

根际芽孢杆菌对水稻根系的促生效应

徐伟慧,刘泽平,符春敏,王志刚\*  
(齐齐哈尔大学 生命科学与农林学院,黑龙江 齐齐哈尔 161006)

**摘要:** 为研究不同根际芽孢杆菌及其复合菌剂对水稻根系的促生效应,采用盆栽试验筛出促生效果好的促生菌剂,研究其对水稻根系生长的影响。结果表明,经解磷菌(*Bacillus pumilus* sp., J)、溶磷菌(*Bacillus megaterium* sp., R)、解钾菌(*Bacillus subtilis* sp., K)菌悬液处理后,水稻幼苗胚根长分别比未添加菌液处理提高161.2%、157.9%、110.5%;在未灭菌的土壤中,解钾菌(K, LZP06)菌悬液处理对水稻根系生长有较好的促生效应,水稻幼苗根干质量比清水对照提高了65.3%;在灭菌土壤中,解钾菌+解磷菌[(K+J)<sub>s</sub>]、解钾菌+溶磷菌+解磷菌[(K+R+J)<sub>s</sub>]菌悬液处理对水稻有较好的促生效应,水稻幼苗根干质量比灭菌水对照分别显著提高57.8%、69.2%。综上,K(LZP06)菌悬液、复合菌悬液(K+J)<sub>s</sub>和(K+R+J)<sub>s</sub>对水稻促生效果较好,可作为微生物肥料生产的候选菌剂。

**关键词:** 根际促生菌;芽孢杆菌;水稻根系;促生;微生物肥料

**中图分类号:** S144;S511      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-3268(2018)04-0059-05

Promoting Effect of *Bacillus* Rhizobacteria on Rice Root

XU Weihui, LIU Zeping, FU Chunmin, WANG Zhigang\*  
(College of Life Science and Agroforestry, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

**Abstract:** To explore the promoting effect of different *Bacillus* rhizobacteria and their complex bacteria on rice root, in this study, better promoting strains were screened by germination experiment, and effects of single bacterium and complex bacteria on rice root were evaluated by pot experiment. Results showed that *Bacillus pumilus* sp. (J), *Bacillus megaterium* sp. (R) and *Bacillus subtilis* sp. (K) bacterium suspension significantly increased radical length of rice seedlings by 161.2%, 157.9%, 110.5% compared to control without bacterium suspension, respectively. In unsterilized soil, the promoting effect of K (LZP06) on rice root was better than other treatments, and root dry weights of rice seedlings were increased by 65.3% compared to control. The promoting effects of (K+J)<sub>s</sub> and (K+R+J)<sub>s</sub> on rice root were better than other treatments in sterilized soil, and root dry weights of rice seedlings were increased by 57.8%, 69.2% compared to control, respectively. This study indicates that K (LZP06) bacterium suspension, complex bacteria (K+J)<sub>s</sub> and (K+R+J)<sub>s</sub> suspension can significantly promote the growth of rice root, and they can be used as candidate bacteria agents in microbial fertilizer production.

**Key words:** Plant growth-promoting rhizobacteria; *Bacillus*; Rice root; Promoting effect; Microbial fertilizer

近年来,由于农业生产中化学肥料的大量施用,造成有机肥使用率下降、土壤养分比例失调、土壤退化、农作物品质下降等一系列问题<sup>[1-2]</sup>。微生物肥料因其促进作物生长、拮抗土传病原菌、诱导植物抗

收稿日期:2017-12-06  
基金项目:黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2015092);齐齐哈尔市科学技术计划项目(SFGG-201576)  
作者简介:徐伟慧(1979-),女,内蒙古赤峰人,副教授,博士,主要从事蔬菜生理生态和土壤微生物研究。  
E-mail: xwh800206@163.com  
\* 通讯作者:王志刚(1980-),男,内蒙古赤峰人,教授,博士,主要从事环境微生物研究。E-mail: wzg1980830@sina.com

性、绿色安全等特点受到广泛关注,逐渐成为现代农业生产中重要的肥料来源<sup>[3-4]</sup>。植物根际蕴藏着丰富的微生物资源,合理开发与利用根际微生物资源是生产微生物肥料的有效途径之一。植物根际促生菌(Plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR)是一种附生于植物根系或栖于根际土壤的有益菌,可促进植物生长及营养元素的吸收和利用,对有害微生物有较强的拮抗作用,近年来逐渐成为国内外学者研究的热点<sup>[5]</sup>。目前研究的 PGPR 主要为荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)和芽孢杆菌属(*Bacillus* sp.)。芽孢杆菌作为一种重要的植物根际促生菌,具有菌体繁殖系数高、效果好、制剂货架期长、成本低、抗逆性强等特点,是很好的生物肥料菌种之一<sup>[6]</sup>。目前,关于芽孢杆菌对作物的促生效应报道较多。杨晓云等<sup>[7]</sup>证实,解淀粉芽孢杆菌 B1619 对番茄生长有显著的促生效应;万兵兵等<sup>[8]</sup>发现,接种弯曲芽孢杆菌(*Bacillus flexus*)能显著提高烟草根总长、根总表面积、根体积和根尖总数;底施枯草芽孢杆菌 AMCC100001 能促进棉花生长、提高棉花产量、改善棉花品质<sup>[9]</sup>。但目前研究多集中在某种芽孢杆菌对单一作物的促生效应,有关不同芽孢杆菌及其复合菌剂对同一作物促生效应的研究较少<sup>[10-11]</sup>。鉴于此,以齐齐哈尔大学生命科学与农林学院微生物生态实验室筛选的不同溶磷菌、解磷菌和解钾菌为试材,筛选出促生效果好的菌株,并研究其单菌剂及复合菌剂对水稻根系的促生效应,以期为微生物肥料的开发与利用提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试土壤采自齐齐哈尔市嫩江边,土壤养分含量为:有机质 20.35 g/kg、碱解氮 27.96 mg/kg、有效磷 26.52 mg/kg、速效钾 79.00 mg/kg,土壤 pH 值 6.49,EC 值 0.76 mS/cm。

供试水稻品种为龙粳 31 号,由佳木斯水稻研究所提供。供试菌株由齐齐哈尔大学生命科学与农林学院微生物生态实验室从水稻根际筛选获得,菌株类型及编号见表 1。

1.2 试验设计

1.2.1 浸种试验 用 0.1% 升汞将水稻种子消毒 5 min,无菌水清洗后用 LB 培养基培养,分别用 9 种供试菌株的菌悬液( $OD_{600} = 0.5$ )浸种 24 h,将水稻种子转至事先湿热灭菌且铺有 2 层滤纸的培养皿(直径为 9 cm)中,每皿放 20 粒种子,以相同浓度的 LB 培养基浸种为对照(CK),每个处理重复 3 次。

在温度 25 ℃、相对湿度 60% 气候箱中暗培养,种子萌发后,以 18 h/6 h 光暗周期进行培养,试验期间每天向培养皿中加入 5 mL 无菌水,7 d 后测量水稻种子胚根长、胚芽长、苗鲜质量。

表 1 供试菌株类型及编号

类型	属分类	菌株编号
解磷菌(有机磷降解菌)	<i>Bacillus pumilus</i> sp.	LZP02
	<i>Bacillus huizhouensis</i> sp.	LZP05
	<i>Bacillus aryabhattai</i> sp.	LZP08
溶磷菌(无机磷溶解菌)	<i>Bacillus megaterium</i> sp.	LZP03
	<i>Bacillus oryzae</i> corticis sp.	LZP04
	<i>Bacillus ginsengisoli</i> sp.	LZP07
解钾菌	<i>Bacillus aryabhattai</i> sp.	LZP01
	<i>Bacillus subtilis</i> sp.	LZP06
	<i>Bacillus licheniformis</i> sp.	LZP09

1.2.2 促生试验 水稻种子用 0.1% 升汞消毒 5 min,无菌水清洗后 30 ℃ 无菌催芽,待水稻胚根长至 0.5 cm 时分别播种到含灭菌土和非灭菌土的营养钵(10 cm × 10 cm,装有 223 g 土)中,每钵 5 株,分别浇灌 3 种单菌及其复合菌悬液 30 mL( $OD_{600} = 0.5$ ),处理方式见表 2,非灭菌土壤以浇灌无菌 LB 培养液为对照,试验期间浇清水(CK1);灭菌土壤以浇灌无菌 LB 培养液为对照,试验期间浇无菌水(CK2);幼苗置于人工气候箱中培养(30 ℃、光照 12 h,18 ℃、黑暗 12 h,相对湿度 60%),试验期间分别浇灌清水(非灭菌土壤)和无菌水(灭菌土壤),每个处理重复 10 次。

表 2 不同处理设置

处理	土壤类型	处理方式
CK1	非灭菌土	浇 30 mL 无菌 LB 培养液
J (LZP02)	非灭菌土	浇 30 mL J 菌悬液
K (LZP06)	非灭菌土	浇 30 mL K 菌悬液
R (LZP03)	非灭菌土	浇 30 mL R 菌悬液
K + J	非灭菌土	K 和 J 菌悬液各浇 15 mL
K + R	非灭菌土	K 和 R 菌悬液各浇 15 mL
R + J	非灭菌土	R 和 J 菌悬液各浇 15 mL
K + R + J	非灭菌土	K、R 和 J 菌悬液各浇 10 mL
CK2	灭菌土	浇 30 mL 无菌 LB 培养液
J <sub>s</sub> (LZP02)	灭菌土	浇 30 mL J 菌悬液
K <sub>s</sub> (LZP06)	灭菌土	浇 30 mL K 菌悬液
R <sub>s</sub> (LZP03)	灭菌土	浇 30 mL R 菌悬液
(K + J) <sub>s</sub>	灭菌土	K 和 J 菌悬液各浇 15 mL
(K + R) <sub>s</sub>	灭菌土	K 和 R 菌悬液各浇 15 mL
(R + J) <sub>s</sub>	灭菌土	R 和 J 菌悬液各浇 15 mL
(K + R + J) <sub>s</sub>	灭菌土	K、R 和 J 菌悬液各浇 10 mL

注:K、R、J 分别表示解钾菌、溶磷菌、解磷菌。

1.3 指标测定

用根系分析仪(Scan Maker i800 plus)扫描获得根系图像,根系分析软件(Scan Wizard EZ)分析根

系长度、根直径、根体积、根表面积、根尖数等<sup>[12]</sup>,并采用称质量法测定根干质量。

1.4 数据处理

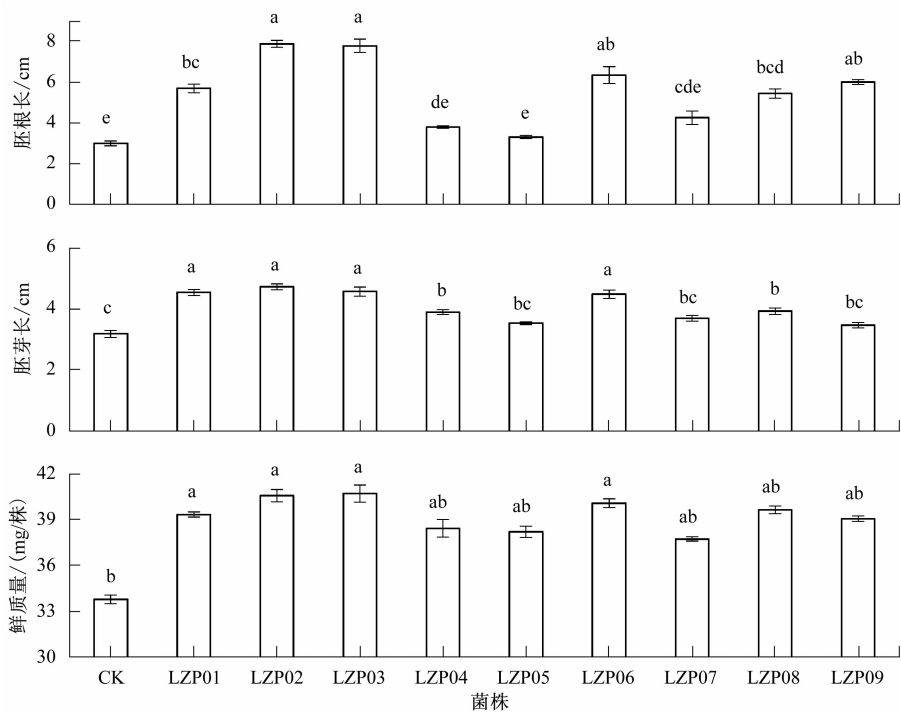
采用 Excel 2007 进行数据整理,采用 SPSS 19.0 进行数据处理及方差分析 (ANOVA),采用 Origin 9.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同菌悬液对水稻种子萌发的影响

从图 1 可以看出,浸种试验中,与 CK 相比,

LZP01、LZP02、LZP03、LZP06、LZP08、LZP09 菌悬液处理的水稻胚根长分别显著提高 89.1%、161.2%、157.9%、110.5%、80.7%、99.3%;LZP01、LZP02、LZP03、LZP04、LZP06、LZP08 菌悬液处理的水稻胚芽长分别显著提高 42.6%、48.4%、43.5%、22.4%、40.8%、23.3%;LZP01、LZP02、LZP03、LZP06 菌悬液处理的水稻苗鲜质量显著提高,其他菌悬液处理无显著差异。综上,LZP02、LZP03、LZP06 菌株处理的促生效果优于其他菌株,故选择此 3 个菌株进行盆栽试验。



不同字母表示不同处理间差异显著 (P<0.05)  
图 1 菌悬液对水稻种子萌发的影响

2.2 3 种菌剂及其复合菌剂对水稻根系生长的影响

由表 3 可知,与 CK1 相比,J、K、K+R+J 处理的水稻幼苗根长分别显著提高 17.8%、55.9%、30.0%;K 处理的水稻根表面积和根尖数分别显著提高 40.2% 和 78.3%;3 种菌剂及其复合菌剂处理对水

稻根体积无显著影响,但显著降低了水稻根平均直径(K+R 处理除外);3 种单菌及其复合菌剂处理均提高了水稻幼苗根干质量,以 K 处理提高幅度最大,比对照提高 65.3%。综合分析,在未灭菌的土壤中,K 处理对水稻的促生效果最佳。

表 3 未灭菌土壤中 3 种菌剂及其复合菌剂对水稻幼苗根系的影响

处理	根长/cm	根表面积/cm <sup>2</sup>	根体积/cm <sup>3</sup>	根平均直径/mm	根尖数/个	根干质量/(mg/株)
CK1	84.19 ± 1.98cd	9.70 ± 0.47bc	0.17 ± 0.01ab	0.46 ± 0.06a	46.00 ± 4.00bc	48.10 ± 7.67d
J (LZP02)	99.17 ± 6.61ab	11.14 ± 2.26b	0.22 ± 0.00a	0.36 ± 0.06bc	52.00 ± 9.00bc	56.75 ± 0.25c
K (LZP06)	131.24 ± 19.90a	13.60 ± 1.89a	0.22 ± 0.02a	0.32 ± 0.01c	82.00 ± 13.00a	79.50 ± 0.80a
R (LZP03)	87.66 ± 5.60bc	7.83 ± 0.26c	0.14 ± 0.04b	0.33 ± 0.03c	44.00 ± 5.00c	72.30 ± 1.2ab
K + J	81.64 ± 0.57bc	8.29 ± 0.36c	0.16 ± 0.04ab	0.33 ± 0.06c	45.00 ± 10.00bc	56.43 ± 7.35c
K + R	80.79 ± 2.56bc	7.81 ± 0.30c	0.17 ± 0.03ab	0.43 ± 0.05ab	46.00 ± 8.00bc	57.00 ± 6.52c
R + J	95.72 ± 5.96bc	10.00 ± 0.57bc	0.16 ± 0.04ab	0.38 ± 0.02bc	59.00 ± 2.00b	64.80 ± 2.10bc
K + R + J	109.46 ± 13.45ab	11.10 ± 1.25b	0.21 ± 0.06ab	0.35 ± 0.01c	48.00 ± 4.00bc	62.95 ± 0.35c

注:同列不同字母代表不同处理间差异显著 (P<0.05),下同。

从表 4 可知,与 CK2 相比,(K + J)<sub>s</sub>、(K + R + J)<sub>s</sub> 处理的水稻根长分别显著增长 188.0%、138.8%;R<sub>s</sub>、(K + J)<sub>s</sub>、(K + R + J)<sub>s</sub> 处理的水稻根表面积和根体积显著增加;(K + J)<sub>s</sub>、(K + R + J)<sub>s</sub> 处理的水稻根平均直径降低;J<sub>s</sub>、R<sub>s</sub>、(K + J)<sub>s</sub>、(K + R + J)<sub>s</sub> 处理的水稻根尖数和根干质量显著提高,以 (K + J)<sub>s</sub>、(K + R + J)<sub>s</sub> 处理的水稻幼苗根干质量提高幅度最大,分别显著提高 57.8%、69.2%。综合分析,在灭菌土壤中,(K + J)<sub>s</sub>、(K + R + J)<sub>s</sub> 处理对水稻有较好的促生效应。

表 4 灭菌土壤中 3 种菌剂及其复合菌剂对水稻幼苗根系的影响

处理	根长/cm	根表面积/cm <sup>2</sup>	根体积/cm <sup>3</sup>	根平均直径/mm	根尖数/个	根干质量/(mg/株)
CK2	83.29 ± 10.90c	8.74 ± 1.09d	0.15 ± 0.03c	0.36 ± 0.03bc	42.00 ± 12.00d	42.10 ± 11.80d
J <sub>s</sub> (LZP02)	117.90 ± 3.93c	10.43 ± 1.82cd	0.19 ± 0.04bc	0.29 ± 0.06cd	81.00 ± 5.00b	58.30 ± 8.10abc
K <sub>s</sub> (LZP06)	107.13 ± 4.20c	10.89 ± 0.41cd	0.17 ± 0.01bc	0.41 ± 0.02ab	56.00 ± 4.00cd	43.47 ± 4.31cd
R <sub>s</sub> (LZP03)	118.91 ± 13.55c	12.92 ± 0.68bc	0.23 ± 0.04b	0.41 ± 0.02ab	71.00 ± 2.00bc	59.03 ± 5.23ab
(K + J) <sub>s</sub>	239.91 ± 40.69a	21.01 ± 3.77a	0.31 ± 0.07a	0.29 ± 0.01cd	113.00 ± 15.00a	66.43 ± 4.23ab
(K + R) <sub>s</sub>	77.64 ± 12.32c	9.12 ± 0.78cd	0.14 ± 0.04c	0.48 ± 0.05a	50.00 ± 6.35d	53.80 ± 11.41bcd
(R + J) <sub>s</sub>	110.48 ± 13.13c	9.36 ± 0.32cd	0.14 ± 0.03c	0.29 ± 0.04cd	58.00 ± 5.00cd	54.70 ± 8.98bcd
(K + R + J) <sub>s</sub>	198.89 ± 38.04b	15.68 ± 4.15b	0.24 ± 0.03b	0.27 ± 0.05d	130.00 ± 17.56a	71.23 ± 6.12a

3 结论与讨论

PGPR 具有固氮、溶磷、解钾、产 ACC 脱氢酶、产吲哚乙酸、赤霉素等功能特性,可以促进植物生长,改善土壤生态环境<sup>[13-15]</sup>。本研究 9 种菌悬液的浸种萌发试验表明,菌株 LZP02(解磷菌)、LZP03(溶磷菌)、LZP06(解钾菌)对水稻胚芽长、胚根长和苗鲜质量有显著的促进效应,原因可能是与 3 种菌株分泌吲哚乙酸和赤霉素等有密切关系。根际促生菌能刺激侧生根的萌动、伸长、发育,影响根系形态,促进植物生长<sup>[16-18]</sup>,主要表现在根长、生物量、根表面积及根体积等形态变化上<sup>[11]</sup>。本研究中,在未灭菌土壤中,K 处理显著提高了水稻根长、根表面积、根尖数、根干质量,降低了根系平均直径;在灭菌土壤中,(K + J)<sub>s</sub>、(K + R + J)<sub>s</sub> 处理对水稻有较好的促生效果。李想等<sup>[19]</sup>研究发现,枯草芽孢杆菌 LX4、地衣芽孢杆菌 LX5、解淀粉芽孢杆菌 LX7 通过增加根长、根表面积、根体积、根直径促进了烟草的生长。*Bacillus subtilis* beb-13bs 作为根际促生菌可以提高西红柿的产量和品质<sup>[20]</sup>。本研究中,促生菌剂在灭菌土壤中对水稻根系的促生效果优于非灭菌土壤,原因可能是在非灭菌土壤中促生菌剂与土壤中某些或某个菌种存在养分竞争或拮抗作用,导致促生菌的繁殖受到影响<sup>[21]</sup>。在灭菌土壤中,复合菌剂(K + J)和(K + R + J)对水稻表现出较好的促生效应,可能与菌剂间的协同作用有关。芽孢杆菌是土壤微生态的优势种群之一,其容易在土壤中存活、定殖与繁殖<sup>[22]</sup>。菌剂浸种萌发试验表明,LZP02、LZP03、LZP06 菌剂的促生效果优于其他菌株。3 种单菌悬液及其复合菌悬液处理水稻幼苗,在未灭菌的土壤

中,解钾菌(K,LZP06)菌悬液处理对水稻根系生长有较好的促生效应;在灭菌土壤中,复合菌剂(K + J)<sub>s</sub>和(K + R + J)<sub>s</sub>处理对水稻有较好的促生效应。本研究单菌剂和复合菌剂对水稻的促生试验是在相对稳定的环境下进行,在复杂的大田环境下的应用效果还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 赵龙飞,徐亚军,常佳丽,等.具 ACC 脱氢酶活性大豆根瘤内生菌的筛选、抗性 & 促生作用[J].微生物学报,2016,56(6):1009-1021.

[2] 许景钢,孙涛,李嵩.我国微生物肥料的研究及其在农业生产中的应用[J].作物杂志,2016(1):1-6.

[3] 黄勇,罗伟聪,吴丹妮,等.利用微生物肥料进行土壤生态修复治理的研究与分析[J].环境科技,2016,29(4):74-78.

[4] 杨永,张学军,李寐华,等.微生物肥料对设施长期连作哈密瓜根际土壤真菌群落结构的影响[J].应用与环境生物学报,2017(1):1-9.

[5] 李婉,刘淼,张必弦,等.植物根际促生菌的研究进展及其应用现状[J].中国农学通报,2014,30(24):1-5.

[6] 戴梅,宫象辉,丛蕾,等.PGPR 制剂研发现状与发展趋势[J].山东科学,2006,19(6):9-11.

[7] 杨晓云,陈志谊,蒋盼盼,等.解淀粉芽孢杆菌 B1619 对番茄的促生作用[J].中国生物防治学报,2016,32(3):349-356.

[8] 万兵兵,刘晔,吴越,等.烟草根际解磷解钾菌的筛选鉴定及应用效果研究[J].河南农业科学,2016,45(9):46-51.

[9] 朱金英,张书良,郭建军,等.枯草芽孢杆菌菌株 AM-CC100001 对棉花的促生效应[J].中国棉花,2013,40(9):16-18.

- [10] 王勇,周冬梅,郭坚华,等. 蜡质芽孢杆菌 AR156 对辣椒的防病促生机理研究[J]. 植物病理学报,2014,44(2):195-203.
- [11] 栾换换,裴红宾,张永清,等. 芽孢杆菌 ZJM-P5 与氮配施对红小豆幼苗生长和氮吸收的影响[J]. 西北植物学报,2017,37(8):1550-1558.
- [12] Xu W H, Wang Z G, Wu F Z. Companion cropping with wheat increases resistance to *Fusarium* wilt in watermelon and the roles of root exudates in watermelon root growth [J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2015, 90: 12-20.
- [13] Velusamy P, Immanuel J E, Gnanamanickam S S. Rhizosphere bacteria for biocontrol of bacterial blight and growth promotion of rice [J]. *Rice Science*, 2013, 20(5):356-362.
- [14] Lin Y, Du D, Si C, *et al.* Potential biocontrol *Bacillus* sp. strains isolated by an improved method from vinegar waste compost exhibit antibiosis against fungal pathogens and promote growth of cucumbers [J]. *Biological Control*, 2014, 71(2):7-15.
- [15] 王志刚,刘帅,徐伟慧,等. 硅酸盐细菌的分离鉴定及其对西瓜的促生效应[J]. 核农学报,2015,29(11):2208-2214.
- [16] Persello-Cartieaux F, Nausaume L, Robaglia C. Tales from the underground: molecular plant-rhizobacteria interactions [J]. *Plant Cell and Environment*, 2003, 26(2):189-199.
- [17] Ortíz-Castro R, Contreras-Cornejo H A, Macías-Rodríguez L, *et al.* The role of microbial signals in plant growth and development [J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2009, 4(8):701-712.
- [18] Shashidar A, Danuše T, Jakub R, *et al.* Analysis of plant growth-promoting properties of *Bacillus amyloliquefaciens* UCMB5113 using *Arabidopsis thaliana* as host plant [J]. *Planta*, 2017, 245(1):15-30.
- [19] 李想,刘艳霞,夏范讲,等. 烟草根际促生菌 (PGPR) 的筛选、鉴定及促生机理研究[J]. 中国烟草学报, 2017, 23(3):111-118.
- [20] Mena-Violante H G, Olalde-Portugal V. Alteration of tomato fruit quality by root inoculation with plant growth promoting rhizobacteria (pgpr): *Bacillus subtilis* be-13bs [J]. *Scientia Horticulturae*, 2007, 113(1):103-106.
- [21] Berendsen R L, Pieterse C M J, Bakker P A H M. The rhizosphere microbiome and plant health [J]. *Trends in Plant Science*, 2012, 17(8):478-486.
- [22] 赵青云,赵秋芳,王辉,等. 根际促生菌 *Bacillus subtilis* Y-IVI 在香茅兰上的应用效果研究[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(2):535-540.

(上接第 58 页)

- [10] 闫加力,李懋,熊双莲,等. 旱改水对水稻幼苗生长的影响及秸秆的改良作用[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5):554-562.
- [11] 邓振镛,王强,张强,等. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J]. 生态学报,2010,30(22):6278-6288.
- [12] 周浩,雷国平,杨雪昕. 三江平原典型流域土地利用格局变化与空间分异研究[J]. 农业机械学报,2017, 48(5):142-151.
- [13] 向长玉,周东兴,宋戈,等. 黑龙江省通河县旱地改水田许可转换度研究[J]. 农业工程学报,2012, 28(13):226-230.
- [14] 周浩,雷国平,张博,等. 1990—2013 年挠力河流域耕地变化下水土资源平衡效应分析[J]. 农业工程学报,2015,31(1):272-280.
- [15] 孙中林,吴金水,葛体达,等. 土壤质地和水分对水稻土有机碳矿化的影响[J]. 环境科学,2009,30(1):214-220.
- [16] 杨东伟,章明奎. 水田改果园后土壤性质的变化及其特征[J]. 生态学报,2015,35(11):3825-3835.
- [17] 郭月峰,祁伟,姚云峰,等. 土地利用方式对土壤微生物生物量碳和土壤养分的影响[J]. 北方园艺,2016, 40(11):166-169.
- [18] 胡明,韩晨,杨秀英,等. 潼关县土壤养分含量及分布特征[J]. 河南农业科学,2016,45(1):61-64.
- [19] 侯红乾,刘光荣,冀建华,等. 南方红壤区稻田土壤养分动态变化及与产量关系分析[J]. 华北农学报, 2013, 28(3):109-115.
- [20] 赵荣钦,刘英,丁明磊,等. 河南省农田生态系统碳源/汇研究[J]. 河南农业科学,2010(7):40-44.