



不同土壤类型中大豆根瘤菌解磷能力及其稳定性评价

王金生, 吴俊江, 蒲国锋, 刘庆莉

(黑龙江省农业科学院 大豆研究所/农业农村部大豆栽培重点实验室/黑龙江省大豆栽培重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:为准确评价大豆根瘤菌解磷能力在不同土壤环境中的稳定性和适应性,筛选在黑龙江省多种土壤类型中具有高效解磷能力的大豆根瘤菌,分析前期分离、鉴定获得的 10 株大豆根瘤菌菌株在不同土壤类型条件下的解磷能力,并采用 GGE 双标图法分析评价解磷能力的稳定性。结果表明:以黑土作为“磷溶出库”,接种菌株 113-2、112-1、114-2、111-2、114-1 和 115-2 的培养基上清液无机磷含量显著高于无接种对照处理,提高幅度为 0.68% ~ 7.02%;以草甸土作为“磷溶出库”,接种菌株 112-1、113-2、114-2、115-2、114-1、111-2、113-1 和 111-1 的培养基上清液无机磷含量显著高于对照处理,提高幅度为 0.57% ~ 8.25%;以黑钙土作为“磷溶出库”,接种不同根瘤菌处理的培养基上清液无机磷含量均显著高于对照处理,提高幅度为 0.75% ~ 7.0%;以白浆土作为“磷溶出库”,接种菌株 112-1、113-2、114-2、111-2、115-1、114-2、111-1 和 112-2 的培养基上清液无机磷含量显著高于对照处理,提高幅度为 0.41% ~ 14.8%;以盐碱土作为“磷溶出库”,接种菌株 113-2、112-1、114-2、111-2、114-1、115-2 和 113-1 的培养基上清液无机磷含量显著高于对照处理,提高幅度为 0.47% ~ 9.9%。以黑土、草甸土、黑钙土、白浆土和盐碱土作为“磷溶出库”接种处理的土壤有效磷含量较对照处理分别提高 0.07% ~ 21.53%、0.08% ~ 38.82%、0.07% ~ 25.94%、0.27% ~ 17.40% 和 0.34% ~ 34.71%。GGE 双标图数学模型综合对比得出土壤磷活化能力强且稳定性较好的菌株为 112-1、113-2 和 114-2。

关键词:大豆根瘤菌;黑龙江省;解磷能力;GGE 双标图;稳定性

Evaluation of Phosphate-solubilizing Ability and Stability of *Rhizobium Fredii* in Various Soils

WANG Jin-sheng, WU Jun-jiang, PU Guo-feng, LIU Qing-li

(Soybean Research Institute of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Soybean Cultivation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Soybean Cultivation, Harbin 150086, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the stability and adaptability of rhizobium fredii phosphate-solubilizing ability in different soil environment of Heilongjiang Province, this study analyzed the phosphate-solubilizing ability of 10 strains of rhizobia isolated from soybean in the pnrophase under different soil types, and evaluated the stability of phosphate solubilization ability with GGE biplot method. The results showed that the content of inorganic phosphorus in the supernatants of black soil inoculated strains 113-2, 112-1, 114-2, 111-2, 114-1 and 115-2 were significantly higher than that of uninoculated control by 0.68% - 7.02%. The contents of inorganic phosphorus in the supernatants of meadow soil inoculated strains 112-1, 113-2, 114-2, 115-2, 114-1, 111-2, 113-1 and 111-1 were significantly higher than those of the control by 0.57% - 8.25%. The content of inorganic phosphorus in the supernatants of chernozem soil inoculated different rhizobium strains were all significantly higher than that of the control by 0.75% - 7.0%. The contents of inorganic phosphorus in the supernatants of albic soil inoculated strains 112-1, 113-2, 114-2, 111-2, 115-1, 114-2, 111-1 and 112-2 were significantly higher than those of the control by 0.41% - 14.8%. The contents of inorganic phosphorus in the supernatants of saline-alkali soil inoculated strains 113-2, 112-1, 114-2, 111-2, 114-1, 115-2 and 113-1 were significantly higher than those of the control, with an increase of 0.47% - 9.9%. The contents of inorganic phosphorus in the supernatant of saline soil inoculated with strains 112-1, 113-2, 114-2, 111-2, 115-1, 114-2, 111-1 and 112-2 were significantly higher than that of control by 0.41% - 14.8%. The available phosphorus content of soils inoculated with black soil, meadow soil, chernozem soil, albic soil and saline-alkali soil as phosphorus leaching reservoir increased by 0.07% - 21.53%, 0.08% - 38.82%, 0.07% - 25.94%, 0.27% - 17.40% and 0.34% - 34.71%, respectively. GGE two-plot mathematical model method was used to synthesize and compare the strains 112-1, 113-2 and 114-2 which had strong phosphorus activation ability and good stability.

Keywords: *Rhizobium fredii*; Heilongjiang Province; Phosphate-solubilizing ability; GGE-Biplot; Stability

在当今农业倡导节约资源、绿色发展的要求下,如何将保障农业健康发展与资源节约有机结合是当下科研人员面临的重大问题。磷是植物生长发育的必需营养元素^[1],大多数土壤中的含磷量较

收稿日期:2020-08-06

基金项目:黑龙江省博士后科研启动金资助(LBH-Q18135);黑龙江省农科院院级科研项目专项资金(2019YYF036);农业科技创新跨越工程专项资金(HNK2019CX01-14-6)。

第一作者简介:王金生(1981-),男,硕士,助理研究员,主要从事大豆耕作与栽培研究。E-mail:jinshengwang1981@163.com。

通讯作者:吴俊江(1970-),男,博士,研究员,主要从事大豆耕作与栽培技术研究。E-mail:nkywujj@126.com。

低,且易于“固定”而形成难溶态磷^[2],当季施入的磷肥通常只有施用量的 10% ~ 20% 参与植物生长发育利用^[3],因而提高大豆对磷肥的利用效率是亟待解决的大豆生产问题之一。

根瘤菌是存在于土壤中的一种革兰氏染色阴性需氧杆菌,可以与豆科植物共生,通过共生固氮作用将空气中游离态氮转变成植物可利用态氮。随着对根瘤菌共生固氮作用的逐渐认识,其功能也被逐渐应用于实际生产。而核心功能被广泛应用的同时,根瘤菌的其它生物学特性功能也逐渐被认识和挖掘。20 世纪中叶,一些学者发现某些根瘤菌除结瘤固氮外也具有分解难溶性磷酸盐或难溶性有机磷的能力^[4]。深入研究表明根瘤菌能够分泌氢离子和有机酸(如乙酸、草酸、柠檬酸、苹果酸等),活化土壤中的磷酸盐和含钾矿物^[5-6]。土壤中难溶性磷的活化利用对于改善植物营养、促进高效、节约型农业生产的发展具有重要意义。以此为研究热点,根瘤菌解磷能力机理及优势菌株筛选研究大量开展起来。张希涛等^[7]在海南和广州等地分离出的 200 余株相似根瘤菌中 40 余株具有解磷能力。Xie^[8]曾以磷酸氢钙作为唯一磷源的固、液体解磷培养基测定了 30 株豌豆根瘤菌的解磷能力。另外,以往的根瘤菌解磷研究大多集中于室内培养基培养方法或者选取单一类型土壤作为“磷溶出库”,但是相关研究表明环境因素同样也影响解磷根瘤菌的解磷能力。Abril 等^[9]比较解磷豌豆根瘤菌一个变种在不同环境下的解磷量,发现该菌株在埃及的水稻根际土壤中解磷量很高,而在阿根廷察科省的土壤中解磷能力却很弱。Whitelaw^[10]和 Nahas^[11]一致认为解磷微生物分泌有机酸的能力受不同地区气候、养分和 pH 的影响,菌株的溶磷量随之变化。

本研究针对黑龙江省土著根瘤菌的解磷能力

进行筛选,以期筛选出适用于黑龙江省仍至东北地区大豆生产现实可行的优势菌株。研究以大豆根瘤菌为研究对象,立足其活化土壤磷能力的特性,扩大了“磷溶出库”类型,用以模拟环境的改变,力求更加客观、全面地比较根瘤菌解磷能力。研究选取黑龙江省 5 种不同类型的土壤为“磷溶出库”,以前期分离、鉴定获得的 10 株大豆根瘤菌菌株为材料,分析侵土前后根瘤菌液体培养基的磷含量变化,利用双标图数据分析方法评价筛选出对土壤磷具有强活化能力的根瘤菌菌株,以期为宜于黑龙江地区不同土壤环境条件下特性优良根瘤菌的应用提供参考,促进大豆根瘤菌剂的研发和更好地服务于农业生产。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试菌株 试验菌株共计 10 株,分离、筛选自黑龙江省不同大豆种植区主栽大豆品种根瘤中(表 1)。

表 1 供试菌株代号及来源地区

Table 1 Code and original sources of the strains			
菌株代号	来源地区	菌株代号	来源地区
Code of strain	Original source	Code of strain	Original source
111-1	双城 Shuangcheng	113-2	拜泉 Baiquan
111-2	阿城 Acheng	114-1	597 农场 597 Farm
112-1	绥化 Suihua	114-2	牡丹江 Mudanjiang
112-2	依安 Yian	115-1	海伦 Hailun
113-1	852 农场 852 Farm	115-2	建三江 Jiansanjiang

1.1.2 供试土壤 供试土壤采自黑龙江省 5 个不同大豆种植地区,土壤类型分别为黑土、草甸土、黑钙土、白浆土和盐碱土。采样深度为 0 ~ 20 cm。供试土壤的理化性质如表 2 所示。

表 2 不同土壤类型理化性质对照表

Table 2 Comparison table of physicochemical properties of different soil types

土壤类型		有机质	全氮	全磷	全钾	碱解氮	速效磷	速效钾
Soil type	pH	Organic matter/%	Total nitrogen / (g·kg ⁻¹)	Total phosphorus / (g·kg ⁻¹)	Total potassium / (g·kg ⁻¹)	Alkali-hydrolyzed nitrogen / (mg·kg ⁻¹)	Available phosphorus / (mg·kg ⁻¹)	Available potassium / (mg·kg ⁻¹)
黑土 Black soil	6.5	3.8	1.05	0.875	16.41	324.12	13.25	172.63
草甸土 Meadow soil	7.2	4.1	1.01	0.742	15.24	224.56	11.51	165.42
黑钙土 Chernozem soil	6.4	3.2	0.98	0.821	15.87	214.53	12.87	168.31
白浆土 Albic soil	5.8	3.3	0.85	0.862	16.10	198.64	14.56	178.36
盐碱土 Saline-alkali soil	7.4	3.1	0.63	0.784	15.64	162.38	11.89	152.34

1.1.3 培养基 供试液体培养基为改进的 YMA 培养基: 甘露醇 10 g, 酵母膏 3.0 g, KCl 0.5 g, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.2 g, $CaCO_3$ 3.5 g, NaCl 0.1 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH6.8~7.2。

固体 YMA 培养基: 甘露醇 10 g, 酵母膏 3.0 g, K_2HPO_4 0.5 g, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.2 g, $CaCO_3$ 3.5 g, NaCl 0.1 g, 琼脂 15 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH6.8~7.2。

1.2 方法

1.2.1 根瘤菌接种液的制备 将根瘤菌接入 YMA 固体培养基平板中活化培养, 再转入 YMA 液体培养基, 置于转速 $120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、温度 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的摇床中培养, 测定根瘤菌接种液 600 nm 处的光密度值, 并调整至 $OD_{600} \approx 0.3$, 制备接种液。

1.2.2 接种根瘤菌 风干土壤, 磨细过 100 目筛, 取 1.0 g 土壤置于两端开口的直径为 1 cm 的塑料管中部, 然后两端塞入玻璃纤维, 将土壤夹在中间, 再用微孔滤膜(孔径 $0.22\text{ }\mu\text{m}$) 密封两端, 使得水分子、无机离子、低分子有机酸等均可顺利进出并与土壤接触, 而土壤又不会穿过玻璃纤维和滤膜而进入溶液, $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ 蒸汽灭菌 $20\text{ min}^{[12]}$ 。取 250 mL 三角瓶, 加入 50 mL YMA 液体培养基, 蒸汽灭菌($121 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 min), 冷却后接入根瘤菌接种液, 分别放入 1 个装有不同类型土壤的灭菌塑料管; 对照处理的三角瓶中添加不接种根瘤菌的液体培养基, 6 次重复。在 $28 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $128\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 培养 7 d。

1.2.3 测定项目与方法 培养基上清液无机磷含量: 将接种根瘤菌的液体培养基摇匀, 取 20 mL 于 $10\text{ }000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 8 min, 采用钼蓝比色法^[13]测定上清液的无机磷含量。

土壤有效磷含量: 从塑料管中取出土壤, 风干后用 Olsen 法提取土壤中的磷酸钙盐, 采用钼蓝比色法^[13]测定土壤中的有效磷含量。

1.2.4 根瘤菌解磷能力综合分析 采用 GGE 双标图法, 以不同根瘤菌菌株侵染 5 种类型土壤时土壤磷溶出量和不同土壤类型为指标分析根瘤菌解磷能力在不同土壤环境下的综合表现, 分析表型的主效应及表型与环境互作的效应, 通过图示化的结果予以表现, 挖掘解磷能力较强且多土壤环境下稳定的优良菌株。

1.3 数据分析

利用 Excel 2007 进行数据整理, 采用 GGE

Biplot 5.2 软件进行双标图法分析。

2 结果与分析

2.1 不同土壤类型条件下不同处理培养基上清液无机磷含量对比分析

以黑土作为“磷溶出库”, 接种菌株 113-2、112-1、114-2、111-2、114-1 和 115-2 处理的培养基上清液无机磷含量显著高于无接种对照处理, 无机磷含量较对照处理分别提高 7.02%、4.97%、3.25%、0.69%、0.68% 和 0.68%, 其它接种处理的培养基上清液无机磷含量则与对照处理相差不大, 差异不显著。

以草炭土作为“磷溶出库”, 接种菌株 112-1、113-2、114-2、115-2、114-1、111-2、113-1 和 111-1 处理的培养基上清液无机磷含量显著高于对照处理, 无机磷含量较对照处理分别提高 8.25%、7.29%、7.10%、5.37%、5.37%、4.99%、0.57% 和 0.57%, 接种 112-2 和 115-1 的培养基上清液无机磷含量与对照处理差异不大。

以黑钙土作为“磷溶出库”, 接种根瘤菌处理的培养基上清液无机磷含量均显著高于对照处理, 提高幅度为 0.75%~7.0%。其中接种菌株 114-1 处理的提高幅度最大, 显著高于其它接种处理。接种菌株 111-2 处理次之, 显著低于 114-1 处理, 但显著高于其它接种处理。115-2 与 113-2 处理相当, 112-1 处理与 114-2 处理相当, 112-2、111-1、113-1 和 115-1 处理之间同样相差不大。

以白浆土作为“磷溶出库”, 接种菌株 112-1、113-2、114-2、111-2、114-1、115-2、111-1 和 112-2 的培养基上清液无机磷含量显著高于对照处理, 提高幅度为 0.41%~14.8%, 其中 112-1 和 113-2 处理的培养基上清液无机磷含量显著高于其它接种处理, 而接种 113-1 和 115-1 处理的培养基上清液无机磷含量与对照差异不大。

以盐碱土作为“磷溶出库”, 接种菌株 113-2、112-1、114-2、111-2、114-1、115-2 和 113-1 的培养基上清液无机磷含量显著高于对照处理, 提高幅度为 0.47%~9.9%, 其中 113-2 和 112-1 处理的培养基上清液无机磷含量显著高于其它接种处理, 而接种 112-2、111-1 和 115-1 处理的培养基上清液无机磷含量与对照差异不大(表 3)。

表 3 接种根瘤菌后培养基上清液无机磷含量分析

Table 3 Analysis of inorganic phosphorus content in the supernatant of rhizobia culture medium after inoculation											
土壤类型 Soil type	111-1	111-2	112-1	112-2	113-1	113-2	114-1	114-2	115-1	115-2	CK
黑土 Black soil	5.85 e	5.88 d	6.13 b	5.85 e	5.84 e	6.25 a	5.88 d	6.03 c	5.86 e	5.88 d	5.84 e
草甸土 Meadow soil	5.24 e	5.47 d	5.64 a	5.22 f	5.24 e	5.59 b	5.49 c	5.58 b	5.22 f	5.49 c	5.21 f
黑钙土 Chernozem soil	5.33 e	5.63 b	5.52 d	5.33 e	5.32 e	5.57 c	5.65 a	5.52 d	5.32 e	5.58 c	5.28 f
白浆土 Albic soil	4.88 e	5.45 c	5.57 a	4.87 ef	4.86 fg	5.57 a	5.43 d	5.5 b	4.86 fg	5.43 d	4.85 g
盐碱土 Saline-alkali soil	4.25 fg	4.58 c	4.65 a	4.25 fg	4.26 ef	4.66 a	4.36 d	4.62 b	4.24 g	4.27 e	4.24 g

同一行不同字母表示在 5% 水平存在显著差异。下同。
The different lowercase marked in the same line mean significant difference at the level of 5%. The same below.

2.2 不同菌株处理条件下土壤有效磷含量对比分析

无论以何种类型土壤作为“磷溶出库”,所有接种处理的土壤有效磷含量均不同程度高于对照处理,说明大豆根瘤菌菌株对土壤难溶性磷具有一定的溶解析出作用。以黑土作为“磷溶出库”,除接种 113-1 菌株处理的土壤有效磷含量与对照处理相差不大外,其余各接种根瘤菌处理的土壤有效磷含量均显著高于对照处理且各接种处理之间差异明显,其中接种 113-2 菌株处理的土壤有效磷含量最高。接种处理的土壤有效磷含量较对照处理提高幅度为 0.07% ~21.53%。

以草甸土、黑钙土作为“磷溶出库”,接种 113-1 菌株处理的土壤有效磷含量与对照差异不大外,其余接种处理的土壤有效磷含量均显著高于对照处理。其中以草甸土作为“磷溶出库”,除接种 112-2 和 113-1 菌株处理外,其它各接种处理之间差异明显,接种 113-2 菌株处理的土壤有效磷含量最高,接种处理的土壤有效磷含量较对照处理提高幅度为

0.08% ~38.82%。

而以黑钙土作为“磷溶出库”,接种 113-2、112-1 菌株处理的土壤有效磷含量相对其它接种处理高,但两处理之间的土壤有效磷含量差异并不大,其它各接种处理之间土壤有效磷含量差异明显。接种处理的土壤有效磷含量较对照处理提高幅度为 0.07% ~25.94%。

以白浆土作为“磷溶出库”,所有接种处理的土壤有效磷含量均显著高于对照处理。其中接种 113-2 菌株处理的土壤有效磷含量显著高于其它接种处理。接种处理的土壤有效磷含量较对照处理提高幅度为 0.27% ~17.40%。

以盐碱土作为“磷溶出库”,所有接种处理的土壤有效磷含量均显著高于对照处理。其中接种 113-2、112-1 菌株处理的土壤有效磷含量显著高于其它接种处理,但两者之间的土壤有效磷含量差别不大。其它各接种处理之间的土壤有效磷含量差异明显,接种处理的土壤有效磷含量较对照处理提高幅度为 0.34% ~34.71% (表 4)。

表 4 接种各根瘤菌后土壤中有有效磷含量分析

Table 4 Analysis of available phosphorus content in soil after inoculation with rhizobia											
土壤类型 Soil type	111-1	111-2	112-1	112-2	113-1	113-2	114-1	114-2	115-1	115-2	CK
黑土 Black soil	13.47 h	15.57 d	16.02 b	13.46 h	13.29 i	16.14 a	15.05 e	15.79 c	14.11 g	14.13 f	13.28 i
草甸土 Meadow soil	12.33 h	13.25 d	15.88 b	12.16 i	11.55 i	16.02 a	13.22 e	15.46 c	12.46 g	12.48 f	11.54 i

续表 4

土壤类型 Soil type	111-1	111-2	112-1	112-2	113-1	113-2	114-1	114-2	115-1	115-2	CK
黑钙土 Chernozem soil	13.02 g	15.88 c	16.25 a	12.98 h	12.92 i	16.26 a	15.79 d	16.03 b	14.54 f	15.67 e	12.91 i
白浆土 Albic soil	15.77 f	16.53 c	17.05 b	14.87 g	14.6 h	17.13 a	16.25 d	16.54 c	15.88 e	16.24 d	14.59 i
盐碱土 Saline-alkali soil	13.46 g	14.90 c	15.63 a	11.75 h	11.65 i	15.64 a	14.86 d	15.33 b	14.24 f	14.46 e	11.61 i

2.3 根瘤菌活化土壤磷能力的图示化比对分析

以不同根瘤菌菌株侵染 5 种类型土壤时的土壤磷溶出量和不同土壤类型为指标建立 GGE 双标图显示,第 1 主成分 PC1 解释了 92.4% 的效应,第 2 主成分 PC2 解释了 5.3% 的效应,PC1 和 PC2 共解释 G 与 GE 互作效应的 97.7%,据此分析推断可靠性较大。通过菌株远端连线,并以中心 5 条边作 5 条垂线,将双标图分为 5 个扇区,位于五边形顶角的菌株是扇区内土壤类型条件下磷溶出量最高的菌株。由此可知,菌株 113-2、112-1 和 114-2 在所有供试土壤条件下磷溶出量相对较高(图 1)。

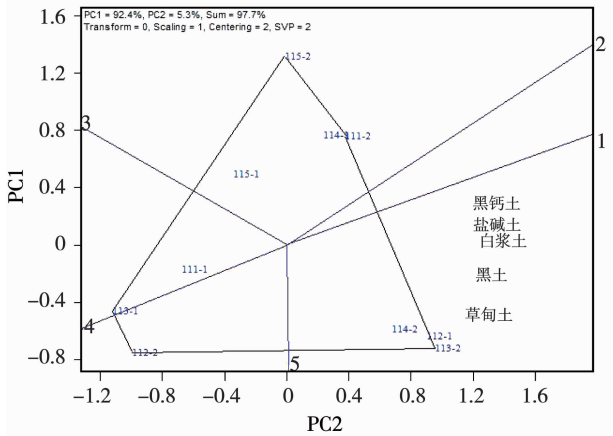


图 1 不同菌株在不同“磷溶出库”中土壤磷溶出量 GGE 双标图

Fig. 1 GGE biplot of soil available phosphorus content of different strains in different phosphorus release reservoirs

由双标图 2 可以得出,供试菌株对土壤磷活化能力顺序为 113-2 > 112-1 > 114-2 > 111-2 > 114-1 > 115-2 > 115-1 > 111-1 > 112-2 > 113-1,其中菌株 113-2、112-1、114-2、111-2 和 114-1 对土壤磷活化能力大于菌株整体活化能力的平均值。活化能力大于平均值且在不同土壤类型条件下稳定性顺序为 112-1 > 114-2 > 113-2 > 111-2 > 114-1。综合比较而言,对土壤磷活化能力强且稳定性较好的菌株为 112-1、113-2 和 114-2。

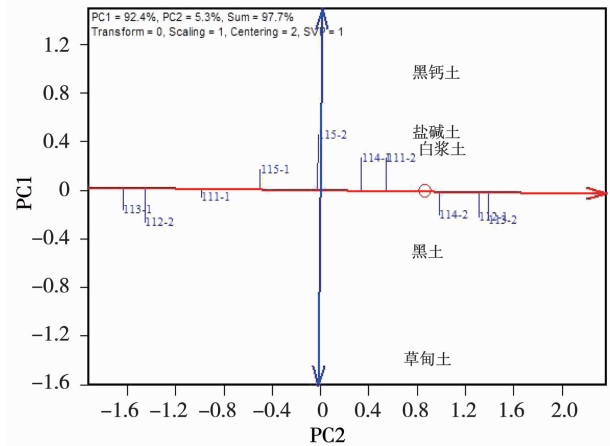


图 2 供试菌株的土壤磷活化能力表现及稳定性

Fig. 2 Soil phosphorus activation ability and stability of the tested strains

3 讨论

磷素缺乏被认为是限制农业生产的主要因子。与氮肥相比,磷化肥的利用率更低,仅有不足 20% 的磷素最终被作物吸收,其余的被化合沉淀、吸附或形成闭蓄态磷而无法被植物吸收利用^[14]。微生物对土壤磷元素的降解能力方面的研究大多集中在芽孢杆菌、真菌和放线菌^[15]。而针对大豆根瘤菌活化土壤磷方面的研究相对较少,开发利用大豆根瘤菌的解磷、溶磷特性,从而服务于大豆生产是一个有益于大豆生产的一举两得的全新方法。

从本研究结果中可以看出,大豆根瘤菌介入条件下,培养基无机磷及土壤中有有效磷含量均显著提高,该结果与其它根瘤菌相关方面的研究大致相同。但本研究与其它相关研究相比,未对土壤难溶性磷组分变化情况做分析研究,所以,对于溶出磷的来源尚属不明,因此需要在今后的研究加以补充。

同以往的相关研究相比,本研究创造性的将 GGE 双标图数学模型方法引入菌株土壤磷活化能力分析中,考虑菌株解磷效应的同时结合了菌株和

环境互作效应,以此对菌株解磷特性进行综合性评价。由于该方法具有直观性和便利性的优点,不仅大大提高了鉴定的准确性,同时也拓展了双标图(Biplot)应用的范畴。

4 结 论

以黑土、草炭土、黑钙土、白浆土和盐碱土作为“磷溶出库”,分别接种分离自黑龙江省不同大豆种植区的 10 种大豆根瘤菌,培养基上清液无机磷含量分别提高 0.68% ~ 7.02%、0.57% ~ 8.25%、0.75% ~ 7.0%、0.41% ~ 14.8% 和 0.47% ~ 9.9%,土壤有效磷含量比对照处理分别提高 0.07% ~ 21.53%、0.08% ~ 38.82%、0.07% ~ 25.94%、0.27% ~ 17.40% 和 0.34% ~ 34.71%。通过 5 种不同类型土壤接种根瘤菌菌株后的土壤磷含量变化建立 GGE 双标图数学模型,并以此方法评价筛选出解磷能力强且多环境下稳定性较好的菌株 112-1、113-2 和 114-2。

参考文献

[1] 王艳,李晓林,张福锁. 不同基因型植物低磷胁迫适应机理的研究进展[J]. 生态农业研究,2000,8(4): 34-36. (Wang Y, Li X L, Zhang F S. Current research on suitable mechanisms on different plant genotypes under phosphorous stress[J]. Eco-agriculture Research, 2000, 8(4): 34-36.)

[2] Pradhan N, Sukla L B. Solubilization of inorganic phosphates by fungi isolated from agriculture soil [J]. African Journal of Biotechnology, 2005, 5(10): 850-854.

[3] 程明芳,何萍,金继运. 我国主要作物磷肥利用率的研究进展[J]. 作物杂志,2010(1): 12-14. (Cheng M F, He P, Jin J Y. Advance of phosphate recovery rate in Chinese main crops[J]. Crops,2010(1):12-14.)

[4] Antoun H A, Beauchamp C J, Goussard N, et al. Potential of rhizobium and bradyrhizobium species as plant growth promoting rhizobacteria on non-legumes: Effect on radishes (*Raphanus sativus* L.) [J]. Plant Soil,1998, 204: 57-67.

[5] Zhang X T, Kang L H, Ma H B, et al. Selection of acacia rhizobium which have the ability to dissolve phosphorus [J]. Forest Research,2008,21(5): 619-624.

[6] Whitelaw M A, Harden T J, Helyar K R. Phosphate solubilisation in solution culture by the soil fungus *Penicillium radicum*[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(5): 655-665.

[7] 张希涛,康丽华,马海宾. 具有解磷能力的相思根瘤菌的筛选[J]. 林业科学研究,2008, 21 (5): 619-622. (Zhang X T, Kang L H, Ma H B. Screening of acacia rhizobia with phosphorus-solubilizing ability [J]. Forest Research, 2008, 21 (5): 619-622.)

[8] Xie J. Screening for calcium phosphate solubilizing rhizobium leguminosarum [D]. Saskatoon: University of Saskatchewan, 2008:16-19.

[9] Abril A, Zurdo-Pineiro J L, Peix A, et al. Solubilization of phosphate by a strain of *Rhizobium leguminosarum* bv. Trifolii isolated from *Phaseolus vulgaris* in El Chaco Arido soil (Argentina) [J]. Developments in Plant and Soil Sciences, 2007, 102: 135-138.

[10] Whitelaw M A. Growth promotion of plants inoculated with phosphate-solubilizing fungi [J]. Advances in Agronomy, 1999, 69: 99-151.

[11] Nahas E. Phosphate solubilizing microorganisms: Effect of carbon, nitrogen, and phosphorus sources [M]//Vela' zquez E, Rodn' guez-Barrueco C. First International Meeting on Microbial Phosphate Solubilization. Springer, 2007:111-115.

[12] 张亮,黄建国. 菜豆根瘤菌对土壤无机磷的活化释放作用 [J]. 土壤学报,2019, 49(5): 996-1002. (Zhang L, Huang J G. Effect of rhizobium phaseoli on mobilization and release of inorganic phosphorus in soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 49(5): 996-1002.)

[13] 杨剑虹,王成林,代亨林. 土壤农化分析与环境监测 [M]. 北京: 中国大地出版社,2008. (Yang J H, Wang C L, Dai H L. Soil agro-chemistry analysis and environmental monitoring [M]. Beijing: Earth Press of China, 2008.)

[14] 李剑峰,张淑卿,杜建雄,等. 解磷根瘤菌研究进展 [J]. 生物技术,2014(18): 11-13. (Li J F, Zhang S Q, Du J X, et al. Advances in the research on phosphorous rhizobia [J]. Biotechnology, 2014(18): 11-13.)

[15] 李剑峰,张淑卿,师尚礼,等. 解磷根瘤菌液体培养基类型、浓度及透气条件的比较 [J]. 草原与草坪,2010, 30(1): 28-32. (Li J F, Zhang S Q, Shi S L, et al. Ventilation conditions on phosphorus-dissolving Rhizobia [J]. Grassland and Turf, 2010, 30(1): 28-32.)