

植物根际促生菌在蔬菜种植中的应用进展

田 婧, 李 邵, 连 青 龙, 鲁 少 尉, 马 宁, 鲍 顺 淑

(农业部规划设计研究院 设施农业研究所, 北京 100125)

摘 要:植物根际促生菌(PGPR)对植物生长具有广谱促进功效,生物调节潜力巨大。将 PGPR 应用于可持续的蔬菜生产系统建设,对营造良好的根际生态环境、改善土壤理化性质、提高土壤供肥能力、降低作物对化肥的依赖、抑制病害发生及减少农药污染等具有重要作用。现介绍了 PGPR 的主要种类和基本作用机理,并重点总结了国内外将 PGPR 应用于 7 种蔬菜作物种植的试验研究和成功实例。

关键词:植物根际促生菌(PGPR);固氮;溶磷;蔬菜种植

中图分类号:S 144 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)06-0181-05

在过分依赖化肥和农药以期追求农作物增产的时代背景下,近年来,人们逐渐意识到生态保护与农业可持续发展的重要性。化学肥料和农药在蔬菜生产中发挥巨大增产作用的同时,土壤板结、地力下降、环境污染、产品质量和安全性下降等一系列负面影响不断升级。因此,如何既能减少化肥和农药的投入量,又能生产出优质、高产的蔬菜产品,成为亟需攻克的种植业发展难题。

植物根际促生菌(plant growth promoting rhizobacteria, PGPR)是指自由生活在土壤或附生于植物根系的一类可促进植物生长及其对矿质营养的吸收和利用,并能抑制有害生物的有益细菌。PGPR 可从植物根部人工分离得到并进行培养扩繁,借助其代谢过程或代谢产物,用来改善植物生长条件,尤其是营养供给。PGPR 的开发与应用对创造良好的根际生态环境、改善土壤理化性质、提高土壤的供肥能力和对环境资源的有效利用、降低作物对化肥的依赖、抑制病虫害的发生及减少农药污染等具有重要作用^[1]。

1 PGPR 的主要种类与基本作用机理

目前已鉴定出 20 多个种属的 PGPR 细菌菌株,主要包括芽孢杆菌属(*Bacillus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*),是植物根际的优势菌种;此外,具有防病促生潜能的 PGPR 还包括农

杆菌属(*Agrobacterium*)、埃文氏菌属(*Eriwinia*)、黄杆菌属(*Flavobacterium*)、巴斯德氏菌属(*Pasteuria*)、沙雷氏菌属(*Serratia*)、固氮菌属(*Azotobacter*)、固氮螺菌属(*Azospirillum*)、肠杆菌属(*Enterobacter*)、哈夫尼菌属(*Hafnia*)、产碱菌属(*Alcaligenes*)、节杆菌属(*Arthrobacter*)、黄单胞菌属(*Xanthomonas*)、克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)和慢生型根瘤菌属(*Bradyrhizobium*)等^[2]。

PGPR 促进植物生长的机理可分为直接作用和间接作用。直接作用一方面是指 PGPR 可以改变土壤中某些无效矿质营养元素的形态,使之易被植物有效吸收,其中最重要的 2 种方式即生物固氮和磷溶解;另一方面,PGPR 可合成和分泌某些对植物生长发育起直接作用的促生物质,如植物激素(如生长素、赤霉素等)、维生素、氨基酸和一些活性有机小分子及衍生物等。间接作用是指 PGPR 能够高密度地定殖于植物根际,抑制或减轻土传病害,并通过诱导植物产生系统抗性提高植物自身的防卫能力,从而减轻病害对植物生长发育及产量收获的不良影响。PGPR 的病害调控机制是通过产生抗生素、胞外溶解酶、氰化物和铁载体等,改变根际微环境平衡,最终诱导植物体内病害防御相关化合物含量水平升高^[3-4]。这种分类是比较主流且全面的分类方式。

PGPR 的作用机理也有另外的分类方式,把诱导植物产生系统抗性(ISR)以抵御生物性胁迫的归为一类,把诱导植物提高耐受力以抵御非生物胁迫的归为另一类。前者是指 PGPR 能产生抵抗多种病原菌的抗生素类物质或毒素,帮助植物抵抗生物类侵害,包括病原细菌、真菌、病毒及线虫等;后者是指 PGPR 能帮助植物忍受多种环境胁迫,包括干旱、盐分、重金属、土壤贫瘠或肥力过剩等^[5]。

第一作者简介:田婧(1983-),女,山西平遥人,博士,工程师,现主要从事设施园艺作物栽培技术与工艺等研究工作。E-mail: tianjingnau@126.com.

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项资助项目(201203002)。

收稿日期:2015-12-18

2 PGPR 在蔬菜种植中的应用效果

PGPR 在多种蔬菜种植中已有试验应用,表现出对植物生长的广谱促进功效,生物调节潜力巨大,净化土壤环境,如重金属、杀虫剂作为生物农药防治多种植物病原体。

目前,PGPR 优良菌株的筛选和扩繁已经开始有商业化的活菌制剂产品问世,但完成接种后的应用效果主要取决于 PGPR 在植物根部的定殖和适应情况。能在根际生长的微生物才是理想的生防因子,PGPR 在植物根部的定殖是指接种后,在固有根际微生物群落竞争条件下,能在土壤中沿根系分布、增殖和长期存活。PGPR 展现在人们面前的,不仅是刺激植物生长促进作物增产,还有生物防控作用抑制土传病害,尤其重要的是激发植物产生系统诱导抗性(ISR),这点非常吸引人^[6]。然而,某种特定 PGPR 对特定作物的生产效率还有待深入的研究和开发,根据土壤条件进行优化和驯化,未来将有希望用于部分替换化学肥料,减少杀虫剂和人工生长调节剂的使用,服务于可持续的农业生产系统建设。

2.1 马铃薯

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是世界上产量居第4位的重要蔬菜。在我国,未来几年将启动马铃薯主粮化战略,掀起第3次主粮革命,马铃薯将成为继稻米、小麦、玉米之后的又一主粮。尽管在世界范围内,马铃薯的总产量很高,但受土壤中磷含量限制,世界上40%的马铃薯种植处于产量不高的状态^[7]。相应地,投入更高剂量的磷肥,即可使马铃薯成为更高产的作物。使磷酸盐增溶的细菌种类有恶臭假单胞菌、微杆菌属和成团泛菌等,通过田间露地或温室种植马铃薯的试验证实发现,单独使用或复合使用这类溶磷菌(PSB)均可促进马铃薯的生长和发育。在这些处理中,无论温室还是露地,与恶臭假单胞菌混合接种成团泛菌或微杆菌属,植株生物量和块茎生长增加,这种促生作用很可能是由于PSB向植物提供了更多的磷元素。MALBOOBI等^[8]认为,所有PSB中效果最强大是成团泛菌,对马铃薯增产的贡献约为20%~25%。其它试验也证实马铃薯使用PSB,叶面积指数、株高、作物生长率、单株块茎数等均有上升^[9]。

氮肥在马铃薯生长中也很重要,施用氮肥后茎叶生长繁茂、颜色黑绿,增产作用明显。然而,人工施用过多尿素,植株容易头重脚轻,出现倒伏,地下茎结薯晚且淀粉含量低,总产量反而下降。研究发现,洋葱假单胞菌、黄单胞菌、阴沟肠杆菌和代尔夫特食酸菌均可提供土壤更多有效氮素,而合理使用圆褐固氮菌可相当于增加50%的化肥;类似地,固氮螺菌和巨大芽孢杆菌也促进马铃薯产量和营养元素吸收^[10]。蜡质芽孢杆菌菌株P31促进磷含量升高43.1%,木糖氧化无色杆菌菌株

P35促进氮含量升高50.5%,钾含量升高48.3%^[11]。联合使用PSB和非共生固氮菌,可以最大限度地提高氮、磷、钾的肥效,与化肥投入相比,应用微生物制剂能节约7%左右的成本^[10]。

2.2 番茄

番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)是世界第二大蔬菜,2008年全球产量1.29亿t^[12]。番茄也是我国设施蔬菜最主要的种植种类,番茄栽培需要大量的氮磷钾,任何一种元素的不足都会成为植株生长和产量形成的限制因素。PGPR在番茄种植中也有应用。番茄幼苗接种热带伯克霍尔德氏菌,可在根部有效定殖,土壤中有益菌的定殖。促使番茄连续2个生长季增产^[13]。根际使用PGPR显著促进地上部枝蔓和根系伸长、干鲜重和磷含量,采用假单胞菌IAA阳性菌株接种,番茄的植株生长量和果实产量明显提高^[14]。番茄在日光温室和塑料大棚中常以槽式、袋式或盆装的形式进行复合基质栽培。有试验比较盆栽和地栽2种栽培模式下番茄接种荧光假单胞菌SS5的效果,结果表明,根系和地上部重量、长度以及单株产量和总产量均明显提高;与地栽相比,盆栽番茄接种,果实产量增加57%。同时,与未接种植株相比,单株果实数量也因接种而有所增加;地栽番茄,接种使干物质积累增加28%^[15]。由此可知,在设施蔬菜种植中应用PGPR会比大田露地应用效果更佳。

关于单一菌种或多菌种混合使用的效果比较,也有研究报道,对番茄植株单独或混合接种固氮菌属菌株和固氮螺菌属菌株,包括整株干重、株高、叶片数、每株果实数、单株产量、平均果实重量、叶绿素和蛋白质含量等指标均得到促进;而所有处理中,混合接种即2种益生菌协调作用下产量最高^[16]。另有试验联合使用假单胞菌、固氮菌和固氮螺菌来研究番茄对营养元素的吸收,结果显示3种菌混合接种时,地上部吸收钾最多,其次是固氮菌和固氮螺菌2种菌混合接种的处理;果实番茄红素含量和抗氧化特性也因PGPR而提高,3种菌混合接种处理下,番茄红素水平和抗氧化水平均达到最高值^[17]。不仅PGPR细菌间混合使用效果佳,PGPR与丛枝菌根(AM)真菌混合使用,也可获得非常好的栽培效果。KIM等^[18]曾设促生细菌(聚团肠杆菌属)单独接种、AM真菌(幼套球囊霉属)单独接种、混合接种及不接种对照4个处理的试验,与对照相比,单独接种或混合接种,均可促进番茄植株生长,混合接种处理的番茄氮、磷吸收最佳。

2.3 茄子

茄子(*Solanum melongena* L.)属于世界产量前十位的蔬菜种类,尤其在亚洲的产量和消费量均超过90%。各种营养元素中,磷的需求量对茄子产量最为重要,通常全部磷肥作为底肥施用。因此,在较为缺磷的土壤中

施用 PSB(如巨大芽孢杆菌)可有效提高土壤磷库,进而促进茄子生长和产量提高。HAN 等^[19]的试验中,施用 PSB 微生物肥,株高、生物量干重、光合速率都显著提高,植株干物质积累增加了 30%,鉴于其试验结果,巨大芽孢杆菌被认为可用作接种菌来弥补和提高缺磷土壤种植茄子的产量。多种 PGPR 联用,促生效果更加突出,PSB、固氮螺菌和固氮菌 3 种菌同时使用,茄子开花期的光合作用、蒸腾速率、气孔阻力、胞间二氧化碳浓度及叶片温度均达峰值,植株生长更加旺盛,分枝更多,产量更高^[10]。在逆境条件下,PGPR 仍能促进茄子产量和品质提高。如在盐胁迫条件下,接种假单胞菌 DW1,萌发率提高且生长速率加快,矿质吸收和抗氧化酶活性(SOD、POD、CAT)均有所提升;盐胁迫显著降低 K^+ 浓度、提高 Na^+ 浓度, Ca^{2+} 含量略有降低;接种植株 Ca^{2+} 含量较高,而 Na^+ 浓度未明显升高;即使土壤 NaCl 浓度达到 2~3 g/kg,应用假单胞菌仍能显著抑制茄子植株 NaCl 积累^[20]。

2.4 辣椒

辣椒(*Capsicum annuum* L.)种类繁多,在我国各地广泛种植,也是我国设施蔬菜主要种植种类之一。PGPR 在辣椒种植中也有应用,芽孢杆菌可提高大田种植红辣椒的茎粗、根长以及根系与地上部的干物质及总产量^[21];大田种植海南黄灯笼辣椒,圆褐固氮菌、巴西固氮螺菌、AM 真菌组合生物肥促进植物营养元素吸收,甚至优于直接施用氮磷钾复合化肥^[22]。SILVA 等^[23]研究根瘤菌对辣椒代谢和生物活性的影响,发现植物有机酸含量下降,酚类/辣椒素以及叶片和果实的抗氧化活性均未受影响,说明给辣椒这类非豆科作物接种根瘤菌是非常有益的农艺措施。同时发现接种会导致辣椒叶片和果实的甾醇和三萜显著下降,而脂肪酸大幅升高,可能与更高生物量及果实成熟相关。接种还使辣椒植株体内氮、磷、钾含量比未接种植株分别高出 16.56%、24.22%、33.21%。因此,辣椒栽培采纳根瘤菌接种的益处至少可归结为 3 个方面:影响代谢物含量变化、提高健康潜力与激发防御能力。

2.5 黄瓜

我国是世界上黄瓜(*Cucumis sativus* L.)栽培面积最大、总产最高的国家,黄瓜性喜温不耐寒热,是设施蔬菜种植的主要种类之一。许多研究报道证实 PGPR 应用于黄瓜栽培显著促进生产、发育和产量形成。如枯草芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌、鲍氏不动杆菌及成团泛菌均促进黄瓜株高、果实重量、单株果数、可溶性固形物及营养元素含量升高,而这几种 PGPR 中,成团泛菌促使单株果数、单株产量、株高、果实长宽、干物质更高,而巨大芽孢杆菌使平均单果重更高^[24]。大田种植的黄瓜植株接种 PGPR,无论是否施用化肥,根系和地上部长度、干

鲜重都显著提高,ISFAHANI 等^[25]进一步分析假单胞菌、PSB(恶臭假单胞菌和成团泛菌)和化肥对黄瓜生长季产量构成的影响,结果 75%肥料+2 种 PSB 处理组合得到了最高的氮磷浓度,而仅添加假单胞菌的处理产量最高。

应用 PGPR 还能有效防控病害,某研究中使用筛选出的 PGPR 菌株,明显降低了镰刀菌引起的根腐病,与未接种相比,整株干物质积累增加了 62%,果实产量提高了 32%^[26]。类似研究,尖孢镰刀菌引起的黄瓜枯萎病严重影响产量,但接种 PGPR 菌种(恶臭假单胞菌、粘质沙雷氏菌、芽孢杆菌、荧光假单胞菌以及解淀粉芽孢杆菌)可以抑制病情促进生长^[27]。逆境条件下,即使在盐碱条件下,播种接种 PGPR 的种子是一种提高黄瓜生长发育的有效手段。试验中,在盐胁迫土壤中添加沙雷氏菌 RR-2-5-10、寡养单胞菌 e-p10、荧光假单胞菌 SPB2145、假单胞菌属耐盐 TSAU20 和荧光假单胞菌 PCL1751,可同时提高黄瓜植株的耐盐性和抗病性;尽管土壤侵染了致病菌,但种子生物接种可减少 10%致病率^[28]。

2.6 甘蓝

甘蓝(*Brassica oleracea* L.)具有适应性广、品种众多、产量高、耐储运等特点,在我国各地种植普遍。在甘蓝幼苗上使用 PGPR,巨大芽孢杆菌 TV-91C 菌株、成团泛菌 RK-92 菌株、枯草芽孢杆菌 TV-17C 菌株均能促进甘蓝植株的生长,改善营养吸收和激素含量,干鲜重、茎粗、株高、叶绿素含量及叶面积增加^[29]。其中,TV-91C 菌株在促进营养吸收方面效果最佳,RK-92 菌株促进叶面积增大和激素含量(赤霉素、水杨酸、吲哚乙酸)方面效果最佳。除幼苗接种外,种子接种也具有类似效果,以巨大芽孢杆菌为例,茎粗、幼苗株高、叶绿素含量分别提高了 47.5%、27.2%和 5.8%。

2.7 萝卜

萝卜(*Raphanus sativus* L.)在世界各地广泛种植,欧、美洲国家多以小型萝卜为主,亚洲国家多以大型萝卜为主。目前,我国已经成为世界上第一大萝卜生产国,种植面积和产量占世界比重均超过 40%^[30]。研究发现,单纯的化肥施用,萝卜干物质积累很难提高,但肠杆菌属和克雷伯氏菌属的 PGPR 应用于萝卜生产,生物量显著提高,包括根长、叶面积和干物质^[31]。盐胁迫下接种荧光假单胞菌属与不接种相比,萝卜根叶干鲜重、光合色素、脯氨酸、总游离氨基酸及粗蛋白含量均显著提高^[32];盐胁迫下使用枯草芽孢杆菌,吲哚乙酸和赤霉素含量升高而脱落酸含量下降,总氮、总磷水平较高, K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量升高而 Na^+ 、 Cl^- 含量降低,显示出缓解盐害的作用^[33]。

3 结语与展望

蔬菜种植,尤其是瓜果类蔬菜,很多农户和种植者

信奉“大肥、大水、高投入、高产出”。然而,化学肥料和农药的过度使用不仅使生产成本不断攀升,还带来土壤污染及地力下降等一系列环境问题。2015年初,农业部首次提出到2020年中国农业要实现“一控两减三基本”,其中“两减”是指减少化肥、农药使用量,目标即到2020年化肥和农药使用量实现零增长。推进蔬菜产业可持续发展,实行化肥减量增效技术,合理应用PGPR是一种积极有效的方法。应用得当时,PGPR不仅可以提高地力,为蔬菜作物提供足够的大量元素和微量元素,还会生成其它一些有益的生长调节物质来促进蔬菜作物生长,增强蔬菜作物对非生物胁迫的耐性及对病虫害的抗性,极大地提高蔬菜种植的产量和品质。此外,蔬菜作物经过PGPR的生物调控处理完全无化学毒害,生产的蔬菜产品安全、健康。

参考文献

- [1] 崔薇薇. 植物根际促生菌的研究进展[J]. 辽宁农业科学, 2010(2): 35-39.
- [2] TAGHAVI S, BARAC T, GREENBERG B, et al. Horizontal gene transfer to endogenous endophytic bacteria from poplar improves phytoremediation of toluene [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, 71(12): 8500-8505.
- [3] ANTOUN H, KLOPPER J. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) [J]. Encyclopedia of Genetics, 2001, 18(3): 1477-1480.
- [4] 李琬, 刘森, 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.
- [5] 康贻军, 程洁, 梅丽娟, 等. 植物根际促生菌作用机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 232-238.
- [6] 胡江春, 薛德林, 马成新, 等. 植物根际促生菌(PGPR)的研究与应用前景[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1963-1966.
- [7] IGUAL J M, VALVERDE A, CERVANTES E, et al. Phosphate-solubilizing bacteria as inoculants for agriculture; Use of updated molecular techniques in their study[J]. Agronomie, 2001, 21(6-7): 561-568.
- [8] MALBOOBI M A, BEHBAHANI M, MADANI H, et al. Performance evaluation of potent phosphate solubilizing bacteria in potato rhizosphere[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2009, 25(8): 1479-1484.
- [9] DARBAGHSHAHI M R N, NIA H A, BAHARI B. Assessment of applications of biological fertilizer for potato cultivation[J]. International Journal of Agriscience, 2012, 2(2): 102-107.
- [10] ALMAS Z, EES A, MOHAMMAD S K, et al. Role of plant growth promoting rhizobacteria in sustainable production of vegetables; Current perspective[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 193: 231-239.
- [11] DAWWAM G E, ELBELTAGY A, ELBELTAGY E, et al. Beneficial effect of plant growth promoting bacteria isolated from the roots of potato plant[J]. Annals of Agricultural Sciences, 2013, 58(2): 195-201.
- [12] FAO, 2010. Website database, <http://www.fao.org>.
- [13] BERNABEU P R, PISTORIO M, TORRES-TEJERIZO G, et al. Colonization and plant growth-promotion of tomato by *Burkholderia tropica* [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 191(6): 113-120.
- [14] WALPOLA B C, YOON M H. Phosphate solubilizing bacteria; Assessment of their effect on growth promotion and phosphorous uptake of mung bean [J]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2013, 73(3): 275-281.
- [15] AHIRWAR N K, GUPTA G, RAWLLEY R K, et al. Influence on growth and fruit yield of tomato plants by inoculation with *Pseudomonas fluorescence* (SS5): possible role of plant growth promotion[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2015(4): 720-730.
- [16] RAMAKRISHNAN K, SELVAKUMAR G. Effect of biofertilizers on enhancement of growth and yield on tomato[J]. Int J Res Bot, 2012, 2(4): 20-23.
- [17] ORDOOKHANI K, KHAVAZI K, MOEZZI A, et al. Influence of PGPR and AMF on antioxidant activity, lycopene and potassium contents in tomato [J]. African Journal of Agricultural Research, 2010, 5(10): 1108-1116.
- [18] KIM K Y, JORDAN D, NALD G A. Effect of phosphate-solubilizing bacteria and vesicular-arbuscular mycorrhizae on tomato growth and soil microbial activity[J]. Biology and Fertility of Soils, 1997, 26(2): 79-87.
- [19] HAN H S, LEE K D. Phosphate and potassium solubilizing bacteria effect on mineral uptake, soil availability and growth of eggplant[J]. Research Journal of Agriculture and Biological Sciences, 2005, 1(2): 176-180.
- [20] FU Q, LIU C, DING Y, et al. Ameliorative effects of inoculation with the plant growth-promoting rhizobacterium *Pseudomonas* sp. DW1 on growth of eggplant (*Solanum melongena* L.) seedlings under salt stress[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(12): 1994-2000.
- [21] MIRIK M, AYSAN Y, CINAR O. Biological control of bacterial spot disease of pepper with *Bacillus* strains[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2008, 32(5): 381-390.
- [22] CONSTANTINO M, GOMEZ-ÁLVAREZ R, ÁLVAREZ-SOLIS J D, et al. Effect of inoculation with rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi on growth and yield of *Capsicum chinense* Jacquin[J]. Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics, 2008, 109(2): 169-180.
- [23] SILVA L R, AZEVEDO M J, VALENTAO P, et al. Chemical assessment and antioxidant capacity of pepper (*Capsicum annuum* L.) seeds[J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 53: 240-248.
- [24] DURSUN A, EKINCI M, DONMEZ M F, et al. Effects of foliar application of plant growth promoting bacterium on chemical contents, yield and growth of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) and cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. Pakistan Journal of Botany, 2010, 42(5): 3349-3356.
- [25] ISFAHANI F M, BESHARATI H. Effect of biofertilizers on yield and yield components of cucumber[J]. Journal of Biol Earth Sciences, 2012, 2(2): 83-92.
- [26] EGAMBERDIEVA D, KUCHAROVA Z, DAVRANOV K, et al. Bacteria able to control foot and root rot and to promote growth of cucumber in salinated soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, 47: 197-205.
- [27] GUL A, ÖZAKTAN H, KIDOGLU F, et al. Rhizobacteria promoted yield of cucumber plants grown in perlite under *Fusarium* wilt stress[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 153(4): 22-25.
- [28] TIKHONOVICH I, KAMILOVA F, VALIDOV S, et al. Bacteria able to control foot and root rot and to promote growth of cucumber in salinated soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, 47: 197-205.
- [29] TURAN M, EKINCI M, YILDIRIM E, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria improved growth, nutrient, and hormone content of cabbage (*Brassica oleracea*) seedlings[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2014, 38: 327-333.
- [30] 胡向东, 李娜, 何忠伟. 中国萝卜产业发展现状与前景分析[J]. 农业展望, 2012(10): 35-37, 40.
- [31] LARA C, SANES S C Y, OVIEDO L E. Impact of native phosphate solubilizing bacteria on the growth and development of radish (*Raphanus sativus* L.) plants[J]. Biotechnology and Applied Biochemistry, 2013, 30: 276-279.

叶菜硝酸盐污染控制方法特征解析与发展趋势

张 蕾^{1,2}, 付 强^{1,2}, 戚 飞^{1,2}, 于海业^{1,2}, 王琳琳^{1,2}

(1. 吉林大学 生物与农业工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 工程仿生教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘 要:该研究着眼于叶菜硝酸盐(NO_3^-)污染现状及其给人体健康及国家经济带来的不利影响,对目前国内外普遍存在的叶菜 NO_3^- 控制方法进行搜集、整理和分析。按照合理施肥(养分调控)、环境调控、使用硝化细菌抑制剂、确定适宜的收获期及土壤间作栽培等五大类方法展开讨论,明确现有方法的共性特征,分析各类方法的特点及存在的弊端。最后从生态系统安全与食品安全角度,探讨未来叶菜 NO_3^- 控制方法的发展趋势。

关键词:叶菜;硝酸盐;污染控制;特征解析;发展趋势

中图分类号:Q 141;S 181 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)06-0185-04

叶菜是一类极易富集 NO_3^- 的喜氮作物,人体摄入的 NO_3^- 有 70%~80% 来自于叶菜。

联合国粮农组织/世界卫生组织(FAO/WHO)下的食品添加剂联合专家委员会(JECFA)及欧盟食品科学

委员会(SCF)给出的允许日摄入量(ADI)为 0~3.7 mg/kg BW。对于体重 60 kg 的人来讲,当仅考虑摄取蔬菜带来的 NO_3^- 时,即使每天仅摄取 100 g 新鲜蔬菜,且蔬菜的 NO_3^- 含量满足欧盟最严格限值 2 500 mg/kg FW, NO_3^- 摄入量仍超出安全限值 13%;如果其中 5% 转化为亚硝酸盐(NO_2^-),则超出 ADI 限值(0~0.06 mg/kg BW)247%,目前我国尚未制定食品中 NO_3^- 含量的限量标准,普遍采用的是沈明珠等^[1]在 1982 年提出的蔬菜 NO_3^- 污染的 4 级标准。我国是蔬菜消费大国,每年人均蔬菜占有量已达 250 kg。随着人们膳食结构的改善以及城镇化规模的日益扩大,人们对蔬菜的需求量日益增加。我国蔬菜 NO_3^- 污染严重的现状已经对人们的身体健康构成了严重威胁。

第一作者简介:张蕾(1979-),女,博士,副教授,现主要从事农业生物环境安全性评价及可持续利用等研究工作。E-mail:z_lei@jlu.edu.cn.

责任作者:于海业(1963-),男,博士,教授,现主要从事农业生物环境与能源工程等研究工作。E-mail:haiye@jlu.edu.cn.

基金项目:“十二五”农村领域国家科技计划资助项目(2013AA103005-04)。

收稿日期:2015-12-14

[32] MOHAMED H I, GOMAA E Z. Effect of plant growth promoting *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas fluorescens* on growth and pigment composition of radish plants (*Raphanus sativus*) under NaCl stress[J]. Photosynthetica, 2012, 50(2):263-272.

[33] YILDRIM E, DONMER M F, TURAN M. Use of bioinoculants in ameliorative effects on radish plants under salinity stress[J]. Journal of Plant Nutrition, 2008, 31(12):2059-2074.

Applications Progress of Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Vegetable Production

TIAN Jing, LI Shao, LIAN Qinglong, LU Shaowei, MA Ning, BAO Shunshu

(Institute of Protected Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125)

Abstract: Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) has broad promoting effect on plant growth and great potential in biological regulation. The application of PGPR in sustainable vegetable production system construction, plays an important role in creating a good ecological environment in the rhizosphere, improving soil physical and chemical properties, enhancing soil fertility, relieving reliance on chemical fertilizer, inhibition of diseases and reducing pesticide pollution. The review introduced the main types and the basic function of PGPR, and also focused on the summary of experimental research and successful examples of PGPR application in production of seven kinds of vegetables at home and abroad.

Keywords: plant growth promoting rhizobacteria (PGPR); nitrogen fixation; phosphate solubilization; vegetable production