

# 溶磷真菌的筛选及配施难溶态磷对土壤磷素有效性的影响

乔志伟

(安顺学院资源与环境工程学院,贵州 安顺 561000)

**摘要:**为研究溶磷真菌菌群对土壤磷素有效性的影响,首先在室内对3株不同种类溶磷真菌(1株属于被孢霉属Z1,1株为青霉属Z2,1株为黑曲霉Z3)的组合效应进行了研究,确定了最佳的菌株组合Z1+Z2+Z3,试验选用Z1、Z2、Z3组成菌群作为试验菌株;然后通过盆栽油菜试验研究溶磷真菌配施难溶态磷(磷酸三钙和磷矿粉)对土壤磷素有效性的影响。结果表明:溶磷真菌处理土壤有效磷、有机质、碱性磷酸酶、蔗糖酶含量和油菜产量分别比基质处理显著增加了60.00%,20.21%,56.45%,53.81%,14.38%,溶磷真菌配施难溶态磷上述各指标都高于单施溶磷真菌处理;单施溶磷真菌对土壤最大吸磷量的影响与基质无差异,溶磷真菌配施难溶态磷可以显著降低土壤最大吸磷量,溶磷真菌+磷酸三钙和溶磷真菌+磷矿粉处理土壤最大吸磷量比溶磷真菌处理显著减少158.7,47.6 mg/kg,溶磷真菌各处理土壤吸附常数都低于对应的基质处理,溶磷真菌可以降低土壤对磷的吸附。在土壤上溶磷真菌应与难溶态磷配合施用,对提高土壤磷素有效性有积极的作用。

**关键词:**溶磷真菌菌群;磷酸三钙;磷矿粉;磷有效性

**中图分类号:**S154.3      **文献标识码:**A      **文章编号:**1009-2242(2019)05-0329-05

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.05.048

## Screening of Phosphorus Solubilizing Fungi and the Effects of Combined Application of Insoluble Phosphorus on Soil Phosphorus Availability

QIAO Zhiwei

(College of Resources and Environment Engineering, Anshun College, Anshun, Guizhou 561000)

**Abstract:** In order to study the effect of phosphorus solubilizing fungal flora on phosphorus availability in soil, firstly, the combined effects of three different kinds of phosphorus solubilizing fungi (1 strain belonged to *Mortierella* Z1, 1 strain belonged to *Penicillium* Z2 and 1 strain belonged to *Aspergillus niger* Z3) were studied in the laboratory, and then the best strain combination Z1+Z2+Z3 was determined, and Z1, Z2 and Z3 flora were selected as test strains in the experiment. Then, the potted rapeseed experiment was conducted to study the effect of phosphorus solubilizing fungi combined with insoluble phosphorus (tricalcium phosphate and phosphate rock powder) on phosphorus availability in soil. The results showed that the contents of soil available phosphorus, organic matter, alkaline phosphatase, invertase and rapeseed yield of phosphorus solubilizing fungi treatment significantly increased by 60.00%, 20.21%, 56.45%, 53.81% and 14.38%, respectively, compared with substrate treatment. The above indicators of the treatment of phosphorus solubilizing fungi combined with insoluble phosphorus were higher than those of single application of phosphorus solubilizing fungi. There was no difference in the soil maximum phosphorus uptake between phosphorus solubilizing fungi treatment and substrate treatment. Phosphorus solubilizing fungi combined with insoluble soluble phosphorus could significantly reduce the soil maximum phosphorus uptake. The maximum phosphorus uptake of phosphorus solubilizing fungi + tricalcium phosphate treatment and phosphorus solubilizing fungi + phosphate rock powder treatment significantly decreased by 158.7 and 47.6 mg/kg compared with phosphorus solubilizing fungi treatment. Soil adsorption constants of the phosphorus solubilizing fungi were lower than those of corresponding substrate treatments. Phosphorus solubilizing fungi could reduce phosphorus adsorption by soil. The results showed that the phosphorus solubilizing fungi should be combined with insoluble phosphorus, which had a positive effect on improving soil phosphorus availability.

收稿日期:2019-04-08

资助项目:贵州省科技计划项目(黔科合基础20181401);贵州省科技厅和安顺市人民政府与安顺学院三方联合基金项目(黔科合LH字2016-7280);贵州省普通高等学校科技拔尖人才项目(黔教合KY字2017091);安顺学院博士科研启动项目(asubssjj201601)

第一作者:乔志伟(1985—),男,博士研究生,副教授,主要从事土壤磷素高效利用研究。E-mail:704725646@qq.com

**Keywords:** phosphorus solubilizing fungal flora; tricalcium phosphate; phosphate rock powder; phosphorus availability

磷是作物生长最重要的营养元素之一<sup>[1]</sup>, 土壤磷含量及其有效性对植物生长具有重要作用, 化学磷肥中能被作物直接吸收的有效磷易与土壤中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  等离子结合, 转化为植物不可利用的难溶性磷酸盐, 造成磷在土壤中的累积, 磷肥利用率及其有效性较低<sup>[2]</sup>。溶磷微生物可以促进土壤中难溶态磷向有效态磷的转化, 提高土壤有效磷含量及磷素有效性; 溶磷微生物包括细菌、真菌和放线菌, 真菌的溶磷能力和稳定性都强于溶磷细菌<sup>[3-4]</sup>。目前, 关于溶磷真菌对土壤磷素作用的研究较多, 陈莎莎等<sup>[5]</sup>施用溶磷草酸青霉和黑曲霉后土壤有效磷分别比对照处理增加了 4.36, 5.03 倍; 薛冬等<sup>[6]</sup>接种溶磷真菌 PPSF1 土壤有效磷与未接菌相比显著增加了 95.7%~386.5%; 徐文凤等<sup>[7]</sup>、魏伟等<sup>[8]</sup>在不同类型的土壤上应用溶磷真菌都表明其对土壤磷素有积极的作用。但是关于溶磷真菌菌群对土壤磷素效应的研究较少<sup>[9]</sup>, 且溶磷真菌菌群配施难溶态磷对磷素有效性的研究未见报道。本试验中首先筛选溶磷真菌组合组成菌群, 然后以溶磷真菌菌群为试验菌株, 并配施难溶态磷(磷酸三钙、磷矿粉等), 通过盆栽试验研究溶磷真菌配施难溶态磷对土壤有效磷、碱性磷酸酶、磷吸附特性等磷素有效性相关指标的影响, 为溶磷真菌在土壤上的有效应用提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 溶磷真菌菌群的筛选及对难溶态磷的溶解能力

1.1.1 溶磷真菌来源 本试验中选用的 3 株溶磷真菌均为山西农业大学资环学院微生物实验室前期分离筛选和鉴定出的菌株, 其中 1 株属于被孢霉属 (Z1), 1 株属于青霉属 (Z2), 1 株为黑曲霉 (Z3)。

1.1.2 培养基 (1)溶磷真菌活化培养基(PDA 液体培养基): 土豆 200 g, 蔗糖 20 g, 蒸馏水 1.0 L, 调节 pH 为 6.0, 固体培养基加 18 g 琼脂。

(2) 溶磷真菌溶磷能力测定培养基(NBRIP 液体培养基): 葡萄糖 10 g,  $\text{Ca}_2(\text{PO}_4)_3$  5 g,  $\text{MgCl}_2$  5 g,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  0.1 g,  $\text{KCl}$  0.2 g,  $\text{MgSO}_4$  0.25 g, 蒸馏水 1.0 L, pH 调节到 7.0。

1.1.3 溶磷真菌菌群筛选 将 Z1、Z2、Z3 分别接种在 PDA 液体培养基上活化 48 h 后制成孢子悬浊液, 按照 1% (孢子悬浊液体积与培养液体积之比) 的比例接种在灭菌后的 NBRIP 液体培养基中, 组合菌株 (组合中各菌株孢子悬浊液体积之比为 1:1) 也按照 1% 的比例接种在灭菌后的 NBRIP 液体培养基中, 并设置不接种的空白对照, 每个试验重复 3 次。在恒

温振荡箱 (30 °C 和 150 r/min) 中振荡培养 7 天后, 在离心机上于 4 °C、6 000 r/min 的条件下将培养液离心 10 min 后, 取上清液测定发酵液中有效磷含量, 溶磷能力为接种菌株培养液有效磷含量与不接种的空白对照的差值, 根据溶磷能力的大小确定最佳的溶磷真菌组合, 组成盆栽试验用真菌菌株。

1.1.4 溶磷真菌对难溶态磷酸盐(磷酸铝、磷酸铁、磷矿粉)的溶解能力测定 在 NBRIP 液体培养基中, 分别用磷酸铝、磷酸铁、磷矿粉替代磷酸三钙, 加入量均为 5 g/L, 培养基其他成分和条件不变, 灭菌后按照 1% 的比例接种活化后的溶磷真菌孢子悬液, 在恒温振荡箱于 30 °C、150 r/min 条件下培养 7 天后取发酵液离心后, 取上清液测定有效磷含量, 并设置不接菌处理作为空白对照, 每个处理重复 3 次。

### 1.2 溶磷真菌配施难溶态磷对土壤磷素有效性的影响

1.2.1 试验概况 试验土样采自山西省长治市襄垣县西山底村采煤复垦后农田的耕层土壤, 种植作物为玉米, 土壤全氮含量为 0.21 g/kg, 有效磷含量为 3.11 mg/kg, 全磷含量为 0.48 g/kg, 有机质含量为 5.32 g/kg, 全钾含量为 16.7 g/kg, 碱解氮为 15.38 mg/kg, 土壤 pH 为 7.90。

试验选用 1.1.3 中筛选出的溶磷真菌组合, 将各菌株活化后的孢子悬浊液等体积混合成菌群悬浊液, 将含有菌群组合的悬浊液与基质按照 1:9 (v/m) 的比例搅拌均匀制成溶磷真菌肥备用; 试验用无机类肥料有尿素(含 N 46.0%)、硫酸钾(含  $\text{K}_2\text{O}$  54.0%)、磷酸二氢钾(含  $\text{P}_2\text{O}_5$  51.9%, 含  $\text{K}_2\text{O}$  34.5%); 试验中所用基质为已经腐熟好的鸡粪, 其中含有机质 46.7%, N 含量为 2.94%,  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量为 1.21%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 1.46%。选择磷酸三钙和磷矿粉作为难溶态磷。

1.2.2 试验设计 盆栽试验用盆为 30 cm × 27 cm 的塑料盆, 将采回的土壤风干且过 2 mm 筛后装盆, 每盆装风干土重 4 kg。采用完全随机试验设计, 设置空白(CK)、基质(M)、溶磷真菌(Z)、溶磷真菌+磷酸三钙(ZG)、基质+磷酸三钙(MG)、溶磷真菌+磷矿粉(ZK)、基质+磷矿粉(MK) 7 个处理(其中基质为腐熟好的鸡粪有机肥, 溶磷真菌为含有 Z1+Z2+Z3 的悬浊液与基质按照 1:9 (v/m) 的比例搅拌均匀制作成的溶磷真菌肥); 每个处理重复 3 次, 试验各处理及肥料用量见表 1。

试验时间为 2017 年 4 月 15 日至 5 月 30 日, 油菜品种为“四月蔓”, 生长期为 45 天, 每盆 3 株, 定期管理。

表1 盆栽试验处理及肥料用量

不同 处理	氮	氧化钾	五氧化 二磷	溶磷 真菌肥	基质	单位:g/pot	
						磷酸 三钙	磷矿粉
CK	0.40	0.40	0.20	0	0	0	0
M	0.40	0.40	0.20	0	10	0	0
Z	0.40	0.40	0.20	11.1	0	0	0
ZG	0.40	0.40	0.20	11.1	0	5	0
MG	0.40	0.40	0.20	0	10	5	0
ZK	0.40	0.40	0.20	11.1	0	0	5
MK	0.40	0.40	0.20	0	10	0	5

注:溶磷真菌肥是含有菌群组合(Z1+Z2+Z3)的悬浊液与基质按照1:9(v/m)的比例搅拌均匀制成。

1.2.3 测定方法 采集油菜收获期土样待风干后过1 mm筛,测定土壤有效磷、有机质、碱性磷酸酶、蔗糖酶、磷吸附特性等指标,并对油菜鲜样进行称重计产。

土壤有效磷测定方法为0.5 mol/L的碳酸氢钠浸提,通过钼锑抗比色法<sup>[10]</sup>测定;有机质采用重铬酸钾容量法<sup>[10]</sup>;土壤碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法<sup>[11]</sup>,蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法<sup>[11]</sup>,土壤磷吸附特性按照文献<sup>[12]</sup>测定和计算最大吸磷量和吸附系数;油菜产量采用直接称重法测定。

### 1.3 数据处理

本文数据采用方差分析的数学方法对数据统计,采用Excel 2003和SASV 8.1软件进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 溶磷真菌及其组合对磷酸三钙的溶解能力

接种溶磷真菌单菌株及组合菌株各培养液有效磷含量及其溶磷能力见表2。组合真菌培养液有效磷含量都显著高于单菌株处理。Z1+Z2组合培养液有效磷含量为385.07 mg/kg,分别比Z1、Z2单菌株培养液有效磷含量显著增加了55.37、43.70 mg/kg;同理,Z1+Z3、Z2+Z3处理培养液有效磷含量都高于对应的单菌株处理;Z1+Z2+Z3组合培养液有效磷含量最高,为579.33 mg/kg,分别比Z1、Z2、Z3、Z1+Z2、Z1+Z3、Z2+Z3显著增加了75.71%、69.71%、16.49%、50.45%、13.02%、8.95%,组合菌株在磷酸三钙液体培养基中表现出了协同增效的能力。接种菌株培养液有效磷含量与空白对照的差值为菌株的溶磷能力,试验中Z1、Z2、Z3真菌组合培养液有效磷含量最高,溶磷能力也最强,为548.65 mg/kg。

### 2.2 Z1+Z2+Z3组合对难溶态磷酸盐的溶解能力

由表3可知,Z1+Z2+Z3组合在磷酸铝、磷酸铁、磷矿粉培养液中的有效磷含量分别为386.27、180.13、70.03 mg/kg,比空白对照分别显著增加了10.07、2.59、24.19倍,该组合菌株对各种难溶态磷酸盐都具有较强的溶解能力。因此,本试验选用Z1、Z2、Z3溶磷真菌组成菌群

(Z1+Z2+Z3)作为盆栽试验中的溶磷真菌处理,并配施磷酸三钙和磷矿粉,研究其对土壤养分、酶活性、磷吸附特性、油菜产量的影响。

表2 溶磷真菌及组合对磷酸三钙的溶解能力

处理	培养液有效磷含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	比对照	
		增加倍数	溶磷能力/(mg·kg <sup>-1</sup> )
Z1	329.70±3.15g	9.75	299.02±3.15g
Z2	341.37±6.97f	10.13	310.69±6.97f
Z3	497.32±5.11d	15.21	466.64±5.11d
Z1+Z2	385.07±5.98e	11.55	354.39±5.98e
Z1+Z3	512.59±6.37c	15.71	481.91±6.37c
Z2+Z3	531.74±11.37b	16.33	501.06±11.37b
Z1+Z2+Z3	579.33±11.68a	17.88	548.65±11.68a
CK	30.68±1.87h		

注:表中数据为平均值±标准差,同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

表3 Z1+Z2+Z3对难溶态磷酸盐的溶解能力

难溶态磷 酸盐	培养液有效 磷含量/( mg·kg <sup>-1</sup> )	空白培养液 有效磷含量/( mg·kg <sup>-1</sup> )	比对照	
			增加倍数	溶磷能力/( mg·kg <sup>-1</sup> )
磷酸铝	386.27±6.50a	34.88±1.26b	10.07	351.39±6.50a
磷酸铁	180.13±2.72b	50.21±2.42a	2.59	129.92±2.72b
磷矿粉	70.03±3.32c	2.78±0.31c	24.19	67.25±3.32c

### 2.3 溶磷真菌配施难溶态磷对土壤养分和油菜产量的影响

不同处理土壤有效磷、有机质含量和油菜产量见表4。基质为腐熟好的鸡粪有机肥,有机肥中有机质含量高,有机质的矿化可以增加有效磷的含量,基质处理(M)土壤有效磷的含量比CK处理显著增加了4.07 mg/kg;溶磷真菌有利于难溶态磷的转化,Z处理土壤有效磷含量比基质处理M显著增加了60.00%;各处理中土壤有效磷含量以ZG处理最高,为17.25 mg/kg,其次为ZK处理,为13.33 mg/kg,ZG处理土壤有效磷含量比Z、MG处理显著增加60.91%,74.95%,ZK处理土壤有效磷含量比Z、MK处理显著增加24.35%,85.14%。

各处理土壤有机质含量大小依次为ZG>ZK>Z>MK>MG>M>CK,Z处理土壤有机质含量为12.43 g/kg,分别比M和CK处理显著增加了18.96%和45.72%,溶磷真菌可以增加土壤有机质的含量;ZG、ZK处理土壤有机质含量为14.68,13.01 mg/kg,分别比Z处理增加了18.10%,4.67%。油菜为喜磷作物,土壤有效磷含量对油菜产量有重要影响,各处理土壤油菜的产量与土壤有效磷含量呈现一致性规律。

### 2.4 溶磷真菌配施难溶态磷对土壤碱性磷酸酶和蔗糖酶含量的影响

不同处理土壤磷酸酶和蔗糖酶含量见表5。溶磷真菌各处理土壤碱性磷酸酶和蔗糖酶含量显著高于对应的基质处理。ZG处理土壤碱性磷酸酶和蔗

糖酶含量最高,分别为 27.53, 39.13 mg/kg, 比 Z、MG 处理显著增加了 29.67% 和 69.73%; ZG、ZK 处理土壤蔗糖酶含量都高于单施菌株和对应的基质处理。溶磷真菌配施难溶态磷对提高土壤碱性磷酸酶和蔗糖酶含量的效果优于单施溶磷真菌。

表 4 不同处理土壤有效磷、有机质含量和油菜产量

不同处理	有效磷含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	油菜产量/(g·pot <sup>-1</sup> )
CK	2.63±0.25e	8.53±0.87d	167.07±7.98f
M	6.70±0.78d	10.34±0.87c	194.27±6.72e
Z	10.72±0.83c	12.43±1.15b	222.20±13.69d
ZG	17.25±0.82a	14.68±0.52a	341.73±14.26a
MG	9.86±0.89c	10.51±0.94c	273.10±12.91bc
ZK	13.33±0.88b	13.01±1.13ab	285.93±14.57b
MK	7.20±30.50d	10.63±0.62c	258.63±11.29c

表 5 不同处理土壤碱性磷酸酶和蔗糖酶含量

不同处理	碱性磷酸酶含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	蔗糖酶含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )
CK	9.92±1.75f	14.25±1.31f
M	13.57±1.55e	18.23±1.07e
Z	21.23±0.81c	28.04±0.93b
ZG	27.53±1.51a	39.13±3.39a
MG	16.22±0.68d	25.65±1.28c
ZK	23.28±0.46b	30.57±1.93b
MK	14.08±0.81e	21.70±1.08d

## 2.5 溶磷真菌配施难溶态磷对土壤磷吸附特性的影响

不同处理土壤 Langmuir 的方程式以及吸附特征相关参数见表 6。各处理吸附等温式的相关系数  $R^2$  都大于 0.950, 呈极显著的线性相关( $P < 0.01$ )。CK 处理土壤最大吸磷量最高, 为 769.2 mg/kg, M 处理土壤最大吸磷量比 CK 显著减少 54.9 mg/kg, 基质可以显著减少土壤最大吸磷量, Z 与 M 土壤最大吸磷量相等, 单施溶磷真菌对土壤最大吸磷量的影响与基质处理无差异; 溶磷真菌配施难溶态磷对土壤最大吸磷量减少的幅度大于对应的基质处理和单施溶磷真菌处理, ZG 处理土壤最大吸磷量比 MG、Z 处理分别显著减少了 32.6, 158.7 mg/kg, ZK 处理土壤最大吸磷量比 MK、Z 处理显著减少了 47.6 mg/kg。

表 6 不同处理土壤磷吸附特性方程及相关参数

不同处理	Langmuir 吸附等温式	相关系数	最大吸磷量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	吸附系数/k
CK	$y = 0.0013x + 0.0321$	0.980 <sup>**</sup>	769.2a	0.040b
M	$y = 0.0014x + 0.0431$	0.968 <sup>**</sup>	714.3b	0.032c
Z	$y = 0.0014x + 0.0471$	0.973 <sup>**</sup>	714.3b	0.030c
ZG	$y = 0.0018x + 0.0424$	0.995 <sup>**</sup>	555.6e	0.042b
MG	$y = 0.0017x + 0.0343$	0.995 <sup>**</sup>	588.2d	0.050a
ZK	$y = 0.0015x + 0.0369$	0.954 <sup>**</sup>	666.7c	0.041b
MK	$y = 0.0014x + 0.0309$	0.974 <sup>**</sup>	714.3b	0.045ab

注: \*\* 表示线性相关显著性( $P < 0.01$ )。

各处理土壤吸附系数  $k$  值大小顺序依次为 MG>MK>ZG>ZK>CK>M>G, Z 处理土壤  $k$  值比 M 处理减少了 0.002, ZG 处理土壤  $k$  值比 MG 处理显

著减少了 0.008, ZK 处理土壤  $k$  值比 MK 处理减少了 0.004, 溶磷真菌可以降低土壤的吸附系数。

## 3 讨论

土壤中的微生物并不是单独存在的, 它是以群落的形式存在, 包含很多不同种类菌株组成的菌群; 在功能微生物实际应用中, 菌株组合成菌群的应用效果一般优于单菌株, 外源的功能微生物进入土壤中, 由于土壤环境条件和土著微生物的影响, 其生长繁殖及特性会受到限制, 单菌株在克服这一问题方面的能力较弱, 不同种类的菌株组合在一起可以在一定程度上增强这一方面的适应性<sup>[13-16]</sup>。本试验中, Z1、Z2 和 Z3 溶磷真菌在组合条件下表现出协同的作用, 在磷酸三钙培养液中的有效磷含量显著高于单菌株及两两组合处理。溶磷微生物溶磷机理具有多样性<sup>[17]</sup>, 不同种类的微生物溶磷机理也不尽相同, 将不同种类的溶磷微生物组合在一起, 有利于多种溶磷机理共同发挥作用。同时 Z1+Z2+Z3 对磷酸铝、磷酸铁、磷矿粉等难溶态磷都有较强的溶解能力, 其值分别为 351.39, 129.92, 67.25 mg/kg, 因此, 选用 Z1、Z2、Z3 菌株组合成菌群作为试验用菌株。

分泌低分子量有机酸和生长物质是溶磷微生物发挥功能的基础, 溶磷真菌也通过分泌低分子量有机酸、生长素等物质促进土壤磷素有效化及作物生长(IAA 等)<sup>[18-19]</sup>, 本试验中溶磷真菌各处理土壤有效磷含量和油菜产量都显著高于空白处理和对应的基质处理; 此外, 溶磷微生物还可以增加磷酸酶活性来提高土壤磷素有效性, 余旋等<sup>[20]</sup>、Jader 等<sup>[21]</sup>研究表明, 溶磷细菌的生长活动可以提高环境中碱性磷酸酶的含量, 何迪等<sup>[22]</sup>研究草酸溶磷青霉菌 HB1 对土壤磷素的活化作用, 结果表明, 接种 HB1 后, 土壤碱性磷酸酶活性比不接种的对照处理增加了 10.62%。本试验中, 溶磷真菌各处理土壤磷酸酶含量显著高于对应的基质处理。ZG 和 ZK 处理土壤有效磷、有机质、磷酸酶、蔗糖酶含量和油菜产量都高于 Z 处理, ZG 处理上述各指标都高于 ZK 处理, 这是因为磷酸三钙和磷矿粉是筛选溶磷真菌培养基中的难溶态磷源, 溶磷真菌对这 2 种难溶态磷有很强的适应性, 有利于其溶磷能力的发挥; 磷酸三钙在土壤溶液中的溶解度大于磷矿粉<sup>[17]</sup>, 并且溶磷真菌对磷酸三钙的溶解能力强, 因此在试验效果上 ZG 处理土壤各指标和油菜产量均高于 ZK 处理。

本试验结果表明, M 处理土壤最大吸磷量和吸附系数比 CK 处理显著减少了 54.9 mg/kg 和 0.008, 基质为腐熟好的鸡粪有机肥, 在土壤中可以分解产生有机质。徐秋桐等<sup>[23]</sup>、赵庆雷等<sup>[24]</sup>研究认为, 土壤磷吸附特性的变化可能是因为土壤中磷与有机质作用的结果, 有机质和磷会发生吸附反应, 可以在一定程度上掩蔽土壤的磷

吸附位点,减少土壤对磷素的吸附。Z 处理与 M 处理土壤最大吸磷量相等,ZG、ZK 处理土壤最大吸磷量显著低于对应的基质处理 MG、MK,溶磷真菌配施难溶态磷对土壤最大吸磷量的减少效果更显著。本试验中溶磷真菌各处理土壤吸附系数都小于对应的基质处理,这是因为溶磷真菌可以分泌低分子量有机酸,这些低分子量的酸会和土壤中的磷酸根离子发生竞争,进而减少土壤磷吸附位点,土壤对磷酸根的吸附能力就降低,吸附系数减小。

## 4 结论

(1) Z1+Z2+Z3 在磷酸三钙培养液中的溶磷能力最强,为 548.65 mg/kg,Z1+Z2+Z3 对磷酸铝、磷酸铁、磷矿粉的溶磷能力分别为 351.39,129.92,67.25 mg/kg,Z1、Z2、Z3 溶磷真菌组成菌群作为试验菌株。

(2) 溶磷真菌各处理土壤有效磷、有机质、磷酸酶、蔗糖酶含量和油菜产量都显著高于对应的基质处理;ZG 处理土壤有效磷、有机质、磷酸酶、蔗糖酶含量和油菜产量比 Z 处理分别增加了 60.91%,18.10%,53.79%,29.67%,9.66%,ZK 处理上述各指标也都高于 Z 处理。

(3) M 和 Z 处理土壤最大吸磷量相同,为 714.3 mg/kg,比空白处理显著减少 54.9 mg/kg,ZG、ZK 处理土壤最大吸磷量都显著低于对应的基质处理和 Z 处理,ZG 处理土壤最大吸磷量最小,为 555.6 mg/kg;Z、ZG、ZK 处理土壤吸附常数比对应的基质处理分别减少 0.002,0.008,0.004,溶磷真菌可以降低土壤对磷的吸附。

## 参考文献:

- [1] Ringeval B, Nowak B, Nesme T, et al. Contribution of anthropogenic phosphorus to agricultural soil fertility and food production [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2014, 28(7): 743-756.
- [2] 伦飞,刘俊国,张丹.1961—2011年中国农田磷收支及磷使用效率研究[J].资源科学,2016,38(9):1681-1691.
- [3] 江红梅,殷中伟,史发超,等.一株耐盐溶磷真菌的筛选、鉴定及其生物肥料的应用效果[J].植物营养与肥料学报,2018,24(3):728-742.
- [4] Yin Z W, Shi F C, Jiang H M, et al. Phosphate solubilization and promotion of maize growth by *Penicillium oxalicum* P4 and *Aspergillus niger* P85 in a calcareous soil [J]. Canadian Journal of Microbiology, 2015, 61(12):913-923.
- [5] 陈莎莎,孙敏,王文超,等.溶磷真菌固体发酵肥对玉米生长及根际细菌群落结构的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(9):1910-1917.
- [6] 薛冬,黄向东,宋根娣,等.牡丹根际溶磷真菌的筛选及其促生效应[J].生态环境学报,2018,27(9):1639-1645.
- [7] 徐文凤,邢芳芳,宋涛,等.溶磷真菌 PFK-1 的解磷能
- [8] 魏伟,吴小芹,乔欢.马尾松根际高效解磷真菌的筛选鉴定及其促生效应[J].林业科学,2014,50(9):82-88.
- [9] 刘玲利,卫迎,刘洋,等.不同解磷菌群对复垦土壤磷素形态及油菜产量的影响[J].华北农学报,2017,32(6):229-234.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,1999:30-81.
- [11] 关松荫.土壤酶及其研究方法[M].北京:农业出版社,1986:274-340.
- [12] 乔志伟,洪坚平,李林轩,等.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,2016,30(2):166-170, 203.
- [13] 韩华雯,孙丽娜,姚拓,等.不同促生菌株组合对紫花苜蓿产量和品质的影响[J].草叶学报,2013,22(5):104-112.
- [14] Verma J P, Yadav J, Tiwari K N, et al. Evaluation of plant growth promoting activities of microbial strains and their effect on growth and yield of chickpea in India [J]. Soil Biology Biochemistry, 2014, 70:33-37.
- [15] 张立阳,李洋,张薇,等.不同微生物菌株及其组合处理抑制玉米秸秆霉变效果研究[J].环境工程学报,2016,47(12):74-85.
- [16] 王誉瑶,韦中,徐阳春,等.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.
- [17] 王丹,詹婧,孙庆业.出芽短梗霉 F4 的溶磷能力及机理[J].应用生态学报,2014,25(7):2079-2084.
- [18] 王伟伟.一株高效解磷真菌的筛选及其解磷机理研究[J].热带农业科学,2018,38(8):64-67.
- [19] Zhang Y, Chen F S, Wu X Q, et al. Isolation and characterization of two phosphate-solubilizing fungi from rhizosphere soil of moso bamboo and their functional capacities when exposed to different phosphorus sources and pH environments [J]. PLoS One, 2018, 13(7):1-14.
- [20] 余旋,朱天辉,刘旭,等.不同解磷菌剂对美国山核桃根际微生物和酶活性的影响[J].林业科学,2012,48(2):117-123.
- [21] Jader G B, Daniel B Z, Alan R M, et, al. Compost biofortification with diazotrophic and P-solubilizing bacteria improves maturation process and P-availability [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 97(3):949-956.
- [22] 何迪,赵全利,耿丽平,等.草酸青霉菌 HB1 活化土壤磷及改善土壤生物学性状研究[J].华北农学报,2019,34(1):172-180.
- [23] 徐秋桐,张莉,章明奎.不同有机废弃物对土壤磷吸附能力及有效性的影响[J].农业工程学报,2014,30(22):236-244.
- [24] 赵庆雷,吴修,袁守江,等.长期不同施肥模式下稻田土壤磷吸附与解吸的动态研究[J].草业学报,2014,23(1):113-122.