

溶磷菌和固氮菌溶解磷矿粉时的互作效应

冯瑞章^{1,2}, 姚拓², 周万海², 龙瑞军^{1,3,*}, 齐文娟²

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008; 2. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070;

3. 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要:采用4株溶磷菌(Lx81、Dm84、Jm92、Lx191)和3株固氮菌(ChW5、ChW6、ChO6)单独和混合接种后测定培养液有效磷含量、pH值及总有机酸含量的方法,研究溶磷菌和固氮菌溶解磷矿粉时的互作效应。结果表明,相对于单独接种溶磷菌:Lx81与3株固氮菌分别混合培养能提高磷矿粉的溶解能力,4株溶磷菌与ChW6、Lx81、Dm84、Lx191与ChO6分别混合培养及Jm92+ChW5组合溶磷量极显著增加($p < 0.01$);Dm84+ChW5、Lx191+ChW5、Jm92+ChO6组合的溶磷量下降($p < 0.01$)。除Lx81+ChW6、Lx81+ChO6培养液pH值降低外,混合培养的其它组合培养液pH值均较单独接种溶磷菌时升高。有机酸测定结果表明,Lx81、Jm92与ChW5、ChO6分别混合培养、ChW6+Lx81组合有机酸含量升高($p < 0.01$),其它7种组合的有机酸含量均较单独接种溶磷菌的值下降($p < 0.01$)。溶磷菌和固氮菌单独培养时溶磷量与pH值、溶磷量与总有机酸含量及pH值与总有机酸含量之间呈现线性相关;Dm84、Lx191与3株固氮菌分别混合培养溶磷量与pH值之间、Lx81与3株固氮菌分别混合培养溶磷量与总有机酸含量之间呈现线性相关,其它组合的溶磷量与pH值、总有机酸含量间没有相关性。溶磷菌和固氮菌混合培养对溶解磷矿粉既有协同作用也有拮抗作用。

关键词:溶磷菌;固氮菌;互作效应;溶磷能力

文章编号:1000-0933(2006)08-2764-06 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Studies on the interactions between phosphate-solubilizing bacteria and nitrogen-fixing bacteria in rock phosphate solubilization

FENG Rui-Zhang^{1,2}, YAO Tuo², ZHOU Wan-Hai², LONG Rui-Jun^{1,3,*}, QI Wen-Juan² (1. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008 China; 2. Faculty of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070 China; 3. Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2764 ~ 2769.

Abstract: Several microorganisms species are known to have the function of dissolving insoluble phosphate through organic acids excretion. Therefore, the higher crop yields would be gained when the seed or the soil were inoculated with phosphate-solubilizing bacteria (PSB) which would be able to improve the solubilization from fixed soil phosphorus and applied phosphatic manure. Furthermore, the interactions between phosphate-solubilizing bacteria (PSB) and nitrogen-fixing bacteria (NFB) in rock phosphate solubilization have been paid much attention in the practice recently. In this research four strains of PSB (Lx81、Dm84、Jm92、Lx191) and 3 strains of NFB (ChW5、ChW6、ChO6) were selected to investigate the effects of interaction between PSB and NFB, P-solubility, pH value and total organic acids production through incubation of those strains in Pikovaskaia, s (PKO) medium individually or in pairs of different combinations.

The results showed that different PSB responded differently to NFB on P solubilization, pH value and total organic production

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30371021);中国科学院百人计划资助项目;甘肃省科学技术攻关资助项目(2GS035-A41-001-04);教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励基金资助项目

收稿日期:2005-05-26; **修订日期:**2006-06-18

作者简介:冯瑞章(1978~),女,甘肃古浪县人,博士,主要从事草地微生物和牧草根际促生菌研究, E-mail: ruizhangfeng@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: longrj@gsau.edu.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 30371021); The "100" Talents Program of CAS; Gansu Key Research Program on technology (Grant No. 2GS035-A41-001-04); Ministry of Education, Tuition Fee and Scientific Research Encouragement of Young Excellent Instructor

Received date: 2005-05-26; **Accepted date:** 2006-06-18

Biography: FENG Rui-Zhang, Ph. D. candidate, mainly engaged in microbiology of grassland and plant growth promotion rhizosphere (PGPR) of grass. E-mail: ruizhangfeng@163.com

when they were incubated in pairs. Compared with the samples of only PSB inoculating groups, the capacity of P solubilization was increased significantly ($p < 0.01$) when Lx81 inoculated with 3 NFB strains in pairs respectively; similar trends were also found in the groups of inoculating of Lx81, Dm84 and Lx191 with ChO6 in pairs respectively, the groups of 4 PSB strains that inoculated with ChW6 in pairs respectively as well as the groups of Jm92 that inoculated with ChW5 together. In contrast, the P solubilizations capacity of incubation of Dm84 + ChW5, Lx191 + ChW5, Jm92 + ChO6 were decreased. The pH values of mixed inoculation groups were all increased compared with the groups of only PSB inoculation groups except for the groups of Lx81 + ChW6 and Lx81 + ChO6 whose pH values decreased. By measuring the total organic acids content levels, it was found that compared with the groups of only inoculated PSB, the levels of the total organic acids were increased significantly when Lx81 or Jm92 inoculated with ChW5, Lx81, Jm92 inoculated with ChO6 and Lx81 inoculated with ChW6 together respectively ($p < 0.01$), but the values of other 7 treatments in pairs were decreased significantly ($p < 0.01$). The linear relationships between two variables of the content levels of P solubilizations and the pH values, the content levels of P solubilizations and the total organic acids content levels, the pH values and the total organic acids content levels were found among the samples of groups that inoculated with PSB or NFB separately, The content levels of P solubilizations and the pH values of the groups of Dm84, Lx191 inoculated with 3 NFB strains mixed or separately had linear relationships. The content levels of P solubilizations and the total organic acids content levels of the groups of Lx81 inoculated with 3 NFB strains mixed separately had linear relationships. None correlations between the variables of the content levels of P solubilizations, the total organic acids content levels as well as pH values of other groups were found So it was concluded that the interactions between PSB and NFB would be either cooperative or anticompetitive in dissolving rock phosphate when they were inoculated in a mixed way.

Key words: phosphate-solubilizing bacteria; nitrogen-fixing bacteria; interactions; P-solubility

大多数农田土壤中 95% 以上的磷素与土壤中的 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 和 Al^{3+} 等结合而降低其有效性^[1], 并且磷肥当季利用率一般只有 5% ~ 10%, 加上作物的后效, 也不超过 25%, 因此施入土壤的大部分磷肥以无效态(难溶态) 积累于土壤中^[1]。如何挖掘土壤潜在的磷库资源, 降低化肥过量施用造成的环境污染, 发展绿色农业, 成为当前农业研究的一个热点问题。近年来国内外大量研究证明, 土壤中存在许多溶磷微生物, 能够将土壤中难以被植物直接吸收利用的磷转化为植物可吸收利用的形态, 从而提高作物产量^[2-4]。一般来说溶磷菌溶解难溶性磷酸盐的能力, 主要受菌株遗传特性的影响, 同时也与其生长环境有关^[1]。一类微生物常常为另一类微生物生长提供了重要的养料和基质, 或者为另一类微生物的继续生长创造了有利条件, 有的甚至依赖其它微生物而存活^[5], 如一些溶磷菌可以促进其它细菌生长繁殖^[6]; 一些联合固氮菌在表现固氮能力的同时, 也具有一定的溶磷能力和分泌植物生长激素的特性^[7]。因此, 在微生物肥料的研究中, 了解这些微生物之间的相互作用, 将几种微生物有机地混合在一起培养, 有可能产生优于单类菌培养的效果, 这对微生物肥料的开发利用尤为重要。本文通过分别单独和混合培养溶磷菌和固氮菌的试验, 探讨溶磷菌(PSB)和固氮菌(NFB)在溶解磷矿粉时的互作效应, 以期能为开发微生物菌肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试菌株为分离自小麦(*Triticum aestivum*)、苜蓿(*Medicago sativa*) 根际的 4 株溶磷菌和小麦(*Triticum aestivum*)、燕麦(*Avena sativa*) 根际的 3 株固氮菌(表 1); 培养基为 Pikovaskaia, s(PKO)液体培养基(pH 值 7.0), LB 培养基(pH 值 7.0)^[8]; 磷矿粉为 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (分析纯, 天津市博迪化工有限公司生产)。

1.2 培养基

Pikovaskaia, s (PKO)培养基 葡萄糖 10g; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.5g; NaCl 0.2g; KCl 0.2g; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.03g; MnSO_4 0.03g; FeSO_4 0.003g; 酵母膏 0.5g; 琼脂 20g; $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 5g; 蒸馏水 1000ml; pH = 6.8 ~ 7.0。

LB 培养基 酵母粉 5g; 蛋白胨 10g; NaCl 6g; 琼脂 20g; 蒸馏水 1000ml; pH 7.0。

1.3 试验方法

表 1 供试菌株

Table 1 Strains for the experiments

菌株类别 Strains types	菌株代号 Strains No.	菌株来源 Strains resources		备注 Note
溶磷菌 PSB	Lx81*	兰州	小麦根际土壤	甘肃农业大学草业学院微生物实验室提供
	Dm 84*	定西	苜蓿根际土壤	
	Jm92*	酒泉	苜蓿根际土壤	
	Lx191*	兰州	小麦根际土壤	
固氮菌 NFB	ChW5 <i>Azotobacte</i> sp.	兰州	小麦根际土壤	
	ChW6 <i>Zoogloea</i> sp.	兰州	小麦根际土壤	
	ChO6 <i>Azospirillus Lipoferum</i>	天祝	燕麦根际土壤	

* 待鉴定 Unknow

于 150ml 三角瓶中注入 PKO 液体培养基 50ml, 高压灭菌 25min 备用。将在 LB 斜面培养基上生长 24h 的 7 株细菌(表 1)分别制成菌悬液(菌数约为 10^9 个 $\cdot$ ml $^{-1}$)接种于 PKO 液体培养基。试验共设 4 个处理:①对照(不接种);②接种 4 株溶磷菌菌液各 1ml;③接种 3 株固氮菌菌液各 1ml;④将 4 株溶磷菌和 3 株固氮菌分别相互组合(计 12 个组合)接种两种菌悬液各 1ml。每个处理重复 3 次,摇床培养(28℃, 160r/min)8d, 4℃ 离心(5595g)15min, 取适量的上清液,测定其有效磷含量、pH 值和总有机酸含量。

含磷量用钼锑抗比色法测定,溶磷量以扣除对照值表示(mg $\cdot$ L $^{-1}$);pH 值用 MP220 酸度计测定;总有机酸含量以酚酞为指示剂,用 0.1mol $\cdot$ L $^{-1}$ 的 NaOH 滴定,以扣除对照值表示(mmol $\cdot$ L $^{-1}$)^[1,9]。

1.3 统计方法 试验数据采用 Excel 和 DPS 进行统计分析。

2 结果

2.1 溶解磷矿粉的能力

表 2 显示,4 株溶磷菌分别单独接种于 PKO 液体培养基中培养 8d 后测定其上清液中磷含量发现各菌株溶解磷矿粉的能力差异显著($p < 0.05$),最大值为 154.3mg/L(Dm84),最小值为 32.9mg/L(Lx81)。同时,3 株联合固氮菌亦均有一定的溶磷能力。4 株溶磷菌和 3 株固氮菌分别组合混合培养后溶解磷矿粉的能力不尽一致,Lx81 + ChW5 和 Jm92 + ChW5 组合的溶磷量较 Lx81 和 Jm92 单独培养时显著升高($p < 0.01$),且大于组合中两菌株分别单独接种时的溶磷量之和($p < 0.01$);相反,Dm84 + ChW5 和 Lx191 + ChW5 组合的溶磷量较 Dm84 和 Lx191 单菌培养时的值分别下降了 11.1% 和 48.5%,较组合中两菌株分别单独接种时的溶磷量之和降低了 30.9% 和 59.6%。说明 Lx81 + ChW5、Jm92 + ChW5 两个组合呈现 1 + 1 > 2 的溶磷效果,而 Dm84 + ChW5、Lx191 + ChW5 两个组合表现 1 + 1 < 2 的结果。4 株溶磷菌分别与 ChO6 混合培养时,与单独接种溶磷菌相比,除 Jm92 + ChO6 组合溶磷量下降外($p < 0.01$),其余 3 个组合之溶磷能力均呈显著上升($p < 0.01$),然而,ChO6 菌株自身的溶磷能力高达 178.6mg/L,将其与 4 株溶磷菌单独接种时的溶磷量分别相加后,只有 Lx81 + ChO6 组合呈现 1 + 1 > 2 的溶磷效果。与 ChO6 不同,ChW6 自身的溶磷量很小,但当 4 株溶磷菌分别与 ChW6 混合培养后,4 种组合均呈现 1 + 1 > 2 的溶磷效果($p < 0.01$)。同一溶磷菌对不同固氮菌的响应各不相同,相对于单独接种固氮菌,如 Jm92 分别与 3 株固氮菌混合培养后溶磷量或高或低;而其它 9 个组合的溶磷量均较固氮菌单独接种时升高。

表 2 溶解磷矿粉的能力(mg $\cdot$ L $^{-1}$)Table 2 The ability of rock phosphate solubilization (mg $\cdot$ L $^{-1}$)

菌株 Strains	Lx81	Dm84	Jm92	Lx191	PKO 培养基 Medium
溶磷菌单独接种 Inoculated PSB separately	32.9C	148.5B	48.4B	154.3B	2.0D
ChW5 +	255.9A	132.0B	157.2A	79.5C	42.4B
ChW6 +	198.3B	232.5A	167.4A	243.2A	19.2C
ChO6 +	280.2A	203.3A	33.2B	238.7A	178.6A

* 各处理间(列)字母相同表示差异不显著,大写字母表示显著水平为 0.01,下同 The same or different letters mean no significant or significant difference between the treatments respectively; capital letters ($p < 0.01$), the same below

2.2 培养液 pH 值的变化

各种处理的 4 株溶磷菌和 3 株固氮菌,在 PKO 培养基上生长 8d 后,其培养液的 pH 值都显著低于不接种的值($p < 0.01$)(表 3)。4 株溶磷菌分别与 3 株固氮菌组合后,除 Lx81 + ChW6 和 Lx81 + ChO6 组合之 pH 值较溶磷菌单独接种时的值降低外($p < 0.01$),其它组合的值均有不同程度的升高。同一溶磷菌对不同固氮菌的响应各不相同,如 Dm84 分别与 3 株固氮菌同时接种,其 pH 值均较单独接种固氮菌时的值低,而其它 9 组合的 pH 值相对于单独接种固氮菌或升高或降低。

表 3 培养液 pH 值变化
Table 3 Changes of pH in liquid medium

菌株 Strains	Lx81	Dm84	Jm92	lx191	PKO 培养基 Medium
溶磷菌单独接种 Inoculated PSB separately	5.2 B	4.4 B	4.7 B	4.4 D	7.0A
ChW5 +	6.2 A	4.9 A	4.9 B	6.5 B	6.2B
ChW6 +	4.9 C	4.4 B	5.6 A	5.2 A	6.2B
ChO6 +	4.9 C	4.5 B	5.9 A	4.9 C	4.6C

2.3 总有机酸含量的变化

溶磷菌与固氮菌的不同组合导致培养液有机酸产生量的明显差异。表 4 表明,各处理的菌株在 PKO 培养基上生长 8d 后,都能分泌一定量的有机酸。与单独接种溶磷菌相比,Lx81、Jm92 分别与 ChW5、ChO6 形成的 4 组合之有机酸含量显著升高($p < 0.01$),而 Dm84、Lx191 分别与 ChW5、ChO6 形成的 4 组合之有机酸含量明显下降($p < 0.01$)。4 株溶磷菌分别与 ChW6 混合培养,除 Lx81 + ChW6 组合有机酸含量升高外($p < 0.01$),其余 3 组合的值分别较单独接种溶磷菌下降了 41.0%、50.0% 和 86.1%。同一溶磷菌对不同固氮菌的反应也各有不同,与固氮菌单独接种相比,Dm84、Lx191 分别与 3 株固氮菌形成 6 个组合之有机酸含量下降与升高兼而有之,但 Lx81、Jm92 与 3 株固氮菌组成的 6 个组合,其有机酸含量均呈不同程度的上升。

表 4 总有机酸含量的变化($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)
Table 4 Changes of total organic acids($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)

菌株 Strains	Lx81	Dm84	Jm92	lx191	PKO 培养基 Medium
溶磷菌单独接种 Inoculated PSB separately	4.2D	25.2A	17.5C	23.3A	0.29C
ChW5 +	19.7B	18.8B	22.0A	17.3C	4.9B
ChW6 +	5.8C	14.9C	8.7D	3.2D	5.4B
ChO6 +	20.7A	4.9D	19.1B	20.1B	18.8A

2.4 pH 值与溶磷量之间的关系

分析 4 株溶磷菌和 3 株固氮菌分别单独接种后培养液溶磷量与其 pH 值之间的关系发现,两类菌的溶磷量与 pH 值均存在线性相关(图 1),且对固氮菌而言,二者相关性较高。4 株溶磷菌与 3 株固氮菌之 12 个不同组合之间培养液 pH 值与溶磷量表现不同(图 1),Dm84、Lx191 分别与 3 株固氮菌混合培养后有效磷含量与 pH 值之间存在显著相关,说明这 6 个组合溶磷量的变化主要是因为质子的作用;而 Lx81、Jm92 与 3 株固氮菌的 6 个组合则不存在相关性,对于相同的 pH,无论是不同溶磷菌与同一固氮菌混合培养的溶磷量,还是同一溶磷菌与不同固氮菌混合培养的溶磷量差异都很大,表明这些组合的溶磷作用可能与其它因素有关。

2.5 有机酸与溶磷量的关系

分析 4 株溶磷菌和 3 株固氮菌分别单独接种后培养液有机酸与其溶磷量的关系发现,两类菌株有机酸含量和溶磷量之间存在直线回归关系(图 2),两类菌株 pH 值与有机酸含量呈线性负相关(图 3)。分析 4 株溶磷菌与 3 株固氮菌混合培养的组合发现, Lx81 与 3 株固氮菌分别混合培养的溶磷量与有机酸之间存在显著相关,说明 Lx81 与 3 株固氮菌分别混合培养,分泌有机酸数量的多少是决定其溶磷量的主要因素,其它组合间均没有相关性(图 2),4 株溶磷菌与 3 株固氮菌分别混合培养时有机酸与 pH 值之间不存在相关性(图 3)。

3 讨论

细菌把 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 从难溶状态转化为可溶状态是一个复杂的过程,不同溶磷菌溶解磷矿粉的能力差异较大,并且菌株溶磷机制也表现出多样性。王富明等^[5]研究表明,磷细菌的存在对土壤中固氮菌的发育有良好

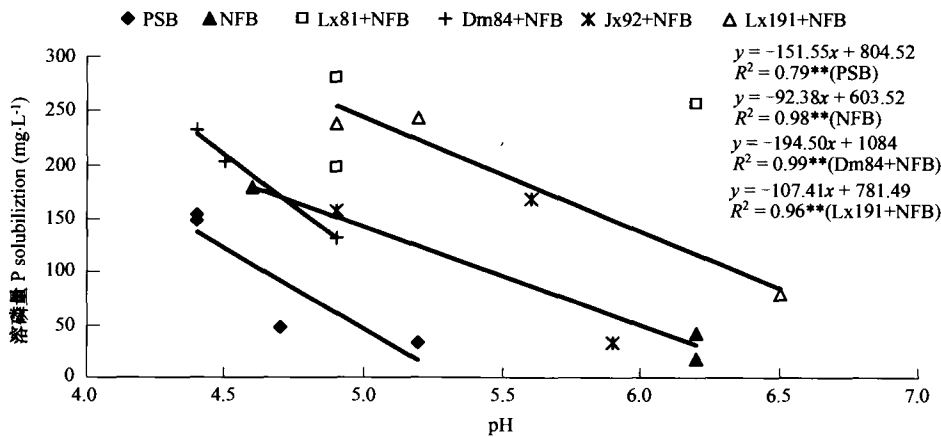


图1 溶磷量与 pH 值关系

Fig. 1 Relationships between P solubilization and pH value

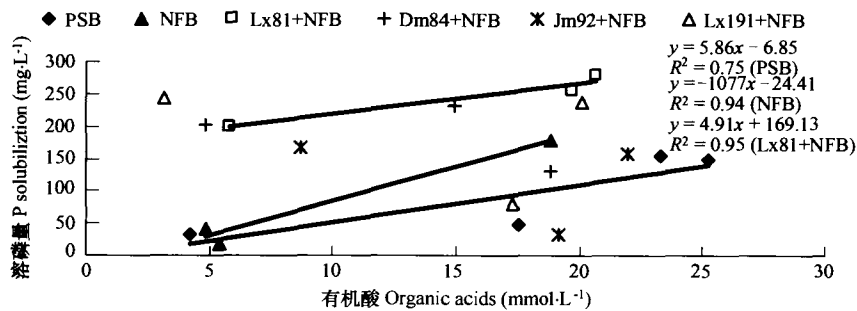


图2 溶磷量与有机酸关系

Fig. 2 Relationships between P solubilization and organic acids

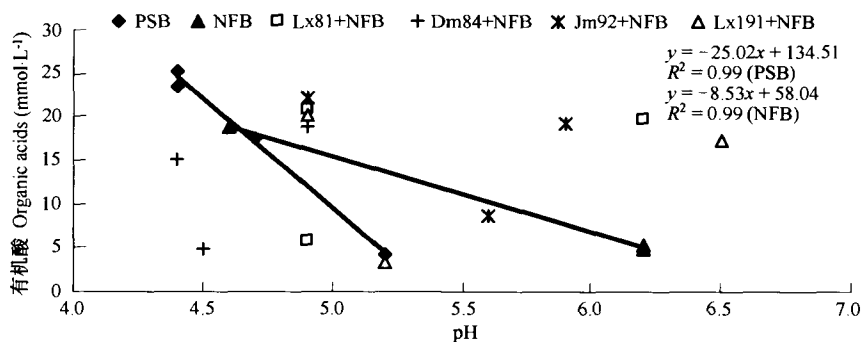


图3 有机酸与 pH 值关系

Fig. 3 Relationships between organic acids and pH value

影响,当磷细菌和固氮菌联合生长时,对发挥磷细菌的解磷作用十分有利,有助于土壤中水溶性磷的形成。本试验的溶磷菌株 Lx81 与 3 株固氮菌, Jm92、Lx191 分别与 ChO6 混合培养后溶磷能力提高; 4 株溶磷菌分别与 ChW6 共同培养溶磷量大幅度上升, 并且大于溶磷菌和固氮菌分别单独培养时的简单加和效应。原因可能是固氮菌和溶磷菌同时接种后, 在二者的相互作用下合成和分泌一些有异于单独接种的生理活性物质, 这些物质的存在, 或者加速了磷细菌的生长和繁殖, 或者刺激不同有机酸的合成, 也可能提高了磷酸酶活性, 从而促进菌株溶磷作用的发挥, 说明它们之间存在协同作用, 这些菌株可以作为微生物肥料, 特别是复合微生物肥料开发和生产的优良菌株。对固氮菌与溶磷菌之间相互作用的机理, 有待进一步研究。

由于微生物之间的竞争、拮抗、捕食等作用普遍存在, 固氮菌与溶磷菌同时接种, 本试验也表现了溶磷量

下降的情况,如 Dm84 + ChW5、Ix191 + ChW5 和 Jm92 + ChO6 组合的溶磷量相对分别单独接种溶磷菌有不同程度的下降。这是多种因素综合作用的结果。一方面可能是溶磷菌、固氮菌本身菌体较大^[10],溶磷菌与固氮菌同时接种后,存在营养和空间的竞争,另一方面相对单独培养,共同培养会导致生理代谢物质的差异,不能排除这些分泌物对菌株溶磷效果的抑制作用;同时,磷是微生物生长繁殖的必需营养元素之一,在溶磷菌和固氮菌的培养过程中,将消耗一部分可溶性磷构建微生物细胞^[11]。并且,这些菌株分离自不同生境的土壤和植物根际(表 1),当它们混合培养后,可能有一个相互适应的过程,或者由于生境的差异,使它们之间存在拮抗作用。

大量的研究表明溶磷量和培养介质 pH 值之间缺乏相关性^[12,13],但也有报道二者之间存在显著的相关性^[14]。本试验中 4 株溶磷菌和 3 株固氮菌分别单独培养后培养液 pH 值与溶磷量间存在显著相关;共同培养的各组合中,pH 值与溶磷量间存在或未表现显著相关性均有体现。林启美等研究表明^[11]溶磷量与所分泌的有机酸量之间不存在显著相关性。相反,王光华^[1]等表明有机酸含量与溶磷量之间呈显著线性关系;本研究中 4 株溶磷菌和 3 株固氮菌分别单独培养、Lx81 与 3 株固氮菌混合培养有机酸含量与溶磷量间存在显著相关,但其它处理则不然,可能与溶磷菌和固氮菌之间既有协同作用,又有拮抗作用有关。

微生物混合培养在生产实践上应用广泛,它可以解决许多情况下单菌培养不能解决的问题。这主要是共同培养的混合体系中微生物之间具有生长代谢协调作用。目前对微生物共生协作机理的研究较少,随着微生物细胞生物学、生物化学、分子生物学等各方面的研究,将对微生物的具体特征有充分的了解,从而挖掘微生物共同培养的巨大应用潜力。

References:

- [1] Wang G H, Zhou K Q, Jin J. Effect of different C sources on the solubilization of rock phosphate by three phosphate solubilizing fungi (PSF). Chinese J. Ecology, 2004, 23(2): 32 ~ 36.
- [2] Abd-Alla M H. phosphatases and the utilization of organic phosphorus by *Rhizobium leguminosarum* biovar viceae . Lett. Appl. Microbiol, 1994, 18:294 ~ 296.
- [3] Yadav K S, Dadarwal K R. Phosphate solubilization and mobilization through microorganisms. In: Dadarwal, K.R. ed. Biotechnological Approaches in soil Microorganisms for Sustainable Crop Production. Jodhpur: Scientific Publishers, 1997.293 ~ 308.
- [4] Jone D L, Darrah P R. Role of root derived organic acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere. Plant Soil, 1994, 166: 247 ~ 257.
- [5] Wang F M, Zhang Y, Wu H Q. Study of dissolve phosphorus and nitrogen fixation bacterial manure as well as the effect of increase production for wheat. Biotechnology, 1994, 4(4): 15 ~ 18.
- [6] Xie Y X. Manufacture principle and industrialized production of biofertilizer. Beijing Agricultural Sciences, 1994, (supplement): 9 ~ 15.
- [7] Yao T. Associative nitrogen-fixing bacteria in the rhizosphere of Avena sativa in an alpine region II . Phosphate-solubilizing power and auxin production. Acta Prataculturae Sinica, 2004, 13(3): 85 ~ 90.
- [8] Shekhar Nautiyal C. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate-solubilizing microorganisms. Federation of European Microbiological Societies, 1999, 170:265 ~ 270.
- [9] Zhao X R, Lin Q M, Li B G. The relationship between rock phosphate solubilization and pH and organic acid production of microorganisms. J. Microbiology, 2003, 23(3): 5 ~ 7.
- [10] Rao Z H, Lin Q M. Interactions between a *Bacillus mucilaginosus*, Phosphobacteria and A Nitrogen Fixing Bacterium, 2002, 21(2): 71 ~ 73.
- [11] Lin Q M, Wang H, Zhao X R, Zhao Z J. Capacity of some bacteria and fungi in dissolving rock. Microbiologica Sinica Bulletin, 2001, 28(2): 26 ~ 30.
- [12] Narsian V, Patel H H. *Aspergillus aculeatus* as a rock phosphate solubilizer. Soil Biol, Biochem, 2000, 32:559 ~ 565.
- [13] Illmer P, Schinner F. Solubilization of inorganic phosphates by microorganisms isolated from forest soils. Soil Biol, Biochem, 1992, 24(4): 389 ~ 395.
- [14] Paul N B, Sundara rao W V B. Phosphate-dissolving bacteria in the rhizosphere of some cultivated legumes. Plant and Soil, 1971, 35:127 ~ 132.

参考文献:

- [1] 王光华,周可琴,金剑.不同碳源对三种溶磷真菌溶解磷矿粉能力的影响.生态学杂志,2004,23(2):32~36.
- [5] 王富明,张彦,吴皓琼.解磷固氮菌剂的研制及其对小麦增产效应.生物技术,1994,4(4):15~18.
- [6] 谢应先.绿发生物肥的研制原理和工业化生产.北京农业科学,1994,(增刊):9~15.
- [7] 姚拓.高寒地区燕麦根际联合固氮菌研究 II.固氮菌的溶磷性和分泌植物生长素特性测定.草业学报,2004,13(3):85~90.
- [9] 赵小蓉,林启美,李保国.微生物溶解磷矿粉能力与 pH 及分泌有机酸的关系.微生物学杂志,2003,23(3):5~7.
- [10] 饶正华,林启美.解钾菌与解磷菌及固氮菌的相互作用.生态学杂志,2002,21(2):71~73.
- [11] 林启美,王华,赵小蓉,赵紫鹃.一些细菌和真菌的解磷能力及其机理初探.微生物学通报,2001,28(2):26~30.