



## 不同土壤水势下贝莱斯芽孢杆菌B006菌剂对茄子的促生增产作用

耿妍, 郭荣君, 张爱香, GOVRIN Eri Moshe, 李世东

引用本文:

耿妍, 郭荣君, 张爱香, 等. 不同土壤水势下贝莱斯芽孢杆菌B006菌剂对茄子的促生增产作用[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 398–406.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0026>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 一株烟草肠杆菌(*Enterobacter tabaci*)S4菌株的鉴定及其效果测定

王威, THINZARToe, 张亚, 张克诚, 姜明国, 张维, 施李鸣, 葛蓓亭

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 407–412 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0473>

### 番茄秸秆固定化芽孢杆菌M1对3环PAHs污染老化土壤修复效果

李岩, 李成, 张小雪, 冯焯, 王伟, 冯圣东, 宁国辉, 王小敏, 杨志新

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 806–813 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0225>

### 超高效液相色谱串联质谱检测啶菌唑等6种农药在我国典型土壤中的残留

焦斌, 徐军, 刘新刚, 董丰收, 吴小虎, 郑永权

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 424–431 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0581>

### 吸水链霉菌(*Streptomyces hygroscopicus*)B04固体菌剂对草莓生长及果实品质影响的研究

沈婷, 杨华, 戴乐天, 邓照亮, 王世梅

农业资源与环境学报. 2016, 33(1): 49–54 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0174>

### 氟吡菌胺及其代谢物在黄瓜中的残留

于博驰, 陈超, 王平平, 满彦利, 刘新刚, 董丰收, 徐军, 吴小虎, 郑永权

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 419–423 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0550>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

耿妍, 郭荣君, 张爱香, 等. 不同土壤水势下贝莱斯芽孢杆菌 B006 菌剂对茄子的促生增产作用[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 398–406.

GENG Yan, GUO Rong-jun, ZHANG Ai-xiang, et al. Growth and yield of eggplant promoted by the application of *Bacillus velezensis* B006 agent under different soil water potential conditions[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(3): 398–406.



开放科学 OSID

# 不同土壤水势下贝莱斯芽孢杆菌 B006 菌剂对茄子的促生增产作用

耿妍<sup>1,2</sup>, 郭荣君<sup>1\*</sup>, 张爱香<sup>2</sup>, GOVRIN Eri Moshe<sup>1</sup>, 李世东<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193; 2. 河北北方学院, 河北 张家口 075000)

**摘要:**为了明确水肥一体化灌溉系统中不同土壤水势条件下,施用芽孢杆菌 B006 菌剂对茄子生长及产量的促进作用,采用灌根法测定施用芽孢杆菌 B006 菌剂( $1 \times 10^7$  CFU·mL<sup>-1</sup>)对盆栽茄子幼苗生长的影响。在日光温室开展两因子、两水平交互田间小区试验,在土壤水势分别为-30 kPa 和-40 kPa 条件下,设置施用和不施用(对照)芽孢杆菌 B006 菌剂共 4 组处理。各处理均施用 278.77 kg·hm<sup>-2</sup> 化学肥料(N/P/K 为 17:9:34)。采用电子张力计监测土壤水势,采用水肥一体化自动灌溉系统进行灌溉。分别在移栽时和定植后 30 d 浇灌浓度为  $1 \times 10^7$  CFU·mL<sup>-1</sup> 的 B006 菌剂稀释液。35 d 后测定茄子的株高、茎粗、叶绿素含量和地上部干质量,50 d 后调查茄子开花数,每次施肥前测定土壤速效氮、磷、钾含量,收获期测定产量,收获后测定根长和根干质量。结果表明:施用 B006 菌剂处理的盆栽茄子株高、茎粗、根长和根干质量比对照分别提高了 16.7%、20.7%、28.7% 和 67.0%。在日光温室大棚试验中,施用 B006 菌剂处理土壤的速效磷、速效钾含量均低于对照;土壤水势-30 kPa 和-40 kPa 条件下,施用 B006 菌剂处理的茄子产量比对照分别提高了 24.5% 和 18.1%。当灌溉量从 804.88 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> 减少到 574.91 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> 时,施用 B006 菌剂的两处理之间产量无显著差异。综上所述,施用芽孢杆菌 B006 菌剂可以促进茄子对氮、磷、钾的吸收,提高肥料利用率,从而促进植物生长,甚至在少水灌溉条件下不降低茄子产量。

**关键词:**土壤水势;芽孢杆菌 B006 菌剂;茄子;促生;肥料利用

中图分类号:Q945.79

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)03-0398-09

doi: 10.13254/j.jare.2020.0026

## Growth and yield of eggplant promoted by the application of *Bacillus velezensis* B006 agent under different soil water potential conditions

GENG Yan<sup>1,2</sup>, GUO Rong-jun<sup>1\*</sup>, ZHANG Ai-xiang<sup>2</sup>, GOVRIN Eri Moshe<sup>1</sup>, LI Shi-dong<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China)

**Abstract:** This study was conducted to explore whether vegetable production could be improved by using *Bacillus velezensis* B006 agent in fertigation system. In a pot experiment, the eggplant seedlings were irrigated with *Bacillus* B006 suspension at a concentration of  $1 \times 10^7$  CFU·mL<sup>-1</sup> during transplantation. Seedling growth was investigated after 35 days growth. In a field trial, eggplant was fertigated automatically according to an electronic tensiometer in a greenhouse. Four treatments were designed by combining two levels of soil water potential at -30 kPa and -40 kPa with and without the *B. velezensis* B006 agent. Chemical fertilizer with N/P/K=17:9:34 was applied in each plot at

收稿日期:2020-01-15 录用日期:2020-04-16

作者简介:耿妍(1994—),女,河北张家口人,在读研究生,主要研究方向为资源利用与植物保护。E-mail:657160335@qq.com

\*通信作者:郭荣君 E-mail:guorj20150620@126.com;李世东 E-mail:sdli@ippcaas.cn

基金项目:中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-XTX2016015);宁夏回族自治区重点研发计划重大项目(2019BFF02006);内蒙古自治区科技重大专项(ZDZX2018009)

**Project supported:** Cooperative Innovation Project of Agricultural Science and Technology Innovation Program of CAAS (CAAS-XTX2016015); The Key Research and Development Plan of Ningxia Hui Autonomous Region (2019BFF02006); The Major Science and Technology Project of Inner Mongolia (ZDZX2018009)

278.77 kg·hm<sup>-2</sup>. The B006 agent was applied at  $1 \times 10^7$  CFU·mL<sup>-1</sup> during transplantation after 30 d. The results showed that application of B006 suspension during transplantation could promote seedlings growth in the pot experiment. The plant height, stem diameter, root length, and root dry weight of eggplant seedlings treated with *Bacillus* increased by 16.7%, 20.7%, 28.7% and 67.0%, respectively. In the field trial, soil chemical analysis indicated that available P and K contents in treatments with the B006 agent were much lower than those without-B006, and plant height, stem diameter, chlorophyll content, root length and root dry weight were enhanced 35 days after transplantation, suggesting that B006 might help eggplant absorb more P and K, and further improve the plant growth. Eggplant yields in the two B006 treatments were increased by 24.5% and 18.1%, respectively, in comparison with the two non-B006 treatments. When the irrigation amount was reduced from 804.88 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> to 574.91 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, no yield difference was observed between the two B006 treatments. In conclusion, B006 agent could enhance eggplant plants to absorb N, P, and K, and improve the utilization efficiency of fertilizer, and resulted in the increase of the plant growth and yield even under low-irrigation condition.

**Keywords:** soil water potential; *Bacillus* B006 agent; eggplant; growth promotion; fertilizer utilization

水分是植物赖以生存的基本条件。土壤水分含量、运行状况以及分布特性不仅直接影响植物的生长,也影响根际微生物的生存以及微生物与植物的互动<sup>[1]</sup>。近年来,不少学者研究了不同农作物的需水规律及其对作物生长的影响。马建辉等<sup>[2]</sup>研究表明,在保证设施番茄产量和节约用水的条件下,将土壤水势-30 kPa 作为膜下滴灌控制下限,有利于土壤结构的稳定。蒋树芳等<sup>[3]</sup>研究了不同水势对茄子生长与水分利用的影响,结果表明水势为-10~-50 kPa 时,不同生育期茄子平均株高无明显差异,但灌溉水利用效率随着土壤水势的降低明显升高,建议将土壤水势控制在-30 kPa 和-40 kPa 较为适宜。土壤水分影响植物根系的分布、形态特征以及吸水能力。土壤水分过高或过低均会对茄子生长产生抑制作用<sup>[4]</sup>。茄子植株对水分状况反应敏感,其生长量不随土壤含水量增加而增大<sup>[5]</sup>。弓萌萌等<sup>[6]</sup>研究发现红树莓“秋福”在苗期经历短期适度干旱可促进根系活力,干旱胁迫后再复水并不影响其生理指标的恢复,提示可在植物生长苗期适当少浇水。当表层土壤水分亏缺时,根向深层延伸,更有利于根系发育和对深层土壤水分的利用<sup>[7-8]</sup>。

土壤含水量不仅影响植物根系发育和分布,还可以改变植物-土壤-微生物间相互作用并调控微生物群落的构成,其中一些厚壁细菌可以更好地存活于干旱胁迫的土壤中<sup>[9-10]</sup>。如放线菌门和芽孢杆菌属丰度明显高于其他菌,这些菌群可能发挥重要的生态功能<sup>[11]</sup>。有关芽孢杆菌和放线菌等菌株的促生作用报道较多<sup>[12-14]</sup>。Grover 等<sup>[15]</sup>从高粱根际分离得到四株芽孢杆菌,其可促进植物生长并具有耐盐、耐高温和耐水分胁迫等特性。在缺水的情况下,一些根际促生细菌(PGPR)可通过产生胞外多糖(EPS)和挥发性物质<sup>[16-18]</sup>提高植物抗逆性能。周冬梅<sup>[19]</sup>报道有益菌产生的挥发

性有机化合物刺激了植物胆碱的合成,植物利用胆碱防止水分流失和维持细胞膨压而抵御逆境胁迫。

水肥一体化灌溉技术已经成为设施蔬菜生产中的重要灌溉方式之一,但是菜农缺乏节水节肥观念,化肥用量高,肥料利用率低(<30%)<sup>[20]</sup>。有关水肥一体化灌溉技术模式下微生物与土壤水势、植物生长以及产量之间的关系尚不明确。贝莱斯芽孢杆菌 B006 是一株高效生防菌株<sup>[21-22]</sup>,该菌生长迅速,具有防病促生功能,但在不同土壤水势条件下该菌株对植物根系发育、生长状况及土壤养分利用的影响尚不清楚。本研究通过盆栽试验进一步明确了芽孢杆菌 B006 菌剂抗缺水胁迫功能;在此基础上研究水肥一体化技术条件下,芽孢杆菌 B006 菌剂应用与土壤水势、植物对土壤中养分利用及植物生长之间的关系,明确少水灌溉时应用芽孢杆菌菌剂促生增产效果,以达到蔬菜优质高产同时减少不合理水肥投入的目标,为芽孢杆菌菌剂的合理应用及科学浇水施肥提供技术指导。

## 1 材料与方法

田间小区试验于北京市海淀区昌宁农庄日光温室进行;盆栽土壤取自北京市海淀区昌宁农庄日光温室大棚自然土,前茬作物为玉米。

### 1.1 试验材料

供试菌剂:贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*) B006 粉剂,参考王军强<sup>[23]</sup>的方法,在 500 L 发酵罐中发酵培养,管式离心机离心收集菌体,阴干后,得到干菌粉。活菌含量为  $1.5 \times 10^{11}$  CFU·g<sup>-1</sup>。

供试茄子品种:京茄黑霸,北京市昌宁农庄提供。

### 1.2 试验设计

#### 1.2.1 盆栽试验

在上口宽×高为 15 cm×15 cm 的花盆中进行盆栽

试验,测定芽孢杆菌 B006 菌剂对茄子的促生作用。试验中设置施用和不施用芽孢杆菌菌剂两个处理。每盆装土 1000 g,每处理 36 盆。将  $1.5 \times 10^{11}$  CFU·g<sup>-1</sup> 的芽孢杆菌 B006 菌剂稀释至  $1 \times 10^7$  CFU·mL<sup>-1</sup>[24],于茄子移栽时,每株幼苗根部浇灌 5 mL B006 菌剂稀释液,以不施用芽孢杆菌菌剂作为对照(CK)。每 2 d 浇一次水,每盆浇水量 150 mL,使土壤含水量保持在 20%~30% 之间。35 d 后,将两处理盆栽苗平分成两组,每组 18 盆。一组正常浇水,一组停止浇水,进行 7 d 缺水处理。

### 1.2.2 日光温室试验

参照文献[2-3],设置土壤水势为-30 kPa(正常灌溉)和-40 kPa(少水灌溉),研究两种土壤水势条件下施用和不施用 B006 菌剂处理对茄子生长和产量的影响。试验采用单因素随机区组交互试验设计,共 4 个处理(表 1)。分别在移栽时和定植后 30 d,每株苗浇灌 250 mL 浓度为  $1 \times 10^7$  CFU·mL<sup>-1</sup>[21]的 B006 菌剂稀释液。每处理重复 3 次,共 12 个小区。移栽前,施用生物有机肥 16 667.67 kg·hm<sup>-2</sup>作为基肥。分别在幼苗期、开花坐果期和盛果期追施水溶肥(N/P/K 为 17:9:34),每个处理苗期追肥量为 39.82 kg·hm<sup>-2</sup>;开花坐果期和盛果期追肥量合计为 238.95 kg·hm<sup>-2</sup>,全生长期共追施 4 次。4 个处理施用同等量的水溶肥。

试验共设 12 个小区,每小区面积为 8.3 m×4.0 m,温室两端设置宽 2.5 m 的保护区。茄子苗于 2019 年 4 月 24 日移栽定植。每小区 11 行,每行 9 株,行距 50 cm,株距 35 cm。每行使用 1 条滴灌带,滴头间距为 35 cm。根据茄子的生长特性,整个生育期分为幼苗期(2019 年 4 月 13 日—6 月 1 日)、开花坐果期(2019 年 6 月 1 日—7 月 1 日)、盛果期(2019 年 7 月 1 日—8 月 24 日),共 132 d。

移栽时,选取长势苗壮且一致的茄子幼苗进行定植栽培。采用电子张力计和水肥一体化自动灌溉系统分别进行土壤水势的监测和日常灌溉。茄子定植后于

每处理 25 cm 深处土层埋设电子张力计,与茄子植株水平距离为 10 cm。每次根据张力计读数指导灌溉,当土壤水势达到设定值时开始灌溉,土壤水势为-40 kPa 的两个处理中每次灌水时间约为 25 min,土壤水势为-30 kPa 的两个处理中每次灌水时间约为 30 min。

### 1.3 测试指标

#### 1.3.1 盆栽试验测试指标

土壤含水量的测定:烘干法[25]测定土壤含水量。用取土器在茄子植株周围挖取长×宽为 2 cm×2 cm 的上层 5 cm 土壤样品,从每处理随机选取 3 盆盆栽土,每盆作为一个样品,每个样品取 3 g 土壤放入 105 ℃ 恒温烘箱中烘干至恒质量,测定土壤含水量(%)。

植株生长指标测定:于移栽后 35 d,短期缺水处理前测定施用 B006 菌剂和对照处理中所有盆栽茄子苗的株高和茎粗。7 d 后测定正常浇水的两处理茄子根长和根干质量,停止浇水的两处理用于观察缺水时植株生长情况。

#### 1.3.2 日光温室试验测试指标

土壤理化性质检测:土壤含水量采用电子张力计(北京市霖雷科技有限公司)实时监测。分别于 2019 年 5 月 23 日、6 月 16 日、7 月 9 日和 7 月 16 日采集各处理土壤样品,进行土壤中营养元素的测定[26]:碱解扩散法测定土壤碱解氮含量;钼锑抗显色法测定土壤速效磷含量;NH<sub>4</sub>OAC 浸提、火焰光度计法测定土壤速效钾含量。

植株生长和产量测定:定植后 35 d 观察到各处理间植株生长存在差异,从每小区四角和中间五个方位各选取 2 行,每行随机挖取 4 株茄子幼苗,共 20 株苗进行生长指标的测定。用直尺测量植株的株高和茎粗,用 SPAD-502PLUS 便携式叶绿素测定仪(柯尼卡美能达控股公司)测量叶片的叶绿素含量(SPAD),烘干法测定地上部干质量。于定植后 50 d,每小区随机抽取 30 株,调查不同处理茄子的开花数。收获时,测定不同小区茄子质量,计算每个处理的平均产量,并计算每公顷产量。拉秧后,从每个小区约 30 cm 深度的耕层土壤内挖取 30 株茄子植株的根系,测量茄子根长和根干质量。

### 1.4 分析方法

采用 Excel 软件作图,采用 IBM SPSS Statistics 20 对实验数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 芽孢杆菌 B006 菌剂对盆栽茄子生长的影响

对施用和未施用 B006 菌剂的盆栽茄子幼苗的生

表 1 日光温室试验设计

Table 1 Experimental design of the field trial

| 处理<br>Treatments | 芽孢杆菌施用<br><i>Bacillus</i> application | 土壤水势<br>Soil water potential/<br>kPa | 实际灌水量<br>Irrigation amount/<br>m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> |
|------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| T-40             | 不施用菌剂                                 | -40                                  | 574.91                                                          |
| TB-40            | 施用 B006 菌剂                            | -40                                  | 574.91                                                          |
| T-30             | 不施用菌剂                                 | -30                                  | 804.88                                                          |
| TB-30            | 施用 B006 菌剂                            | -30                                  | 804.88                                                          |



长指标进行统计分析,结果见图 1。芽孢杆菌 B006 菌剂对茄子苗期生长具有促进作用。施用 B006 菌剂后,茄子幼苗株高、茎粗、根长、根干质量比对照分别提高了 16.7%、20.7%、28.7% 和 67.0%,与对照差异显著( $P<0.05$ )。

正常浇水处理组中,空白对照和 B006 菌剂处理的茄子植株周围 5 cm 土层的土壤含水率分别为  $30.1\% \pm 0.7\%$  和  $28.0\% \pm 1.1\%$ ,两处理之间差异不显著( $P>0.05$ )。缺水处理组中,空白对照和 B006 菌剂处理的土壤含水率分别为  $3.1\% \pm 0.3\%$  和  $3.2\% \pm 0.7\%$ ,两处理之间土壤含水量差异也不显著( $P>0.05$ )。缺水处理后,对照中茄子萎蔫程度比施用 B006 菌剂处理更为严重(图 2),说明在土壤缺水时,施用芽孢杆菌 B006 菌剂可以提高茄子幼苗对缺水胁迫的耐受能力。

2.2 日光温室试验各处理土壤养分动态变化

在茄子不同生育期,各处理的土壤养分变化见表 2。从不同时期的土壤碱解氮含量来看,两个未施用菌剂的对照处理中,少水灌溉 T-40 处理比正常灌溉 T-30 处理土壤中碱解氮含量高,且均存在显著差异( $P<0.05$ ),表明少水灌溉不利于植株对土壤中氮的吸收。少水灌溉条件下,施用 B006 菌剂 TB-40 处理比

对照 T-40 土壤中碱解氮含量降低,在幼苗期和盛果早、中、后期差异均显著( $P<0.05$ );但在正常灌溉条件下,施用 B006 菌剂 TB-30 与对照 T-30 土壤中碱解氮含量总体上差异不显著。该结果说明芽孢杆菌在土壤水势较低的情况下,可帮助植物吸收土壤中的氮元素。从不同时期土壤速效磷含量和土壤速效钾含量来看,施用芽孢杆菌菌剂两处理中土壤速效磷的含量较为稳定,在盛果早期和中期与对照差异显著( $P<$

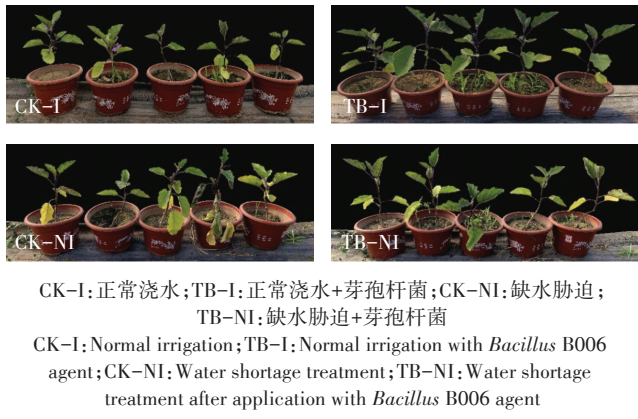
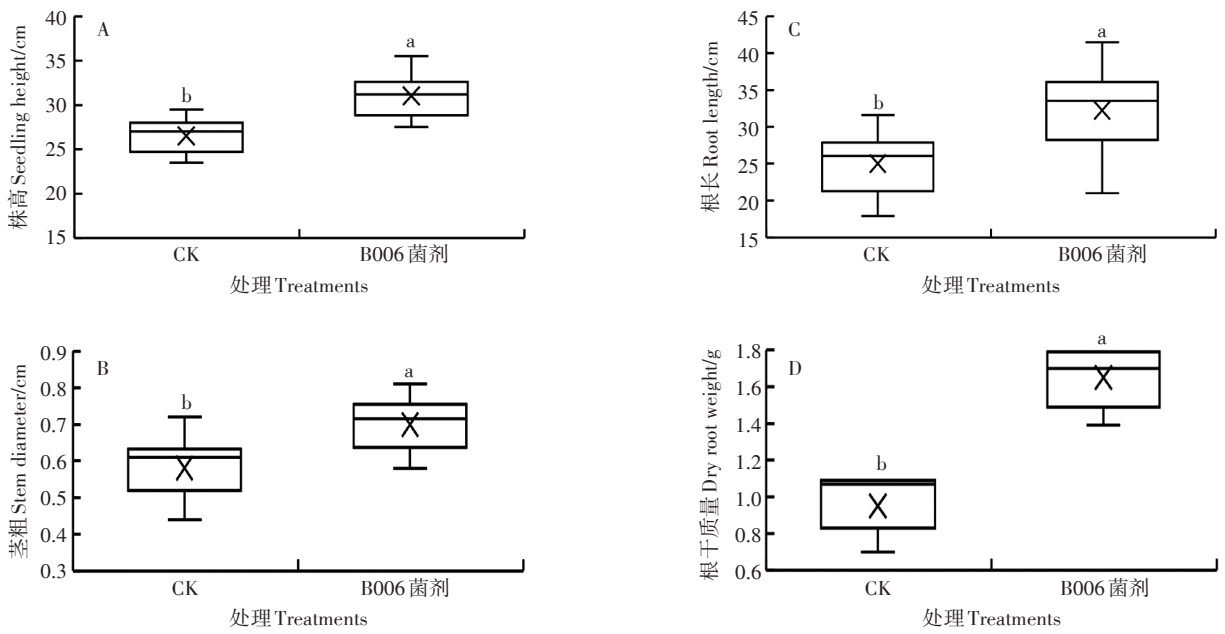


图2 芽孢杆菌 B006 菌剂对茄子幼苗缺水耐受能力的提升作用  
Figure 2 Improvement of *Bacillus* B006 agent on the tolerance of eggplant seedlings under 7 day water deficit



不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )  
Different lowercase letters above the columns indicate significant difference between treatments( $P<0.05$ )

图1 芽孢杆菌 B006 菌剂对茄子幼苗的促生作用

Figure 1 Growth promotion of eggplant seedlings by *Bacillus* B006 agent

表2 芽孢杆菌 B006 菌剂对茄子不同生长期土壤养分的影响

Table 2 Effect of *Bacillus* B006 agent on the available soil nutrients at different growth stages of eggplants

| 生长期<br>Growth stage                                    | 处理<br>Treatments | 碱解氮<br>Available nitrogen/mg·kg <sup>-1</sup> | 速效磷<br>Available phosphorus/mg·kg <sup>-1</sup> | 速效钾<br>Available potassium/mg·kg <sup>-1</sup> |
|--------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 幼苗期<br>Seedling stage<br>(2019-04-28)                  | T-40             | 56.00±1.80a                                   | 37.50±0.50c                                     | 288.00±8.66a                                   |
|                                                        | TB-40            | 50.25±0.35b                                   | 40.00±0.44b                                     | 285.67±10.69a                                  |
|                                                        | T-30             | 51.00±2.25b                                   | 42.50±0.50a                                     | 289.33±1.53a                                   |
|                                                        | TB-30            | 50.25±2.01b                                   | 40.00±1.00b                                     | 285.00±8.54a                                   |
| 开花坐果期<br>Flowering fruit-bearing stage<br>(2019-06-15) | T-40             | 58.00±2.02a                                   | 40.00±0.87b                                     | 302.33±8.74a                                   |
|                                                        | TB-40            | 56.50±1.31ab                                  | 39.00±0.87b                                     | 300.00±4.36a                                   |
|                                                        | T-30             | 53.00±1.17c                                   | 45.00±1.00a                                     | 305.00±5.57a                                   |
|                                                        | TB-30            | 54.50±1.13bc                                  | 39.50±1.18b                                     | 299.00±9.54a                                   |
| 盛果早期<br>Early full fruit stage<br>(2019-07-08)         | T-40             | 71.75±0.75a                                   | 43.00±1.00b                                     | 328.00±8.00a                                   |
|                                                        | TB-40            | 64.75±0.85b                                   | 39.50±0.50c                                     | 312.67±20.98a                                  |
|                                                        | T-30             | 57.75±1.18c                                   | 50.00±1.80a                                     | 329.33±15.14a                                  |
|                                                        | TB-30            | 64.75±0.73b                                   | 40.00±0.96c                                     | 320.67±8.14a                                   |
| 盛果中期<br>Middle full fruit stage<br>(2019-07-15)        | T-40             | 40.25±0.52a                                   | 46.00±0.51a                                     | 411.33±11.5a                                   |
|                                                        | TB-40            | 36.50±1.18b                                   | 37.00±1.32c                                     | 315.33±5.13b                                   |
|                                                        | T-30             | 35.00±1.00b                                   | 41.00±1.11b                                     | 281.67±8.02c                                   |
|                                                        | TB-30            | 35.00±0.50b                                   | 36.00±0.50c                                     | 280.67±10.02c                                  |
| 盛果后期<br>Late full fruit stage<br>(2019-07-23)          | T-40             | 36.75±0.43a                                   | 45.50±0.44a                                     | 452.00±3.61a                                   |
|                                                        | TB-40            | 31.50±0.50b                                   | 36.50±0.50b                                     | 296.33±7.09c                                   |
|                                                        | T-30             | 26.25±0.57c                                   | 36.50±1.48b                                     | 382.67±7.02b                                   |
|                                                        | TB-30            | 31.50±0.70b                                   | 38.00±1.21b                                     | 278.00±3.61d                                   |

注:同一生育期内不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Notes: The different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the same growth stage ( $P<0.05$ ). The same below.

0.05);施用芽孢杆菌菌剂处理中土壤速效钾含量在茄子幼苗期到盛果早期与对照无显著差异,但在盛果中、后期TB-40处理的土壤速效钾含量与对照相比分别显著下降了23.3%和34.4% ( $P<0.05$ ),而且比TB-30处理中土壤速效钾含量降幅明显,说明施用芽孢杆菌菌剂利于茄子对磷、钾元素的吸收。总之,在少水灌溉条件下,芽孢杆菌B006菌剂有助于植物对土壤中氮、磷、钾营养元素的吸收。

### 2.3 芽孢杆菌 B006 菌剂对茄子植株生长发育影响

在定植后35 d测定了茄子的株高、茎粗、叶绿素含量和地上部干质量等生物量指标(表3)。施用芽孢杆菌B006菌剂的两个处理中茄子株高和茎粗比对照分别增加了13.8%、12.4%和14.3%、7.8%,差异显著( $P<0.1$ );正常灌溉且施用菌剂的TB-30处理中茄子叶绿素含量、地上部干质量和开花数与对照T-30差异不显著,与少水灌溉且施用菌剂的处理TB-40相比差异也不显著,但与少水灌溉对照T-40相比差异显著( $P<0.1$ )。TB-30处理的叶绿素含量、地上部干质量和开花数比T-40处理分别增加47.1%、31.0%和

40.6%。上述结果说明在少水灌溉条件下,芽孢杆菌B006菌剂可缓解缺水所造成的植株生长受限,促进其生长,使其达到甚至超过正常浇水施肥时植株的生长水平。正常灌水条件可使芽孢杆菌的促生作用得到更好的发挥。

### 2.4 芽孢杆菌 B006 菌剂对茄子根系生长及产量的影响

在茄子拉秧时对根系生长情况的调查结果(图3)表明,少水灌溉处理T-40与正常灌溉处理T-30相比,茄子根长、根干质量差异不显著。施用B006菌剂可促进茄子根系生长,TB-40和TB-30两处理的茄子根长和根干质量均显著高于其对照( $P<0.1$ ),但两者之间差异不显著。

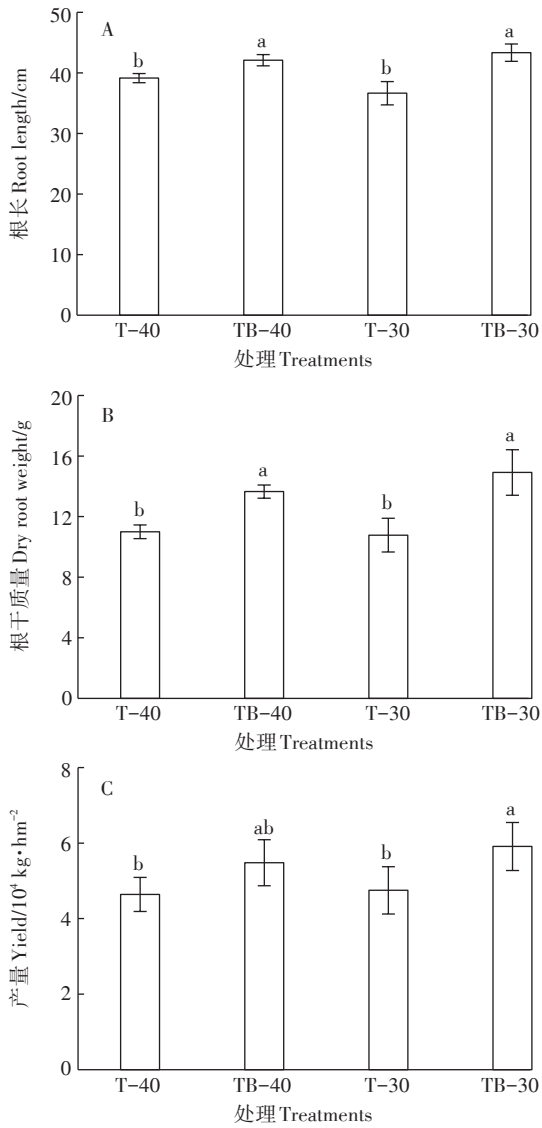
对不同处理茄子产量的调查结果(图3)表明,正常灌溉并施用B006菌剂的TB-30处理产量最高,平均产量为59 091.2 kg·hm<sup>-2</sup>,比对照T-30产量增加24.5%,差异显著( $P<0.1$ );少水灌溉并施用B006菌剂处理TB-40的平均产量为54 790.9 kg·hm<sup>-2</sup>,比对照T-40增产18.1%;施用B006菌剂两处理的灌溉量从804.88 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>减少到574.91 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,但产量差异不

表 3 不同浇水条件下芽孢杆菌 B006 菌剂对茄子生长发育的影响

Table 3 Effect of *Bacillus* B006 agent on the growth and development of eggplant under different water conditions

| 处理<br>Treatments | 株高<br>Seedling height/cm | 茎粗<br>Stem diameter/cm | 叶绿素含量<br>Chlorophyll content (SPAD) | 地上部干质量/g·株 <sup>-1</sup><br>Dry weight of above ground plants/g·plant <sup>-1</sup> | 开花数<br>Flower number |
|------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| T-40             | 32.10±3.41b              | 0.49±0.01b             | 77.45±14.87b                        | 3.48±0.43b                                                                          | 7.58±1.89b           |
| TB-40            | 36.54±0.98a              | 0.56±0.03a             | 83.22±17.54ab                       | 4.43±0.10a                                                                          | 9.55±0.88ab          |
| T-30             | 32.91±0.64b              | 0.51±0.01b             | 92.65±15.14ab                       | 4.06±0.43ab                                                                         | 10.09±0.79a          |
| TB-30            | 37.00±0.61a              | 0.55±0.03a             | 113.92±15.81a                       | 4.56±0.52a                                                                          | 10.66±1.73a          |

注:同列不同字母表示处理间差异显著( $P<0.1$ )。  
Note: The different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ( $P<0.1$ ).



不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.1$ )  
Different lowercase letters above the columns indicate significant difference among treatments ( $P<0.1$ )

图 3 芽孢杆菌 B006 菌剂对茄子根长、根干质量及产量的影响  
Figure 3 Effect of *Bacillus* B006 agent on root length, dry root weight and yield of eggplants

显著( $P>0.1$ )。上述结果表明少水灌溉条件下施用芽孢杆菌 B006 菌剂仍可促进植株生长,且不降低产量,在土壤水势为-30 kPa 时进行灌溉并施用芽孢杆菌 B006 菌剂可进一步促进茄子生长并提高产量。

3 讨论

蔬菜在生长过程中对水分和营养的需求并不是恒定的,如何科学管理水、肥用量并提高作物产量对设施蔬菜生产具有重要意义。邢英英等<sup>[27]</sup>研究表明不合理的灌溉与氮肥施用不仅不能增加产量,反而会增加土壤剖面硝态氮累积、降低作物品质,而减水减肥能有效提高肥料利用率<sup>[28-29]</sup>。有益微生物不仅能通过植物互作促进肥料的使用效率<sup>[30]</sup>,而且其所制成的微生物肥与化肥减量配施还可提高土壤微生物数量并改善土壤肥力<sup>[31]</sup>。本研究将水肥一体化技术与有益微生物制剂应用相结合,以土壤水势指导浇水时间和浇水量,发现芽孢杆菌 B006 菌剂能够促进茄子的根系生长并具增产效果,使少水条件下产量达到正常浇水的产量水平,为水肥一体化条件下合理灌溉和应用芽孢杆菌提供了指导。为了减少肥料投入,在茄子不同生育期使用了不同的追肥量,开花坐果期和盛果期追肥量是苗期追肥量的 6 倍,然而花果期土壤中的养分含量远远低于苗期,说明茄子在苗期需要的肥料量很少,与前人研究结果一致<sup>[32]</sup>,提示在作物苗期应减少追肥用量。

灌水量不仅影响植物根系在土壤中的分布,还与土壤中营养元素相互作用,最终影响产量。赵俊芳等<sup>[33]</sup>研究发现较少灌水更利于早稻根系向中下层土壤分布,根冠比增加,利于早稻对土壤深层水的利用,从而减少灌溉水的投入。Zhang 等<sup>[34]</sup>研究表明,不同作物或同种作物的不同品种对水分和氮素的营养需求不同,低土壤含水量(土壤水势-20 kPa)和中等水平施氮量适于早稻,而高土壤含水量(土壤水势 0

kPa)和低水平施氮量更适合水稻生长和根系发育,这与旱稻和水稻根系在土壤中的分布有关。旱稻根系主要分布于10~20 cm耕作层,而水稻根系主要分布于0~5 cm耕作层。因此确定适宜的土壤水势和施肥量,既可避免水分和氮素营养的过多投入又可增产,在生产中具有重要的意义。本研究采用的土壤水势-30 kPa和-40 kPa是比较适合茄子生长的用水量<sup>[2-3]</sup>,在这两种土壤水势条件下,茄子根系生长差异不显著,但使用B006菌剂可明显促进茄子根系发育,根长和根干质量增加,说明根系向土壤深层伸展可帮助茄子更好地利用深层土壤的养分和水分<sup>[33,35]</sup>。虽然本研究中所有处理的土壤施肥量和追肥量相同,但应用芽孢杆菌的土壤中可溶性磷、钾含量减少,氮含量略高于对照,而植株生长并未受到影响,其生长和开花、结实还有明显的提升(表3),因此认为,芽孢杆菌的应用首先促进了根系的生长及其对土壤深层养分的利用,是芽孢杆菌促进植物生长的重要原因。土壤中氮元素增多可能是由于土壤中氮素营养供应过多,远远超出茄子本身需求量,而造成土壤中碱解氮略有升高。芽孢杆菌B006菌剂应用与植物对土壤中营养元素利用效率之间的相关性还需要进一步研究。

植物耐受缺水胁迫的能力可以通过叶片水势、光合作用、气孔导度、蒸腾速率和叶面积指数等生理指标来反映<sup>[36]</sup>,本研究盆栽试验验证了芽孢杆菌B006菌剂能够提高茄子对短期缺水的耐受能力。在田间小区试验中,监测土壤灌水量所采用的土壤水势-30 kPa和-40 kPa,是比较适合茄子生长的土壤水势,其是否影响上述生理指标,尚需进一步研究。B006菌剂的应用提高了茄子叶片中叶绿素含量,可能增加了叶片的光合作用效率,进而影响植株生长及产量。此外,前人研究认为芽孢杆菌或其他微生物产生的代谢物是有益菌的重要促生机理<sup>[37-38]</sup>。芽孢杆菌B006具有编码IAA(吲哚乙酸)产生的基因簇<sup>[22]</sup>,并可产生IAA(待发表),IAA的产生可能直接促进茄子的根系发育,使其可以从深层土壤吸收更多的水分和养分;IAA也可能促进植株的光合效率,或通过影响根系水压、调节植物根系水分运输<sup>[39]</sup>来促进植物的生长。有关B006菌剂对茄子的促生机理还需要深入研究。

综上所述,芽孢杆菌B006菌剂在不同土壤水势下均能促进茄子根系生长,并能增强根系对土壤中营养元素的吸收利用,未来将进一步明确土壤水势、肥料用量与芽孢杆菌用量之间是否存在互作或协同作

用,以及通过何种途径调控植物生长,为水、肥及有益微生物的利用提供理论基础。

## 4 结论

(1)施用芽孢杆菌B006菌剂可以促进茄子对氮、磷、钾的吸收,提高肥料利用率。

(2)芽孢杆菌B006菌剂对茄子苗期生长有明显的促生作用,并能提高茄子幼苗对短期缺水的耐受能力。

(3)正常浇水并施用芽孢杆菌B006菌剂可显著促进茄子生长并提高产量。少水灌溉并增施芽孢杆菌B006菌剂可以缓解因缺水所造成的植株生长受限。

## 参考文献:

- [1] 姚小英,王澄海,蒲金涌,等.甘肃黄土高原地区土壤水热特征分析研究[J].土壤通报,2006,37(4):666-670.  
YAO Xiao-ying, WANG Cheng-hai, PU Jin-yong, et al. Hydro-thermal feature of soil in the Loess Plateau, Gansu[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4):666-670.
- [2] 马建辉,叶旭红,韩冰,等.膜下滴灌不同灌水控制下限对设施土壤团聚体分布特征的影响[J].中国农业科学,2017,50(18):3561-3571.  
MA Jian-hui, YE Xu-hong, HAN Bing, et al. Effects of different controlled irrigation low limits on the size distribution of soil aggregates with drip irrigation under film mulching in a greenhouse soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(18):3561-3571.
- [3] 蒋树芳,万书勤,康跃虎.滴灌条件下不同土壤基质势对圆茄子生长与水分利用的影响[J].灌溉排水学报,2009,28(4):66-69.  
JIANG Shu-fang, WAN Shu-qin, KANG Yue-hu. Effects of soil matrix potential on eggplant growth and water use efficiency under drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(4):66-69.
- [4] 全国栋,刘洪禄,吴文勇,等.不同水分处理对茄子生长与产量品质的影响[J].排灌机械工程学报,2013,31(6):540-545.  
TONG Guo-dong, LIU Hong-lu, WU Wen-yong, et al. Effects of different water treatments on growth, yield and quality of greenhouse eggplant[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(6):540-545.
- [5] 陈修斌,杨彬,闫芳,等.不同土壤含水量对日光温室茄子生长及生理特性影响[J].土壤通报,2009,40(2):231-234.  
CHEN Xiu-bin, YANG Bin, YAN Fang, et al. Effect of different soil moistures on growth and physiological characteristics of solar greenhouse spring eggplant during fruit stage[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(2):231-234.
- [6] 弓萌萌,张培雁,张瑞禹,等.干旱胁迫及复水处理对‘秋福’红树莓苗期生理特性的影响[J].经济林研究,2019,37(1):94-99.  
GONG Meng-meng, ZHANG Pei-yan, ZHANG Rui-yu, et al. Effects of drought stress and re-watering treatment on physiological characteristics in ‘Autumn Bliss’ *Rubus idaeus* seedlings[J]. *Nonwood Forest Re-*



- search, 2019, 37(1):94-99.
- [7] Potters G, Pasternak T P, Guisez Y, et al. Stress-induced morphogenic responses: Growing out of trouble[J]. *Trends in Plant Science*, 2007, 12(3):98-105.
- [8] Pasternak T, Rudas V, Potters G, et al. Morphogenic effects of abiotic stress: Reorientation of growth in *Arabidopsis thaliana* seedlings[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 53(3):299-314.
- [9] Na X F, Yu H L, Wang P, et al. Vegetation biomass and soil moisture co-regulate bacterial community succession under altered precipitation regimes in a desert steppe in northwestern China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 136:107520.
- [10] Santos-Medellín C, Edwards J, Liechty Z, et al. Drought stress results in a compartment-specific restructuring of the rice root-associated microbiomes[J]. *mBio*, 2017, 8(4):e00764-17.
- [11] Nessner K V, Taketani R G, Lanconi M D, et al. Water regime influences bulk soil and rhizosphere of *Cereus jamacaru* bacterial communities in the Brazilian Caatinga biome[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(9):e0073606.
- [12] Ahemad M, Kibret M. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective[J]. *Journal of King Saud University: Science*, 2014, 26(1):1-20.
- [13] Fahad S, Hussan S, Bano A, et al. Potential role of phytohormones and plant growth-promoting rhizobacteria in abiotic stresses: Consequences for changing environment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(7):4907-4921.
- [14] Vejan P, Abdullah R, Khadiran T, et al. Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability: A review[J]. *Molecules*, 2016, 21(5):e573.
- [15] Grover M, Madhubala R, Ali S Z, et al. Influence of *Bacillus* spp. strains on seedling growth and physiological parameters of sorghum under moisture stress conditions[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2014, 54(9):951-961.
- [16] García J E, Maroniche G, Creus C, et al. In vitro PGPR properties and osmotic tolerance of different *Azospirillum* native strains and their effects on growth of maize under drought stress[J]. *Microbiological Research*, 2017, 202:21-29.
- [17] Sandhya V, Ali S Z, Grover M, et al. Alleviation of drought stress effects in sunflower seedlings by the exopolysaccharides producing *Pseudomonas putida* strain GAP-P45[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2009, 46(1):17-26.
- [18] Cho S M, Kang B R, Han S H, et al. 2R, 3R-butanediol, a bacterial volatile produced by *Pseudomonas chlororaphis* O6, is involved in induction of systemic tolerance to drought in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2008, 21(8):1067-1075.
- [19] 周冬梅. 植物-微生物互作提高植物抗生物和非生物胁迫能力的机理研究及应用[D]. 南京:南京农业大学, 2015:16-18.
- ZHOU Dong-mei. Plant-microbe interactions to improve plant resistance to biotic and abiotic stresses[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015:16-18.
- [20] 王俊霞. 水肥一体化在日光温室中的应用[J]. 农业技术与装备, 2011(13):68-70.
- WANG Jun-xia. Application of water and fertilizer integration in solar greenhouse[J]. *Agricultural Technology and Equipment*, 2011(13):68-70.
- [21] 贾珂, 李世东, 刘桂君, 等. 枯草芽孢杆菌B006产surfactin突变株特性及其对黄瓜枯萎病的抑制能力[J]. 中国生物防治学报, 2013, 29(4):538-546.
- JIA Ke, LI Shi-dong, LIU Gui-jun, et al. Characteristics of surfactin mutants of *Bacillus subtilis* B006 and their suppressing ability against cucumber *Fusarium* wilt[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2013, 29(4):538-546.
- [22] Gao Y H, Guo R J, Li S D. Draft genome sequence of *Bacillus velezensis* B6, a rhizobacterium that can control plant diseases[J]. *Genome Announcements*, 2018, 6(12):e00182-18.
- [23] 王军强. 枯草芽孢杆菌B006的发酵工艺优化及其代谢组学研究[D]. 连云港:江苏海洋大学, 2017:10-12.
- WANG Jun-qiang. Optimization of fermentation process and metabolomics of *Bacillus subtilis* B006[D]. Lianyungang: Jiangsu Ocean University, 2017:10-12.
- [24] 马海莲, 刘会清, 郭荣军, 等. 芽孢杆菌在棚室黄瓜育苗上的应用研究[J]. 北方园艺, 2011(23):33-34.
- MA Hai-lian, LIU Hui-qing, GUO Rong-jun, et al. Study on applications of bio-control *Bacillus* on cucumber seeding in greenhouse[J]. *Northern Horticulture*, 2011(23):33-34.
- [25] 郭焱, 于红博. 土壤含水量测定方法综述[J]. 内蒙古科技与经济, 2018(3):66-67.
- GUO Tao, YU Hong-bo. Review of methods for measuring soil water content[J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2018(3):66-67.
- [26] 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, 2000:127-136.
- LU Ru-kun. Chemical analysis method of soil agriculture[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:127-136.
- [27] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4):713-726.
- XING Ying-ying, ZHANG Fu-cang, ZHANG Yan, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4):713-726.
- [28] 邹慧芳, 李丽君, 刘平, 等. 减水减肥条件下温室黄瓜产量、养分吸收情况[J]. 山西农业科学, 2019, 47(3):393-397.
- ZOU Hui-fang, LI Li-jun, LIU Ping, et al. Study on cucumber yield and nutrient uptake under reduced irrigation and fertilization[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(3):393-397.
- [29] 罗勤, 陈竹君, 闫波, 等. 水肥减量对日光温室土壤水分状况及番茄产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2):449-457.
- LUO Qin, CHEN Zhu-jun, YAN Bo, et al. Effects of reducing water and fertilizer rates on soil moisture and yield and quality of tomato in solar greenhouse[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2):449-457.
- [30] Adesemoye A O, Kloepper J W. Plant-microbes interactions in en-

- hanced fertilizer-use efficiency[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, 85(1):1-12.
- [31] 赵政, 陈巍, 王欢, 等. 木霉微生物肥与减量化肥配施对番茄产量、品质及土壤肥力的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(5):1243-1253.  
ZHAO Zheng, CHEN Wei, WANG Huan, et al. Effects of bio-manure combined with chemical fertilizer reduced in application rate on soil fertility and yield and quality of tomato[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(5):1243-1253.
- [32] 杜健宇, 夏春婷, 左秀丽. 茄子需肥特点及施肥[J]. *河北农业科技*, 2007(7):47.  
DU Jian-yu, XIA Chun-ting, ZUO Xiu-li. Characteristics and fertilization of eggplant[J]. *Hebei Agricultural Science and Technology*, 2007(7):47.
- [33] 赵俊芳, 杨晓光, 陈斌, 等. 不同灌溉处理对旱稻根系生长及水分利用效率的影响[J]. *中国农业气象*, 2004, 25(4):44-48.  
ZHAO Jun-fang, YANG Xiao-guang, CHEN Bin, et al. Effects of different irrigation treatments on root growth and water use efficiency of upland rice[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2004, 25(4):44-48.
- [34] Zhang Y J, Xu J N, Cheng Y D, et al. The effects of water and nitrogen on the roots and yield of upland and paddy rice[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(5):1363-1374.
- [35] Wang X B, Zhou B Y, Sun X F, et al. Soil tillage management affects maize grain yield by regulating spatial distribution coordination of roots, soil moisture and nitrogen status[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(6):e0129231.
- [36] 饶玲. 不同外源硒对干旱胁迫下黄瓜生长的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2017:1-6.  
RAO Ling. Effects of exogenous selenium on the growth of cucumber under drought stress[D]. Chongqing: Southwest University, 2017:1-6.
- [37] Liu Y P, Chen L, Wu G W, et al. Identification of root-secreted compounds involved in the communication between cucumber, the beneficial *Bacillus amyloliquefaciens*, and the soil-borne pathogen *Fusarium oxysporum*[J]. *Mol Plant Microbe Interact*, 2017, 30(1):53-62.
- [38] Kokalis-Burelle N, Kloepper J W, Reddy M S. Plant growth-promoting rhizobacteria as transplant amendments and their effects on indigenous rhizosphere microorganisms[J]. *Applied Soil Ecology*, 2005, 31(1):91-100.
- [39] Quiroga G, Erice G, Aroca R, et al. Radial water transport in arbuscular mycorrhizal maize plants under drought stress conditions is affected by indole-acetic acid (IAA) application[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2020:246/247:e153115.