

## 不同磷水平对土壤化学性质和棉花产量及其构成的影响

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. 不同磷水平对土壤化学性质和棉花产量及其构成的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(2): 378–388.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0495>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响

李春越, 郝亚辉, 薛英龙, 王益, 党廷辉

*农业环境科学学报*. 2020, 39(8): 1783–1791 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0240>

#### 渭北旱地麦田配施有机肥减量施氮的作用效果

张昊青, 于昕阳, 翟丙年, 金忠宇, 马臣, 王朝辉

*农业环境科学学报*. 2017, 36(1): 124–133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0827>

#### 清液肥对滴灌棉田 $\text{NH}_3$ 挥发和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

*农业环境科学学报*. 2020, 39(10): 2354–2362 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>

#### 长期不同施肥对钙质紫色水稻土重金属累积及有效性的影响

刘灿, 秦鱼生, 赵秀兰

*农业环境科学学报*. 2020, 39(7): 1494–1502 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0012>

#### 种植方式对稻田氨挥发及氮磷流失风险的影响

杨振宇, 罗功文, 赵杭, 胡旺, 王艺哲, 张含丰, 张玉平

*农业环境科学学报*. 2021, 40(7): 1529–1537 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1481>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄伟, 王西和, 贾宏涛, 等. 不同磷水平对土壤化学性质和棉花产量及其构成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 378-388.

HUANG W, WANG X H, JIA H T, et al. Gradient phosphorus application affects soil chemical properties and cotton yield and composition [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(2): 378-388.



开放科学 OSID

# 不同磷水平对土壤化学性质和棉花产量及其构成的影响

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:**本研究探讨不同磷水平对北疆灰漠土棉田土壤化学性质和棉花产量及其构成的影响,为确定最佳施磷量和深入了解当前棉田肥力及棉花生产状况提供实践指导。以“国家灰漠土肥力与肥料效益监测站”已进行了5 a的棉田土壤磷素肥力演替特征定位施肥试验为研究对象,本研究对不施肥、不施磷、常规施化肥磷100%、化肥磷减施25%、化肥磷增施25%、化肥磷增施50%处理的土壤化学性质、磷素有效性特征和棉花产量及其构成进行分析。结果表明:随着施磷量的增加,有利于提升土壤养分含量。速效氮、有效磷、速效钾增幅分别在3.0%~16.10%、29.20%~111.77%、70.10%~72.10%之间,各速效养分含量依次与施肥初期相比,年均最高分别增长2.12、1.53、22.85 mg·kg<sup>-1</sup>。全氮、全磷、全钾增幅分别在21.10%~35.10%、1.60%~54.0%、9.30%~10.90%之间,各全量养分含量依次与施肥初期相比,年均最高分别增长0.03、0.06、0.41 g·kg<sup>-1</sup>。施磷150 kg·hm<sup>-2</sup>时,土壤有效磷含量和磷活化能力均显著最强,磷活化系数达2.13%,有效促进了土壤全磷向有效磷的转化。随着施磷量的增加,土壤有机质、有机碳含量均在施磷150 kg·hm<sup>-2</sup>时显著提升,增幅均在11.86%~36.50%之间,有机质年均增长0.33 g·kg<sup>-1</sup>左右,由于受北疆石灰性土壤自然特性和气候条件限制,结合碳氮磷比表明土壤有机质处于缺乏状态。对土壤pH和总盐分别呈下降和提升的趋势,范围分别在7.91~8.05和1.55~1.85 g·kg<sup>-1</sup>之间,但效应均不显著。连续5 a施磷150 kg·hm<sup>-2</sup>,能在确保棉株整个生育时期养分需求的同时节约磷肥用量且对棉花增产效果最佳,籽棉产量可达4 658 kg·hm<sup>-2</sup>,与不施肥、不施磷、常规施化肥磷100%相比,分别显著增产16.83%、15.01%、11.63%。本研究综合土壤养分、肥料投入、棉花产量指标,得出在北疆灰漠土棉田施磷150 kg·hm<sup>-2</sup>较为可行。



收稿日期:2023-06-23 录用日期:2023-09-27

作者简介:黄伟(1992—),男,甘肃酒泉人,硕士研究生,从事养分资源管理与磷素高效利用研究。E-mail:871191337@qq.com

\*通信作者:王西和 E-mail:wXH810701@163.com

基金项目:新疆维吾尔自治区重大专项(2022A02007);现代农业产业技术体系专项资金(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: Major Science and Technology Projects of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2022A02007); Special Fund of Modern Agricultural Industrial Technology System (CARS-15-49); 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)

关键词:棉花;磷梯度;土壤化学性质;碳氮磷比;产量

中图分类号:S562;S153.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)02-0378-11 doi:10.11654/jaes.2023-0495

## Gradient phosphorus application affects soil chemical properties and cotton yield and composition

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 Xincheng 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 different P levels on soil chemical properties and cotton yield and composition were explored in gray desert soil cotton fields in northern Xinjiang to provide practical guidance for determining the best P application amount and understand the current fertility of the cotton fields and cotton production. In this experiment, the P fertility succession characteristics of cotton soil at the “National Gray Desert Soil Fertility and Fertilizer Benefit Monitoring Station” over 5 years was used as the research object. Soil chemical properties, P availability characteristics, and cotton yield and composition were analyzed under conditions of no fertilization, no P application, conventional P application at 100%, P reduction of 25%, P increase of 25%, and P increase of 50%. The results showed that: With the increase in P application, the soil nutrient content was improved. The increases in available N, P, and K ranged from 3.0% to 16.10%, 29.20% to 111.77%, and 70.10% to 72.10%, respectively. Compared with the initial period of fertilization, the annual maximum increases of available nutrients were 2.12, 1.53, and 22.85 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. Total N, P, and K increased by 21.10%–35.10%, 1.60%–54.0% and 9.30%–10.90%, respectively. Compared with the initial period of fertilization, the annual maximum increase of total nutrient content was 0.03, 0.06, and 0.41 g·kg<sup>-1</sup>, respectively. With the application of 150 kg·hm<sup>-2</sup> P, the soil available P content and P activation capacity were the highest, and the P activation coefficient reached 2.13%, which effectively promoted the conversion of total P to available P. With the increase in P application rate, soil organic matter and organic C levels increased significantly when P application was 150 kg·hm<sup>-2</sup>, with an increase rate of 11.86% to 36.50%, and the average annual growth rate of organic matter was approximately 0.33 g·kg<sup>-1</sup>. Owing to the natural characteristics of calcareous soil and climatic conditions in northern Xinjiang, combined with the ratio of C, N, and P, soil organic matter was deficient. Soil pH and total salt decreased and increased in the range of 7.91–8.05 and 1.55–1.85 g·kg<sup>-1</sup>, respectively, but the effects were not significant. Applying 150 kg·hm<sup>-2</sup> P for 5 consecutive years can ensure the nutrient requirements of cotton plants during the entire growth period, deliver savings in the amount of P fertilizer used, and has the best effect on increasing cotton production. The seed cotton yield reached 4 658 kg·hm<sup>-2</sup> and production was significantly increased by 16.83%, 15.01%, and 11.63% compared with that at no fertilizer, no P application, and conventional fertilizer with 100% P, respectively. Based on soil nutrients, fertilizer input, and cotton yield, applying 150 kg·hm<sup>-2</sup> P to cotton field of gray desert soil in northern Xinjiang is feasible.

**Keywords:** cotton; phosphorus gradient; soil chemical property; carbon, nitrogen and phosphorus ratio; yield

新疆石灰性土壤其pH和CaCO<sub>3</sub>含量较高,使之成为我国典型的缺磷土壤之一<sup>[1]</sup>。近30年来,化肥企业迅猛兴起,农田施肥量大幅提高,土壤全磷和有效磷水平也随之提升,由于石灰性土壤对磷素的固持作用较强,施入土壤中的磷肥大部分与Ca<sup>2+</sup>发生反应,至少有70%~90%的磷素被吸附-沉淀,转化成难以被作物吸收利用的难溶性磷酸钙盐在土壤中累积,加上干旱缺水的自然条件导致农田作物对磷肥的利用效率较低<sup>[2-4]</sup>。另外,磷矿是磷素的主要来源,开采近83%的磷用于肥料加工,属有限的自然资源,具有不可代替和不可再生性,合理施磷是延长有限磷矿资源开发年限的前提<sup>[5]</sup>。有研究表明,施磷能增强棉花对

磷的吸收积累并促进棉花增产,当土壤全磷达到一定水平时,植物有效磷将随土壤磷素积累的增幅明显增强<sup>[6]</sup>。当施磷0~75、45~135 kg·hm<sup>-2</sup>,棉花可平均增产9.55%~17.66%、18.17%,有效提升了土壤肥力和棉花产量<sup>[7-8]</sup>。施磷400 kg·hm<sup>-2</sup>时棉田土壤有机质和有效磷含量达最高值,施磷显著增加了各生育期土壤碱解氮含量,施磷150 kg·hm<sup>-2</sup>时,棉田碱解氮含量最高,约增加了39.77%~126.43%,施磷对速效钾无显著影响<sup>[9]</sup>。周宝库等<sup>[10]</sup>对黑土的长期试验表明,相比不施肥,施磷显著提升了土壤有效磷含量,增幅可达6~15倍。尽管磷肥是农田肥料的主要来源,但盲目甚至过量施肥导致土壤肥力受阻,自然供给力下降的事实已

有报道<sup>[11-12]</sup>。新疆磷肥施用量由1979年的 $8.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至2012年的 $95.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,并以7.7%的递增率逐年上升<sup>[2]</sup>,但磷肥利用效率即便加上磷肥后效也不足50%<sup>[13-14]</sup>。合理施磷能够在提高土壤供磷强度的同时降低土壤磷环境污染风险,要实现棉田减磷增效,科学施磷是提升磷肥利用效率、保证棉花产量可持续发展和磷资源长久利用的关键。本研究采用长期性控制氮钾等量的施肥方式,弥补了以往的磷梯度试验中周期短、施肥用量的变量因素欠考虑甚至不可控、验证性不充分、对适宜新疆石灰性土壤的棉花栽培模式研究较少等不足。本研究以5 a的6种磷浓度梯度定位施肥处理为研究对象,探讨其对土壤化学性质、磷素有效性特征和棉花产量及构成的影响,可为北疆灰漠土区棉花高产、磷素养分资源高效利用、土壤肥力体系培育提供理论支撑和实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验基本概况

试验位于距乌鲁木齐市以北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站”,供试土壤类型为灰漠土,地理位置为 $43^{\circ}56'32'' \text{ N}$ , $87^{\circ}28'27'' \text{ E}$ ,区域光热资源丰富,适宜多种农作物生长,其地势东高西低,南高北低,坡度 $1/100 \sim 1/70$ ,海拔高度600 m,地下水位30 m以下。常年降水量310 mm、蒸发量2 570 mm,年平均气温 $7.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,有效积温 $1\ 734 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均日照时数2 594 h,无霜期156 d。试验地耕层土壤基础理化性状为:全氮 $0.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全磷 $0.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全钾 $21.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有机质 $10.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效氮 $52.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效磷 $12.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾 $138.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,总盐 $1.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH 8.45。

### 1.2 试验设计

本试验始于2018年,设置6个施肥处理。T1:不施肥,T2:不施磷,T3:常规施化肥磷100%,P1:化肥磷减施25%(施磷75%),P2:化肥磷增施25%(施磷125%),P3:化肥磷增施50%(施磷150%)。各处理设4次重复,采用完全随机区组设计,每个小区面积为 $2 \text{ m}^2$ ,小区间用80 cm深混凝土隔板区隔,防止水肥互串,翻耕深度约25 cm,平整土地。棉花品种为新陆早53号,采取一膜两带四行棉花栽培模式,地膜覆盖人工点播,株距15 cm,播幅内宽、窄行距配置为40、10 cm,种植密度 $24 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,出苗后保苗株数 $20 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。氮、钾肥等量,设置不同比例的磷浓度梯度,磷钾肥在翻地前一次性施入,化肥氮投入为实物尿素与磷酸二铵投入之和计算,以当地施肥习惯,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模式一致。各处理保持5年相同施肥模式,采集2022年棉田土壤、棉株,结合田间调查,分析不同施磷水平对土壤化学性质、磷素有效性特征和棉花产量及构成的影响。磷梯度长期性施肥试验设计如表1所示。

### 1.3 样品采集及分析

分别于磷梯度试验初期(2018年)和长期棉花连作施肥后(2022年)采集棉花成熟期耕层(0~20 cm)土样,五点取样法,土钻取土混合成一个样,拣除砾石、植物残体等,风干研磨过1.00 mm和0.149 mm尼龙筛后制样待测。

2022年10月5日对棉花进行测产,对 $2 \text{ m}^2$ 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、下部位),自然晒干后在室内压花拷种,统计单铃质量、衣分、实收记产。

表1 磷梯度长期性施肥试验设计

Table 1 Design of long-term fertilization experiment with phosphorus gradient

处理 Treatment	处理设置 Treatment setup	施肥量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )							备注 Remark
		化肥氮总量(N)	化肥磷总量( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	化肥钾总量( $\text{K}_2\text{O}$ )	尿素 Urea(46%)	磷酸二铵 DAP(46%)	硫酸钾 Potassium sulfate(51%)	磷酸二铵带入N DAP brings in N (18%)	
T1	空白	0	0	0	0	0	0	0	不施肥
T2	对照	195	0	30	423.9	0	58.8	0	不施磷
T3	常规施肥	195	120	30	376.9	260.9	58.8	21.6	常规施化肥磷100%
P1	化肥磷减施25%	195	90	30	388.7	195.6	58.8	16.2	化肥磷减施25%(施磷75%)
P2	化肥磷增施25%	195	150	30	365.2	326.1	58.8	27.0	化肥磷增施25%(施磷125%)
P3	化肥磷增施50%	195	180	30	353.5	391.3	58.8	32.4	化肥磷增施50%(施磷150%)

## 1.4 测定项目及方法

土壤全磷采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮,钼锑抗比色法测定<sup>[15]</sup>;土壤有效磷采用 $\text{NaHCO}_3$ 溶液( $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )浸提-钼锑抗比色法测定<sup>[15]</sup>;土壤有机质采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定;土壤pH值用水浸提(水土比为5:1)电位法测定;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定;土壤全钾采用氢氧化钠熔融法测定<sup>[16]</sup>;全氮采用半微量开氏法测定;速效氮采用碱解扩散法测定;盐离子待测液的制备采用去离子水按土水比1:5提取,振荡5 min后过滤。测定方法参照鲁如坤的《土壤农业化学分析方法》<sup>[16]</sup>。

## 1.5 数据处理方法

(1)土壤磷活化系数(Phosphorus activation coefficient, PAC)是土壤中有效磷(Olsen-P)在全磷中的占比,表征土壤磷的活化能力。土壤中全磷和有效磷之间处于相互转化的过程,供作物可吸收利用的磷主要是土壤总磷中的有效磷,PAC作为权衡施磷效果的重要指标,可体现土壤全磷向有效磷转化的难易程度。PAC值越高,则有效磷在全磷中的比例越大,磷素有效性水平也越高。土壤磷活化系数 $\text{PAC}(\%) = \text{Olsen-P}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}) / [\text{全磷}(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}) \times 1000] \times 100$ <sup>[17]</sup>;

(2)棉花总产量=总面积×单位面积株数×单株成铃数×单铃质量;

数据均采用Excel 2019与SPSS 26.0进行统计分析,Origin 2021绘图,用最小差异显著法(least-significant difference, LSD)( $P < 0.05$ )进行多重比较确定差异的显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施磷量对土壤化学性质及磷素有效性特征的影响

#### 2.1.1 不同施磷量对土壤速效养分的影响

棉田速效养分含量随不同施磷量表现出差异性(表2),各处理速效氮平均含量在 $54.4\sim 63.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,增幅在 $3.0\%\sim 16.1\%$ 。P3处理的土壤速效氮提升速度最快,年均增长 $2.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与T1相比,各施磷处理的土壤速效氮含量均显著增加,P2、P3处理的土壤速效氮含量分别显著增长 $14.9\%$ 、 $16.1\%$ ,T2、T3、P1处理间土壤速效氮含量差异不显著,说明施磷有利于氮素养分的转化,随着施磷量的增加土壤速效氮呈递增趋势。

各处理有效磷含量为 $\text{P2} > \text{P3} > \text{T3} > \text{P1} > \text{T2} > \text{T1}$ ,平均含量在 $9.6\sim 20.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,增幅在 $29.2\%\sim$

表2 不同施磷量对土壤速效养分的影响( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Table 2 Effects of different phosphorus application rates on soil available nutrients( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

处理 Treatment	速效氮 Soil available nitrogen	有效磷 Soil available phosphorus	速效钾 Soil available potassium
T1	54.40±0.79c	9.60±1.07d	146.50±1.73b
T2	56.95±0.90b	12.40±1.44c	249.25±1.89a
T3	56.03±0.69b	14.05±1.34c	251.25±1.71a
P1	56.05±0.89b	13.88±1.47c	250.25±2.22a
P2	62.53±1.49a	20.33±1.76a	251.75±3.20a
P3	63.18±0.62a	16.25±1.03b	252.25±2.87a

注:表格中数值为平均值±标准差;同列数字后小写字母不同表示处理间在0.05水平差异显著。下同。

Note: Values in the table are mean ± standard deviation; Different lowercase letters after the same column of numbers indicate significant difference between treatments at 0.05 level. The same below.

111.7%。P2处理下土壤有效磷含量最高为 $20.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其提升速度最快,年均增长 $1.53\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,相比不施磷肥的T1、T2处理分别增长 $111.77\%$ 、 $63.95\%$ 。T2、T3、P1处理的土壤有效磷含量差异不显著,但均显著高于T1处理,P3处理的土壤有效磷含量显著低于P2处理。整体上随着施磷量的增加,土壤有效磷含量呈先增后减的趋势,当化肥磷增施 $25\%$ ,即施磷 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,土壤有效磷含量达到最高值,较T3处理显著提升 $44.7\%$ ,此后土壤有效磷含量随施磷量增加至 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时下降了 $25.11\%$ 。说明施磷 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 对土壤有效磷含量的提升效果最优。

各处理速效钾含量均显著高于T1处理,平均含量在 $146.5\sim 252.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,增幅在 $70.1\%\sim 72.1\%$ 。P3处理下土壤速效钾含量相对最高为 $252.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,年均增长 $22.85\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。除T1处理外,各处理间速效钾含量差异不显著,说明连续5年施钾 $30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 对土壤速效钾的提升效果可达 $70\%$ 左右,但施磷对土壤速效钾的提升无显著影响。

#### 2.1.2 不同施磷量对土壤全量养分的影响

不同施磷量影响了棉田全量养分含量(表3)。随着施磷量的增加,土壤全氮含量呈递增趋势,平均含量在 $0.57\sim 0.77\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,增幅在 $21.10\%\sim 35.10\%$ 。与T1相比,各处理全氮含量均显著提高,但各施肥处理间土壤全氮含量差异不显著,P3处理的土壤全氮含量最高且增长速度最快,年均增长 $0.03\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。说明施磷对土壤全氮含量有一定的影响,土壤全氮含量随施磷量的增加而增加,但差异不显著。

各处理土壤全磷平均含量在 $0.63\sim 0.97\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之

表3 不同施磷量对土壤全量养分的影响(g·kg<sup>-1</sup>)

Table 3 Effects of different phosphorus application rates on total soil nutrients(g·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	全氮 Soil total nitrogen	全磷 Soil total phosphorus	全钾 Soil total potassium
T1	0.57±0.03b	0.63±0.04c	21.03±0.69b
T2	0.71±0.06a	0.64±0.07c	22.99±1.01a
T3	0.69±0.02a	0.87±0.07b	23.03±0.71a
P1	0.70±0.07a	0.82±0.08b	23.27±0.95a
P2	0.73±0.08a	0.96±0.02a	23.11±0.56a
P3	0.77±0.08a	0.97±0.04a	23.32±1.56a

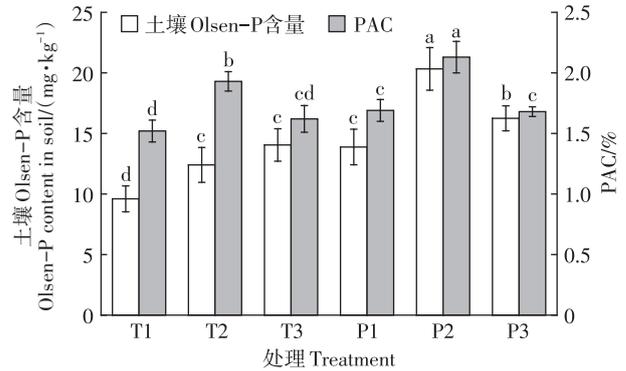
间,增幅在 1.60%~54.0%。与不施磷肥的 T1、T2 处理相比,随着施磷量的增加土壤全磷含量均呈提升趋势,P3 处理土壤全磷含量最高为 0.97 g·kg<sup>-1</sup>,年均增长 0.06 g·kg<sup>-1</sup>。T3、P1、P2、P3 处理的土壤全磷含量相比 T1 处理分别显著增加 38.1%、30.2%、50.0%、54.0%,相比 T2 处理分别显著增加 36.0%、28.1%、50.0%、51.6%,T1、T2 处理间差异不显著,P1、T3 处理间土壤全磷含量相当,P2、P3 处理间土壤全磷含量处于最高值,但差异不显著。整体而言在常规施磷的基础上化肥磷减施 25% 差异不显著,化肥磷增施 25%,即施磷 150 kg·hm<sup>-2</sup> 时对土壤全磷的提升有明显的效果,且此时全磷含量基本达到稳定状态,之后随着施磷量增加至 180 kg·hm<sup>-2</sup> 时土壤全磷含量虽呈现持续提升趋势,但差异不显著。说明此状态下土壤全磷含量的临界值为 0.96 g·kg<sup>-1</sup> 左右,即施磷 150 kg·hm<sup>-2</sup> 时对土壤全磷的提升效果最优。

各处理全钾含量均显著高于 T1 处理,平均含量在 21.03~23.32 g·kg<sup>-1</sup> 之间,增幅在 9.3%~10.9%。P3 处理的土壤全钾含量最高为 23.32 g·kg<sup>-1</sup>,年均增长 0.41 g·kg<sup>-1</sup>。除 T1 处理外,各处理间全钾含量差异不显著,说明连续 5 a 施磷 30 kg·hm<sup>-2</sup> 对土壤全钾的提升效果可达 10%,但施磷对土壤全钾的提升无显著影响。

### 2.1.3 不同施磷量对土壤 Olsen-P 含量和 PAC 的影响

不同施磷量对土壤 Olsen-P 含量和 PAC 的影响规律见图 1,其 PAC 顺序为 P2>T2>P1>P3>T3>T1,在施磷 150 kg·hm<sup>-2</sup> 时土壤 Olsen-P 含量提升效果最显著,磷素活化能力 PAC 也显著最强为 2.13%,T3、P1、P3 处理间土壤 PAC 差异不显著,且随着施磷量的增加土壤 PAC 呈下降趋势,P3 较 P2 处理的土壤 PAC 下降了 0.45 个百分点,说明适度施磷会增强土壤中总磷向有效磷的转化程度,在施磷 150 kg·hm<sup>-2</sup> 土壤中

总磷向有效磷的转化程度较易,过度施磷会限制土壤有效磷的转化,不利于作物吸收利用,造成化肥磷资源浪费和土壤质量下降的风险。



不同小写字母代表各处理间在 P<0.05 水平差异显著。下同。  
Different lowercase letters represent significant differences between treatments at P<0.05 level. The same below.

图1 不同施磷量对土壤 Olsen-P 含量和 PAC 的影响

Figure 1 Effects of different phosphorus application rates on Olsen-P content and PAC in soil

### 2.2 不同施磷量对土壤有机质及 pH、总盐的影响

由图 2 可知,P3、P2 处理的土壤有机质含量显著最高,分别为 11.97、11.69 g·kg<sup>-1</sup>,但 P3、P2 间差异不显著,年均增长 0.33 g·kg<sup>-1</sup> 左右。各处理与 T1 处理相比增长 1.04~3.2 g·kg<sup>-1</sup>,增幅在 11.86%~36.5%,整体上有有机质含量随着施磷量的增加而提升。T1 处理的土壤 pH 值最高为 8.05,范围在 7.91~8.05 之间,相比 T1 处理,各施肥处理的土壤 pH 随着施磷量的增加呈下降趋势,但差异不显著。P3 处理土壤总盐含量最高为 1.85 g·kg<sup>-1</sup>,范围在 1.55~1.85 g·kg<sup>-1</sup> 之间,与 T1 相比,各处理的土壤总盐含量随着施磷量的增加而提

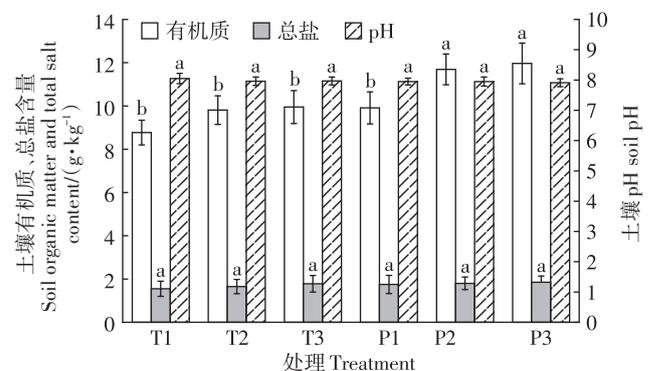


图2 不同施磷量对土壤有机质及 pH、总盐的影响

Figure 2 Effects of different phosphorus application rates on soil organic matter, pH and total salt

升,但整体变化差异不显著,说明在一定时期内施磷对土壤pH和总盐的作用效果均不明显。

### 2.3 不同施磷量对土壤C/N、C/P、N/P的影响及相关性分析

土壤碳、氮、磷比值是判断土壤碳氮磷平衡特征的重要参数,土壤C/N水平可反映土壤中有机质的分解程度和有机质对土壤肥力的贡献潜能。若C/N偏高(质量比>25)则表示当下土壤有机质累积速率大于分解速率,有机质处于积累过程;若C/N在12~16间表明有机质已被土壤微生物很好地分解<sup>[18]</sup>,通常农田耕层土壤C/N处于10~12间,底层土壤的C/N一般低于10<sup>[19]</sup>。试验结果分析(图3),土壤C/N在8.06~9.30之间,整体上各施肥处理C/N比处于较低水平,土壤C/N随着施磷量的增加而增大,P2、P3处理的土壤C/N相对较高,T2、P1、T3处理的土壤C/N相对较低,T1处理的土壤C/N处于中度水平,结合肥料投入分析,在偏施氮钾肥而长期不施磷下较易提升土壤有机质的分解效率,长期不施肥处理对土壤有机质的分解效率有一定的限制作用。本试验C/N表明,整体上试验区土壤有机质处于缺乏状态,由于受“最少养分定律”限制,当下土壤对作物来说即便补充大量氮素

也不是最优选择。

土壤C/P是土壤中磷素矿化能力的标志,其比值高低严重影响着作物的生长发育过程<sup>[20]</sup>。当C/P值较低时,有利于微生物分解有机质过程中对养分的释放,促进土壤有效磷含量的提升,反之,会出现微生物在分解有机质的过程中因磷素缺乏而受到限制,致使微生物与植物形成与磷素的竞争关系,不利于植物生长。试验结果表明,土壤C/P在6.67~8.89之间,整体处于较低水平,相对降低了33%。不施磷肥的T1、T2处理土壤C/P比最高,各磷梯度下土壤C/P相对较低,且土壤C/P随着施磷量的增加呈递增趋势,但差异均不显著,说明施磷促进了土壤有效磷含量的提升进而降低了土壤C/P。

土壤N/P是有机质可分解性的有效指标,其比值可用来判定土壤中养分的限制状况,即明确限制了有机质分解的元素组成<sup>[21]</sup>。试验结果表明,土壤N/P比在0.77~1.10之间,整体变化幅度较小,不施磷肥的T1、T2处理土壤N/P比相对最高,之后随着施磷量的提升而下降,但差异均不显著,P2处理下土壤N/P最低,表明施磷150 kg·hm<sup>-2</sup>时最有利于提升有机质的可分解性效果。

土壤碳氮磷含量、碳氮磷比之间的相关性分析表明(表4),土壤有机碳与全氮、全磷呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与C/N呈正相关,相关性不显著,与C/P、N/P呈负相关,相关性均不显著。全氮与全磷呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与C/N、C/P、N/P均呈负相关,相关性不显著。全磷与C/N呈正相关,相关性不显著,与C/P、N/P呈极显著负相关( $P<0.01$ )。C/N与C/P呈负相关,相关性不显著,与N/P呈极显著负相关( $P<0.01$ ),C/P与N/P呈极显著正相关( $P<0.01$ )。

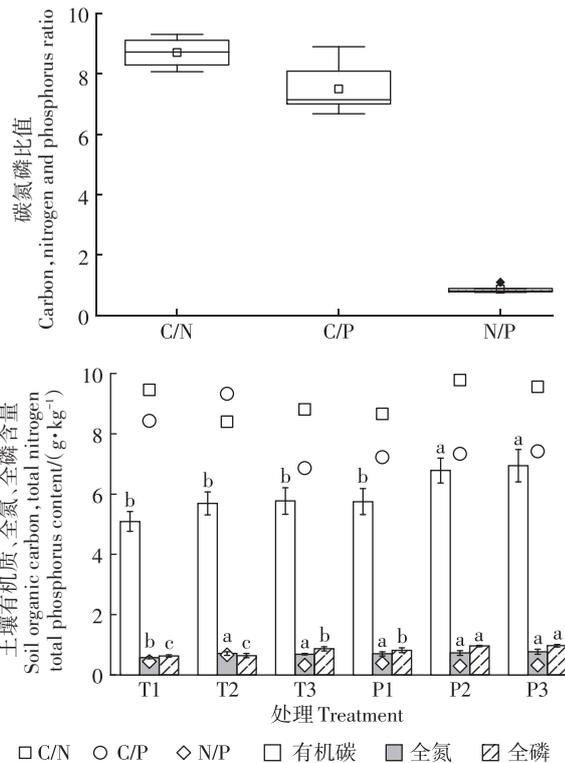


图3 不同施磷量对土壤C/N、C/P、N/P的影响

Figure 3 Effects of different phosphorus application rates on soil C/N, C/P and N/P

表4 土壤碳氮磷含量及化学计量比的相关性

Table 4 Correlation between soil carbon, nitrogen and phosphorus content and stoichiometric ratio

含量及比值 Content and ratio	C	N	P	C/N	C/P	N/P
C	1					
N	0.84**	1				
P	0.84**	0.69**	1			
C/N	0.34	-0.23	0.31	1		
C/P	-0.28	-0.21	-0.75**	-0.13	1	
N/P	-0.39	-0.05	-0.75**	-0.60**	0.87**	1

注:\*、\*\*分别表示差异显著( $P<0.05$ )、差异极显著( $P<0.01$ )。

Note: \* and \*\* indicated significant difference ( $P<0.05$ ) and extremely significant difference ( $P<0.01$ ), respectively.

总体上,土壤有机碳含量在 5.09~6.94 g·kg<sup>-1</sup> 之间,增幅为 11.8%~36.3%,P3 处理的土壤有机碳含量最高,年均增长 0.2 g·kg<sup>-1</sup> 左右。整体而言土壤有机碳含量并不丰富,土壤全氮、全磷含量分别在 0.57~0.77、0.63~0.97 g·kg<sup>-1</sup> 之间,土壤全氮处于欠缺状态。通过土壤 C/N、C/P、N/P 分析,制约土壤养分供应能力的主要因素还是源于有机碳,这与试验区灰漠土本身养分较低和在短时期内通过施肥对土壤有机质、有机碳含量整体提升效果较慢有关。另外,受气候的影响,对土壤碳氮磷化学计量特征的变化最为重要,通常 C/P 和 N/P 较低的原因是温带沙漠地区年均降水率、年均温度等较低,受干旱低温的气候影响致使土壤 P 的淋溶损失小,同时该气候条件下的初级生产力造成土壤中 C、N 含量相对较低,相对于土壤 C、N 来说则土壤 P 的含量相对较高。因此,该试验中灰漠土 C/P 和 N/P 较低的原因与我国新疆属于中温带干旱半干旱荒漠气候类型有关。

#### 2.4 不同施磷量对棉花产量及其构成的影响

施磷量对连续 5 a 磷梯度定位试验中棉花产量及其构成有明显影响(表 5),随着施磷量的增加,棉花总铃数、单株成铃与单铃质量均呈显著提高趋势,进而提升了籽棉和皮棉产量。T1、T2、T3、P1、P2、P3 处理(除自比外)依次与 T1 处理相比,籽棉产量分别提高了 1.58%、4.64%、4.16%、16.81%、19.08%,与 T2 处理相比分别提高了 -1.55%、3.02%、2.55%、15.00%、17.23%,与 T3 处理相比分别提高了 -4.44%、-2.93%、-0.46%、11.63%、13.80%。试验表明,P3、P2 处理的籽棉和皮棉产量均达到显著最高水平,且 P3、P2 间差异不显著。T3、P1 处理的籽棉和皮棉产量差异不显著,但均显著高于不施磷的 T1、T2 处理。各施磷处理的棉花衣分均无显著影响,但显著高于不施磷的 T1、T2 处理。综上,在常规施化肥磷 100% 的基础上减施

25%,对籽棉造成减产效应,但差异不显著,增施 25% 后,籽棉和皮棉产量均显著提高 11.63%、15.7%,相对常规施化肥磷 100% 而言,在化肥磷增施 25% 的条件下,棉花增产幅度最大,随着施磷量持续增施到 50% 时,较增施 25% 而言,增产幅度不显著,皮棉和籽棉产量仅分别提升 2.17% 和 3.19%。综合肥料投入、棉花产量等指标,在密度为 24 万株·hm<sup>-2</sup> 的试验种植模式下,化肥磷增施 25% 即施磷 150 kg·hm<sup>-2</sup>,籽棉产量可达 4 658 kg·hm<sup>-2</sup>,有利于实现棉花产量和经济产能的协同提升,与 T1、T2、T3 相比,分别显著增产 16.83%、15.01%、11.63%。

#### 2.5 土壤化学性质与棉花产量的相关性

对 0~20 cm 土层土壤化学性质与产量的相关性分析表明(图 4),棉花产量与土壤速效氮、有效磷、全氮、全磷、有机质、有机碳均呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与速效钾、全钾呈显著正相关( $P < 0.05$ ),说明在常规施氮钾肥的基础上,随着化肥磷的梯度施加,均提升了土壤全量养分、速效养分、有机质、有机碳含量,进而在促进棉花生产能力方面发挥重要作用。棉花产量与土壤 pH 呈负相关关系,相关性不显著,与土壤总盐呈正相关关系,相关性不显著。说明施磷量的增加对降低土壤 pH 和提升土壤盐含量有一定的影响,相对较高的 pH 是限制棉花高效生产的因素之一。

### 3 讨论

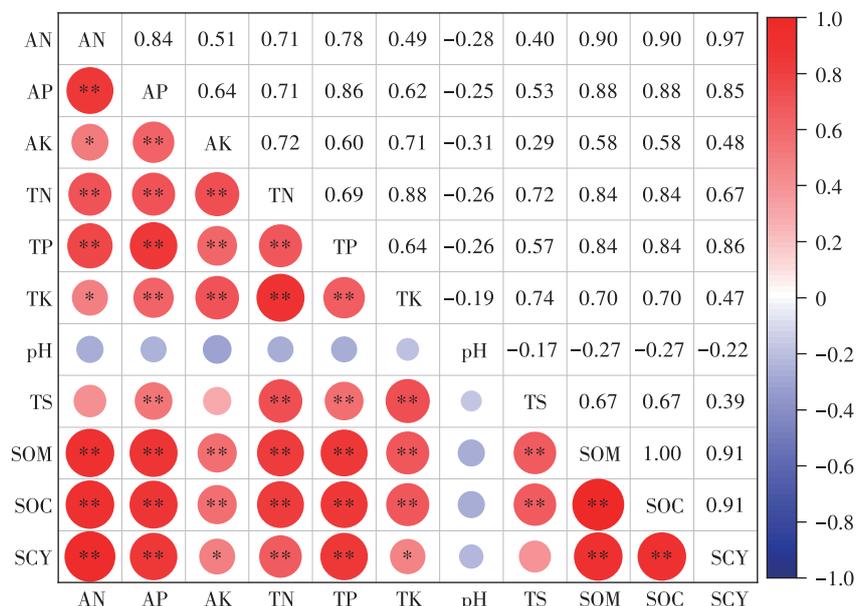
#### 3.1 不同施磷量对土壤养分含量的影响

棉花生长的适宜施磷量与当地气候、栽培品种、土壤基本肥力和施肥管理模式密切相关<sup>[6]</sup>,土壤中持有的磷素过低或过量施磷会导致土壤养分元素比例的失调,不利于作物生长<sup>[22]</sup>,土壤缺磷时一般通过作物根系活动实现对土壤中磷素的较高利用效率<sup>[23]</sup>。有研究表明<sup>[24-25]</sup>,增施磷肥可显著提高棉田有效磷含

表 5 不同施磷量对棉花产量及其构成因素的影响

Table 5 Effects of different phosphorus application rates on cotton yield and its constituent factors

处理 Treatment	总铃数 Total number of cotton bolls/ ( $\times 10^4$ 个·hm <sup>-2</sup> )	单株成铃 Number of bolls in a cotton plant/ (个·株 <sup>-1</sup> )	单铃质量 Single boll weight/ (g·朵 <sup>-1</sup> )	衣分 Fiber yield/%	皮棉产量 Lint yield/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	籽棉产量 Seed cotton yield/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	籽棉增产率 Yield increase of seed cotton/%		
							与T1比	与T2比	与T3比
T1	87.63±0.95c	4.38±0.05c	4.55±0.02b	43.19±0.01b	1 722.66±43.60c	3 987.92±56.33c	—	-1.55	-4.44
T2	89.00±1.22c	4.45±0.06c	4.55±0.01b	43.31±0.01b	1 754.39±45.41c	4 050.84±56.54c	1.58	—	-2.93
T3	91.38±0.63b	4.57±0.03b	4.57±0.01b	45.16±0.01a	1 884.74±38.11b	4 173.13±35.36b	4.64	3.02	—
P1	91.13±0.48b	4.56±0.02b	4.56±0.02b	45.42±0.01a	1 908.90±42.24b	4 154.00±39.55b	4.16	2.55	-0.46
P2	95.88±1.31a	4.79±0.07a	4.86±0.02a	44.12±0.01a	2 180.58±69.68a	4 658.30±84.95a	16.81	15.00	11.63
P3	97.25±1.26a	4.86±0.06a	5.88±0.02a	44.39±0.01a	2 240.71±56.82a	4 748.93±83.52a	19.08	17.23	13.80



AN:速效氮、AP:速效磷、AK:速效钾、TN:全氮、TP:全磷、TK:全钾、TS:总盐、SOM:有机质、SOC:有机碳、SCY:籽棉产量。

AN: available nitrogen, AP: available phosphorus, AK: available potassium, TN: total nitrogen, TP: total phosphorus,

TK: total potassium, TS: total salt, SOM: organic matter, SOC: organic carbon, SCY: seed cotton yield.

\*、\*\*分别表示差异显著( $P < 0.05$ )、差异极显著( $P < 0.01$ )。

\* and \*\* indicated significant difference ( $P < 0.05$ ) and extremely significant difference ( $P < 0.01$ ), respectively.

图4 土壤化学性质与棉花产量的相关性

Figure 4 Correlation between soil chemical properties and cotton yield

量,偏低则会导致有效磷含量下降,过量施用( $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )并不能持续增加土壤有效磷含量。王改兰等<sup>[26]</sup>表示,施用磷肥后土壤碱解氮提升38.7%,随着磷肥用量的增加,促进了土壤氮素参与棉株含氮量的转运与合成量。杨鹏飞等<sup>[27]</sup>在阿克苏地区沙雅县棉田施磷 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤有效磷含量到达农学阈值,磷肥利用率较高(22.59%),且保证棉花高产。本研究中随着施磷量的增加提升了土壤养分含量,刘美娟等<sup>[9]</sup>施磷 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤有机质、碱解氮、有效磷分别增加了18.4%~37.01%、78.86%~126.43%、45.54%~159.41%,施磷对土壤速效钾无显著影响,詹其厚等<sup>[28]</sup>同样表示单施化肥对土壤速效钾的影响较小,这与本研究施磷对土壤钾素的提升均无显著影响的结论基本一致,其原因与新疆土壤富钾的自然特性有关。

### 3.2 不同施磷量对土壤有机质及总盐、pH的影响

土壤有机质含量是衡量土壤肥力的指标之一,有研究表明<sup>[29]</sup>作物根际土壤有机质含量密切影响着自身对有效磷的吸收利用,有机质能促使难溶性磷酸盐的解吸,进而丰富土壤中的磷库。本试验连续5 a磷梯度施肥,在施磷 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时显著提升了耕层土壤有机质含量,且有机质含量随着施磷量的增加而提

升,说明施磷对土壤有机质含量累积起到促进作用,这与刘美娟等<sup>[9]</sup>的研究结果一致。土壤pH降低是土壤磷活化的机理之一,pH在一定范围内的降低可增加土壤中有效磷的含量,但根系土壤pH下降程度因作物而异<sup>[30]</sup>。作物自身阴阳离子的不平衡导致根系土壤酸化,使之增强了根际土壤中难溶性养分的溶解度<sup>[31]</sup>。尤其是在缺磷的环境中根系有机酸(如柠檬酸)的分泌量增多,加剧了根际酸化程度从而降低了根际土壤pH<sup>[32]</sup>。本研究显示,土壤pH随着施磷量的增加呈下降趋势,但差异不显著,最低值出现在施磷 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理中,说明磷浓度增加降低了土壤pH。施磷对土壤盐含量的影响与其理化特性密切相关,有研究表明,施磷量与土壤总盐含量间无显著相关性<sup>[33]</sup>,施磷量对土壤含盐量没有显著影响<sup>[34]</sup>,施磷可增加土壤全盐含量,但各施磷处理甚至高磷处理与对照相比差异并不显著<sup>[35]</sup>。本研究显示,随着施磷量的增加土壤总盐含量呈上升趋势,但整体上变化差异不显著,这与施肥增加了土壤中的离子含量,从而提高土壤总盐含量有关<sup>[36-37]</sup>。

### 3.3 不同施磷量对土壤Olsen-P含量和土壤PAC及C/N、C/P、N/P的影响

我国北方土壤缺乏有效磷现象较为普遍,本研究

连续5 a 磷梯度施肥显著提高了土壤磷含量与磷素有效性,当PAC>2.0%时,表明土壤全磷极易向有效磷转化<sup>[38]</sup>,本研究P2处理的土壤PAC显著最强为2.13%,其他施肥处理的土壤PAC均低于2.0%,说明施磷150 kg·hm<sup>-2</sup>时土壤有效磷含量提升效果最显著,土壤中的全磷极易向有效磷转化,这与磷在土壤中的生物化学过程和外源磷投入对土壤供磷强度的影响有关,进一步剖析土壤供磷强度与土壤磷的吸附、解吸能力的机理,土壤有机磷的矿化速率与土壤有机质及有机质中碳磷比的关系、有机磷形态与有效磷之间的关系,可更为全面地揭示土壤磷的活化机制。C/N反映了土壤氮素矿化能力<sup>[39]</sup>,有机肥矿化速率与C/N呈显著负相关<sup>[40]</sup>,本试验中T2和P1处理的土壤C/N最低,分别为8.06和8.29,整体上随着施磷量的增加,有利于增强土壤供氮能力,但各施肥处理C/N均处于较低水平。磷素形态、有机物料的C/P等因素严重影响着磷素对作物的增产效应<sup>[41]</sup>,本试验显示,各施磷处理的土壤C/P均偏低,在6.67~7.17范围内,P3较P2的C/P增长较快,综合增长趋势分析,在施磷90~150 kg·hm<sup>-2</sup>时,最有利于微生物分解有机质对养分的释放和对有效磷的转化。土壤N/P可用来判定土壤中养分的限制状况,是有机质可分解性的有效指标<sup>[21]</sup>,本试验N/P整体变化幅度较小,在0.77~1.10之间,表明试验区土壤整体上倾向于受N限制。

### 3.4 不同施磷量对土壤化学性质、棉花产量及其构成的影响

已有研究表明<sup>[7,42]</sup>,磷素过量或缺磷都会造成棉花减产,施磷量在75 kg·hm<sup>-2</sup>时,棉花产量经济效益也最大,施磷量在150 kg·hm<sup>-2</sup>时,杂交棉经济产量和生物产量最高。也有研究显示<sup>[43]</sup>,棉花获得最高产的施磷量(以P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>计,下同)为158.3 kg·hm<sup>-2</sup>,最佳施磷量为146.3 kg·hm<sup>-2</sup>,棉花产量随着施磷量的增加呈先增后减的趋势,其最佳施磷量是150 kg·hm<sup>-2</sup>。本试验表明,在常规施化肥磷100%的基础上减施25%,对籽棉造成减产,但差异不显著,增施25%后籽棉和皮棉产量均显著提高11.6%、15.7%,即施磷150 kg·hm<sup>-2</sup>时棉花增产幅度最大。综合肥料投入、棉花产量等指标,施磷150 kg·hm<sup>-2</sup>最有利于实现棉花产量和经济产能的协同提升,因此本研究认为当地较适宜的棉花施磷量为150 kg·hm<sup>-2</sup>,这与王海洋等<sup>[44]</sup>的研究结果一致。对耕层土壤化学性质与产量的相关分析表明,籽棉产量与土壤有机质呈极显著正相关,与土壤pH呈负相关,但相关性不显著。与养分含量均呈正相关关

系,分析棉花增产的主要原因是磷梯度的增加在一定程度上提升了土壤养分含量,促进了棉株对营养元素的综合吸收效率,进而提高棉花总铃数、单株成铃数和单铃质量,而限制棉花增产的主要原因是相对偏高的土壤pH。另外,确保棉株整个生育时期养分需求是棉花获得高产的关键,而适宜的施磷量可提升土壤有机质含量,这与有机质能够减少磷在土壤中的固定,且有机质中有机酸能够置换出部分被胶体吸附的H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>和HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>。土壤有机质含量越高,微生物活化元素的能力也越强,土壤矿化的有效磷含量和比例也越大<sup>[45-46]</sup>。

## 4 结论

(1)施磷量的增加加速了土壤养分转化,提升了土壤有机质、有机碳含量。

(2)增加施磷量具有降低土壤pH和提升土壤盐含量的作用,但效果均不显著。

(3)结合北疆灰漠土棉田富钾的自然特性,施磷对土壤钾素养分的提升无显著影响。当施磷150 kg·hm<sup>-2</sup>时,土壤有效磷含量和磷活化能力均最强,磷活化系数为2.13%,有效促进了土壤全磷向有效磷的转化,促进了棉花增产,值得推广应用。

### 参考文献:

- [1] IRFAN M, ABBAS M, SHAH J A, et al. Categorization and identification of brassica genotypes for phosphorus utilization efficiency[J]. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2020, 23(1): 227-234.
- [2] 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. 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.
- [3] ZHANG W L, LI C B, LI G T, et al. Biochar alters inorganic phosphorus fractions in tobacco-growing soil[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(2): 1689-1699.
- [4] AHMAD M, AHMAD M, EL-NAGGAR A H, et al. Aging effects of organic and inorganic fertilizers on phosphorus fractionation in a calcareous sandy loam soil[J]. *Pedosphere*, 2018, 28(6): 873-883.
- [5] GEISSLER B, HERMANN L, MEW M C, et al. Striving toward a circular economy for phosphorus: the role of phosphate rock mining[J]. *Minerals*, 2018, 8(9): 395-395.
- [6] 童文彬, 邱志腾, 章明奎. 植物有效磷与水溶性磷对土壤磷素积累响应研究[J]. *农学报*, 2020, 10(1): 37-42. TONG W B, QIU Z T, ZHANG M K. Response of bio-available phosphorus and water-soluble phosphorus to phosphorus accumulation in soil[J]. *Journal of Agriculture*, 2020, 10(1): 37-42.

- [7] 胡国智, 张炎, 胡伟, 等. 施磷对棉花磷素吸收、利用和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010, 228(4): 27-31. HU G Z, ZHANG Y, HU W, et al. Effects of phosphate fertilizer application on P absorption, utilization and yield of cotton[J]. *Chinese Soil and Fertilizer*, 2010, 228(4): 27-31.
- [8] 吴梅菊, 刘荣根. 不同施磷量对棉花生长发育及产量的影响[J]. 土壤肥料, 2000(3): 44-45. WU M J, LIU R G. Effects of different phosphorus application rates on cotton growth, development and yield[J]. *Soil Fertilizer*, 2000(3): 44-45.
- [9] 刘美娟, 侯银莹, 汤明尧, 等. 施磷量对棉田土壤基础肥力的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2019, 42(6): 392-399. LIU M J, HOU Y Y, TANG M Y, et al. Effect of phosphorus application rates on soil basic fertility in cotton fields[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2019, 42(6): 392-399.
- [10] 周宝库, 张喜林. 长期施肥对黑土磷素积累、形态转化及其有效性影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005(2): 143-147. ZHOU B K, ZHANG X L. Effect of long-term phosphorus fertilization on the phosphorus accumulation and distribution in black soil and its availability[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2005(2): 143-147.
- [11] 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, 2021: 1-11. 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, 2021: 1-11.
- [12] 李天娇, 田有国, 杜春先. 土壤施钾和叶面施钾对棉花产量和养分吸收及土壤肥力状况的影响[J]. 中国农技推广, 2017, 33(11): 14-20. LI T J, TIAN Y G, DU C X. Effects of soil potassium application and leaf potassium application on cotton yield, nutrient absorption and soil fertility[J]. *Agricultural Technology Extension of China*, 2017, 33(11): 14-20.
- [13] 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.
- [14] 鲁如坤. 土壤磷素(二)[J]. 土壤通报, 1980(2): 47-49. LU R K. Soil phosphorus(II)[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1980(2): 47-49.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-144. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-144.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146-195. LU R K. Analysis method of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 146-195.
- [17] 贾兴永, 李菊梅. 土壤磷有效性及其与土壤性质关系的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2011(6): 76-82. JIA X Y, LI J M. Study on soil phosphorus availability and its relation to the soil properties in 14 soils from different sites in China[J]. *Chinese Soil and Fertilizer*, 2011(6): 76-82.
- [18] 王晓光, 乌云娜, 宋彦涛, 等. 土壤与植物生态化学计量学研究进展[J]. 大连民族大学学报, 2016, 18(5): 437-442. WANG X G, WU Y N, SONG Y T, et al. Research advances of soils and plants ecological stoichiometry[J]. *Journal of Dalian Minzu University*, 2016, 18(5): 437-442.
- [19] RAYMENT G, HIGGINSON F. Australian laboratory handbook of soil and water chemical methods[M]. Melbourne: Inkata Press, 1992: 33-88.
- [20] 林丽, 张法伟, 李以康, 等. 高寒矮蒿草甸退化过程土壤碳氮储量及C/N化学计量学特征[J]. 中国草地学报, 2012, 34(3): 42-47. LIN L, ZHANG F W, LI Y K, et al. The soil carbon and nitrogen storage and C/N metrological characteristics of chemistry in Kobresia humilis meadow in degradation succession stages[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(3): 42-47.
- [21] 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 9-19. WANG J L, ZHONG Z M, WANG Z H, et al. soil C/P distribution characteristics of alpine steppe ecosystem in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 9-19.
- [22] 张炎, 崔水利, 王讲利, 等. 不同施磷量对棉花根系形态和磷吸收的影响[J]. 新疆农业科学, 1996(2): 82-84. ZHANG Y, CUI S L, WANG J L, et al. Effects of different phosphorus application rates on cotton root morphology and phosphorus uptake[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 1996(2): 82-84.
- [23] 罗佳. 不同基因型棉花根际过程对磷肥响应特征的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016: 9-57. LUO J. Response of rhizosphere processes of cotton cultivars to phosphate fertilizers[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016: 9-57.
- [24] 陈波浪, 盛建东, 蒋平安, 等. 磷肥种类和用量对土壤磷素有效性和棉花产量的影响[J]. 棉花学报, 2010, 22(1): 49-56. CHEN B L, SHENG J D, JIANG P A, et al. Effect of applying different forms and rates of phosphoric fertilizer on phosphorus efficiency and cotton yield[J]. *Cotton Science*, 2010, 22(1): 49-56.
- [25] 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.
- [26] 王改兰, 段建南, 贾宁凤, 等. 长期施肥对黄土丘陵区土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2006(4): 82-85, 89. WANG G L, DUAN J N, JIA N F, et al. Effects of long-term fertilization on soil physical and chemical property in Loess Hilly Area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006(4): 82-85, 89.
- [27] 杨鹏飞, 王冰, 袁文杰, 等. 秸秆还田及不同施磷量对磷肥利用率的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2023, 46(2): 125-130. YANG P F, WANG B, YUAN W J, et al. Effects of straw returning to field and different amount of phosphorus application on utilization rate of phosphorus fertilizer[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2023, 46(2): 125-130.
- [28] 詹其厚, 陈杰. 基于长期定位试验的变性土养分持续供给能力和

- 作物响应研究[J]. 土壤学报, 2006(1): 124-132. ZHAN Q H, CHEN J. Continual nutrient supplying capacity and crop responses based on long-term fertilizer experiment in vertisol[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006(1): 124-132.
- [29] 张涓涓, 杨莉, 刘德春, 等. 土壤养分状况与马家柚果实品质相关性的多元分析[J]. 经济林研究, 2015, 33(4): 25-31. ZHANG J J, YANG L, LIU D C, et al. Multivariate analysis of relationship between soil nutrient status and fruit quality of *Majia shaddock*[J]. *Nonwood Forest Research*, 2015, 33(4): 25-31.
- [30] 张雨瑶, 李世友. 土壤磷与植物关系研究进展[J]. 世界林业研究, 2013, 26(5): 19-24. ZHANG Y Y, LI S Y. Relationship between soil phosphorus and plant[J]. *World Forestry Research*, 2013, 26(5): 19-24.
- [31] 王昕, 李海港, 程凌云, 等. 磷与水分互作的根土界面效应及其高效利用机制研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1054-1064. WANG X, LI H G, CHENG L Y, et al. Advances of root-soil interface effect of phosphorus and water interaction and mechanisms of their efficient use[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(4): 1054-1064.
- [32] 赵宽, 周葆华, 马万征, 等. 不同环境胁迫对根系分泌有机酸的影响研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(2): 235-240. ZHAO K, ZHOU B H, MA W Z, et al. The influence of different environmental stresses on root-exuded organic acids: a review[J]. *Soil*, 2016, 48(2): 235-240.
- [33] 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, phosphorus, potassium of cotton[J]. *Cotton Science*, 2010, 22(5): 466-470.
- [34] 张锡洲, 王永东, 郑子成, 等. 氮磷钾肥交互作用对设施土壤盐分含量与离子组成的影响[J]. 四川农业大学学报, 2010, 28(1): 84-89. ZHANG X Z, WANG Y D, ZHENG Z C, et al. Effects of interaction among nitrogen phosphorus and potassium fertilizers on salt content and ion composition in greenhouse soil[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2010, 28(1): 84-89.
- [35] 陈波浪, 盛建东, 戴婷婷, 等. 棉田土壤磷素与盐分离子的相关性初步研究[J]. 新疆农业大学学报, 2012, 35(3): 222-226. CHEN B L, SHENG J D, DAI T T, et al. Preliminary research on the correlation between soil phosphorus and salt ions in cotton field[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2012, 35(3): 222-226.
- [36] 王艳群, 彭正萍, 薛世川, 等. 过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005(增刊1): 81-84. WANG Y Q, PENG Z P, XUE S C, et al. Effect of excessive fertilization on soil ecological environment in the facility farmland[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005(Suppl1): 81-84.
- [37] 赵彩芹. 保护地土壤次生盐渍化的危害及防治[J]. 陕西农业科学, 2005(2): 82-83. ZHAO C Q. Harm and prevention of soil secondary salinization in protected land[J]. *Shaanxi Agricultural Sciences*, 2005(2): 82-83.
- [38] MARTÍN-HERNÁNDEZ E, MARTÍN M, RUIZ-MERCADO G J. A geospatial environmental and techno-economic framework for sustainable phosphorus management at livestock facilities[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 175: 105843.
- [39] 李涛, 何春娥, 葛晓颖, 等. 秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(12): 1633-1642. LI T, HE C E, GE X Y, et al. Responses of soil mineral N contents, enzyme activities and crop yield to different C/N ratio mediated by straw retention and N fertilization[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(12): 1633-1642.
- [40] 鲍艳宇, 周启星, 颜丽, 等. 不同畜禽粪便堆肥过程中有机氮形态的动态变化[J]. 环境科学学报, 2008(5): 930-936. BAO Y Y, ZHOU Q X, YAN L, et al. Dynamic changes of organic nitrogen forms during the composting of different manures[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008(5): 930-936.
- [41] 邢璐. 不同粪肥的施用对土壤磷素转化与迁移的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 13-55. XING L. Effects of different manure application on phosphorus conversion and transport in soil[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 13-55.
- [42] 杨明花, 姜益娟, 聂万林, 等. 施磷量对膜下滴灌杂交棉氮磷钾养分吸收利用及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 75-78. YANG M H, JIANG Y J, NIE W L, et al. Effect of phosphorus rates on nitrogen phosphorus and potassium uptake and utilization and yield of hybrid cotton with drip irrigation under membrane[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(5): 75-78.
- [43] 杨鸿杰, 王琪贞. 盐碱地棉花经济施用磷肥的研究[J]. 中国棉花, 1984(3): 39-40. YANG H J, WANG Q Z. Study on economic application of phosphate fertilizer to cotton in saline-alkali soil[J]. *China Cotton*, 1984(3): 39-40.
- [44] 王海洋, 陈建平, 张萼, 等. 氮磷钾肥施用量及配比对棉花产量的影响[J]. 江西棉花, 2011, 33(4): 25-28. WANG H Y, CHEN J P, ZHANG E, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer application amount and ratio on cotton yield[J]. *Jiangxi Cotton*, 2011, 33(4): 25-28.
- [45] WANG Y, HE Y, ZHANG H, et al. Phosphate mobilization by citric-tartaric and oxalic acids in a clay loam ultisol[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72: 1363-1368.
- [46] YUSRAN F H. The relationship between phosphate adsorption and soil organic carbon from organic matter addition[J]. *Journal of Tropical Soils*, 2010, 15: 1-10.

(责任编辑:叶飞)