

栗丽, 李廷亮, 孟会生, 洪坚平, 谢英荷. 溶磷菌剂对施磷复垦土壤无机磷形态及油菜磷吸收的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26 (3): 612-618
Li L, Li TL, Meng HS, Hong JP, Xie YH. Effects of a phosphorus-dissolving agent on the phosphorus absorption of rape and inorganic phosphorus fractions in reclaimed soil supplemented with phosphorus fertilizers [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2020, 26 (3): 612-618

溶磷菌剂对施磷复垦土壤无机磷形态及油菜磷吸收的影响

栗丽^{1,2} 李廷亮^{1,2} 孟会生^{1,2} 洪坚平^{1,2} 谢英荷^{1,2}✉

¹山西农业大学资源环境学院 太谷 030801

²山西农业大学资源环境国家级实验教学中心 太谷 030801

摘要 磷的有效化是限制复垦土壤肥力提升的主要因素, 溶磷菌能够活化土壤中的难溶态的磷, 增强土壤磷的供给能力, 研究其对复垦土壤无机磷形态及生物有效性的影响, 可为矿区复垦土壤熟化和肥力提升提供科学依据. 通过盆栽试验, 研究混合溶磷菌剂对施用磷矿粉和磷酸钙的复垦土壤中有效磷含量、磷酸酶活性、无机磷形态及其转化以及盆栽油菜磷素吸收的影响. 结果显示: 与未接种溶磷菌剂的处理相比, 接种溶磷菌剂后复垦土壤中有效磷含量和磷酸酶活性分别提高了61.44%-65.77%和95.49%-104.75% ($P < 0.05$); 土壤油菜鲜重和吸磷量分别增加了28.07%-33.89%和25.53%-33.33% ($P < 0.05$). 等磷量施用磷酸钙和磷矿粉, 复垦土壤中的无机磷均以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主要形态. 在施用磷矿粉的土壤中接种溶磷菌剂能够显著降低 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量和转化率, 提高 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量和转化率, 促进 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 向 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 转化; 在施用磷酸钙的土壤中接种溶磷菌剂能够促进 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 向 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 转化, O-P 向 Al-P 转化. 土壤有效磷和磷酸酶以及油菜吸磷量的增加与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的减少以及 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 的增加有关. 本研究表明溶磷菌剂能够促进磷矿粉和磷酸钙在复垦土壤中由 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 向 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 转化, 提高土壤磷的生物有效性; 另外, 在施用磷酸钙的土壤中, 溶磷菌剂的溶磷能力和对油菜的促生效果优于施用磷矿粉的土壤. (图1 表6 参35)

关键词 溶磷菌剂; 复垦土壤; 无机磷形态; 有效磷; 磷素吸收

Effects of a phosphorus-dissolving agent on the phosphorus absorption of rape and inorganic phosphorus fractions in reclaimed soil supplemented with phosphorus fertilizers

LI Li^{1,2}, LI Tingliang^{1,2}, MENG Huisheng^{1,2}, HONG Jianping^{1,2} & XIE Yinghe^{1,2}✉

¹ College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

² National Experimental Teaching Demonstration Center for Agricultural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

Abstract The availability of phosphorus is one of the main limiting factors in improving reclaimed soil fertility. Phosphate-dissolving bacteria can activate recalcitrant phosphorus and enhance the available phosphorus supply in soil. Investigation into the effects of phosphate-dissolving bacteria on inorganic phosphorus fractions and bioavailability in reclaimed soil could provide a scientific basis for soil maturation and fertility improvement of reclaimed soil in mining areas. A pot experiment was conducted to study the effects of phosphate-dissolving bacteria on available phosphorus content, phosphatase activity, inorganic phosphorus fractions, and its transformation in reclaimed soil, as well as the phosphorus absorption of potted rape. Phosphate rock powder and tricalcium phosphate were used as exogenous phosphorus and added at the rate of 0.23 g P kg^{-1} soil, with the phosphorus-dissolving agent applied at a rate of 1.0 g kg^{-1} soil. The results showed that inoculation with phosphate-dissolving bacteria significantly increased the available phosphorus content, enzyme activity, and phosphorus uptake by rape ($P < 0.05$). Inoculation with a phosphorus-solubilizing agent resulted in an increase in available phosphorus content, phosphatase activity, rape fresh weight, and phosphorus uptake in the combined treatments by 61.44%–65.77%, 95.49%–104.75%, 28.07%–33.89%, and 25.53%–33.33%, respectively. Under the same phosphorus application amount, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ was the main inorganic phosphorus soil fraction in all treatments. Inoculating reclaimed soil supplemented with phosphate rock powder with a phosphate-dissolving agent significantly reduced the amount and conversion rate of $\text{Ca}_{10}\text{-P}$, while increasing

收稿日期 Received: 2019-08-22 接受日期 Accepted: 2019-12-04

国家自然科学基金项目(U1710255-3)、国家重点研发计划项目(2018YFD0200401)和国家公益性行业(农业)专项(201303104, 201503124)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (U1710255-3), the National Key Research and Development Project of China (2018YFD0200401) and the National Public Welfare Industry (Agriculture) Special Project of China (201303104, 201503124)

✉通讯作者 Corresponding author (E-mail: xieyinghe@163.com)

that of $\text{Ca}_8\text{-P}$ ($P < 0.05$). This indicates that phosphate-solubilizing agents promote the transformation of $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ to $\text{Ca}_8\text{-P}$. The combination of phosphate-solubilizing agent and tricalcium phosphate may promote the transformation of $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ to $\text{Ca}_8\text{-P}$ and $\text{Ca}_2\text{-P}$, as well as O-P to Al-P . Available soil phosphorus, phosphatase activity, and phosphorus absorption of rape were negatively correlated with $\text{Ca}_{10}\text{-P}$, and positively correlated with $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$, Fe-P , and Al-P ($P < 0.05$). This indicates that the increase of available phosphorus and phosphatase in the soil, as well as the phosphorus absorption in rape is related to the decrease of $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ and the increase of $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P , and Fe-P . Our results suggest that phosphorus-dissolving bacteria could promote the transformation of inorganic phosphorus from $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ to $\text{Ca}_2\text{-P}$ and $\text{Ca}_8\text{-P}$, as well as O-P to Al-P in reclaimed soil. This would therefore increase the content of available phosphorus in soil and improve bioavailability of phosphorus for rape. In addition, phosphorus-dissolving bacteria had a greater effect on rape growth and dissolving phosphorus in soil supplemented with tricalcium phosphate, compared to soil supplemented with phosphate rock powder.

Keywords phosphorus solubilizing agent; reclaimed soil; inorganic phosphorus form; available phosphorus; phosphorus absorption

磷(P)是植物生长发育和产量形成所必需的营养元素之一,土壤中的无机磷占全磷总量的60%-80%,是植物所需磷素的主要来源^[1,2]. 土壤中的无机磷有多种形态,且不同形态间存在复杂的转化关系^[3]. 土壤供磷能力和水平受土壤中无机磷形态及其有效性的影响,然而,进入土壤中的无机磷与土壤中的 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 结合,形成不能被植物吸收利用的难溶态磷酸盐,生物有效性降低^[4]. 受到采煤塌陷及人为因素的影响,复垦土壤养分十分贫瘠,且施入土壤中的化学磷肥极易被吸附固定,导致复垦土壤有效磷含量极低. 保证土壤中磷素的高效利用是矿区土壤复垦成功的关键,而磷素的有效化成为复垦土壤肥力提升的主要限制因子^[5]. 溶磷菌能够活化土壤中的难溶性磷,增强土壤有效磷的供给能力,进而提高磷素利用率,改善植物营养,并促进作物增产^[6-7]. 因此,研究溶磷菌对复垦土壤无机磷形态转化以及对植物磷素吸收的影响,对提高复垦土壤磷素及其作物有效性具有重要意义.

溶磷菌的解磷过程十分复杂,其溶磷能力和潜在机制也因菌种不同而异. 研究表明,溶磷菌能够通过酸解作用、酶解作用以及蛋白质作用等途径将土壤中无效磷转化为有效态磷供植物吸收利用^[8]. 目前,溶磷菌在复垦土壤中的研究主要集中在溶磷菌对复垦土壤中磷的吸附解吸特征及磷的有效性,溶磷菌的促生作用及其对复垦土壤磷素分级的影响等方面^[9-11]. 孟会生等的研究表明解磷菌肥与有机无机肥配施能够提高复垦土壤磷的最大解吸量和解吸率,提高复垦土壤Olsen-P及碱性磷酸酶活性,并且通过改变土壤微生物群落结构改善土壤结构和肥力^[12]. 乔志伟等研究表明复垦土壤中接种磷细菌,可以改善土壤磷素的解吸特征,有利于土壤快速培肥,并增加作物产量^[13]. 溶磷菌溶解难溶态无机磷,势必会导致土壤中的无机磷形态及其含量发生改变,进而影响土壤中磷的有效性以及植物对磷的吸收利用. 目前,溶磷细菌对复垦土壤无机磷形态转化及磷素有效性缺乏系统的研究. 我们以分离自石灰性土壤中的高效溶磷混合菌剂为试验材料,通过盆栽试验,研究溶磷菌剂对施用磷酸钙和磷矿粉的复垦土壤中无机磷形态转化特征,以及对盆栽油菜生长和磷素吸收的促进作用,结果可一定程度上丰富矿区复垦土壤培肥理论及技术.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤:取自山西襄垣采煤塌陷区生土. 土壤类型为

石灰性褐土,有机质含量5.32 g/kg,全氮0.17 g/kg,全磷0.53 g/kg,碱解氮5.48 mg/kg,有效磷3.24 mg/kg,速效钾139.06 mg/kg, pH为8.2; 土壤中无机磷分别为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ (磷酸二钙型)为4.87 mg/kg, $\text{Ca}_8\text{-P}$ (磷酸八钙型)为10.24 mg/kg, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ (磷灰石型)为162.16 mg/kg, Al-P (磷酸铝型)为30.27 mg/kg, Fe-P (磷酸铁型)为26.13 mg/kg, O-P (闭蓄态磷)为38.58 mg/kg. 取回的土壤风干后过2 mm筛,充分混匀备用.

供试溶磷菌剂:从山西石灰性土壤中分离出来的高效溶磷细菌,分别为蜡样芽孢杆菌(*Waxy bacillus*, W11)、拉恩氏菌(*Rahnella* sp., W25)和荧光假单胞菌(*Fluorescent pseudomonas*, W137),经检验菌种间无拮抗作用. 将各菌株等比例混合置于高密度发酵罐中发酵后,按V(菌液):m(腐熟的鸡粪)=1:9的比例在搅拌机中混匀,制成溶磷菌剂(P_2O_5 含量为0.95%),有效活菌数 $\geq 0.5 \times 10^8$ cfu/g.

供试作物:甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.),品种为四月蔓.

供试肥料:复合肥(养分含量分别为N 20%、 P_2O_5 15%、 K_2O 5%);腐熟的鸡粪(有机质38.9%、N 2.15%、 P_2O_5 1.06%、 K_2O 1.31%);磷矿粉(P_2O_5 23%);磷酸钙(P_2O_5 46%).

1.2 试验设计

试验采用完全随机设计,设5个施肥处理,分别为对照(CK)、磷矿粉(PR)、磷酸钙(PT)、磷矿粉+溶磷菌剂(PR+PB)以及磷酸钙+溶磷菌剂(PT+PB),每个处理3次重复. 供试盆钵为30 cm × 27 cm的聚乙烯塑料盆,每盆装风干过筛土10 kg,加入腐熟鸡粪和复合肥各10 g/盆,外源磷添加量为0.23 g/kg,即磷矿粉为10 g/盆,磷酸钙为5 g/盆;菌剂施入量为10 g/盆. 所有肥料与盆装土壤混匀,在移栽油菜前一天,以基肥形式一次施入. 油菜于3月7日在温室中采用育苗盘进行育苗(自然光照,温度为15-22 ℃),3月28日移栽,每盆6株,生长期根据根据实际情况采用滴灌方式定量浇水,使土壤水分含量保持在田间持水量的70%左右,并经常更换盆的位置.

1.3 样品采集与测定

油菜于5月11日一次性收获带回实验室,先用自来水冲洗干净,再用蒸馏水冲洗,最后用吸水纸擦干后称鲜重. 采集的植株样品置于烘箱中杀青(105 ℃, 2 h)后烘干(55-60 ℃)至恒重,测定干重及油菜中的磷素含量. 油菜收获后采集土壤样品,用于测定土壤养分、无机磷形态及土壤酶活性. 植株全

磷、土壤全磷、有效磷含量测定参考鲍士旦的方法^[14]；土壤酶活性测定参考关松荫的方法^[15]。土壤无机磷分级测定采用蒋柏藩等的方法^[16]，各形态无机磷的转化率计算：转化率= 某形态无机磷的增加量/无机磷总增加量 $\times 100\%$ ^[17]。

1.4 数据处理

采用Excel 2013进行数据处理，运用SPSS 18.0软件和邓肯多重比较对各项指标进行One-way ANOVA分析 ($\alpha = 0.05$)，并对土壤中全磷、有效磷含量以及油菜磷吸收量等与土壤中各无机磷形态进行Pearson相关分析。

2 结果与分析

2.1 溶磷菌剂对复垦土壤磷素养分的影响

由表1可知，等量磷施用条件下，接种溶磷菌剂可显著提高复垦土壤有机质含量，处理PR + PB比PR提高了41.25%，PT + PB比PT提高了44.69%。施用外源磷显著提高了复垦土壤中的全磷含量，与CK相比，处理 PR、PT、PR + PB和PT + PB分别提高了31.15%、33.22%、38.66%和38.49%，但各处理间差异不显著。接种溶磷菌剂对土壤全磷含量没有显著影响，但对土壤有效磷及土壤微生物量磷含量影响较大。与CK相比，单施磷酸钙能显著提高土壤有效磷和微生物量磷含量，分别提高了1.22倍和1.13倍；处理PT的有效磷和微生物量磷含量显著高于处理PR ($P < 0.05$)。接种溶磷菌剂可显著提高有效磷和微生物量磷含量，处理PR + PB比PR提高了61.44%和57.10%；处理PT + PB比PT提高了65.77%和71.36%。

2.2 溶磷菌剂对复垦土壤无机磷组分的影响

如表2所示，施用外源磷能显著增加土壤中无机磷的含量，但各施磷处理间差异不显著。复垦土壤中无机磷以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主，其次为O-P、Al-P、Fe-P和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ ， $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量最少。各

处理中， $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Al-P和Fe-P以处理PT + PB最高，O-P以处理PT最高， $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 以处理PR最高。处理PT土壤中的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Fe-P、Al-P和O-P的含量分别提高了57.23%、144.5%、42.36%、46.33%和52.28%， $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的含量降低了26.85%；与处理PR相比，处理PR + PB土壤中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量提高了1.14倍 ($P < 0.05$)， $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量降低了17.96% ($P < 0.05$)。与处理PT相比，处理PT + PB显著增加了土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量 (1.07倍和72.68%)，减少O-P和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量 (16.68%和14.30%)。与处理PR + PB相比，处理PT + PB中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Fe-P、Al-P分别提高了144.5%、42.36%、46.33%和52.28% ($P < 0.05$)，表明溶磷菌剂对磷酸钙的溶磷效果优于磷矿粉。

土壤无机磷各组分占总无机磷的比例如图1所示。各处理Ca-P所占比例最大 (67.07% - 86.43%)，尤其以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 所占比例最大。各施磷处理中， $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Al-P和Fe-P所占总无机磷的比例以处理PT + PB最高。施用磷矿粉后土壤中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 所占总无机磷的比例最高， $\text{Ca}_2\text{-P}$ 比例最低；与处理PR相比，处理PT中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Fe-P、Al-P和O-P所占比例显著增加， $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 所占比例显著下降。处理PR中无机磷组分百分比顺序表现为 $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{O-P} > \text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$ ，接种溶磷菌剂后，处理PR + PB中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 比例显著下降， $\text{Ca}_8\text{-P}$ 比例显著上升， $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、Fe-P和Al-P的比例也有所增加，但不显著。处理PT各无机磷组分表现为 $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{O-P} > \text{Fe-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$ ，接种溶磷菌剂后，处理PT + PB中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 比例显著下降， $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 比例显著上升，Fe-P和Al-P和O-P变化不显著。

不同处理中土壤无机磷各组分的转化率如表3所示。施入土壤中的磷主要转化为Ca-P，以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主。施入磷矿粉，土壤中的无机磷95.89%转化为 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ ，只有1.23%转化为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Fe-P和Al-P；接种溶磷菌剂后， $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的转化

表1 溶磷菌剂对复垦土壤有机质、全磷、有效磷和微生物量磷的影响 ($N = 3$)

Table 1 Effects of phosphorus solubilizing bacteria on the contents of SOM, TP, Olsen-P and MBP in reclaimed soil ($N = 3$)

处理 Treatment	有机质 SOM (w/g kg^{-1})	全磷 Total P (w/g kg^{-1})	有效磷 Olsen-P (w/mg kg^{-1})	微生物量磷 MBP (w/mg kg^{-1})
CK	$7.40 \pm 0.59\text{b}$	$0.626 \pm 0.036\text{b}$	$10.61 \pm 1.15\text{c}$	$5.32 \pm 1.21\text{c}$
PR	$7.20 \pm 0.75\text{b}$	$0.821 \pm 0.194\text{a}$	$13.33 \pm 3.74\text{c}$	$6.76 \pm 1.58\text{c}$
PT	$7.16 \pm 0.86\text{b}$	$0.834 \pm 0.192\text{a}$	$23.52 \pm 6.81\text{b}$	$11.87 \pm 3.21\text{b}$
PR + PB	$10.17 \pm 0.93\text{a}$	$0.868 \pm 0.123\text{a}$	$21.52 \pm 5.23\text{b}$	$10.62 \pm 3.12\text{b}$
PT + PB	$10.36 \pm 0.78\text{a}$	$0.867 \pm 0.076\text{a}$	$38.99 \pm 6.45\text{a}$	$20.34 \pm 5.22\text{a}$

CK、PR、PT、PR + PB以及PT + PB分别表示对照、磷矿粉、磷酸钙、磷矿粉+溶磷菌剂以及磷酸钙+溶磷菌剂处理；表中数据为平均值 $\pm$ 标准差，且同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

CK, PR, PT, PR + PB and PT + PB indicate control, phosphate rock powder addition, tricalcium phosphate addition, phosphate rock powder + phosphorus solubilizing agent and tricalcium phosphate + phosphorus solubilizing agent, respectively. Data in the table are mean $\pm$ SD, and numbers followed by different small letters in the same column mean significant difference among the treatments ($P < 0.05$).

表2 溶磷菌剂对复垦土壤各形态无机磷组分含量的影响 (w/mg kg^{-1} , $N = 3$)

Table 2 Effects of phosphorus solubilizing bacteria on the concentrations of inorganic phosphorus fractions in reclaimed soil (w/mg kg^{-1} , $N = 3$)

处理 Treatment	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	Fe-P	Al-P	O-P	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	Total P
CK	$9.03 \pm 1.10\text{d}$	$14.14 \pm 1.46\text{c}$	$29.77 \pm 5.21\text{b}$	$32.96 \pm 4.58\text{d}$	$33.63 \pm 2.75\text{d}$	$183.74 \pm 8.51\text{d}$	$302.27 \pm 17.4\text{b}$
PR	$12.86 \pm 2.21\text{cd}$	$18.62 \pm 4.27\text{c}$	$34.61 \pm 3.25\text{b}$	$31.88 \pm 3.19\text{d}$	$40.84 \pm 3.33\text{c}$	$656.86 \pm 83.30\text{a}$	$795.67 \pm 90.19\text{a}$
PT	$20.22 \pm 2.89\text{b}$	$45.53 \pm 8.56\text{b}$	$49.27 \pm 8.32\text{a}$	$46.65 \pm 6.61\text{b}$	$62.19 \pm 1.85\text{a}$	$517.81 \pm 27.22\text{b}$	$741.67 \pm 60.18\text{a}$
PR + PB	$14.68 \pm 2.56\text{c}$	$39.90 \pm 4.24\text{b}$	$37.15 \pm 5.34\text{b}$	$39.02 \pm 4.24\text{bc}$	$42.63 \pm 7.59\text{c}$	$556.48 \pm 39.39\text{b}$	$729.86 \pm 40.17\text{a}$
PT + PB	$41.77 \pm 4.16\text{a}$	$78.62 \pm 12.11\text{a}$	$55.6 \pm 8.27\text{a}$	$55.42 \pm 10.36\text{a}$	$53.3 \pm 6.63\text{b}$	$468.07 \pm 38.26\text{c}$	$752.78 \pm 34.12\text{a}$

CK、PR、PT、PR + PB以及PT + PB分别表示对照、磷矿粉、磷酸钙、磷矿粉+溶磷菌剂以及磷酸钙+溶磷菌剂处理。表中数据为平均值 $\pm$ 标准差，且同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

CK, PR, PT, PR + PB and PT + PB indicate control, phosphate rock powder addition, tricalcium phosphate addition, phosphate rock powder + phosphorus solubilizing agent and tricalcium phosphate + phosphorus solubilizing agent, respectively. Data in the table are mean $\pm$ SD, and numbers followed by different small letters in the same column mean significant difference among the treatments ($P < 0.05$).

率显著提高, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 转化率显著降低, 表明溶磷菌剂能促进磷矿粉添加土壤中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 向 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 转化. 施入磷酸钙, 土壤中的无机磷 76.03% 转化为 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$, 17.25% 转化为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 和 Al-P , 6.73% 转化为 O-P ; 接种溶磷菌剂后, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的转化率显著提高, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 转化率显著降低, 表明溶磷菌剂促使磷酸钙添加土壤中的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 向 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 转化, O-P 向 Al-P 转化.

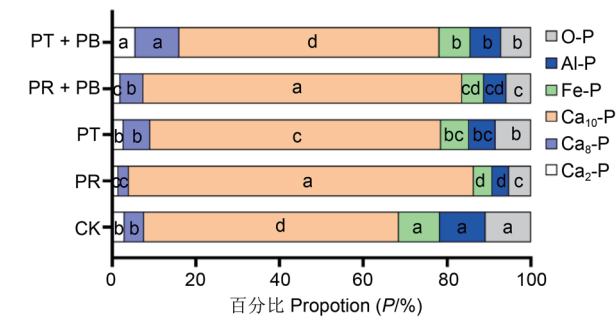


图1 各处理中土壤无机磷组分占无机磷总量的百分比 ($N = 3$). CK、PR、PT、PR + PB 以及 PT + PB 分别表示对照、磷矿粉、磷酸钙、磷矿粉 + 溶磷菌剂以及磷酸钙 + 溶磷菌剂处理. 方柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$).

Fig. 1. Proportions of soil inorganic phosphorus fractions to total inorganic phosphorus in different treatments ($N = 3$). CK, PR, PT, PR + PB and PT + PB indicate control, phosphate rock powder addition, tricalcium phosphate addition, phosphate rock powder + phosphorus solubilizing agent and tricalcium phosphate + phosphorus solubilizing agent, respectively. Different small letters above the bars indicate significant difference among the treatments ($P < 0.05$).

2.3 溶磷菌剂对复垦土壤酶活性的影响

如表4所示, 土壤磷酸酶、脲酶和转化酶活性均以处理PT + PB最高, 分别为CK的2.27、2.22倍和1.03倍. 接种溶磷菌剂后, 土壤转化酶活性没有显著变化, 磷酸酶和脲酶活性均显著增加, 处理PT + PB比PT增加了104.75%和93.90%, 处理PR + PB比PR增加了95.49%和84.27%. 不同施磷处理间比较,

处理PT + PB的磷酸酶、脲酶和转化酶活性显著高于处理PR + PB ($P < 0.05$), 增幅分别为20.19%、23.00%和17.63%; 处理PT的脲酶活性显著高于PR ($P < 0.05$), 增幅为29.03%.

2.4 溶磷菌剂对油菜生长及磷吸收的影响

如表5所示, 油菜鲜干重、磷含量以及磷吸收量均以处理PT + PB最高, 分别比CK提高了55.46%、45.83%、26.98%和86.05%. 与单施磷矿粉和磷酸钙相比, 接种溶磷菌剂均能显著提高油菜的鲜重和磷吸收量 ($P < 0.05$), 处理PT + PB比PT增加了33.89%和33.33%, 处理PR + PB比PR增加了28.07%和25.53%, 且处理PT + PB显著高于PR + PB (35.59%), PT显著高于PR (27.66%). 油菜干重和磷素含量在处理PR、PT和PR + PB间差异不显著, 但均显著低于处理PT + PB.

相关性分析结果如表6所示, 土壤全磷含量与各无机磷组分均无显著相关性, 表明土壤无机磷组分及其转化不受土壤中全磷含量的影响. 土壤有效磷和油菜磷素吸收量与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 和 Al-P 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 呈显著负相关 ($P < 0.05$). 土壤磷酸酶与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 呈显著负相关 ($P < 0.05$); 土壤微生物量磷与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 和 Al-P 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 呈极显著负相关 ($P < 0.01$).

3 讨论

3.1 溶磷菌剂对复垦土壤磷素养分的影响

土壤有效磷含量能够反映土壤中磷的供应容量以及磷细菌施入土壤后磷的释放速度^[18-19]. 研究表明溶磷微生物分泌的有机酸可以直接溶解难溶态磷酸盐, 将难溶态磷酸盐转换为有效态磷酸盐, 也可以与铁、铝、钙等离子螯合, 使难溶磷或不溶性磷转化为有效磷^[20-21]. 本研究中, 施用等量磷矿粉和磷酸三钙均能显著提高土壤中的全磷含量. 接种溶磷菌剂对土壤全磷含量没有显著影响, 但能显著提高土壤有效磷含量. 主要是因为溶磷细菌将土壤中的难溶态磷 (磷酸钙或磷矿

表3 不同处理复垦土壤中无机磷的转化率 ($P/\%$, $N = 3$)

Table 3 Conversion rate of inorganic phosphorus in reclaimed soil with different treatments ($P/\%$, $N = 3$)

处理 Treatment	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	Fe-P	Al-P	O-P	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$
PR	0.78b	0.91c	0.98b	-0.22c	1.66c	95.89a
PT	2.55b	7.14b	4.44a	3.12b	6.73a	76.03c
PR + PB	1.32b	6.02b	1.73b	1.42c	2.34c	87.17b
PT + PB	7.27a	14.31a	5.73a	4.99a	4.59b	63.11d

K、PR、PT、PR + PB 以及 PT + PB 分别表示磷矿粉、磷酸钙、磷矿粉 + 溶磷菌剂以及磷酸钙 + 溶磷菌剂处理. 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$).

PR, PT, PR + PB and PT + PB indicated phosphate rock powder addition, tricalcium phosphate addition, phosphate rock powder + phosphorus solubilizing agent and tricalcium phosphate + phosphorus solubilizing agent, respectively. Numbers followed by different small letters in the same column mean significant difference among the treatments ($P < 0.05$).

表4 溶磷菌剂对复垦土壤酶活性的影响 ($N = 3$)

Table 4 Effects of phosphorus solubilizing bacteria on enzyme activities of the reclaimed soil ($N = 3$)

处理 Treatment	磷酸酶 Phosphatase ($\lambda/\text{mg g}^{-1}$)	脲酶 Urease ($\lambda/\text{mg g}^{-1}$)	转化酶 Invertase ($\lambda/\text{mg g}^{-1}$)
CK	20.89 $\pm$ 1.78c	11.05 $\pm$ 0.69d	18.72 $\pm$ 0.86a
PR	20.39 $\pm$ 1.78c	10.3 $\pm$ 0.67d	15.30 $\pm$ 1.14b
PT	23.17 $\pm$ 2.82c	13.29 $\pm$ 1.58c	17.29 $\pm$ 1.19ab
PR + PB	39.47 $\pm$ 2.97b	19.91 $\pm$ 1.54b	16.57 $\pm$ 0.08b
PT + PB	47.44 $\pm$ 6.54a	24.49 $\pm$ 0.67a	19.49 $\pm$ 1.67a

CK、PR、PT、PR + PB 以及 PT + PB 分别表示对照、磷矿粉、磷酸钙、磷矿粉 + 溶磷菌剂以及磷酸钙 + 溶磷菌剂处理. 表中数据为平均值 $\pm$ 标准差, 且同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$).

CK, PR, PT, PR + PB and PT + PB indicate control, phosphate rock powder addition, tricalcium phosphate addition, phosphate rock powder + phosphorus solubilizing agent and tricalcium phosphate + phosphorus solubilizing agent, respectively. Data in the table are mean $\pm$ SD, and numbers followed by different small letters in the same column mean significant difference among the treatments ($P < 0.05$).

表5 溶磷菌剂对油菜生长及养分吸收的影响 ($N = 3$)Table 5 Effects of phosphorus solubilizing bacteria on the growth and nutrient absorption of rape ($N = 3$)

处理 Treatment	每株鲜重 Fresh weight per plant (mg)	每株干重 Dry weight per plant (mg)	磷素含量 P content (w%)	每株磷吸收量 P absorption per plant (mg)
CK	90.04 ± 1.96d	6.83 ± 0.55c	0.063 ± 0.001b	0.43 ± 0.06c
PR	94.01 ± 4.34d	7.20 ± 0.62bc	0.065 ± 0.005b	0.47 ± 0.05c
PT	104.55 ± 2.32c	8.40 ± 0.8b	0.072 ± 0.012ab	0.60 ± 0.09b
PR + PB	120.40 ± 9.99b	8.21 ± 1.22b	0.073 ± 0.003ab	0.59 ± 0.07b
PT + PB	139.98 ± 6.65a	9.96 ± 0.51a	0.080 ± 0.005a	0.80 ± 0.02a

CK、PR、PT、PR + PB以及PT + PB分别表示对照、磷矿粉、磷酸钙、磷矿粉+溶磷菌剂以及磷酸钙+溶磷菌剂处理。表中数据为平均值±标准差 ($N = 3$)，且同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

CK, PR, PT, PR + PB and PT + PB indicate control, phosphate rock powder addition, tricalcium phosphate addition, phosphate rock powder + phosphorus solubilizing agent and tricalcium phosphate + phosphorus solubilizing agent, respectively. Data in the table are mean ± SD ($N = 3$), and numbers followed by different small letters in the same column mean significant difference among the treatments ($P < 0.05$).

表6 土壤全磷、有效磷、微生物量磷、磷酸酶和磷吸收量与无机磷组分的相关分析

Table 6 Correlation analysis between TP, Olsen-P, MBP, phosphatase, P absorption and different inorganic phosphorus fractions

处理 Treatment	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Ca ₁₀ -P	Fe-P	Al-P	O-P
全磷 TP	-0.045	0.050	0.335	-0.146	0.130	0.212
有效磷 Olsen-P	0.919**	0.827**	0.651*	0.855**	0.773**	0.246
磷吸收量 P absorption	0.845**	0.840**	0.627*	0.734**	0.813**	0.165
磷酸酶 Phosphatase	0.673*	0.772**	0.623*	0.385	0.550	0.003
微生物量磷 Microbial biomass phosphorus	0.891**	0.948**	0.734**	0.668**	0.824**	0.413

** $P < 0.01$; * $P < 0.05$.

粉)转化为有效磷,使土壤中的有效磷含量增加,这与周鑫斌等人研究结果^[18]一致。然而,不同种类的溶磷细菌溶磷能力不同,同种溶磷细菌对不同外源磷的溶磷能力也有差异^[22-23]。前期的室内培养试验表明,供试溶磷菌剂中的各菌株对磷酸钙的溶解能力(400.6-583.5 mg/L)远大于对磷矿粉的溶解能力(19.48-21.27 mg/L)^[10]。本研究中溶磷菌剂对磷酸钙的溶解能力显著高于对磷矿粉的溶解能力,这与前期研究结果一致。但在土壤中,溶磷菌剂对磷酸钙的溶解能力大大降低,可能与溶磷细菌在培养基和土壤中溶磷能力不同有关,也可能是由于不同溶磷菌株对土壤养分的竞争,导致溶磷能力降低。

3.2 溶磷菌剂对复垦土壤无机磷组分的影响

石灰性土壤中的磷与Ca²⁺结合以Ca-P的形式存在,导致土壤中磷的生物有效性降低^[24-25]。溶磷菌剂对土壤中难溶态磷的转化,必然会引起土壤中各无机磷形态的变化。周鑫斌等研究表明在富含难溶性磷的石灰性土壤中施用溶磷菌肥有利于Ca₁₀-P和Ca₈-P向Ca₂-P转化,并增加Al-P含量^[18]。梁利宝等认为解磷细菌能够增加石灰性褐土中Ca₂-P、Al-P、Fe-P含量,减少Ca₈-P和Ca₁₀-P含量,对O-P则没有影响^[26]。孟会生等研究表明低磷条件下接种溶磷菌剂可提高石灰性土壤中Ca₂-P、Ca₈-P和O-P含量,降低Al-P、Fe-P和Ca₁₀-P含量^[27]。本研究中,等量施磷条件下,复垦土壤无机磷含量显著增加,但在各施磷处理间差异不显著。溶磷菌剂对施用磷矿粉和磷酸钙复垦土壤中各形态无机磷的含量及其转化能力不同。磷矿粉主要成分是钙磷灰石,施入土壤中只有很小部分被转化为有效磷,绝大多数以Ca₁₀-P的形态存在,接种溶磷菌剂后,土壤中Ca₁₀-P含量显著降低,Ca₈-P显著提高,促使Ca₁₀-P向Ca₈-P转化。施入土壤中的磷酸钙与Ca²⁺结合转化为Ca₈-P和Ca₁₀-P,同时和土壤胶体结合转化为O-P,接种溶磷菌剂后,土壤中Ca₁₀-P和O-P含量均显著降低,Ca₂-P、Ca₈-P和Al-P显著提高,促使Ca₁₀-P向Ca₂-P和Ca₈-P转化,O-P向Al-P转化。结果表明溶磷菌株主要是通过溶解土壤中的钙磷来提高复垦土壤中磷的有效性。另外,溶磷菌剂对磷酸钙的溶解能力显著高于对磷矿粉的溶解能力,这可能与溶磷菌株产生的有机酸种类及其对土壤中难溶性无机磷的作用方式和溶解能力不同有关。研究表明,在以钙磷灰石为磷源时主要产生乳酸、琥珀

酸、柠檬酸等难挥发性有机酸溶解钙磷灰石,促进土壤中钙磷的有效化^[22]。在以磷酸钙为磷源时主要产生甲酸、乙酸、丙酸、草酸等挥发性有机酸溶解磷酸钙,并且使有机酸阴离子与铁、铝、钙等离子螯合,促进难溶性磷酸盐的释放^[20]。

3.3 溶磷菌剂对复垦土壤磷酸酶活性及微生物生物量磷的影响

土壤磷酸酶是评价土壤磷素生物转化强度的重要指标,其活性对于土壤磷有效性具有重要意义。研究表明,溶磷细菌溶解难溶态磷的过程中不仅分泌有机酸,还可以分泌高活性的磷酸酶,将土壤有机磷转化为无机磷,进而增加土壤中的有效磷含量,在贫磷土壤条件下尤为显著^[28]。本研究中单施磷矿粉和磷酸钙对土壤磷酸酶活性没有显著影响,接种溶磷菌剂后,土壤磷酸酶活性显著增加。这与复垦土壤处于低磷水平时溶磷细菌分泌磷酸酶的增加有关。另外,磷酸酶是一种诱导酶,植物根系分泌物也可能诱导磷酸酶的产生,进而增加土壤中磷酸酶的活性^[29]。土壤微生物量磷与有效磷关系密切,对土壤磷素的生物转化以及磷素的植物有效性具有重要意义,可作为土壤磷生物有效性的一个重要指标^[30]。施入土壤中的溶磷细菌在生长过程中同化无机磷,直接导致微生物生物量磷的显著提高^[6]。另外,溶磷细菌在转化难溶性无机磷过程中也可能提高自身的细胞磷含量,进而增加土壤中微生物磷的含量^[18]。这与本研究结果一致。本研究中,土壤微生物量磷与Ca₈-P、Ca₂-P、Al-P和Fe-P呈极显著正相关($P < 0.01$),与Ca₁₀-P呈极显著负相关($P < 0.01$),表明溶磷菌剂能将土壤中的Ca₁₀-P转化成Ca₂-P、Ca₈-P,同时又同化无机磷增加其生物量磷。

3.4 溶磷菌剂对油菜产量及磷素吸收的影响

磷是复垦土壤中主要的养分限制因子,增加土壤中磷的施入量可有效提高油菜的干重和鲜重以及对磷素的吸收。有研究认为溶磷菌对磷溶解作用是中低肥力土壤上促进植物生长的重要机制之一^[31]。溶磷菌可明显提高土壤中可溶性磷的营养水平,增加植物对磷元素的吸收,从而促进植物的生长^[32-33]。施入石灰性土壤中的磷与钙结合使磷有效性降低,接种溶磷菌剂能够增加土壤中有效磷含量,平衡土壤养分,促进油菜生长发育,进而显著提高油菜的产量和磷素吸收量。也有研究认

为适宜条件下, 溶磷菌剂不仅能够将难溶态的磷酸盐转化为有效磷, 还可以分泌生长调节物质, 如生长素、赤霉素、细胞分裂素等, 刺激植物根系发育, 促进植物生长并提高植物对磷的吸收^[23]. 这可能是溶磷微生物促生的另一个重要机制.

土壤有效磷与植物对磷的吸收显著相关, 土壤不同形态无机磷与有效磷的相关性可表征其有效性. 郭智芬等研究表明石灰性土壤中不同形态无机磷的有效性为 Al-P 、 Fe-P > $\text{Ca}_2\text{-P}$ > $\text{Ca}_8\text{-P}$, 对作物磷营养贡献为 Al-P > $\text{Ca}_8\text{-P}$ > $\text{Ca}_2\text{-P}$. 本研究中复垦土壤有效磷与油菜磷吸收量呈极显著正相关 ($R = 0.945$), 不同形态无机磷的有效性表现为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ > Fe-P 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ > Al-P , 对油菜磷吸收的贡献表现为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ > Al-P > Fe-P ^[25]. 研究表明 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 和 Al-P 可以被植物利用, 是石灰性土壤中的有效磷源, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 短期内不能被植物利用, 可作为潜在磷源^[34-35]; 土壤有效磷与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 和 Al-P 具有较高的相关性, 与 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 相关性较低^[25]. 这与我们的研究结果也一致. 另外, 本研究中复垦土壤有效磷和油菜磷吸收量的增加与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的减

少以及 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 和 Al-P 的增加有关, 也表明溶磷菌剂能促进复垦土壤中难溶性磷的转化, 提高了土壤磷的有效性.

4 结论

等磷量施用外源磷条件下, 接种溶磷菌剂均可显著提高复垦土壤中有效磷和磷酸酶含量, 促进油菜生长, 提高油菜产量及其对磷素吸收量, 且在施用磷酸钙的土壤中, 溶磷菌剂的溶磷效果以及对油菜的促生作用优于施用磷矿粉的土壤. 接种溶磷菌剂能够显著影响土壤中各形态无机磷的含量及其转化, 在施用磷矿粉的土壤中促使 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 向 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 转化, 在施用磷酸钙土壤中使 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 向 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 转化, O-P 向 Al-P 转化, 进而提高复垦土壤中磷的有效性. 本研究只探讨了溶磷菌剂对复垦土壤中无机磷组分及其形态转化的影响, 今后需要进一步研究复垦土壤中有机磷组分及其形态转化, 通过难溶无机磷转化和有机磷的矿化, 提升复垦土壤磷素有效性, 加速矿区土壤熟化过程.

参考文献 [References]

- Solomon RI, Saddiq AM, Usman BH. Effects of organic materials on phosphorus forms under submerged condition in the soils of Lake Geriyo irrigation project, Adamawa state, Nigeria [J]. *IOSR J Agric Vet Sci*, 2014, **7**: 11-18
- 杨慧, 曹建华, 孙蕾, 梁会妮, 侯彦林. 岩溶区不同土地利用类型土壤无机磷形态分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, **24** (2): 135-140 [Yang H, Cao JH, Sun L, Luan HN, Hou YL. Fractions and distribution of inorganic phosphorus in different land use types of Karst area [J]. *J Soil Water Conser*, 2010, **24** (2): 135-140]
- Shaheen SM, Tsadilas CD, Stamatiadis S. Inorganic phosphorus forms in some entisols and aridisols of Egypt [J]. *Geoderma*, 2007, **142** (1-2): 217-225
- Tao GC, Tian SJ, Cai MY, Xie GH. Phosphate-solubilizing and -mineralizing abilities of bacteria isolated from soils [J]. *Pedosphere*, 2008, **18** (4): 515-523
- 李新举, 胡振琪, 李晶, 张雯雯, 刘宁. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, **23** (6): 276-280 [Li XJ, Hu ZQ, Li J, Zhang WW, Liu N. Research progress of reclaimed soil quality in mining subsidence area [J]. *Transact CSAE*, 2007, **23** (6): 276-280]
- 蔡璐, 王小利, 陈莹, 王子苑, 李小冬. 无机磷溶解菌RW8的筛选、鉴定及对白三叶促生效果研究[J]. 草业学报, 2017, **26** (5): 181-188 [Cai L, Wang XL, Cheng Y, Wang ZY, Li XD. Isolation and identification of an inorganic phosphorus-solubilizing bacterium RW8 and its growth-promoting effect on white clover (*Trifolium repens*) [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2017, **26** (5): 181-188]
- Fiske EH, Subbarow Y. The solubilization of phosphate: the action of various organic compounds on dicalcium and tricalcium phosphates [J]. *New Zealand J Sci Tehnol Sect B*, 2019, **33**: 436-446
- 马文彬. 9种豆科牧草根际促生菌筛选及特性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015 [Ma WB. Screening plant growth promoting rhizobacteria resources and their characteristics of legumes [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2015]
- 李娜, 乔志伟, 洪坚平, 谢英荷, 张铁全. 磷细菌在复垦土壤上生长规律及对磷解析特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23** (8): 964-972 [Li N, Qiao ZW, Hong JP, Xie YH, Zhang TQ. Phosphorus solubilizing bacteria growth and effects on soil phosphorus adsorption-desorption characteristics in reclaimed soils [J]. *Chin J Eco Agric*, 2015, **23** (8): 964-972]
- 乔志伟. 石灰性土壤溶磷细菌的筛选鉴定及在复垦土壤上的应用[D]. 太原: 山西农业大学, 2014 [Qiao ZW. Screening and identification phosphorus solubilizing bacteria in calcareous soil and the application in coal mining reclaimed soil [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2014]
- Shi XK, Ma JJ, Liu LJ. Effects of phosphate-solubilizing bacteria application on soil phosphorus availability in coal mining subsidence area in Shanxi [J]. *J Plant Inter*, 2017, **12** (1): 137-142
- 孟会生, 洪坚平, 杨毅, 王向英, 李廷亮, 栗丽. 配施磷细菌肥对复垦土壤细菌多样性及磷有效性的影响[J]. 应用生态学报, 2016, **27** (9): 3016-3022 [Meng HS, Hong JP, Yang Y, Wang XY, Li TL, Li L. Effect of applying phosphorus bacteria fertilizer on bacterial diversity and phosphorus availability in reclaimed soil [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27** (9): 3016-3022]
- 乔志伟, 洪坚平, 李林轩, 刘超. 溶磷细菌对复垦土壤养分、酶活性及磷解析的影响[J]. 水土保持学报, 2017, **31** (2): 166-170+203 [Qiao ZW, Hong JP, Li LX, Liu C. Effects of phosphor-bacterias on nutrient, enzyme activities and phosphorus adsorption-desorption characteristics in a reclaimed soil [J]. *J Soil Water Conser*, 2017, **31** (2): 166-170+203]
- 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000 [Bao SD. Soil Agricultural Chemistry Analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000]
- 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986 [Guan SY. Soil Enzyme and its Research Method [M]. Beijing: Agriculture Press, China, 1986]
- 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 BP, Gu YC. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils [J]. *Sci Agri Sin*, 1989, **22** (3): 58-66]
- 17 王海龙, 张民, 刘之广, 于小品, 赵洪猛, 陈海宁. 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): 321-327 [Wang HL, Zhang M, Liu ZG, Yu XJ, Zhao HM, Chen HN. Effects of different phosphorus application levels on the inorganic phosphorus fractions under multi-year location experiment [J]. *J Soil Water Conser*, 2018, **32** (5): 321-327]
 - 18 周鑫斌, 洪坚平, 谢英荷. 溶磷细菌肥对石灰性土壤磷素转化的影响[J]. 水土保持学报, 2005, **19** (6): 72-75 [Zhou XB, Hong JP, Xie YH. Effects of phosphorous bacteria fertilizer on phosphorus validity of calcareous soil [J]. *J Soil Water Conser*, 2005, **19** (6): 72-75]
 - 19 Shen Y, Duan YH, McLaughlin N, Huang SM, Guo DD, Xu MG. Phosphorus desorption from calcareous soils with different initial Olsen-P levels and relation to phosphate fractions [J]. *J Soil Sediment*, 2019, **19** : 2997-3007
 - 20 章爱群, 贺立源, 赵会娥, 吴照辉, 郭再华, 李淑艳. 有机酸对不同磷源条件下土壤无机磷形态的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2009, **15** (4): 474-478 [Zhang AQ, He LY, Zhao HE, Wu ZH, Guo ZH, Li SY. Effect of organic acids on inorganic phosphorus transformation in soil with different phosphorus sources [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2009, **15** (4): 474-478]
 - 21 梅新兰, 闪安琪, 蒋益, 韦中, 王誉瑶, 王世梅, 沈其荣, 徐阳春, 刘建. 适应玉米的溶磷细菌筛选及其对玉米生长的影响[J]. 土壤学报, 2016, **53** (2): 502-509 [Mei XL, Shan AQ, Jiang Y, Wei Z, Wang YY, Wang SM, Shen QR, Xu CY, Liu J. Screening of phosphate-solubilizing bacteria adaptable to corn and effects of the bacteria on the growth of corn [J]. *Acta Pedol Sin*, 2016, **53** (2): 502-509]
 - 22 钟传青, 黄为一. 磷细菌P17对不同来源磷矿粉的溶磷作用及机制[J]. 土壤学报, 2004, **41** (6): 931-937 [Zhong CQ, Huang WY. Effects and mechanism of P-solubilizing bacillus P17 strain on phosphorus solubilizing of different phosphate rocks [J]. *Acta Pedol Sin*, 2004, **41** (6): 931-937]
 - 23 Li Y, Zhang JJ, Zhang JQ, Xu WL, Mou ZS. Characteristics of inorganic phosphate-solubilizing bacteria from the sediments of a eutrophic lake [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, **16**: 2141
 - 24 Barrow NJ. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil [J]. *Eur J Soil Sci*, 2015, **66**: 4-8
 - 25 郭智芬, 涂书新, 李晓华, 潘勇, 张宜春. 石灰性土壤不同形态无机磷对作物磷营养的贡献[J]. 中国农业科学, 1997, **30** (1): 26-32 [Guo ZF, Tu SX, Li XH, Pan Y, Zhang CY. Contribution of soil inorganic phosphorus on plant nutrition in lime soil [J]. *Sci Agric Sin*, 1997, **30** (1): 26-32]
 - 26 梁利宝. 解磷细菌对石灰性土壤磷形态的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2008, **28** (4): 454-457 [Liang LB. Effects of phosphorus dissolving microorganisms on phosphorous form in calcareous soil. *J Shanxi Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 2008, **28** (4): 454-457]
 - 27 孟会生, 洪坚平, 吴文丽, 栗丽. 配施解磷菌肥对采煤塌陷区复垦土壤磷有效性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2017, **33** (4): 357-363 [Meng HS, Hong JP, Wu WL, Li L. Effect of amendment of biomanure of phosphate-solubilizing bacteria on soil phosphorus availability in reclaimed farmland in coal mining subsidence area [J]. *J Ecol Rur Environ*, 2017, **33** (4): 357-363]
 - 28 钟传青, 黄为一. 不同种类解磷微生物的溶磷效果及其磷酸酶活性的变化[J]. 土壤学报, 2005, **42** (2): 286-294 [Zhong CQ, Huang WY. Comparison in P-solubilizing effects between different P-solubilizing microbes and variation of activities of their phosphatases [J]. *Acta Pedol Sin*, 2005, **42** (2): 286-294]
 - 29 武志海, 刘晶晶, 付丽, 卢冬雪, 岳胜天, 杨美英. 溶磷菌对大豆根际土壤酶活性及微生物群落的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, **22** (11): 58-67 [Wu ZH, Liu JJ, Fu L, Lu DX, Yue ST, Yang MY. Effects of phosphate-solubilizing bacteria on the soil enzyme activities and microecology of soybean rhizosphere [J]. *J China Agric Univ*, 2017, **22** (11): 58-67]
 - 30 文倩, 赵小蓉, 张书美, 妥德宝, 李贵桐, 陈焕伟, 林启美. 半干旱地区不同土壤团聚体中微生物量磷的分布特征[J]. 中国农业科学, 2005, **38** (2): 327-332 [Wen Q, Zhao XR, Zhuang SM, Sui DB, Li GT, Chen HW, Lin MQ. Distribution characteristics of microbial biomass phosphorus in different soil aggregates in semi-arid area [J]. *Sci Agri Sin*, 2005, **38** (2): 327-332]
 - 31 Chabot R, Antoun H, Cescas MP. Growth promotion of maize and lettuce by phosphate-solubilizing *Rhizobium leguminosarum* biovar. *phaseoli* [J]. *Plant Soil*, 1996, **184** (2): 311-321
 - 32 Hameeda B, Harini G, Rupela OP, Wani SP, Reddy Gopal. Growth promotion of maize by phosphate-solubilizing bacteria isolated from composts and macrofauna [J]. *Microbiol Res*, 2008, **163** (2): 234-242
 - 33 王誉瑶, 韦中, 徐阳春, 沈其荣. 溶磷菌株组合的溶磷效应及对玉米生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23** (1): 262-268 [Wang YY, Wei Z, Xu YC, Shen QR. Dissolving capacity of phosphate dissolving bacteria strains combination and their effects on corn growth [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2017, **23** (1): 262-268]
 - 34 Wang J, Liu WZ, Mu HF, Dang TH. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-year superphosphate application [J]. *Pedosphere*, 2010, **20** (3): 304-310
 - 35 Zhou XY, Xu MG, Wang BR, Cai ZJ, Gilles C. Changes of soil phosphorus fractionation according to pH in red soils of China: an incubation experiment [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2018, **49** (7): 1-12