

周文利,宋盼盼,吴 军. 不同品种磷肥对土壤无机磷组分及磷有效性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(17):197-203.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.17.028

# 不同品种磷肥对土壤无机磷组分及磷有效性的影响

周文利,宋盼盼,吴 军

(河南科技大学农学院,河南洛阳 471023)

**摘要:**通过土壤培养试验研究施用不同品种磷肥对石灰性土壤中无机磷组分及土壤有效磷的影响,并通过相关分析和逐步回归分析,探讨施磷肥后土壤无机磷组分与土壤有效磷的关系。试验包括 6 个处理,分别为 CK(不施磷)、SSP(过磷酸钙)、MAP(磷酸一铵)、DAP(磷酸二铵)、CMP(钙镁磷肥)和 APP(聚磷酸铵)。结果表明,不同品种磷肥施入石灰性土壤后主要转化为  $\text{Ca}_2\text{-P}$  和  $\text{Ca}_8\text{-P}$ 。水溶性磷肥能迅速增加土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量, $\text{Ca}_2\text{-P}$  在培养 7~15 d 左右迅速向  $\text{Ca}_8\text{-P}$  转化,之后转化速率降低。CMP 和 APP 施入石灰性土壤后土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$  和  $\text{Ca}_8\text{-P}$  均表现出缓慢上升的趋势。培养结束,MAP、SSP、DAP、APP 和 CMP 处理土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$  和  $\text{Ca}_8\text{-P}$  增加量之和分别占施磷量的 100.7%、94.7%、80.6%、75.3% 和 53.1%。磷肥施入土壤后能迅速提高土壤有效磷含量。水溶性磷肥施入石灰性土壤后,在培养 15 d 内土壤有效磷含量迅速下降,之后下降速率减慢。CMP 和 APP 施入土壤后,土壤有效磷在培养过程中均较为稳定,且有上升趋势,其中 APP 处理上升趋势显著。本试验中无论施用何种磷肥土壤无机磷组分中  $\text{Ca}_2\text{-P}$  均是土壤有效磷的主要来源。

**关键词:**石灰性土壤;磷肥;无机磷形态;有效磷

**中图分类号:**S143.2;S158.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)17-0197-07

磷是植物必需营养元素之一,施用磷肥是农业生产中提高作物产量的重要技术手段。土壤中施用磷肥能提高土壤有效磷含量,从而提高磷素的供给能力<sup>[1]</sup>。但是,磷肥施入土壤后会迅速与土壤发生反应而固定,因此,磷肥的利用率普遍不高<sup>[2]</sup>。大量的磷肥投入导致土壤中磷素累积,并因此产生环境污染的风险<sup>[3-5]</sup>。传统的磷肥品种有水溶性磷肥、弱酸溶性磷肥和难溶性磷肥 3 种。不同品种磷肥施入土壤后有效性不同<sup>[6-8]</sup>。大量的研究表明,在石灰性土壤上,不同品种磷肥的肥效大小顺序为水溶性磷肥 > 弱酸溶性磷肥 > 难溶性磷肥<sup>[9-13]</sup>。近年来聚磷酸盐农用走进人们的视野,聚磷酸盐在

土壤中水解转化为正磷酸盐被植物吸收利用,是一种缓效型磷肥。水溶性磷肥施入石灰性土壤中后水溶性的正磷酸盐主要转化为  $\text{Ca-P}$ ,随着化学沉淀的发生,有效性迅速下降<sup>[14-16]</sup>。弱酸溶性磷肥施入石灰性土壤后在土壤中各种酸的作用下缓慢溶解,被植物吸收利用。聚磷酸盐通过水解转化为正磷酸盐,之后正磷酸盐会被植物吸收或土壤固定。由此可见,不同品种磷肥施入土壤后的转化过程不同是引起其有效性不同的重要因素。蒋柏藩等把土壤无机磷形态分为  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ 、 $\text{O-P}$  和  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  6 种类型<sup>[17]</sup>。一般认为  $\text{Ca}_2\text{-P}$  是土壤速效磷的主要来源, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ 、 $\text{Al-P}$  为缓效磷源。不同品种磷肥施入土壤后,土壤无机磷库中不同形态磷组分会发生何种变化,磷组分的改变对土壤有效磷的贡献如何,需要进一步研究。进一步认识不同品种磷肥施入土壤后的转化对合理施用磷肥、提高磷肥利用效率有重要意义。

收稿日期:2023-3-22

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0200205);河南科技大学博士科研启动基金(编号:13480073)。

作者简介:周文利(1978—),男,河北正定人,博士,讲师,主要从事养分资源管理方面的研究。E-mail:zwli12@163.com。

[27] 李大鹏,庄 平,严安生,等. 光照、水流和养殖密度对史氏鲟稚鱼摄食、行为和生长的影响[J]. 水产学报,2004,28(1):54-61.

[28] 罗 江,杜 浩,冷小茜,等. 不同养殖密度对长江鲟稚鱼生长

的影响[J]. 淡水渔业,2018,48(3):107-111.

[29] 熊 梅,Onxayvieng K,李大鹏,等. 急性拥挤胁迫对草鱼肌肉泛素-蛋白酶系统活性的影响[J]. 中国水产科学,2019,26(3):427-435.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

本试验以洛阳市郊区农田耕层土壤作为供试土壤。土壤风干,过 2 mm 筛后备用。土壤基本理化性状如下:pH 值 8.05,有机碳含量 7.60 g/kg,碱解氮含量 108.54 mg/kg,有效磷(Olsen-P)含量 4.04 mg/kg,速效钾含量 223 mg/kg,全磷含量 761 mg/kg。供试肥料分别为:过磷酸钙(12%  $P_2O_5$ ,颗粒状);磷酸一铵(61%  $P_2O_5$ ,白色结晶);磷酸二铵(53%  $P_2O_5$ ,白色结晶);钙镁磷肥(12%  $P_2O_5$ ,粉末状);聚磷酸铵(43%  $P_2O_5$ ,白色粉末)。肥料均磨碎备用。

### 1.2 试验设计

试验设 6 个处理,分别为不施磷肥(CK)、过磷酸钙(SSP)、磷酸一铵(MAP)、磷酸二铵(DAP)、钙镁磷肥(CMP)和聚磷酸铵(APP)。磷肥添加量均为 100 mg/kg 干土。每个处理称干土 250 g,与对应磨碎的肥料混合均匀,放入培养瓶中,加水至田间持水量的 75% 左右,滴加三氯甲苯 3 滴,用带有通气孔的封口膜封口,于 25 ℃ 恒温培养箱中培养。每隔 5 d 用称重法调节土壤含水量,使含水量保持在田间持水量的 70% ~ 80%。每个处理重复 4 次。

### 1.3 样品采集及测定

试验于 2019 年 10 月 29 日至 2020 年 2 月 26 日在河南科技大学试验室进行。在培养 1、3、7、15、30、60、120 d 后,从每个培养瓶中取土壤样品 30 g 左右。土壤样品风干后,分别磨碎过 20 目和 100 目筛备用。过 20 目筛的土样测 Olsen-P 和  $CaCl_2$ -P 含量。过 100 目筛的土样用蒋-顾法测土壤  $Ca_2$ -P、 $Ca_8$ -P、Al-P、Fe-P、O-P、 $Ca_{10}$ -P 含量<sup>[17-19]</sup>。

### 1.4 数据分析

利用 Excel 计算平均值和标准差,SPSS 19 软件进行逐步回归,Origin 2021 软件进行相关性分析和做图。

## 2 结果与分析

### 2.1 施用不同品种磷肥对土壤无机磷组分的影响

由图 1 可知,不同品种磷肥施入土壤后均能使土壤  $Ca_2$ -P 含量明显增加。在培养 1 d 后 5 种肥料处理土壤  $Ca_2$ -P 含量的排序为 SSP > MAP > APP > CMP > CK。SSP 处理土壤  $Ca_2$ -P 含量达到 60.32 mg/kg,较不施肥处理(4.08 mg/kg)提高

56.24 mg/kg,增加量占施磷总量的 56.2%,明显高于其他 4 种肥料处理。MAP、DAP、CMP 和 APP 处理土壤  $Ca_2$ -P 含量均显著高于不施磷处理, $Ca_2$ -P 的增加量分别占施磷量的 45.9%、40.9%、26.5% 和 30.0%,但处理间差异不明显。随着培养时间延长,不同磷肥处理  $Ca_2$ -P 含量的变化有不同的表现。其中 MAP、DAP 和 SSP 处理土壤中  $Ca_2$ -P 含量均表现为在培养初期随着时间延长迅速下降,之后基本稳定。而不同磷肥处理  $Ca_2$ -P 含量迅速下降持续的时间不同,MAP 和 DAP 处理为培养的前 7 d,SSP 处理为培养的前 15 d 左右。其中 MAP 处理在培养 7 d 之后  $Ca_2$ -P 含量又有所增加,30 d 后再次下降。培养 120 d 后 MAP 处理和 SSP 处理  $Ca_2$ -P 含量显著高于 DAP 处理。CMP 处理和 APP 处理土壤  $Ca_2$ -P 含量在培养过程中波动较小。其中 APP 处理在培养 15 d 后土壤  $Ca_2$ -P 含量有增高的趋势,之后稍有下降。CMP 处理在培养的前 7 d 稍有下降,之后上升,培养 30 d 后基本稳定。培养结束后 MAP、CMP、APP 和 SSP 处理土壤  $Ca_2$ -P 含量没有明显差异,均明显高于 DAP 处理,此时 SSP、MAP、DAP、CMP 和 APP 处理土壤  $Ca_2$ -P 的增加量分别占施磷量的 29.2%、27.2%、12.0%、22.9% 和 26.2%。

土壤中施入不同品种磷肥后, $Ca_8$ -P 含量也有不同程度的增加。在培养 1 d 后,不同处理土壤  $Ca_8$ -P 含量的排序为 CMP > DAP > APP > MAP > SSP > CK。其中 DAP、CMP 和 APP 处理土壤  $Ca_8$ -P 含量较不施磷处理明显增加,而 MAP 和 SSP 处理较 CK 处理没有明显差异。随着培养时间延长,不同肥料处理土壤  $Ca_8$ -P 含量的变化趋势可以分为 2 类。一类是 MAP、DAP 和 SSP 处理。随着培养时间的延长,土壤  $Ca_8$ -P 含量逐渐增加。其中 DAP 处理在培养前 30 d 增加幅度最大,之后稍有下降,至培养结束 MAP、DAP 和 SSP 处理之间没有明显差异。另一类是 CMP 和 APP 处理,两者在培养过程中, $Ca_8$ -P 含量在培养初期有小幅下降,之后有缓慢上升的趋势,至培养结束 APP 处理显著高于 CMP 处理。培养结束时,5 个肥料处理  $Ca_8$ -P 含量均显著高于不施磷处理。5 个肥料品种之间,MAP、SSP 和 DAP 处理  $Ca_8$ -P 含量明显高于 APP 处理和 CMP 处理。5 个肥料处理  $Ca_8$ -P 含量的排序为 MAP > SSP > DAP > APP > CMP。此时 SSP、MAP、DAP、CMP 和 APP 处理土壤  $Ca_8$ -P 的增加量分别

占施磷量的 65.5%、73.5%、68.6%、30.2% 和 49.1%。

土壤中 Al-P 的含量随着磷肥的施入有所增加。在培养 1 d 后,不同处理土壤中 Al-P 含量的排序为 SSP>CMP>DAP>MAP>APP>CK。其中 SSP 处理和 CMP 处理明显高于不施磷处理,而 APP、DAP、MAP 处理和 CK 之间没有明显差异。5 种磷肥施入土壤后随培养时间的延长,土壤 Al-P 含量的变化趋势大致相同,即在前期有所下降,之后缓慢上升。不同的是,SSP 处理在培养前 60 d Al-P 含量高于其他处理。在培养 60 d 后除了 MAP 处理 Al-P 含量继续升高外,其余肥料处理 Al-P 含量基本保持稳定。培养结束后,各处理 Al-P 含量为 MAP>SSP>DAP>CMP>APP>CK。其中 MAP、SSP 和 DAP 处理明显高于 CK,MAP 处理

明显高于其余 4 个磷肥处理,DAP、CMP 和 APP 处理间差异不明显。

不同磷肥施入土壤后,土壤 Fe-P 有小幅度的增加趋势。在培养 1 d 后 CMP 和 SSP 处理 Fe-P 含量显著高于不施磷处理,而其余 3 个磷肥处理与不施磷处理间没有明显差异。随着培养时间的延长,各处理均表现为培养前 3 d 先短暂上升,然后下降,15 d 后,除 MAP 处理 Fe-P 含量保持稳定外,其余肥料处理土壤 Fe-P 含量均有再次上升的趋势。培养 30 d 后,SSP 处理土壤 Fe-P 含量基本稳定不变,其余 3 个肥料处理的 Fe-P 含量均有明显下降趋势。培养 60 d 直到培养结束各处理土壤 Fe-P 含量均保持相对稳定且差异不明显。

各个处理间土壤 O-P 和  $\text{Ca}_{10}$ -P 含量在培养过程中均没有明显差异。

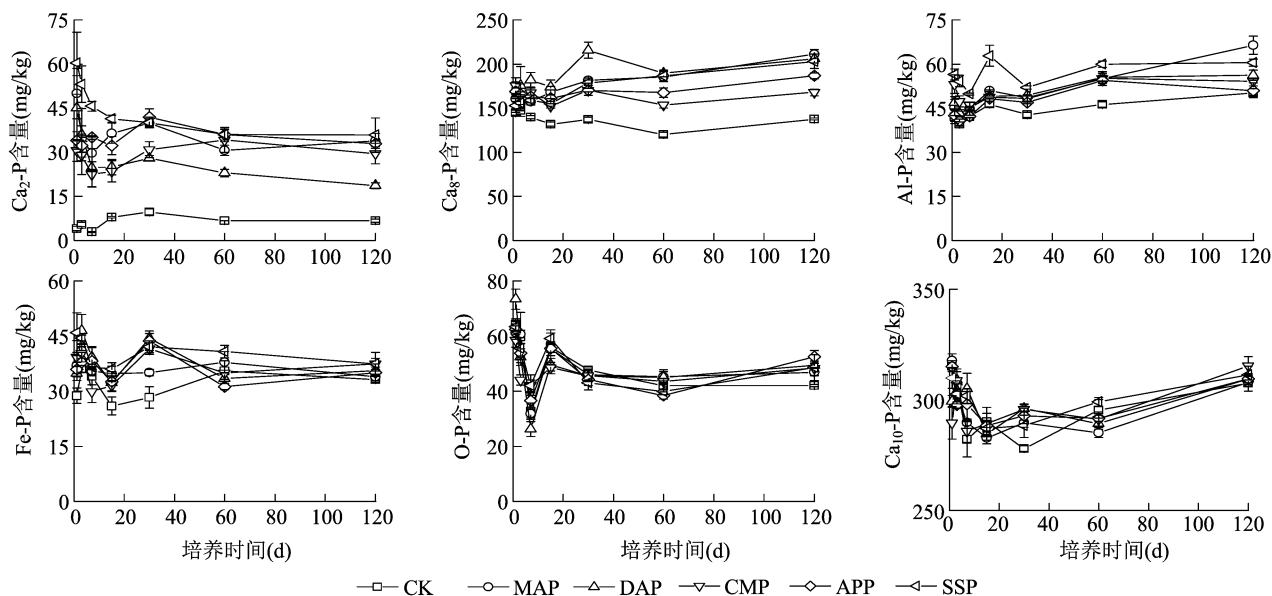


图1 施用不同品种磷肥土壤无机磷各组分含量动态变化

## 2.2 施用不同品种磷肥对土壤有效磷的影响

由图 2 可知,在培养初期,不施磷处理土壤  $\text{CaCl}_2$ -P 含量只有 0.21 mg/kg。施入磷肥后,土壤  $\text{CaCl}_2$ -P 含量明显增加。其中 SSP 处理  $\text{CaCl}_2$ -P 含量达到 6.00 mg/kg,明显高于不施磷处理和 CMP 处理,较 MAP、APP 及 DAP 处理分别高出 39.4%、55.1% 和 88.2%。不同施磷肥处理中 CMP 处理土壤  $\text{CaCl}_2$ -P 含量最低只有 1.22 mg/kg。随着培养时间的延长不同处理土壤  $\text{CaCl}_2$ -P 含量有不同的变化趋势。其中不施磷处理在整个培养过程中土壤  $\text{CaCl}_2$ -P 含量均维持在较低的水平上 (0.21 ~ 0.33 mg/kg)。SSP、MAP 和 DAP 处理有相同的变

化趋势,即在培养的前 15 d 表现出迅速下降趋势,之后下降趋势逐渐减缓。不同之处在于 DAP 处理在整个培养过程中  $\text{CaCl}_2$ -P 含量均低于 MAP 处理和 SSP 处理。CMP 处理土壤  $\text{CaCl}_2$ -P 含量在整个培养过程中没有出现大幅度变化,一直维持在 1.00 ~ 1.68 mg/kg。在培养初期 CMP 处理土壤  $\text{CaCl}_2$ -P 含量明显低于其余 4 个肥料处理,培养前 15 d 由于 MAP、SSP 和 DAP 处理  $\text{CaCl}_2$ -P 含量迅速下降,导致在培养 15 d 后 DAP 处理  $\text{CaCl}_2$ -P 含量逐渐低于 CMP 处理,培养 60 d MAP 和 SSP 处理与 CMP 处理没有明显差异。在整个培养过程中 APP 处理土壤  $\text{CaCl}_2$ -P 含量经历了最初 3 d 内的

下降之后逐渐升高,到 30 d 后又逐渐下降的过程。到培养 30 d,APP 处理  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  含量明显高于其余 4 个施肥处理,之后虽有下降,但到培养 60 d 时依然明显高于其余处理。培养结束时 APP、MAP 和 SSP 处理之间  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  含量差异不明显,但明显高于 DAP 和 CMP 处理。

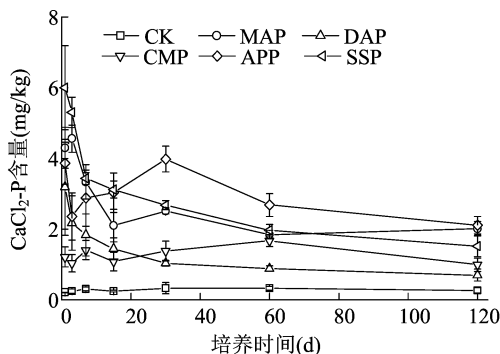


图2 施用不同品种磷肥土壤  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  含量的变化

由图 3 可知,不施磷肥处理土壤 Olsen - P 含量在整个培养过程中均保持在较低的水平(5.65 ~ 6.92 mg/kg)。施入磷肥后,土壤 Olsen - P 含量明显增高。培养第 1 天不同肥料处理土壤中 Olsen - P 含量排序为  $\text{SSP} > \text{MAP} > \text{APP} > \text{DAP} > \text{CMP}$ 。其中 SSP 处理达到 70.84 mg/kg,含量最低的 CMP 处理也达到了 24.93 mg/kg。随着培养时间的延长,MAP 和 SSP 处理土壤 Olsen - P 含量有相同的变化趋势,即在培养前 7 d 迅速下降,其中 SSP 处理下降了 20.3%,MAP 处理下降了 31.1%。到培养 30 d 稍有增加,之后缓慢下降,培养结束时,SSP 处理和 MAP 处理土壤 Olsen - P 含量分别为 26.43 mg/kg 和 27.78 mg/kg,两者之间没有明显差异。DAP 处理培养的前 3 d 土壤 Olsen - P 含量没有变化,之后迅速下降,到培养的 15 d 下降了 34.9%,只有 21.75 mg/kg。之后基本维持稳定,60 d 后缓慢下降,培养结束时只有 14.53 mg/kg,明显低 SSP、MAP 和 APP 处理。CMP 处理和 APP 处理土壤 Olsen - P 含量的变化有相同的趋势,在培养的前 15 d 基本维持稳定,APP 处理和 CMP 处理土壤 Olsen - P 分别约为 34.57 mg/kg 和 21.88 mg/kg。之后缓慢上升,60 d 后缓慢下降。在整个培养过程中 APP 处理土壤 Olsen - P 均明显高于 CMP 处理。培养结束时 5 个肥料处理土壤 Olsen - P 含量排序为  $\text{APP} > \text{MAP} > \text{SSP} > \text{CMP} > \text{DAP}$ 。其中 APP、MAP 和 SSP 处理间差异不明显,均明显高于 CMP 和 DAP 处理, CMP 和 DAP 处理之间差异不明显。

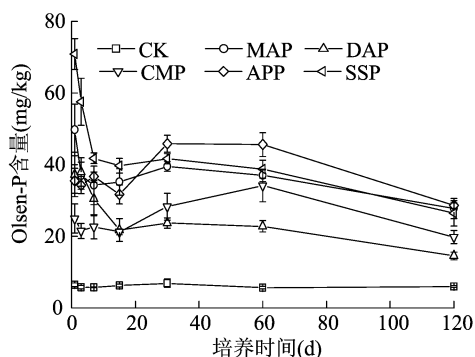
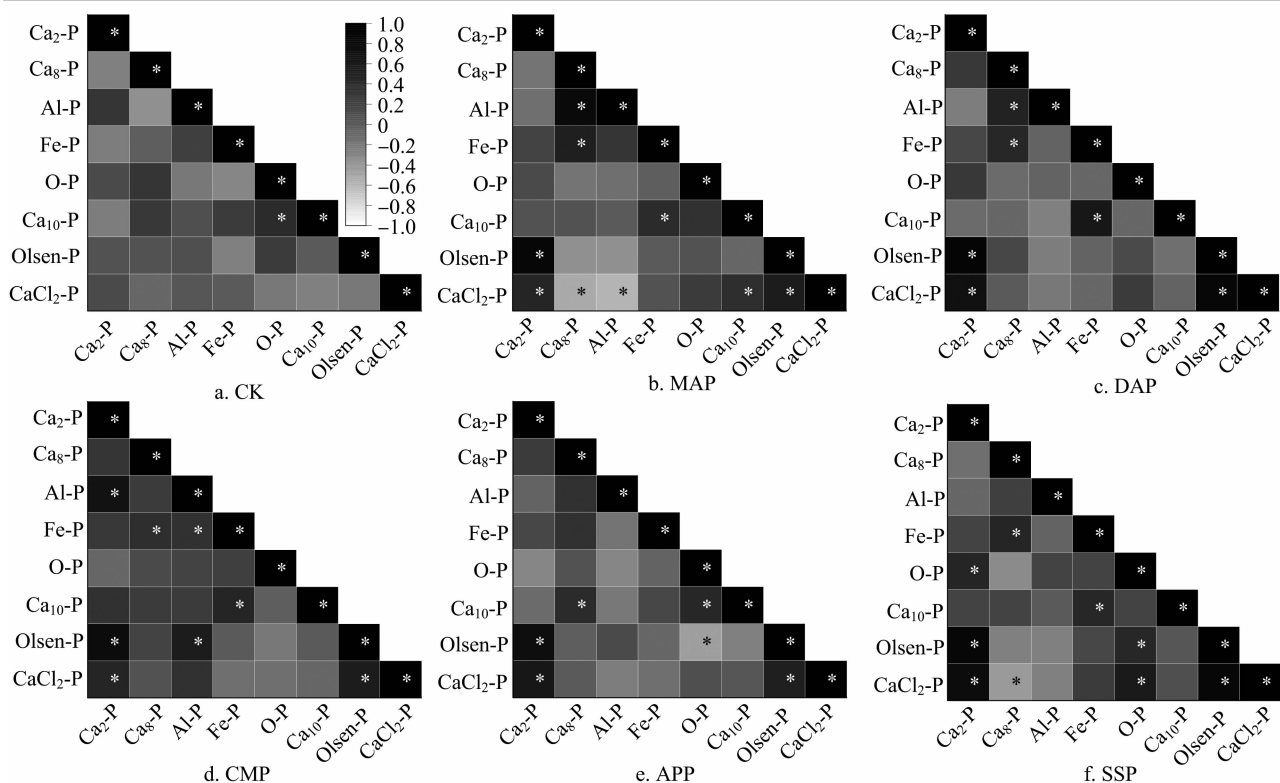


图3 施用不同品种磷肥土壤 Olsen-P 含量的变化

### 2.3 施用不同品种磷肥土壤有效磷与无机磷组分的关系

由图 4 可见,在不施磷处理中土壤 Olsen - P 和  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  含量与土壤中各无机磷组分均没有显著相关关系。在施用磷肥的处理中,土壤 Olsen - P 含量均与  $\text{Ca}_2 - \text{P}$  含量显著正相关。其中 MAP 处理和 DAP 处理土壤 Olsen - P 含量只与  $\text{Ca}_2 - \text{P}$  含量呈显著正相关关系;CMP 处理还与  $\text{Al} - \text{P}$  含量显著正相关;APP 处理与  $\text{O} - \text{P}$  显著负相关;SSP 处理还与  $\text{O} - \text{P}$  显著正相关。所有的施肥处理中,土壤  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  含量均与土壤  $\text{Ca}_2 - \text{P}$  含量正相关。其中 DAP、CMP 和 APP 处理仅与  $\text{Ca}_2 - \text{P}$  含量正相关;MAP 处理还与  $\text{Ca}_{10} - \text{P}$  含量正相关,与  $\text{Ca}_8 - \text{P}$  和  $\text{Al} - \text{P}$  含量显著负相关;SSP 处理与  $\text{Ca}_8 - \text{P}$  含量显著负相关,与  $\text{O} - \text{P}$  含量显著正相关。

以不同处理  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  和 Olsen - P 含量为因变量,以各无机磷组分含量为自变量,分别进行了多元线性逐步回归分析,结果(表 1)表明,不施磷肥土壤有效磷( $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  和 Olsen - P)与土壤中无机磷各组分含量之间均没有显著相关关系。施用磷肥后土壤无机磷组分中的  $\text{Ca}_2 - \text{P}$  对土壤有效磷均有正效应。对  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  来说,其中 APP 处理中  $\text{Ca}_2 - \text{P}$  的正效应最大,其次是 SSP 处理,之后依次是 DAP、MAP 和 CMP 处理。对 Olsen - P 来说,其中 APP 处理中  $\text{Ca}_2 - \text{P}$  的正效应最大,其次是 SSP 处理,之后依次是 CMP、MAP 和 DAP 处理。不同磷肥处理土壤中其余无机磷组分对土壤有效磷有不同的效应。其中 MAP 处理中  $\text{Al} - \text{P}$  对  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  和 Olsen - P 均有负效应。DAP 处理中  $\text{Fe} - \text{P}$  对 Olsen - P 有负效应。CMP 处理中  $\text{Ca}_{10} - \text{P}$  对 Olsen - P 有负效应。APP 处理中  $\text{O} - \text{P}$  对  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  有正效应。SSP 处理中  $\text{Ca}_8 - \text{P}$  对  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  有负效应, $\text{Fe} - \text{P}$  对  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  有正效应。



\* 表示在 0.05 水平显著相关

图4 施用不同品种磷肥土壤各无机磷组分与土壤有效磷的关系

表1 各无机磷组分对土壤有效磷的逐步回归

处理	CaCl <sub>2</sub> - P	R <sup>2</sup>	P 值	Olsen - P	R <sup>2</sup>	P 值
CK	—	—	—	—	—	—
MAP	$Y_1 = 5.089 + 0.048X_1 - 0.077X_3$	0.438	0.000	$Y_2 = 21.962 + 0.794X_1 - 0.272X_3$	0.823	0.000
DAP	$Y_1 = -0.549 + 0.075X_1$	0.511	0.000	$Y_2 = 15.400 + 0.757X_1 - 0.294X_4$	0.851	0.000
CMP	$Y_1 = 0.420 + 0.029X_1$	0.221	0.007	$Y_2 = 51.127 + 0.819X_1 - 0.170X_6$	0.679	0.000
APP	$Y_1 = -4.370 + 0.155X_1 + 0.041X_5$	0.470	0.000	$Y_2 = 1.342 + 1.019X_1$	0.555	0.000
SSP	$Y_1 = 2.157 + 0.091X_1 - 0.046X_2 + 0.119X_4$	0.844	0.000	$Y_2 = 4.586 + 0.851X_1$	0.802	0.000

注:  $Y_1$  代表  $\text{CaCl}_2 - \text{P}$  含量,  $Y_2$  代表 Olsen - P 含量;  $X_1 \sim X_6$  分别代表  $\text{Ca}_2 - \text{P}$ 、 $\text{Ca}_8 - \text{P}$ 、 $\text{Al} - \text{P}$ 、 $\text{Fe} - \text{P}$ 、 $\text{O} - \text{P}$ 、 $\text{Ca}_{10} - \text{P}$  含量。

### 3 讨论

#### 3.1 不同品种磷肥在石灰性土壤中的转化

磷肥施入土壤后,很快发生物理和化学反应,转化成一些新的磷酸盐形态<sup>[15-16]</sup>。大量研究表明,磷肥施入石灰性土壤,能显著增加土壤中  $\text{Ca}_2 - \text{P}$ 、 $\text{Ca}_8 - \text{P}$ 、 $\text{Al} - \text{P}$  和  $\text{Fe} - \text{P}$  的含量,而短期内  $\text{O} - \text{P}$  和  $\text{Ca}_{10} - \text{P}$  难以生成<sup>[20-24]</sup>。本试验也得到了相同的结论,5 种磷肥施入土壤后均能明显增加土壤  $\text{Ca}_2 - \text{P}$  和  $\text{Ca}_8 - \text{P}$  含量,其中 MAP、SSP、DAP、APP 和 CMP 处土壤  $\text{Ca}_2 - \text{P}$  和  $\text{Ca}_8 - \text{P}$  增加量之和分别占施磷量的 100.7%、94.7%、80.6%、75.3% 和 53.1%。 $\text{Al} - \text{P}$ 、 $\text{Fe} - \text{P}$ 、 $\text{O} - \text{P}$  和  $\text{Ca}_{10} - \text{P}$  含量变化不明显。由此可

见,磷肥施入石灰性土壤后短期内主要转化为了  $\text{Ca}_2 - \text{P}$ 、 $\text{Ca}_8 - \text{P}$ 。

不同磷肥品种施入土壤后,土壤无机磷各组分变化不同。水溶性磷肥 SSP、MAP 和 DAP 施入土壤后能迅速增加土壤  $\text{Ca}_2 - \text{P}$  含量,随着培养时间延长在短期内土壤  $\text{Ca}_2 - \text{P}$  含量迅速下降,之后趋于平稳。而  $\text{Ca}_8 - \text{P}$  含量在施肥之初有一定增加,随着培养时间延长,其含量不断地缓慢增加。说明有一部分  $\text{Ca}_2 - \text{P}$  转化为了  $\text{Ca}_8 - \text{P}$ 。有研究表明, $\text{Ca}_2 - \text{P}$  向  $\text{Ca}_8 - \text{P}$  转化的速度受土壤 pH 值影响。蒋柏藩的研究表明,在 pH 值 7.9 的石灰性土壤中,磷酸二钙在土壤中培养 4 周可检测出磷酸八钙,而 pH 值 6.9 的土壤需要 44 周<sup>[15]</sup>。本试验中 DAP 处理在培

养 30 d 后土壤  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量基本稳定, SSP 处理和 MAP 处理在培养 60 d 左右  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量基本稳定, 这可能与不同肥料性质有关。SSP 是化学酸性肥料, 其中主要是水溶性磷酸一钙和难溶性的硫酸钙, 此外还有少量的硫酸铝和硫酸铁, 以及游离的磷酸和硫酸。SSP 施入土壤后发生异成分溶解, 在石灰性土壤中, 磷酸根在扩散过程中与土壤中的钙、镁等离子结合, 形成一系列的磷酸钙、磷酸镁等盐类。MAP 是化学酸性肥料, 与化学弱碱性的 DAP 施入土壤后不发生异成分溶解, 其中的正磷酸根与土壤中的钙发生化学反应直接生成一系列的磷酸钙盐。由此可见, 随着肥料 pH 值的增加, 在土壤中  $\text{Ca}_2\text{-P}$  转化为  $\text{Ca}_8\text{-P}$  的进程越快。从  $\text{Ca}_2\text{-P}$  和  $\text{Ca}_8\text{-P}$  的总量来看, SSP 处理和 MAP 处理均表现为缓慢增加趋势, 培养结束较培养之初分别增加了 16.3% 和 25.6%。DAP 处理在培养 30 d 左右达到高峰, 之后稍有下降。3 种肥料处理之间差异不明显。CMP 是弱酸溶性磷肥, 主要成分为  $\alpha$ -磷酸三钙、氧化钙、氧化镁和二氧化硅等。钙镁磷肥在水中的溶解度随 pH 值升高而降低, 在 pH 值 8 时溶解度约为 1%<sup>[25]</sup>。因此, CMP 施入石灰性土壤中后, 在培养初期  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量明显低于水溶性磷肥处理, 而  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量与水溶性磷肥差异不明显, 随着培养时间的延长  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量也并没有明显增高的趋势。APP 是一种含有氮和磷的聚磷酸盐。APP 施入土壤中后聚磷酸盐逐渐水解成为正磷酸盐。在石灰性土壤中聚磷酸盐有较好的稳定性<sup>[26]</sup>, 因此 APP 施入土壤中后  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量在培养过程中没有出现较大的波动, 而是有随着培养时间延长而缓慢增加的趋势。由于聚磷酸盐对钙、镁等的螯合作用, 使得形成不溶性磷酸钙的过程受到抑制<sup>[27]</sup>, 因此  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量增加幅度较水溶性磷肥处理低。

### 3.2 不同品种磷肥对石灰性土壤有效磷的影响

磷肥施入土壤能显著增加土壤可溶态磷的含量<sup>[28]</sup>。水溶性磷肥施入土壤后, 磷有效性迅速下降。Lewis 等的研究表明, 水溶性磷肥施入土壤后在 24 h 内有效性迅速下降, 之后保持相对稳定<sup>[29]</sup>。本试验有相似的结果。不同之处在于, 水溶性磷肥施入土壤后, 无论是  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  还是 Olsen-P 含量迅速下降持续 7~15 d, 之后相对稳定。弱酸溶性磷肥钙镁磷肥施入土壤后, 磷素缓慢释放, 相对于水溶性磷肥来说, 短期内 (10 d 左右) 有效磷含量较低, 之后有效磷含量明显增加。1 个月后有有效磷和过磷

酸钙相近<sup>[25,30-31]</sup>。本试验结果与之类似, 在培养前 15 d 含量很低, 30 d 后, CMP 处理有效磷含量与 DAP 处理相近, 培养 60 d 后与 MAP 和 SSP 处理相近。APP 施入土壤后, 聚磷酸需要水解为正磷酸才能被作物吸收, 成为有效态磷。由于聚磷酸可以络合土壤中的钙、镁、铝、铁等离子, 形成稳定可溶的混合物, 因此降低了形成磷酸盐沉淀的过程, 从而可以在一定时期内维持土壤有效磷的含量<sup>[32-34]</sup>。本试验也得到了相同的结果。

土壤中不同无机磷组分对土壤有效磷的贡献不同。一般认为  $\text{Ca}_2\text{-P}$  是土壤速效磷的来源,  $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ 、 $\text{Al-P}$  为缓效磷源<sup>[35]</sup>, 在各个磷组分中  $\text{Ca}_2\text{-P}$  对有效磷贡献最大<sup>[36]</sup>。冯固等的研究表明, 石灰性土壤中施用重过磷酸钙, 不同磷组分对玉米有效性顺序分别为  $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Ca}_{10}\text{-P}$ <sup>[37]</sup>。张英鹏等在褐土中施用磷酸一铵, 土壤无机磷组分中对速效磷贡献最大的是  $\text{Ca}_2\text{-P}$ , 其次是  $\text{Fe-P}$ , 再次是  $\text{Ca}_8\text{-P}$ <sup>[38]</sup>。在灰漠土中, 施用重过磷酸钙, 各形态无机磷对速效磷的有效性依次为  $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\text{O-P}$ <sup>[39]</sup>。本试验通过相关分析和多元逐步回归分析表明, 在石灰性土壤中施用不同种磷肥  $\text{Ca}_2\text{-P}$  均对土壤有效磷产生正效应, 可见无论施用哪种磷肥均通过改变土壤中  $\text{Ca}_2\text{-P}$  的含量来影响土壤磷的有效性。

## 4 结论

不同品种磷肥施入石灰性土壤后主要转化为  $\text{Ca}_2\text{-P}$  和  $\text{Ca}_8\text{-P}$ , 其次是  $\text{Al-P}$  和  $\text{Fe-P}$ ,  $\text{O-P}$  和  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  没有明显变化。其中水溶性磷肥 (SSP、MAP 和 DAP) 施入土壤后首先主要转化为  $\text{Ca}_2\text{-P}$ , 在短期内土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量迅速下降, 其中, MAP 和 DAP 处理迅速下降持续 7 d 左右, SSP 处理持续 15 d 左右, 之后下降速度减缓, 其中, DAP 处理下降幅度最大。伴随着  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量下降,  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量上升, 至培养结束 3 种水溶性磷肥处理土壤  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量没有明显差异。CMP 和 APP 施入石灰性土壤后, 在整个培养过程中, 土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量较为稳定, 总体上有小幅度的上升趋势。 $\text{Ca}_8\text{-P}$  也有相同的变化趋势。其中, APP 处理  $\text{Ca}_2\text{-P}$  和  $\text{Ca}_8\text{-P}$  均高于 CMP 处理。

磷肥施入土壤后能迅速提高土壤有效磷含量。其中水溶性磷肥处理明显高于 CMP 和 APP 处理。在培养的 15 d 内水溶性磷肥处理的土壤有效磷含

量迅速下降,之后缓慢下降。CMP 和 APP 处理土壤有效磷在培养过程中均较为稳定,且有上升趋势,其中 APP 处理上升趋势明显。

不施磷肥土壤中各无机磷组分含量均与土壤有效磷没有显著相关关系。不同品种磷肥施入土壤之后,均表现出土壤无机磷组分中  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量与土壤有效磷有显著正相关关系,由此可见  $\text{Ca}_2\text{-P}$  是施磷肥后土壤有效磷的主要来源。

#### 参考文献:

- [1] Mussarat M, Ali H, Muhammad D, et al. Comparing the phosphorus use efficiency of pre-treated (organically) rock phosphate with soluble P fertilizers in maize under calcareous soils[J]. PeerJ, 2021, 9:e11452.
- [2] Bertrand I, McLaughlin M J, Holloway R E, et al. Changes in P bioavailability induced by the application of liquid and powder sources of P, N and Zn fertilizers in alkaline soils[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, 74(1): 27-40.
- [3] Li H, Huang G, Meng Q, et al. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review[J]. Plant and Soil, 2011, 349(1): 157-167.
- [4] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [5] 杨振兴, 周怀平, 解文艳, 等. 长期施肥褐土有效磷对磷盈亏的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1529-1535.
- [6] 吉冰洁, 李文海, 徐梦洋, 等. 不同磷肥品种在石灰性土壤中的磷形态差异[J]. 中国农业科学, 2021, 54(12): 2581-2594.
- [7] 张璐, 肖靖秀, 郑毅, 等. 不同品种磷肥施用对玉米根际土壤磷组分的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(6): 1076-1082.
- [8] Zhao Y N, Li R K, Huang Y F, et al. Effects of various phosphorus fertilizers on maize yield and phosphorus uptake in soils with different pH values[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2022, 68(12): 1746-1754.
- [9] 黎耀辉, 杜忠诚, 王福英, 等. 陕西关中石灰性土壤上几种形态磷肥肥效的比较[J]. 土壤通报, 1963(6): 1-5.
- [10] 周伟金, 刘光崧. 钙镁磷肥在淮北石灰性土壤上的肥效[J]. 土壤学报, 1965, 2(1): 89-91.
- [11] 李阿荣, 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤适用磷肥品种的研究[J]. 土壤, 1985, 17(6): 319-322.
- [12] 刘世亮, 介晓磊, 李有田, 等. 不同磷源在石灰性土壤中的供磷能力及形态转化[J]. 河南农业大学学报, 2002, 36(4): 370-373.
- [13] 王少仁, 夏培桢. 石灰性土壤上三种磷肥不同用量的磷肥利用率及其缓效率[J]. 土壤通报, 2008, 39(6): 1363-1368.
- [14] Larsen S, Widdowson A E. Evidence of dicalcium phosphate precipitation in a calcareous soil[J]. Journal of Soil Science, 1970, 21(2): 364-367.
- [15] 蒋柏藩. 磷肥在土壤中的形态转化及其有效性[J]. 土壤学进展, 1981, 9(2): 1-11.
- [16] 尹金来, 曹翠玉, 史瑞和. 磷肥在石灰性土壤中的形态转化及其有效性[J]. 土壤通报, 1989, 20(1): 14-16.
- [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.
- [18] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990, 22(2): 101-102, 110.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 81-83, 93-96.
- [20] 刘秀珍, 孙立艳. 膨润土和磷肥对石灰性土壤无机磷形态转化及有效性的影响[J]. 核农学报, 2004, 18(1): 59-62.
- [21] 尹金来, 沈其荣, 周春霖, 等. 猪粪和磷肥对石灰性土壤无机磷组分及有效性的影响[J]. 中国农业科学, 2001, 34(3): 296-300.
- [22] 吕家珑, 刘文革, 王旭东, 等. 长期施肥对土壤无机磷形态组成的影响[J]. 西北农业大学学报, 1995, 23(3): 51-54.
- [23] 杨毅, 赵文婷. 不同施肥制度对北方石灰性土壤无机磷形态影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(7): 28-33.
- [24] 黄欣欣, 廖文华, 刘建玲, 等. 长期秸秆还田对潮土土壤各形态磷的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 779-789.
- [25] 吕美林, 鲁如坤. 钙镁磷肥肥效的再探讨[J]. 土壤通报, 1985, 16(1): 35-38.
- [26] 杨旭, 张承林, 胡义熬, 等. 农用聚磷酸铵在土壤中的有效性研究进展及在农业上的应用[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3): 1-6.
- [27] Amer F, Mostafa H E. Effect of pyrophosphate on orthophosphate reactions in calcareous soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(5): 842-847.
- [28] Sonmez O, Pierzynski G M. Changes in soil phosphorus fractions resulting from crop residue removal and phosphorus fertilizer[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2017, 48(8): 929-935.
- [29] Lewis G C, Baker G O, Snyder R S. Phosphate fixation in calcareous soils[J]. Soil Science, 1950, 69(1): 55-62.
- [30] 王少仁, 夏培桢. 钙镁磷肥在石灰性土壤上的肥效变化及原因探讨[J]. 土壤肥料, 1991(6): 11-14.
- [31] 邱慧珍. 石灰性土壤施用钙镁磷肥对春小麦的增产效果[J]. 甘肃农业科技, 1997(5): 30-31.
- [32] 周文利. 不同品种磷肥对土壤有效磷及玉米苗期生长的影响[J]. 磷肥与复肥, 2022, 37(11): 45-48.
- [33] 熊子怡, 邱焯, 郭琳钰, 等. 聚磷酸铵在土壤中有有效性的变化及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(8): 1473-1480.
- [34] 单旭东, 石琳, 田帅, 等. 玉米秸秆还田后磷肥减量对冬小麦磷素积累量和产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 884-892.
- [35] 孙正国. 不同肥力石灰性潮土对小麦苗期磷吸收利用的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(11): 103-107.
- [36] 甄清香, 邵煜庭. 施磷肥对土壤磷素形态转化和有效性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 1994, 29(4): 392-395.
- [37] 冯固, 杨茂秋, 白灯莎, 等. 用 $^{32}\text{P}$ 示踪法研究石灰性土壤中磷素的形态及有效性变化[J]. 土壤学报, 1996, 33(3): 301-307.
- [38] 张英鹏, 陈清, 李彦, 等. 不同磷水平对山东褐土耕层无机磷形态及磷有效性的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 245-248.
- [39] 赵靓, 侯振安, 柴颖, 等. 长期施磷对灰漠土无机磷形态的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 236-242.