

## 磷胁迫条件下小麦、蚕豆根系分泌物对红壤磷的活化\*

陈佰岩, 郑毅\*\*, 汤利

(云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

**摘要:** 通过室内盆栽试验研究了磷胁迫下小麦、蚕豆根系分泌物对石灰岩和玄武岩母质上发育的红壤中磷的活化效果。结果表明: 在培养至第7 d时, 小麦单作、蚕豆单作、小麦蚕豆混作的根系分泌物处理与对照相比, 石灰岩母质上发育的红壤有效磷分别提高29.51%, 22.16%, 23.91%, 玄武岩母质发育的红壤有效磷分别比对照提高6.3%, 31.19%, 31.20%。加入根系分泌物后的2种土壤在培养过程中土壤中的磷酸铝盐(Al-P)和磷酸铁盐(Fe-P)含量有所降低, 闭蓄态磷(O-P)和磷酸钙盐(Ca-P)含量变化不大。可能的原因为根系分泌物通过对土壤中无机磷的Al-P和Fe-P的活化从而提高了土壤中磷的有效性。

**关键词:** 磷胁迫; 根系分泌物; 活化

**中图分类号:** S 153   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1004-390X (2009) 06-0869-07

## Mobilizing Phosphorus in Red Soils by Root Exudates of Wheat and Broadbean under Phosphorus Stress Condition

CHEN Bai-yan, ZHENG Yi, TANG Li

(College of Resources and Environmental, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** Incubation experiment to investigate the mobilization of phosphorus (P) in red soils with root exudates collected from wheat and broadbean under P stress condition were carried out. The results showed that in comparison with control (pure water), the available P of red soil developing from limestones treatments of root exudates of wheat, broadbean, wheat and broadbean mixture increased by 29.51%, 22.16%, 23.91% respectively, those from basalts by 6.3%, 31.19%, 31.20% respectively. The contents of Al-P and Fe-P fraction of soil inorganic P decreased, and O-P, Ca-P fraction remained no change in both red soils developing from limestones and basalts in the incubation experiment. It is suggested that mobilizing soil inorganic P by Al-P and Fe-P can increase P availability.

**Key words:** P stress; root exudates; mobilize

土壤缺磷是作物生产的重要限制因素之一, 我国缺磷土壤约占耕地面积的1/3~1/2<sup>[1]</sup>。云南省是我国南方典型酸性红壤, 土壤中的速效磷很

容易被土壤中的铁、铝氧化物固定, 作物对土壤中磷的利用效率较低。磷在土壤中的扩散系数很小, 作物对土壤磷的有效性很大程度上取决于作

收稿日期: 2008-11-05   修回日期: 2009-04-17

\* 基金项目: 国家自然科学基金(30860157)。“973”计划前期研究专项(2008CB117011); 公益性行业(农业)科研专项(200803030)。

作者简介: 陈佰岩(1983-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 在读硕士研究生, 主要从事根际营养研究。

\*\* 通讯作者 Corresponding author: 郑毅, 教授, 博士生导师。E-mail: yzheng@yanu.edu.cn

物根系的生物学特性,如根系分泌物、根长以及根构型等<sup>[2,3]</sup>。因此,利用作物根系特性提高土壤难溶性磷的吸收利用,是一条经济有效的途径<sup>[4,5]</sup>。

研究表明,根系分泌物能改善根际环境,是植物在胁迫条件下维持正常生长的重要机制。根系分泌物中的有机酸、磷酸酶等对活化土壤中难溶磷具有重要作用<sup>[6]</sup>。在养分胁迫,尤其是缺磷胁迫下植物可以通过增加低分子量有机酸的分泌,促进自身对土壤中难溶性含磷化合物的利用,改善其体内磷营养状况,促进生长发育<sup>[4]</sup>。

小麦、蚕豆混作是云南一种很普遍的粮食高产种植方式,小麦和蚕豆在形态和生理上差别较大,二者间作优势互补,可增产增收。其中蚕豆还是重要的食用蛋白来源之一,经济价值高。因此本研究选用小麦、蚕豆作为实验材料,具有普遍代表性。张福锁和李隆<sup>[7]</sup>研究表明,蚕豆与玉米间作,蚕豆相对于玉米具有更强的分泌能力,能显著酸化根际,从而有利于难溶性土壤磷的活化和促进玉米对磷的吸收作用。基于此本试验采用磷胁迫条件下收集的小麦、蚕豆根系分泌物,研究其对不同母质上发育两种红壤中磷的活化效果,以期进一步为小麦、蚕豆混作研究提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 根系分泌物的收集

将小麦(云 K50)和蚕豆(8363)种子在已消毒好的石英砂中萌发至均匀一致,将幼苗取出用蒸馏水冲洗,移栽在 1/4 营养液中。容器体积 3 L,容器上有 8 个小孔,单作小麦每孔 2 株苗,单作蚕豆每孔 1 株苗,混作小麦、蚕豆每孔各一株,留一个孔通气,每种处理重复 10 次。培养 3 d 后换成 1/2 营养液,6 d 后换成缺磷营养液。营养液 3 d 换一次,营养液的 pH 值用 KOH 或 HCl 调节到  $6.0 \pm 0.1$ ,昼夜连续通气。温度保持在 20~30℃ 之间,白天 25℃ 光照 14 h (8:00~22:00),黑暗 20℃ 10 h。

待植物出现缺磷症状开始收集分泌物。收集根系分泌物在当天早晨 8:00 给予光照,2 h 后,将植株从营养液中取出,用蒸馏水将根系冲洗干净,然后放在 1 L 盛有百里酚的蒸馏水的容器中,在光照下生长 24 h 后,取出植物放回缺磷营养液中

生长。将所收集的根系分泌物,在旋转蒸发器上浓缩至 10 mL,最后稀释到 0.5 L。放在封闭的塑料桶内于 -18℃ 保存,备用。

营养液配比:  $K_2SO_4$ :  $0.75 \times 10^{-3}$  mol/L,  $MgSO_4$ :  $0.65 \times 10^{-3}$  mol/L,  $KCl$ :  $1.0 \times 10^{-3}$  mol/L,  $Ca(NO_3)_2$ :  $2.0 \times 10^{-3}$  mol/L,  $KH_2PO_4$ :  $0.25 \times 10^{-3}$  mol/L,  $H_3BO_3$ :  $1.0 \times 10^{-5}$  mol/L,  $CuSO_4$ :  $1.0 \times 10^{-7}$  mol/L,  $MnSO_4$ :  $1.0 \times 10^{-6}$  mol/L,  $ZnSO_4$ :  $1.0 \times 10^{-6}$  mol/L,  $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$ :  $5.0 \times 10^{-6}$  mol/L,  $Fe-EDTA$ :  $1.0 \times 10^{-4}$  mol/L。营养液稀释 4 倍为 1/4 营养液,稀释 2 倍为 1/2 营养液,缺磷处理的营养液中不加  $KH_2PO_4$ 。

### 1.2 培养试验

石灰岩、玄武岩母质上发育的红壤分别取自昆明市东北部黑龙潭和云南农业大学后山农场,(N:  $25^\circ 08' 32.8''$ , E:  $102^\circ 45' 14.4''$ ; N:  $25^\circ 08' 42.6''$ , E:  $102^\circ 45' 15.2''$ ) 海拔分别为 1 965 m 和 1 955 m。土壤的基本理化性状见表 1。土壤风干后,磨细过 20 目筛。准确称取风干土 20.00 g 放入培养皿中,分别加缺磷供应时提取的小麦单作、蚕豆单作、小麦蚕豆混作的根系分泌物 10 mL,至土壤湿润即可,以等体积的去离子水为对照。在培养箱中 30℃ 培养。在培养开始后的第 1, 3, 5, 7, 9 d 分别测定土壤有效磷的变化,每种土壤 3 种根系分泌物 3 次重复。

### 1.3 分析与测定方法

各项指标的测定采用土壤农业化学常规方法<sup>[8]</sup>: 土壤全氮,半微量开氏法;土壤全磷,NaOH 熔融-钼锑抗比色法;土壤全钾,NaOH 熔融-火焰光度法;碱解氮,NaOH-1.0 mol/L 扩散法;土壤速效磷,0.5 mol/L  $NaHCO_3$  浸提-钼锑抗比色法;土壤有机质,外加热-重铬酸钾容量法;pH-电位计法。

土壤不同组分无机磷的测定,张守敬等<sup>[8]</sup>提出酸性土壤无机磷形态的分级测定方法。其基本原理是利用不同化学浸提剂的特性,将土壤中各种形态的无机磷酸盐加以逐级分离。首先用 1 mol/L  $NH_4Cl$  溶液浸提,再用 0.5 mol/L  $NH_4F$  溶液浸提,振荡,离心后测上清液的磷酸铝盐(Al-P)含量;将浸提过 Al-P 的土样用饱和 NaCl 溶液洗两次,再用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液浸提,振荡 2 h,静置 16 h,再振荡 2 h,离心,

加浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1.5 mL 于上清液中, 摇匀后放置过夜, 过滤, 测其磷酸铁盐 (Fe - P) 含量。浸提过 Fe - P 的土样用其测定闭蓄态磷 (O - P) 含量。浸提过 O - P 的土样加入 0.5 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶

液 50 mL, 在 20 ~ 25 °C 振荡 1 h, 离心, 倾出上层清液于三角瓶中。吸取适量浸出液于 50 mL 容量瓶中, 用钼锑抗比色法测定磷酸钙磷 (Ca - P) 含量。无机磷总量为 4 种形态无机磷相加之和。

表 1 供试红壤的基本理化指标

Tab. 1 The physical and chemical properties of red soil

| 土壤<br>田质<br>soil<br>parent<br>matter | 全氮/<br>(g · kg <sup>-1</sup> )<br>total<br>nitrogen<br>(N) | 全磷/<br>(g · kg <sup>-1</sup> )<br>total<br>phosphorus<br>(P) | 全钾/<br>(g · kg <sup>-1</sup> )<br>total<br>potassium<br>(K) | 碱解氮/<br>(mg · kg <sup>-1</sup> )<br>available<br>nitrogen<br>(N) | 有效磷/<br>(mg · kg <sup>-1</sup> )<br>available<br>phosphorus<br>(P) | 有机质/<br>(g · kg <sup>-1</sup> )<br>organic<br>matter | pH   |
|--------------------------------------|--|--|---|--|--|--|------|
| 石灰岩<br>Limestones                    | 1.43   | 0.75   | 1.68  | 138.81   | 8.98   | 4.67   | 6.54 |
| 玄武岩<br>basalts                       | 1.58   | 0.92   | 1.57  | 135.07   | 10.43  | 4.56   | 6.68 |

1.4 数据统计与分析

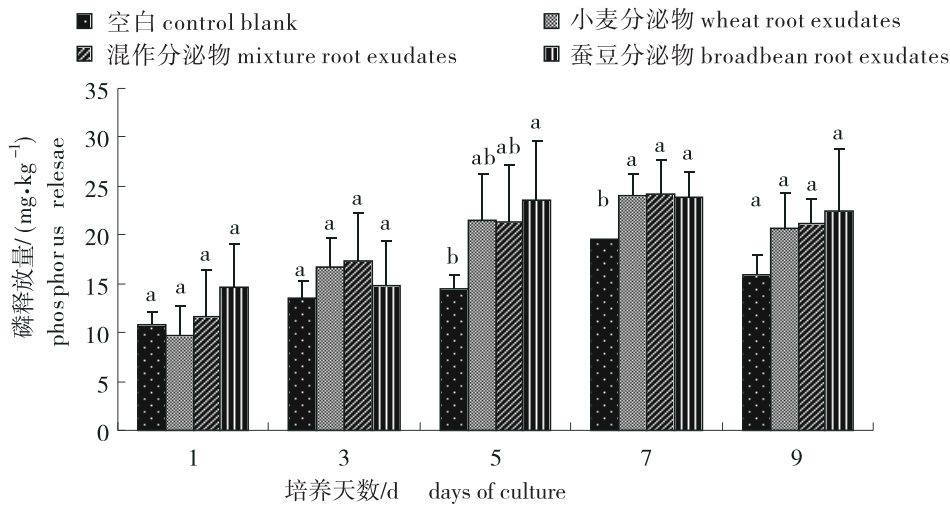
本试验采用 SAS 软件和 EXCEL 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 根系分泌物对土壤有效磷含量的影响

由图 1, 2 可以看出, 在培养过程中, 3 种作物缺磷处理根系分泌物对有效磷的活化量均比对照处理的高。根系分泌物对供试两种母质土壤的有效磷都有不同程度的影响, 有效磷先增加后逐渐趋于平稳的过程, 有效磷的活化能力总的趋势为: 蚕豆根系分泌物 > 混作根系分泌物 > 小麦根

系分泌物 > 对照。石灰岩母质土壤上蚕豆根系分泌物对磷活化总量最高, 其次是混作根系分泌物, 最低为小麦根系分泌物。3 种根系分泌物对土壤磷的活化量都是到第 7 d 时出现最大值。玄武岩土壤与石灰岩土壤的变化趋势基本一致, 蚕豆根系分泌物的活化总量最高, 其次是混作根系分泌物和小麦根系分泌物。蚕豆根系分泌物和混作根系分泌物同样是在第 7 d 时达到最大活化值并与对照差异显著 (P < 0.05), 而小麦根系分泌物与对照差异不显著 (P > 0.05)。小麦根系分泌物在第 5 d 时达到最大活化量, 此后小麦根系分泌物活化量呈下降趋势, 到 9 d 基本趋于平稳。



注: 图中不同字母表示差异达5%水平, 下同。

Note: Different letters mean significant difference (P < 0.05), the same as below.

图 1 不同根系分泌物对石灰岩母质土壤有效磷的影响

Fig. 1 Influence of different root exudates on available P content of limestones soil

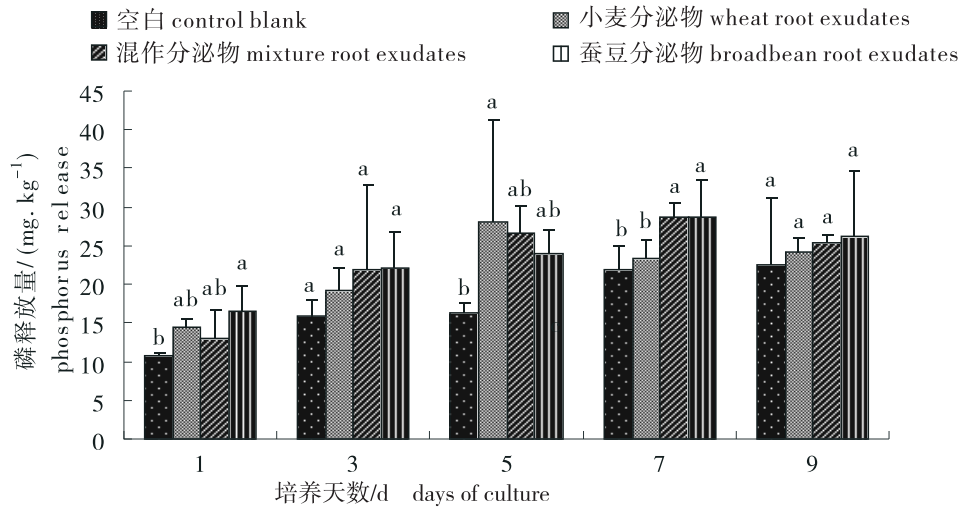


图 2 不同根系分泌物对玄武岩母质有效磷的影响  
Fig. 2 Influence of different root exudates on available P content of basalts soil

2.2 不同母质土壤磷组分的变化

土壤无机磷组成因土壤酸碱环境不同而有明显的区别。根据南方土壤的特点采用张守敬和 JACKSON<sup>[7]</sup> 的分组方法, 可将无机磷分为以下几种形态: 磷酸铝盐 (Al-P)、磷酸铁盐 (Fe-P) 闭蓄态磷 (O-P)、磷酸钙盐 (Ca-P)。从试验结果 (表 2) 可以看出, 不同母质之间土壤磷的组分存在差异。石灰岩母质土壤无机磷总量为 244.42 mg/kg, Al-P, Ca-P 含量很少, Fe-P,

O-P 占无机磷总量的 66.84%, 23.18%; 玄武岩母质土壤无机磷总量为 231.67 mg/kg, Al-P 含量明显高于石灰岩母质土壤, 占无机磷总量的 11.46%, Fe-P, O-P 占无机磷总量的 61.50%, 26.24%。由此可知, 红壤无机磷各组分中, Ca-P 含量最低, Al-P 含量较低, O-P 含量较高, Fe-P 含量最高, 因此红壤上无机磷以 Fe-P 和 O-P 为主。

表 2 供试红壤磷各组分含量

Tab. 2 Content of inorganic phosphorus fractions of tested red soil

| 土壤母质<br>soil parent matter | 磷酸铝盐<br>Al-P | 磷酸铁盐<br>Fe-P | 闭蓄态磷<br>O-P | 磷酸钙盐<br>Ca-P | 无机磷总量<br>total content of inorganic P |
|----------------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|---------------------------------------|
| 石灰岩母质<br>limestones        | 22.30        | 163.38       | 56.65       | 2.09         | 244.42                                |
| 玄武岩母质<br>basalts           | 26.56        | 142.48       | 60.78       | 1.85         | 231.67                                |

2.2.1 磷酸铝盐 (Al-P) 在土壤中的含量变化

如表 3 可知, 石灰岩母质的培养过程中, 在培养初期 3 种根系分泌物处理 Al-P 含量与对照相比差异均不显著 ( $P > 0.05$ ), 但在第 3 d 蚕豆根系分泌物、混作根系分泌物处理 Al-P 含量与小麦根分泌物之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。第 7 d 时 3 种根系分泌物与对照差异显著 ( $P < 0.05$ ) 均比对照 Al-P 含量低, 小麦根系分泌物和蚕豆根系分泌物降幅都比较大, 混作根系分泌物降幅较小。培养后期 Al-P 含量均比对照值低但与对

照差异并不显著 ( $P > 0.05$ ), 蚕豆根系分泌物最低, 其次是混作根系分泌物和小麦根系分泌物。

玄武岩母质的培养过程中, 培养初期第 1 d 小麦根系分泌物和混作根系分泌物与对照之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 而蚕豆根系分泌物与对照差异不显著 ( $P > 0.05$ )。培养 3 ~ 7 d 时 3 种处理与对照之间均达到显著差异 ( $P < 0.05$ ) 并低于对照水平, 后期 3 种处理与对照之间无显著差异 ( $P > 0.05$ ) 变化量基本趋于平稳。

表3 根系分泌物对 Al-P 含量的影响

Tab. 3 Effects of root exudates application on Al-P content

| 土壤<br>soil        | 处理<br>treatment | Al-P 含量/ (mg · kg <sup>-1</sup> ) Al-P content |                |                |                |                |
|-------------------|-----------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                   |                 | 1 d  | 3 d            | 5 d            | 7 d            | 9 d            |
| 石灰岩<br>limestones | CK              | 21.35 ± 1.1 ab                                 | 22.97 ± 0.7 ab | 23.77 ± 0.09 a | 24.73 ± 0.5 a  | 24.86 ± 1.5 a  |
|                   | I               | 22.35 ± 1.1 ab                                 | 23.93 ± 0.2 a  | 24.53 ± 1.8 a  | 16.94 ± 0.9 c  | 23.52 ± 1.0 ab |
|                   | II              | 22.97 ± 0.6 a                                  | 22.00 ± 1.6 b  | 23.00 ± 1.2 a  | 17.73 ± 0.2 c  | 18.85 ± 0.4 b  |
|                   | III             | 20.26 ± 0.1 b                                  | 21.74 ± 0.2 b  | 23.75 ± 0.6 a  | 20.19 ± 1.5 b  | 22.47 ± 4.7 ab |
| 玄武岩<br>basalts    | CK              | 26.02 ± 0.8 b                                  | 25.97 ± 0.5 a  | 28.62 ± 1.1 a  | 25.23 ± 0.04 a | 25.18 ± 1.0 ab |
|                   | I               | 28.23 ± 0.8 a                                  | 20.91 ± 0.3 c  | 27.46 ± 0.1 ab | 22.35 ± 0.1 b  | 26.19 ± 0.2 a  |
|                   | II              | 24.88 ± 0.5 b                                  | 22.11 ± 0.1 c  | 24.87 ± 1.8 c  | 21.12 ± 0.5 c  | 26.20 ± 0.1 a  |
|                   | III             | 28.00 ± 1.4 a                                  | 23.67 ± 1.3 b  | 25.71 ± 0.3 bc | 22.91 ± 0.5 b  | 25.06 ± 0.3 b  |

注 CK: 空白对照; I: 小麦分泌物; II: 蚕豆根分泌物; III: 小麦、蚕豆混作根分泌物; 下同。

Note CK: control blank; I: wheat root exudates; II: broadbean root exudates; III: wheat and broadbean mixture root exudates; the same as below.

### 2.2.2 磷酸铁盐 (Fe-P) 在土壤中的含量变化

由表4可知, 对照处理中 Fe-P 的含量变化在小的范围内波动, 2种不同母质土壤上 Fe-P 含量变化范围也很小。石灰岩母质中 Fe-P 含量的变化中, 培养初期1~3d, 小麦根系分泌物处理的 Fe-P 含量高于对照处理并达到显著差异 ( $P < 0.05$ ), 蚕豆根系分泌物处理 Fe-P 含量低于对照水平, 混作根系分泌物在第3d时与对照处理差异显著 ( $P < 0.05$ )。培养5~9d时3种处理与对照相比 Fe-P 含量均呈下降趋势, 蚕豆

根系分泌物在整个的培养阶段 Fe-P 含量均低于对照处理, 混作根系分泌物的变化趋势基本和蚕豆根系分泌物相似。在玄武岩母质培养的过程中, 在整个的培养阶段从初期开始3种根系分泌物处理就低于对照处理。小麦根系分泌物处理在3d和7d时, Fe-P 含量高于对照, 蚕豆根系分泌物处理在整个培养时期 Fe-P 含量均低于对照处理。混作根系分泌物在7d时, Fe-P 含量高于对照处理。

表4 根系分泌物对 Fe-P 含量的影响

Tab. 4 Effects of root exudates application on Fe-P content

| 土壤<br>soil        | 处理<br>treatment | Fe-P 含量/ (mg · kg <sup>-1</sup> ) Fe-P content |                 |                |                 |                |
|-------------------|-----------------|--|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
|                   |                 | 1 d  | 3 d             | 5 d            | 7 d             | 9 d            |
| 石灰岩<br>limestones | CK              | 147.85 ± 1.6 b                                 | 153.35 ± 1.0 c  | 165.90 ± 1.0 a | 159.42 ± 0.6 a  | 153.48 ± 1.1 a |
|                   | I               | 165.14 ± 17.7 a                                | 153.77 ± 0.1 b  | 144.97 ± 0.4 c | 141.87 ± 3.3 b  | 140.44 ± 1.1 c |
|                   | II              | 130.11 ± 0.3 c                                 | 130.60 ± 0.4 c  | 143.99 ± 1.4 c | 139.45 ± 2.8 c  | 131.20 ± 0.9 d |
|                   | III             | 142.35 ± 2.2 bc                                | 161.31 ± 0.9 a  | 151.31 ± 1.3 b | 141.04 ± 1.7 bc | 150.38 ± 1.4 b |
| 玄武岩<br>basalts    | CK              | 137.86 ± 1.6 a                                 | 138.35 ± 5.4 ab | 139.42 ± 1.9 a | 123.48 ± 1.1 b  | 145.90 ± 2.1 a |
|                   | I               | 133.98 ± 1.4 b                                 | 139.48 ± 4.6 a  | 135.68 ± 1.5 b | 138.00 ± 4.6 a  | 136.14 ± 3.4 b |
|                   | II              | 120.81 ± 2.3 c                                 | 121.31 ± 0.3 c  | 134.70 ± 0.9 b | 121.91 ± 1.4 b  | 142.59 ± 0.9 a |
|                   | III             | 133.06 ± 2.0 b                                 | 132.02 ± 0.5 b  | 131.74 ± 1.7 c | 140.11 ± 1.5 a  | 142.24 ± 0.2 a |

### 2.2.3 闭蓄态磷 (O-P) 在土壤中的含量变化

表5显示, 2种母质土壤与对照处理的 O-P 含量变化量随时间推移基本变化不大。在石灰岩母质上, 培养初期第1d对照处理 O-P 含量与混作根系分泌物之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 在培养的3~5d, 3种处理在根系分泌物的作用下, O-P 含量基本变化不大。第7d小麦根系分泌物、混

作根系分泌物 O-P 含量均低于对照处理, 蚕豆根系分泌物略高于对照, 并且小麦根系分泌物与对照之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 第9d时3种根系分泌物处理 O-P 含量均低于对照并与对照差异显著 ( $P < 0.05$ )。

在玄武岩母质上, 在培养初期小麦根系分泌物、混作根系分泌物 O-P 含量高于对照处理。

培养第 3 d, 3 种根系分泌物处理 O-P 含量均低于对照处理并与对照差异显著 ( $P < 0.05$ )。在第 5 d 时小麦根系分泌物和蚕豆根系分泌物与对照差异显著 ( $P < 0.05$ )。培养后期变化趋势同培养初期一致。即小麦根系分泌物、混作根系分泌物含

量高于对照, 蚕豆根系分泌物低于对照。在石灰岩母质上蚕豆根系分泌物 O-P 的略有升高可能与其不同母质土壤的风化程度有关, 还有待于进一步的研究。

表 5 根系分泌物对 O-P 含量的影响

Tab. 5 Effects of root exudates application on O-P content

| 土壤<br>soil        | 处理<br>treatment | O-P 含量/ (mg · kg <sup>-1</sup> ) O-P content |                |               |                |                |
|-------------------|-----------------|--|----------------|---------------|----------------|----------------|
|                   |                 | 1 d  | 3 d            | 5 d           | 7 d            | 9 d            |
| 石灰岩<br>limestones | CK              | 58.51 ± 2.9 a                                | 55.42 ± 1.6 ab | 55.01 ± 1.1 a | 53.82 ± 1.2 a  | 61.37 ± 0.8 a  |
|                   | I               | 61.08 ± 0.9 a                                | 58.16 ± 3.8 a  | 56.28 ± 1.2 a | 49.81 ± 0.7 b  | 52.10 ± 1.5 c  |
|                   | II              | 61.09 ± 1.0 a                                | 51.27 ± 0.4 c  | 55.65 ± 1.2 a | 54.20 ± 1.9 a  | 53.15 ± 2.5 bc |
|                   | III             | 51.06 ± 0.4 b                                | 53.15 ± 0.7 bc | 56.49 ± 0.6 a | 52.94 ± 1.4 a  | 55.65 ± 1.8 b  |
| 玄武岩<br>basalts    | CK              | 56.72 ± 2.1 ab                               | 55.92 ± 1.1 a  | 53.51 ± 1.2 b | 56.82 ± 0.9 a  | 51.87 ± 2.2 ab |
|                   | I               | 60.35 ± 2.2 a                                | 53.37 ± 1.4 b  | 45.26 ± 1.9 c | 52.53 ± 3.0 b  | 54.43 ± 1.3 a  |
|                   | II              | 55.57 ± 1.6 b                                | 53.51 ± 0.8 b  | 58.94 ± 2.4 a | 53.97 ± 0.5 ab | 49.11 ± 0.7 b  |
|                   | III             | 58.89 ± 2.5 ab                               | 53.49 ± 0.7 b  | 50.70 ± 2.9 b | 53.89 ± 0.9 ab | 54.94 ± 2.1 a  |

#### 2.2.4 磷酸钙盐 (Ca-P) 在土壤中的含量变化

从表 6 可以看出, 石灰岩母质在整个培养过程中, 3 种根系分泌物处理与对照之间差异均不显著 ( $P > 0.05$ ), 但是在第 3 d 时小麦根系分泌物与蚕豆根系分泌物和混作根系分泌物之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。在玄武岩母质培养过程中, 在培养初期 3 种根系分泌物处理与对照之间均差异

显著 ( $P < 0.05$ ), Ca-P 含量均高于对照值。在培养 3 ~ 7 d 时小麦根系分泌物和混作根系分泌物与对照之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 而蚕豆根系分泌物与对照之间并未达到显著性差异 ( $P > 0.05$ )。在培养后期与培养初期一致, 即 3 种处理与对照之间均达到显著差异 ( $P < 0.05$ )。

表 6 根系分泌物对 Ca-P 含量的影响

Tab. 6 Effects of root exudates application on Ca-P content

| 土壤<br>soil        | 处理<br>treatment | Ca-P 含量/ (mg · kg <sup>-1</sup> ) Ca-P content |               |               |                |              |
|-------------------|-----------------|--|---------------|---------------|----------------|--------------|
|                   |                 | 1 d  | 3 d           | 5 d           | 7 d            | 9 d          |
| 石灰岩<br>limestones | CK              | 2.11 ± 0.2 a                                   | 2.28 ± 0.1 ab | 2.40 ± 0.1 a  | 2.49 ± 0.3 a   | 2.38 ± 0.4 a |
|                   | I               | 2.31 ± 0.1 a                                   | 2.62 ± 0.3 a  | 2.32 ± 0.5 a  | 2.31 ± 0.04 a  | 2.43 ± 0.3 a |
|                   | II              | 2.28 ± 0.1 a                                   | 2.19 ± 0.2 b  | 2.40 ± 0.2 a  | 2.29 ± 0.4 a   | 2.52 ± 0.2 a |
|                   | III             | 2.33 ± 0.2 a                                   | 2.42 ± 0.1 ab | 2.37 ± 0.2 a  | 2.50 ± 0.04 a  | 2.36 ± 0.2 a |
| 玄武岩<br>basalts    | CK              | 2.11 ± 0.1 c                                   | 2.26 ± 0.1 b  | 2.45 ± 0.1 c  | 2.46 ± 0.3 c   | 2.20 ± 0.1 c |
|                   | I               | 2.71 ± 0.1 b                                   | 3.10 ± 0.2 a  | 3.03 ± 0.2 b  | 3.06 ± 0.2 b   | 3.22 ± 0.2 b |
|                   | II              | 2.77 ± 0.1 b                                   | 2.66 ± 0.2 ab | 2.80 ± 0.1 bc | 2.75 ± 0.04 bc | 3.86 ± 0.2 a |
|                   | III             | 3.17 ± 0.1 a                                   | 3.24 ± 0.5 a  | 3.46 ± 0.3 a  | 3.44 ± 0.2 a   | 3.45 ± 0.2 b |

### 3 讨论与结论

施用根系分泌物能明显提高土壤有效磷的含量。有研究表明缺磷胁迫条件下, 植物通过根系分泌低分子量有机酸来提高磷的生物有效

性<sup>[6,9-12]</sup>。据研究, 根系分泌物中有机酸能明显提高土壤有效磷含量<sup>[13-16]</sup>, 而有效磷含量的增加与土壤中无机磷形态的变化有密切关系。

在这两种供试母质土壤上, 与对照相比, 3 种根分泌物处理一方面促进了红壤中磷的释放, 另一方面对土壤无机磷的影响不尽相同, 总的趋

势是两种母质土壤上无机磷总量下降。其中主要是 Al-P 和 Fe-P 含量下降, O-P 和 Ca-P 含量变化不大, 而 Al-P 和 Fe-P 在土壤中含量较多, 可能是植物吸收磷的主要贡献者。陆文龙等研究表明, 将有机酸加入到红壤中浸提, 红壤经有机酸处理后, 无机磷组分也发生了变化, Fe-P 含量的下降幅度在 5%~8%, 表明植物在缺磷胁迫下分泌的有机酸可溶解红壤中的 Fe-P, 从而提高磷的有效性。这与本试验研究的结果相一致。但本试验采用的是直接提取的缺磷条件下的根系分泌物来对红壤进行培养, 更能反应出根系分泌物对土壤磷素的影响。

培养过程中玄武岩母质的有效磷变化量大于石灰岩母质, 可能是由于玄武岩风化及强烈, 全磷含量高, 有效磷含量也较高, 而石灰岩难风化, 所以有效磷的相对含量就比较低, 其有效性低的原因可能是土壤活性铝、铁含量高, 另外与土壤中不同形态无机磷占无机磷总量比例有关。由此可以推测: Al-P, Fe-P, 是酸性土壤有效磷的重要来源, 这与成瑞喜等研究的结果一致。本试验研究表明, 根系分泌物一方面可提高土壤中有有效磷含量, 另一方面对土壤中无机磷形态转化有明显的促进作用, 总的趋势是促进土壤中植物难以利用的无机磷向可利用的形态转化。

#### [参考文献]

- [1] 鲁如坤. 我国土壤氮、磷、钾的基本情况 [J]. 土壤学报, 1989, 26 (3): 280-286.
- [2] GARDNER W K, BARBER D A, PARBERRY D G. The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L: III. The probable mechanism by which phosphorus movement in the soil/root interface is enhanced [J]. Plant and soil, 1983, 70: 107-124.
- [3] AE N, ARIHARA J, OKADA K, et al.. phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of Indian subcontinent [J]. Science, 1990, 248: 477-480.
- [4] FOHSE D N, CLAASSEN N, JUNGK A. Phosphorus efficiency of plant, II Significance of root. Radius, root hairs and cation/anion balance for phosphorus influx in sever plant species [J]. Plant and Soil, 1991, 132: 261-272.
- [5] EISENSTAT D M. Costs and benefits of construction roots of small diameter [J]. Plant Nutrition Journal, 1992, 15: 763-782.
- [6] 张福锁. 环境胁迫与植物根际营养 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [7] 张福锁, 李隆. 蚕豆根系分泌物可促进磷的活化 [J]. 大众科技日报, 2007, 11 (2): 5-6.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [9] 胡红青, 李妍, 贺纪正. 土壤有机酸与磷素相互作用的研究 [J]. 土壤通报, 2004, 35 (2): 222-229.
- [10] 陆文龙, 张福锁, 曹一平, 等. 低分子量有机酸对石灰性土壤磷吸附动力学的影响 [J]. 土壤学报, 1999, 36 (2): 189-197.
- [11] TADANO T, SAKAI H. Secretion of acid phosphorus by roots of sever crop species under phosphorus-deficient conditions [J]. Plant and soil, 1991, 37 (1): 129-140.
- [12] JONES D J, DARRAH P R. Role of root derived organic acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere [J]. Plant and Soil, 1994, 166: 247-257.
- [13] 胡红青, 贺纪正, 李学垣. 多种有机酸共存对可变电荷土壤吸附磷的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5 (2): 122-128.
- [14] 章永松, 林成永, 罗安程, 等. 有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4 (2): 145-150.
- [15] 胡红青, 贺纪正, 李学垣. 有机酸对酸性土壤吸附磷的影响 [J]. 华中农业大学学报, 1997, 16 (1): 37-42.
- [16] 曲东, 尉庆丰. 有机酸对石灰性土壤磷素的活化效应 [J]. 西北农业大学学报, 1996, 24 (1): 101-103.