

溶磷微生物菌剂对土壤营养元素及玉米生长的影响

千淋兆^{1,2}, 龚明波^{1*}, 顾金刚¹, 李世贵¹, 汪强²

(1.农业部农业微生物资源收集与保藏重点实验室/中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2.河南农业大学资源与环境学院, 河南 郑州 450002)

摘要:为比较不同溶磷菌剂在田间应用效果,通过田间小区试验,研究3种菌剂草酸青霉 I1(I1)、黑曲霉 H1(H1)和巨大芽孢杆菌 BM(BM)对土壤营养元素动态变化以及玉米产量的影响。结果表明:施用3种菌剂,土壤有效磷含量显著提高,在不同磷水平下,土壤有效磷含量比对照提高 6.47%~37.13%。在 P_2O_5 92 $kg \cdot hm^{-2}$ 水平下,在玉米生长前期,施用3种菌剂,土壤 pH 值显著降低,土壤交换性 Ca、Mg 和有效性 Fe、Cu、Zn 含量以及玉米叶片 SOD、POD 和 CAT 酶活性显著增加,而有效 Mn 的含量降低;总体上,各处理间提高土壤交换性钙、镁和有效锌的能力为 $H1>I1>BM$,提高土壤有效铁能力为 $H1 \geq BM>I1$,提高土壤有效铜能力为 $BM>H1>I1$ 。不同磷水平下,施用3种菌剂后,玉米产量显著提高,在 P_2O_5 92 $kg \cdot hm^{-2}$ 水平下,施用微生物菌剂玉米产量比 CK 增加 8.2%~12.1%,总体上,增产效果为 $I1>H1>BM$ 。

关键词:微生物菌剂;溶磷;土壤营养元素;玉米

中图分类号:X172

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2014)05-0425-07

doi: 10.13254/j.jare.2014.0158

Effects of Phosphate-solubilizing Microbial Inoculums on Soil Nutrients and Corn Growth

QIAN Lin-zhao^{1,2}, GONG Ming-bo^{1*}, GU Jin-gang¹, LI Shi-gui¹, WANG Qiang²

(1.Key Laboratory of Microbial Resources, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2.College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Phosphate-solubilizing microorganisms (PSMs), which are commonly found in soil, can solubilize insoluble phosphate (P), reduce phosphorus fertilizer fixation, increase the utilization ratio of P fertilizers, and promote crop growth. In order to analyse the effects of different phosphate-solubilizing microbial inoculums in field, the experiment was conducted to study the effects of soil nutrients and output of corn after three phosphate-solubilizing microbial inoculums in plot experiment. The results showed that available phosphate in soil was increased remarkably after *Penicillium oxalate* I1 (I1), *Aspergillus niger* H1 (H1) and *Bacillus Megaterium* (BM) were inoculated. When the concentration of P_2O_5 were 0, 46, 75 $kg \cdot hm^{-2}$ and 92 $kg \cdot hm^{-2}$, the content of soil available phosphate was increased 6.47%~37.13%. At prophase of corn growth, when P_2O_5 was 92 $kg \cdot hm^{-2}$, the soil pH was decreased, and the soil exchangeable Ca, Mg and available Fe, Cu and Zn were increased significantly, and the activity of SOD, POD and CAT enzyme was also increased. However, at the same condition, the content of available Mn was decreased higher than CK. As a whole, the ability of increasing exchangeable Ca, Mg and available Zn was $H1>I1>BM$, the ability of increasing available Fe was $H1 \geq BM>I1$, and the ability of increasing available Cu was $BM>H1>I1$. The output of corn increased remarkable after three inoculums were inoculated, and the output were increased 8.2%~12.1% higher than CK at 92 $kg \cdot hm^{-2}$ of P_2O_5 .

Keywords: microbial inoculants; phosphate-solubilizing; soil nutrient elements; corn

磷是植物生长所必需三大营养元素之一,施用磷肥一直是保证农业生产增产的重要手段,粮食主产区

的磷肥投入量达到 1 350 $kg \cdot hm^{-2}$,但磷肥当季利用率不足 20%^[1-2]。中国土壤中全磷含量为 0.2~2.0 $g \cdot kg^{-1}$,平均为 0.5 $g \cdot kg^{-1}$,但土壤溶液中的浓度一般只有 10 $mg \cdot kg^{-1}$ 左右。土壤磷丰富,但大多以植物难以利用的无机态和有机态存在,占土壤总磷的 95%。溶磷微生物在转化土壤自身难溶磷和阻止有效磷的固定方面发挥的重要作用尤为引人关注,研究证明溶磷菌在转

收稿日期:2014-06-17

基金项目:国家科技支撑计划项目“复合抗逆型微生物肥料研制与应用”(2011BAD11B05)

作者简介:千淋兆(1988—),男,河南新乡人,在读硕士,主要从事植物营养与农业微生物研究。E-mail: 289335530@qq.com

* 通信作者:龚明波 E-mail: gongcaas@163.com

化土壤难溶磷、提高磷肥利用率和促进作物生长等方面都具有显著的作用^[3-5]。土壤微生物在土壤有机质和土壤养分转化方面发挥重要的作用^[6],对作物根际土壤的营养环境和化学环境起着重要的调理作用^[7]。研究证明一些微生物菌剂能够增加土壤微生物菌落数,促进土壤中营养元素的转化与循环,减少部分化学肥料施用,从而促进作物的生长^[8-11]。本研究采用的草酸青霉 I1、黑曲霉 H1 和巨大芽孢杆菌具有很好的溶磷效果,分别能够产生草酸、乳酸和葡萄糖酸溶解土壤难溶磷,对作物生长具有一定的促进作用^[12-15]。本文以 3 株菌株为出发菌株,采用田间小区试验,研究其对玉米生长及土壤营养元素的动态影响,为溶磷菌株的田间应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2013 年 6 月—2013 年 10 月在河南农业大学华北小麦玉米轮作营养与施肥科学观测试验站(河南省郑州市航空港区三官庙镇,北纬 34°30′3.56″,东经 113°53′40.48″)进行。试验区海拔 92 m,年平均气温 14.3 ℃,≥15 ℃积温 3 990 ℃,年平均日照时数 2 175.1 h,无霜期 218 d,年平均降雨量 780 mm,属暖温带季风气候。土壤为砂质潮土。0~20 cm 土壤样品基础值:有机质(OM)13.82 g·kg⁻¹,全氮(N)0.94 g·kg⁻¹,pH 8.25,有效磷(P)9.02 mg·kg⁻¹,交换性钙、镁为 9.78、3.26 cmol·kg⁻¹,有效性铁、锰、铜、锌为 2.76、5.25、0.52、1.26 mg·kg⁻¹。

1.2 供试材料

供试品种:玉米(郑单 958)(河南省农业科学院)。溶磷微生物制剂:草酸青霉 I1(*Penicillium oxalicum* I1)、黑曲霉 H1(*Aspergillus niger* H1)和巨大芽孢杆菌 BM(*Bacillus megaterium*),菌株在 50 L 发酵罐中发酵 40 L。真菌发酵培养基(g·L⁻¹):玉米粉 5 g,黄豆饼粉 10 g,葡萄糖 4 g,酵母膏 4 g,(NH₄)₂SO₄ 3 g,MgSO₄·7H₂O 0.1 g,CaCO₃ 0.5 g,K₂HPO₄ 0.2 g,28 ℃、200 r·min⁻¹ 培养 48 h,收集 40 L 菌液中的菌丝体,混入 20 kg 干热灭菌草炭中,培养 4 d,使菌丝形成孢子,草酸青霉菌剂(I1)和黑曲霉菌剂(H1)的孢子含量分别为 1.4×10⁸ cfu·g⁻¹ 和 2.1×10⁷ cfu·g⁻¹;BM 发酵培养基:玉米粉 20 g,黄豆粉 10 g,K₂HPO₄ 1.5 g,MgSO₄·7H₂O 1.5 g,CaCO₃ 1.5,H₂O 1 000 mL,pH 7.0,菌株 32 ℃培养 36 h,收集 40 L 菌液,将菌液离心后混入灭菌的 20 kg 草炭中,巨大芽孢杆菌菌剂(BM)菌数为 3.5×10⁹ cfu·g⁻¹。

1.3 试验设计

试验常规施肥量为 N 260 kg·hm⁻² (60%基施,40%拔节期追施),P₂O₅ 92 kg·hm⁻²,K₂O 81 kg·hm⁻²。试验设 4 个磷水平,0 水平(P0)为不施磷肥,1 水平(P1)为 50%常规施磷量,2 水平(P2)为 75%常规施磷量,3 水平(P3)为 100%常规施磷量;每个磷水平分别施加微生物菌剂 I1、H1、BM,施用量为 20 kg·hm⁻²,菌剂与底肥混合一起施入,设置空白 CK 处理。试验共 16 个处理,3 次重复,小区面积 3 m×12 m。

1.4 取样与测定

在播种后 10、17、24 d(苗期)、31、45 d(拔节期)、71 d(灌浆期)、110 d(收获期)用土钻在每个小区取 0~20 cm 土样 5 个,四分法混匀制备为待测土样。分别在苗期、拔节期、灌浆期取 P3 水平处理的玉米同部位新鲜叶片,用液氮保鲜,24 h 内测定酶活性。

土壤 pH 值(1:2.5):电位法测定;土壤有效磷测定:碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法(olsen 法);土壤交换性 Ca、Mg 测定:1 mol·L⁻¹ 乙酸铵交换-原子吸收分光光度法^[16];土壤有效性 Cu、Zn、Fe 和 Mn:DTPA 溶液浸提-原子吸收光谱法^[17];SOD 活性测定:NBT 法;POD 活性测定:愈创木酚法;CAT 活性测定:紫外吸收法^[18]。数据使用 Excel 2007 和 DPS 7.05 进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同菌剂对土壤有效磷影响

将 3 种菌剂施用田间后在玉米生长不同时期取样,测定土壤有效磷含量变化,从表 1 可以看出,土壤有效磷含量随着种植时间的延长,含量逐渐降低,田间施用菌剂 I1、H1 和 BM 后,土壤有效 P 的含量总体上比 CK 增加。在 P0 水平下,施用菌剂处理后有效磷的含量在第 24~45 d 比 CK 显著增加,其他时间土壤有效磷含量增加但不显著,总体溶磷效果为 H1>I1>BM,在收获时,施用菌剂 I1、H1 和 BM 后,土壤有效磷含量比 CK 分别增加 6.47%、11.41%和 12.27%;在 P1 水平下,在 10~24 d,施用菌剂处理后有效磷的含量比 CK 显著增加,总体上溶磷效果为 BM>I1>H1,在收获时,施用菌剂 I1、H1 和 BM 后,土壤有效磷含量比 CK 分别增加 13.35%、8.61%和 10.68%;在 P2 水平下,整个生长期,施用菌剂处理土壤有效磷含量显著高于对照,溶磷效果为 BM>H1>I1,在收获时,施用菌剂 I1、H1 和 BM 后土壤有效磷含量比 CK 分别增加 10.58%、37.13%和 23.15%;在 P3 水平下,使用 BM 菌剂处理后土壤有效磷含量较 CK 显著增加,而 I1 和

表 1 不同 P 水平处理下菌剂对土壤有效 P 的影响(mg•kg⁻¹)
Table 1 Effect of inoculums inoculation on soil available P at different P levels (mg•kg⁻¹)

磷水平	处理	播种后天数 /d						
		10	17	24	31	45	71	110
P0	I1	10.12a	9.08a	9.22ab	9.19a	8.01ab	7.21a	6.25a
	H1	10.59a	10.22a	10.01a	8.90ab	7.63ab	7.14a	6.54a
	BM	9.38a	8.55a	8.67b	8.55ab	8.55a	7.20a	6.59a
	CK	8.70a	8.50a	7.84b	7.10b	6.97b	6.63a	5.87a
P1	I1	12.67a	9.90ab	8.96b	9.57a	9.27a	7.77a	5.52a
	H1	12.07ab	9.82ab	9.97a	9.07a	8.06b	7.87a	5.27a
	BM	12.05ab	11.58a	10.40a	9.06a	8.11b	7.61a	5.39a
	CK	9.63b	9.03b	9.30ab	8.69a	7.92b	7.06a	4.87a
P2	I1	12.10a	10.47bc	9.72ab	10.22a	10.37a	6.35a	5.54bc
	H1	12.42a	12.03ab	10.70ab	10.02a	10.27a	6.50a	6.87a
	BM	13.48a	12.75a	11.00a	9.62a	10.12a	6.37a	6.17ab
	CK	9.79b	9.40c	9.33b	8.36b	8.56a	6.14b	5.01c
P3	I1	12.36ab	11.38b	11.17bc	9.57a	8.76ab	7.54b	6.93a
	H1	12.06ab	11.56b	12.81a	10.26a	9.25ab	9.01a	7.36a
	BM	13.74a	13.31a	12.17ab	11.15a	10.12a	9.88a	7.26a
	CK	11.61b	10.41b	10.32c	9.64a	8.24b	7.49b	6.58a

注:同列不同小写字母表示差异达 5%显著水平。下同。

H1 处理与 CK 间没有显著差异, 总体上溶磷效果 BM>H1>I1,在收获时,施用菌剂 I1、H1 和 BM 后,土壤有效磷含量比 CK 分别增加 5.32%、11.85% 和 10.33%。

2.2 P3 水平下,不同菌剂对土壤 pH 值的影响

将 3 种菌剂施用田间后在玉米生长不同时期检测土壤 pH 值变化,表 2 中可看出,菌剂对土壤 pH 值有显著影响,施用菌剂前 31 d,各菌剂对土壤 pH 影响差异显著,土壤 pH 值较 CK 处理下降,第 31 d 时, I1、H1 和 BM 处理后土壤 pH 值分别比对照下降 0.09、0.18 和 0.12,第 45 d 后,各菌剂处理间没有显著差异,3 株菌溶磷的主要作用机制是分泌有机酸,随着菌株的生长,分泌有机酸从而降低土壤 pH 值,在第 45 d 后,菌株在土壤中存活数量大量减少,不同处理

的土壤 pH 值之间差异不显著。

2.3 P3 水平下,不同菌剂对土壤交换性钙镁的影响

由表 3 可以看出,随着玉米的生长,土壤交换性 Ca、Mg 含量逐渐降低,不同处理的土壤交换性 Ca、Mg 的变化趋势与土壤 pH 值变化趋势一致。施入 3 种不同的菌剂处理,整个生长周期,土壤交换性 Ca、Mg 的含量比 CK 高,但差异不显著。施用菌剂 I1、H1 和 BM 后,在第 24 d 时,土壤交换性 Ca 含量比 CK 分别增加 3.23%、4.76%和 1.79%,土壤交换性 Mg 含量比 CK 分别增加 6.96%、7.91%和 6.95%。

2.4 P3 水平下,不同菌剂对土壤有效 Fe、Mn、Cu、Zn 的影响

土壤有效 Fe、Cu、Zn 含量在玉米整个生长周期中总体趋势是逐渐增加(表 4),施用菌剂后,土壤有效 Fe、Cu、Zn 含量比 CK 高,而土壤有效 Mn 含量在玉米整个生长周期中变化不明显,施入真菌菌剂后,其含量比 CK 低。施用菌剂 I1、H1 和 BM 后,在收获时,土壤有效 Fe 含量比 CK 分别增加 2.84%、7.46%和 3.23%,土壤有效 Cu 含量比 CK 分别增加 3.80%、5.85%和 15.51%。土壤有效 Zn 含量比 CK 分别增加 7.74%、11.64%和 6.94%,土壤有效 Mn 的含量比 CK 分别降低了 7.60%、4.56%和 1.89%。玉米在生长过程中所需要的 Fe、Mn、Cu、Zn 含量较少,土壤施入菌剂

表 2 P3 水平下施用不同菌剂土壤 pH 值变化
Table 2 The change of soil pH value after inoculums inoculation at P3 level

处理	播种后天数 /d						
	10	17	24	31	45	71	110
I1	8.13b	8.18ab	7.47c	7.76ab	8.20a	7.62a	8.04a
H1	8.31a	8.20ab	7.60b	7.67b	8.14a	7.58a	7.96a
BM	8.21ab	8.04b	7.68ab	7.73ab	7.97a	7.70a	8.06a
CK	8.33a	8.32a	7.84a	7.85a	8.13a	7.63a	7.94a

表 3 P3 水平下施用菌剂对土壤交换性钙、镁的影响($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 3 Effect of inoculums inoculation on soil exchangeable Ca and Mg at P3 level ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)

指标	处理	播种后天数/d						
		10	17	24	31	45	71	110
交换性 Ca	I1	10.038ab	9.834a	9.771a	9.638a	9.371a	9.007a	8.740a
	H1	10.583a	10.116a	9.916a	9.782a	9.582a	9.183a	8.782a
	BM	9.964b	9.803a	9.634a	9.503a	9.403a	9.034a	8.803a
	CK	9.793b	9.627a	9.465a	9.331a	9.321a	8.927a	8.727a
交换性 Mg	I1	3.657a	3.527a	3.490a	3.431a	3.358a	3.322a	3.239a
	H1	3.685a	3.553a	3.521a	3.465a	3.420a	3.331a	3.297a
	BM	3.480a	3.445a	3.480a	3.413a	3.313a	3.275a	3.181a
	CK	3.363a	3.302a	3.263a	3.261a	3.235a	3.297a	3.195a

表 4 P3 水平下施用菌剂对土壤铁、锰、铜锌有效性的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 4 The changes of soil available Fe, Mn, Cu and Zn after inoculums inoculation at P3 level ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

指标	处理	播种后天数/d						
		10	17	24	31	45	71	110
有效铁	I1	2.936a	2.972a	2.999a	3.328a	3.484a	3.293a	3.404a
	H1	2.977a	3.024a	3.163a	3.302a	3.324a	3.456a	3.557a
	BM	3.014a	3.058a	2.954a	3.255a	3.178a	3.402a	3.417a
	CK	2.791a	3.038a	2.620a	2.625a	2.883a	2.963a	3.310a
有效锰	I1	5.327a	4.851ab	4.961a	5.300ab	5.349a	5.448a	4.901a
	H1	5.336a	4.402b	5.252a	4.966b	5.125a	5.464a	5.062a
	BM	5.266a	5.025a	5.578a	5.533a	5.358a	5.369a	5.204a
	CK	5.227a	5.026a	5.572a	5.294ab	5.400a	5.717a	5.304a
有效铜	I1	0.592ab	0.614a	0.618a	0.648a	0.625a	0.608a	0.656a
	H1	0.613a	0.601a	0.622a	0.631a	0.628a	0.645a	0.669a
	BM	0.638a	0.646a	0.603a	0.697a	0.665a	0.631a	0.730a
	CK	0.516b	0.533b	0.624a	0.611a	0.507a	0.518a	0.632a
有效锌	I1	1.330a	1.361a	1.388a	1.369a	1.298a	1.377a	1.351a
	H1	1.375a	1.390a	1.486a	1.363a	1.332a	1.446a	1.400a
	BM	1.256b	1.270b	1.397a	1.355a	1.248a	1.350a	1.341a
	CK	1.268b	1.279b	1.337a	1.273a	1.191a	1.249a	1.254a

后,能够释放部分 Fe、Cu、Zn,从而使其含量处于一直增加的趋势。

2.5 P3 水平下,不同菌剂对玉米叶内保护性酶的影响

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(POD)、过氧化物酶(CAT)是植物生长过程中比较重要的 3 种保护性酶。SOD 能够清除植物代谢中产生的有氧自由基,防止活性氧在植物体内积累过多损伤膜脂;POD 能降解植物组织内的 IAA,对于控制植物体内 IAA 含量、维系植物组织中源-库平衡起关键作用;CAT 在清除和维持植物体内活性氧及光呼吸中起作用。总体上,施用菌剂后,在苗期第 24 d,拔节期第 45 d 和孕穗期第 71 d,SOD、POD 和 CAT 酶活性显著高于 CK,SOD 和 POD 在拔节期增加最多,CAT 酶活性

在苗期增加最多(图 1)。

2.6 施用不同菌剂对玉米产量的影响

玉米收获后,晾干,称重,测量含水率,最后换算成 14%含水量时的干重。从表 5 可以看出,不同磷水平下,玉米产量与 CK 差异显著,磷肥施入越多,产量越高。施用菌剂后,玉米产量显著提高,不同菌剂施用对玉米产量有影响,但差异不显著,总体上,增产效果为 I1>H1>BM。在 P0 水平下,各菌剂处理与 CK 相比,玉米产量增加最高,施用菌剂 I1、H1 和 BM 后,产量比 CK 分别增加 15.7%、15.9%和 12.8%,在缺磷时,微生物能够释放土壤部分难溶磷,提高土壤有效磷含量,从而提高玉米产量。在 P3 水平下,玉米产量最高,施用菌剂 I1、H1 和 BM 后,产量比 CK 分别增加

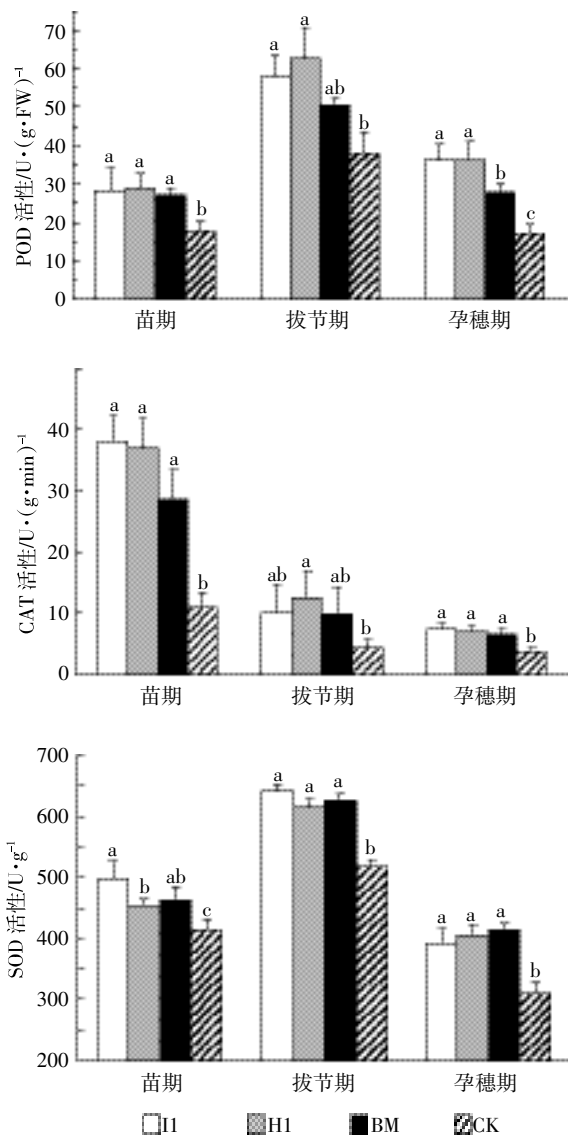


图 1 P3 水平下不同菌剂对各生育时期玉米叶内保护性酶影响
Figure 1 Effect of inocula inoculation on the leaf protective enzyme in different growing periods of corn at P3 level

12.1%、9.2%和 8.2%。

3 讨论

本试验菌株草酸青霉菌、黑曲霉和巨大芽孢杆菌

都是具有高效溶磷且能增产的菌株。草酸青霉菌和黑曲霉在 PDB 培养液中培养 18 h 可分别产生大量的草酸和乳酸,将溶液 pH 值从 7.0 降低到 2.0 以下^[13-15];巨大芽孢杆菌培养中分泌葡萄糖酸。有机酸的分泌是溶磷微生物溶磷的主要机制,微生物在土壤繁殖过程中分泌有机酸,致使土壤中 H^+ 增多,降低土壤 pH 值,能与铁、铝、钙等离子螯合,从而使难溶磷转化为有效磷^[9],同时,土壤中钙、镁、铁、铜、锌等营养元素在土壤中 H^+ 增多的同时也会被活化,从而提高这些营养元素在土壤中的有效性;同时,微生物分泌其他与植物抗逆直接相关的氨基酸类物质能够提高植物的抗逆性^[20-21]。3 种菌剂草酸青霉 I1、黑曲霉 H1 和巨大芽孢杆菌 BM 使用后,总体上效果提高土壤交换性钙、镁和有效锌的能力为 $H1>I1>BM$,土壤有效铁为 $H1 \geq BM>I1$,土壤有效铜为 $BM>H1>I1$,而提高产量的效果为 $I1>H1>BM$,3 个菌株增产效果不仅仅是释放土壤营养元素,还有其他方面的作用效果。土壤 H^+ 增多,而有效锰含量降低,可能与这两种菌对锰具有吸附或吸收作用有关,有待进一步研究考证^[22-23]。

微生物菌剂在作物种植过程中发挥促生作用以微生物在土壤中前期定殖为主,微生物在土壤中定殖时间一般能够达到 40 d,随着时间的延长,菌株迅速在土壤中消亡^[15]。本研究施用 3 种菌剂后,土壤 pH 值、交换性钙镁、有效锰、铜和锌在前 31 d,与对照之间差异显著,这与菌株生长特性一致。土壤 pH 值与难溶磷的溶解有高度相关性^[24],有机酸过度分泌也会造成土壤酸化^[25],土壤酸度过低会不利于作物根系的生长。土壤酸化具有一定的接受范围,土壤 pH 值小于 6.5 后,土壤 pH 值就可能影响作物的正常生长,长期使用溶磷微生物是否会导致土壤酸化需要进一步的试验。

4 结论

菌剂草酸青霉菌、黑曲霉和巨大芽孢杆菌在田间试验条件下能够通过提高土壤有效磷含量,适当降低

表 5 不同磷水平下各处理玉米产量($kg \cdot hm^{-2}$)
Table 5 The corn yield at different phosphorus levels ($kg \cdot hm^{-2}$)

处理	P0		P1		P2		P3	
	产量	增产率	产量	增产率	产量	增产率	产量	增产率
I1	6 278a	15.7%	6 557a	11.5%	7 187a	14.9%	7 251a	12.1%
H1	6 293a	15.9%	6 515a	11.0%	6 989a	12.4%	7 013a	9.2%
BM	6 071a	12.8%	6 386a	9.2%	6 788a	9.9%	6 941a	8.2%
CK	5 295b		5 801b		6 119b		6 371b	

土壤 pH 值, 增加土壤交换性 Ca、Mg 和有效性 Fe、Cu、Zn 含量以及玉米保护性酶活性, 从而起到促生的作用。在常规施磷肥的情况下, 玉米产量较 CK 增加 8.2%~12.1%, 这 3 株菌可以替代部分无机磷肥的使用, 具备作为微生物肥料而被开发利用的潜力。

参考文献:

- [1] 李廷亮, 谢英荷, 洪坚平, 等. 施磷水平对晋南旱地冬小麦产量及磷素利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 658-665.
LI Ting-liang, XIE Ying-he, HONG Jian-ping, et al. Effects of phosphorus application rates on winter wheat yield and phosphorus use efficiency in drylands of south Shanxi Province[J]. *China J Eco-Agri*, 2013, 21(6): 658-665.(in Chinese)
- [2] 章明清, 李 娟, 孔庆波, 等. 不同磷肥用量对菜稻轮作土壤磷肥利用率的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 952-955.
ZHANG Ming-qing, LI Juan, KONG Qing-bo, et al. Effect of different P fertilizer application rates on P use efficiency in vegetable-paddy rice rotation system[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(4): 952-955.(in Chinese)
- [3] Bianco C, Defez R. Improvement of phosphate solubilization and medicago plant yield by an indole-3-acetic acid-overproducing strain of *Sinorhizobium meliloti*[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2010, 76: 4626-4632.
- [4] Preeti M, Walia A, Chauhan A, et al. Plant growth promoting traits of phosphate-solubilizing rhizobacteria isolated from apple trees in trans Himalayan region of Himachal Pradesh[J]. *Arch Microbiol*, 2013, 195: 357-369.
- [5] Panhwar Q A, Jusop S, Naher U A, et al. Application of potential phosphate-solubilizing bacteria and organic acids on phosphate solubilization from phosphate rock in aerobic rice[J]. *Sci World J*, 2013, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/272409>.
- [6] 叶协锋, 张友杰, 鲁喜梅, 等. 土壤微生物与土壤营养关系研究进展[J]. 土壤通报, 2010(1): 237-241.
YE Xie-feng, ZHANG You-jie, LU Xi-mei, et al. Research advance on relationship between the soil microbes and soil nutrition[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010(1): 237-241.(in Chinese)
- [7] Hinsinger P, Bengough A G, Vetterlein D, et al. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance[J]. *Plant and Soil*, 2009, 321(1-2): 117-152.
- [8] Nakayan P, Hameed A, Singh S, et al. Phosphate-solubilizing soil yeast *Meyerozyma guilliermondii* CC1 improves maize (*Zea mays* L.) productivity and minimizes requisite chemical fertilization[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373(1-2): 301-315.
- [9] 鲁耀雄, 涂晓嵘, 程 新, 等. 稻草还田配施菌剂对晚稻生长和土壤酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013(6): 32-36.
LU Yao-xiong, TU Xiao-rong, CHENG Xin, et al. Effects of application of rice-straw decomposing microbe agent on the growth of rice and soil enzyme activity in straw-returning field[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(6): 32-36.(in Chinese)
- [10] 贺国强, 王 磊, 邓志平, 等. 固氮·解磷菌剂对小麦种子萌发及田

- 间小麦产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2011(7): 3875-3876.
HE Guo-qiang, WANG Lei, DENG Zhi-ping, et al. Effects of nitrogen-fixing, phosphate-solubilizing bacterial agents on wheat yield in the field[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011(7): 3875-3876.(in Chinese)
- [11] 白灯莎·买买提艾力, 张少民, 孙良斌. 接种丛枝菌根真菌对脱毒马铃薯微型薯生长及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011(1): 80-83.
BAI Deng-sha, ZHANG Shao-min, SUN Liang-bin. Effect of inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and yield of micro propagated potato[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(1): 80-83.(in Chinese)
- [12] 柳艳艳, 骆洪义, 王凤忠, 等. 巨大芽孢杆菌(BM002)生物有机肥对油菜生长发育的影响[J]. 山东农业科学, 2012, 44(7): 63-66.
LIU Yan-yan, LUO Hong-yi, WANG Feng-zhong, et al. Effect of *Bacillus megaterium* (BM002) microbial organic fertilizer on growth and development of rape[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2012, 44(7): 63-66.(in Chinese)
- [13] 唐超西, 龚明波, 李顺鹏, 等. 草酸青霉菌 I1 的 cDNA 文库构建及其溶磷相关基因的筛选[J]. 中国农业科学, 2012, 18: 3792-3800.
TANG Chao-xi, GONG Ming-bo, LI Shun-peng, et al. Construction of cDNA library of *Penicillium oxalicum* I1 and screening of phosphate-dissolving related gene[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 18: 3792-3800.(in Chinese)
- [14] 唐超西, 龚明波, 李顺鹏, 等. 黑曲霉 H1 的 cDNA 文库构建及其溶磷相关基因的筛选[J]. 微生物学报, 2012, 52(3): 311-317.
TANG Chao-xi, GONG Ming-bo, LI Shun-peng, et al. Construction of cDNA library of *Aspergillus niger* H1 and screening of phosphate-dissolving related gene[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2012, 52(3): 311-317.(in Chinese)
- [15] 龚明波, 范丙全, 金振国, 等. 适应玉米生产的溶磷真菌筛选及其应用[J]. 微生物学报, 2010, 12: 1619-1625.
GONG Ming-bo, FAN Bing-guan, JIN Zhen-guo, et al. Screening and application of phosphate-dissolving microorganism suitable for corn production[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2010, 12: 1619-1625.(in Chinese)
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Analysis of soil agro-chemistry(Third edition)[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.(in Chinese)
- [17] 张 静. 测定土壤有效铜、锌、铁、锰采用 DTPA 与 M3 提取的比较实验[J]. 山西农业科学, 2004, 32(3): 30-33.
ZHANG Jing. Contrast determination of available Cu, Zn, Fe, Mn in soil by DTPA and M3 extraction[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2004, 32(3): 30-33.(in Chinese)
- [18] 许 凯, 秦樊鑫, 耿 丹. 汞胁迫对大豆幼苗 SOD 和 CAT 活性的影响[J]. 种子, 2013, 32(8): 37-41.
XU Kai, QIN Fan-xin, GENG Dan. Mercury stress effects on SOD and CAT activity of soybean seedlings[J]. *Seed*, 2013, 32(8): 37-41.(in Chinese)
- [19] Nahas E. Factors determining rock phosphate solubilization by microorganisms isolated from soil[J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 1996, 12(6): 567-572.

- [20] 黄益洪, 汤日圣, 叶晓青, 等. 脱落酸(ABA)对白粒小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(3): 503-507.
HUANG Yi-hong, TANG Ri-sheng, YE Xiao-qing, et al. Effect of ABA on the germination of white-grain wheat seeds and growth of its seedlings[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(3): 503-507. (in Chinese)
- [21] 李明, 马启全, 赵洪军, 等. 微生物源抗逆剂对玉米根系内源激素含量影响[J]. 黑龙江农业科学, 2012(8): 47-49.
LI Ming, MA Qi-quan, ZHAO Hong-jun, et al. Effect of micro-derived hardiness agent on endogenous hormones content in maize roots[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2012(8): 47-49. (in Chinese)
- [22] 凌薇薇, 吴晓芙, 陈永华, 等. 除锰微生物的筛选及其除锰特性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2011(6): 152-156.
LING Wei-wei, WU Xiao-fu, CHEN Yong-hua, et al. Screening of manganese-resistant microorganism and their characteristics on Mn^{2+} ion removal[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2011(6): 152-156. (in Chinese)
- [23] 杨宏, 张杰, 赵丹丹, 等. 生物固锰除锰技术的微生物学研究[J]. 给水排水, 2004(5): 25-29.
YANG Hong, ZHANG Jie, ZHAO Dan-dan, et al. Microbiological research on biological fixing and removal of manganese[J]. *Water & Waste-water Engineering*, 2004(5): 25-29. (in Chinese)
- [24] Buddhi C W, Min-Ho Y. Phosphate solubilizing bacteria: Assessment of their effect on growth promotion and phosphorous uptake of mung bean (*Vigna radiata* L R. Wilczek)[J]. *Chilean J Agri Res*, 2013, 73(3): 275-281.
- [25] Li Za, Zou B, Xia H P, et al. Role of low-molecule-weight organic acids and their salts in regulating soil pH[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(2): 137-148.

欢迎订阅 2015 年《农业环境科学学报》

《农业环境科学学报》(原《农业环境保护》)是由农业部主管、农业部环境保护科研监测所、中国农业生态环境保护协会主办的全国性学术期刊。是中国科学引文数据库核心期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊, 列于被引频次最高的中国科技期刊 100 名之内并入选《中国学术期刊(光盘版)》。本刊还被国外多家著名检索机构收录, 如美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ), 美国《剑桥科学文摘社网站: 水系统、水科学与渔业文摘、环境工程、水资源文摘及环境科学与污染管理》等 7 种国际检索系统列为来源期刊。本刊主要刊登农业生态环境科学领域具有创新性的研究成果, 包括新理论、新技术和新方法。读者对象为从事农业科学、环境科学、林业科学、生态学、医学和资源保护等领域的科技人员和院校师生。

《农业环境科学学报》为月刊, 每月 20 日出版, 大 16 开, 208 页, 每本定价 75.00 元, 全年定价 900.00 元。国内外公开发行, 全国各地邮局征订, 邮发代号 6-64。如读者在当地邮局漏订, 可通过邮局汇款至本刊编辑部补订。

编辑部地址: 天津市南开区复康路 31 号

邮编: 300191

电话: (022)23674336 传真: (022)23674336

电子信箱: caep@vip.163.com nyhkxxb@vip.163.com

网址: <http://www.aes.org.cn>