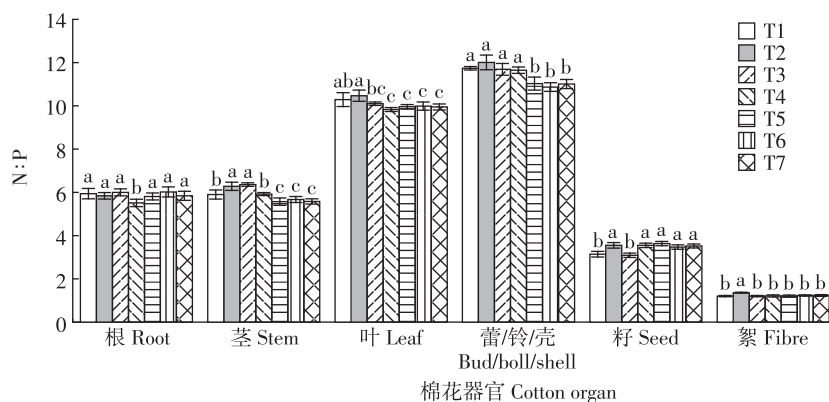
注:以上各指标均以 $\text{P}_2\text{O}_5$ 计。

Note: The above indicators are calculated in  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

表8 磷肥有机替代对棉田磷肥利用效率的影响

Table 8 Effect of organic replacement of phosphorus on utilization rate of phosphorus fertilizer in cotton field

| 处理 Treatment | 磷肥利用率 REP/% | 磷肥累积利用率 PUE/% | 磷肥农学效率 AE/( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 磷肥偏生产力 PFP/( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |
|--------------|-------------|---------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| T1           | —           | —             | —                                            | —                                             |
| T2           | —           | —             | —                                            | —                                             |
| T3           | 7.06        | 74.16         | 1.02                                         | 34.78                                         |
| T4           | 12.54       | 102.00        | 1.62                                         | 46.63                                         |
| T5           | 33.04       | 167.23        | 12.57                                        | 80.09                                         |
| T6           | 19.52       | 86.61         | 8.21                                         | 41.96                                         |
| T7           | 17.39       | 84.48         | 6.50                                         | 40.26                                         |



不同小写字母代表各处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著。  
Different lowercase letters represent significant differences among treatments at the  $P < 0.05$  level.

图1 磷肥有机替代下棉花不同器官N:P

Figure 1 N:P in different organs of cotton under organic phosphorus replacement

絮N:P处于相对最低水平,其值为3.09、1.20。相比于不施磷的T1、T2处理,T5、T6、T7处理显著降低了棉株茎、叶、蕾/铃/壳的N:P。综上,磷肥有机替代和秸秆还田对棉株茎、叶、蕾/铃/壳的N:P起到了显著的降低作用。

### 2.5 棉花生物量、产量和棉花养分指标的相关性分析

由图2可知,棉株生物量和籽棉产量与棉株全氮吸收量、全磷吸收量、籽N:P均呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),相关系数分别为1.00、0.98、0.68和0.83、0.87、0.48;生物量与整株N:P呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),相关系数为0.48,与根、絮N:P呈正相关,但相关性不显著。这表明棉株生物量、籽棉产量随棉株全氮、全磷积累量和棉籽N:P的增大而增加。棉株生物量和籽棉产量与茎、叶、蕾/铃/壳N:P均呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),相关系数分别为-0.51、-0.51、-0.69和-0.62、-0.48、-0.88;籽棉产量与棉絮N:P呈负相关,但相关性不显著,相关系数为-0.14,与根、整株N:P呈正相关,但相关性不显著。这表明棉株生物量、籽棉产量随茎、叶、蕾/铃/壳N:P的降低而增加。

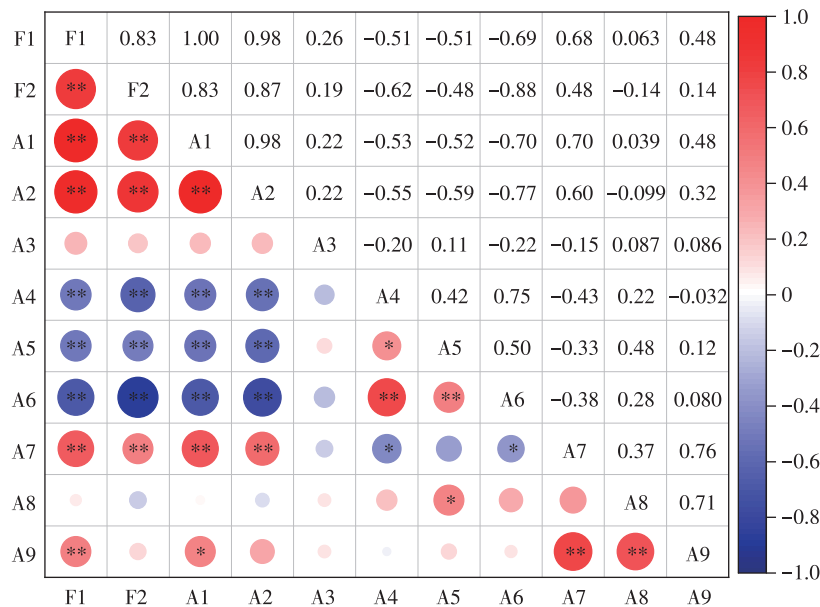
## 3 讨论

### 3.1 磷肥有机替代对棉株氮、磷、钾吸收和干物质量的影响

氮、磷、钾是棉花生长和产量形成所需量最大的必需矿质元素<sup>[19]</sup>,作物生长与不同养分的吸收和分配密切相关<sup>[20]</sup>,养分在营养器官和生殖器官之间的运输能力极大影响着作物养分的利用效率<sup>[21]</sup>。有研究表明<sup>[22]</sup>,施用有机水溶肥显著增加了马铃薯各生育时期不同器官的氮、磷、钾含量。本试验显示,与不施肥相

比,有机替代、增施有机肥和秸秆还田显著增加了棉株的吸氮能力,T5、T6、T7处理下的棉株茎、叶、蕾/铃/壳的含磷量显著增加,50%有机替代处理下棉株吸磷能力最强,T5、T6、T7处理下的棉株茎、叶钾素含量均显著提升,50%有机替代最有利于实现棉花节肥增钾的效果。杨建峰等<sup>[23]</sup>研究发现,植株体内磷浓度与施磷程度密切相关,植株磷浓度随施磷量减少而降低。这与本试验的研究结果一致,即不施肥和不施磷处理的棉花茎、叶、籽、絮及整株磷素平均含量均处于较低水平,说明磷素施用量对棉花磷素的吸收有显著影响。有机替代、增施有机肥和秸秆还田可增强棉株养分吸收能力,其原因可能是有机肥本身含有丰富的有机质和无机养分,配施后可有效改善土壤物理环境,增加土壤微生物活性,促进养分循环与有机物质的分解,提升养分可利用效率,从而增加土壤肥力,促进作物对养分的吸收<sup>[24]</sup>;同时有机肥本身含有一定数量的有机质和速效磷,有机质可减少土壤对无机磷的固定,其在腐解过程中产生了有机酸等物质,能溶解土壤中难溶性的磷,增强土壤中相关微生物和酶的活性并促进无机磷的溶解,最终增加了土壤速效磷含量,进而协调并促进了作物对养分的吸收能力<sup>[25]</sup>。另外,新疆土壤缺氮、少磷、富钾,添加有机肥提升了原本土壤氮磷钾的有效性。本试验发现,生殖器官的氮、磷、钾积累量最高的处理其产量并非最高,这说明提高收获期生殖器官干物质积累是提高棉花产量的必要条件,但并非充分条件,这可能是由于新疆本地气温下降快,纤维和棉铃发育受阻,即使青铃较多,且受贪青迟熟影响,仍不能高效形成有效产量<sup>[26]</sup>。

生物量积累以养分吸收为前提,表征作物对养分



F1:生物量,F2:籽棉产量,A1:棉株全氮吸收量,A2:棉株全磷吸收量,A3:根N:P,A4:茎N:P,A5:叶N:P,A6:蕾/铃/壳N:P,A7:籽N:P,A8:絮N:P,A9:整株N:P。\*、\*\*分别表示指标间的相关性达显著( $P<0.05$ )、极显著( $P<0.01$ )水平。  
F1:biomass,F2:seed cotton yield,A1:total nitrogen uptake of cotton plant,A2:total phosphorus uptake of cotton plant,A3:root N:P,A4:stem N:P,A5:leaf N:P,A6:bud/boll/shell N:P,A7:seed N:P,A8:floc N:P,A9:whole plant N:P。\* and \*\* indicate that the correlation among indicators is significant( $P<0.05$ ) and extremely significant( $P<0.01$ ) respectively.

图2 棉花生物量、产量和棉花养分指标的相关性分析

Figure 2 Correlation analysis of cotton biomass, yield and cotton nutrient indexes

的有效吸收能力,棉花产量高低、品质优劣与干物质积累密切相关<sup>[27]</sup>。有机无机肥配施既能提高作物产量,又能促进其干物质累积,进而提升养分的吸收量,提高肥料利用效率<sup>[28]</sup>。有研究表明<sup>[29-30]</sup>,在一定范围内施用生物有机肥,能增加棉花生长后期干物质及养分积累量,进而提高产量。本试验磷肥有机替代处理对棉花整株和各器官中干物质及氮、磷、钾的积累效果较优,T5、T6、T7处理的棉花整株及各器官干物质质量处于较高水平,综合肥料投入分析,50%的有机替代处理,即施磷( $P_2O_5$ ) $60.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和配施羊粪 $9\ 784.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,能促进棉株干物质积累,从而为产量形成提供保障。

### 3.2 磷肥有机替代对磷肥利用及磷平衡的影响

肥料利用率能直观反映作物对土壤养分的当季利用效应<sup>[31]</sup>。本试验显示,有机替代、增施有机肥和秸秆还田处理均提高了棉田磷肥利用效率的四项指标(表8)。结合土壤养分状况,棉田中施入有机肥或秸秆还田,可提升土壤有效磷含量,促进棉花磷素吸收和干物质积累,T5、T6、T7处理显著增加了籽棉和皮棉产量,与常规施肥、不施磷处理相比,其分别显著增加了棉花根、茎、蕾/铃/壳含磷量和整株及茎、叶、蕾/铃/壳、籽、絮的干物质质量,进而提高了磷肥的利用

率,合理的磷肥用量配施有机肥调控了棉花营养生长和生殖生长,促进碳水化合物的合成、运输及产量形成,提升了光合产物转化为经济产量的能力<sup>[32]</sup>。上述结果表明,适度的有机替代和秸秆还田通过提升棉田有效磷水平来促进棉花生长,从而提高生物量、吸磷量和产量,最大程度实现棉田磷肥高效利用。

从棉田土壤磷平衡来看,本研究中有有机替代和秸秆还田的外源肥料投入量(有机肥和化肥)均为等氮磷用量,在棉花连作条件下,不施磷的T1、T2处理土壤磷库处于消耗和亏缺状态,不利于磷素的可持续管理。其他处理的磷素均处于盈余状态,结合磷肥利用率、培肥地力和产量因素认为,北疆灰漠土棉田中应适量施用化学磷肥,50%有机替代,即施磷( $P_2O_5$ ) $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和配施羊粪 $9\ 784.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,磷肥利用率可达33.04%,此时棉田磷素盈余为 $19.66\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,籽棉产量为 $4\ 805\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,说明该有机替代比例可在保持较高磷肥利用率和产量的同时促进棉田磷平衡。

### 3.3 磷肥有机替代对植株氮磷化学计量比的影响

植物器官N、P化学计量特征受功能分化和组织结构的影响,能反映资源分配模式和生长策略<sup>[33]</sup>,植株不同器官N:P的变化能表征N和P在植物体内的迁移转化过程<sup>[34]</sup>。有研究显示<sup>[35]</sup>,小白菜生物量与植株

全氮积累量呈极显著负相关,与植株全磷积累量呈极显著正相关,与植株N:P呈极显著负相关。塔里木河上游不同年限棉花连作试验显示,棉花各器官中,根部N、P含量均处于最低值,各器官中氮素平均含量为 $1.97\sim 38.07\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,磷素平均含量为 $0.39\sim 14.41\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,N:P为 $5.45\sim 11.37$ ,综合土壤养分、环境等状况分析,当地棉花更倾向于受N、P共同限制<sup>[36]</sup>,这与本研究的土壤养分和棉花生长状况类似。本试验结果表明,磷肥有机替代和秸秆还田显著降低棉株茎、叶、蕾/铃/壳N:P,棉株生物量和籽棉产量与棉株全氮积累量、全磷积累量、棉籽N:P均呈极显著正相关,而与茎、叶、蕾/铃/壳N:P均呈极显著负相关。汪苏洁等<sup>[37]</sup>的研究表明,有机肥替代部分化肥与单施化肥相比降低了棉株根、茎、叶、生殖器官及整株的N:P,生物量与植株全氮、全磷积累量呈极显著正相关,而与根、茎、叶、生殖器官及整株N:P呈负相关,这与本研究相关性趋势一致。Güsewell等<sup>[38]</sup>的研究表明,叶的N:P最能体现作物生长的养分限制类型。李红林<sup>[39]</sup>的试验得出,N、P限制棉花最大生长速率对应的叶片N:P约为13,即棉花限制性营养元素临界值为13。叶N:P<13时,棉花生长易受N限制;N:P>13时,棉花生长易受P限制;N:P=13时,棉花生长受N、P共同限制。严正兵等<sup>[40]</sup>研究发现植物与土壤间养分元素含量存在显著的相关性,表明该养分元素可能抑制植物生长。本试验中棉花各器官N:P变化范围在 $1.20\sim 12.01$ 之间,棉花叶N:P在 $9.83\sim 10.47$ 之间(图1),结合本地土壤养分状况和环境因素综合分析,得出本试验棉花生长更倾向于受N、P共同限制,这与新疆石灰性土壤缺氮少磷现象相一致。总体来看,棉株茎、叶、蕾/铃/壳的N:P越高越限制棉花产量,在棉花种植中应合理施用氮、磷肥,促进棉花养分吸收。

## 4 结论

(1)本试验条件下,连续5年应用磷肥有机替代和秸秆还田,能促进棉株氮、磷、钾养分吸收并增加干物质积累,50%的磷肥有机替代对棉花产量、生物量、养分吸收的综合效应最优。

(2)棉田磷肥利用率随着有机替代量的增加而提高,土壤磷素盈余量随着有机替代量的增加而减少。在北疆灰漠土棉区应适量施用磷肥,采用50%的磷肥有机替代,即施磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和配施羊粪 $9\,784.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,磷肥利用率可达33.04%,其磷素盈余为 $19.66\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,籽棉产量可达 $4\,805\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

磷肥有机替代能提升土壤磷素可持续性治理水平,具有磷肥减量和促使土壤磷平衡的双重作用,有利于最大程度实现棉田磷素高效利用和产量协同提升,效果优于秸秆还田。

## 参考文献:

- [1] 毛树春,程思贤,赵富强,等. 2019—2021年西北内陆棉区棉花生产表现成本、产值和收益监测报告[J]. 中国棉花, 2022, 49(12): 4-16. MAO S C, CHENG S X, ZHAO F Q, et al. Monitoring report on apparent cost, output value and revenue of cotton production in northwest inland cotton growing area from 2019 to 2021[J]. *China Cotton*, 2022, 49(12): 4-16.
- [2] 吴璐璐,张水清,黄绍敏,等. 长期定位施肥对潮土磷素形态和有效性的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 379-386. WU L L, ZHANG S Q, HUANG S M, et al. Effect of long-term fertilization on phosphorus fraction and availability in fluvo-aquic soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(2): 379-386.
- [3] 陈家杰. 长期施磷对新疆农田磷素肥力演变、土壤磷的转化及磷肥肥效的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2016. CHEN J J. The long-term effects of phosphorus application on Xinjiang phosphorus evolution, soil phosphorus transformation and fertilizer efficiency[D]. Shihezi: Shihezi University, 2016.
- [4] 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(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(5): 70-75.
- [5] RAMAEKERS L, REMANS R, RAO I M, et al. Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants[J]. *Field Crops Research*, 2010, 117(2/3): 169-176.
- [6] 张微微. 长期不同施肥下潮土有效磷对磷盈亏的响应关系及差异机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. ZHANG W W. The difference and mechanism of the relation between soil Olsen-P and P budget of fluvo-aquic soil under long-term fertilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [7] 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: 27-33.
- [8] 宁川川,王建武,蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 175-181. NING C C, WANG J W, CAI K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: a review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1): 175-181.
- [9] 李锐,陶瑞,王丹,等. 减氮配施有机肥对滴灌棉田土壤生物学性状与团聚体特性的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(10): 3297-3304. LI R, TAO R, WANG D, et al. Effect of mineral N fertilizer reduction and organic fertilizer substitution on soil biological properties and aggregate characteristics in drip-irrigated cotton field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(10): 3297-3304.

- [10] 韩晓飞, 高明, 谢德体, 等. 有机无机肥配施对紫色土旱坡地土壤无机磷迁移的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 39-44. HAN X F, GAO M, XIE D T, et al. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on inorganic phosphorus migration characteristics in purple soil sloping field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5): 39-44.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 罗先学, 王振华, 唐浩浩. 有机肥配施化肥对湘西烟区烤烟产质量的影响[J]. 湖南农业科学, 2021, 425(2): 49-52. LUO X X, WANG Z H, TANG H H. Effect of organic fertilizer combined with chemical fertilizer on yield and quality of flue-cured tobacco in Xiangxi tobacco growing area[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2021, 425(2): 49-52.
- [15] 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]. *Henan Agricultural Sciences*, 2018, 47(8): 39-44.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-144. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-144.
- [17] 范秀艳, 杨恒山, 高聚林, 等. 施磷方式对高产春玉米磷素吸收与磷肥利用的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2013, 19(2): 312-320. FAN X Y, YANG H S, GAO J L, et al. Effects of phosphorus fertilization methods on phosphorus absorption and utilization of high yield spring maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 312-320.
- [18] 卜容燕, 任涛, 鲁剑巍, 等. 水稻-油菜轮作条件下磷肥效应研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(6): 1227-1234. BU R Y, REN T, LU J W, et al. Analysis of P fertilizer efficiency under rice-rapeseed rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(6): 1227-1234.
- [19] CHOUDHUR Y I A, HASHMI M S J. Encyclopedia of renewable and sustainable materials[M]. Amsterdam: Elsevier, 2020.
- [20] 崔佩佩, 丁玉川, 焦晓燕, 等. 氮肥对作物的影响研究进展[J]. 山西农业科学, 2017, 45(4): 663-668. CUI P P, DING Y C, JIAO X Y, et al. Research advances on effects of nitrogen fertilizer application on crops[J]. *Shanxi Agricultural Sciences*, 2017, 45(4): 663-668.
- [21] ROCHESTER I J, CONSTABLE G A. Improvements in nutrient uptake and nutrient use-efficiency in cotton cultivars released between 1973 and 2006[J]. *Field Crops Research*, 2015, 173: 14-21.
- [22] 郭斌煜, 刘坤雨. 喷施有机水溶肥对马铃薯生长过程中干物质积累的影响研究[J]. 吉林农业, 2019(8): 50. GUO B Y, LIU K Y. Effects of organic water-soluble fertilizer on dry matter accumulation during potato growth[J]. *Jilin Agriculture*, 2019(8): 50.
- [23] 杨建峰, 贺立源, 左雪冬, 等. 不同pH低磷土壤上水稻磷营养特性研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2009, 15(1): 62-68. YANG J F, HE L Y, ZUO X D, et al. Phosphorous nutritional characteristics of rice in P-deficient soils with different pH values[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 62-68.
- [24] PAN H, CHEN M, FENG H, et al. Organic and inorganic fertilizers respectively drive bacterial and fungal community compositions in a fluvo-aquic soil in northern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 198: 104540.
- [25] 杨峰, 黄山, 崔亮, 等. 玉米/大豆套作下作物叶片氮、磷动态特征及其相关性分析[J]. 植物营养与肥科学报, 2013, 19(4): 781-789. YANG F, HUANG S, CUI L, et al. Dynamic changes and correlations of P and N concentrations in crop leaves under relay intercropping system of maize and soybean[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(4): 781-789.
- [26] 黄梅芳, 付永红, 刘克钊. 鄂北棉区麦后移栽棉贪青晚熟的原因及预防措施[J]. 江西棉花, 2011, 33(4): 48-49. HUANG M F, FU Y H, LIU K Z. Causes and preventive measures of late ripening of transplanting cotton after wheat in northern Hubei[J]. *Jiangxi Cotton*, 2011, 33(4): 48-49.
- [27] 戴婷婷, 盛建东, 陈波浪. 磷肥不同用量对棉花干物质及氮磷钾吸收分配的影响[J]. 棉花学报, 2010, 22(5): 466-470. DAI T T, SHENG J D, CHEN B L. Effect of different phosphorus fertilizer rate on dry matter accumulation and the absorption and distribution of nitrogen, phosphorous, potassium of cotton[J]. *Cotton Journal*, 2010, 22(5): 466-470.
- [28] ADENIYAN O N, OJO A O, AKINBODE O A, et al. Comparative study of different organic manures and NPK fertilizer for improvement of soil chemical properties and dry matter yield of maize in two different soils[J]. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 2011, 2(1): 9-13.
- [29] 田小明, 李俊华, 危常州, 等. 连续3年施用生物有机肥对土壤有机质组分、棉花养分吸收及产量的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2012, 18(5): 1111-1118. TIAN X M, LI J H, WEI C Z, et al. Effects of continuous application of bio-organic fertilizer for three years on soil organic matter fractions, cotton nutrient absorption and yield[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2012, 18(5): 1111-1118.
- [30] 白玲, 李俊华, 褚贵新, 等. 有机无机肥配施对棉花养分吸收及氮素效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 143-148. BAI L, LI J H, CHU G X, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and nitrogen efficiency of cotton in Xinjiang[J]. *Agricultural Research in the Ar-*

- id Areas, 2014, 32(5):143-148.
- [31] 宋世佳. 施肥模式对棉花生长生理特征及肥料利用率的影响[D]. 保定:河北农业大学, 2011. SONG S J. Influences of fertilization models on the growth and physiological characteristics and fertilizer use efficiency in cotton[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2011.
- [32] 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.
- [33] ZHANG J, HE N, LIU C, et al. Allocation strategies for nitrogen and phosphorus in forest plants[J]. *Oikos*, 2018, 127(10):1506-1514.
- [34] 杨有德, 李月芬, 赵兰坡, 等. 不同装土量对玉米植株·根系·籽粒养分浓度及化学计量比的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(22):10456-10460. YANG Y D, LI Y F, ZHAO L P, et al. Effects of different soil amounts on nutrients concentration and stoichiometry of maize plant, root and seed[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(22):10456-10460.
- [35] 陈智伟. 生物质炭和磷肥施用对土壤养分、小白菜生物量和植株养分含量的影响[D]. 福州:福建师范大学, 2018. CHEN Z W. Effects of biochar and phosphate fertilizer application on soil nutrients, biomass and plant nutrient contents of pakchoi[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2018.
- [36] 陈新, 贡璐, 李红林, 等. 塔里木河上游典型绿洲中棉花的生态化学计量特征及其与棉田连作年限的关系[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(9):89-99. CHEN X, GONG L, LI H L, et al. Stoichiometric characteristics of cotton in the oasis of upper reaches of Tarim River and its relationship with continuous cropping years[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(9):89-99.
- [37] 汪苏洁, 贵会平, 董强, 等. 有机肥替代对棉花养分积累、产量及土壤肥力的影响[J]. 棉花学报, 2021, 33(1):54-65. WANG S J, GUI H P, DONG Q, et al. Effects of organic fertilizer substitution on cotton nutrient accumulation, yield and soil fertility[J]. *Cotton Science* 2021, 33(1):54-65.
- [38] GÜSEWELL S. N:P in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *The New Phytologist*, 2004, 164(2):243-266.
- [39] 李红林. N、P添加对绿洲棉花生态化学计量特征、内稳性和生长速率的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2017. LI H L. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry, homeostasis and growth rate of oasis cotton[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2017.
- [40] 严正兵, 金南瑛, 韩廷申, 等. 氮磷施肥对拟南芥叶片碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(6):551-557. YAN Z B, JIN N Y, HAN T S, et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Arabidopsis thaliana*[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(6):551-557.