



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>

施磷对灌耕草甸土无机磷形态和有效磷的影响

王宇莹, 龚会蝶, 王雪艳, 涂永峰, 宋海英, 陈波浪, 盛建东

引用本文:

王宇莹, 龚会蝶, 王雪艳, 涂永峰, 宋海英, 陈波浪, 盛建东. 施磷对灌耕草甸土无机磷形态和有效磷的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 135–142.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0752>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

长期不同培肥对苏打盐碱地稻田土壤盐碱指标和养分含量的影响

肖扬, 黄立华, 杨易, 黄金鑫, 刘伯顺, 杨靖民

农业资源与环境学报. 2023, 40(1): 126–134 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0032>

有机肥添加对不同磷肥用量新疆棉田磷素状况及棉花产量的影响

袁芳, 张凯, 马超, 张楠, 盛建东, 张文太

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 118–128 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0767>

长期施肥对不同深度稻田土壤团聚体磷素分配的影响

柳开楼, 都江雪, 郭磊, 张文菊, 韩天富, 李文军, 施林林, 余喜初

农业资源与环境学报. 2022, 39(6): 1115–1123 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0583>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王宇莹, 龚会蝶, 王雪艳, 等. 施磷对灌耕草甸土无机磷形态和有效磷的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 135–142.

WANG Y Y, GONG H D, WANG X Y, et al. Effects of phosphorus application on inorganic phosphorus forms and available phosphorus in irrigated meadow soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(1): 135–142.



开放科学 OSID

施磷对灌耕草甸土无机磷形态和有效磷的影响

王宇莹¹, 龚会蝶¹, 王雪艳¹, 涂永峰², 宋海英², 陈波浪¹, 盛建东^{1*}

(1. 新疆土壤与植物生态过程重点实验室/新疆农业大学资源与环境学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆慧尔农业集团股份有限公司, 新疆 昌吉 831100)

摘要:为探讨磷肥品种和施磷方式对灌耕草甸土无机磷形态和有效磷含量的影响,设置重过磷酸钙基施(TSP-B)、磷酸一铵基施(MAP-B)、聚磷酸铵基施(APP-B)、磷酸一铵滴施(MAP-D)、聚磷酸铵滴施(APP-D)和不施磷肥(CK)6个处理,室内培养120 d分别测定各土层无机磷和有效磷含量。结果表明:三种磷肥基施处理显著提升5~20 cm土层无机磷总量以及0~20 cm土层有效磷和Ca₂-P含量,而Ca₈-P含量仅在5~10 cm土层中显著增加($P<0.05$)。TSP-B和MAP-B处理显著增加了0~5 cm和10~20 cm土层中Fe-P含量以及5~10 cm和10~20 cm土层中Al-P含量($P<0.05$)。与MAP-B和APP-B处理相比,MAP-D和APP-D处理均显著增加了0~5 cm土层中无机磷总量及有效磷、Ca₂-P和Ca₈-P含量,且APP-D处理无机磷总量、有效磷含量和Ca₂-P含量均显著高于MAP-D处理($P<0.05$)。灌耕草甸土无机磷中Ca₁₀-P和O-P占比最高,分别占无机磷总量的37.6%和35.7%,Ca₈-P、Al-P和Fe-P分别占14.0%、6.2%和4.8%,Ca₂-P仅占1.7%。Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P和O-P与有效磷呈显著正相关($P<0.05$),其贡献顺序为Ca₂-P>Ca₈-P>Al-P>O-P。研究表明,磷肥基施可明显提高灌耕草甸土耕层(0~20 cm)中无机磷总量和有效磷含量,而滴施仅能提高其表层(0~5 cm)无机磷总量和有效磷含量。无机磷中Ca₁₀-P和O-P含量最高,其后依次为Ca₈-P、Al-P、Fe-P和Ca₂-P。对于深根系作物,磷肥应以基施为主,宜选用价格相对较低的酸性的TSP;对于浅根系作物(<5 cm),可采用磷肥滴施方式,且聚磷酸铵滴施效果优于磷酸一铵。

关键词:磷肥品种;施磷方式;灌耕草甸土;无机磷形态;有效磷

中图分类号:S153.6

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)01-0135-08

doi: 10.13254/j.jare.2021.0752

Effects of phosphorus application on inorganic phosphorus forms and available phosphorus in irrigated meadow soil

WANG Yuying¹, GONG Huidie¹, WANG Xueyan¹, TU Yongfeng², SONG Haiying², CHEN Bolang¹, SHENG Jiandong^{1*}

(1. Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes / College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Huier Agricultural Group Co., Ltd., Changji 831100, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of phosphorus fertilizer varieties and application methods on inorganic phosphorus (IP) and available phosphorus (AP) content in irrigated meadow soil, in order to provide a decision-making basis for rational phosphorus application. Six treatments were set up in an indoor cultivation: basal application of triple superphosphate (TSP-B), mono-ammonium phosphate (MAP-B) and ammonium polyphosphate (APP-B), drip application of mono-ammonium phosphate (MAP-D) and ammonium phosphate (APP-D) and no phosphate fertilizer (CK). Then the IP and AP content in each soil layer were measured after 120 days. Our results showed that TSP-B, MAP-B and APP-B significantly increased AP and Ca₂-P content at 0–20 cm soil layer, IP content at 5–20 cm

收稿日期:2021-11-03 录用日期:2021-12-17

作者简介:王宇莹(1991—),女,山西怀仁人,硕士研究生,主要从事土壤肥料研究。E-mail:18534966078@163.com

*通信作者:盛建东 E-mail: sjd@xjau.edu.cn

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项(2020A01002-3);国家重点研发计划项目(2017YFD0200205-6);新疆维吾尔自治区天山雪松计划(2020XS05);新疆维吾尔自治区研究生创新项目(XJ2021G166)

Project supported: The Key Program of Science and Technology of Xinjiang Uygur Autonomous Region, China(2020A01002-3); The National Key Research and Development Program of China(2017YFD0200205-6); Tianshan Cedar Project in Xinjiang Uygur Autonomous Region(2020XS05); Xinjiang Uygur Autonomous Region Graduate Innovation Project(XJ2021G166)

and $\text{Ca}_8\text{-P}$ content at 5–10 cm ($P<0.05$). Meanwhile, TSP-B and MAP-B also significantly increased Fe-P content at 0–5 cm and 10–20 cm, as well as Al-P content at 5–10 cm and 10–20 cm ($P<0.05$). Despite MAP-D and APP-D both significantly increased IP, AP, $\text{Ca}_2\text{-P}$ and $\text{Ca}_8\text{-P}$ content at 0–5 cm compared with treatments of MAP-B and APP-B, however, IP, AP and $\text{Ca}_2\text{-P}$ content under APP-D were all significantly higher than that under MAP-D ($P<0.05$). In irrigated meadow soil, IP was largely composed by $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ and O-P, which accounted for 37.6% and 35.7% to total IP, respectively; while $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P, and Fe-P accounted for 14.0%, 6.2%, and 4.8%, respectively, and $\text{Ca}_2\text{-P}$ only accounted for 1.7%. In addition, $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P and O-P were significantly correlated with AP ($P<0.05$), the contribution order was $\text{Ca}_2\text{-P}>\text{Ca}_8\text{-P}>\text{Al-P}>\text{O-P}$. Our results indicated that for phosphorus, basal application could significantly increase IP and AP at arable layer (0–20 cm) while drip application only increased IP and AP at topsoil (0–5 cm). In irrigated meadow soil, IP was mostly contributed by $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ and O-P, followed by $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P, Fe-P, and $\text{Ca}_2\text{-P}$, respectively. We suggested that for crops with deep-root systems, the best application method was basal application of TSP as it had a low price. While for crops with shallow-root systems (<5 cm), APP-D was superior to MAP-D in terms of soil phosphorus content.

Keywords: phosphate fertilizer variety; phosphorus application method; irrigated meadow soil; inorganic phosphorus form; available phosphorus

磷是植物生长发育必不可少的营养元素^[1]。土壤中的磷分为有机磷和无机磷两大类,其中石灰性土壤中无机磷占全磷总量的65%~85%,无机磷是作物磷营养的主要来源^[2]。蒋柏藩等^[3]将石灰性土壤无机磷分为磷酸二钙盐($\text{Ca}_2\text{-P}$)、磷酸八钙盐($\text{Ca}_8\text{-P}$)、磷酸石盐($\text{Ca}_{10}\text{-P}$)、磷酸铁盐(Fe-P)、磷酸铝盐(Al-P)和闭蓄态磷酸盐(O-P)6个形态。土壤无机磷形态与有效磷含量息息相关^[4]。韩琅丰等^[5]认为,石灰性土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是有效磷源, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Al-P和Fe-P是缓效磷源,O-P和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 是潜在磷源。李若楠等^[6]对壤土的研究表明,有效磷的增加主要通过提高有效态磷($\text{Ca}_2\text{-P}$)和缓效态磷($\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Al-P)的比例、降低无效态磷($\text{Ca}_{10}\text{-P}$)的比例来实现。

施磷可以有效改变土壤无机磷形态,增加有效磷含量^[7],但不同磷肥品种和施用方式表现不同。郭大勇等^[8]对河南玉米田的研究表明聚磷酸铵主要提升土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和Fe-P含量,且其肥料利用率高于磷酸一铵和过磷酸钙。马丹等^[9]对新疆棉田的研究表明磷酸一铵和磷酸脲对土壤有效磷的提升效果优于重过磷酸钙。随着滴灌技术的大面积应用,有研究认为与基施相比,磷肥滴施可显著提升磷素在土壤中的平均垂直移动距离,从而提高磷肥利用率^[10]。

然而在新疆农业生产中,一方面农户习惯施用磷酸二铵等碱性磷肥,导致磷肥性质与石灰性土壤不匹配,另一方面土壤中存在各种固磷机制,影响磷肥移动性,导致磷肥当季作物利用率仅为10%~20%^[11],远低于发达国家40%的水平^[12]。大量磷被固定在土壤中,不仅造成磷资源浪费^[13],还破坏土壤微团聚体结构,增加面源污染的风险^[14]。

灌耕草甸土是新疆北部地区一种典型石灰性土

壤,广泛分布在地下水位较高的低洼部位,在绿洲农业生产中具有十分重要的地位^[15]。但以往对灌耕草甸土的研究多集中在磷肥固定和有效磷损失方面^[16–17],关于不同磷肥的形态变化和有效性的研究鲜有报道,且目前对磷肥滴施下土壤有效磷垂直分布特征的认识尚未完全清楚。因此本研究通过室内土壤培养的方法,定量分析磷肥品种和施磷方式对灌耕草甸土不同土层的无机磷形态和有效磷含量的影响,以期新疆北部灌耕草甸土磷肥的合理管理提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 采样地及土壤概况

试验在新疆北部昌吉市草甸土分布区^[15]进行,采集典型的棉田灌耕草甸土(87°25′39″E, 44°10′32″N),取其耕层土壤(0~20 cm),带回实验室进行培养研究。土壤初始背景值见表1。

1.2 磷肥品种

本研究选用重过磷酸钙(TSP)、磷酸一铵(MAP)和聚磷酸铵(APP)3种磷肥,其性质及来源见表2。

1.3 试验设计

本研究在新疆慧尔农业集团股份有限公司现代化温室大棚内开展,该温室可精确控制室内温度及湿度。

试验开始前,将从棉田取回的土壤风干后过2 mm筛,混匀装盆(长×宽×高为80 cm×33 cm×26 cm,质量为0.25 kg),每盆装土50 kg,土层厚度20 cm。设重过磷酸钙基施(TSP-B)、磷酸一铵基施(MAP-B)、聚磷酸铵基施(APP-B)、磷酸一铵滴施(MAP-D)、聚磷酸铵滴施(APP-D)及不施磷肥对照(CK)6个处理(TSP溶解度低,故未设滴施),每个处理4次重复,共

表1 灌耕草甸土基本理化性质

Table 1 The basic physical and chemical properties of the irrigated meadow soil

pH (5:1)	有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	碳酸钙 CaCO ₃ /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/(g·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)
8.3	5.9	71.5	2.6	0.7	11.1	15.2	212.0

表2 三种磷肥性质及来源

Table 2 The properties and sources of three phosphate fertilizers

种类 Type	缩写 Abbreviation	有效成分 Active ingredient	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	酸碱性 Acid-base	适用土壤 Applicable soil	生产厂家 Manufacturer
重过磷酸钙	TSP	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ ·H ₂ O	0-46-0	酸性	碱性、中性土壤	云南云磷恒盛化肥有限公司
磷酸一铵	MAP	NH ₄ H ₂ PO ₄	10-50-0	酸性	各类土壤	云天化集团
聚磷酸铵	APP	(NH ₄ ,H) _{n+2} P _n O _{3n+1}	18-58-0	中性	各类土壤	云南天耀化工有限公司

24盆土,随机区组排列,进行室内培养。

各处理根据所选磷肥品种,按照每千克土施入100 mg P的标准加入,其余养分按照每千克土98 mg N(30%基施+70%追施)和39 mg K₂O(基施)补足,N不足部分由尿素(46%)补充,钾肥使用硫酸钾(51%)。基施处理把每盆土所需肥料和盆中土壤充分混匀后,通过滴施装置(图1)一次性滴水10 L(田间持水量的80%);滴施处理把所需肥料溶于水(10 L)后随水一起滴入土壤。培养期间,每周称质量灌水一次,保持土壤含水量为田间持水量的60%~80%。培养至120 d,用土钻于每盆土相同位点上,按0~5、5~10 cm和10~20 cm垂直分三层采集土壤样品,带回实验室分析。

1.4 样品处理与分析

土样风干后研磨,过1 mm与0.15 mm筛备用。采用蒋柏藩-顾益初无机磷分级方法连续浸提,测定土壤样品的Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P和Ca₁₀-P含量;采用Olsen-P法(0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃)测定土壤

有效磷含量。测样方法均参照鲍士旦《土壤农化分析》第三版中给定方法^[18],土壤无机磷总量为各无机磷形态含量之和。

1.5 数据处理与分析

采用R软件进行单因素方差分析和通径分析,采用SPSS 19.0软件进行皮尔逊相关性分析,采用Excel 2019和SigmaPlot 10.0软件进行数据和图表整理。

2 结果与分析

2.1 磷肥品种和施磷方式对灌耕草甸土无机磷总量和有效磷含量的影响

相比对照处理(CK),总体上各处理中无机磷总量和有效磷含量均有不同程度升高(表3)。其中,三种磷肥基施处理(TSP-B、MAP-B和APP-B)显著提升了5~10 cm和10~20 cm土层中无机磷总量和有效磷含量($P<0.05$),而三个土层中,除10~20 cm土层MAP-B有效磷含量显著高于APP-B外,其余基施处理间均无显著差异;两种磷肥滴施处理(MAP-D和APP-D)仅显著提升0~5 cm土层中无机磷总量和有效磷含量($P<0.05$),且APP-D处理显著高于MAP-D处理($P<0.05$)。

磷肥滴施与基施相比,APP-D处理下0~5 cm土层中无机磷总量和有效磷含量显著高于基施($P<0.05$),而在5~10 cm和10~20 cm土层中结果恰好相反。

2.2 磷肥品种和施磷方式对灌耕草甸土无机磷形态的影响

各处理三个土层中无机磷形态含量均有不同程度的变化(图2)。总体而言,三个土层中Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P和Fe-P含量相比对照均升高,而Ca₁₀-P和O-P含量变化不明显。其中,三个土层中Ca₂-P含量在三种磷肥基施处理下均比对照显著升高($P<0.05$),但三

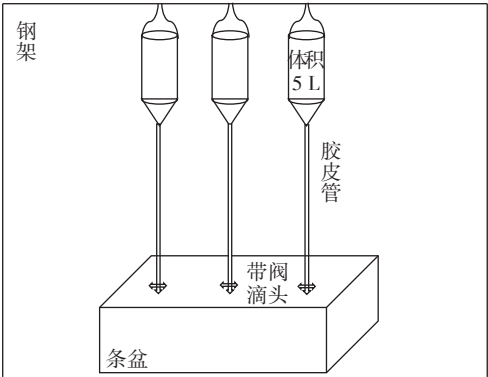


图1 滴施模拟装置

Figure 1 Drip simulation device

表3 不同磷肥品种和施磷方式对灌耕草甸土无机磷和有效磷含量的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 3 Effects of P fertilizers and applications on inorganic P and available P content of irrigated meadow soil($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatment	0~5 cm		5~10 cm		10~20 cm	
	无机磷 Inorganic phosphorus	有效磷 Available phosphorus	无机磷 Inorganic phosphorus	有效磷 Available phosphorus	无机磷 Inorganic phosphorus	有效磷 Available phosphorus
CK	494.1±6.1d	11.3±0.3d	503.8±11.4c	11.4±0.4c	514.1±8.3cd	11.0±0.7c
TSP-B	598.3±26.3bc	56.7±3.7c	601.7±12.0a	57.7±1.9ab	614.1±11.2a	60.6±9.3ab
MAP-B	575.7±27.7cd	55.6±5.5c	603.6±18.3a	67.0±7.3a	600.4±20.3ab	74.4±6.9a
APP-B	565.1±26.8cd	52.3±5.4c	596.1±17.4a	59.0±9.2ab	591.5±8.6ab	47.3±4.0b
MAP-D	687.7±35.3b	160.1±8.0b	579.9±8.7ab	42.4±9.4b	554.9±37.4bc	18.4±2.3c
APP-D	783.5±42.5a	192.2±22.7a	538.0±17.7bc	21.6±2.6c	502.8±9.1d	17.6±3.3c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments($P<0.05$).

种基施处理在0~5 cm和5~10 cm土层中差异不显著;仅0~5 cm土层 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量在两种磷肥滴施处理下比对照显著升高($P<0.05$),且APP-D处理显著高于MAP-D处理($P<0.05$)(图2a~图2c); $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量在0~5 cm土层两种滴施处理以及5~10 cm土层三种基施处理下比对照显著升高($P<0.05$),但各土层相同施磷方式间无显著差异(图2d~图2f); Fe-P 含量在0~5 cm和10~20 cm土层三种基施处理以及三个土层两种滴施处理下均比对照显著升高($P<0.05$)(图2m~图2o),但各土层施磷处理间均无显著差异;而 Al-P 含量在0~5 cm土层两个滴施处理以及5~10 cm和10~20 cm土层TSP-B和MAP-B处理与对照相比均显著提升($P<0.05$)(图2j~图2l)。

磷肥滴施与基施相比,0~5 cm土层两种滴施处理下 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量均显著高于基施处理(图2a和图2d),10~20 cm土层 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量结果恰好相反(图2c)。

2.3 磷肥品种和施磷方式对灌耕草甸土无机磷形态比例的影响

如图3所示,不施磷条件下,灌耕草甸土耕层无机磷中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 含量最多,分别占无机磷总量的37.6%和35.7%, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 分别占14.0%、6.2%和4.8%, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 最少,仅占1.7%;施入磷肥后, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 比例略有降低,范围为23.0%~37.6%和24.9%~37.8%, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 波动范围为15.2%~22.9%、5.6%~8.1%和4.2%~7.4%, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 比例升高,最大可达19.0%。

与CK相比,三种磷肥基施处理提高三个土层 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 比例,同时降低 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 比例($P<0.05$),且三种基施处理间无显著差异;与CK相比,MAP-D处理显著提高0~5 cm和5~10 cm土层 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 比例,同时显著降低 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 比例($P<0.05$), $\text{Ca}_2\text{-P}$ 占比变化较大,分

别提高13.1个百分点和5.9个百分点。APP-D处理仅在0~5 cm土层有显著影响,其中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 占比分别显著提高17.3个百分点和8.7个百分点, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 Fe-P 和 O-P 占比分别显著降低13.6、0.9个百分点和10.8个百分点($P<0.05$)(图3)。

磷肥滴施与基施相比,MAP-D处理0~5 cm土层 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 占比显著高于MAP-B处理($P<0.05$);APP-D处理0~5 cm土层 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 占比显著高于APP-B处理, Fe-P 和 O-P 占比显著低于APP-B处理,在5~10 cm和10~20 cm土层 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 占比显著低于APP-B处理($P<0.05$)(图3)。

2.4 灌耕草甸土无机磷与有效磷相关关系

灌耕草甸土无机磷和有效磷相关性分析(表4)表明,耕层(0~20 cm)土壤无机磷总量和有效磷含量呈极显著正相关关系($P<0.01$),其相关系数为0.91;无机磷中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Al-P 与有效磷也呈极显著正相关关系($P<0.01$),其中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的相关系数最大,为0.97; O-P 与有效磷呈显著正相关关系($P<0.05$)。此外 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Al-P 三种形态之间也呈极显著的正相关关系($P<0.01$), O-P 与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 之间呈显著的正相关关系($P<0.05$)。

为进一步探讨无机磷形态对有效磷的贡献,对与有效磷显著相关的无机磷形态含量和有效磷含量进行通径分析(表5),结果表明,四种无机磷形态对有效磷的直接通径系数大小顺序为 $\text{Ca}_2\text{-P}(0.89)>\text{Al-P}(0.09)>\text{Ca}_8\text{-P}(0.05)>\text{O-P}(-0.01)$,其中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 在 Al-P 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 O-P 的间接通径系数中均为最大。

3 讨论

磷肥进入土壤会与土壤发生一系列反应,转化为各种形态的无机磷在土壤中累积,不同形态无机磷有

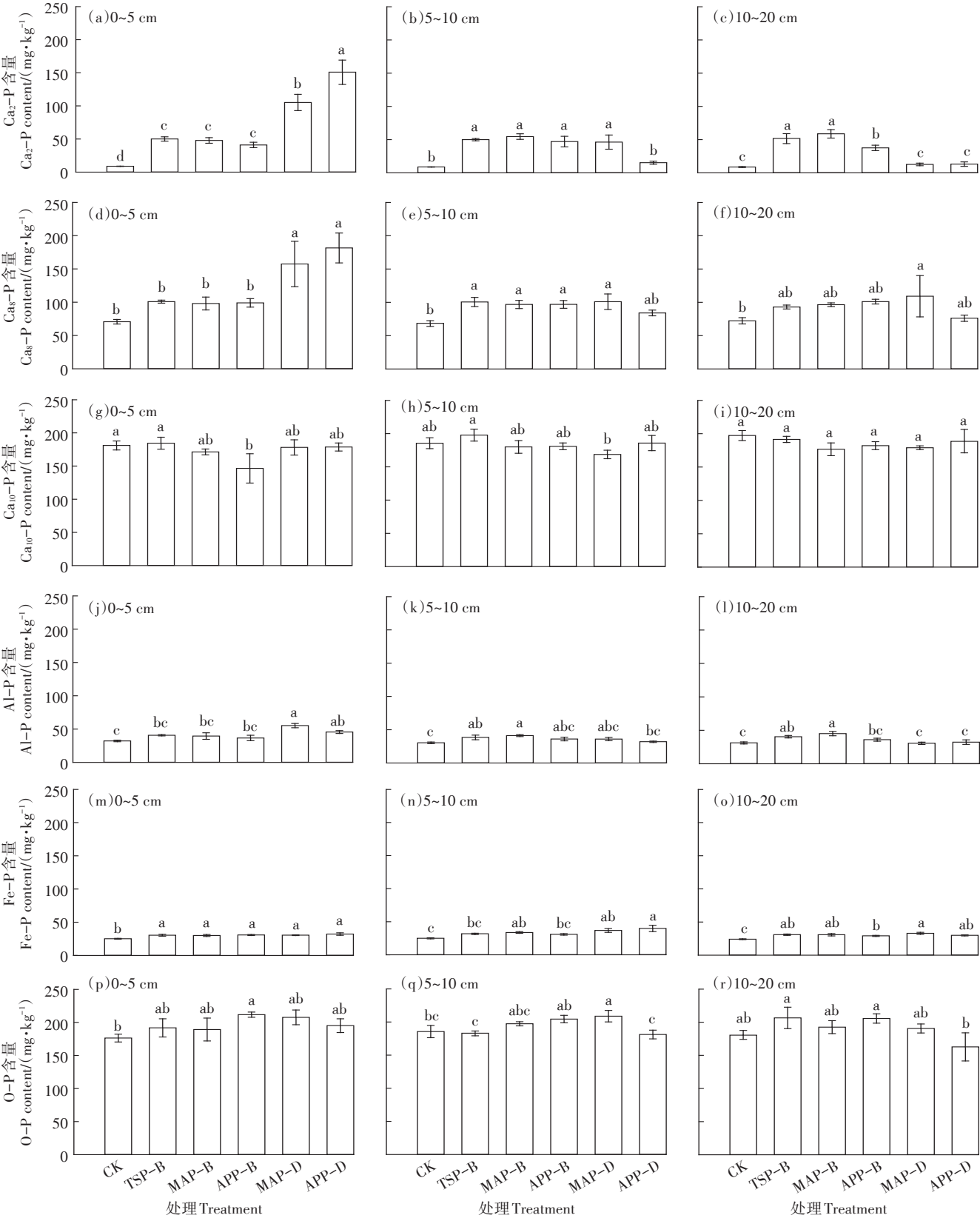
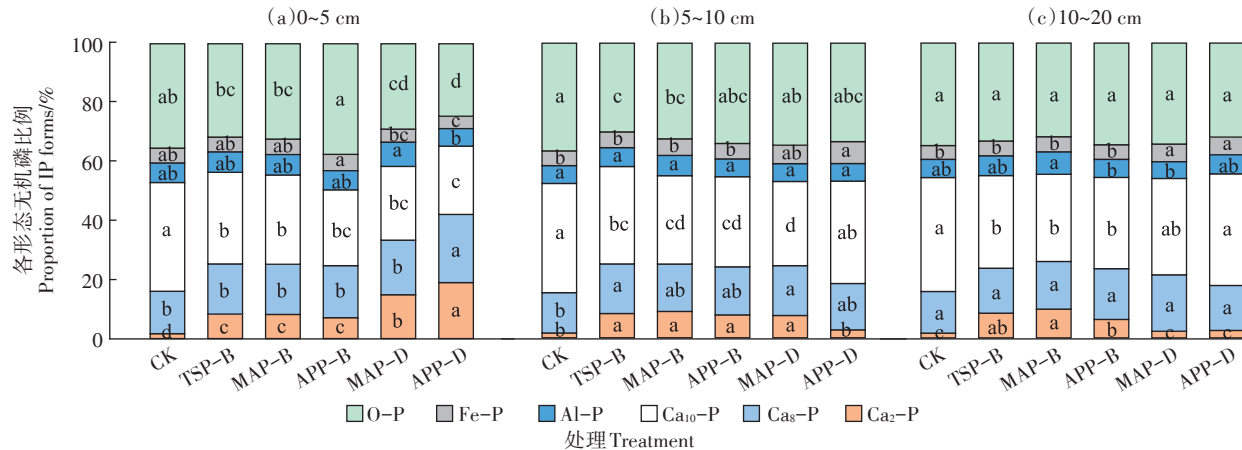


图2 不同磷肥品种和施磷方式下灌耕草甸土无机磷各形态含量

Figure 2 Inorganic phosphorus content of various forms in irrigated meadow soil under different P fertilizers and applications



不同小写字母表示同一形态不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments in the same P form ($P < 0.05$)

图3 不同磷肥品种和施磷方式下灌耕草甸土各土层无机磷形态比例

Figure 3 Proportion of inorganic phosphorus forms in each soil layer of irrigated meadow soil under different P fertilizers and applications

表4 灌耕草甸土无机磷与有效磷相关关系

Table 4 Correlation between inorganic phosphorus components and available phosphorus in irrigated meadow soil

无机磷形态 Inorganic phosphorus form	AP	IP	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P
IP	0.91**						
Ca ₂ -P	0.97**	0.92**					
Ca ₈ -P	0.79**	0.87**	0.78**				
Al-P	0.69**	0.58**	0.65**	0.32**			
Fe-P	0.14	0.29*	0.16	0.17	0.09		
O-P	0.27*	0.40**	0.29*	0.28*	0.23	0.08	
Ca ₁₀ -P	-0.07	0.09	-0.07	0.02	-0.11	0.12	-0.39

注:表中相关系数为Person相关系数。**, $P < 0.01$; *, $P < 0.05$ 。下同。

Note: The correlation coefficient in the table is Person correlation coefficient. **, $P < 0.01$; *, $P < 0.05$. The same below.

效性不同,从而导致土壤供磷能力存在差异,磷肥品种和施磷方式可以影响土壤无机磷形态及有效磷含量^[13,19-20]。

施磷能明显提高土壤无机磷总量和有效磷含量(表3)。三种磷肥基施时,不同土层间无机磷总量和有效磷含量增幅大致相同,说明基施有利于磷肥的均

匀分布;而同一土层各处理间差异不显著,说明三种磷肥肥效相似。两种磷肥滴施时,0~5 cm 土层无机磷总量和有效磷含量显著增加,10~20 cm 土层几乎不变,这与张国桥^[21]对液体磷肥移动性的研究结果一致,说明磷肥滴施主要提高施肥区域(<5 cm)的磷含量,且随土层深度增加作用逐步减弱;而0~5 cm 土层 APP-D 处理无机磷总量和有效磷含量显著高于 MAP-D 处理,是因为在石灰性土壤中 APP 可减少土壤对磷的吸附,且高磷背景下 APP 的解吸率高于 MAP,相同条件下 APP 更有利于土壤磷的保持和供给^[22],这也与 Gao 等^[23]的研究结果相同。

从无机磷形态上看,施磷后各处理 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P 含量均增加,而 O-P 和 Ca₁₀-P 含量几乎不变(图2),说明短期内施磷主要引起石灰性土壤 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P 含量的变化,这与王海龙等^[24]和郭大勇等^[8]对石灰性土壤的研究结果基本一致。

从无机磷各形态占比来看,无论施磷与否, Ca₁₀-P 与 O-P 占比之和均超过无机磷总量的 60%,是灌耕草甸土含量最高的两种形态,其余各形态占比在施磷前为 Ca₈-P > Al-P > Fe-P > Ca₂-P(图3),施磷后

表5 灌耕草甸土部分无机磷形态含量与有效磷含量的通径分析

Table 5 Path analysis of partial inorganic phosphorus form content and available phosphorus content in irrigated meadow soil

无机磷形态 Inorganic phosphorus form	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient				相关系数 Correlation coefficient
		Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	O-P	
Ca ₂ -P	0.89		0.04	0.05	>-0.01	0.98**
Ca ₈ -P	0.05	0.70		0.05	>-0.01	0.80**
Al-P	0.09	0.51	0.03		>-0.01	0.63**
O-P	-0.01	0.26	0.01	0.03		0.29*

Ca₂-P占比升高。除O-P比例略高外,本研究结果与张晓蕊^[25]对石灰性土壤中磷形态的研究结果基本相同。O-P比例高的原因,可能与取样棉田开垦种植年限长有关,有研究显示O-P含量与土壤风化强度呈正相关,种植年限越长,土壤风化程度越强,因而O-P比例越高^[26-27]。

不同类型土壤的无机磷组分对有效磷的影响不同。棕壤中Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P和Fe-P与有效磷显著相关($P<0.05$)^[28];壤土中Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P和O-P与有效磷呈极显著相关($P<0.01$)^[29];石灰性潮土中Ca₂-P、Ca₈-P和Al-P与有效磷呈极显著相关,Fe-P与有效磷呈显著相关^[30]。本研究中灌耕草甸土各无机磷形态与有效磷相关性表现为Ca₂-P>Ca₈-P>Al-P>O-P,除O-P外均呈极显著正相关(表4),这一结果与石灰性潮土略有差异,推测其可能是由地理环境和土地利用方式不同引起的,张泽兴^[31]的研究也表明不同种植体系下土壤各形态无机磷有效性不同。

本试验围绕磷肥-土壤系统展开,仅研究了土壤本身对磷肥品种和施磷方式的响应,而对于种植作物后土壤磷库的变化情况还有待进一步探索。

4 结论

(1)施磷可以显著提高灌耕草甸土无机磷总量和有效磷含量,短期内可以增加土壤Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P和Fe-P含量,而对Ca₁₀-P和O-P含量影响不大。

(2)灌耕草甸土无机磷中含量最高的形态是Ca₁₀-P和O-P,其后依次为Ca₈-P、Al-P、Fe-P和Ca₂-P,其中Ca₂-P与有效磷的相关性最强,Ca₈-P、Al-P和O-P次之。

(3)磷肥滴施仅能提高0~5 cm土层的有效磷和Ca₂-P含量,而基施可以提高整个耕层土壤的磷含量。因此,建议对于深根系作物施用磷肥以基施为主,选用价格相对较低的重过磷酸钙为宜;对于浅根系作物(<5 cm)可采用磷肥滴施方式,且聚磷酸铵滴施效果优于磷酸一铵。

参考文献:

[1] 胡霁堂,周立祥.植物营养学(下册)[M].2版.北京:中国农业大学出版社,2003:60-62. HU A T, ZHOU L X. Plant nutrition (Volume II) [M]. 2nd Edition. Beijing: China Agricultural University Press, 2003:60-62.

[2] BAI J H, YE X F, JIA J, et al. Phosphorus sorption-desorption and effects of temperature, pH and salinity on phosphorus sorption in marsh soils from coastal wetlands with different flooding conditions[J]. *Chemo-*

sphere, 2017, 188:677-688.

[3] 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.

[4] BOL R, JULICH D, BRÖDLIN D, et al. Dissolved and colloidal phosphorus fluxes in forest ecosystems: An almost blind spot in ecosystem research[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2016, 179(4): 425-438.

[5] 韩琅丰,李俊良,梁素娥.石灰性土壤中磷形态的研究[J].莱阳农学院学报,1993,10(2):79-82. HAN L F, LI J L, LIANG S E. The study of form of phosphorus in calcareous soils[J]. *Journal of Laiyang Agricultural College*, 1993, 10(2):79-82.

[6] 李若楠,王政培, BATBAYAR J, 等.等有机质壤土有效磷和无机磷形态的关系[J].中国农业科学,2019,52(21):3852-3865. LI R N, WANG Z P, BATBAYAR J, et al. Relationship between soil available phosphorus and inorganic phosphorus forms under equivalent organic matter condition in a tier soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21):3852-3865.

[7] 来璐,郝明德,彭令发.土壤磷素研究进展[J].水土保持研究,2003,10(1):65-67. LAI L, HAO M D, PENG L F. Development of researches on soil phosphorus[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(1):65-67.

[8] 郭大勇,袁玉玉,曾祥,等.石灰性土壤施用不同磷肥对玉米苗期生长和土壤无机磷组分的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):243-249. GUO D Y, YUAN Y Y, ZENG X, et al. Effect of phosphorus fertilizer on maize growth and inorganic phosphorus fractions in a calcareous soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4):243-249.

[9] 马丹,赵库,沙木和别克·阿咱别克,等.磷肥种类和施用方式对新疆棉田磷素利用及棉花产量的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(2):86-92. MA D, ZHAO K, AZANBIEKE S, et al. Effects of phosphate fertilizer types and application methods on phosphorus utilization and cotton yield in Xinjiang cotton field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(2):86-92.

[10] 王静.不同施磷策略对磷在土壤中移动、转化及磷肥利用率的影响[D].石河子:石河子大学,2016:22-30. WANG J. Effects of phosphate fertilizer application strategies on soil P mobility, transformation and P use efficiency on calcareous soil[D]. Shihezi: Shihezi University, 2016: 22-30.

[11] 程明芳,何萍,金继运.我国主要作物磷肥利用率的研究进展[J].作物杂志,2010,134(1):12-14. CHENG M F, HE P, JIN J Y. Advance of phosphate recovery rate in Chinese main crops[J]. *Crops*, 2010, 134(1):12-14.

[12] SHEN J B, YUAN L X, ZHANG J L, et al. Phosphorus dynamics: From soil to plant[J]. *Plant Physiology*, 2011, 156(3): 997-1005.

[13] 杨建浩,韩晓日,刘勇涛,等.我国磷资源和磷肥施用中存在的问题及对策[J].辽宁农业科学,2011,262(6):36-40. YANG J H, HAN X R, LIU Y T, et al. Problems and countermeasures on phosphorous resource and phosphate fertilizer use in China[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2011, 262(6):36-40.

- [14] WITHERS P J A, SYLVESTER-BRADLEY R, JONES D L, et al. Feed the crop not the soil: Rethinking phosphorus management in the food chain[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(12): 6523–6530.
- [15] 刘文惠. 1980年和2014年北疆四种典型土壤有机质、全氮和全磷的对比变化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016: 8–11. LIU W H. Change of SOM, TN and TP in four soil great group of northern Xinjiang in 1980 and 2014[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016: 8–11.
- [16] 张磊, 付明鑫, 曾胜和, 等. 奎屯垦区棉田土壤养分吸附特征与有效性研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(22): 13466–13468. ZHANG L, FU M X, ZENG S H, et al. Study on adsorbing traits and availability of soil nutrient elements in Kuitun cotton field, Xinjiang[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2011, 39(22): 13466–13468.
- [17] 新疆维吾尔自治区农业厅, 新疆维吾尔自治区土壤普查办公室. 新疆土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 253–254. Department of Agriculture of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Soil Survey Office of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Soil in Xinjiang[M]. Beijing: Science Press, 1996: 253–254.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 79–268. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 79–268.
- [19] 刘建玲, 张福锁. 小麦-玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化 II. 土壤 Olsen-P 及各形态无机磷的动态变化[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 365–368. LIU J L, ZHANG F S. Dynamics of soil P pool in a long-term fertilizing experiment of wheat-maize rotation II. Dynamics of soil Olsen-P and inorganic P[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 365–368.
- [20] 蔡秋燕, 张锡洲, 李廷轩, 等. 不同磷源对磷高效利用野生大麦根际土壤磷组分的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3207–3214. CAI Q Y, ZHANG X Z, LI T X, et al. Effects of phosphorus sources on phosphorus fractions in rhizosphere soil of wild barley genotypes with high phosphorus utilization efficiency[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(11): 3207–3214.
- [21] 张国桥. 不同磷源及其施用方式对石灰性土壤磷的有效性 & 磷肥利用效率的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2014: 26–33. ZHANG G Q. Effects of different forms of P fertilizer and its supply strategy on soil P availability and P utilization efficiency on calcareous soil[D]. Shihezi: Shihezi University, 2014: 26–33.
- [22] 杨依彬, 陈小娟, 邓兰生, 等. 聚磷酸铵对砖红壤和石灰性土壤上磷素吸附解吸行为的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(4): 697–703. YANG Y B, CHEN X J, DENG L S, et al. Effect of ammonium polyphosphate on phosphorus adsorption and desorption in laterite and calcareous soil[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, 33(4): 697–703.
- [23] GAO Y J, WANG X W, SHAH J A, et al. Polyphosphate fertilizers increased maize (*Zea mays* L.) P, Fe, Zn, and Mn uptake by decreasing P fixation and mobilizing microelements in calcareous soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(1): 1–11.
- [24] 王海龙, 张民, 刘之广, 等. 温度和施磷对石灰性潮土小麦苗期生长及磷形态的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4135–4142. WANG H L, ZHANG M, LIU Z G, et al. Effects of temperature and phosphorus application on wheat growth at seedling stage and phosphorus form in calcareous fluvo-aquic soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(12): 4135–4142.
- [25] 张晓蕊. 石灰性潮土中磷形态转化以及交换性钙对磷固定的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020: 14–22. ZHANG X R. Transformation of phosphorus speciation in a calcareous fluvo-aquic soil and effects of exchangeable calcium on phosphate fixation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020: 14–22.
- [26] 张树金, 余海英, 李廷轩, 等. 温室土壤磷素迁移变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1534–1541. ZHANG S J, YU H Y, LI T X, et al. The migration characteristics of phosphorus in greenhouse soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8): 1534–1541.
- [27] 贾志航, 吕明露, 张鑫, 等. 不同种植年限苹果园土壤磷状况和无机磷组分特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 308–312, 320. JIA Z H, LÜ M L, ZHANG X, et al. Phosphorus status and inorganic phosphorus fractions in apple orchards soil with different planting years[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 308–312, 320.
- [28] 程艳丽, 程希雷, 邹德乙. 棕壤长期定位施肥 15 年后磷素形态及有效性[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1362–1366. CHENG Y L, CHENG X L, ZOU D Y. Long-term located fertilizer experiments after 15-years in brown soil forms and availability of phosphate nutrient[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(6): 1362–1366.
- [29] WANG J, LIU W Z, MU H F, et al. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-year superphosphate application[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(3): 304–310.
- [30] 介晓磊, 杨先明, 黄绍敏, 等. 石灰性潮土长期定位施肥对小麦根际无机磷组分及其有效性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007, 208(2): 53–58. JIE X L, YANG X M, HUANG S M, et al. Effects of long-term fertilization on inorganic phosphorus fractions and availability in wheat rhizosphere in calcareous fluvo-aquic soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007, 208(2): 53–58.
- [31] 张泽兴. 北方主要农作物种植区典型土壤无机磷形态分布特征及其有效性[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021: 38–65. ZHANG Z X. Distribution characteristics and availability of inorganic phosphorus forms in typical soils of main crop growing areas in northern China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021: 38–65.