

# 过磷酸钙对石灰性土壤有效磷及无机磷组分的影响

周文利\*, 宋盼盼, 吴 军

(河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471023)

**摘 要:** 为研究水溶性磷肥在石灰性土壤中的转化, 采用室内土壤培养的方法, 在土壤中分别添加过磷酸钙 0、6.25、12.5、25、50 和 100 mg/kg 干土 (即 P0、P6.25、P12.5、P25、P50 和 P100 处理), 保持土壤湿度为田间持水量的 70% ~ 80%, 在 25℃ 恒温培养箱中培养 120 d。培养期间在第 1、3、7、15、30、60 和 120 d 连续采样, 测定土壤 Olsen-P、CaCl<sub>2</sub>-P 和各无机磷组分的含量。结果表明, 在石灰性土壤中施用过磷酸钙能显著增加土壤 Olsen-P 和 CaCl<sub>2</sub>-P 含量, 在一定的培养时间内, 过磷酸钙转化为土壤 Olsen-P 和 CaCl<sub>2</sub>-P 的比例不随施肥量的变化而变化。随着培养时间的延长, 土壤有效磷含量逐渐下降, 尤其是培养前期 (前 7 d) 土壤有效磷含量显著下降, 之后下降速率减缓。施入土壤中的过磷酸钙主要转化为 Ca<sub>2</sub>-P 和 Ca<sub>8</sub>-P (两者之和约占 90%), 其次是 Al-P 和 Fe-P (两者之和约占 10%), 在短期内 O-P 和 Ca<sub>10</sub>-P 相对较为稳定。随着培养时间延长, Ca<sub>2</sub>-P 逐渐向 Ca<sub>8</sub>-P 转化, 在培养的前 30 d 转化速率较快, 之后速率减缓。随着磷肥施用量的增加, Ca<sub>2</sub>-P 转化为 Ca<sub>8</sub>-P 所需的时间逐渐延长。Olsen-P 和 CaCl<sub>2</sub>-P 含量均与土壤无机磷组分中的 Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P 和 Al-P 含量呈显著正相关, 通过逐步回归分析表明, 其中 Ca<sub>2</sub>-P 是土壤 Olsen-P 和 CaCl<sub>2</sub>-P 的主要来源。

**关键词:** 过磷酸钙; 磷素形态; 转化; 石灰性土壤

磷是作物生长发育的必需营养元素之一, 在农业生产中施用磷肥非常普遍。施用磷肥能增加土壤有效磷含量, 从而增加作物的产量<sup>[1]</sup>。磷肥施入土壤后会迅速发生转化, 导致磷肥有效性降低<sup>[2]</sup>。同时磷肥的过度施用也导致磷肥利用率不高, 使磷素在土壤中大量累积, 可能对环境产生危害<sup>[3-5]</sup>。关于水溶性磷肥施入土壤后对土壤有效磷含量及磷存在形态的影响有大量的研究, 研究表明长期施肥条件下, 土壤有效磷的变化受土壤磷盈余状况影响, 土壤类型及其他环境条件不同土壤磷盈余引起的土壤有效磷变化不同。袁天佑等<sup>[6]</sup>在潮土上的研究表明土壤中每盈余 P 100 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤有效磷可增加 1.2 mg/kg。孙翠平等<sup>[7]</sup>的研究表明, 单施化肥和有机肥土壤每盈余 P 100 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤有效磷可分别增加 0.76 和 1.46 mg/kg。张微微等<sup>[8]</sup>在几种碱性土上的研究表明, 土壤每盈余 P 100 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤有

效磷可增加 2.6 ~ 22.1 mg/kg。土壤中无机磷的形态根据不同浸提剂可分为 Ca-P、Fe-P、Al-P 和 O-P<sup>[9]</sup>。蒋柏藩等<sup>[10]</sup>和顾益初等<sup>[11]</sup>又将石灰性土壤中的 Ca-P 分为了 Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P 和 Ca<sub>10</sub>-P。土壤无机磷各组分含量与土壤磷盈余呈显著正相关关系。其增加幅度顺序为 Ca<sub>2</sub>-P>Ca<sub>8</sub>-P>Al-P>Fe-P>O-P 和 Ca<sub>10</sub>-P<sup>[12-13]</sup>。关于磷肥施入土壤后的转化过程, 冯固等<sup>[14]</sup>的研究表明, 重过磷酸钙施入石灰性土壤后 30 d 有超过 70% 的肥料磷被土壤固定, 67 d 后肥料磷主要转化为 Ca<sub>2</sub>-P (39.2%) 和 Ca<sub>8</sub>-P (39.7%)。刘文革等<sup>[15]</sup>的研究表明, 水溶性磷肥施入石灰性土壤主要形成易溶态磷和 Al-P, 其次是 Ca-P 和 O-P, 形成的 Fe-P 很少。随着培养时间的延长, 易溶态磷迅速减少, Ca-P 和 O-P 增加, Al-P 基本不变。这些转化可以分为两个阶段, 3 d 之内可以看做是快速反应阶段, 之后反应缓慢。水溶性磷肥施入土壤后有效性迅速降低, 但是, 一般来说, 苗期是作物的磷素营养临界期, 因此, 磷肥施入土壤后其转化过程会影响磷肥的施用策略。虽然有研究表明, 在施肥量一定的条件下播前施肥早晚与作物产量关系不大, 但在磷肥资源有限, 且土

收稿日期: 2022-08-20; 录用日期: 2022-12-09

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

作者简介: 周文利 (1978-), 博士, 讲师, 主要从事养分资源管理方面的研究。E-mail: zwli12@163.com。同时为通讯作者。

壤磷盈余的现状下, 进行进一步优化磷肥的施用, 以提高磷肥利用效率, 有必要对磷肥在土壤中的转化过程进行研究。本研究试图通过土壤培养的方法, 在石灰性土壤中添加不同用量的过磷酸钙, 恒温、恒湿培养, 连续采样测定, 探讨磷肥施入土壤后其有效性及土壤无机磷组分的变化, 以期为磷肥的优化管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤及肥料

供试土壤为石灰性褐土, 采自河南省洛阳市偃师区高龙镇试验田 (112.70° E, 34.60° N) 耕层 (0 ~ 20 cm)。土壤风干后, 捡出植物残体及碎石, 过 2 cm 筛备用。土壤基本理化性质为: pH (土水比为 1:2.5) 8.05, 有机质含量 13.1 g/kg, 水解性氮含量 108.54 mg/kg, Olsen-P 含量 5.04 mg/kg, 速效钾含量 223 mg/kg, 全磷含量 761 mg/kg。供试肥料为粉状过磷酸钙 ( $P_2O_5$  12%)。

### 1.2 试验设计

试验根据磷肥用量设置 6 个处理, 分别为 P0、P6.25、P12.5、P25、P50 和 P100, 添加磷量分别为 P 0、6.25、12.5、25、50 和 100 mg/kg 干土。每个处理分别称取干土 250 g, 将土壤与所添加肥料混合均匀, 放入 250 mL 玻璃瓶中, 加蒸馏水调节土壤含水量达到田间持水量的 70% ~ 80%, 同时滴 3 滴三氯甲苯。之后用带有通气孔的封口膜封口, 放入 25℃ 恒温培养箱培养。每隔 5 d 用称重法调节含水量, 使土壤湿度保持基本恒定, 每个处理重复 4 次。

### 1.3 样品采集处理

在培养的第 1、3、7、15、30、60、120 d 分别从每个培养瓶中取湿土 30 g。将湿土摊开风干, 然后将样品分成两部分, 分别过 1 mm 和 0.15 mm 筛。

### 1.4 测试项目及方法

过 1 mm 筛的土壤用 0.5 mol/L  $NaHCO_3$  (pH 8.5) 浸提, 钼蓝比色法测定 Olsen-P 含量; 用 0.02 mol/L  $CaCl_2$  浸提, 钼蓝比色法测定  $CaCl_2$ -P 含量。过 0.15 mm 筛的土壤用蒋-顾法测定土壤无机磷各组分 ( $Ca_2$ -P、 $Ca_8$ -P、Al-P、Fe-P、O-P、 $Ca_{10}$ -P) 含量<sup>[10-11, 16]</sup>。

### 1.5 数据分析

利用 SAS 8.0 对试验数据进行方差分析, 多重比较采用 LSD 最小极差法; 利用 SPSS 19.0 进行逐步回归; 利用 Origin 2021 进行相关性分析和

做图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同过磷酸钙添加量对土壤 Olsen-P 及 $CaCl_2$ -P 含量的影响

由图 1 可见, 土壤中添加过磷酸钙后, 土壤 Olsen-P 含量明显增加。其中, 在培养初期 (1 d) P100、P50 和 P25 处理的 Olsen-P 含量分别显著高于不添加过磷酸钙的 P0 处理 10.2、4.1 和 1.2 倍, 而 P12.5、P6.25 处理与 P0 处理之间没有显著性差异。随着培养时间的延长, 在短时间内 P100 和 P50 处理的 Olsen-P 含量迅速下降, 之后逐渐稳定, 其变化规律符合指数模型:

$$y = 36.15 + 45.42e^{(-0.26x)} \quad (\text{P100 处理}, R^2 = 0.7317^{**})$$

$$y = 23.71 + 9.66e^{(-0.14x)} \quad (\text{P50 处理}, R^2 = 0.2868^*)$$

式中, y 表示 Olsen-P 含量 (mg/kg), x 表示培养时间 (d)。

由此可见, P100 处理 Olsen-P 含量最终趋向于 36.15 mg/kg, P50 处理趋向于 23.71 mg/kg 左右。P25、P12.5、P6.25 和 P0 处理的土壤 Olsen-P 均没有随着培养时间发生显著性变化, 这 4 个处理的 Olsen-P 含量平均值分别为 14.73、10.94、8.25 和 6.10 mg/kg。

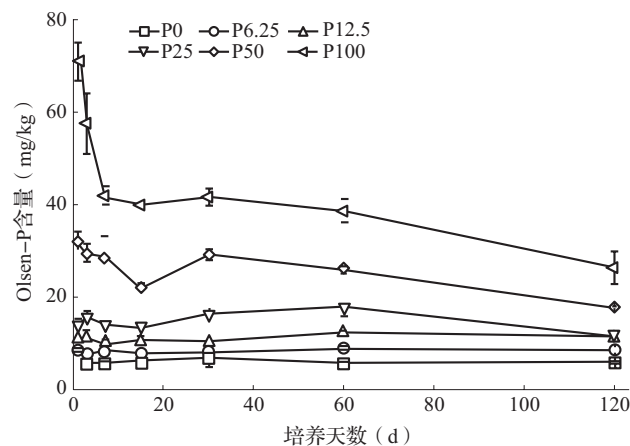


图 1 不同磷肥添加量处理下土壤 Olsen-P 含量的变化

由图 2 可见, 添加过磷酸钙土壤中的  $CaCl_2$ -P 含量明显增加。其中 P50 和 P100 处理  $CaCl_2$ -P 的含量显著高于 P0 处理。在培养第 1 d, P100 和 P50 处理的  $CaCl_2$ -P 含量分别达到 6.00 和 2.27 mg/kg, 较 P0 处理分别显著增加 27.2 和 9.7 倍。虽然 P25、P12.5 和 P6.25 处理的  $CaCl_2$ -P 含量较 P0 处理都有不同程度的增加, 但差异均不显著。随着培养时间

的延长, 在培养前期 P100 和 P50 处理的  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量显著下降, 之后含量逐渐稳定, 其变化规律符合指数模型:

$y=1.99+4.39e^{(-0.11x)}$  (P100 处理,  $R^2=0.7073^{**}$ )

$y=1.33+1.17e^{(-0.17x)}$  (P50 处理,  $R^2=0.4159^{**}$ )

式中,  $y$  表示  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量 ( $\text{mg/kg}$ ),  $x$  表示培养时间 ( $\text{d}$ )。

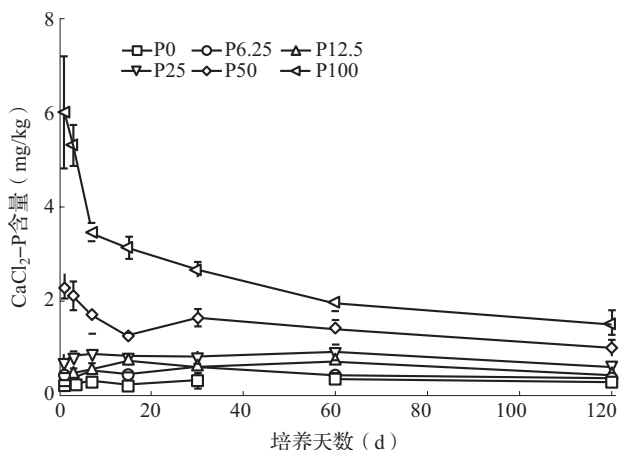


图 2 不同磷添加量处理下土壤  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量的变化

由此可见, P100 处理的  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量最终趋向于  $1.99 \text{ mg/kg}$ , P50 处理趋向于  $1.33 \text{ mg/kg}$  左右。P25、P12.5、P6.25 和 P0 处理的土壤  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量均没有随着培养时间发生显著性变化, 这 4 个处理的  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量平均值分别为  $0.80$ 、 $0.58$ 、 $0.44$  和  $0.28 \text{ mg/kg}$ 。

由表 1 可见, 过磷酸钙的施入量与土壤中 Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量均呈显著直线正相关关系, 其直线回归的斜率系数可以看做是单位过磷酸钙的投入转化为 Olsen-P 或  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  的比例。由此可见, 在本试验条件下同一培养阶段过磷酸钙转化为 Olsen-P 或  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  的比例不随施肥量的变化而发生变化。随着培养时间的延长, 单位过磷酸钙的投入转化为 Olsen-P 或  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  的比例逐渐减小。过磷酸钙施入土壤后培养 1 d 转化为 Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  的比例分别为  $65\%$  和  $5.9\%$ , 培养 7 d 转化的比例分别为  $37\%$  和  $3.1\%$ , 之后磷肥有效性下降速率变慢, 培养 120 d 后转化为 Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  的比例分别只有  $20.0\%$  和  $1.3\%$ 。

表 1 不同培养时间过磷酸钙施用量与土壤 Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量的关系

| 培养天数 ( $\text{d}$ ) | Olsen-P            | $R^2$          | $\text{CaCl}_2\text{-P}$ | $R^2$          |
|---------------------|--------------------|----------------|--------------------------|----------------|
| 1                   | $y=0.6528x+2.8030$ | $0.9764^{***}$ | $y=0.0585x-0.1999$       | $0.9572^{***}$ |
| 3                   | $y=0.5227x+4.3956$ | $0.9957^{***}$ | $y=0.0515x-0.1154$       | $0.9697^{***}$ |
| 7                   | $y=0.3730x+6.0602$ | $0.9730^{***}$ | $y=0.0313x+0.2283$       | $0.9908^{***}$ |
| 15                  | $y=0.3346x+5.7678$ | $0.9963^{***}$ | $y=0.0275x+0.2143$       | $0.9618^{***}$ |
| 30                  | $y=0.3653x+6.9544$ | $0.9705^{***}$ | $y=0.0236x+0.3408$       | $0.9876^{***}$ |
| 60                  | $y=0.3249x+5.7678$ | $0.9733^{***}$ | $y=0.0163x+0.4402$       | $0.9482^{***}$ |
| 120                 | $y=0.1974x+7.1374$ | $0.9801^{***}$ | $y=0.0128x+0.2876$       | $0.9844^{***}$ |

注:  $y$  代表土壤中 Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量 ( $\text{mg/kg}$ );  $x$  代表过磷酸钙施用量 ( $\text{P mg/kg}$ ); \* 表示  $P<0.05$ ; \*\* 表示  $P<0.01$ ; \*\*\* 表示  $P<0.001$ 。下同。

2.2 不同过磷酸钙添加量对土壤无机磷组分的影响

随着过磷酸钙添加量的增加, 土壤全磷含量相应增加, 其中 P6.25、P12.5、P25、P50 和 P100 处理中土壤全磷含量分别为  $768.01$ 、 $782.89$ 、 $799.21$ 、 $829.88$  和  $874.74 \text{ mg/kg}$ 。

由图 3 可见, 随着土壤中过磷酸钙添加量的增加,  $\text{Ca}_2\text{-P}$  的含量显著增加。其中 P100 和 P50 处理  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量分别显著高于 P0 处理  $13.8$  和  $6.5$  倍。

虽然 P25、P12.5 和 P6.25 处理较 P0 处理的  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量也分别增加  $2.2$ 、 $1.2$  和  $1.1$  倍, 但差异不显著。随着培养时间的延长, 在培养初期, P100 和 P50 处理的  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量显著下降。培养 15 d 后 P100 处理的土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$  从  $60.32 \text{ mg/kg}$  下降到  $41.41 \text{ mg/kg}$ 。P50 处理的  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量从  $30.51 \text{ mg/kg}$  下降到  $26.75 \text{ mg/kg}$ 。之后下降速度显著降低, 培养结束后 P100 和 P50 处理的土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量分别为  $35.88$  和

21.27 mg/kg。其余4个处理的土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量在培养过程中均没有随着培养时间的延长发生显著的变化。培养结束时 P25、P12.5、P6.25 和 P0 处理的  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量分别为 13.33、10.56、9.21 和 6.68 mg/kg。

在培养的前 7 d, P100 处理中  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量显著高于其余 5 个处理, P0、P6.25、P12.5、P25 和 P50 这 5 个处理虽然土壤中  $\text{Ca}_8\text{-P}$  的含量随着过磷酸钙添加量的增加而增加, 但处理间差异不显著。随着培养时间的延长, P100、P50、P25 处理土壤  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量逐渐增加, 其中 P100 处理在培养的 15 ~ 60 d 时土壤  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量增长较快, 之后变化平稳, 培养结束时达到 203.11 mg/kg, P50 和 P25 处理在培养的 15 ~ 30 d 时土壤  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量增长较快, 之后变化平稳, 培养结束时分别达到 163.50 和 155.01 mg/kg。而 P12.5、P6.25 和 P0 处理土壤  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量相对比较稳定, 在培养结束时土壤  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量分别为 146.94、139.56 和 137.63 mg/kg。随着培养时间的延长, 不同处理间土壤  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量的差异逐渐增大。在培养结束时 P100 处理显著高于其余 5 个处理, P50 和 P25 处理差异不显著, 但显著高于 P12.5、P6.25 和 P0 处理, P25 和 P12.5 处理间差异不显著, 但显著高于 P6.25 和 P0 处理, P12.5、P6.25 和 P0 处理之间差异不显著。

土壤中 Al-P 的含量随着过磷酸钙添加量的增加而增加。在培养的前 15 d, P100 处理显著高于其余 5 个处理, P50 处理显著高于 P25、P12.5、P6.25 和 P0 处理。P25、P12.5、P6.25 和 P0 处理间差异不显著。随着培养时间的延长, 6 个处理土壤中 Al-P 含量均有上升的趋势 (除了 P100 处理外其余 5 个处理土壤 Al-P 在培养 15 d 时有所下降)。到培养 60 d 后, 各处理土壤 Al-P 含量基本稳定, 此时 P100 处理显著高于其余 5 个处理, P50 处理显著高于 P25 处理, 但与 P12.5、P6.25 和 P0 处理间差异不显著。

土壤中 Fe-P 的含量随着过磷酸钙添加量的增加有增加的趋势, 但规律性不明显。较 P0 处理, 各处理虽然随着过磷酸钙添加量的增加, Fe-P 的含量有所增加, 但差异不显著。随着培养时间的延长, 各处理中土壤 Fe-P 的含量也没有发生显著的变化。

各处理土壤中 O-P 的含量在培养初期都有不同程度的上升, 在培养 30 d 后下降趋于稳定, 各处理间的差异在整个培养过程中没有规律性变化。培养结束各处理间差异不显著。由此可见, 添加过磷酸钙没有使土壤 O-P 含量发生显著性变化。

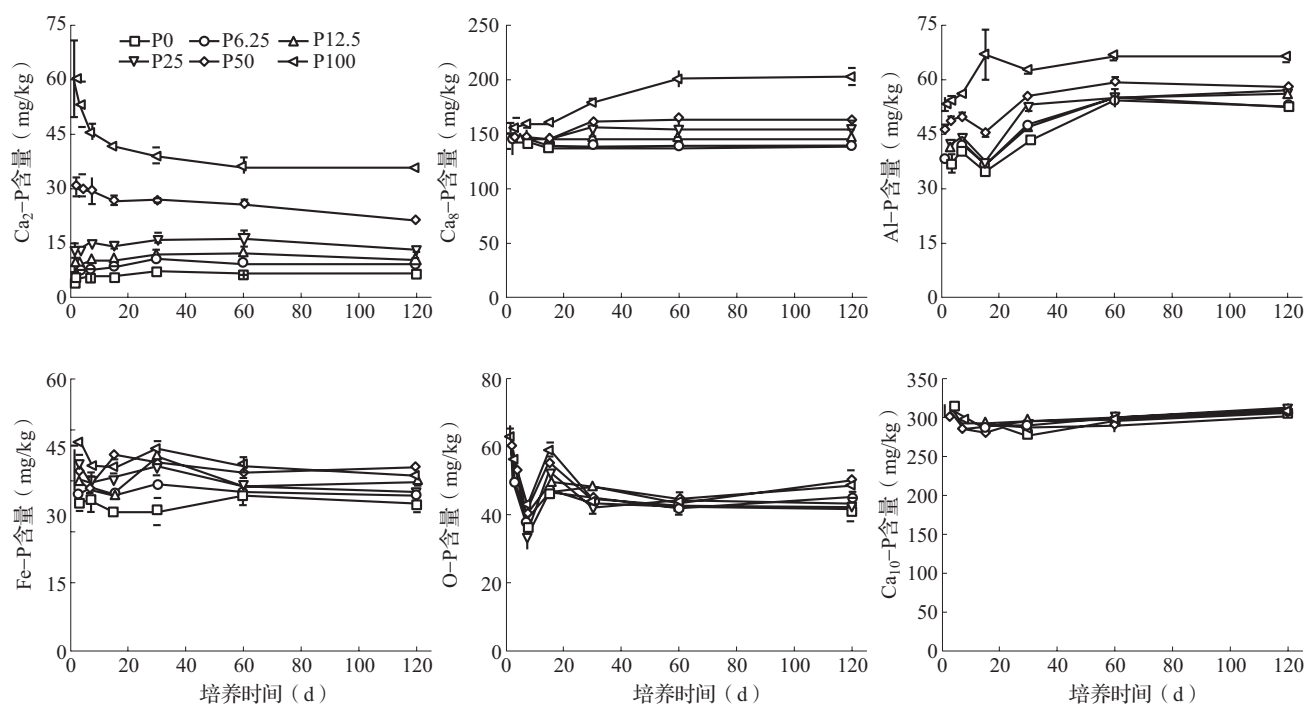


图3 不同磷肥添加量处理下土壤无机磷组分含量的变化

各处理中土壤  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  含量在培养前期 (前 7 d) 均有不同程度下降, 之后又缓慢上升, 培养结束时与培养初期基本一致。由此可见, 添加过磷酸钙没有引起土壤  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  含量的显著变化。

从不同处理下土壤各个磷组分的增加量 (图 4) 来看, 随着培养时间的延长, 高施肥量处理中  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量的增加量逐渐减少, 尤其在培养初期下降幅度较大, 之后下降趋势逐渐减缓, 说明由于施用过磷酸钙后土壤中  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量不稳定, 会迅速向其他磷组分转化。其中 P100 处理培养 30 d 后基本达到稳定, 此时转化为  $\text{Ca}_2\text{-P}$  的比例由最初的 56.2% 下降到了 31.9%, 培养结束时, 下降到了 29.2%。P50 处理在培养 15 d 时基本达到稳定, 此时转化为  $\text{Ca}_2\text{-P}$  的比例由 52.8% 下降到了 41.7%, 培养结束下降到了 29.2%。而较低的施肥量引起的  $\text{Ca}_2\text{-P}$  增加量没有随着培养时间的延长发生显著的变化。其中 P25、P12.5 和 P6.25 处理的转化率分别为 34.4%、35.1% 和 44.9%。土壤中  $\text{Ca}_8\text{-P}$  的增加量在培养的第 3 d 有所下降, 除了 P6.25 处

理外, 其余处理均随培养时间延长逐渐增加。其中 P100 处理培养到 60 d 基本达到稳定, 最终转化率约为 64.8%。P50 和 P25 处理培养 30 d 基本达到稳定, 最终转化率分别约为 51.8% 和 70.6%。P12.5 处理培养 15 d 基本达到稳定, 最终转化率约为 71.3%。P6.25 处理在 3 d 以后基本没有变化, 最终转化率约为 30.0%。由此可见, 部分  $\text{Ca}_2\text{-P}$  转化为了  $\text{Ca}_8\text{-P}$ , 且随着施肥量的增加达到稳定的时间越长。土壤中  $\text{Al-P}$  的增加量总体上随着培养时间的延长逐渐降低。最终只有 P100 和 P50 处理在培养结束时  $\text{Al-P}$  的增加量大于 0, 最终转化率约 10%, 而其余施肥较少的处理均表现出  $\text{Al-P}$  含量较不施肥处理有所降低。土壤中  $\text{Fe-P}$  的增加量与  $\text{Al-P}$  类似, 随着培养时间的延长逐渐降低, 最终各处理间差异不显著。由此可见, 施肥虽能引起  $\text{Fe-P}$  和  $\text{Al-P}$  含量的变化, 但其变化量并不显著。 $\text{O-P}$  和  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  含量在培养过程中虽有波动, 但各处理间差异不显著, 且培养结束时增加量趋近于 0。

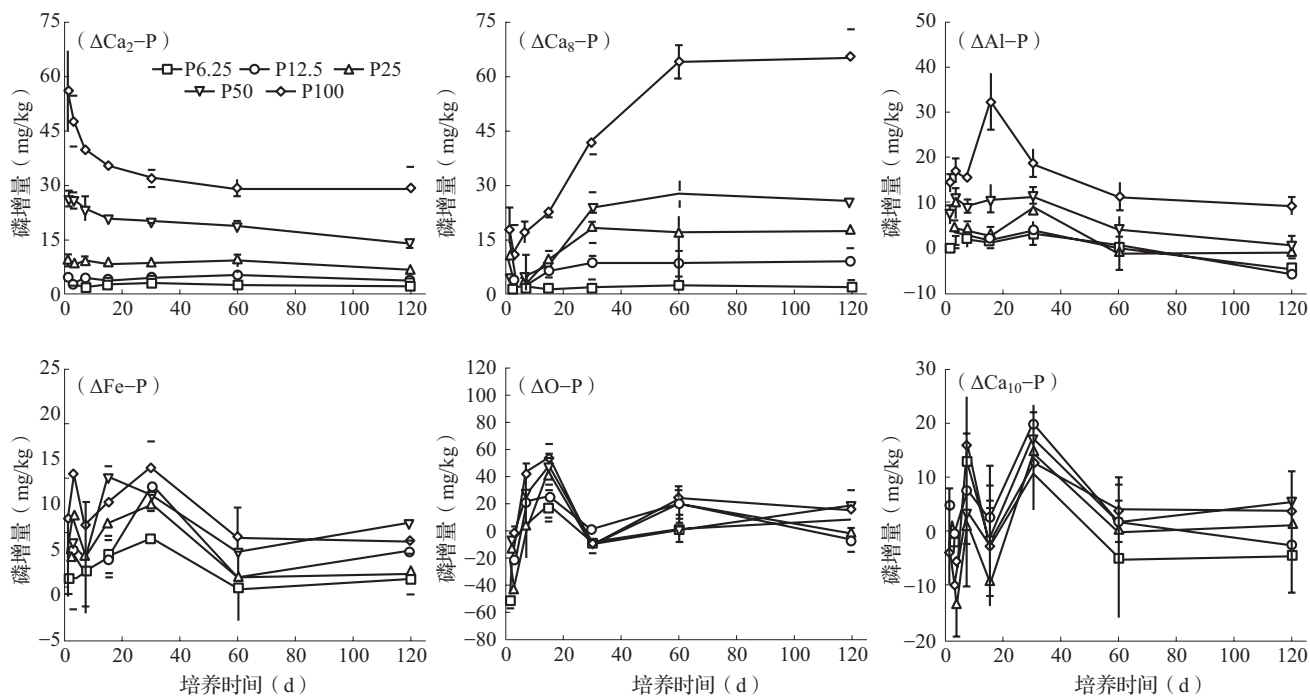


图 4 不同磷肥添加量处理下土壤无机磷组分增加量的变化

从土壤中各无机磷组分所占全磷的比例 (图 5) 来看, 土壤中添加过磷酸钙使土壤中  $\text{Ca}_2\text{-P}$  所占比例增加, 随着培养时间延长,  $\text{Ca}_2\text{-P}$  所占比例逐渐减少。其中, P100 处理从最初的 6.81% 下降到最终的 4.13%, P50 处理也从 3.69% 下降到 2.56%。土壤中

$\text{Ca}_8\text{-P}$  所占比例在培养初期并没有随着过磷酸钙的添加而发生变化, 随着培养时间的延长, 添加过磷酸钙的处理  $\text{Ca}_8\text{-P}$  所占比例逐渐增加, 不同处理间的差异逐渐显现。培养 30 d 时, P100 处理土壤  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量所占比例达到 20.51%, 显著高于 P12.5、P6.25

和 P0 处理。培养结束时 P100 处理土壤  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量所占比例达到 23.36%，显著高于其他 5 个处理。土壤中  $\text{Al-P}$  含量所占比重在培养前 30 d 均表现为随着过磷酸钙添加量的增加而增加，在培养的第 30 d P100 处理  $\text{Al-P}$  含量所占比例达 7.19%，显著高于 P12.5、P6.25 和 P0 处理。培养 30 d 之后各处理间  $\text{Al-P}$  含量所占比例差异没有明显的规律性。各处理土壤中  $\text{Fe-P}$  含量所占比例在培养过程中没有显著的规律性变化。土壤中的  $\text{Fe-P}$  含量所占比例有随着过磷酸钙添加量的增加而增加的趋势，这种趋

势在培养前期较为显著，在培养至 60 d 以后各处理间的差异性消失。土壤  $\text{O-P}$  含量所占比例有随着过磷酸钙添加量的增加而减少的趋势，这种趋势在培养前期较为显著，在培养的第 1 d P100 处理  $\text{O-P}$  含量所占比例为 7.25%，较 P0 处理 8.43% 显著下降了 14.00%。培养到 60 d 以后各处理间的差异性消失。不同处理土壤中  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  含量所占比例在培养过程中均基本保持稳定。而不同处理间表现为随着过磷酸钙添加量的增加，土壤  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  含量所占比例有所下降。

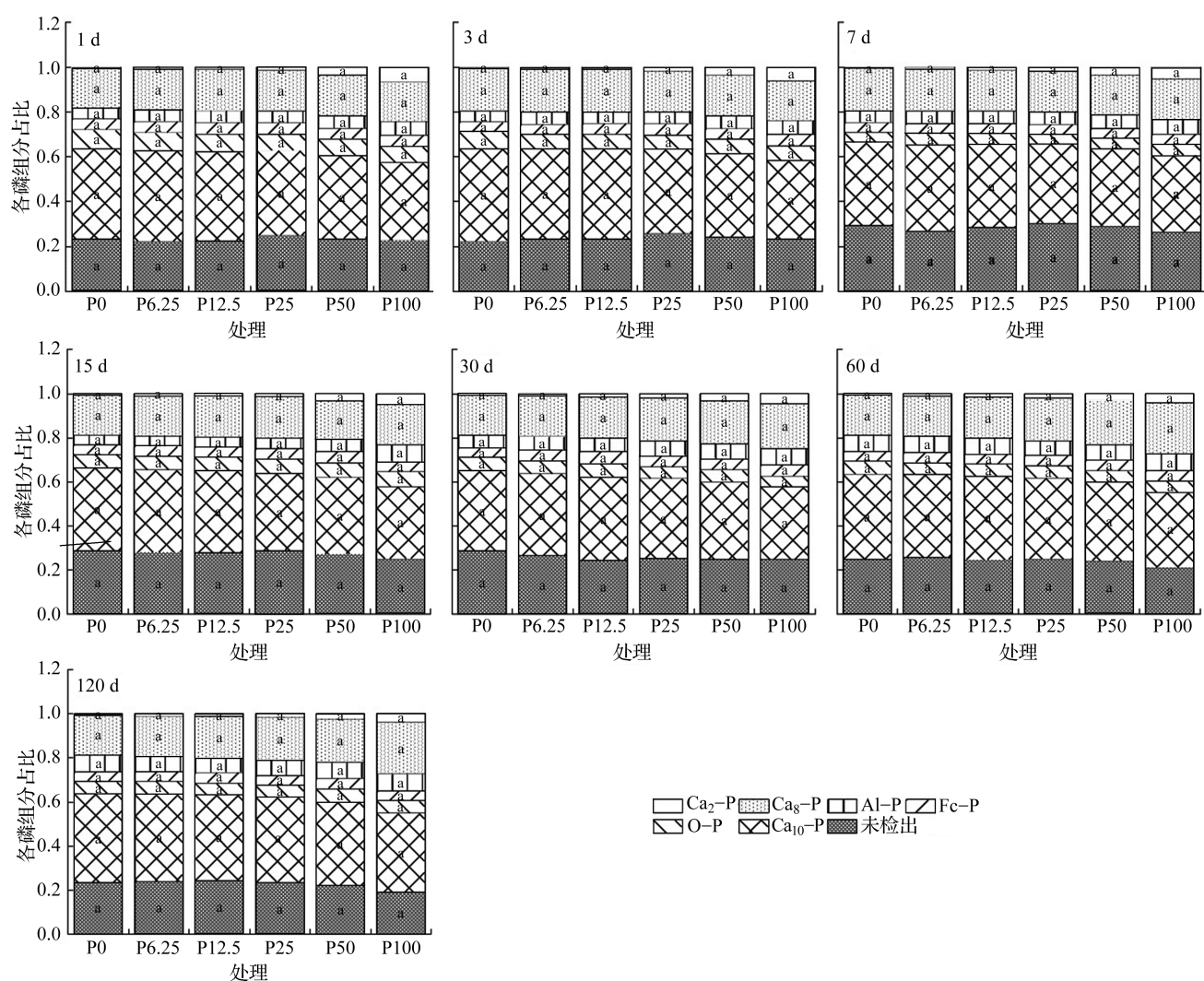


图5 不同磷肥添加量处理下土壤无机磷组分所占比重的变化

注：同一磷组分不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 土壤中各无机磷组分与有效磷的关系

由表2可见，在整个培养过程中，Olsen-P、 $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量均与  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$  和  $\text{Al-P}$  含量显著正相关。Olsen-P 含量与  $\text{Fe-P}$  含量在培养的第 1、3、

15、30、60 d 呈显著正相关。 $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量与  $\text{Fe-P}$  含量在培养的第 3、15、30、60 d 呈显著正相关。进一步通过逐步回归（表3）可见，在培养过程中，各无机磷组分中  $\text{Ca}_2\text{-P}$  是 Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  的主要来源。

表 2 Olsen-P 和 CaCl<sub>2</sub>-P 含量与土壤无机磷各组分的相关性

| 培养天数 (d) | 磷组分                 | Ca <sub>8</sub> -P | Al-P      | Fe-P      | O-P      | Ca <sub>10</sub> -P | Olsen-P   | CaCl <sub>2</sub> -P |
|----------|---------------------|--------------------|-----------|-----------|----------|---------------------|-----------|----------------------|
| 1        | Ca <sub>2</sub> -P  | 0.6629***          | 0.9410*** | 0.4082*   | 0.2560   | -0.1470             | 0.8820*** | 0.9691***            |
|          | Ca <sub>8</sub> -P  |                    | 0.5963**  | 0.1065    | 0.0462   | 0.0646              | 0.4431*   | 0.6575***            |
|          | Al-P                |                    |           | 0.4638*   | 0.2398   | -0.3148             | 0.8929*** | 0.9154***            |
|          | Fe-P                |                    |           |           | 0.0121   | -0.2829             | 0.4720*   | 0.3957               |
|          | O-P                 |                    |           |           |          | -0.0906             | 0.1736    | 0.2852               |
|          | Ca <sub>10</sub> -P |                    |           |           |          |                     | -0.4170   | -0.1592              |
|          | Olsen-P             |                    |           |           |          |                     |           | 0.8618***            |
| 3        | Ca <sub>2</sub> -P  | 0.5615**           | 0.8687*** | 0.6021**  | 0.1639   | -0.36959            | 0.9607*** | 0.9621***            |
|          | Ca <sub>8</sub> -P  |                    | 0.4570*   | 0.7253*** | 0.2915   | -0.5297**           | 0.6093**  | 0.5563**             |
|          | Al-P                |                    |           | 0.4377*   | -0.0158  | -0.3100             | 0.8486*** | 0.8406***            |
|          | Fe-P                |                    |           |           | 0.1033   | -0.5970**           | 0.7183*** | 0.6321***            |
|          | O-P                 |                    |           |           |          | 0.0047              | 0.1724    | 0.1829               |
|          | Ca <sub>10</sub> -P |                    |           |           |          |                     | -0.3635   | -0.2864              |
|          | Olsen-P             |                    |           |           |          |                     |           | 0.9787***            |
| 7        | Ca <sub>2</sub> -P  | 0.7299***          | 0.9686*** | 0.3964    | 0.4919*  | 0.2704              | 0.9940*** | 0.9723***            |
|          | Ca <sub>8</sub> -P  |                    | 0.6631*** | 0.0063    | 0.3601   | 0.2535              | 0.7387*** | 0.7634***            |
|          | Al-P                |                    |           | 0.4831*   | 0.4949*  | 0.3585              | 0.9650*** | 0.9443***            |
|          | Fe-P                |                    |           |           | -0.0442  | 0.2058              | 0.3674    | 0.3746               |
|          | O-P                 |                    |           |           |          | 0.2927              | 0.4891*   | 0.4841*              |
|          | Ca <sub>10</sub> -P |                    |           |           |          |                     | 0.2753    | 0.2502               |
|          | Olsen-P             |                    |           |           |          |                     |           | 0.9725***            |
| 15       | Ca <sub>2</sub> -P  | 0.8625***          | 0.8460*** | 0.6571*** | 0.5281** | -0.1033             | 0.9578*** | 0.9578***            |
|          | Ca <sub>8</sub> -P  |                    | 0.7055*** | 0.5073*   | 0.4352*  | 0.0172              | 0.8876*** | 0.9070***            |
|          | Al-P                |                    |           | 0.3875    | 0.3683   | -0.0191             | 0.8448*** | 0.8251***            |
|          | Fe-P                |                    |           |           | 0.3955   | -0.2303             | 0.6234**  | 0.5460**             |
|          | O-P                 |                    |           |           |          | -0.2359             | 0.5086*   | 0.4819*              |
|          | Ca <sub>10</sub> -P |                    |           |           |          |                     | -0.07753  | -0.0924              |
|          | Olsen-P             |                    |           |           |          |                     |           | 0.9859***            |
| 30       | Ca <sub>2</sub> -P  | 0.9379***          | 0.9302*** | 0.5451**  | -0.3571  | 0.2653              | 0.9899*** | 0.9633***            |
|          | Ca <sub>8</sub> -P  |                    | 0.9132*** | 0.6429*** | -0.3512  | 0.2881              | 0.9239*** | 0.9251***            |
|          | Al-P                |                    |           | 0.5317**  | -0.3776  | 0.3777              | 0.9284*** | 0.9112***            |
|          | Fe-P                |                    |           |           | -0.1300  | 0.5103*             | 0.5344**  | 0.5814**             |
|          | O-P                 |                    |           |           |          | -0.0640             | -0.3408   | -0.3506              |
|          | Ca <sub>10</sub> -P |                    |           |           |          |                     | 0.2590    | 0.2245               |
|          | Olsen-P             |                    |           |           |          |                     |           | 0.9583***            |
| 60       | Ca <sub>2</sub> -P  | 0.9382***          | 0.7702*** | 0.5017*   | 0.3477   | 0.2435              | 0.9904*** | 0.9641***            |
|          | Ca <sub>8</sub> -P  |                    | 0.7526*** | 0.6332*** | 0.3117   | 0.1507              | 0.9606*** | 0.8835***            |
|          | Al-P                |                    |           | 0.4703*   | 0.1315   | 0.2709              | 0.7649*** | 0.6825***            |
|          | Fe-P                |                    |           |           | -0.1735  | 0.2164              | 0.5398**  | 0.4750*              |
|          | O-P                 |                    |           |           |          | 0.0741              | 0.3518    | 0.3556               |
|          | Ca <sub>10</sub> -P |                    |           |           |          |                     | 0.2287    | 0.2544               |
|          | Olsen-P             |                    |           |           |          |                     |           | 0.9471***            |
| 120      | Ca <sub>2</sub> -P  | 0.9390***          | 0.7923*** | 0.3531    | 0.2474   | 0.30987             | 0.9844*** | 0.9410***            |
|          | Ca <sub>8</sub> -P  |                    | 0.8589*** | 0.3522    | 0.3619   | 0.37118             | 0.9419*** | 0.8771***            |
|          | Al-P                |                    |           | 0.1268    | 0.2930   | 0.5085*             | 0.7609*** | 0.7530***            |
|          | Fe-P                |                    |           |           | 0.1132   | 0.2164              | 0.3706    | 0.3983               |
|          | O-P                 |                    |           |           |          | 0.1716              | 0.2295    | 0.1673               |
|          | Ca <sub>10</sub> -P |                    |           |           |          |                     | 0.3063    | 0.3223               |
|          | Olsen-P             |                    |           |           |          |                     |           | 0.9401***            |

表3 Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量与土壤无机磷组分的逐步回归

| 培养天数 (d) | Olsen-P                               | $R^2$    | $\text{CaCl}_2\text{-P}$ | $R^2$    |
|----------|---------------------------------------|----------|--------------------------|----------|
| 1        | $y=0.855x_1-1.063x_6+331.149$         | 0.888*** | $y=0.103x_1-0.459$       | 0.936*** |
| 3        | $y=0.868x_1+0.822x_4+0.234x_6-99.780$ | 0.962*** | $y=0.099x_1-0.423$       | 0.922*** |
| 7        | $y=0.892x_1+0.171x_5-5.330$           | 0.989*** | $y=0.076x_1-0.206$       | 0.943*** |
| 15       | $y=0.803x_1+0.200x_2-26.747$          | 0.979*** | $y=0.074x_1-0.225$       | 0.914*** |
| 30       | $y=1.131x_1-2.408$                    | 0.979*** | $y=0.072x_1-0.249$       | 0.924*** |
| 60       | $y=0.824x_1+0.131x_2-16.854$          | 0.988*** | $y=0.057x_1-0.040$       | 0.927*** |
| 120      | $y=0.661x_1+2.829$                    | 0.968*** | $y=0.044x_1-0.015$       | 0.880*** |

注:  $y$  代表土壤中 Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量 (mg/kg);  $x_1 \sim x_6$  分别代表  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ 、 $\text{O-P}$  和  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  的含量 (mg/kg)。

### 3 讨论

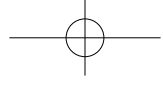
#### 3.1 过磷酸钙在石灰性土壤中的转化

水溶性磷肥施入石灰性土壤后迅速发生各种转化, 形成其他形态的磷酸盐而固定于土壤中, 使其有效性随着时间的延长而逐渐降低<sup>[17-19]</sup>, 在 24 h 内反应迅速<sup>[20]</sup>。在本试验中高施肥量 (P100 和 P50 处理) 条件下, 土壤 Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量均在短时间 (15 d) 内显著降低, 之后降低速度减缓, 这与其他研究者的报道结果一致<sup>[14, 19]</sup>。而较低的施肥量 (P6.25、P12.5 和 P25 处理) 能在一定程度上增加土壤有效磷含量, 且土壤有效磷在培养过程中并没有随着培养时间的延长而显著下降。磷在石灰性土壤中的主要固定过程之一是与土壤中的钙、镁、铁、铝等发生的化学沉淀<sup>[21-22]</sup>。梁美英等<sup>[23]</sup>的试验表明, 在两种石灰性土壤上施用不同数量的过磷酸钙, 在短时间内  $\text{Ca}_2\text{-P}$  和  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量均大幅度提高, 随着培养时间的延长  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量显著下降, 而  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量在前期有增长的趋势, 之后增长趋势减缓或有下降趋势。 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ 、 $\text{O-P}$  和  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  含量均随着培养时间延长有小幅增加。本试验也得到了相似的结果, 在培养初期,  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$  和  $\text{Fe-P}$  含量较不施磷处理都有不同程度的增加, 且有随着施肥量的增加, 增加幅度有增大的趋势, 说明施入土壤中的过磷酸钙主要分配到了这几个磷库中。随着培养时间的延长,  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量逐渐减小,  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量逐渐增大。Bell 等<sup>[24]</sup>发现在石灰性土壤上  $\text{Ca}_2\text{-P}$  转化为  $\text{Ca}_8\text{-P}$  需要 4 周时间, 而本试验中, P100 处理  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量到培养 60 d 左右才达到相对稳定, 其余 4 个处理到培养

30 d 左右达到相对稳定, 说明  $\text{Ca}_2\text{-P}$  向  $\text{Ca}_8\text{-P}$  的转化在 30 d 内较快,  $\text{Ca}_2\text{-P}$  向  $\text{Ca}_8\text{-P}$  的转化除了受时间影响外, 还受施肥量的影响, 随着施肥量的增加,  $\text{Ca}_2\text{-P}$  向  $\text{Ca}_8\text{-P}$  转化所需的时间延长。本试验中  $\text{Al-P}$  和  $\text{Fe-P}$  含量在整个试验过程中没有发生显著变化。但梁美英等<sup>[23]</sup>的研究结果表明,  $\text{Al-P}$  和  $\text{Fe-P}$  含量随着培养时间的延长呈逐渐上升的趋势。产生试验结果差异的原因可能是本试验培养时间只有 2 个月, 而梁美英等<sup>[23]</sup>的试验持续了 12 个月。由此可见, 施入的过磷酸钙向  $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ 、 $\text{O-P}$  和  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  的转化较慢, 尤其是  $\text{O-P}$  和  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  含量比较稳定, 施肥在短期内很难引起其变化。因此, 在施用过磷酸钙后短期内主要分配在  $\text{Ca}_2\text{-P}$  和  $\text{Ca}_8\text{-P}$  这两个组分中, 约占 90%, 且这两个组分存在此消彼长的关系。其次是分配在  $\text{Al-P}$  和  $\text{Fe-P}$  之中, 约占 10%, 长期试验的结果也表明施肥主要增加土壤中  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$  和  $\text{Fe-P}$  的含量<sup>[25-27]</sup>。王海龙等<sup>[28]</sup>研究表明长期施磷在无机磷盈余的状态下, 无机磷有 50% ~ 70% 转化为了  $\text{Ca}_8\text{-P}$ , 10% ~ 23% 转化为了  $\text{Al-P}$  和  $\text{Fe-P}$ , 这与本研究短期土壤培养的结果基本一致。

#### 3.2 土壤中各无机磷组分与有效磷的关系

土壤中 Olsen-P、 $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量与作物的磷吸收量有显著的正相关关系, 因此, 其通常作为土壤磷有效性的指标<sup>[29]</sup>。从 Olsen-P、 $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量与土壤无机磷组分的相关性来看, 在培养过程中, Olsen-P、 $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量与  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$  及  $\text{Fe-P}$  含量呈正相关关系。一般认为, 土壤无机磷各组分中,  $\text{Ca}_2\text{-P}$  属于速效性磷,  $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$  属于缓效性磷,  $\text{O-P}$  和  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  属于固定态磷<sup>[30]</sup>。



由此可见,土壤有效磷库主要与无机磷组分中的  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$  有关。进一步逐步回归表明,在培养过程中,各无机磷组分中  $\text{Ca}_2\text{-P}$  是 Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  的主要来源。这与焦亚鹏等<sup>[31]</sup>的研究结果基本一致。也就是说,在无机磷各组分中  $\text{Ca}_2\text{-P}$  是土壤有效磷的主要来源。

#### 4 结论

在石灰性土壤中施用过磷酸钙能显著增加土壤有效磷含量,且随着磷肥用量的增加,土壤有效磷含量增加,土壤有效磷含量与磷肥添加量成正比。施入土壤中的过磷酸钙主要转化为  $\text{Ca}_2\text{-P}$  和  $\text{Ca}_8\text{-P}$  (约占 90%),其次是  $\text{Al-P}$  和  $\text{Fe-P}$  (约占 10%),随着施肥量的增加, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$  和  $\text{Fe-P}$  含量也相应增加,而在短期内  $\text{O-P}$  和  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  含量相对稳定。随着培养时间的延长, $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量逐渐减少而  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量逐渐增加,在培养初期  $\text{Ca}_2\text{-P}$  转化为  $\text{Ca}_8\text{-P}$  的速率较快,之后逐渐减缓,随着施肥量的增加转化所需的时间增加。不同处理中  $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ 、 $\text{O-P}$  和  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  含量随着培养时间的延长变化不显著。逐步回归表明,在各无机磷组分中, $\text{Ca}_2\text{-P}$  是土壤 Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  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: 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] 袁天佑,王俊忠,冀建华,等. 长期施肥条件下潮土有效磷的演变及其对磷盈亏的响应[J]. 核农学报, 2017, 31 (1): 125-134.
- [7] 孙翠平,张英鹏,罗加法,等. 长期施肥对山东潮土磷盈亏及农学阈值的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34 (5): 185-191.
- [8] 张微微,周怀平,黄绍敏,等. 长期不同施肥模式下碱性土有效磷对磷盈亏的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (2): 263-274.
- [9] 李廷轩,叶代桦,张锡洲,等. 植物对不同形态磷响应特征研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (6): 1536-1546.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 刘文革,李祖荫. 磷肥在石灰性土壤中的形态转化及施用时间对其肥效的影响[J]. 土壤通报, 1993, 24 (4): 154-157.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 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 (2): 1-11.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Lewis G C, Baker G O, Snyder R S. Phosphate fixation in calcareous soils [J]. Soil Science, 1950, 69 (1): 55-62.
- [21] 赵靛,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.
- [22] Shen J, Yuan L, Zhang J, et al. Phosphorus dynamics: from soil to plant [J]. Plant Physiol, 2011, 156 (3): 997-1005.
- [23] 梁美英,李兵霞,卜玉山. 施磷和培养时间对两种石灰性土壤无机磷形态转化的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2008, 28 (4): 458-461.
- [24] Bell L C, Black C A. Transformation of dibasic calcium phosphate dihydrate and octacalcium phosphate in slightly acid and alkaline soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1970, 34 (4): 583-587.
- [25] 胡霭堂. 植物营养学(下册)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [26] 林治安,谢承陶,张振山,等. 石灰性土壤无机磷形态、转化及其有效性研究[J]. 土壤通报, 1997, 28 (6): 274-276.
- [27] 黄欣欣,廖文华,刘建玲,等. 河北省典型土壤磷库状况及对长期施磷和秸秆还田的响应[J]. 中国土壤与肥料, 2017 (6): 30-36.
- [28] 王海龙,张民,刘之广,等. 多年定位试验条件下不同施磷

- 水平对土壤无机磷分级的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 318-324.
- [29] Olsen S R, Watanabe F S, Bowman R A. Evaluation of fertilizer phosphate residues by plant uptake and extractable phosphorus [J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47(5): 952-958.
- [30] 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷有效性的研究[J]. 土壤, 1992, 24(2): 61-64.
- [31] 焦亚鹏, 齐鹏, 王晓娇, 等. 氮磷配施对黄土高原旱作农业区典型农田土壤无机磷形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(8): 1459-1472.

### Effect of superphosphate on available phosphorus and inorganic phosphorus fractions in calcareous soil

ZHOU Wen-li\*, SONG Pan-pan, WU Jun ( College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471023 )

**Abstract:** The objective of this study was to explore the transformation of water-soluble phosphate fertilizer in calcareous soil. A soil incubation experiment was conducted. Different amounts of superphosphate ( P 0, 6.25, 12.5, 25, 50 and 100 mg/kg dry soil ) were added to the soil ( recorded as P0, P6.25, P12.5, P25, P50 and P100 treatments ), and the soil humidity was maintained at 70% ~ 80% of the field capacity. The soil was incubated in a constant temperature incubator at 25℃ for 120 days. Continuous sampling was performed on days of 1, 3, 7, 15, 30, 60 and 120 during the incubation period. The contents of Olsen-P, CaCl<sub>2</sub>-P and inorganic phosphorus fractions in soil were determined. The results showed that the content of Olsen-P and CaCl<sub>2</sub>-P in calcareous soil was significantly increased by applying superphosphate. Within a certain incubation time, the proportion of superphosphate transformed into Olsen-P and CaCl<sub>2</sub>-P in soil did not change with the change of fertilization amount. The soil available phosphorus was decreased significantly in the first 7 days of incubation, and then decreased slowly. The superphosphate applied to the soil was mainly transformed into Ca<sub>2</sub>-P and Ca<sub>8</sub>-P ( the sum of the two was about 90% ), followed by Al-P and Fe-P ( the sum of the two was about 10% ). In the short term, the contents of O-P, Ca<sub>10</sub>-P were relatively stable. With the extension of incubation time, Ca<sub>2</sub>-P gradually transformed into Ca<sub>8</sub>-P, and the transformation rate was fast in the first 30 days of incubation, and then slowed down. With the increase of phosphorus fertilizer application, the time required for Ca<sub>2</sub>-P transform into Ca<sub>8</sub>-P gradually prolonged. The contents of Olsen-P and CaCl<sub>2</sub>-P were significantly positively correlated with the contents of Ca<sub>2</sub>-P, Ca<sub>8</sub>-P and Al-P in soil inorganic phosphorus fractions. The stepwise regression analysis showed that Ca<sub>2</sub>-P was the main source of soil Olsen-P and CaCl<sub>2</sub>-P.

**Key words:** superphosphate; phosphorus fractions; transformation; calcareous soil