

解磷细菌和丛枝菌根真菌对紫花苜蓿生产性能及地下生物量的影响

孙艳梅, 张前兵, 苗晓茸, 刘俊英, 于磊, 马春晖

(石河子大学动物科技学院, 新疆石河子 832003)

摘要:【目的】解磷细菌 (PSB) 和丛枝菌根真菌 (AMF) 在促进作物养分吸收、提高作物产量等方面具有重要意义。探讨 PSB 和 AMF 对苜蓿生长及地下生物量的影响, 明确 PSB 与 AMF 的相互作用对紫花苜蓿生长的机制, 以为紫花苜蓿人工栽培及其高效复合型微生物肥料的研制提供理论依据。【方法】试验采用单因素随机区组设计, 选用 4 株菌, 分别为具有高效解磷能力的巨大芽孢杆菌 (Bm) 和枯草芽孢杆菌 (Bs), 以及能与苜蓿根系共生的摩西管柄囊霉 (Fm) 和幼套球囊霉 (Ge), 并将这两类菌双接种, 分别为 BmBs、BmFm、BmGe、BsFm、BsGe、FmGe, 以加灭活菌为对照 (CK), 共计 11 个处理。测定接菌处理后紫花苜蓿地上生物量、株高、茎粗、粗蛋白含量、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、苜蓿植株磷含量、主根长、地下生物量、土壤 pH、土壤全磷和速效磷含量, 通过隶属函数法综合各项指标评价单接种菌和双接种菌对苜蓿的应用效果。【结果】紫花苜蓿的地上生物量、株高、茎粗、粗蛋白含量、植株磷含量、主根长、地下生物量和土壤速效磷含量均为接菌处理显著高于 CK ($P < 0.05$), 土壤 pH、全磷、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量均显著低于 CK ($P < 0.05$)。与 CK 相比, 苜蓿地下生物量、株高和茎粗在单施解磷细菌 Bm 和 Bs 处理下分别增加了 18.57%—24.49%、8.59%—21.33% 和 3.86%—9.54%, 在单施丛枝菌根真菌 Fm 和 Ge 处理下分别增加了 9.15%—27.35%、2.51%—18.60% 和 4.59%—8.58%, 双接种 BmBs、BmFm、BmGe、BsFm、BsGe、FmGe 处理下分别增加了 7.66%—41.62%、7.44%—34.56% 和 5.58%—26.61%。单施 Fm 和 Ge 处理苜蓿的主根长均显著大于单施 Bm 和 Bs 处理 ($P < 0.05$), 但 Fm 和 Ge 处理之间、Bm 和 Bs 处理之间差异均不显著 ($P > 0.05$); 双接种处理中, FmGe 处理苜蓿的主根长最长, 且显著大于其他施菌处理 ($P < 0.05$), 其中 BmBs 处理对紫花苜蓿主根长的效应最弱。相关性分析表明, 除酸性洗涤纤维含量与茎粗呈负相关不显著 ($P > 0.05$), 地下生物量与苜蓿磷呈正相关不显著 ($P > 0.05$), 与土壤全磷呈负相关不显著 ($P > 0.05$) 外, 其他各指标之间均为显著或极显著正相关、显著或极显著负相关。采用隶属函数法综合各项指标进行评价, 对苜蓿生产性能影响较大的接菌处理前 3 位排序为 BmFm、BmGe 和 FmGe 处理。【结论】PSB 和 AMF 同时接种, 对苜蓿植株生长发育和磷营养促生效果优于单一接种 PSB 或 AMF, 其促进作用的大小与 PSB 和 AMF 的种类有关。从紫花苜蓿生长状况、植株的磷营养及地下生物量指标综合考虑, 解磷细菌巨大芽孢杆菌 (Bm) 与丛枝菌根真菌摩西管柄囊霉 (Fm) 同时接种 (即 BmFm 处理), 对紫花苜蓿的生长发育和磷营养的改善效果最好, 其次是 BmGe 处理。

关键词: 苜蓿; 解磷细菌; 丛枝菌根真菌; 生产性能; 营养品质

Effects of Phosphorus-Solubilizing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Production Performance and Root Biomass of Alfalfa

SUN YanMei, ZHANG QianBing, MIAO XiaoRong, LIU JunYing, YU Lei, MA ChunHui

(College of Animal Science & Technology, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang)

收稿日期: 2019-01-29; 接受日期: 2019-04-08

基金项目: 国家自然科学基金 (31660693)、中国博士后科学基金 (2018T111120, 2017M613252)、石河子大学青年创新人才培养计划 (CXRC201605)、兵团农业技术推广专项 (CZ0021)、国家牧草产业技术体系项目 (CARS-34)

联系方式: 孙艳梅, E-mail: 157372541@qq.com. 通信作者张前兵, E-mail: qbz102@163.com. 通信作者马春晖, E-mail: chunhuima@126.com

Abstract: 【Objective】 Phosphorus-solubilizing bacteria (PSB) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) play an important role in promoting nutrient uptake and increasing yield of crop. In order to explore the effects of PSB and AMF on growth and root biomass of alfalfa and to clarify the interaction between PSB and AMF, the mechanism of their effects on alfalfa growth were studied, so as to provide theoretical basis for alfalfa artificial cultivation and the development of high-efficiency compound microbial fertilizer. 【Method】 Single factor randomized block design was used in the experiment, and four kinds of bacteria were selected, including *Bacillus megaterium* (Bm) and *Bacillus subtilis* (Bs) with high phosphorus-solubilizing ability, and *Funneliformis mosseae* (Fm) and *Glomus etunicatum* (Ge), which could coexist with alfalfa roots, and the two types of bacteria were double inoculated with BmBs, BmFm, BmGe, BsFm, BsGe, FmGe, and adding inactivated bacteria as a control (CK), respectively. A total of 11 treatments.. After inoculation of the bacteria, the hay yield, plant height, stem diameter, crude protein concentration, neutral detergent fiber, acid detergent fiber, phosphorus concentration, taproot length, root biomass of alfalfa were determined, and pH value, total phosphorus, available phosphorus concentration of soil were also analyzed. Then, the effects of single and double inoculation on alfalfa were evaluated by membership function analysis. 【Result】 The above-ground biomass, plant height, stem diameter, crude protein concentration, phosphorus concentration, taproot length, under-ground biomass, soil available phosphorus under inoculated bacteria treatments were significantly higher than that under CK ($P<0.05$), while neutral detergent fiber and acid detergent fiber of alfalfa, pH value and total phosphorus concentration under soil inoculated bacteria treatments were significantly lower than that under CK ($P<0.05$). Comparisons between inoculated bacteria and CK, above-ground biomass, plant height and stem diameter of alfalfa increased by 18.57%-24.49%, 8.59%-21.33% and 3.86%-9.54% under PSB in Bm and Bs treatments, respectively, and increased by 9.15%-27.35%, 2.51%-18.60 and 4.59%-8.58% under AMF in Fm and Ge treatments, respectively; BmBs, BmFm, BmGe, BsFm, BsGe, and FmGe treatments increased them by 7.66%-41.62%, 7.44%-34.56% and 5.58%-26.61%, respectively. The taproot length of alfalfa in single inoculated Fm and Ge treatments were significantly longer than those treated with Bm and Bs ($P<0.05$), but the differences between Fm and Ge, Bm and Bs treatments were not significant ($P>0.05$); Under the mixed inoculation treatments, the FmGe was the largest and significantly larger than that under other inoculation treatments in the taproot length of alfalfa ($P<0.05$); BmBs treatments was the weakest. The correlation analysis showed that there was no significant negative correlation between acid detergent fiber concentration and stem diameter ($P>0.05$); The under-ground biomass had no significant positive correlation with alfalfa phosphorus ($P>0.05$), and no significant negative correlation with soil total phosphorus ($P>0.05$). The comprehensive assessment various indicator of alfalfa by a membership function analysis showed that BmFm>BmGe>FmGe, which were the top three treatments for alfalfa production performance. 【Conclusion】 The effect of simultaneous inoculation of PSB and AMF on alfalfa plant growth and phosphorus nutrition was better than that of single inoculation of PSB or AMF, and the effect was related to the types of PSB and AMF. Considering the growth status, plant phosphorus nutrition and underground biomass of alfalfa, the effect of simultaneous inoculation of phosphorus-solubilizing bacteria was *Bacillus megaterium* (Bm) and arbuscular mycorrhizal fungus was *Funneliformis mosseae* (Fm) on alfalfa growth and phosphorus nutrition were well improved, and the next was BmGe treatments.

Key words: alfalfa; phosphate-solubilizing bacteria; arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); growth; nutritional quality

0 引言

【研究意义】紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 是多年生优质豆科牧草, 具有营养品质好、产草量高、适应性广等特点, 被誉“牧草之王”^[1]。磷是植物体内部不可或缺的营养元素, 构成植物体生物膜并参与一些特定的生物化学活动^[2]。据报道, 我国 74% 的农田土壤缺少磷^[3], 人们通过向土壤施加磷肥以提高作物的产量, 但磷肥施入土壤后由于淋失、挥发或被土壤中的金属离子结合形成难溶性磷酸盐^[4], 施入的磷肥中有 70%—90% 都难以被植物吸收利用, 土壤中的全磷量虽然相对较高, 但其中的有效磷却很少^[5], 因此, 土壤中有效磷含量成为制约我国农业生产发展的

重要因素。【前人研究进展】解磷细菌与丛枝菌根真菌均为土壤中重要的植物有益微生物类群, 近年来日益成为微生物高效复合肥领域的研究热点。解磷细菌 (Phosphate-Solubilizing Bacteria, PSB) 能分泌胞外磷酸酶和有机酸, 通过生物途径促进土壤难溶性磷的转化, 提高土壤中可溶性磷的含量, 将植物难以吸收利用的磷素转化为可供植物吸收利用的形式, 进而提高植物对磷的吸收利用效率^[6]。研究表明, 接种不同解磷菌替代磷肥不仅能够显著提高苜蓿的干草产量和粗蛋白含量^[7], 而且能够明显改善苜蓿的株高、茎粗、干鲜比和叶茎比^[8], 以及改善土壤肥力^[9]。豆科植物根际土壤微生物中的解磷菌主要是芽孢杆菌属^[10], 添加芽孢杆菌对有机磷、无机磷具有降解

效果, 均能改善土壤当中的有效磷含量^[11]。在添加芽孢杆菌对玉米 (*Zea mays* L.) 生长的研究发现, 接菌显著提高玉米植株的干重、茎粗、磷累积量和改善土壤磷有效性^[12], 也能显著提高油菜 (*Brassica napus* L.) 产量及促进根系生长^[13]。丛枝菌根真菌 (Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF) 能够与 80% 以上的植物形成共生体^[14-16], 菌根能扩大植物根系的表面积^[17]和其他生理过程^[18], 分泌的根系有机物能够改善土壤矿物质的成分^[19], 从而促进植物的生长发育^[20-21]。研究表明添加 AMF 可以改善宿主植物养分和难溶性矿质元素的吸收^[22-23], 尤其是在有效磷含量低的土壤上可提高植物对磷素的吸收^[24]。接种 AMF 能积极促进水稻 (*Oryza sativa* L.) 的生长, 提高水稻的千粒重和干重^[25]。且能与羊草 (*Leymus chinensis*) 形成良好共生关系, 显著提高羊草地上和地下部分全磷含量, 进而促进羊草生物量的增加^[26]。在番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill) 生产中也有相同的表现^[27]。通过接种 AMF 和 PSB 对红三叶草 (*Trifolium pratense*) 和印度印楝 (*Azadirachta indica* A. Juss) 生长的研究发现, 双接种 AMF 和 PSB 能够显著提高植物对磷的吸收, 促进植物生长发育^[28-29]。可见, 解磷细菌与菌根真菌互作在增加磷素吸收和植物的促生作用上优于单一接种时的效果^[30-31]。【本研究切入点】新疆石河子垦区土壤类型为灰漠土, 土壤有效磷含量较低, 解决土壤有效磷缺乏问题只能从增施磷肥或高效微生物肥料两方面入手, 但施入土壤的磷肥很容易被固定, 并在土壤中富集, 在限制苜蓿生长发育的同时, 造成土壤磷的污染。因此, 挖掘微生物解磷能力, 筛选出高效的解磷菌是解决土壤有效磷缺乏的有效途径。国内外学者将 PSB、AMF 等植物有益微生物复合接种在作物上, 并获得了显著协同促生效果, 但该类研究大多集中在农作物上^[32-34], 将 PSB、AMF 共同接种于紫花苜蓿的研究鲜见报道。【拟解决的关键问题】本试验以紫花苜蓿为研究对象, 利用 2 株解磷细菌与 2 株丛枝菌根真菌, 开展双接种 AMF、PSB 试验, 探明其对紫花苜蓿生产性能、根系生物量及土壤磷含量的影响, 明确接菌后紫花苜蓿各生长性状指标之间的关系, 以期对紫花苜蓿高效生产及高效复合型微生物肥料的研制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试菌种与植物 从中国农业微生物菌种保

藏管中心 (Agricultural Culture Collection of China, ACCC) 购买具有解磷作用的巨大芽孢杆菌 (*Bacillus megaterium*, Bm) 和枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*, Bs) 菌种, 该 2 株菌均可以在以 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 为难解磷源的 NBRIP 液体培养基中生长并且形成解磷圈。从青岛农业菌根研究所购买摩西管柄囊霉 (*Funneliformis mosseae*, Fm) 和幼套球囊霉 (*Glomus etunicatum*, Ge), 此菌种的接种物为孢子、带菌丝的沙土及其宿主植物的根段混合物, 孢子的密度为 25—35 个/g。供试的宿主植物紫花苜蓿品种为 WL354HQ (北京正道生态科技有限公司)。

1.1.2 培养基 牛肉膏蛋白胨液体培养基为牛肉膏 5 g·L⁻¹、蛋白胨 10 g·L⁻¹、NaCl 5 g·L⁻¹、琼脂 30 g·L⁻¹, pH 7.0。霍格兰氏营养液 Hoagland's 为硝酸钙 945 mg·L⁻¹、硝酸钾 607 mg·L⁻¹、硫酸镁 493 mg·L⁻¹、铁盐溶液 2.5 mg·L⁻¹、微量元素 5 mg·L⁻¹, pH 6.0。

1.2 试验区域概况

试验于 2017 年 4 月在新疆石河子市石河子大学农学院试验站 (44°18' N, 86°03' E) 进行。该地区为温带大陆性气候带, 干燥少雨, 气温日差较大, 年平均气温为 11.2—13.9℃, 年平均降水量为 203.1—394.9 mm, 年蒸发量为 1 000—1 500 mm。试验用的土壤采自石河子市天业集团农业示范园区试验田 (44°26' N, 85°95' E), 该地土壤类型为灰漠土, 土壤容重为 1.48 g·cm⁻³, 田间持水量为 24.6%, 土壤饱和体积含水量为 29.2%, 0—20 cm 耕层土壤含有机质 25.3 g·kg⁻¹, 碱解氮 72.6 mg·kg⁻¹, 全氮 1.61 g·kg⁻¹, 速效磷 16.3 mg·kg⁻¹, 全磷 0.21 g·kg⁻¹, 速效钾 139.6 mg·kg⁻¹, pH 为 7.75。采集的土壤样品经自然风干后过 2 cm 筛, 去除土壤中的石块和其他植物根段, 测定其基本理化性质备用。

1.3 盆栽试验设计

先复壮巨大芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌种, 后接种至选择性培养基牛肉膏蛋白胨液体培养基中进行扩繁, 采用 GB/T 13092—2006 所述方法进行平皿涂布, 每个梯度 3 次重复, 将菌落数在 30—300 的平板作为有效计数板, 菌落以肉眼可见为准, 菌液中的菌落数约为 10⁹ cfu·mL⁻¹ 后备用。试验采用单因素随机区组设计, 选取 2 株解磷细菌, 分别为巨大芽孢杆菌 (Bm) 和枯草芽孢杆菌 (Bs); 2 株丛枝菌根真菌, 分别为摩西管柄囊霉 (Fm) 和幼套球囊霉 (Ge), 以及解磷细菌和丛枝菌根真菌两两双接种处理: BmBs、BmFm、BmGe、BsFm、BsGe、FmGe, 以加灭活菌为对照 (CK),

共计 11 个处理进行盆栽试验。土壤在 121℃ 下高温湿热灭菌备用, 挑选籽粒硕大的种子, 用 75% 的酒精消毒 30 s, 然后用 5% 的次氯酸消毒 12 min, 再以无菌水冲洗种子多次后播在育苗盘中, 育苗盘大小为 72 孔/板, 孔径 4 cm, 每孔 1 粒种子, 育苗盘中种子播种深度为 1—2 cm。种子播种完后加入上述的菌, 其中 Bm 和 Bs 处理在育苗盘中加入 10 mL, Fm 和 Ge 处理为每孔接菌 10 g, 让其均匀分布于苜蓿种子周围。于 2017 年 3 月 16 日将育苗盘置于恒温培养箱中 25℃ 催芽, 培养条件为光照 12 h (25℃), 黑暗 12 h (20℃), 光照强度 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 空气湿度为 55%。同时, 将 $24 \text{ cm}\times 16 \text{ cm}\times 19 \text{ cm}$ (盆口直径 \times 盆底直径 \times 高) 规格的黑色塑料盆在酒精里浸泡 20 min 后备用, 于 4 月 2 日将选取长势均匀一致的幼苗 15 株置于盆栽盒中, 移栽时每盆装 5.0 kg 灭菌土, 同时再补充一次菌。以 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 为唯一磷源, 施肥时间为分枝期及每 1 茬刈割后, 具体施肥时间为 2017 年 5 月 7 日, 6 月 30 日。每个处理 6 次重复, 共计 66 盆。每隔 10 d 定量 (每盆 100 mL) 给每个处理施加不加磷酸的 Hoagland's 溶液, 具体添加时间为 3 月 16 日、3 月 26 日、4 月 5 日、4 月 15 日及 4 月 25 日, 在添加 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 后停止施用, 用称重法将盆栽土壤湿度控制在田间持水量的 65%—75%。在盆栽周围设置支架, 在支架上装上白色塑料篷布, 如遇下雨天将塑料篷布展开, 以防止降雨对盆栽试验的影响。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 苜蓿生物量 以每盆为单位, 在 6 盆中选取长势一致的苜蓿 3 盆, 于 2017 年 6 月 26 日刈割第 1 茬, 8 月 15 日刈割第 2 茬, 用剪刀将植株地上部分离土壤表面 5 cm 剪下称重, 记录苜蓿鲜草产量, 将苜蓿地下部分冲洗干净并收集根系, 称取并记录鲜重。将苜蓿地上部分植株和地下部分根系在烘箱中于 105℃ 杀青 30 min 后, 于 65℃ 烘干至恒重, 测定其含水率并折算出苜蓿地上生物量(g/pot)和苜蓿地下生物量(g/pot)。具体计算公式如下:

$$\text{苜蓿地上生物量} = \text{植株鲜重生物量} \times (1 - \text{含水率}) \quad (1)$$

$$\text{苜蓿地下生物量} = \text{根系鲜重生物量} \times (1 - \text{含水率}) \quad (2)$$

1.4.2 株高测定 测定地上鲜重生物量的同时, 在 3 盆中随机选取长势均匀一致的紫花苜蓿 30 株, 用钢卷尺测定其到地表的垂直高度, 求其平均值。

1.4.3 茎粗测定 在株高测定的同时, 对测定株高的 30 株紫花苜蓿单株, 用游标卡尺测量距离地面 5 cm 处的茎粗, 求其平均值。

1.4.4 营养品质测定 粗蛋白质含量 (CP) 测定采用 GB/T6432—94, 酸性洗涤纤维 (ADF) 与中性洗涤纤维 (NDF) 含量根据 VAN SOEST 等^[35]方法测定。

1.4.5 植株和土壤磷含量 在苜蓿地上生物量测定的过程中, 将取回的鲜草样品和根系烘干磨成粉末后, 将其置于 600℃ 茂福炉中烧成白色的灰分, 用盐酸溶解灰分, 过滤后用钼锑抗比色法测苜蓿植株磷含量^[36]。在苜蓿第 2 茬刈割后将盆栽中的土壤取出, 过 2 mm 筛后装入塑料自封袋中, 用于土壤全磷和有效磷含量的测定。土壤全磷 (total phosphorus, TP) 采用硫酸—高氯酸消煮钼锑抗比色法测定, 有效磷 (available phosphorus, AP) 采用 NaHCO_3 浸提钼锑抗比色法测定^[37]。

1.4.6 主根长测定 将盆栽中的土壤取出后, 将已经测定株高和茎粗的 10 株紫花苜蓿根系用水冲洗干净, 将主根拉直用钢卷尺测定主根的长度, 求其平均值。

1.5 数据处理分析

利用 Microsoft excel 2007 和 DPS 7.05 进行数据处理分析, 采用新复极差法 (Duncan) 对数据进行差异显著性分析。采用隶属函数评价法评价出最佳处理, 具体公式为:

$$\text{UX}(+) = (\text{X}_{ij} - \text{X}_{i\min}) / (\text{X}_{i\max} - \text{X}_{i\min}) \quad (4)$$

$$\text{UX}(-) = 1 - \text{UX}(+) \quad (5)$$

式中, X_{ij} 为第 i 个处理第 j 个指标测定值; $\text{X}_{i\max}$ 、 $\text{X}_{i\min}$ 为所有供试对象中第 j 项指标的最大值、最小值。 $\text{UX}(+)$ 为各指标呈正相关隶属函数值, $\text{UX}(-)$ 为各指标呈负相关隶属函数值。

2 结果

2.1 接种不同菌对紫花苜蓿地下生物量及土壤磷含量的影响

通过对单接和双接菌处理下紫花苜蓿的地下生物量及土壤磷含量进行测定, 结果表明 (表 1), 所有接菌处理下紫花苜蓿的主根长、地下生物量和土壤速效磷均显著高于 CK ($P < 0.05$), 而 pH 和全磷含量均显著低于 CK ($P < 0.05$)。单接 Bm 和 Bs 处理苜蓿的主根长均大于 Fm 和 Ge 处理 ($P < 0.05$), 但 Bm 和 Bs 之间、Fm 和 Ge 处理间差异均不显著 ($P > 0.05$); 单接 Fm 和 Ge 处理的地下生物量均显著高于 Bm 和 Bs 处理 ($P < 0.05$), 且 Bm 和 Bs、Fm 和 Ge 之间差异均显著 ($P < 0.05$)。双接菌处理中, FmGe 处理的苜蓿主根长显著大于其他施菌处理 ($P < 0.05$), 其中

BmBs 处理对紫花苜蓿主根长的效应最弱。紫花苜蓿地下生物量、速效磷含量均在 BmFm 处理下达到最大值, 分别为 20.94 g/pot 和 31.19 mg·kg⁻¹。与 CK 相比, 土壤 pH、全磷含量均为接菌处理显著低于 CK ($P<0.05$), 且在 BmFm 处理下达到最低值, 为 7.15 和 0.836 g·kg⁻¹。可见, 接种不同菌处理对提高紫花苜蓿主根长、地下生物量及速效磷含量具有较为显著的促进作用, 能够降低土壤 pH 和全磷含量。双接

菌具有一定的正向协同作用, 双接菌更有利于改善苜蓿的根系生长。

2.2 接种不同菌对紫花苜蓿生长的影响

紫花苜蓿地上生物量、株高和茎粗是衡量其生长的重要指标。通过盆栽试验中接种单菌及双接种菌处理对紫花苜蓿生长的测定, 结果表明(表 2), 所有接菌处理的紫花苜蓿地上生物量、株高和茎粗均显著高于 CK ($P<0.05$), 且与 CK 相比, 苜蓿地上生物

表 1 不同菌处理下紫花苜蓿地下生物量及土壤磷含量

Table 1 The under-ground biomass and soil phosphorus concentration of alfalfa under different bacterial treatments

| 处理 Treatment | 主根长 Taproot length (cm) | 地下生物量 Under-ground biomass (g/pot) | pH | 土壤全磷 Total phosphorus in soil (g·kg ⁻¹) | 土壤速效磷 Available phosphorus in soil (mg·kg ⁻¹) |
|-----------------|-------------------------------|--|--------------|---|---|
| CK | 28.87±0.36g | 6.07±0.05k | 7.63±0.13a | 1.142±0.063a | 20.95±0.14h |
| Bm | 33.43±0.25f | 10.86±0.13h | 7.33±0.02cde | 0.904±0.016fgh | 28.63±0.37d |
| Bs | 32.21±0.22f | 9.27±0.06f | 7.44±0.07bc | 0.964±0.017def | 25.25±0.26f |
| Fm | 34.94±0.34e | 14.93±0.14g | 7.40±0.04bcd | 1.073±0.047bc | 27.56±0.31e |
| Ge | 33.92±0.21e | 13.87±0.15i | 7.49±0.05b | 1.021±0.020cd | 25.55±0.24f |
| BmBs | 31.94±0.42f | 12.14±0.09i | 7.41±0.11bc | 1.094±0.019ab | 23.37±0.22ab |
| BmFm | 39.07±0.47b | 19.07±0.19b | 7.15±0.12f | 0.836±0.018h | 31.19±0.38a |
| BmGe | 38.72±0.28b | 17.33±0.11d | 7.24±0.06ef | 0.872±0.025gh | 30.74±0.35ab |
| BsFm | 36.14±0.12c | 17.67±0.05c | 7.34±0.05cde | 0.926±0.022efg | 30.42±0.29bc |
| BsGe | 35.45±0.23d | 16.04±0.13e | 7.21±0.07ef | 0.943±0.054ef | 30.04±0.48c |
| FmGe | 39.83±0.27a | 20.94±0.18a | 7.26±0.03def | 0.977±0.060de | 28.71±0.31d |

同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同
Different lowercase letters in the same column mean significant differences at 0.05 level. The same as below

表 2 不同菌处理下紫花苜蓿生长

Table 2 The growth of alfalfa under different bacterial treatments

| 处理 Treatment | 地上生物量 Above-ground biomass (g/pot) | | | | 株高 Plant height (cm) | | | | 茎粗 Stem diameter (mm) | | | |
|-----------------|------------------------------------|------------------|-----------------|------------------|----------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------|------------------|
| | 第 1 茬 First cut | 第 2 茬 Second cut | 第 1 茬 First cut | 第 2 茬 Second cut | 第 1 茬 First cut | 第 2 茬 Second cut | 第 1 茬 First cut | 第 2 茬 Second cut | 第 1 茬 First cut | 第 2 茬 Second cut | 第 1 茬 First cut | 第 2 茬 Second cut |
| CK | 18.47±0.02i | 13.31±0.08i | 37.41±0.53i | 32.26±0.42g | 2.83±0.09h | 2.44±0.03h | | | | | | |
| Bm | 22.23±0.15e | 16.57±0.17e | 45.39±0.45d | 36.91±0.49c | 3.1±0.03ef | 2.65±0.06def | | | | | | |
| Bs | 21.90±0.21f | 15.93±0.04f | 43.25±0.26f | 35.03±0.35de | 3.01±0.02fg | 2.52±0.05gh | | | | | | |
| Fm | 21.74±0.05f | 16.95±0.09d | 44.37±0.82e | 34.42±0.41e | 3.15±0.03de | 2.68±0.06de | | | | | | |
| Ge | 20.16±0.24h | 14.92±0.19g | 42.21±0.38g | 33.07±0.36f | 2.96±0.05g | 2.63±0.07def | | | | | | |
| BmBs | 20.83±0.18g | 14.33±0.22h | 40.32±0.32h | 34.66±0.25e | 3.06±0.02ef | 2.56±0.09fg | | | | | | |
| BmFm | 25.31±0.11a | 18.85±0.15a | 50.34±0.39a | 42.91±0.38a | 3.32±0.05b | 2.82±0.05b | | | | | | |
| BmGe | 25.03±0.18a | 18.07±0.25b | 48.67±0.34b | 36.75±0.24c | 3.29±0.06bc | 2.79±0.04bc | | | | | | |
| BsFm | 23.76±0.21c | 17.55±0.13c | 46.42±0.51c | 35.65±0.43d | 3.28±0.07bc | 2.74±0.03bcd | | | | | | |
| BsGe | 23.28±0.18d | 16.15±0.07f | 45.63±0.35d | 35.38±0.32d | 3.22±0.04cd | 2.71±0.09cde | | | | | | |
| FmGe | 24.7±0.14b | 18.20±0.14b | 49.70±0.27a | 40.08±0.34b | 3.43±0.06a | 3.05±0.02a | | | | | | |

量、株高和茎粗在单施解磷细菌 Bm 和 Bs 处理下分别增加了 18.57%—24.49%、8.59%—21.33%和 3.86%—9.54%，单施丛枝菌根真菌 Fm 和 Ge 处理下分别增加了 9.15%—27.35%、2.51%—18.60%和 4.59%—8.58%，双接 BmBs、BmFm、BmGe、BsFm、BsGe、FmGe 处理下分别增加了 7.66%—41.62%、7.44%—34.56%和 5.58%—26.61%。在单接菌条件下，紫花苜蓿地上生物量、株高均为 Bm 处理显著大于 Bs、Fm 和 Ge 处理 ($P<0.05$)，Fm 处理显著大于 Ge 处理 ($P<0.05$)。单独接 PSB 和 AMF 中，苜蓿的茎粗在 Fm 处理下最好。双接菌处理中，苜蓿地上生物量、株高和茎粗均在 BmFm 处理下达到最大值，但双接菌 BmBs 处理的紫花苜蓿地上生物量、株高显著低于单接 Bm 和 Bs 处理 ($P<0.05$)，FmGe 处理苜蓿的株高和茎粗均显著高于单施 Fm 和 Ge 处理 ($P<0.05$)。不同接菌处理下紫花苜蓿地上生物量、株高和茎粗均为第 1 茬大于第 2 茬。上述结果表明，在本试验条件下，单接和双接菌处理对苜蓿地上部分生长有明显的促进作用，即对苜蓿地上部的生长具有显著的正效应。

2.3 接种不同菌对紫花苜蓿营养品质的影响

单接菌及双接菌处理下紫花苜蓿的营养品质如表 3 所示，所有接菌处理下紫花苜蓿的粗蛋白含量、苜

蓿植株磷含量均显著高于 CK ($P<0.05$)，中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量均显著低于 CK ($P<0.05$)。单施 Bm 和 Bs 处理及 Fm 和 Ge 处理下，紫花苜蓿的粗蛋白量差异均不显著 ($P>0.05$)，但双接菌 BmFm 处理的粗蛋白含量显著大于单接 Bm、Bs、Fm 和 Ge 处理 ($P<0.05$)，但与 BmFm 与 BmGe、BsFm、BmGe 和 FmGe 处理差异均不显著 ($P>0.05$)。中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量代表适口性，其含量越高，适口性越差，不同接菌处理条件下紫花苜蓿中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量在 BmFm 处理下达到最小值。紫花苜蓿磷含量在单接菌条件下为 Bm 和 Bs 处理高于 Fm 和 Ge 处理，但差异不显著 ($P>0.05$)，双接菌条件下 BmFm 处理显著高于其他双接菌处理 ($P<0.05$)，除 BmBs 外，其他双接菌处理均高于单接菌 Bm、Bs、Fm 和 Ge 处理。不同接菌处理条件下紫花苜蓿的粗蛋白、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量均为第 1 茬大于第 2 茬。苜蓿磷含量反之，为第 1 茬小于第 2 茬。

2.4 接种不同菌处理下紫花苜蓿各指标相关性分析

皮尔逊相关系数是一种度量两个变量间相关程度的方法，它是一个介于 1 和-1 之间的数值，其中，1 表示变量完全正相关，0 表示不相关，-1 表示完全负相关。通过皮尔逊相关性分析表明（表 4），紫花苜

表 3 不同菌处理下紫花苜蓿的营养品质
Table 3 The nutrition quality of alfalfa under different bacterial treatments

| 处理 Treatment | 粗蛋白 Crude protein (%) | | 中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (%) | | 酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (%) | | 苜蓿磷 Phosphorus concentration in alfalfa (%) | |
|-----------------|--------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|--|---------------------|
| | 第 1 茬 First cut | 第 2 茬 Second cut | 第 1 茬 First cut | 第 2 茬 Second cut | 第 1 茬 First cut | 第 2 茬 Second cut | 第 1 茬 First cut | 第 2 茬 Second cut |
| | | | | | | | | |
| CK | 16.45±0.21h | 17.58±0.11h | 40.98±0.31a | 41.78±0.53a | 32.63±0.33a | 32.98±0.44a | 0.242±0.008f | 0.223±0.002f |
| Bm | 18.63±0.47cd | 19.45±0.28bc | 37.59±0.39de | 40.40±0.49c | 28.32±0.29f | 28.52±0.33fg | 0.294±0.009bc | 0.255±0.008c |
| Bs | 18.57±0.22cde | 18.87±0.04ef | 38.03±0.48d | 41.28±0.38ab | 29.56±0.33cd | 29.63±0.46d | 0.277±0.016cde | 0.248±0.003cd |
| Fm | 18.35±0.09def | 19.05±0.14de | 38.96±0.39bc | 38.78±0.37e | 28.87±0.36e | 29.73±0.22d | 0.266±0.022de | 0.233±0.008ef |
| Ge | 18.22±0.18bc | 18.54±0.22fg | 39.49±0.23b | 41.65±0.28a | 29.19±0.41de | 30.88±0.26c | 0.252±0.012ef | 0.229±0.002ed |
| BmBs | 17.94±0.23g | 18.39±0.17g | 38.88±0.47bc | 41.62±0.26a | 30.73±0.25b | 31.94±0.31b | 0.255±0.018ef | 0.236±0.004e |
| BmFm | 19.41±0.15a | 19.99±0.26a | 35.61±0.36g | 37.87±0.28f | 26.01±0.21i | 27.14±0.32h | 0.324±0.012a | 0.288±0.007a |
| BmGe | 19.13±0.21ab | 19.72±0.24ab | 36.81±0.32f | 39.43±0.23d | 27.75±0.22g | 28.26±0.06g | 0.303±0.016ab | 0.269±0.005b |
| BsFm | 18.79±0.16bc | 19.35±0.15bcd | 37.14±0.16ef | 39.61±0.27d | 26.65±0.34h | 29.03±0.31ef | 0.291±0.002bcd | 0.253±0.009cd |
| BsGe | 18.05±0.14fg | 18.82±0.28df | 38.67±0.35c | 41.47±0.34ab | 28.98±0.27e | 29.46±0.38de | 0.286±0.017bcd | 0.247±0.009cd |
| FmGe | 18.46±0.08cde | 19.20±0.25cde | 36.77±0.19f | 40.88±0.33bc | 29.89±0.38c | 30.81±0.25c | 0.290±0.007bcd | 0.239±0.006de |

表 4 不同菌处理下紫花苜蓿各指标相关性分析

Table 4 The correlation analysis of each index of alfalfa under different bacterial treatments

| 指标 Index | 主根长 Taproot | 地下生物量 Under-ground biomass | pH | 全磷 Total phosphorus | 速效磷 Available phosphorus | 地上生物量 Above-ground biomass | 株高 Plant height | 茎粗 Stem | 粗蛋白 Crude protein | 中性洗 涤纤维 Neutral detergent fiber | 酸性洗 涤纤维 Acid detergent fiber |
|--|----------------|----------------------------------|----------|---------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------|-------------------------|---|---------------------------------------|
| 地下生物量 Under-ground biomass | 0.957** | | | | | | | | | | |
| pH | -0.857** | -0.807** | | | | | | | | | |
| 全磷 Total phosphorus | -0.714* | -0.576 | 0.822** | | | | | | | | |
| 速效磷 Available phosphorus | 0.863** | 0.811** | -0.903** | -0.874** | | | | | | | |
| 地上生物量 Above-ground biomass | 0.939** | 0.856** | -0.906** | -0.840** | 0.923** | | | | | | |
| 株高 Plant height | 0.918** | 0.825** | -0.900** | -0.821** | 0.847** | 0.956** | | | | | |
| 茎粗 Stem | 0.958** | 0.947** | -0.840** | -0.620* | 0.814** | 0.910** | 0.897** | | | | |
| 粗蛋白 Crude protein | 0.807** | 0.705* | -0.820** | -0.886** | 0.877** | 0.902** | 0.859** | 0.715* | | | |
| 中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber | -0.808** | -0.713* | 0.790** | 0.796** | -0.829** | -0.914** | -0.895** | -0.741** | -0.923** | | |
| 酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber | -0.692* | -0.607* | 0.776** | 0.905** | -0.900** | -0.822** | -0.762** | -0.576 | -0.934** | 0.883** | |
| 苜蓿磷 Phosphorus concentration in alfalfa | 0.719* | 0.570 | -0.847** | -0.936** | 0.824** | 0.874** | 0.882** | 0.642* | 0.875** | -0.900** | -0.877** |

*表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关，**表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关

*represents significant correlation at 0.05 level (bilateral), ** represents significant correlation at 0.01 level (bilateral)

苜的中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量与苜蓿地上生物量、株高、茎粗和粗蛋白含量呈极显著负相关（ $P<0.01$ ），pH 除与中洗洗涤纤维含量和主根长呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），与其他指标均呈极显著负相关（ $P<0.01$ ）。速效磷含量除与中性洗涤纤维含量、pH 和土壤全磷含量呈极显著负相关（ $P<0.01$ ），与其他指标均呈极显著正相关（ $P<0.01$ ）。其他指标除酸性洗涤纤维含量与茎粗呈负相关不显著（ $P>0.05$ ）；地下生物量与苜蓿磷呈正相关不显著（ $P>0.05$ ），与土壤全磷呈负相关不显著外（ $P>0.05$ ），其他各指标之间呈显著或极显著正相关、显著或极显著负相关。

2.5 接种不同菌对紫花苜蓿生长、营养品质和地下生物量的综合评价

由于各处理在不同指标上表现均不相同，而以任何一个单一指标评价最优接菌处理均是不全面的^[38]。以主根长、地下生物量、pH、土壤全磷、速效磷、苜蓿地上生物量、株高、茎粗、粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、苜蓿磷含量、含量总计 12 个指标，对接种不同菌处理下紫花苜蓿的生长、营养品质及地下生物量和土壤磷含量进行综合评价（表 5）。其中主根长、地下生物量、速效磷、地上生物量、株高、茎粗、粗蛋白含量、苜蓿磷含量为正向指标，pH、全磷含量、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量为负向指标。

将 12 项指标的隶属函数值进行综合价值排序,平均值越大综合价值越高,反之越差。各不同接菌处理下苜蓿各生产指标综合排序,前 3 位为 BmFm、BmGe 和 FmGe 处理。

表 5 不同菌处理下紫花苜蓿各指标综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of various indicators of alfalfa under different bacterial treatments

| 指标 Index | CK | Bm | Bs | Fm | Ge | BmBs | BmFm | BmGe | BsFm | BsGe | FmGe |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 主根长 Taproot | 0.000 | 0.415 | 0.304 | 0.552 | 0.460 | 0.280 | 0.927 | 0.896 | 0.661 | 0.599 | 1.000 |
| 地下生物量 Under-ground biomass | 0.000 | 0.323 | 0.216 | 0.596 | 0.525 | 0.409 | 0.874 | 0.757 | 0.780 | 0.671 | 1.000 |
| pH | 0.000 | 0.625 | 0.396 | 0.479 | 0.292 | 0.458 | 1.000 | 0.813 | 0.604 | 0.875 | 0.771 |
| 全磷 Total phosphorus | 0.000 | 0.775 | 0.580 | 0.225 | 0.394 | 0.156 | 1.000 | 0.879 | 0.704 | 0.648 | 0.537 |
| 速效磷 Available phosphorus | 0.000 | 0.750 | 0.420 | 0.646 | 0.449 | 0.236 | 1.000 | 0.956 | 0.925 | 0.888 | 0.758 |
| 地上生物量 Above-ground biomass | 0.000 | 0.567 | 0.489 | 0.559 | 0.267 | 0.274 | 1.000 | 0.914 | 0.770 | 0.618 | 0.898 |
| 株高 Plant height | 0.000 | 0.536 | 0.365 | 0.387 | 0.238 | 0.225 | 1.000 | 0.668 | 0.526 | 0.481 | 0.853 |
| 茎粗 Stem | 0.008 | 0.402 | 0.221 | 0.467 | 0.270 | 0.295 | 0.721 | 0.672 | 0.623 | 0.549 | 1.000 |
| 粗蛋白 Crude protein | 0.000 | 0.755 | 0.636 | 0.628 | 0.509 | 0.429 | 1.000 | 0.898 | 0.766 | 0.530 | 0.677 |
| 中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber | 0.000 | 0.514 | 0.372 | 0.541 | 0.175 | 0.244 | 1.000 | 0.703 | 0.648 | 0.282 | 0.551 |
| 酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber | 0.000 | 0.704 | 0.515 | 0.563 | 0.445 | 0.236 | 1.000 | 0.770 | 0.797 | 0.575 | 0.394 |
| 苜蓿磷 Phosphorus concentration in alfalfa | 0.000 | 0.571 | 0.408 | 0.231 | 0.109 | 0.177 | 1.000 | 0.728 | 0.537 | 0.463 | 0.435 |
| 平均值 Average | 0.001 | 0.578 | 0.410 | 0.489 | 0.344 | 0.285 | 0.960 | 0.805 | 0.695 | 0.598 | 0.739 |
| 排序 Rank | 11 | 6 | 8 | 7 | 9 | 10 | 1 | 2 | 4 | 5 | 3 |

3 讨论

3.1 接种 PSB 和 AMF 对紫花苜蓿生物量的影响

接种不同菌对紫花苜蓿地上生物量及地下生物量的影响,实质上是通过不同菌的功能改善土壤当中营养物质形态以便于植物体吸收,或加强植物根系的吸收能力进而促进植物的生长。本研究中,接种菌处理的紫花苜蓿地上生物量、株高、茎粗、主根长、地下生物量均显著高于 CK(表 1—2)。研究表明磷素营养与植物生长发育有关,解磷细菌能改善土壤有效磷含量进而改善了苜蓿生物量变化^[9]。土壤磷含量增加后会显著增加紫花苜蓿叶片中的叶绿素含量,提高了苜蓿光合作用速率^[39],从而促进苜蓿植株生长,提高紫花苜蓿干草产量,故土壤当中的有效磷增多对苜蓿干物质的累积有一定的促进作用^[40]。而土壤有效磷增多时,苜蓿的根系能立马反映并利用它进行根系本身的生长发育,然后将养分运输到地上部分,同时促进地上和地下生物量的增加。其他研究认为,添加 PSB 促进植物生长是通过诱导植物分泌生长激素或降低抑制植物生长激素的形成,从而促进植物的生长和

发育^[41]。添加 AMF 相较于 CK,能与紫花苜蓿的根系形成共生体,菌根的菌丝可以直接吸收水分,且菌丝将根系的表面积扩大,在相同的条件下,吸收的养分和水分的利用效率随之提高^[42]。本研究中 Fm 处理下苜蓿的地上生物量、株高、地下生物量显著高于 Ge 处理($P<0.05$)(表 1—2),菌根的生长发育依赖于 AM 真菌与宿主植物的根系亲和力以及二者之间的相互选择性,紫花苜蓿接种 Fm 和 Ge 两种菌,两者形成菌丝的能力不同,对植物生长的影响也有所不同,同时也说明 Fm 与苜蓿植物具有更好的亲和性。

本研究中接种 FmGe 处理在紫花苜蓿促生长方面高于单独接种 Fm 或 Ge 处理(表 1)。在其他植物上也有相似的结论,如在百合(*Lilium*)上接种 AMF 显著增加其生长量,混合接种 AMF 对百合生长指标和生理特性各指标的影响效果显著高于单一菌种^[43],在郁金香(*Tulipa gesneriana*)上混合接种 AMF 的促生效应最好^[44]。本研究中 BmFm、BmGe 处理对苜蓿促生的效果优于 FmGe 处理(表 1—2),研究表明,双接种条件下,AMF 与植物是互惠共生的关系,在互惠共生体中,共生体的利益应该与双方合作者的利益是

一致的^[45], 真菌菌丝能从土壤中将养分元素集中吸收并转运到根系内^[46], 进而促进各自的生长和营养吸收, 真菌和解磷细菌的合作扩大了植物对养分的吸收范围, 同时也能增加土壤难溶性磷的活化和植物对磷的吸收利用^[18], 同时, AMF 促使根系分泌出更多微生物利用的资源, 根系分泌物除了为根际微生物提供丰富的营养物质外, 通过诱导趋化性运动吸引微生物向根际聚集和定殖, 进而影响其他微生物在植物根际定殖^[47]。双接种所含的有益微生物在生长繁殖过程中不但能够直接给作物提供某些营养元素, 产生对植物有益的代谢产物, 而且能够不同程度地刺激和调节植物生长使其生长健壮, 营养状况得到改善, 从而达到增产效果^[48]。研究表明双接菌提高了根际土壤中的微生物数量及土壤酶活力, 在提高土壤肥力的同时, 改善了土壤微生物的多样性^[49], 故不同功能土壤微生物发挥不同的功能作用, 促进苜蓿各方面的营养, 从而使苜蓿达到促生效果。磷营养在苜蓿生产中发挥着巨大的作用, 接种 PSB 和 AMF 两者相互作用有利于土壤的磷循环^[28], 故解磷细菌与菌根真菌互作在增加磷素吸收和植物的促生长作用上优于单一接种^[29-30]。本研究中并不是所有的双接菌处理对苜蓿生长都有协同作用, 不同菌促进紫花苜蓿生长的作用机制存在一定的差异, 与枯草芽孢组合的 BmBs、BsFm、BsGe 处理在地下生物量、株高等方面均比与巨大芽孢杆菌组合的 BmFm、BmGe 处理效果差, 且 BmBs 处理对苜蓿的促生效果差于 BsFm、BsGe 处理 (表 1—2), 这主要是由于枯草芽孢杆菌对真菌、细菌、病毒和菌原体等具有良好的抑制作用^[50], 故与枯草芽孢杆菌结合的菌在生产性能和营养品质等方面表现较差, 但是 BmBs、BsFm、BsGe 处理也高于 CK, 因为微生物有很大一部分具有活化养分的功能, 它们能够将难溶性的无机化合物或有机氮或者磷转化为植物可直接吸收利用的有效养分, 同时当这类功能性微生物衰老死亡后, 体内贮存的养分释放成为土壤有效养分^[51]。

3.2 接种 PSB 和 AMF 对紫花苜蓿营养品质的影响

本研究中, 接种菌处理的紫花苜蓿粗蛋白、磷含量均显著高于 CK ($P<0.05$), NDF 和 ADF 均显著小于 CK ($P<0.05$) (表 3)。双接菌通过提高土壤生物有效磷浓度和改善营养物质循环来促进菌根的发展进而促进植物的生长, 同时, 通过改变土壤、植物有效磷浓度会影响植物光合作用进而影响生物固氮^[52], 从而提高苜蓿粗蛋白含量。苜蓿营养品质的形成是紫花苜蓿生物量一种转化, 一般地上部分的生物

量受光合作用的影响较大, 通过光合作用累积生物量, 而累积后较多的养分含量才能进一步的改善苜蓿品质。且 AM 真菌不仅能促进植物吸收养分同时还能明显减少养分损失^[53], 故使得植物体内部的蛋白含量在逐渐增加。在肥力较丰富的土壤环境, 会促进植物生长发育, 植物发育较好植株体的木质化随之降低, 故 NDF 和 ADF 小于 CK。

3.3 接种 PSB 和 AMF 对紫花苜蓿土壤磷含量的影响

本研究中, 接种菌处理的紫花苜蓿土壤速效磷显著高于 CK, 全磷和 pH 显著低于 CK (表 1)。PSB 和 AMF 能够分泌有机酸, 有机酸当中的 H^+ 使得土壤 pH 降低, 其中有机酸能够降解土壤中难溶性磷酸盐, 故使得全磷含量下降, 速效磷含量增加^[54]。同时, 释放出的酸性物质将土壤当中的难溶性磷溶解供给植物吸收利用, 其本身还能够分泌磷酸酶对有机磷进行降解消化^[55], 另外有机酸还可以与磷酸根离子之间竞争磷吸附位点, 减少土壤对磷酸根的吸附, 溶解土壤中的磷酸钙盐, 还可以使土壤对磷的吸附位点消失进而使得更多的有效磷释放出来^[56]。故添加菌能提高土壤有效磷含量, 降低土壤全磷含量。新疆地区属于盐碱地, 在盆栽种植条件下, 不断地浇水会使得土壤板结化严重, PSB 在生长过程中分泌的大量有机酸能改善土壤理化结构^[11,19], 使土壤疏松, 非毛细管孔隙增加^[57], 可以给予苜蓿一个更好生长的环境。PSB 对其他作物的促进作用也有相似报道, 在添加巨大芽孢杆菌对玉米 (*Zea mays* L.) 生长的研究发现, 接菌显著改善土壤磷有效性^[12], 且添加巨大芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌对有机磷、无机磷具有降解效果, 均能改善土壤当中的有效磷含量, 但两者解磷能力大小具有差异, 巨大芽孢杆菌的解磷能力强于枯草芽孢杆菌^[11], 而 AMF 不仅改善土壤理化性状, 还能通过促使土壤中的其他微生物繁殖, 使这些微生物参与降解植物残体^[58], 微生物大量的繁殖及植物降解也能分泌大量的有效磷, 及降低土壤全磷的含量。

3.4 隶属函数分析评价不同组合的最优接菌模式

单接 PSB 或 AMF 与双接 PSB 和 AMF 方式对紫花苜蓿的生长、营养品质和地下生物量的影响不同 (表 1—3), 通过一个指标来评价最优接菌模式并不能全面说明不同接菌处理的优劣, 而采用隶属函数分析的方法能够综合多项指标来评价最优接菌模式^[38]。本研究表明, 按照不同施菌最优组合排序, 滴灌苜蓿各茬次最优组合为 BmFm 处理 (表 5), 说明当双接种菌中 PSB 为巨大芽孢杆菌、AMF 为摩西管柄囊霉, 能

够更有效提高紫花苜蓿干草产量, 溶解更多的土壤全磷, 促进苜蓿植株对速效磷的吸收, 并提高苜蓿的营养品质。同时, 相同功能菌或不同功能菌对紫花苜蓿影响不同, 只有选择合适的接菌处理才能达到提高苜蓿生产性能, 改善营养品质及土壤肥力等效果, 并提高土壤有效磷。本研究发现, 土壤速效磷与紫花苜蓿的生产性能和品质呈正相关, pH、全磷含量与紫花苜蓿的生产性能和品质呈负相关(表4), 说明各菌通过改善土壤营养状况, 以及苜蓿根系情况来提高苜蓿生产性能。本文对不同菌对紫花苜蓿的促生长特性、解磷菌的解磷机理以及丛枝菌根真菌促生长等问题没有涉及, 在后续工作中尚需进一步的深入研究。

4 结论

在单接种解磷细菌条件下, 接种巨大芽孢杆菌有利于促进紫花苜蓿生长及溶磷。在单接种丛枝菌根真菌条件下, 接种摩西球囊霉有利于促进紫花苜蓿的主根长、地下生物量。枯草芽孢杆菌与其他菌种结合虽然会产生抑制作用, 但对苜蓿的促生效果大于不接菌处理, 仍具有一定的正向促进作用。采用隶属函数法从紫花苜蓿生长、营养品质、地下生物量和土壤磷含量综合评价, 巨大芽孢杆菌与摩西管柄囊霉同时接种, 对紫花苜蓿的生长发育和磷营养的改善效果最好, 且优于单一接种, 其促进作用的大小与解磷菌的种类有关。

References

- [1] 张前兵, 于磊, 鲁为华, 马春晖, 和海秀. 优化灌溉制度提高苜蓿种植当年产量及品质. 农业工程学报, 2016, 32(23): 116-122.
ZHANG Q B, YU L, LU W H, MA C H, HE H X. Optimal irrigation regime improving yield and quality of alfalfa in year of sowing. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(23): 116-122.(in Chinese)
- [2] 苏亚丽, 张力君, 孙启忠, 乌艳红, 杨秀芳, 吕宁. 水肥耦合对散汉苜蓿营养成分的影响. 草地学报, 2011, 19(5): 821-824.
SU Y L, ZHANG L J, SUN Q Z, WU Y H, YANG X F, LÜ N. Effects of variable water and nutrient regimes on nutrients of alfalfa. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(5): 821-824. (in Chinese)
- [3] 赵小蓉, 林启美, 孙焱鑫, 张有山, 张美庆. 玉米根际与非根际解磷细菌的分布特点. 生态学杂志, 2001, 20(6): 62-64.
ZHAO X R, LIN Q M, SUN Y X, ZHANG Y S, ZHANG M Q. Phosphobacteria distribution in rhizosphere and nonrhizosphere soil of corn. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 20(6): 62-64. (in Chinese)
- [4] 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. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 262-268.
WANG Y Y, WEI Z, XU C Y, SHEN Q R. Dissolving capacity of phosphate dissolving bacteria strains combination and their effects on corn growth. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 262-268. (in Chinese)
- [5] RODRIGUEZ H, FRAGA R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 1999, 17(4/5): 319-339.
- [6] 李海云, 姚拓, 张榕, 张洁, 李智燕, 荣良燕, 路晓雯, 杨晓蕾, 夏东慧, 罗慧琴. 红三叶根际溶磷菌株分泌有机酸与溶磷能力的相关性研究. 草业学报, 2018, 27(12): 113-121.
LI H Y, YAO T, ZHANG R, ZHANG J, LI Z Y, RONG L Y, LU X W, YANG X L, XIA D H, LUO H Q. Relationship between organic acids secreted from rhizosphere phosphate-solubilizing bacteria in *Trifolium pratense* and phosphate-solubilizing ability. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(12): 113-121.(in Chinese)
- [7] 韩华雯, 孙丽娜, 姚拓, 荣良燕, 刘青海, 卢虎, 马晖玲. 不同促生菌株组合对紫花苜蓿产量和品质的影响. 草业学报, 2013, 22(5): 104-112.
HAN H W, SUN L N, YAO T, RONG L Y, LIU Q H, LU H, MA H L. Effects of bio-fertilizers with different PGPR strain combinations on yield and quality of alfalfa. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(5): 104-112.(in Chinese)
- [8] 韩光, 张磊, 邱勤, 石杰, 胡正峰. 复合型 PGPR 和苜蓿对新垦地土壤培肥效果研究. 土壤学报, 2011, 48(2): 405-411.
HAN G, ZHANG L, QIU Q, SHI J, HU Z F. Effects of PGPR and alfalfa on soil building of newly-reclaimed land. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 405-411.(in Chinese)
- [9] 李玉娥, 姚拓, 荣良燕. 溶磷菌溶磷和分泌 IAA 特性及对苜蓿生长的影响. 草地学报, 2010, 18(1): 84-88.
LI Y E, YAO T, RONG L Y. Characteristics of IAA secretion and phosphate dissolving of phosphate-solubilizing bacteria and its effect on alfalfa growth. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(1): 84-88.(in Chinese)
- [10] THAKUR D, KAUSHAL R, SHYAM V. Phosphate solubilising microorganisms: role in phosphorus nutrition of crop plants-A review. *Agricultural Reviews*, 2014, 35(3): 159.
- [11] 张维娜, 孙梅, 陈秋红, 施大林, 匡群. 巨大芽孢杆菌 JD-2 的解磷效果及对土壤有效磷化的研究. 吉林农业科学, 2012, 37(5): 38-41.
ZHANG W N, SUN M, CHEN Q H, SHI D L, KUANG Q. Studies on the effect of *Bacillus megaterium* JD-2 in dissolving P and soil

- available phosphorus. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2012, 37(5): 38-41.(in Chinese)
- [12] 王琰. 解磷芽孢杆菌的筛选鉴定及其对玉米促生机理的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- WANG Y. Study on isolation of phosphate-solubilizing bacillus and their impact of growth-promoting for maize[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [13] 柳艳艳, 骆洪义, 王凤忠, 周波, 韩明渠, 王芳. 巨大芽孢杆菌(BM002)生物有机肥对油菜生长发育的影响. *山东农业科学*, 2012, 44(7): 63-66.
- LIU Y Y, LUO H Y, WANG F Z, ZHOU B, HAN M Q, WANG F. Effect of *Bacillus megaterium* (BM002) microbial organic fertilizer on growth and development of rape. *Shandong Agricultural Sciences*, 2012, 44(7): 63-66.(in Chinese)
- [14] XU Z Y, BAN Y H, JIANG Y H, ZHANG X L, LIU X Y. Arbuscular mycorrhizal fungi in wetland habitats and their application in constructed wetland: A review. *Pedosphere*, 2016, 26(5): 592-617.
- [15] 舒波, 李伟才, 刘丽琴, 魏永赞, 石胜友. 丛枝菌根(AM)真菌与共生植物物质交换研究进展. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4): 1111-1117.
- SHU B, LI W C, LIU L Q, WEI Y Z, SHI S Y. Progress on material exchange between arbuscular mycorrhizal(AM) fungi and host plant: A review. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4): 1111-1117.(in Chinese)
- [16] 王庆峰, 姜昕, 马鸣超, 关大伟, 赵百锁, 魏丹, 曹凤明, 李力, 李俊. 长期施用氮肥和磷肥对东北黑土丛枝菌根真菌群落组成的影响. *中国农业科学*, 2018, 51(17): 3315-3324.
- WANG Q F, JIANG X, MA M C, GUAN D W, ZHAO B S, WEI D, CAO F M, LI L, LI J. Influence of long-term nitrogen and phosphorus fertilization on arbuscular mycorrhizal fungi community in Mollisols of Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(17): 3315-3324.(in Chinese)
- [17] WILLMANN M, GERLACH, BUER B, POLATAJKO A, NAGY R, KOEBKE E, JANSKA J, FLISCH R, BUCHER M. Mycorrhizal phosphate uptake pathway in maize: vital for growth and cob development on nutrient poor agricultural and greenhouse soils. *Frontiers in Plant Science*, 2013, 26(4): 523.
- [18] 宋圆圆, 夏明, 林熠斌, 林娴慧, 丁朝晖, 王杰, 胡林, 曾任森. 丛枝菌根真菌摩西管柄囊霉侵染增强番茄对机械损伤的响应. *应用生态报*, 2018, 29(11): 3811-3818.
- SONG Y Y, XIA M, LIN Y B, LIN X H, DING C H, WANG J, HU L, ZENG R S. Colonization with arbuscular mycorrhizal fungus *Funneliformis mosseae* enhanced the responses of tomato plants to mechanical wounding. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(11): 3811-3818.(in Chinese)
- [19] 郭静, 罗培宇, 杨劲峰, 李冬冬, 黄月玥, 韩晓日. 长期施肥对棕壤丛枝菌根真菌群落结构及其侵染的影响. *中国农业科学*, 2018, 51(24): 4677-4689.
- GOU J, LUO P Y, YANG J F, LI D D, HUANG Y Y, HAN X R. Influence of long-term fertilization on community structures and colonization of arbuscular mycorrhizal fungi in a brown soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(24): 4677-4689.(in Chinese)
- [20] SMITH S E, SMITH F A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology*, 2011, 62(1): 227-250.
- [21] LIU C, RAVNSKOV S, LIU F, RUBAEK G H, ANDERSEN M N. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate abiotic stresses in potato plants caused by low phosphorus and deficit irrigation/partial root-zone drying. *The Journal of Agricultural Science*, 2018, 156(1): 46-48.
- [22] GIOVANNETTI M, SBRANA C, AVIO L, STRANI P. Patterns of below-ground plant interconnections established by means of arbuscular mycorrhizal networks. *New Phytologist*, 2004, 164(1): 175-181.
- [23] MORTIMER P E, PEREZFERNANDEZ M A, VALENTINE A J. The role of arbuscular mycorrhizal colonization in the carbon and nutrient economy of the tripartite symbiosis with nodulated *Phaseolus vulgaris*. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(5): 1019-1027.
- [24] 任爱天, 鲁为华, 杨洁晶, 刘红玲, 马春晖. 不同磷水平下 AM 真菌对紫花苜蓿生长和磷利用的影响. *中国草地学报*, 2014, 36(6): 72-78.
- REN A T, LU W H, YANG J J, LIU H L, MA C H. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on growth of alfalfa and phosphorus utilization under different P levels. *Chinese Journal of Grassland*, 2014, 36(6): 72-78.(in Chinese)
- [25] 黎绍鹏, 林哲, 李德智, 陈保瑜, 叶少萍, 辛国荣. 多花黑麦草根际土壤丛枝菌根真菌对早稻生长的影响. *生态科学*, 2010, 29(5): 411-416.
- LI S P, LIN Z, LI D Z, CHEN B Y, YE S P, XIN G R. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of Italian ryegrass on succeeding rice growth. *Ecological Science*, 2010, 29(5): 411-416.(in Chinese)
- [26] 甄莉娜, 王润梅, 杨俊霞, 李侠, 张英俊. 丛枝菌根真菌与氮肥对羊草生长的影响. *中国草地学报*, 2018, 40(3): 49-54.
- ZHEN L N, WANG R M, YANG J X, LI X, ZHANG Y J. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen fertilizer on the growth of *Leymus chinensis*. *Chinese Journal of Grassland*, 2018, 40(3): 49-54.

- (in Chinese)
- [27] ZIANE H, MEDDAD-HAMZA A, BEDDIAR A, GIANINAZZI S. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and fertilization levels on industrial tomato growth and production. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2017, 19(2): 341-347.
- [28] 秦芳玲, 田中民. 同时接种解磷细菌与丛枝菌根真菌对低磷土壤红三叶草养分利用的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 151-157.
- QIN F L, TIAN Z M. Effect of co-inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and four different phosphate-solubilizing bacteria on nutrients uptake of red clover in a low phosphorus soil. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2009, 37(6): 151-157.(in Chinese)
- [29] MUTHUKUMAR T, UDAIYAN K, RAJESHKANNAN V. Response of neem (*Azadirachta indica* A. Juss) to indigenous arbuscular mycorrhizal fungi, phosphate-solubilizing and asymbiotic nitrogen-fixing bacteria under tropical nursery conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34(6): 417-426.
- [30] ZHANG L, DING X, CHEN S, HE X, ZHANG F, FENG G. Reducing carbon: phosphorus ratio can enhance microbial phytin mineralization and lessen competition with maize for phosphorus. *Journal of Plant Interactions*, 2014, 9(1): 850-856.
- [31] BABANA A H, ANTOUN H. Effect of Tilemsi phosphate rock-solubilizing microorganisms on phosphorus uptake and yield of field-grown wheat (*Triticum aestivum* L.) in Mali. *Plant & Soil*, 2006, 287(1/2): 51-58.
- [32] ZHANG L, FAN J Q, DING X D, HE X H, ZHANG F S, FENG G. Hyphosphere interactions between an arbuscular mycorrhizal fungus and a phosphate solubilizing bacterium promote phytate mineralization in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 74(1/7): 177-183.
- [33] ZAIDI A. Stimulatory effects of dual inoculation with phosphate solubilising microorganisms and arbuscular mycorrhizal fungus on chickpea. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2007, 47(8): 1016-1022.
- [34] JORQUERA M A, HERNANDEZ M T, RENGEL Z, MARSCHNER P, MORA M L. Isolation of culturable phosphobacteria with both phytate-mineralization and phosphate-solubilization activity from the rhizosphere of plants grown in a volcanic soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 44(8): 1025-1034.
- [35] VAN SOEST P J, ROBERTSON J B, LEWIS B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74(10): 3583-3597.
- [36] FAN J W, DU Y L, WANG B R, TURNER N C, WANG T, ABBOTT L K, STEFANOVA K, SIDDIQUE K H M, LI F M. Forage yield, soil water depletion, shoot nitrogen and phosphorus uptake and concentration, of young and old stands of alfalfa in response to nitrogen and phosphorus fertilisation in a semiarid environment. *Field Crops Research*, 2016, 198(11): 247-257.
- [37] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU R K. *Methods of Soil Agricultural Chemical Analysis*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [38] 张凡凡, 和海秀, 于磊, 鲁为华, 张前兵, 马春晖. 天山西部高山区夏季放牧草地 4 种重要牧草营养品质评价. 草业学报, 2017, 26(8): 207-215.
- ZHANG F F, HE H X, YU L, LU W H, ZHANG Q B, MA C H. Nutritional quality of four important herbage species in summer grazing grassland in the alpine zone, west Tianshan Mountain. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(8): 207-215. (in Chinese)
- [39] ABEL S, TICCONI C A, DELATORRE C A. Phosphate sensing in higher plant. *Physiologia Plantarum*, 2010, 115(1): 1-8.
- [40] 张凡凡, 于磊, 马春晖, 张前兵, 鲁为华. 绿洲区滴灌条件下施肥对紫花苜蓿生产性能及品质的影响. 草业学报, 2015, 24(10): 175-182.
- ZHANG F F, YU L, MA C H, ZHANG Q B, LU W H. Effect of phosphorus application under drip irrigation on the productivity and quality of alfalfa in Northern Xinjiang. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(10): 175-182.(in Chinese)
- [41] 李海云, 姚拓, 师尚礼, 王国基, 唐玉, 范宇航, 胡鸿娇, 朱熙栋. 复合菌剂对玉米根际土壤酶活性和微生物数量的影响. 草原与草坪, 2018, 38(6): 19-26.
- LI H Y, YAO T, SHI S L, WANG G J, TANG Y, FAN Y H, HU H J, ZHU X D. Effect of compound inoculants on maize rhizosphere soil enzyme activity and microbial quantity. *Grassland and Turf*, 2018, 38(6): 19-26.(in Chinese)
- [42] 田蜜, 陈应龙, 李敏, 刘润进. 丛枝菌根结构与功能研究进展. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2369-2376.
- TIAN M, CHEN Y L, LI M, LIU R J. Structure and function of arbuscular mycorrhiza: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(8): 2369-2376.(in Chinese)
- [43] 刘兆娜, 郭绍霞, 李伟. AM 真菌对百合生长和生理特性的影响. 草业学报, 2017, 26(11): 85-93.
- LIU Z N, GOU S X, LI W. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and physiological characteristics of *Lilium brownii*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(11): 85-93.(in Chinese)

- [44] 李文彬, 卢文倩, 谢佳委, 刘艳敏, 刘润进, 郭绍霞. 丛枝菌根真菌对郁金香生长及其切花生理的影响. 菌物学报, 2018, 37(4): 456-465.
- LIU W B, LU W J, XIE J W, LIU Y M, LIU R J, GUO S X. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and cut flower physiology of *Tulipa gesneriana*. *Mycosystema*, 2018, 37(4): 456-465. (in Chinese)
- [45] JONES M D, SMITH S E. Exploring functional definitions of mycorrhizas: Are mycorrhizas always mutualisms? *Canadian Journal of Botany*, 2004, 82(8): 1089-1109.
- [46] PARNISKE M. Arbuscular mycorrhiza: The mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, 6(10): 763-775.
- [47] THANGAVELU M, KARUTHAMUTHU U. Coinoculation of bioinoculants improve *Acacia auriculiformis* seedling growth and quality in a tropical Alfisol soil. *Journal of Forestry Research*, 2018, 29(3): 663-673.
- [48] MIRANSARI M. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and soil bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, 89(4): 917-930.
- [49] 付晓峰, 张桂萍, 张小伟, 任嘉红. 溶磷细菌和丛枝菌根真菌接种对南方红豆杉生长及根际微生物和土壤酶活性的影响. 西北植物学报, 2016, 36(2): 353-360.
- FU X F, ZHANG G P, ZHANG X W, REN J H. Effects of PSB and AMF on growth, microorganisms and soil enzyme activities in the rhizosphere of *Taxus chinensis* var. *mairei* seedlings. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, 36(2): 353-360. (in Chinese)
- [50] TAMEHIRO N, OKAMOTO-HOSOYA Y, OKAMOTO S, UBUKATA M, HAMADA M, NAGANAWA H, OCHI K. Bacilysin, a novel phospholipid antibiotic produced by *Bacillus subtilis* 168. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 2002, 46(2): 315-320.
- [51] CHEN G C, HE Z L. Microbial biomass phosphorus turnover in variable-charge soils in China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33(13/14): 2101-2117.
- [52] TORO M, AZCON R, BAREA J. Improvement of arbuscular mycorrhiza development by inoculation of soil with phosphate-solubilizing rhizobacteria to improve rock phosphate bioavailability ((sup32)P) and nutrient cycling. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63(11): 4408-4412.
- [53] BENDER S F, CONEN F, VAN, D H M G A. Mycorrhizal effects on nutrient cycling, nutrient leaching and N₂O production in experimental grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80: 283-292.
- [54] HEIJDEN M G A V D, BARDGETT R D, STRAALLEN N M V. The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology letters*, 2008, 11(3): 296-310.
- [55] BAUDOIN E, NAZARET S, MOUGEL C, RANJARD L, MOENNE-LOCCOZ Y. Impact of inoculation with the phytostimulatory PGPR *Azospirillum lipoferum* CRL7 on the genetic structure of the rhizobacterial community of field-grown maize. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(2): 409-413.
- [56] 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. 中国生态农业学报, 2015, 23(8): 964-972.
- LI N, QIAO Z W, HONG J P, XIE Y H, ZHANG T Q. Phosphorus solubilizing bacteria growth and effects on soil phosphorus adsorption-desorption characteristics in reclaimed soils. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(8): 964-972. (in Chinese)
- [57] 武志海, 刘晶晶, 杨美英, 卢冬雪, 岳胜天, 付丽. 外源溶磷菌对不同土壤条件下大豆生长特性的影响. 大豆科学, 2017, 36(1): 78-86.
- WU Z H, LIU J J, YANG M Y, LU D X, YUE S T, FU L. Effects of exogenous phosphate-solubilizing bacteria on growth characteristics of soybean under different soil condition. *Soybean Science*, 2017, 36(1): 78-86. (in Chinese)
- [58] GEISSELER D, HORWATH W R, JOERENSEN R G, LUDWIG B. Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms - A review. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 42(12): 2058-2067.

(责任编辑 杨鑫浩)