



长期施用有机酸和有机肥对新疆绿洲棉田土壤磷库的影响

陈钰秦, 李忠婷, 胡杰, 彭懿, 冯固, 盛建东

引用本文:

陈钰秦, 李忠婷, 胡杰, 等. 长期施用有机酸和有机肥对新疆绿洲棉田土壤磷库的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2026, 43(1): 217–226.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0658>

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>

增施有机肥对稻田亚耕层土壤的培肥效应

韩上, 武际, 张祥明, 胡鹏, 杨友兵, 李敏, 王慧, 唐杉

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 334–341 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0319>

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>

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>

磷高效转基因水稻OsPT4对红壤无机磷组成的影响

魏琳琳, 倪土, 臧怀敏, 李刚, 修伟明, 杨殿林, 赵建宁

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 414–421 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0077>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈钰秦, 李忠婷, 胡杰, 等. 长期施用有机酸和有机肥对新疆绿洲棉田土壤磷库的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 217-226.

CHEN Y Q, LI Z T, HU J, et al. Effects of long-term application of organic acids and fertilizers on the soil phosphorus pool in cotton field of the arid oasis of Xinjiang, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2026, 43(1): 217-226.



开放科学 OSID

长期施用有机酸和有机肥对新疆绿洲棉田土壤磷库的影响

陈钰秦¹, 李忠婷¹, 胡杰¹, 彭懿¹, 冯固², 盛建东^{1*}

(1. 新疆农业大学资源与环境学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:为探讨长期增施有机酸和有机肥对土壤稳定态磷库活化、磷肥利用效率及棉花高产的影响,本研究在水肥一体化棉花种植体系中,选用牛粪和乙酸,设置单施无机肥(NPK)、增施有机酸(NPKA)和增施有机肥(NPKM)3个处理,开展了5年田间试验,测定不同处理下的棉花产量、土壤理化性质和磷组分。结果表明:增施有机酸和有机肥可逐年提高棉花产量,平均分别提高4.0%和9.5%。NPKA处理逐年显著降低土壤pH值0.2~0.4个单位,有效磷和水溶磷含量呈显著上升趋势,分别增加3.8%~23.6%和29.1%~66.8%;NPKM处理逐年显著降低土壤pH值0.2~0.5个单位,分别显著提高土壤有效磷、水溶磷和有机质含量14.1%~49.0%、75.6%~115.2%和23.5%~40.3%。NPKA处理显著提高Ca₂-P(二钙磷)、Al-P(铝磷)、MROP(中稳性有机磷)和HROP(高稳性有机磷)比例,显著降低Ca₁₀-P(十钙磷)比例;NPKM处理显著提高Ca₂-P、Ca₈-P(八钙磷)、Al-P、LOP(活性有机磷)、MLOP(中活性有机磷)、MROP和HROP比例,显著降低Ca₁₀-P比例。土壤pH与Ca₂-P、Al-P和LOP呈显著负相关,与Ca₁₀-P和HROP呈显著正相关;有机质与Ca₁₀-P、HROP呈显著负相关,与Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P和LOP呈显著正相关,这表明有机质有效活化了土壤稳定态磷库。研究表明,在新疆绿洲棉田长期增施有机酸和有机肥能活化土壤稳定态磷库,提高磷肥利用率实现作物高产。

关键词:棉田;有机酸;有机肥;磷素活化调控;磷组分

doi: 10.13254/j.jare.2024.0658

Effects of long-term application of organic acids and fertilizers on the soil phosphorus pool in cotton field of the arid oasis of Xinjiang, China

CHEN Yuqin¹, LI Zhongting¹, HU Jie¹, PENG Yi¹, FENG Gu², SHENG Jiandong^{1*}

(1. School of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. School of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: This study investigates the effects of long-term application of organic acids and organic fertilizers on the activation of the soil stable phosphorus pool, phosphorus utilization efficiency, and high cotton yield. We selected a five-year field experiment using an integrated water and fertilizer cotton planting system. The experiment included treatments of inorganic fertilizer (NPK), organic acid application (NPKA), and organic fertilizer application (NPKM) using cow manure and acetic acid. By measuring cotton yield, soil physicochemical properties, and phosphorus components under different treatments, we analyzed the impact of organic acids and organic fertilizers on phosphorus effectiveness. The results showed that continuous application of organic acids and organic fertilizers for five years increased cotton yield by an average of 4.0% and 9.5%, respectively. Compared with the NPK treatment, the NPKA treatment significantly reduced soil pH by 0.2 to 0.4 unit, while significantly increasing soil available phosphorus and water-soluble phosphorus by 3.8% to 23.6% and 29.1% to 66.8%, respectively. The NPKM treatment significantly lowered soil pH by 0.2 to 0.5 unit and significantly increased soil available phosphorus, water-soluble phosphorus, and organic matter content by 14.1% to 49.0%, 75.6% to 115.2%, and 23.5% to 40.3%, respectively. In terms of soil inorganic phosphorus, the NPKA treatment significantly increased the ratio of Ca₂-P (dicalcium phosphate)

收稿日期: 2024-08-23 录用日期: 2025-01-24

作者简介: 陈钰秦(1998—), 女, 安徽合肥人, 硕士研究生, 从事土壤肥料研究。E-mail: 1263129869@qq.com

*通信作者: 盛建东 E-mail: sjd@xjau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U2003210); 国家重点研发项目子课题(2022YFD190010304)

and Al-P (aluminum phosphate) while significantly decreasing the ratio of Ca₁₀-P (dicalcium phosphate). The NPKM treatment significantly increased the ratios of Ca₂-P, Ca₈-P (octacalcium phosphate), and Al-P while significantly decreasing the ratio of Ca₁₀-P. Regarding soil organic phosphorus, the NPKA treatment showed an increasing trend in LOP (labile organic phosphorus) and MLOP (moderately labile organic phosphorus), significantly increasing MROP (moderately stable organic phosphorus) and HROP (highly stable organic phosphorus). The NPKM treatment significantly increased LOP, MLOP, MROP, and HROP. Correlation analysis indicated that soil pH was significantly negatively correlated with Ca₂-P, Al-P, and LOP, and significantly positively correlated with Ca₁₀-P and HROP. Organic matter was significantly negatively correlated with Ca₁₀-P and HROP, and significantly positively correlated with Ca₂-P, Ca₈-P, Al-P, and LOP, indicating that organic matter effectively activated the soil stable phosphorus pool. In summary, the long-term application of organic acids and organic fertilizers in the arid region of Xinjiang can activate the soil stable phosphorus pool, improve phosphorus utilization efficiency, and achieve high crop yields.

Keywords: cotton field; organic acid; organic fertilizer; phosphorus activation regulation; phosphorus component

磷是作物生长所必需的营养元素。集约化的膜下滴灌棉田依赖大量磷肥来维持高产^[1],棉田石灰性土壤易固定磷素,造成新疆绿洲棉田磷肥的当季利用率普遍偏低^[2],土壤累积态磷持续增加。有效活化利用土壤中累积的磷是促进作物高产和环境友好的关键,厘清土壤中磷肥的转化规律对提高磷肥利用效率至关重要^[3]。

不同调控措施可以有效改变土壤无机磷和有机磷形态,影响土壤磷素赋存形态和转化规律^[4],增加有效磷含量^[5],但有机酸和有机肥增施改变磷形态的方式不同。张春龙等^[6]的研究结果表明,有机肥连续7年投入0.9 t·hm⁻²后,水稻土无机磷组分(Fe-P、Al-P)向Ca₈-P转化,增加了Ca₈-P含量。在灰漠土长期定位试验站连续23年投入30 t·hm⁻²有机肥后,土壤无机磷主要转化为Ca₈-P,其转化量占土壤无机磷总转化量的40%左右^[7]。在红壤和黑土中增施低分子量有机酸可以降低磷的固定,使Al-P、Fe-P、Ca₈-P、Ca₁₀-P和O-P量分别减少21.3%、15.5%、8.4%、11.8%和8.2%,而有效磷和Ca₂-P分别增加213.0%和7.9%^[8]。在红壤中施用浓度10 mmol·L⁻¹的草酸,可以活化56%Ca-P、12%O-P、65%Al-P和20%Fe-P^[9],而对新疆棉田施用乙酸食醋可以显著降低碳酸钙含量,增强土壤磷素有效性^[10]。在大多数土壤中有有机磷含量可达30%~50%,甚至高达95%^[11],低分子量有机酸能促进土壤有机磷活化^[12]。石灰性土壤有机磷以中活性有机磷为主,有机酸能够提高中活性有机磷、活性有机磷和中稳性有机磷的含量,降低高稳性有机磷的含量,促进土壤有机磷由有效性较低的形态逐步向有效性较高的形态转化^[13]。黄潮土上长期施用有机肥,会显著增加土壤活性有机磷和高稳性有机磷含量^[14]。水稻土施用有机肥会显著增加土壤有机磷含量,其中中活性有机磷增幅最大^[15]。

综上,提高肥料磷和稳定态磷利用效率是实现作物增产、环境友好的重要途径。本研究通过连续5年的田间试验,试图验证新疆干旱区棉田通过增施有机酸和有机肥是否可活化土壤稳定态磷库,提高磷肥利用效率,从而实现作物高产的目标。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究于2017年开始在新疆沙湾市144团新疆农业大学棉花教学科研基地(85°45′34″E,44°29′26″N)进行试验。试验区年平均气温6.3~6.9℃,年均≥10℃积温3400~3600℃,无霜期170~190d,降水量140~250mm,年蒸发量1500~2000mm,年日照时数2800~2870h。试验土壤质地为壤土,耕层0~20cm土壤pH 8.14、有机质7.68 g·kg⁻¹、碱解氮35.50 mg·kg⁻¹、有效磷9.50 mg·kg⁻¹、速效钾289.00 mg·kg⁻¹、电导率1.07 dS·m⁻¹。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,设置3个处理,每个处理4次重复,共12个小区,每小区面积为72 m²。三个处理分别为:①施氮磷钾肥(NPK);②施氮磷钾肥配施有机酸(NPKA);③施氮磷钾肥配施有机肥(NPKM)。氮肥为尿素,施氮量220 kg·hm⁻²(以N计);磷肥为重过磷酸钙,施磷量100 kg·hm⁻²(以P₂O₅计);钾肥为硫酸钾,施钾肥90 kg·hm⁻²(以K₂O计)。磷钾肥全部基施;氮肥20%作基肥,剩余80%氮肥分6次滴灌追施。NPKA处理施有机酸乙酸40 kg·hm⁻²,分6次滴灌追施;NPKM处理基施腐熟的牛粪15 t·hm⁻²(表1)。每年4月底播种,种植棉花品种为新农大3号,采用1膜6行3带种植模式,播幅内宽、窄行距配置为(66 cm+10 cm),理论密度为18万株·hm⁻²。棉花秸秆机械深翻还田,其他田间管理措施均与当地高

表1 有机酸和有机肥的碳氮磷钾含量(%)

Table 1 Carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium content of organic acids and organic fertilizers(%)

材料 Materia	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
有机酸	40.00	0.00	0.00	0.00
有机肥	43.85	2.55	0.20	0.14

产栽培模式保持一致。

1.3 样品采集与测定

2018—2022年,每年棉花的吐絮期,本研究采用五点取样法,采集0~20 cm土壤样品,混合均匀后风干过筛,用于测定土壤理化性质。每个小区随机采集5株棉花,按照器官分开烘干称量质量,粉碎后过孔径0.5 mm的筛,分别测定每部分植物磷含量。在各试验小区调查6.7 m²棉花株数和铃数,并随机采收小区内植株上、中、下层棉花共100朵,分别测单铃生物量和衣分,计算产量。

土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;有效磷采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定;水溶磷采用蒸馏水浸提-钼蓝比色法测定;全磷用浓硫酸高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定^[16]。土壤无机磷分级采用顾益初-蒋柏藩磷素分级法^[17],将其分为Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、Ca₁₀-P和O-P(闭蓄态磷);土壤有机磷分级采用Bowman-Cole磷素分级法^[18],将其分为LOP、MLOP、MROP和HROP。用浓硫酸双氧水消煮-钼钒黄比色法测定成熟期棉花各器官磷含量^[16]。

1.4 数据处理与计算

磷盈余(kg·hm⁻²)=施磷量(kg·hm⁻²,以P₂O₅计)-籽棉吸磷量(kg·hm⁻²)。

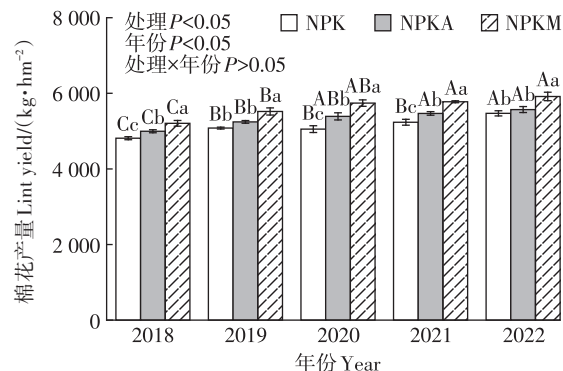
土壤累积磷盈余量(kg·hm⁻²)=∑[当年磷总投入量(kg·hm⁻²)-当年作物携出磷量(kg·hm⁻²)]

利用SPSS软件进行数据统计分析;采用Origin 2022软件进行数据可视化。

2 结果与分析

2.1 对棉花产量的影响

试验区棉花经过连续5年施用有机酸和有机肥,不同年限和不同施肥处理均显著提高了棉花产量(图1)。其中,2018、2020年和2021年,NPKA处理的棉花产量较NPK处理平均显著提高了4.0%。NPKM处理产量显著高于NPKA和NPK处理,较NPK处理平均提高了9.5%。不同施肥处理的棉花产量随年限增加显著增长,2022年NPKA处理棉花产量较2018年显著提高572.9 kg·hm⁻²,NPKM处理显著提高710.5 kg·hm⁻²。



不同大写字母表示同一处理不同年份间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图1 不同施肥处理棉花产量

Figure 1 Cotton yield under different fertilization treatments

2.2 对土壤理化性质的影响

有机酸和有机肥增施对土壤pH、有机质、有效磷和水溶磷含量产生显著影响(图2)。随着种植年限增加,土壤pH显著降低,NPKA处理较NPK处理显著降低0.2~0.4个单位,NPKM处理较NPK处理显著降低0.2~0.5个单位;与NPK处理相比,仅NPKM处理土壤有机质含量显著增加23.5%~40.3%;NPKA和NPKM处理较NPK处理土壤有效磷含量均显著增加3.8%~23.6%和14.1%~49.0%;土壤水溶磷含量在有机酸和有机肥增施后显著增加29.1%~66.8%和75.6%~115.2%($P<0.05$)。

在长期增施有机酸和有机肥下,不同施肥处理的地上部吸磷量差异显著(表2),2020年和2021年NPKA处理较NPK处理显著增加3.67 kg·hm⁻²和2.85 kg·hm⁻²,NPKM处理较NPK处理每年均显著增加10.42 kg·hm⁻²。对于土壤磷盈余,NPKA处理较NPK处理平均降低1.66 kg·hm⁻²,2018—2021年分别降低1.34、1.23、2.31 kg·hm⁻²和3.95 kg·hm⁻²,2022年提高0.55 kg·hm⁻²,其中2020年和2021年两处理间差异显著;NPKM处理较NPK处理平均提高7.62 kg·hm⁻²,两处理间各年间差异均显著。综合来看,NPKA处理的磷盈余为21.64 kg·hm⁻²,低于NPK处理(23.30 kg·hm⁻²),NPKM处理的磷盈余为30.92 kg·hm⁻²,高于NPK处理。

2.3 棉花产量和土壤磷素对累积磷盈余的响应

从图3可知,单施无机肥处理(NPK)与棉花产量和累积磷盈余间呈显著上抛物线形相关($P<0.05$),土壤全磷、有效磷、水溶磷与累积磷盈余间呈显著线性正相关($P<0.05$)。NPKA和NPKM处理棉花产量和土壤全磷与累积磷盈余间呈显著上抛物线形相关($P<$

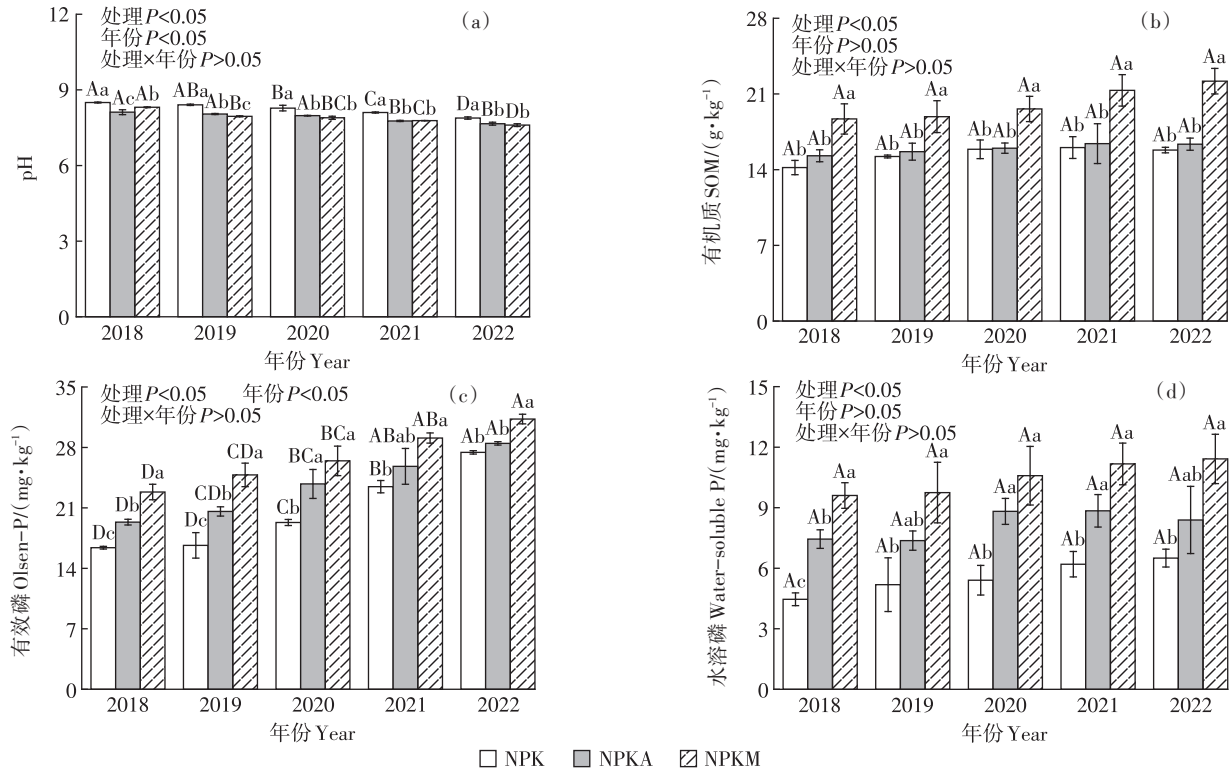


图2 不同施肥处理土壤pH、有机质、有效磷和水溶磷含量

Figure 2 Soil pH, organic matter, olsen-P, and water soluble-P contents under different fertilization treatments

表2 长期施肥条件下年均磷素平衡

Table 2 Long-term fertilization-induced annual phosphorus balance

年份 Year	处理 Treatment	总投入 ^a Input/(kg·hm ⁻²)	籽棉磷素吸收量 Cotton P uptake/(kg·hm ⁻²)	地上部吸磷量 Aboveground P uptake/(kg·hm ⁻²)	磷盈余 P surplus/(kg·hm ⁻²)
2018	NPK	49.68	28.16±0.97b	39.43±1.04b	21.52±0.97b
	NPKA	49.58	29.40±0.27b	40.34±0.32b	20.18±0.27b
	NPKM	64.11	33.74±0.64a	45.49±0.83a	30.37±0.64a
2019	NPK	51.36	26.81±0.49b	36.69±0.59b	24.55±0.49b
	NPKA	51.36	28.04±0.51b	38.08±0.57b	23.32±0.51b
	NPKM	65.68	33.79±0.73a	46.77±0.95a	31.89±0.73a
2020	NPK	50.89	28.42±0.27c	36.30±0.53c	22.46±0.27b
	NPKA	51.01	30.87±0.75b	39.97±1.18b	20.15±0.75c
	NPKM	66.28	39.05±0.93a	49.43±1.09a	27.23±0.93a
2021	NPK	51.02	25.59±0.66c	35.99±1.12c	25.43±0.66b
	NPKA	52.04	30.56±0.18b	38.84±0.57b	21.48±0.18c
	NPKM	67.64	36.91±0.55a	48.09±0.95a	30.73±0.55a
2022	NPK	50.64	28.12±0.36b	37.59±0.62b	22.52±0.36b
	NPKA	51.40	28.34±0.86b	40.20±1.11b	23.07±0.86b
	NPKM	67.55	33.18±0.86a	48.34±1.22a	34.36±0.86a

注:a为磷养分总投入,指无机磷肥磷量、秸秆还田磷量和有机肥磷量的总和。磷盈余=总投入-籽棉磷素吸收量。不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。

0.05),随着累积磷盈余增加,棉花产量和土壤全磷增加速率降低;土壤有效磷和水溶磷与累积磷盈余间呈显著线性正相关(P<0.05),土壤每积累100 kg·hm⁻²

磷,有效磷含量分别上升11 mg·kg⁻¹和7 mg·kg⁻¹。

2.4 对土壤磷库的影响

有机酸和有机肥处理对土壤磷库的影响不同(图

4),与NPK处理相比,长期增施有机肥处理的土壤总无机磷每年显著提高 $55.5\sim 82.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤总有机磷每年提高 $90.9\sim 112.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。除个别年限与对照NPK处理有显著差异之外,有机酸处理5年总体对土壤无机磷和有机磷影响不显著。有机肥处理对土壤磷库的提高效果总体优于有机酸处理。

2018—2022年各处理土壤无机磷和有机磷组分比例具有显著变化(表3),NPK处理的土壤无机磷组分 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 含量最高,平均含量分别占无机磷总量的44.27%和23.18%, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 平均分别占22.01%、3.27%和4.15%。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 最少仅占3.12%。增施有机酸后, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 Fe-P 比例降低, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 O-P 比例较高。增施有机肥后 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 Fe-P 比例降低, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 O-P 比例提高。

对于土壤有机磷组分,在单施无机肥条件下,MLOP含量最多,平均分别占有机磷总量58.7%,MROP和HROP平均分别占15.0%和18.2%,LOP最低,仅占7.9%。增施有机酸后,LOP除2019年外比例均略提高;MROP比例每年均有提高,2018年提高显著;MLOP比例略有降低,其中2018年和2020年降低显著;HROP比例2018—2020年略有升高,2021—2022年略有降低。增施有机肥后,LOP比例显著提高,HROP比例显著降低,MLOP有增加趋势,MROP有降低趋势。

与NPK处理相比,NPKA处理2019年和2022年

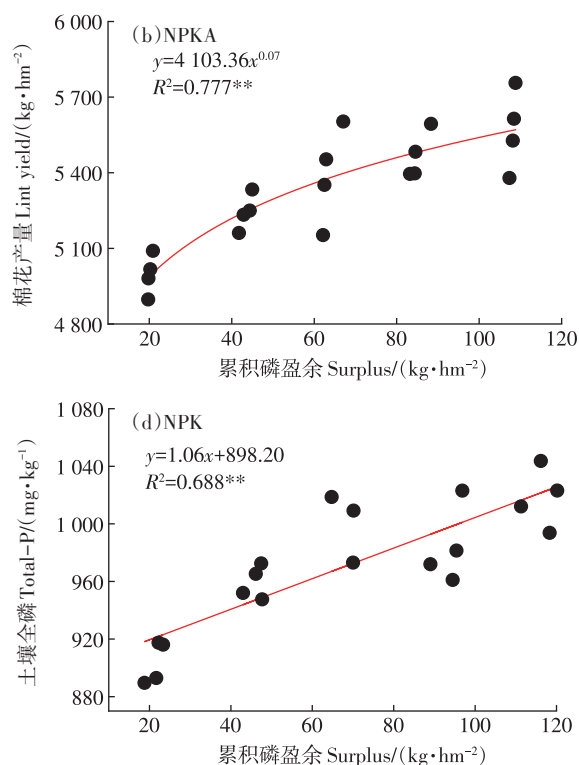
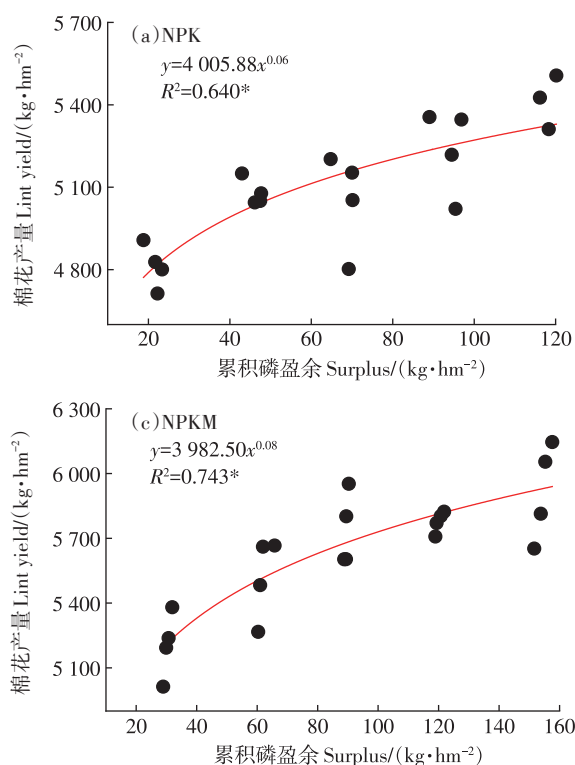
$\text{Ca}_2\text{-P}$ 比例显著提高0.8个和1.1个百分点; Al-P 比例2019—2022年分别显著提高0.4、0.9、0.9个和0.9个百分点; $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 比例2019—2021年显著降低2.8、2.8个和2.5个百分点;MLOP 2018年和2020年显著降低4.5个和4.1个百分点;MROP 2018年显著提高3.1个百分点,且随着年限增长 O-P 和HROP的比例均有降低的趋势。NPKM处理与NPK处理相比 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 和LOP比例平均每年显著增加1.6、1.0个和2.2个百分点,而 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 2019—2021年显著降低5.3、4.9个和5.9个百分点,HROP平均每年显著降低2.9个百分点。

本研究综合5年数据,分析了土壤pH、土壤有效磷、水溶磷、有机质与各磷组分比例间的相关性(图5),pH与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 和LOP呈显著负相关,与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和HROP显著正相关;水溶磷和有效磷与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 和LOP呈显著正相关,与HROP显著负相关;土壤有机质与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和HROP呈显著负相关,与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和LOP呈显著正相关。

3 讨论

3.1 增施有机酸和有机肥对土壤理化性质的影响

新疆棉田土壤中 CaCO_3 含量较高,导致磷肥施入后易被固定,进而降低磷肥利用率。土壤中积累了大量稳定态磷素资源,增施有机酸和有机肥对土壤磷素



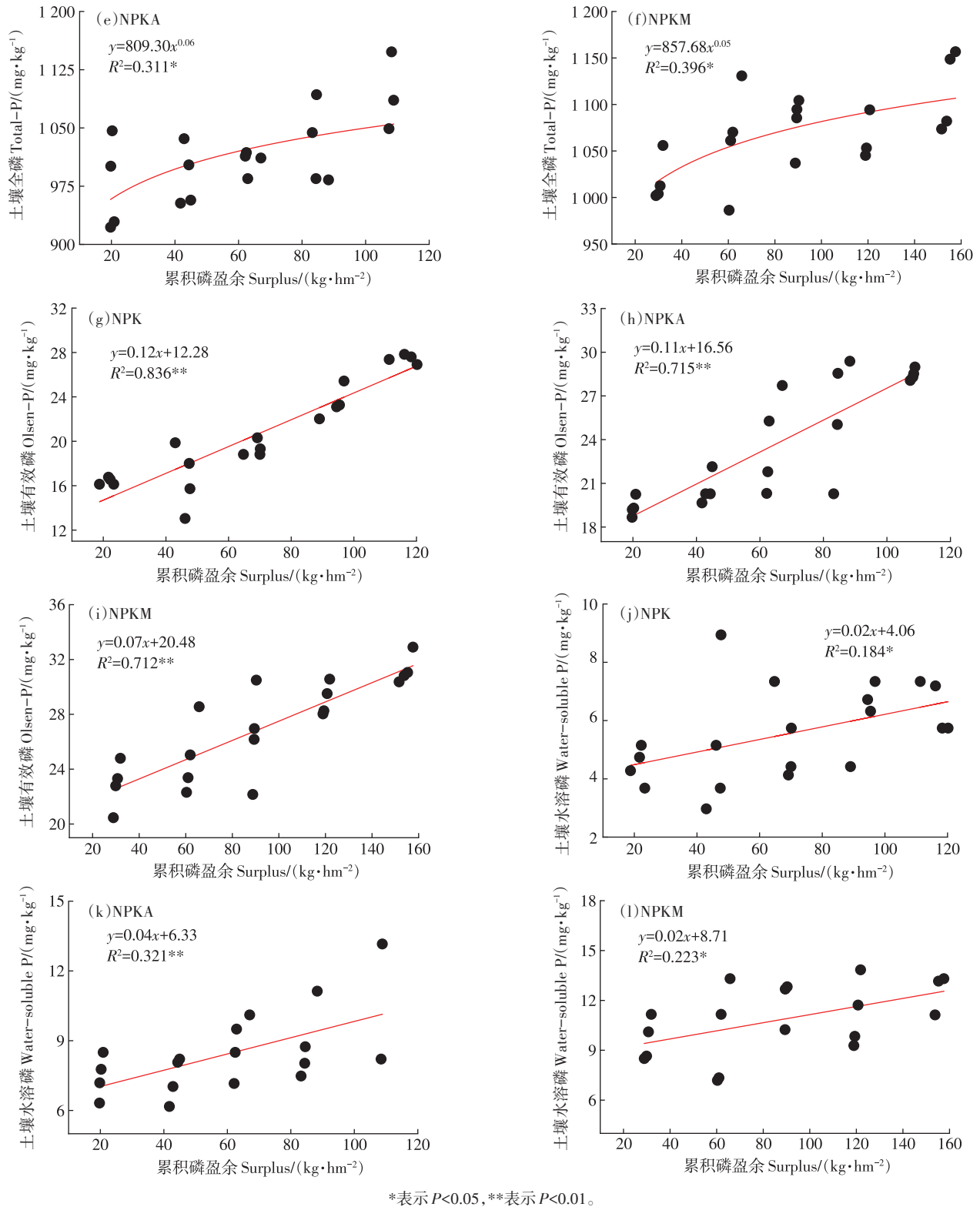


图3 土壤磷盈余与棉花产量,土壤全磷、有效磷、水溶磷含量间的关系

Figure 3 Relationship between accumulated phosphorus surplus and yield, total-P, olsen-P, water-soluble P contents

有效性具有显著影响^[19]。

本研究结果显示,NPKA和NPKM处理的土壤有效磷含量相较于NPK处理显著提高。李军等^[20]发现,

增施低分子量有机酸可显著提高土壤有效磷含量,这与本研究结果一致。酸质子反应是一个快速过程,有机酸施入土壤后,迅速活化部分稳定态Ca-P为有效

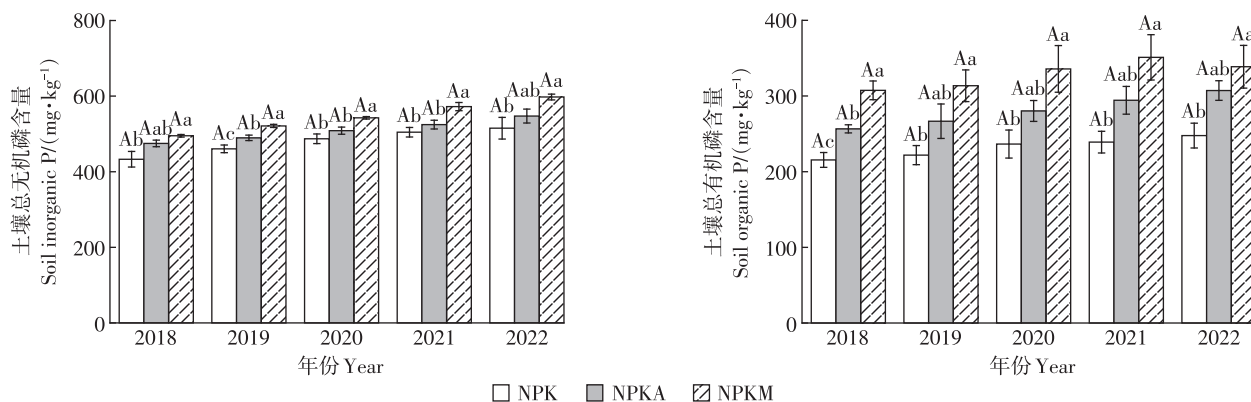


图4 不同施肥处理土壤总无机磷和土壤总有机磷含量

Figure 4 Content of total inorganic phosphorus and total organic phosphorus in soil under different fertilization treatments

表3 长期增施有机酸和有机肥土壤磷组分比例(%)

Table 3 Various forms of phosphorus in soil under long-term application of organic acids and organic fertilizers (%)

年份 Year	处理 Treatment	无机磷组分比例 Inorganic P						有机磷组分比例 Organic P			
		Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	Ca ₁₀ -P	O-P	LOP	MLOP	MROP	HRPOP
2018	NPK	2.47b	22.32a	3.21b	4.12a	43.03a	24.86a	7.33b	57.95a	14.60b	19.90a
	NPKA	2.83b	23.06a	3.67ab	3.70a	41.58ab	25.17a	7.95b	53.41b	17.71a	20.93a
	NPKM	4.30a	24.03a	4.14a	3.60a	38.36b	25.58a	8.81a	60.93a	14.49b	15.88b
2019	NPK	2.67c	21.97a	3.24c	3.97a	44.23a	23.91a	6.87ab	59.22ab	14.49a	18.56a
	NPKA	3.48b	22.89a	3.63b	3.74a	41.47b	24.79a	6.66b	54.93b	18.52a	18.61a
	NPKM	4.43a	23.75a	4.13a	3.67a	38.91c	25.11a	8.42a	60.87a	14.55a	15.43b
2020	NPK	3.34b	21.98b	3.22b	4.21a	44.45a	22.80b	8.08b	59.49a	15.21a	17.22ab
	NPKA	3.93ab	22.23ab	4.15a	3.89a	41.68b	24.12ab	8.87b	55.42b	17.62a	18.09a
	NPKM	4.71a	23.60a	4.09a	3.74a	39.53c	24.33a	10.26a	59.90a	14.49a	15.34b
2021	NPK	3.46b	21.85a	3.29b	4.27a	44.78a	22.35b	8.73b	57.71a	15.61a	17.95a
	NPKA	4.28ab	22.07a	4.20a	3.79a	42.28b	23.39ab	8.84b	57.22a	16.39a	17.54a
	NPKM	4.92a	23.74a	4.27a	3.84a	38.92c	24.31a	10.87a	59.11a	14.85a	15.18b
2022	NPK	3.64b	21.95a	3.38b	4.20a	44.88a	21.96a	8.41b	59.01a	15.31a	17.27a
	NPKA	4.69a	21.66a	4.27a	3.82a	42.50ab	23.06a	9.60ab	56.81a	16.58a	17.01ab
	NPKM	5.14a	23.64a	4.49a	3.84a	38.51b	24.38a	12.27a	58.14a	14.88a	14.71b

磷。马超等^[21]指出有机酸施入后会持续进行络合和竞争吸附作用,增加土壤有效磷含量。Ye等^[22]的研究表明增施有机肥后土壤有效磷含量显著提升,这可能是由于新疆棉田土壤中高CaCO₃含量使Ca²⁺易将有效磷固定为稳定态磷,而有机肥在转化过程中产生的有机酸等物质减少了有效磷酸盐的固定,促进了无机磷的溶解^[23]。土壤pH与土壤养分有效性密切相关,新疆棉田为碱性土壤(pH>7.5),适当降低pH可提高土壤多种矿物养分的可利用性,并促进作物根系生长和水分运输^[24]。本研究表明,土壤pH值与有效磷变化密切相关,NPKA和NPKM处理后的pH较NPK处理显著降低,这可能与有机酸和有机肥施入后土壤中酸性物质的增加有关^[25]。在新疆棉田中,pH降低加速了磷酸盐溶解,提高了土壤磷素的有效性^[26]。有机质是农

田土壤的重要组成部分,本研究中,与NPK处理相比,NPKM处理的有机质含量显著提高,因为有机肥中富含有机质,增施后可显著增加土壤有机质含量^[27]。有机质可缓解对稳定态磷的固定,促进其向有效磷的转化^[28],进而提高作物对土壤有效磷素的吸收。

3.2 增施有机酸和有机肥对土壤磷库的影响

持续5年增施有机酸和有机肥后,NPK处理的土壤全磷、有效磷和水溶磷量随着累积磷盈余量增加而线性增加。NPKA和NPKM处理的土壤全磷量随着累积磷盈余量增加呈抛物线形增加,土壤有效磷和水溶磷量呈线性上升关系。这些结果表明增施有机酸和有机肥可以活化土壤稳定态磷库^[29]。本研究中,NPKA处理提高了Ca₂-P和LOP比例,可能是由于有机酸与Ca²⁺等络合形成磷酸盐络合物,减少了土壤对

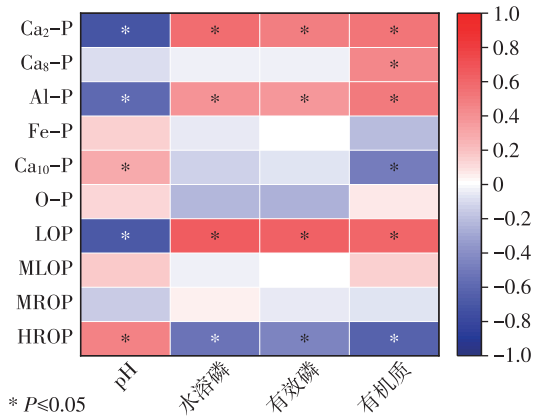


图5 不同施肥处理土壤理化性质与各磷组分比例的相关性分析

Figure 5 Correlation analysis between soil physicochemical properties and different forms of phosphorus ratios under different fertilization treatments

磷的吸附,提高了Ca₂-P含量^[30]。然而,仅在2019年和2022年Ca₂-P比例显著提高,可能是土壤有机质含量较低,限制了有机酸对无机磷的活化作用。土壤有机磷活化主要取决于有机酸的酸性强度即氢质子酸效应^[31],氢质子通过降低土壤pH促进MROP和HROP组分的矿化,提高土壤有机磷素的有效性。NPKA处理的土壤LOP比例与NPK处理无显著差异,可能是由于NPKA处理中pH值降低不足以将土壤中稳定态磷素转化为LOP,以往的研究中也有类似报道^[32]。此外,NPKA处理显著提高了HROP比例,可能是新疆棉田土壤pH较高,减缓了难溶性磷向有效磷的转化速率^[33],影响了有机酸对土壤磷素的活化作用。而NPKM处理显著提高土壤Ca₂-P和LOP比例,可能是由于有机肥施用后刺激微生物增殖和根系生长,促进微生物和根系分泌有机酸、磷酸酶和氢质子等物质^[34],有机酸通过与磷酸根竞争土壤颗粒表面的附着部分,刺激活性无机磷酸盐的释放^[35],从而增加植物可直接利用的Ca₂-P占比,与Song等^[36]和Ahmed等^[15]的研究结果一致。有机肥的增施有利于增加活性、中活性有机磷的含量,促进土壤中稳性、高稳性有机磷的转化^[37],这也可能是因为有机肥的输入带来了额外的磷,导致Ca₂-P和LOP比例提高。

3.3 土壤磷库对土壤理化性质变化的响应

土壤磷素的有效性受到多种生物和环境因素的影响。有研究表明,土壤磷组分的变化可以通过土壤理化性质的差异来解释^[38]。本研究基于Pearson模型分析得出,土壤pH、有效磷、水溶磷和有机质对土壤

磷组分比例的影响存在显著差异。土壤pH与Ca₂-P、Al-P和LOP比例呈显著负相关,与Ca₁₀-P和HROP比例呈显著正相关。有机酸和有机肥增施显著降低土壤pH,其通过与磷酸盐离子竞争阳离子结合,促进各种吸附磷酸盐的溶解,最终导致土壤中溶解更多的磷酸盐^[39]。土壤有效磷和水溶磷与Ca₂-P、Al-P和LOP比例均呈显著正相关,与HROP比例呈显著正相关。以往的研究也证明,在长期施肥条件下灰漠土土壤稳定态无机磷主要转化为土壤Ca₂-P和Al-P^[8]。土壤有机质含量提高与Ca₁₀-P和HROP比例呈显著负相关,与Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P和LOP比例呈显著正相关,说明有机质含量上升可以刺激土壤稳定态无机磷Ca₁₀-P向Ca₂-P转化,HROP向LOP转化。Gao等^[40]的研究说明,土壤活性无机磷组分的含量会随着土壤有机质增加而增加的,与本研究结果一致。土壤有机质的含量与土壤微生物密切相关,有机质的存在为微生物提供生命活动所需的营养物质,从而促进微生物群落的发展^[41]。有机酸和有机肥调控新疆棉田土壤pH趋向中性,为多数微生物提供适宜的生长环境,改变它们的活性,进而调节土壤的整体环境^[42]。靳玉婷等^[43]的研究表明微生物可以提高土壤中酶的活性和养分含量,同时丰富的磷活性微生物会促进作物对磷的吸收,影响土壤磷素转化^[44]。何强^[45]的研究表明有机酸和有机肥增施均可显著增加土壤酸杆菌门、变形菌门和放线菌门的相对丰度之和,有提高土壤肥力的潜力。综上所述,磷养分高效利用应综合考虑产量水平、累积磷盈余、当季磷肥回收率等因素,全面评价磷素利用效率。未来的农业管理策略应该维持土壤有效磷供应处于目标产量所需水平,即以满作物生长和土壤供磷能力、发挥土壤稳定态磷库潜力的需求为依据,在新疆干旱区绿洲农田增施有机酸和有机肥,将有助于实现磷肥高效利用。

4 结论

(1)增施有机酸显著降低土壤pH,增加Ca₂-P和LOP比例,从而提高土壤有效磷和水溶磷含量,提升棉花产量。

(2)有机肥的增施增加了土壤有机质含量,有机质与Ca₁₀-P和HROP比例显著负相关,激活了土壤稳定态磷库,增加Ca₂-P和LOP的比例,显著提高了有效磷和水溶磷的含量,最终提升棉花产量。

(3)针对新疆干旱区绿洲棉田土壤磷肥利用率低

的问题,可以增施有机酸和有机肥以活化土壤稳定态磷库、维持土壤磷素有效性,提高磷肥利用效率从而实现棉花高产。

参考文献:

- [1] LANGHANS C, BEUSEN A H W, MOGOLLÓN J M, et al. Phosphorus for sustainable development goal target of doubling smallholder productivity[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5:57-63.
- [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] 余海英, 李廷轩, 张树金, 等. 温室栽培条件下土壤无机磷组分的累积、迁移特征[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(5):956-962. YU H Y, LI T X, ZHANG S J, et al. The accumulation and migration of inorganic phosphorus fractions in soils under greenhouse cultivation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(5):956-962.
- [4] 李新乐, 侯向阳, 穆怀彬, 等. 连续6年施磷肥对土壤磷素积累、形态转化及有效性的影响[J]. *草业学报*, 2015, 24(8):218-224. LI X L, HOU X Y, MU H B, et al. P fertilization effects on the accumulation, transformation and availability of soil phosphorus[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(8):218-224.
- [5] ZHANG Z S, CAO C G, CAI M L, et al. Crop yield, P uptake and soil organic phosphorus fractions in response to short-term tillage and fertilization under a rape-rice rotation in Central China[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013(3):871-882.
- [6] 张春龙, 李冰, 黄容, 等. 长期施用猪粪对土壤磷含量及无机磷组分的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(10):2241-2249. ZHANG C L, LI B, HUANG R, et al. Effects of long-term application of swine manure on soil phosphorus content and inorganic phosphorus components[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(10):2241-2249.
- [7] 王斌, 刘骅, 马义兵, 等. 长期施肥对灰漠土无机磷组分的影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(4):917-921. WANG B, LIU H, MA Y B, et al. Effect of long-term fertilization on fractions of inorganic phosphorus in grey desert soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(4):917-921.
- [8] 孙桂芳, 金继运, 王玲莉, 等. 低分子量有机酸类物质对红壤和黑土磷有效性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6):1426-1432. SUN G F, JIN J Y, WANG L L, et al. Effect of low-molecular-weight organic acids on Olsen-P in red soil and black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(6):1426-1432.
- [9] 龚松贵, 王兴祥, 张桃林, 等. 低分子量有机酸对红壤无机磷活化的作用[J]. *土壤学报*, 2010, 47(4):692-697. GONG S G, WANG X X, ZHANG T L, et al. Release of inorganic phosphorus from red soils induced by low molecular weight organic acids[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4):692-697.
- [10] 刘璐, 王宇莹, 何强, 等. 新疆棉田土壤累积态磷的活化效果初探[J]. *新疆农业大学学报*, 2021, 44(3):157-162. LIU L, WANG Y Y, HE Q, et al. Preliminary study on activation effect of soil accumulated phosphorus in cotton field in Xinjiang[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2021, 44(3):157-162.
- [11] SHARPLEY A N. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(4):905-911.
- [12] POWLSON D S, PROOKES P C, CHRISTENSEN B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(2):159-164.
- [13] 杨绍琼, 党廷辉, 戚瑞生, 等. 低分子量有机酸对石灰性土壤有机磷组成及有效性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4):167-171. YANG S Q, DANG T H, QI R S, et al. Effect of low molecular weight organic acid on organic phosphorus fraction and availability in calcareous soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4):167-171.
- [14] 王静, 王磊, 张爱君, 等. 长期增施有机肥对土壤不同组分有机磷含量及微生物丰度的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(9):1161-1168. WANG J, WANG L, ZHANG A J, et al. Effects of long-term organic fertilization on the content of soil organic phosphorus fractions and abundance of soil microorganism[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(9):1161-1168.
- [15] AHMED W, HUANG J, KAILLOU L, et al. Changes in phosphorus fractions associated with soil chemical properties under long-term organic and inorganic fertilization in paddy soils of southern China[J]. *PLoS One*, 2019, 14(5):e0216881.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing:China Agriculture Press, 2000.
- [17] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J]. *中国农业科学*, 1989, 22(3):58-66. JIANG B F, GU Y C. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, 22(3):58-66.
- [18] BOWMAN R A, COLE C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. *Soil Science*, 1978, 125:95-101.
- [19] 陈建超. 腐植酸和有机肥对新疆棉田磷素有效性和棉花产量的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2020. CHEN J C. Effects of humic acid and organic fertilizer on availability and cotton yield in cotton field in Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2020.
- [20] 李军, 袁亮, 赵秉强, 等. 磷肥中腐植酸添加比例对玉米产量、磷素吸收及土壤速效磷含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3):641-648. LI J, YUAN L, ZHAO B Q, et al. Effect of adding humic acid to phosphorous fertilizer on maize yield and phosphorus uptake and soil available phosphorus content[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(3):641-648.
- [21] 马超, 张凯, 柳萍, 等. 有机酸添加对不同磷肥用量新疆棉田磷素健康状况评价[J]. *安徽农业科学*, 2023, 51(7):160-164. MA C, ZHANG K, LIU P, et al. Evaluation of organic acid addition on phosphorus health status in cotton field with different phosphorus fertilization rates in Xinjiang[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(7):160-164.

- [22] YE L, ZHAO X, BAO E C, et al. Bio-organic fertilizer with reduced rates of chemical fertilization improves soil fertility and enhances tomato yield and quality[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 177.
- [23] 吴科生, 车宗贤, 包兴国, 等. 灌漠土长期有机配施土壤肥力特征和作物产量可持续性分析[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 333-340. WU K S, CHE Z X, BAO X G, et al. Analysis on soil fertility characteristics and crop yield sustainability of irrigated desert soil with long-term organic fertilization application[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3): 333-340.
- [24] GIOVANNETTI M, SALVIOLI DI FOSSALUNGA A, STRINGLIS I A, et al. Unearthing soil-plant-microbiota crosstalk: looking back to move forward[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 13: 1082752.
- [25] QASWAR M, HUANG J, AHMED W, et al. Yield sustainability, soil organic carbon sequestration and nutrients balance under long-term combined application of manure and inorganic fertilizers in acidic paddy soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 198: 104569.
- [26] LI F R, LIU L L, LIU J L, et al. Abiotic and biotic controls on dynamics of labile phosphorus fractions in calcareous soils under agricultural cultivation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 681: 163-174.
- [27] ZHAI L M, LIU H B, ZHANG J Z, et al. Long-term application of organic manure and mineral fertilizer on N₂O and CO₂ emissions in a red soil from cultivated maize-wheat rotation in China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(11): 1748-1757.
- [28] HUANG S, ZHANG W J, YU X C, et al. Effects of long-term fertilization on corn productivity and its sustainability in an ultisol of southern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 138(1/2): 44-50.
- [29] 王一锸, 蔡泽江, 冯固. 不同磷肥调控措施下红壤磷素有效性和利用率的变化[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 235-246. WANG Y K, CAI Z J, FENG G. Effects of different phosphorus application techniques on phosphorus availability in a rape system in a red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(1): 235-246.
- [30] 张玉兰, 王俊宇, 马星竹, 等. 提高磷肥有效性的活化技术研究进展[J]. 土壤通报, 2009, 40(1): 194-202. ZHANG Y L, WANG J Y, MA X Z, et al. Advances on activating technique research in improving the validity of phosphorus fertilizer[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(1): 194-202.
- [31] WANG Y Z, CHEN X, JOANN K. Whalen, et al. Kinetics of inorganic and organic phosphorus release influenced by low molecular weight organic acids in calcareous neutral and acidic soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178(4): 555-66.
- [32] TIAN J H, WEI K, CONDRON L M, et al. Impact of land use and nutrient addition on phosphatase activities and their relationships with organic phosphorus turnover in semi-arid grassland soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(5): 675-683.
- [33] ALVAREZ R, EVANS L A, MILHAM P J, et al. Effects of humic material on the precipitation of calcium phosphate[J]. *Geoderma*, 2004, 118(3/4): 245-260.
- [34] WANG H H, LI X, LI X, et al. Long-term no-tillage and different residue amounts alter soil microbial community composition and increase the risk of maize root rot in northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196: 104452.
- [35] REN F L, SUN N, XU M, et al. Changes in soil microbial biomass with manure application in cropping systems: a meta-analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 194: 104291.
- [36] SONG K, XUE Y, ZHENG X Q, et al. Effects of the continuous use of organic manure and chemical fertilizer on soil inorganic phosphorus fractions in calcareous soil[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1164.
- [37] 谢林花, 吕家珑, 张一平, 等. 长期施肥对石灰性土壤磷素肥力的影响 II. 无机磷和有机磷[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 790-794. XIE L H, LÜ J L, ZHANG Y P, et al. Influence of long-term fertilization on phosphorus fertility of calcareous soil II. Inorganic and organic phosphorus[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 790-794.
- [38] 陈云峰, 邹贤斌, 罗时明, 等. 连年翻压紫云英对早稻田土壤性质及酶活性动态的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(2): 24-29. CHEN Y F, ZOU X B, LUO S M, et al. Effects of Chinese milk vetch (*Astragalussinicus* L.) incorporation on dynamics of soil characteristics and enzyme activities in early rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(2): 24-29.
- [39] ROBLES-AGUILAR A A, PANG J Y, POSTMA J A, et al. The effect of pH on morphological and physiological root traits of *Lupinus angustifolius* treated with struvite as a recycled phosphorus source[J]. *Plant and Soil*, 2019, 434(1): 65-78.
- [40] GAO S, HOFFMAN-KRULL K, BIDWELL A L, et al. Locally produced wood biochar increases nutrient retention and availability in agricultural soils of the San Juan Islands, USA[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 233: 43-54.
- [41] JACOBY R, PEUKERT M, SUCCURRO A, et al. The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition: current knowledge and future directions[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1617.
- [42] MAGER D M, THOMAS A D. Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: a review of their role in dryland soil processes[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(2): 91-97.
- [43] 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 等. 秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3985-3996. JIN Y T, LI X F, CAI Y, et al. Effects of straw returning with chemical fertilizer on soil enzyme activities and microbial community structure in rice-rape rotation[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(8): 3985-3996.
- [44] 刘玉学, 唐旭, 杨生茂, 等. 生物炭对土壤磷素转化的影响及其机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1690-1695. LIU Y X, TANG X, YANG S M, et al. Review on the effect of biochar on soil phosphorus transformation and mechanisms[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6): 1690-1695.
- [45] 何强. 施磷量和有机无机配施对棉田土壤微生物、磷素状况和产量的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022. HE Q. Effects of phosphorus application rate and combined application of organic and inorganic fertilizer on soil microorganism, phosphorus status and yield in cotton field[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.