

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.022

# 根际促生细菌应用方式下金银花生长与根际环境特征

刘方春<sup>1</sup> 马海林<sup>1</sup> 杜振宇<sup>1</sup> 马丙尧<sup>1</sup> 杨庆山<sup>1</sup> 井大炜<sup>2</sup>

(1. 山东省林业科学研究院山东省森林植被生态修复工程技术研究中心, 济南 250014;

2. 德州学院生态与园林建筑学院, 德州 271018)

**摘要:** 为提高植物根际促生细菌在干旱环境下的应用效果,以 *Bacillus cereus* DZ1 为供试菌株,探讨了清水稀释和豆芽汁营养液稀释处理下其在交联聚丙烯酰胺 (CLP) 中的存活特征,然后通过金银花造林实验,研究了接种 *B. subtilis* DZ1 (PGPR)、施用 CLP (CLP)、接种 *B. subtilis* DZ1 并混施 CLP (C-P) 和 CLP-PGPR 凝胶 (CPG) 对植物生长及根际环境微生物特征的影响。结果表明,同清水稀释处理相比,豆芽汁营养液稀释处理 CLP 中的有效活菌数量显著提高 19.45% ~ 664.05%, CLP 可以作为 PGPR 的吸附载体。同 PGPR 处理相比, CPG 处理根系分泌物中的氨基酸总量、有机酸总量和总糖含量分别提高 37.36%、30.04% 和 8.18%; 直接接种 *B. cereus* DZ1 对根际土壤微生物量碳影响较小,但 CPG 处理显著提高了微生物量碳含量,并明显增强了土壤微生物呼吸作用,其微生物呼吸速率较 PGPR、CLP、C-P 和 CK 分别高出 18.02%、9.93%、8.56% 和 18.91%; CPG 处理还降低了代谢熵,与另外 4 个处理相比其下降幅度分别为 12.74%、7.62%、8.02% 和 14.02%。无论 *B. cereus* DZ1 何种接种方式均对金银花的造林成活率影响不显著,但 CPG 处理显著增加了植物的干物质积累量,其叶片相对含水率较 C-P 处理显著增加 10.34%,而相对电导率降低 9.70%。可见,CLP-PGPR 凝胶方式更有利于接种微生物的定殖存活,可改善金银花根际土壤的微生态环境,增强植物干旱耐受性的同时促进植物生长。

**关键词:** 金银花; 植物根际促生细菌; 交联聚丙烯酰胺; 凝胶; 根际

**中图分类号:** S728.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0163-09

## *Lonicera japonica* Thunb. Growth and Its Rhizosphere Environment Characteristics with Application of Plant Growth-promoting Rhizobacteria

Liu Fangchun<sup>1</sup> Ma Hailin<sup>1</sup> Du Zhenyu<sup>1</sup> Ma Bingyao<sup>1</sup> Yang Qingshan<sup>1</sup> Jing Dawei<sup>2</sup>

(1. Shandong Engineering Research Center for Ecological Restoration of Forest Vegetation, Shandong Academy of Forest, Ji'nan 250014, China

2. College of Ecology and Garden Architecture, Dezhou University, Dezhou 271018, China)

**Abstract:** Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) are beneficial native soil bacteria that colonize the rhizosphere or plant roots and regulate the functional properties of agricultural systems. One of the proposed mechanisms through which PGPR enhances plant growth is the production of plant growth regulators, especially cytokinin. However, little information is available regarding cytokinin-producing PGPR inoculation on growth and water stress consistence of *Lonicera japonica* Thunb. seedlings. Therefore, a bacterial strain with high cytokinin production and known positive effects on plant growth was selected for use in present investigation. Cross-linked polyacrylamide is a widely studied super-absorbent polymer with segments of hydrophilic groups that can absorb and retain liquids, with the absorbed water it is difficult to remove even under pressure. In addition, because of the water absorbing properties of these macromolecules, cross-linked polyacrylamide were used in a wide range of applications in agriculture and

收稿日期: 2016-07-14 修回日期: 2016-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(31570614)和山东省科技发展计划项目(2010GSF10621, 2014GNC113006)

作者简介: 刘方春(1978—),男,高级工程师,博士,主要从事森林土壤与植物营养研究, E-mail: fchliu@126.com

通信作者: 马海林(1970—),男,研究员,主要从事植物营养与土壤肥料研究, E-mail: mahlin@163.com

forestry. Firstly, an inoculation experiment was conducted to determine whether cross-linked polyacrylamide could be used as carrier for PGPR by inoculating *Bacillus cereus* DZ1. And then, a *Lonicera japonica* Thunb. afforestation experiment, including five treatments, i.e. PGPR (*B. subtilis* DZ1 inoculation alone), CLP (cross-linked polyacrylamide was applied alone), C-P (*B. subtilis* inoculation with CLP), CPG (gel was made of PGPR and CLP), and CK (neither *B. subtilis* nor CLP was applied) was conducted. The experiment was to evaluate the effect of different ways of PGPR application on *Lonicera japonica* Thunb. growth and microbial characteristics in rhizosphere soils. Results indicated that compared with the diluted water treatment, the number of effective viable bacteria of bean sprout juice dilution treatment in cross-linked polyacrylamide was significantly increased by 19.45% ~ 664.05%, which meant that CLP can be used as an carrier for *B. subtilis* DZ1. The root exudates, namely amino acids, organic acids and total sugars in CPG treated *Lonicera japonica* Thunb. rhizosphere soils were significantly increased by 37.36%, 30.04% and 8.18% than those in PGPR treatment. Although *B. subtilis* DZ1 inoculation alone had no significant effect on microbial biomass carbon contents, the CPG treatment evidently increased microbial biomass carbon and significantly enhanced microbial respiration, showing 18.02%, 9.93%, 8.56% and 18.91% increases in microbial respiration rate over the treatments of PGPR, CLP, C-P and CK, respectively. At the same time, the metabolic quotient was reduced by the CPG treatment, demonstrating 12.74%, 7.62%, 8.02% and 14.02% decreases, respectively. Besides, the CPG treatment achieved the highest Simpson index, however the lowest Shannon and McIntosh index among all the treatments. CPG treatment had no significant effect on afforestation survival rate, it was beneficial to the shoot and root dry matter accumulation of *Lonicera japonica* Thunb. Compared with C-P treatment, CPG treatment increased the relative water content of *Lonicera japonica* Thunb. leaves by 10.34%, whereas decreased the relative electric conductance by 9.70%. As a result, the CLP-PGPR gel can alleviate the drought stress and interfere with the suppression of plant growth through regulating the micro ecological environment of *Lonicera japonica* Thunb. rhizosphere soil, showing a real potential to perform as a drought stress inhibitor in arid environments.

**Key words:** *Lonicera japonica* Thunb.; plant growth-promoting rhizobacteria; cross-linked polyacrylamide; gel; rhizosphere

## 引言

植物根际促生细菌(PGPR)是指生存在植物根圈范围中,对植物生长有促进或对病原菌有拮抗作用的有益细菌的统称<sup>[1-2]</sup>。PGPR是目前国内外研究的热点之一,关注点主要是利用PGPR促进植物生长、活化土壤养分、减少化肥施用量和提高植物的诱导系统抗性等<sup>[3-5]</sup>。然而,YANG等指出,PGPR如此重要,但却很少有关将PGPR用作非生物胁迫,尤其是干旱胁迫诱导物质的研究报道<sup>[6]</sup>。干旱是限制植物产量最重要的环境因子,也是影响树木成活与生长的重要限制因子<sup>[7]</sup>。近年来,利用PGPR提高植物干旱耐受性的研究在国际上已逐渐得到关注。然而,不同的环境条件,诸如水分、土壤性质或其他土著微生物活力等均会对细菌生长造成影响。有研究表明,干旱会导致土壤中细菌数量减少、生物多样性降低、生物活性下降<sup>[8]</sup>,不可能充分发挥

其功效<sup>[9]</sup>,这是PGPR在干旱环境中难以推广应用的主要限制因素。提高PGPR在干旱逆境中的定殖存活能力,加强其在干旱环境中的应用效果已成为PGPR应用中亟待解决的难题。

交联聚丙烯酰胺(CLP)是一种人工合成的高分子长链聚合物,其自身有超强的重复吸水能力,且所吸收水分的85%~95%是植物可以利用的有效水,常作为土壤保水剂施用于干旱和半干旱地区的土壤中<sup>[10-11]</sup>。应用CLP能增加土壤表层颗粒间的凝聚力与入渗率,提高土壤总孔隙度和毛管孔隙度,增强土壤微生物呼吸作用<sup>[12-13]</sup>。由此推测,可以将CLP同PGPR一起施用,以充分发挥PGPR在干旱环境下的功效,但目前这方面的研究相对较少,尤其针对植物根际土壤环境微生物特征的研究更是鲜有报道。根际是由土壤-微生物-酶组成的一个特殊微生物生态系统,是水分与各种养分物质进入根系并参与物质循环和能量转化的重要场所之一,且与原土体差

异较大的特殊土壤微区<sup>[14-16]</sup>。研究表明,根际土壤中的细菌的数量是非根际土壤中的 8.75 ~ 28.77 倍,干旱对根际土壤中细菌数量的影响明显大于对非根际土壤的影响<sup>[17]</sup>。为此,本文选取具有促生功能的枯草芽胞杆菌(*Bacillus subtilis*) DZ1 为供试菌株,以金银花为试材,于 PGPR 在 CLP 中定殖存活规律研究的基础上,开展 PGPR 的不同应用方式对金银花造林成活率、生长及根际土壤微生物特征的影响研究,旨在明确 PGPR 同 CLP 的最佳结合应用方式,为干旱环境下 PGPR 的合理应用提供新思路,为干旱山地造林及经济林栽培工作提供理论依据和技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 *B. subtilis* DZ1 在 CLP 中的存活研究

实验选用 PGPR 为枯草芽胞杆菌(*B. subtilis*) DZ1,已于 2011 年 10 月 14 日保藏于中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心,保藏编号为 CGMCC No. 5318。实验选用的 XL 型 CLP 来自北京汉力葆科贸中心,粒径为 1.6 ~ 4.0 mm,阴离子度为 12.3%,含水率为 9.7%,表观密度为 0.78 g/cm<sup>3</sup>,吸纯水倍数为 350。

将培养 24 h 的 *B. subtilis* DZ1 菌液浓度调至 600 nm 波长处的吸光值大于 0.5,再取 20 mL 菌液用无菌水或豆芽汁营养液(黄豆芽 100 g,加 1 000 mL 水,煮沸约 30 min,用纱布过滤,用水补足原来的量,再加入蔗糖 50 g,煮沸溶化,pH 值自然,121℃ 灭菌 20 min)稀释至 2 000 mL,加入到灭菌后的 50 g CLP 载体中。将物料在 121℃ 条件下间歇灭菌,每次灭菌 1 h。灭菌后称取 50 g 载体,无菌条件下将稀释后的菌液与载体充分混匀,使载体湿润,并保持松散不结块。充分混匀后装入自封袋,封口,重复 3 次。自封袋表面用灭菌针均匀扎若干个通气孔,再套一层自封袋同样扎若干个通气孔。将其置于常温干燥阴凉处。载体吸附后取 10 g 样品,用稀释平板计数法测定活菌数,以后每 3 d 测定一次。

### 1.2 金银花的造林实验

#### 1.2.1 造林区概况

在莱芜市苗山镇的牛旺泉北山安排金银花的造林实验。该地区地处暖温带半湿润季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨,年平均气温 13.0℃,年均降水量 695.1 mm,降水时空分布不均匀,70% 主要集中在夏季,年平均相对湿度为 63%。土壤类型为褐土,地上植被以芒草(*Miscanthus giganteus*)、羊茅(*Festuca ovina*)和稗(*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.)为主。土壤碱解氮、速效磷和速效钾质量比

分别为 70.29、10.00、260 mg/kg, pH 值为 7.99,有机质质量分数为 0.68%。

#### 1.2.2 造林实验设置

将培养 24 h 的 *B. subtilis* DZ1 菌液浓度调至 600 nm 波长处的吸光值大于 0.5,按照体积比 1:100 用豆芽汁营养液稀释制成接种剂,然后用 CLP 按照 1:40 (g/mL) 吸附接种剂制成 CLP-PGPR 凝胶。2014 年 3 月 29 日,选择生长基本一致的金银花扦插苗造林,造林的株行距为 1 m × 1 m,每处理 200 株,重复 3 次。造林实验共设 5 个处理,分别为接种 *B. subtilis* DZ1 (简称 PGPR)、施用 CLP (简称 CLP)、施用 CLP 并接种 *B. subtilis* DZ1 (简称 C-P)、施用 CLP-PGPR 凝胶 (简称 CPG) 和对照 (简称 CK)。PGPR 处理 *B. subtilis* DZ1 接种液的用量为每株 600 mL,CLP 处理是将 15 g CLP 吸附 600 mL 豆芽汁营养液后应用于金银花根系周围,C-P 处理是将 15 g CLP 和 600 mL *B. subtilis* DZ1 接种剂分别施用于金银花根系周围,CPG 处理是将 615 g CLP-PGPR 凝胶施用于金银花根系周围,CK 处理另外补充 600 mL 豆芽汁营养液于金银花根系周围。

#### 1.3 测定项目与方法

2014 年 9 月 22 日分别在每个小区随机选择 10 株金银花苗木,采集金银花的成熟功能叶迅速装入液氮罐内带回实验室,进行相对含水率和相对电导率的测定。采用重量法测定金银花叶片的相对含水率<sup>[18]</sup>;采用电导法测定叶片的相对电导率<sup>[19]</sup>。2014 年 10 月 12 日调查造林成活率,同时参考 LIU 等<sup>[20]</sup>的方法收集金银花根际土,迅速装入液氮罐内带回实验室进行根际土壤相关生理指标的测定,同时将金银花地上部和地下部带回实验室,杀青干燥后测定干物质量。

根系分泌物的收集采用层析滤纸定位法<sup>[21]</sup>。根分泌物中氨基酸总量的测定采用甲醛滴定法,总糖的测定采用蒽酮比色法,有机酸的测定分析采用 Agilent HP-1100 series 型液相色谱仪<sup>[22]</sup>;土壤有机质含量测定用重铬酸钾-硫酸容量法;碱解氮的测定采用碱解扩散法;速效磷的测定采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法;速效钾的测定采用 NH<sub>4</sub>Ac 浸提-火焰光度法;pH 值的测定采用电位法(水土质量比为 1:2.5)<sup>[23]</sup>;土壤的呼吸强度采用室内恒温培养、碱液吸收法测定,根据培养 24 h 内 CO<sub>2</sub> 的释放量计算土壤呼吸强度<sup>[23]</sup>,代谢熵为土壤呼吸强度和微生物量碳的比值;土壤微生物生物量碳的测定采用氯仿熏蒸 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提法<sup>[24]</sup>。

稀释平板计数法测定土壤细菌。称取 10 g 新鲜土样,溶于 100 mL 已灭菌的蒸馏水中,振荡

20 min后作为土壤悬液。用1 mL消毒移液管取悬液依次稀释至 $10^{-5}$ 、 $10^{-6}$ 、 $10^{-7}$ ,采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基进行细菌数量的测定。用0.1 mL消毒移液管取每个稀释度悬液,无菌操作,接种于消毒培养皿,重复3次,以不加悬液的消毒蒸馏水作空白对照。

土壤微生物群落功能多样性采用 BIOLOG 微生物自动分析系统进行分析<sup>[13]</sup>。称取5 g新鲜土样,置于50 mL无菌的0.85%质量分数NaCl溶液中,175 r/min条件下振荡30 min,用无菌NaCl溶液稀释200倍,向BIOLOG Eco微孔板各孔中分别添加150  $\mu$ L稀释后的悬液,25 $^{\circ}$ C恒温培养,每隔24 h在BIOLOG自动读盘机上读取波长590 nm和750 nm下的吸光度。选取96 h的数据,参照ZHONG等<sup>[25]</sup>的方法进行多样性指数的计算。

#### 1.4 数据分析

采用Excel 2010处理数据并制图,SPSS 13.0统计软件进行方差分析和多重比较(Least significant difference, LSD)

## 2 结果与分析

### 2.1 CLP中的有效活菌数

不同时间CLP载体中的有效活菌数如图1所示。可以看出,无论是用清水还是用豆芽汁营养液稀释,有效活菌数在培养初期均有较大幅度下降。同接种初期时相比,培养至第3天时,有效活菌数分别降低了35.30%和46.21%。从第6天开始,豆芽汁营养液稀释处理的有效活菌数开始显著大于清水处理。在培养至第12天时,豆芽汁营养液稀释处理中的有效活菌数趋于稳定,维持在 $3.25 \times 10^7 \sim 3.997 \times 10^7$  CFU/g之间。清水处理在培养前9 d有效活菌数持续下降,在第9~21天时趋于稳定,有效活菌数维持在 $9.4 \times 10^6 \sim 1.04 \times 10^7$  CFU/g之间;

表1 PGPR的应用方式对金银花根际土壤根系分泌物的影响

Tab.1 Effect of different application ways of PGPR on root exudates content in *Lonicera japonica* Thunb. rhizosphere soil

处理	氨基酸质量比/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有机酸质量比/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	总糖质量比/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
PGPR	$0.886 \pm 0.081^a$	$(22.321 \pm 2.010) \times 10^{-3b}$	$(15.925 \pm 1.340) \times 10^{-3b}$
CLP	$0.961 \pm 0.053^b$	$(23.421 \pm 1.410) \times 10^{-3b}$	$(14.501 \pm 2.050) \times 10^{-3b}$
C-P	$0.973 \pm 0.035^b$	$(28.516 \pm 1.420) \times 10^{-3a}$	$(14.423 \pm 1.410) \times 10^{-3b}$
CPG	$1.217 \pm 0.081^a$	$(29.021 \pm 1.530) \times 10^{-3a}$	$(17.213 \pm 1.053) \times 10^{-3a}$
CK	$0.892 \pm 0.052^a$	$(22.011 \pm 1.650) \times 10^{-3b}$	$(10.623 \pm 1.120) \times 10^{-3c}$

注:数据为平均值 $\pm$ 标准差,同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

### 2.3 微生物量碳、微生物呼吸和代谢焓

土壤微生物生物量碳的动态变化是微生物对土壤养分的生长固持和死亡矿化释放的外在表现形式,对土壤有机质的分解与养分的转化循环具有重要作用<sup>[2,13]</sup>。从不同处理土壤微生物量碳的含量可

在第24 d时,其有效活菌数又显著下降,至培养结束时仅为 $7 \times 10^5$  CFU/g,仅为豆芽汁营养液稀释处理的2.15%。以上分析认为,*B. subtilis* DZ1可以在CLP中稳定定殖,但营养液连同菌剂一起吸附最为关键。

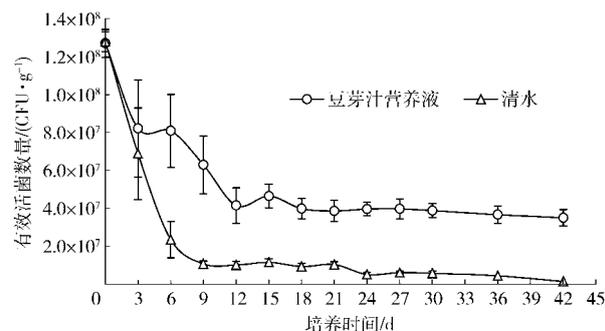


图1 不同培养时间CLP中的有效活菌数

Fig.1 Number of effective bacteria in CLP at different inoculation time

### 2.2 根系分泌物

植物生长过程中,根系从周围环境中吸收水分和养分的同时,也会向根际环境中分泌大量有机物,释放一些无机离子和质子,即根系分泌物<sup>[26]</sup>。不同处理根系分泌物中氨基酸总量、有机酸总量和总糖含量的变化如表1所示。可以看出,与C-P处理相比,CPG处理的氨基酸质量比和总糖质量比均有不同幅度的增加,增加比例分别为25.08%和19.35%。CPG处理的有机酸质量比同C-P处理之间差异不显著,但较PGPR、CLP和CK处理分别显著增加30.02%、23.91%和31.85%。PGPR处理的氨基酸总量和有机酸含量显著低于C-P处理,但总糖含量差异不显著。数据显示,PGPR的接种方式对根系分泌物的含量起到了决定作用,CLP-PGPR凝胶方式的应用对金银花根际环境的根系分泌物含量影响最为显著。

以看出(表2),施用CLP不同程度上提高了微生物碳的含量。同CK相比,CLP、C-P和CPG处理的微生物碳含量显著提高了16.22%、17.17%、38.46%。3种PGPR的接种方式中,同PGPR和C-P处理相比,CPG处理的微生物量碳分别显著提高

表 2 金银花根际土壤的微生物量碳、微生物呼吸和代谢熵

Tab.2 Microbial biomass carbon, microbial respiration and metabolic quotient in *Lonicera japonica* Thunb. rhizosphere soil

处理	微生物量碳含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	微生物呼吸速率/(mg·kg <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	代谢熵/h <sup>-1</sup>
PGPR	246.23 ± 19.25 <sup>c</sup>	0.666 ± 0.033 <sup>c</sup>	2.70 ± 0.01 <sup>a</sup>
CLP	279.87 ± 16.85 <sup>bc</sup>	0.715 ± 0.019 <sup>b</sup>	2.55 ± 0.02 <sup>b</sup>
C-P	282.17 ± 14.18 <sup>b</sup>	0.724 ± 0.042 <sup>b</sup>	2.57 ± 0.10 <sup>b</sup>
CPG	333.43 ± 20.37 <sup>a</sup>	0.784 ± 0.029 <sup>a</sup>	2.36 ± 0.12 <sup>c</sup>
CK	240.82 ± 17.23 <sup>c</sup>	0.661 ± 0.035 <sup>c</sup>	2.74 ± 0.15 <sup>a</sup>

35.41%和18.17%,而直接接种PGPR处理显著最低,与CK之间差异不显著。

从表2还可以看出,PGPR处理同CK之间微生物呼吸速率差异不显著,直接接种*B. subtilis* DZ1对金银花根际土壤的微生物呼吸速率影响较小。但将PGPR和CLP相结合,2种施用方式均不同程度提高了微生物的呼吸速率,其中以CPG的形式施用效果最为显著。无论是否接种PGPR,添加CLP对金银花根际土壤微生物呼吸速率具有较大影响。同CK处理相比,C-P处理和CPG处理的微生物呼吸速率分别显著提高9.53%和18.91%。相比于直接添加CLP,CPG处理微生物呼吸速率显著提高8.55%。可见,以CLP-PGPR凝胶的方式接种PGPR,对土壤微生物的呼吸有益的。

代谢熵是对土壤微生物呼吸速率和与微生物生物量变化的综合反映,其数值代表微生物生物量的大小和活性,也指示着土壤生态系统的成熟程度<sup>[27]</sup>。表2显示,CK处理和PGPR处理的代谢熵最高,且两者之间差异不显著。而加入CLP以后,根际土壤的代谢熵显著降低。同CK处理相比,处

理CLP、C-P、CPG的代谢熵显著降低6.76%、6.36%和13.97%。同另外2个添加CLP处理相比,CPG处理的代谢熵分别降低7.62%和8.08%,差异显著。数据分析表明,干旱环境下直接接种*B. subtilis* DZ1对根际土壤微生物呼吸速率和代谢熵影响较小,但添加CLP不仅有利于提高根际土壤的微生物呼吸速率,还降低了代谢熵,其中以CLP-PGPR凝胶方式应用效果最为明显。

#### 2.4 细菌数量及微生物功能多样性

由表3可以看出,不同的PGPR接种方式之间金银花根际土壤细菌数量差异显著。虽然接种了相同数量的*B. subtilis* DZ1,但CPG处理的细菌数量分别比PGPR和C-P处理显著提高28.32%和11.72%。PGPR处理同CK处理之间差异不显著,说明干旱环境下直接接种*B. subtilis* DZ1并未对金银花根际土壤的细菌数量产生较大影响。与CK处理相比,CLP、C-P和CPG处理的细菌数量显著增加了14.81%、13.07%和26.32%,这说明添加CLP对根际土壤中的细菌繁殖具有积极的作用。

表 3 PGPR 的应用方式对金银花根际土壤细菌数量和多样性指数的影响

Tab.3 Effect of different application methods of PGPR on bacteria count and diversity indexes in *Lonicera japonica* Thunb. rhizosphere soil

处理	细菌数量/(CFU·g <sup>-1</sup> )	Shannon 指数	Simpson 指数	McIntosh 指数
PGPR	(1.08 ± 0.08) × 10 <sup>7c</sup>	2.71 ± 0.15 <sup>b</sup>	0.87 ± 0.02 <sup>b</sup>	5.34 ± 0.35 <sup>a</sup>
CLP	(1.26 ± 0.08) × 10 <sup>7b</sup>	3.41 ± 0.20 <sup>a</sup>	0.76 ± 0.04 <sup>c</sup>	4.99 ± 0.44 <sup>b</sup>
C-P	(1.24 ± 0.10) × 10 <sup>7b</sup>	3.45 ± 0.17 <sup>a</sup>	0.77 ± 0.06 <sup>c</sup>	4.68 ± 0.27 <sup>bc</sup>
CPG	(1.38 ± 0.09) × 10 <sup>7a</sup>	2.78 ± 0.14 <sup>b</sup>	0.96 ± 0.07 <sup>a</sup>	4.13 ± 0.30 <sup>c</sup>
CK	(1.09 ± 0.09) × 10 <sup>7c</sup>	2.72 ± 0.09 <sup>b</sup>	0.88 ± 0.01 <sup>b</sup>	5.51 ± 0.36 <sup>a</sup>

Shannon 指数主要表明物种的丰富度,Simpson 指数反映群落内最常见物种的优势度<sup>[13]</sup>,McIntosh 指数反映群落内物种的均匀性<sup>[28]</sup>。3种不同PGPR应用方式中,C-P处理的Shannon指数分别比PGPR和CPG显著提高了27.31%和24.10%,而CK、PGPR和CPG处理之间差异不显著。所有处理中,CPG处理的McIntosh指数最低,而PGPR处理和CK处理最高。表3还可以看出,直接接种*B. subtilis* DZ1对金银花根际土壤的Simpson指数

影响较小,但CLP-PGPR凝胶处理的Simpson指数显著增加,与PGPR和C-P处理相比,CPG处理的Simpson指数显著提高10.34%和24.67%。以上分析表明,直接接种*B. subtilis* DZ1对金银花根际土壤的微生物功能多样性影响较小,但以CLP-PGPR凝胶方式施用,降低了微生物的多样性和均匀性,提高了微生物的优势度。

#### 2.5 生物量积累及生理特征

从表4可以看出,CLP、C-P和CPG处理的造

林成活率分别比 CK 提高 12.06%、12.62% 和 15.22%，加入 CLP 显著提高了金银花的造林成活率，但接种 PGPR 对造林成活率影响不显著。直接接种 PGPR 对金银花干物质积累影响较小，但 PGPR 同 CLP 混合使用却促进了金银花干物质的积累。3 种 PGPR 接种方式中，CPG 处理的地上部干质量比 PGPR 和 C-P 处理分别提高 26.11% 和 13.79%，地下部干质量提高 32.33% 和 11.57%，差异显著。

表 4 PGPR 的应用方式对金银花造林成活率、干物质积累和叶片生理特性的影响

Tab.4 Effect of different application methods of PGPR on survival rate, dry matter accumulation and leaf physiological property of *Lonicera japonica* Thunb.

处理	成活率/%	地上部干质量/(g·株 <sup>-1</sup> )	地下部干质量/(g·株 <sup>-1</sup> )	叶片相对含水率/%	叶片相对电导率/%
PGPR	79.30 ± 5.20 <sup>b</sup>	8.77 ± 0.35 <sup>c</sup>	5.32 ± 0.16 <sup>c</sup>	66.18 ± 1.26 <sup>bc</sup>	57.06 ± 0.92 <sup>a</sup>
CLP	89.92 ± 3.94 <sup>a</sup>	10.01 ± 0.62 <sup>b</sup>	5.98 ± 0.22 <sup>bc</sup>	70.32 ± 1.73 <sup>b</sup>	52.39 ± 2.14 <sup>b</sup>
C-P	90.37 ± 5.24 <sup>a</sup>	9.72 ± 0.59 <sup>b</sup>	6.31 ± 0.30 <sup>b</sup>	69.37 ± 0.99 <sup>b</sup>	50.64 ± 1.06 <sup>b</sup>
CPG	92.45 ± 4.53 <sup>a</sup>	11.06 ± 0.71 <sup>a</sup>	7.04 ± 0.24 <sup>a</sup>	76.54 ± 1.72 <sup>a</sup>	45.73 ± 1.55 <sup>c</sup>
CK	80.24 ± 3.59 <sup>b</sup>	8.42 ± 0.34 <sup>c</sup>	5.36 ± 0.28 <sup>c</sup>	62.17 ± 1.69 <sup>c</sup>	58.38 ± 1.21 <sup>a</sup>

### 3 讨论

#### 3.1 PGPR 在 CLP 中的存活能力及根际环境中的细菌数量

提高 PGPR 在干旱环境中的定殖能力是 PGPR 发挥功效的关键。本研究结果发现，培养初期 CLP 中的 *B. subtilis* DZ1 有效活菌数均显著下降，这是微生物并不能立即适应新环境所致。随着培养时间的延长，PGPR 可以在 CLP 中稳定定殖，与清水稀释 *B. subtilis* DZ1 相比，营养液稀释处理的有效活菌数提高了 19.45% ~ 664.05%，这说明 PGPR 在 CLP 稳定定殖的前提条件是保证一定的营养。CLP 具有高分子三维网状结构，其功能是通过物理过程体现而非化学作用，吸水后易使土壤团粒化，提高土壤透气性，改善土壤理化性质<sup>[13]</sup>。从这一点分析，在保证微生物生长繁殖所需养分的前提下，PGPR 便可在 CLP 中长期稳定的定殖。SANDHYA 等<sup>[29]</sup> 和 ARZANESH 等<sup>[30]</sup> 利用平板计数研究发现，与正常供水的对照相比，一定强度的干旱可使细菌数量降低 40% 以上，这说明干旱环境下接种的大部分微生物并不能定殖在植物的根际环境中<sup>[9,16]</sup>，这直接限制了其功能的发挥。将 PGPR 和 CLP 相结合制成凝胶形式，提高了 PGPR 的有效性，这也是 CPG 处理显著促进金银花生长重要原因之一。

细菌约占土壤微生物总数的 70% ~ 90%，它们不仅参与土壤养分循环，而且对整个土壤生态系统起着重要的作用。文献[31]报道，施用微生物菌剂可提高土壤中细菌的数量。本研究中的金银花造林实验中，直接接种 PGPR 对根际土壤中的细菌数

此外，CPG 处理的金银花叶片相对含水率显著高于其他处理，分别比其他 4 个处理显著提高 15.64%、8.85%、10.34%、23.11%。虽然 CLP 和 C-P 处理之间叶片相对电导率差异不显著，但比 CPG 处理分别显著增加了 14.56% 和 10.74%。由此可见，虽然直接接种 PGPR 对金银花的造林成活率影响较小，但 CLP-PGPR 凝胶却明显促进了金银花的生长，且一定程度上提高了金银花的干旱适应能力。

量影响较小，其原因可能是本研究选择的 *B. subtilis* DZ1 筛选于冬枣的根际土壤，该菌株在相对干旱的环境中并不能长期稳定的定殖，因此，直接接种 *B. subtilis* DZ1 对并未对土壤中的细菌数量产生大的影响。但以凝胶的形式接种 PGPR 显著提高了根际土壤的细菌数量，这从另外一个角度证实了 *B. subtilis* DZ1 可在 CLP 中存活，并对植物根际环境中细菌数量产量影响。

#### 3.2 微生物量及微生物活性

土壤微生物呼吸是指有机质潜在的矿化速率，可反映土壤微生物的总体活性<sup>[13]</sup>。本研究认为，无论是否接种 PGPR，施用 CLP 可显著提高土壤微生物呼吸速率和微生物量碳含量。其原因可能是 CLP 可提高土壤含水率，增加了土壤毛管孔隙度，改善了土壤物理性状<sup>[32]</sup>，更好的生存环境刺激土壤微生物的大量繁殖，导致微生物呼吸速率提高和微生物量碳含量增加。在 3 种 PGPR 接种方式中，直接接种 PGPR 对根系呼吸速率影响较小，而 CLP-PGPR 凝胶在提高微生物量碳含量的同时促进了微生物呼吸速率，可能是 CLP-PGPR 凝胶处理中的有效活菌数量大、微生物活性较高引起的，CPG 处理细菌数量显著高于其他处理也证实了这一点。此外，根系分泌物含量的增加为微生物的生长繁殖提供了大量的营养物质来源。微生物代谢熵将微生物量的大小与微生物的生物活性、功能有机地联系起来，土壤微生物呼吸速率高，但微生物呼吸消耗的碳占土壤微生物总碳的比例相对较小最为重要，对维持土壤的优良性状和可持续利用潜力有益<sup>[25]</sup>。本研究认为，加入 CLP 降低了根际土壤的代谢熵，虽然在 CLP 的基

础上再接种 PGPR 对代谢熵的影响较小,但 CLP - PGPR 凝胶显著降低了微生物的代谢熵。代谢熵较低说明微生物呼吸所消耗碳的比例小,而用于建造微生物细胞碳的比例相对增大,土壤中微生物对碳的利用效率较高<sup>[33]</sup>。分析其原因一方面可能是虽然各个处理的微生物呼吸速率和微生物生物量呈一致的变化规律,但 CLP - PGPR 凝胶处理微生物量碳含量升高得更快,故降低了代谢熵;另一方面可能是 CLP - PGPR 凝胶中的 *B. subtilis* DZ1 能够快速繁殖,微生物活性提高,从而提高对碳源的利用率。

### 3.3 微生物功能多样性

Shannon 指数主要表明物种的丰富度, Simpson 指数常用来反映群落中最常见的物种的优势度<sup>[13,26]</sup>;而 McIntosh 指数反映了群落内物种的均匀度<sup>[13]</sup>。本研究中施用 CLP 显著提高了 Shannon 指数和 McIntosh 指数,而降低了 Simpson 指数,这与井大炜等在杨树研究中的结果一致<sup>[13]</sup>。此外,本研究还发现,虽然直接接种 *B. subtilis* DZ1 对根际土壤微生物的群落结构影响较小,但 CLP - PGPR 凝胶处理却显著提高了 Simpson 指数,而降低了根际土壤的 Shannon 指数和 McIntosh 指数。刘方春等<sup>[2]</sup>对冬枣的研究结果认为,土壤中施用微生物肥料可提高根际土壤的丰富度和均匀度,这与本研究的结果相反。其原因可能在于:①本研究是在干旱瘠薄山地中进行的,干旱环境中一些土著微生物数量大幅降低。②通过 CLP - PGPR 凝胶的接种的微生物,由于有充足的养分和水分供应,再加上 CLP 本身的物理性状,CLP - PGPR 凝胶中的微生物在一定时间内大量繁殖,能够成为干旱土壤中的优势微生物。③CLP - PGPR 凝胶能显著提高根系分泌物含量,而根系分泌物是根际土壤微生物的主要碳源与能源,进而影响微生物的代谢,并直接或间接影响根际土壤微生物多样性。有研究表明,干旱胁迫会导致根际土壤微生物群落结构多样性大幅降低<sup>[17]</sup>,增加植物所受的干旱胁迫强度。本研究中 CLP - PGPR 凝胶显著提高了根际土壤的微生物功能多样性,这对金银花生长和增强植物的干旱耐受性显然是有益的。

前人研究认为,土壤微生物多样性的提高对土壤根际区域微生态环境调节有益,可促进植物生长<sup>[2,13]</sup>。但本研究发现,同 CLP 和 C - P 处理相比,虽然 CPG 处理对金银花的造林成活率没有表现出明显的优势,但却显著促进了金银花干物质的积累,这可能与本研究所处的干旱环境有关。本研究选用的 *B. subtilis* DZ1 可产细胞分裂素,文献[34 - 35]

证实,产细胞分裂素的 PGPR 可提高植物的干旱适应性。本研究发现,CLP - PGPR 凝胶在促进植物干物质积累的同时提高了金银花的干旱耐受性(提高叶片相对含水量,降低叶片相对电导率),这说明 CPG 中的 *B. subtilis* DZ1 发挥了关键作用,这也从另外一个角度证明了 CLP - PGPR 凝胶中 *B. subtilis* DZ1 能够在金银花根际土壤中成功定殖,并且成为优势菌落促进植物生长,提高植物的干旱适应性。但 PGPR 和 C - P 处理对植物生长和金银花的干旱适应能力影响较小,进一步印证了 PGPR 的接种方式是在干旱环境中能否发挥功效的关键因素。

## 4 结论

(1)将 *B. subtilis* DZ1 用清水和豆芽汁营养液稀释后吸附到 CLP 中,培养期间豆芽汁营养液稀释处理的有效活菌数显著提高 19.45% ~ 664.05%,且培养后期 *B. subtilis* DZ1 可在 CLP 中稳定定殖。CLP 可以作为 PGPR 的吸附载体使用,但连同微生物生长繁殖所需的营养液一起吸附是关键因素。

(2)CLP - PGPR 凝胶处理显著提高了根际土壤中根系分泌物含微生物量碳含量,并明显增强了土壤微生物呼吸作用,其微生物呼吸速率较直接接种 PGPR、施用 CLP、施用 CLP 的同时接种 PGPR 和 CK 处理分别高出 18.02%、9.93%、8.56% 和 18.91%;同时,CLP - PGPR 凝胶还降低了代谢熵,其下降幅度分别为 12.74%、7.62%、8.02% 和 14.02%;直接接种 PGPR 对金银花根际土壤细菌数量和微生物多样性影响较小,但同其他处理相比,CLP - PGPR 凝胶处理可培养细菌数量显著提高 11.72% ~ 28.32%,此外,CLP - PGPR 凝胶降低微生物的多样性和均匀性的同时增加了微生物的优势度。

(3)无论是何种接种方式,PGPR 对金银花的造林成活率影响不显著;虽然直接接种 PGPR 对植物生长影响较小,但 CLP - PGPR 凝胶处理的地上干物质质量显著增加 10.49% ~ 31.35%,地下干物质质量显著增加 11.57% ~ 32.33%,同时一定程度上提高了金银花的叶片相对含水率,降低了叶片相对电导率,这对增强植物的干旱逆境适应能力具有重要意义。

(4)在保证一定营养基础的条件下,CLP 可以作为 PGPR 的吸附载体使用;即使 PGPR 本身不适应干旱环境,但以 CLP - PGPR 凝胶方式接种同样能够有效改善根际区域的微生态环境,提高根际微生物的活性,促进植物生长的同时提高植物的干旱逆境适应能力。

## 参 考 文 献

- 1 OSCAR M, ANALIA L, VIRGINIA L. A new PGPR co-inoculated with *Bradyrhizobium japonicum* enhances soybean nodulation [J]. *Microbiological Research*, 2014, 169(7): 609 – 615.
- 2 刘方春,邢尚军,马海林,等. 根际促生细菌 (PGPR)对冬枣根际土壤微生物数量及细菌多样性影响[J]. *林业科学*,2013, 49(8):75 – 80.  
LIU Fangchun, XING Shangjun, MA Hailin, et al. Effect of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on the microorganism population and bacterial diversity in *Ziziphus jujuba* rhizosphere soil[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(8): 75 – 80. (in Chinese)
- 3 ABBASI M K, SHARIF S, KAZMI M, et al. Isolation of plant growth promoting rhizobacteria from wheat rhizosphere and their effect on improving growth, yield and nutrient uptake of plants[J]. *Plant Biosystems*, 2011, 145(1): 159 – 168.
- 4 PIRLAK L, ESITKEN A, DONMEZ M F. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) increase yield, growth and nutrition of strawberry under high-calcareous soil conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2014, 37(5): 990 – 1001.
- 5 LIU F, XING S, MA H, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria affect the growth and nutrient uptake of *Fraxinus americana* container seedlings[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, 97(10): 4617 – 4625.
- 6 YANG J, KLOPPER J W, RYU C M. Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress[J]. *Trends in Plant Science*, 2009, 14(1): 1 – 4.
- 7 XIE Xianhong, LIANG Shunlin, YAO Yunjun, et al. Detection and attribution of changes in hydrological cycle over the Three-North region of China: climate change versus afforestation effect[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2015, 213:74 – 87.
- 8 LIU X, LINDEMAN W C, WHITFORD W G, et al. Microbial diversity and activity of disturbed soil in the northern Chihuahuan desert[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(3): 243 – 249.
- 9 MAYAKA S, TIROSH T, GLICK B R. Plant growth-promoting bacteria that confer resistance to water stress in tomatoes and peppers[J]. *Plant Science*, 2004, 166(2):525 – 530.
- 10 赵智,唐泽军,宋满刚,等. 粉煤灰和聚丙烯酰胺对沙质土壤中玉米生长的影响[J]. *农业机械学报*,2013,44(6):136 – 142.  
ZHAO Zhi, TANG Zejun, SONG Man'gang, et al. Effect of sandy soils amendment with fly ash and polyacrylamide on crop growth[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(6): 136 – 142. (in Chinese)
- 11 邢睿,黄建国,晋艳,等. 交联聚丙烯酰胺和 AM 真菌对玉米苗生长、养分吸收和生理指标的影响[J]. *水土保持学报*, 2011,25(3):147 – 150.  
XING Rui, HUANG Jian'guo, JIN Yan, et al. Effects of polyacrylamide on water use efficiency and output value of different crops in arid and semi-arid regions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 147 – 150. (in Chinese)
- 12 LIU F, MA H, XING S, et al. Effects of super-absorbent polymer on dry matter accumulation and nutrient uptake of *Pinus pinaster* container seedlings[J]. *Journal of Forest Research*, 2013, 18(3): 220 – 227.
- 13 井大炜,邢尚军,刘方春,等. 保水剂施用方式对侧柏根际微生态环境的影响[J]. *农业机械学报*,2016,47(5):146 – 154.  
JING Dawei, XING Shangjun, LIU Fangchun, et al. Effect of different application methods of super absorbent polymers on enzyme activities and microbial functional diversity in rhizosphere soil of *Platycladus orientalis* [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5): 146 – 154. (in Chinese)
- 14 CHAUDHARY D R, GAUTAM R K, YOUSUF B, et al. Nutrients, microbial community structure and functional gene abundance of rhizosphere and bulk soils of halophytes[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 91: 16 – 26.
- 15 MIMMO T, DEL BUONO D, TERZANO R, et al. Rhizospheric organic compounds in the soil – microorganism – plant system: their role in iron availability[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(5): 629 – 642.
- 16 FARRAR J, HAWES M, JONES D, et al. How roots control the flux of carbon to the rhizosphere[J]. *Ecology* 2003, 84(4): 827 – 837.
- 17 刘方春,邢尚军,马海林,等. 持续干旱对樱桃根际土壤细菌数量及结构多样性影响[J]. *生态学报*,2014,34(3):642 – 649.  
LIU Fangchun, XING Shangjun, MA Hailin, et al. Effects of continuous drought on soil bacteria populations and community diversity in sweet cherry rhizosphere[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(3): 642 – 649. (in Chinese)
- 18 LU S Y, GUO Z F, PENG X X. Effects of ABA and S – 3307 on drought resistance and antioxidative enzyme activity of turfgrass [J]. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2003, 78(5): 663 – 666.
- 19 WAN X Q, TAN J L, LU S Y, et al. Increased tolerance to oxidative stress in transgenic tobacco expressing a wheat oxalate oxidase gene via induction of antioxidant enzymes is mediated by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>[J]. *Physiologia Plantarum*, 2009, 136(1): 30 – 44.
- 20 LIU F, XING S, MA H, et al. Cytokinin-producing, plant growth-promoting rhizobacteria that confer resistance to drought stress in *Platycladus orientalis* container seedlings[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, 97(20): 9155 – 9164.
- 21 涂书新,吴佳. 植物根系分泌物研究方法评述[J]. *生态环境学报*,2010,19(9):2493 – 2500.  
TU Shuxin, WU Jia. A review on research methods of root exudates[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(9):

- 2493 - 2500. (in Chinese)
- 22 吴林坤,林向民,林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望[J]. 植物生态学报,2014, 38(3):298 - 310.  
WU Linkun, LIN Xiangmin, LIN Wenxiong. Advances and perspective in research on plant - soil - microbe interactions mediated by root exudates[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38 (3): 298 - 310. (in Chinese)
- 23 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- 24 徐永刚,宇万太,马强,等. 长期不同施肥制度对潮棕壤微生物生物量碳、氮及细菌群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2010,21(8):2078 - 2085.  
XU Yonggang, YU Wantai, MA Qiang, et al. Effects of long-term fertilizations on microbial biomass C and N and bacterial community[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(8): 2078 - 2085. (in Chinese)
- 25 ZHONG W H, CAI Z C. Long-term effects of inorganic fertilizers on microbial biomass and community functional diversity in a paddy soil derived from quaternary red clay[J]. Applied Soil Ecology, 2007, 36(2 - 3): 84 - 91.
- 26 CARVALHAIS L C, DENNIS P G, FEDOSEYENKO D, et al. Root exudation of sugars, amino acids, and organic acids by maize as affected by nitrogen, phosphorus, potassium, and iron deficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2011, 174(1): 3 - 11
- 27 立天宇,康峰峰,韩海荣,等. 冀北辽河源自然保护区土壤微生物碳代谢对阔叶林叶凋落物组成的响应[J]. 应用生态学报,2015,26(3):715 - 722.  
LI Tianyu, KANG Fengfeng, HAN Hairong, et al. Responses of soil microbial carbon metabolism to the leaf litter composition in Liaohe River Nature Reserve of northern Hebei Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 715 - 722. (in Chinese)
- 28 宋蒙亚,李忠佩,刘明,等. 不同有机物料组合对土壤养分和生化性状的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(17):3594 - 3603.  
SONG Mengya, LI Zhongpei, LIU Ming, et al. Effects of mixtures of different organic materials on soil nutrient content and soil biochemical characteristics[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(17): 3594 - 3603. (in Chinese)
- 29 SANDHYA V, ALI S K, GROVER M, et al. Effect of plant growth promoting *Pseudomonas* spp. on compatible solutes, antioxidant status and plant growth of maize under drought stress[J]. Plant Growth Regulation, 2010, 62(1): 21 - 30.
- 30 ARZANESH M H, ALIKHANI H A, KHAVAZI K, et al. Wheat (*Triticum aestivum* L.) growth enhancement by *Azospirillum* sp. under drought stress[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2011, 27(2):197 - 205.
- 31 GIRVAN M S, CAMPBELL C D, KILLHAM K, et al. Bacterial diversity promotes community stability and functional resilience after perturbation[J]. Environmental Microbiology, 2005, 7(3): 301 - 313.
- 32 郭金瑞,宋振伟,彭宪现,等. 东北黑土区长期不同种植模式下土壤碳氮特征评价[J]. 农业工程学报,2015,31(6):178 - 185.  
GUO Jinrui, Song Zhenwei, Peng Xianxian, et al. Evaluation in soil carbon and nitrogen characteristics under long-term cropping regimes in black soil region of Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 178 - 185. (in Chinese)
- 33 李华,贺洪军,李腾飞,等. 不同地下滴灌制度下黄瓜根际微生物活性及功能多样性[J]. 应用生态学报,2014,25(8): 2349 - 2354.  
LI Hua, HE Hongjun, LI Tengfei, et al. Microbial activity and functional diversity in rhizosphere of cucumber under different subsurface drip irrigation scheduling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(8):2349 - 2354. (in Chinese)
- 34 LIU F, XING S, MA H, et al. Cytokinin-producing, plant growth-promoting rhizobacteria that confer resistance to drought stress in *Platycladus orientalis* container seedlings[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(20): 9155 - 9164.
- 35 刘方春,马海林,马丙尧,等. 干旱环境下接种根际促生细菌对核桃苗光合特性的影响[J]. 林业科学,2015, 51(7):84 - 90.  
LIU Fangchun, MA Hailin, MA Bingyao, et al. Effect of plant growth-promoting rhizobacteria on photosynthetic characteristics in walnut seedlings under drought stress[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(7): 84 - 90. (in Chinese)