doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.032

夏季黄瓜穴盘育苗施用甲基营养型芽孢杆菌的效果分析

胡晓辉[1,2]　王君正[1,2]　彭铁梨[1,2]　袁路乔[1]

(1. 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部西北设施园艺工程重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探究甲基营养型芽孢杆菌对高温季节黄瓜穴盘育苗效果和基质酶活性的影响,筛选出适宜黄瓜穴盘育苗的菌剂用量,以博耐 526、津优 1 号和西蔬-131 共 3 个品种的黄瓜为供试材料,研究了不同菌剂用量(0、0.25、0.50、0.75 g/株,分别记为 CK、T1、T2 和 T3)对夏季高温环境下穴盘育黄瓜秧苗形态指标、生物量、根系生长、壮苗指数、生长函数和基质酶活性等指标的影响,分析了基质酶活性与秧苗生理和生长指标的相关性。结果表明,随菌剂用量的增加,3 个品种黄瓜秧苗的形态指标、生物量、根系生长指标(除根直径外)、壮苗指数和生长函数均呈先升后降趋势;T2 处理的秧苗质量最佳,该处理的博耐 526、津优 1 号和西蔬-131 秧苗的壮苗指数分别较 CK 提高了 77.8%、108.3% 和 63.6%,生长函数分别提高了 183.3%、177.8% 和 133.3%,根系长度较 CK 分别提高了 105.6%、72.4% 和 75.5%,根表面积分别提高了 174.9%、111.4% 和 122.2%,根体积分别提高了 212.0%、137.8% 和 156.3%,根尖数分别提高了 108.9%、58.6% 和 64.6%。而根直径、叶绿素含量和基质酶活性(脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶)则表现出随菌剂用量增加而增加的趋势。脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均与叶绿素总量呈极显著正相关($P<0.01$),蔗糖酶活性还与根系活力、根干质量呈极显著正相关($P<0.01$),并与根长、根表面积、根体积、根直径均表现出显著正相关性($P<0.05$),过氧化氢酶活性还与根干质量、根表面积、根体积、根直径表现出正相关性($P<0.05$)。考虑菌剂对黄瓜秧苗生长发育、成苗质量和基质酶活性的综合影响,按 0.5 g/株向育苗基质中添加甲基营养型芽孢杆菌菌剂(5×10^{10} CFU/g)是本试验条件下夏季黄瓜穴盘育苗较优的施用量。本研究结果可为陕西关中地区及类似气候区域夏季高温期黄瓜穴盘育苗生产提供参考。

关键词: 黄瓜; 夏季高温; 穴盘育苗; 壮苗; 基质酶; 甲基营养型芽孢杆菌

中图分类号: S359.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)09-0284-10　　**OSID**:

Effect of *Bacillus methylotrophicus* on Cucumber Acupoint Plate Seedling in Summer

HU Xiaohui[1,2]　WANG Junzheng[1,2]　PENG Tieli[1,2]　YUAN Luqiao[1]

(1. *College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *Key Laboratory of Protected Horticultural Engineering in Northwest, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: In order to explore the effects of *Bacillus methylotrophicus* agent on cucumber seedling nursing and substrate enzyme activities under high temperature season, and obtain the optimal content, Bonai 526, Jinyou 1 and Xishu-131 were chosen as materials, the effects of different dosages of bacteria agent (0 g/plant, 0.25 g/plant, 0.50 g/plant and 0.75 g/plant, labeled as CK, T1, T2 and T3, respectively) on the growth physiological indexes of cucumber seedlings and the substrate enzyme activities in high temperature environment were measured, and the correlation between substrate enzyme activities and growth physiological indexes was analyzed. The results showed that the biomass, root growth rates (except root diameter), seedling index and *G* value (the growth rate of the daily average dry mass) of three kinds of cucumber seedlings were increased first and then decreased with the increase of the dosage. Compared with CK, T2 treatment significantly improved the seedling indexes of Bonai 526, Jinyou 1 and Xishu-131 by 77.8%, 108.3% and 63.6%, respectively, the *G* value were significantly improved by 183.3%, 177.8% and 133.3%, respectively, the root length were significantly improved

收稿日期: 2019-12-27　修回日期: 2020-01-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1001902)、陕西省科技计划项目(2018TSCXL-NY-05-01)和西北农林科技大学试验示范站(基地)科技创新与成果转化项目

作者简介: 胡晓辉(1977—),女,教授,博士生导师,主要从事设施园艺研究,E-mail: hxh1977@163.com

by 105.6%, 72.4% and 75.5%, root surface area were significantly improved by 174.9%, 111.4% and 122.2%, root volume were significantly improved by 212.0%, 137.8% and 156.3%, and root tip number of seedlings were significantly improved by 108.9%, 58.6% and 64.6%, respectively. The root diameter, chlorophyll content and activities of substrate enzyme (including urease, sucrase and catalase) were increased with the increase of the dosage of bacteria agent. It was noteworthy that three kinds of substrate enzyme activities had a significant positive correlation with contents of chlorophyll ($P<0.01$). In addition, remarkably significant correlation was found between sucrase activity and the indexes of root activity and dry weight ($P<0.01$). Sucrase and catalase were both significantly correlated with root surface area, root volume and root diameter ($P<0.05$). In conclusion, taking consideration of growth physiological indexes, seedling quality and substrate enzyme activies, adding *Bacillus methylotrophicus* agent to the substrate at 0.5 g/plant (T2) level was the preferable treatments, the results can provide theoretical support for cucumber seedling raising during summer high temperature period in Guanzhong region of Shaanxi Province.

Key words: cucumber; summer high temperature; acupoint plate seedling; strong seedling; substrate enzyme; *Bacillus methylotrophicus*

0　引言

工厂化育苗是指在温室等设施内,以穴盘作为育苗容器,将蛭石、珍珠岩及草炭等不同基质按比例复配作为育苗基质,在适宜的环境下培育出生长旺盛、质量良好的秧苗,最终达到一次性成苗的现代化、工厂化、规模化的育苗体系[1],是我国现代育苗的主要方式[2]。目前,我国西北地区育苗设施结构较为简单,环境控制能力弱,夏季生产常遭遇高温胁迫[3]。研究表明,高温胁迫造成秧苗根系生长受到抑制、植株生长缓慢[4-5]、生物量降低、成苗质量下降[6-7],而成苗质量最终会影响作物产量和品质[8]。在高温环境下,不仅通过影响作物的光合作用、呼吸作用、细胞分裂和伸长等过程抑制其生长发育及产量形成[9-11],而且还会降低作物栽培介质中脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶等酶活性[12]。而基质酶是评价根际环境质量与肥力水平的重要生物学指标之一,在基质元素转化过程中发挥着重要作用。

微生物是反映栽培介质活性和营养转化能力的指标之一,不仅可以分解有机质、转化土壤元素形态,进而利于植物吸收,如固氮、解磷等[13-14],还可定殖于植株根际或其周围形成优势菌群[15],直接合成 IAA、GA 等对植物生长发育有直接作用的调节物质,促进植物生长[16-17],或直接分泌代谢产物,防止通过土传病虫害[18-19]等途径参与和影响作物的生产过程。基于有益微生物的特殊功能及环境友好的特点,人工培植的微生物菌群经加工制成的微生物活菌制剂应运而生。甲基营养型芽孢杆菌(*B. methylotrophicus*)是 MUNUSAMY 等[20]于 2010 年从水稻根际土壤中分离获得并确认其为芽孢杆菌属的一个新种。目前国内外关于甲基营养型芽孢杆菌的研究主要集中于对黄瓜炭疽病、枯萎病、葡萄霜霉病等病害的防治及作用机理研究[21-22],其对作物生长及对根际环境的影响却鲜见报道。

同时,关于缓解和解除高温胁迫的研究多集中于对设施条件的改造和管理技术的提升[23-24]以及精胺、亚精胺、水杨酸等外源物质的应用[25-26]方面。关于利用微生物制剂促进作物生长、提高产量和品质的研究多在作物适生环境条件下进行[13-17],而关于甲基营养型芽孢杆菌对促生壮苗及利用微生物菌剂等生物制剂缓解高温对秧苗胁迫伤害的研究却鲜有报道。本研究基于黄瓜穴盘育苗试验,采用拌基质方式将甲基营养型芽孢杆菌微生物菌剂应用于夏季黄瓜育苗中,将甲基营养型芽孢杆菌与促生壮苗、元素形态转化和缓解高温胁迫相结合,通过测定秧苗形态和生理指标、根系生长指标、壮苗指数、生长函数和基质酶活性等,探究甲基营养型芽孢杆菌对夏季高温期黄瓜穴盘育苗效果和基质酶活性的影响,以期缓解或降低西北旱区设施高温环境对秧苗造成的胁迫伤害,为提高黄瓜产量和品质、降低生产成本提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

以津优 1 号、博耐 526 和西蔬-131 3 个品种黄瓜和 VL-10 型甲基营养型芽孢杆菌(粉剂,山东蔚蓝生物科技有限公司生产,有效活菌数为 5×10^{10} CFU/g)为试验材料。育苗基质选用以菇渣和牛粪为主要成分的腐熟农业废弃物,其容重为 0.36 g/cm^3、pH 值为 6.65、电导率为 1 537 μS/cm、硝态氮质量比 634 mg/kg、铵态氮质量比 75.5 mg/kg、速效磷质量比 712 mg/kg、速效钾质量比 4 389 mg/kg、有机质质量分数 41.7%。采用 50 孔穴盘育苗。

1.2　试验设计

试验于 2019 年 6—7 月在陕西杨凌(北纬 34°28′,

东经 108°7′)揉谷设施农业基地非对称大跨度塑料温室内进行。试验期间的日平均空气温度变化范围为 29.6 ~ 35.4℃,昼温 22.2 ~ 55.3℃,夜温 17.0 ~ 30.2℃;日平均相对湿度变化范围为 50.3% ~87.3%(由北京金洋万达科技有限公司生产的 WD - PDKI 型温湿度光照记录仪测得)。

每个黄瓜品种均设置基质内添加 0、0.25、0.50、0.75 g/株 VL - 10 型甲基营养型芽孢杆菌 4 个菌剂用量处理,分别记为 CK、T1、T2 和 T3,各处理 3 次重复,每个穴盘为 1 个重复。黄瓜种子经温汤浸种、催芽露白后,分别播种于含不同用量菌剂的基质内,并置于塑料温室内育苗,苗期管理按常规育苗方法。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 形态和生理指标测定

于各处理植株第 1 片真叶展平时(定植后第 12 天),每 5 d 测量 1 次幼苗的株高和茎粗,每个处理随机选取 5 株标记、测定,共测 4 次,其中株高用直尺测量植株茎基部到最高处长度,茎粗用游标卡尺测量茎基部直径;于植株第 2 片真叶展平时(定植后第 17 天开始)每 5 d 用游标卡尺分别测量标记植株第 2 片真叶的叶长和叶宽,共测 3 次,最大叶面积计算公式为[27]

$$A = 0.743bl \tag{1}$$

式中 A——最大叶面积

b——最大叶宽 l——最大叶长

生理指标包括叶绿素含量和根系活力,于幼苗长至三叶一心时取样测定。其中幼苗根系活力采用 TTC 法[28]测定,叶绿素含量的测定均选取幼苗第 2 片真叶,采用乙醇丙酮混合浸提法[28]测定。

1.3.2 生物量测定

于成苗(三叶一心)时,每个处理随机取样 5 株,将植株冲洗干净,用纱布擦干后从根基分开,分别测定幼苗地上部和地下部鲜质量,再将其置于 105℃烘箱中杀青 30 min,于 70℃干燥至质量恒定后,测定地上部和地下部的干质量。

1.3.3 壮苗指数和生长函数计算

根据生物量测定结果计算成苗时黄瓜幼苗的壮苗指数和生长函数,计算公式为[27]

$$S = MD/H \tag{2}$$

$$G = M/d \tag{3}$$

式中 S——壮苗指数 G——生长函数,g/d

D——茎粗 H——株高

M——全株干质量 d——育苗时间

1.3.4 根系生长指标的测定

于成苗时各处理随机选取 3 株幼苗利用 Epson Perfection V700 Photo 型根系扫描仪分析根系总长度、表面积、根体积、平均直径及根尖数。

1.3.5 基质酶活性和硝铵态氮测定

于成苗时各处理随机取 5 株幼苗根系基质,自然风干后研磨过筛测定基质酶活性。基质过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定,酶活性以过氧化氢酶作用下 1 h 后滴定 1 g 基质所消耗 0.02 mol/L $KMnO_4$ 的体积表示;脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法测定,酶活性以脲酶作用下 37℃恒温培养 24 h 后 1 g 基质生成 NH_3-N 的质量表示;蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,酶活性以蔗糖酶作用下 37℃恒温培养 24 h 后 1 g 基质生成葡萄糖的质量表示;磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,酶活性以磷酸酶作用下 37℃恒温培养 24 h 后 1 g 基质中释放出酚的质量表示[29]。采用连续流动分析仪(Auto Analyzer 3 型, 德国)测定基质悬液的铵态氮(NH_4^+-N)含量和硝态氮(NO_3^--N)含量[30]。

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2010 软件进行数据整理及作图,用 SPSS 17.0 软件中的 Duncan's 方法进行数据差异性分析,数据以"平均值 ± 标准差"表示,用 Pearson 相关性分析基质酶活性与秧苗生理、形态、生物量、根系生长等指标的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同菌剂用量对黄瓜秧苗形态指标的影响

2.1.1 对黄瓜秧苗株高和茎粗的影响

由图 1 可以看出(图中同一品种、同一参数上的小写字母不同表示差异显著,下同),随着菌剂用量的增加,3 个品种秧苗的株高和茎粗均表现出先增加后降低的趋势,基质中添加甲基营养型芽孢杆菌均显著提升了黄瓜秧苗的生长速度。在 T2 处理下效果最优,该处理下博耐 526、津优 1 号和西蔬-131 的株高较 CK 处理分别提高了 40.4%、55.8% 和 36.5%,茎粗分别提高了 56.8%、48.3% 和 46.3%,T3 处理对株高和茎粗的影响效果次之,该处理下株高比 CK 处理分别提高了 31.6%、50.5% 和 32.6%,增幅较 T2 处理降低了 3.9% ~8.8%,茎粗分别提高了 41.9%、36.1% 和 41.4%,增幅较 T2 处理降低了 4.9% ~14.9%。3 个品种在 T1 处理下株高和茎粗均显著低于 T3 处理,但显著高于 CK 处理。表明在基质中添加甲基营养型芽孢杆菌后可促进茎的生长,其作用强度受菌剂用量的影响,并因品种不同而稍有差异,但不同菌用量间的作用趋势一致。

2.1.2 对黄瓜幼苗叶面积的影响

由图 2 可知,基质中添加甲基营养型芽孢杆菌菌剂后,T1、T2 和 T3 处理的叶面积均显著高于 CK

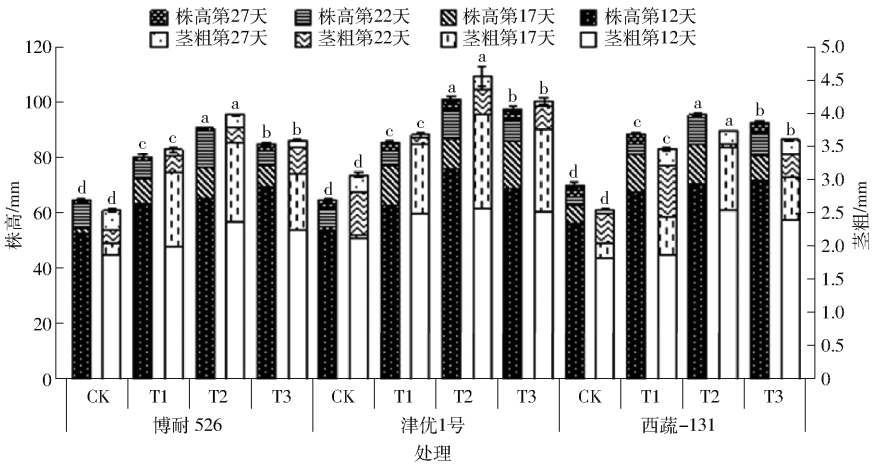

图 1　不同菌剂用量对黄瓜秧苗株高和茎粗的影响

Fig. 1　Effect of different inoculants dosages on plant height and stem diameter of cucumber seedlings

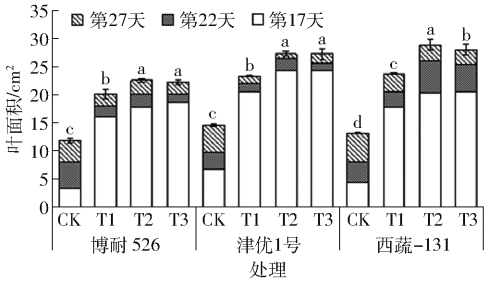

图 2　不同菌剂用量对黄瓜幼苗叶面积的影响

Fig. 2　Effect of different inoculants dosages on area of cucumber seedling leaves

处理，以 T2 处理下秧苗叶面积最大，与 CK 处理相比，该处理下博耐 526、津优 1 号和西蔬-131 的幼苗叶面积分别提高了 90.9%、85.4% 和 119.2%，T3 处理次之，该处理下除西蔬-131 的叶面积显著低于 T2 处理外，其他 2 个品种的秧苗叶面积均与 T2 处理无显著差异，而 T2 和 T3 处理均显著大于 T1 处理，T1 处理的叶面积分别较 CK 处理提高了 70.0%、58.7% 和 80.6%。结果表明甲基营养型芽孢杆菌对秧苗叶片生长有明显促进作用，以中等菌剂用量下促生效果更优。

2.2　不同菌剂用量对黄瓜幼苗叶绿素含量的影响

在本试验条件下，秧苗叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总含量均表现出随菌剂用量的增加而增加的趋势（表 1），T3 处理最高，T2 处理次之。与 CK 相比，T3 处理下博耐 526、津优 1 号和西蔬-131 的叶绿素 a 含量分别提高了 51.0%、32.0% 和 72.7%，叶绿素 b 含量分别提高了 40.9%、40.0% 和 83.3%；叶绿素总含量分别提高了 47.9%、32.4% 和 77.1%。T2 处理下同样较 CK 显著提高了叶绿素 a、b 含量和总含量，但均显著低于 T3 处理，T1 处理的叶绿素 a、b 含量和总含量同样高于 CK 处理，但在津优 1 号秧苗中，均与 CK 处理无显著差异。表明夏季高温条件下黄瓜育苗过程中，在基质中添加甲基营养型芽孢杆菌不仅可以提高秧苗叶面积，还可提升黄瓜秧苗叶绿素含量，有利于提高叶片光合速率，加速秧苗生长发育。

表 1　不同菌剂用量对黄瓜秧苗叶绿素含量的影响

Tab. 1　Effect of different inoculants dosages on chlorophyll content of cucumber seedlings

品种	处理	叶绿素 a 含量/(mg·g^{-1})	叶绿素 b 含量/(mg·g^{-1})	叶绿素总含量/(mg·g^{-1})	叶绿素 a 与叶绿素 b 含量比
博耐 526	CK	(0.49 ± 0.006)^{d}	(0.22 ± 0.005)^{c}	(0.71 ± 0.011)^{d}	(2.23 ± 0.024)^{c}
	T1	(0.53 ± 0.002)^{c}	(0.23 ± 0.002)^{c}	(0.76 ± 0.004)^{c}	(2.28 ± 0.015)^{b}
	T2	(0.66 ± 0.002)^{b}	(0.28 ± 0.002)^{b}	(0.94 ± 0.003)^{b}	(2.30 ± 0.012)^{ab}
	T3	(0.74 ± 0.014)^{a}	(0.31 ± 0.007)^{a}	(1.05 ± 0.021)^{a}	(2.34 ± 0.004)^{a}
津优 1 号	CK	(0.50 ± 0.002)^{c}	(0.20 ± 0.003)^{c}	(0.71 ± 0.005)^{c}	(2.48 ± 0.027)^{a}
	T1	(0.52 ± 0.006)^{c}	(0.21 ± 0.003)^{c}	(0.74 ± 0.009)^{c}	(2.48 ± 0.014)^{a}
	T2	(0.59 ± 0.008)^{b}	(0.25 ± 0.003)^{b}	(0.84 ± 0.010)^{b}	(2.35 ± 0.009)^{b}
	T3	(0.66 ± 0.021)^{a}	(0.28 ± 0.009)^{a}	(0.94 ± 0.030)^{a}	(2.36 ± 0.023)^{b}
西蔬-131	CK	(0.44 ± 0.006)^{c}	(0.18 ± 0.012)^{d}	(0.61 ± 0.018)^{c}	(2.51 ± 0.145)^{a}
	T1	(0.55 ± 0.010)^{b}	(0.23 ± 0.005)^{c}	(0.78 ± 0.016)^{b}	(2.43 ± 0.018)^{a}
	T2	(0.59 ± 0.018)^{b}	(0.26 ± 0.007)^{b}	(0.85 ± 0.024)^{b}	(2.27 ± 0.028)^{a}
	T3	(0.76 ± 0.021)^{a}	(0.33 ± 0.011)^{a}	(1.08 ± 0.031)^{a}	(2.33 ± 0.012)^{a}

注：同列数据后不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$），下同。

2.3 不同菌剂用量对黄瓜秧苗生物量的影响

由表 2 可以看出,甲基营养型芽孢杆菌可促进夏季高温环境中黄瓜秧苗生物量的积累,显著提高壮苗指数和生长函数。在 T2 处理下,3 个品种的秧苗根系和地上部分鲜干质量、壮苗指数和 G 均显著高于其他处理,与 CK 相比,T2 处理的根系干质量提高了 112.5% ~204.2%,地上部分干质量提高了 146.3% ~ 185.8%,壮苗指数分别提高了 77.8%(博耐 526)、108.3%(津优 1 号)和 63.6%(西蔬-131),G 分别提高了 183.3%、177.8% 和 133.3%(品种顺序同上)。T1 和 T3 处理的秧苗壮苗指数均无显著差异,但在 T3 处理下根系和地上部分干质量均高于 T1 处理。由此分析,在夏季高温条件下,甲基营养型芽孢杆菌通过提高秧苗叶面积和光合色素含量,提高了光能利用率,进而使黄瓜秧苗净光合产物积累量、生长函数和壮苗指数均显著提高。

表 2 不同菌剂用量对黄瓜幼苗生物量的影响

Tab.2 Effects of different inoculants dosages on biomass of cucumber seedlings

品种	处理	鲜质量/(g·株$^{-1}$)		干质量/(g·株$^{-1}$)		壮苗指数	G/(g·d^{-1})
		根系	地上部分	根系	地上部分		
博耐 526	CK	(0.39 ±0.02)^{d}	(1.47 ±0.04)^{d}	(0.024 ±0.000 9)^{d}	(0.169 ±0.007 8)^{c}	(0.009 ±0.000 4)^{c}	(0.006 ±0.000 3)^{c}
	T1	(1.08 ±0.01)^{c}	(3.30 ±0.08)^{c}	(0.054 ±0.000 9)^{c}	(0.327 ±0.006 2)^{b}	(0.013 ±0.000 1)^{b}	(0.013 ±0.000 2)^{b}
	T2	(1.24 ±0.02)^{a}	(4.08 ±0.10)^{a}	(0.073 ±0.001 5)^{a}	(0.442 ±0.012 6)^{a}	(0.016 ±0.000 6)^{a}	(0.017 ±0.000 4)^{a}
	T3	(1.14 ±0.01)^{b}	(3.53 ±0.05)^{b}	(0.061 ±0.002 6)^{b}	(0.334 ±0.006 2)^{b}	(0.013 ±0.000 2)^{b}	(0.013 ±0.000 2)^{b}
津优 1 号	CK	(0.89 ±0.01)^{d}	(2.37 ±0.03)^{d}	(0.040 ±0.003 0)^{d}	(0.232 ±0.010 1)^{d}	(0.012 ±0.000 5)^{c}	(0.009 ±0.000 4)^{d}
	T1	(1.24 ±0.02)^{c}	(3.90 ±0.26)^{c}	(0.060 ±0.000 3)^{c}	(0.363 ±0.014 5)^{c}	(0.015 ±0.000 5)^{b}	(0.014 ±0.000 5)^{c}
	T2	(1.83 ±0.10)^{a}	(6.09 ±0.61)^{a}	(0.085 ±0.001 2)^{a}	(0.663 ±0.031 8)^{a}	(0.025 ±0.001 7)^{a}	(0.025 ±0.001 1)^{a}
	T3	(1.63 ±0.02)^{b}	(4.75 ±0.41)^{b}	(0.080 ±0.002 3)^{b}	(0.499 ±0.006 2)^{b}	(0.017 ±0.000 6)^{b}	(0.019 ±0.000 3)^{b}
西蔬-131	CK	(0.58 ±0.01)^{d}	(2.13 ±0.06)^{d}	(0.032 ±0.001 2)^{d}	(0.227 ±0.019 9)^{c}	(0.011 ±0.000 2)^{c}	(0.009 ±0.000 4)^{d}
	T1	(1.09 ±0.04)^{c}	(4.21 ±0.26)^{c}	(0.061 ±0.005 0)^{c}	(0.423 ±0.014 8)^{b}	(0.014 ±0.000 7)^{b}	(0.016 ±0.000 2)^{c}
	T2	(1.62 ±0.09)^{a}	(5.14 ±0.22)^{a}	(0.081 ±0.003 7)^{a}	(0.559 ±0.027 3)^{a}	(0.018 ±0.000 8)^{a}	(0.021 ±0.000 6)^{a}
	T3	(1.38 ±0.03)^{b}	(4.63 ±0.14)^{b}	(0.075 ±0.002 0)^{b}	(0.458 ±0.012 2)^{b}	(0.015 ±0.000 2)^{b}	(0.018 ±0.000 2)^{b}

2.4 不同菌剂用量对秧苗根系生长和根系活力的影响

由表 3 可知,不同甲基营养型芽孢杆菌菌剂用量均显著提高了黄瓜秧苗的根系生长指标和根系活力。对于根长、根表面积和根尖数,3 个品种均以 T2 处理效果最优,与 CK 相比,T2 处理下博耐 526 的根长、根表面积和根尖数分别提高了 105.6%、174.9% 和 108.9%,津优 1 号分别提高了 72.4%、111.4% 和 58.6%,西蔬-131 分别提高了 75.5%、122.2% 和 64.6%。而 3 个品种秧苗的根直径均随着菌剂用量的增加呈逐渐增加的趋势,以 T3 处理下效果最优,较 CK 处理提高了 23.3% ~48.2%。博耐 526 和津优 1 号秧苗在 T2 处理下根体积分别显著大于 T3 处理,而西蔬-131 的 T2 处理根体积低于 T3 处理,但二者差异不显著。说明该菌剂对黄瓜根系生长的影响受剂量影响,超过一定剂量后可能

表 3 不同菌剂用量对黄瓜幼苗根系生长的影响

Tab.3 Effects of different inoculants dosages on root growth of cucumber seedlings

品种	处理	根长/cm	根表面积/cm^2	根直径/mm	根体积/cm^3	根尖数	根系活力/(mg·g^{-1}·h^{-1})
博耐 526	CK	(277.45 ±7.78)^{c}	(29.66 ±0.78)^{d}	(0.33 ±0.004)^{c}	(0.25 ±0.011)^{d}	(1 080.33 ±22.39)^{d}	(0.13 ±0.002)^{c}
	T1	(486.59 ±23.79)^{b}	(67.44 ±0.76)^{c}	(0.38 ±0.006)^{b}	(0.47 ±0.011)^{c}	(1 577.00 ±58.31)^{c}	(0.27 ±0.007)^{b}
	T2	(570.53 ±7.84)^{a}	(81.54 ±1.30)^{a}	(0.38 ±0.006)^{b}	(0.78 ±0.006)^{a}	(2 256.33 ±64.19)^{a}	(0.31 ±0.012)^{a}
	T3	(561.59 ±6.92)^{a}	(76.15 ±0.27)^{b}	(0.41 ±0.013)^{a}	(0.66 ±0.013)^{b}	(2 069.00 ±4.36)^{b}	(0.25 ±0.004)^{b}
津优 1 号	CK	(446.49 ±4.17)^{d}	(49.24 ±2.33)^{d}	(0.34 ±0.005)^{d}	(0.45 ±0.017)^{c}	(1 622.33 ±149.92)^{c}	(0.18 ±0.003)^{d}
	T1	(588.58 ±2.52)^{c}	(68.94 ±1.11)^{c}	(0.38 ±0.006)^{c}	(0.66 ±0.007)^{b}	(2 035.00 ±127.74)^{b}	(0.27 ±0.003)^{c}
	T2	(769.70 ±3.70)^{a}	(104.11 ±0.99)^{a}	(0.43 ±0.005)^{b}	(1.07 ±0.053)^{a}	(2 572.67 ±62.99)^{a}	(0.35 ±0.002)^{a}
	T3	(611.65 ±2.39)^{b}	(90.64 ±1.04)^{b}	(0.48 ±0.002)^{a}	(1.10 ±0.008)^{a}	(2 155.67 ±107.10)^{b}	(0.31 ±0.001)^{b}
西蔬-131	CK	(427.31 ±6.52)^{c}	(41.73 ±1.13)^{c}	(0.30 ±0.002)^{c}	(0.32 ±0.007)^{d}	(1 775.00 ±66.97)^{c}	(0.18 ±0.003)^{c}
	T1	(613.95 ±3.42)^{b}	(80.39 ±0.86)^{b}	(0.34 ±0.012)^{b}	(0.74 ±0.003)^{c}	(2 234.33 ±81.53)^{b}	(0.25 ±0.001)^{b}
	T2	(750.08 ±8.11)^{a}	(92.73 ±1.86)^{a}	(0.37 ±0.002)^{a}	(0.82 ±0.011)^{a}	(2 921.33 ±183.72)^{a}	(0.31 ±0.007)^{a}
	T3	(730.96 ±12.75)^{a}	(83.35 ±1.56)^{b}	(0.37 ±0.004)^{a}	(0.77 ±0.011)^{b}	(2 833.33 ±177.38)^{a}	(0.32 ±0.004)^{a}

会抑制根系生长，但同时也与品种有关。对于根系活力，表现出随菌剂用量的增加呈先增加后降低的趋势，品种不同稍有变化。博耐 526 和津优 1 号黄瓜根系活力均以 T2 处理最高，较 CK 处理分别提高了 138.5% 和 94.4%，而西蔬－131 品种以 T3 处理下根系活力最高，较 CK 处理提高了 77.8%，但该品种 T2 和 T3 处理之间的根系活力无显著差异。从相同的菌剂用量来看，与 CK 处理相比，T1、T2 和 T3 处理对秧苗根系活力的提高范围分别为 38.9% ~ 92.3%、72.2% ~ 138.5% 和 72.2% ~ 107.7%。

2.5　不同菌剂用量对育苗基质酶活性的影响

如表 4 所示，在本试验条件下，随着菌剂用量的增加，基质中脲酶活性、蔗糖酶活性和过氧化氢酶活性呈逐渐增加的趋势，而碱性磷酸酶活性随着菌剂用量的增加逐渐降低。与 CK 相比，T2 处理下 3 个品种根际基质中脲酶活性提高范围在 14.1% ~ 29.9% 之间，蔗糖酶活性提高了 140.4% ~ 324.3%，过氧化氢酶活性提高了 11.3% ~ 26.3%；而 T2 和 T3 处理间除津优 1 号的蔗糖酶活性和西蔬－131 的过氧化氢酶活性无显著差异外，T3 处理的 3 种基质酶活性均显著高于 T2 处理，与对照相比，T3 处理下博耐 526、津优 1 号和西蔬－131 根际基质中脲酶活性分别提高了 27.8%、45.9% 和 39.1%，蔗糖酶活性分别提高了 289.5%、155.9% 和 469.4%，过氧化氢酶活性分别提高 23.2%、46.2% 和 27.3%。而添加菌剂后，基质中的碱性磷酸酶活性在 3 个品种内均表现出随着菌剂用量的增加逐渐降低的趋势，3 个品种在 T1 处理下均显著高于各自对照处理，而在 T3 处理下，仅博耐 526 根际基质的碱性磷酸酶未显著低于 T1 处理，其他 2 个品种中均显著低于 T1 处理，津优 1 号根际基质的碱性磷酸酶活性甚至显著低于 CK 处理。

表 4　不同菌剂用量对黄瓜幼苗根际基质酶活性的影响

Tab. 4　Effects of different inoculants dosages on rhizosphere medium enzyme activities of cucumber seedlings

品种	处理	脲酶活性/（mg·g^{-1}·d^{-1}）	蔗糖酶活性/（mg·g^{-1}·d^{-1}）	过氧化氢酶活性/（mL·g^{-1}·h^{-1}）	碱性磷酸酶活性/（mg·g^{-1}·d^{-1}）
博耐 526	CK	(2.77 ± 0.10)^{c}	(17.30 ± 1.48)^{d}	(3.19 ± 0.15)^{c}	(2.33 ± 0.23)^{b}
	T1	(2.76 ± 0.06)^{c}	(51.12 ± 0.99)^{c}	(3.43 ± 0.05)^{bc}	(3.41 ± 0.05)^{a}
	T2	(3.16 ± 0.02)^{b}	(62.02 ± 0.85)^{b}	(3.55 ± 0.03)^{b}	(3.18 ± 0.03)^{a}
	T3	(3.54 ± 0.07)^{a}	(67.38 ± 0.55)^{a}	(3.93 ± 0.01)^{a}	(3.09 ± 0.20)^{a}
津优 1 号	CK	(2.31 ± 0.03)^{c}	(21.82 ± 2.45)^{c}	(2.66 ± 0.03)^{c}	(3.02 ± 0.18)^{b}
	T1	(2.17 ± 0.05)^{c}	(39.25 ± 0.89)^{b}	(3.33 ± 0.03)^{b}	(6.02 ± 0.14)^{a}
	T2	(3.00 ± 0.09)^{b}	(52.45 ± 0.45)^{a}	(3.33 ± 0.04)^{b}	(2.87 ± 0.19)^{b}
	T3	(3.37 ± 0.02)^{a}	(55.84 ± 0.03)^{a}	(3.89 ± 0.10)^{a}	(1.66 ± 0.16)^{c}
西蔬－131	CK	(3.07 ± 0.09)^{d}	(14.14 ± 0.70)^{c}	(2.89 ± 0.05)^{c}	(1.78 ± 0.17)^{c}
	T1	(1.87 ± 0.04)^{c}	(19.56 ± 0.46)^{c}	(3.32 ± 0.09)^{b}	(4.47 ± 0.10)^{a}
	T2	(3.55 ± 0.02)^{b}	(60.00 ± 0.87)^{b}	(3.65 ± 0.08)^{a}	(3.56 ± 0.14)^{b}
	T3	(4.27 ± 0.19)^{a}	(80.51 ± 3.37)^{a}	(3.68 ± 0.03)^{a}	(1.79 ± 0.15)^{c}

2.6　不同菌剂用量对育苗基质有效态氮（NH_4^+-N 和 NO_3^--N）含量的影响

由图 3 可以看出，在育苗结束时，添加微生物菌剂的根际基质铵态氮（NH_4^+-N）含量显著高于对照处理，其趋势由大到小为 T1、T2、T3、CK，相同品种内处理间差异显著，趋势相同。成苗时，3 个品种在 T1 处理下基质的 NH_4^+-N 含量分别较各自的 CK 处理提高了 41.7%、835.1% 和 155.9%，T2 处理分别较各自的 CK 处理提高了 15.9%、111.0% 和 50.9%。而硝态氮（NO_3^--N）含量未表现出明显的规律，3 个品种的最高值分别出现在 T1、CK 和 T1 处理。综合基质有效态氮含量和基质酶活性试验结果可知，基质中添加甲基营养型芽孢杆菌后，促进了基质中氮素形态的转化，可使基质中有效态元素含量升高。

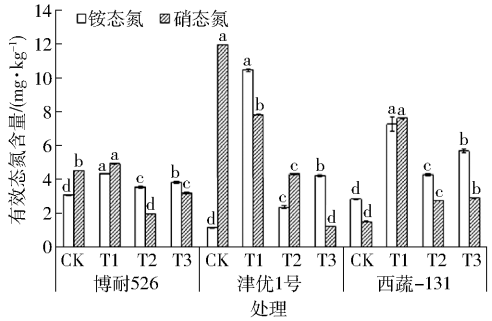

图 3　不同菌剂用量对育苗基质有效态氮含量的影响

Fig. 3　Effect of different inoculants dosages on available nitrogen content in seedling medium

2.7　基质酶活性与秧苗生理、生长指标的相关性

由表 5 可以看出，脲酶活性与叶绿素含量呈极显著正相关（$P < 0.01$），而与其他指标间无相关性（$P < 0.05$）；除与壮苗指数无相关性外，蔗糖酶活性

表 5 基质酶活性与秧苗生理、生长指标的相关性

Tab. 5 Correlation between medium enzyme activity and seedling physiology and growth index

因子	叶绿素总量	根系活力	壮苗指数	生长函数	地上干质量	根干质量	根长	根表面积	根体积	根直径	根尖数
脲酶	0.710**	0.415	0.225	0.336	0.324	0.409	0.385	0.330	0.298	0.307	0.520
蔗糖酶	0.893**	0.789**	0.512	0.630*	0.608*	0.765**	0.673*	0.708*	0.610*	0.604*	0.686*
过氧化氢酶	0.797**	0.569	0.303	0.474	0.454	0.600*	0.442	0.606*	0.590*	0.651*	0.420
碱性磷酸酶	−0.226	0.095	0.066	0.064	0.086	0.061	0.142	0.122	0.009	−0.098	0.024

注：* 表示显著相关（$P<0.05$）；** 表示极显著相关（$P<0.01$）。

与叶绿素含量、根系活力、根干质量呈极显著正相关（$P<0.01$），与 G、地上干质量、根长、根表面积、根体积、根直径和根尖数均呈显著正相关（$P<0.05$）；过氧化氢同样与叶绿素含量呈极显著正相关（$P<0.01$），与根系干质量、根表面积、根体积和根直径呈显著正相关（$P<0.05$），而碱性磷酸酶活性与秧苗指标间均未表现出相关性。

3 讨论

根际促生细菌可以通过诱导植株合成生长素和细胞分裂素等生长调控物质来调节植株的生长发育[16-17]，或改变土壤营养元素的形态，使之有效化而利于植物吸收以促进植株生长[14]，还有研究表明部分真菌可以通过分泌蛋白，增强在根系的定植能力，改变根际菌群和植物根系结构，促进植株生长发育[31-32]。但不同根际微生物种类、作用方式及其浓度存在作用差异，枯草芽孢杆菌在 $5\times10^5\sim1\times10^6$ CFU/mL 范围内均可促进黄瓜生长，提高其壮苗指数和生长函数[33]，链霉菌菌液对植株生长的促进作用随菌液浓度增加呈现先增加后降低的趋势[34]。本试验发现，黄瓜秧苗的形态指标、壮苗指数和生长函数随着甲基营养型芽孢杆菌菌剂用量的增加呈先增后降的趋势，在 0.5 g/株菌剂用量下有最大值，且在该用量下，秧苗根长、根表面积和根尖数均高于其他处理，整体来看根系生长状况与秧苗长势一致，说明该菌剂通过提高根系长度、增加根系数量和根系表面积，从而扩大了营养吸收面积，以加速对基质元素的吸收，进而促进幼苗地上部分的生长，提高植株地上、地下部分的干/鲜物质积累量，这与孙中华等[35]研究的枯草芽孢杆菌 B67 对黄瓜幼苗生长的影响和柳艳艳等[36]研究的巨大芽孢杆菌对油菜生长的影响结果相同，即随着菌剂用量（浓度）的增加，对植株形态发育和根系生长的促进作用呈现先增加后降低的趋势。综合秧苗形态、根系生长、生物量等指标的变化趋势，说明甲基营养型芽孢杆菌对黄瓜秧苗生长发育的促进作用存在剂量效应，促生效果直接受菌剂用量影响，同时也因品种不同，稍有变化，最适浓度出现在 0.50 g/株或 0.50～0.75 g/株之间（有效活菌数为 5×10^{10} CFU/g），超过最适用量范围后，其促生效果减弱，其原因可能是因为在根际环境中，微生物与植株间存在相互作用的关系，微生物在发挥作用的同时，自身也需吸收养分来维持自身生长和繁殖的需要，当营养底物含量一定时，随着活菌数量的增加，与植物之间的营养竞争同时增加，所以造成在高浓度下植株对营养元素的吸收量减少，生长速度降低[37]。

光合作用是植物对高温最敏感的生理过程之一，植物在高温条件下光合作用受到抑制，进而引起生长缓慢，秧苗质量降低已被许多作物所证实[38]，已有研究表明，高温通过破坏叶绿体结构和降低叶绿素含量[39]、降低 Rubisco 酶活性[40]、引起叶片过量失水导致气孔导度降低[41]、通过非气孔因子降低净光合速率[42]等途径降低光合速率。本研究结果表明，在高温条件下，对照处理的黄瓜秧苗叶绿素含量、壮苗指数和生长函数等指标均处于较低水平，成苗质量严重下降，但在育苗基质中添加甲基营养型芽孢杆菌菌剂后，秧苗叶面积显著增大，随着菌剂用量的增加，叶绿素含量逐渐增加，以 0.75 g/株处理下叶绿素含量最高，叶绿素总量较对照提高了 32.4%～77.1%，同时，3 种黄瓜秧苗的叶面积和叶绿素含量变化趋势较一致，说明甲基营养型芽孢杆菌可通过提高秧苗叶面积和光合色素含量，有效补偿高温胁迫对秧苗叶片中叶绿体造成的伤害，进而提高黄瓜秧苗的光能利用率和净光合产物积累量，加速秧苗生长，该结果与李伟等[43]的研究结果相一致。

土壤酶活性和肥力存在直接关系，脲酶是氮素转化的关键酶，主要来源于微生物和植物代谢；蔗糖酶又称转化酶，可将蔗糖水解为葡萄糖和果糖；过氧化氢酶是稳定存在于土壤中的氧化物分解酶，可以将过氧化氢分解为 H_2O 和 CO_2，从而解除或减轻过氧化氢对植物的毒害作用；磷酸酶可以参与有机磷转化为无机磷供植物、微生物吸收利用，其活性主要受微生物数量、种类及植被类型的影响。而高温环境会显著降低土壤酶活性[12]，任杰[27]的研究结果表明，基质酶活性与微生物数量有关，添加外源细菌

微生物可使基质酶活性提高。本试验中，随着菌剂用量的增加，基质中脲酶活性、蔗糖酶活性和过氧化氢酶活性呈逐渐增加的趋势，其中在 0.50、0.75 g/株处理下，上述 3 种酶活性均显著高于对照，且以 0.75 g/株添加量下的 3 种酶活性最高，该结果与刘丽英等[44]的研究结果相同，说明上述 3 种酶活性直接受甲基营养型芽孢杆菌菌剂用量的影响，可以通过提高菌剂用量以提高基质酶活性。但碱性磷酸酶活性随着菌剂用量的增加呈逐渐降低的趋势，在 0.25 g/株用量下均显著高于对照，而在 0.75 g/株用量下只有博耐 526 品种的基质酶活显著高于对照，而其他品种与对照间无显著差异（西蔬－131）或显著低于对照（津优 1 号），该结果与闫杨等[45]的研究结果相反，其原因可能是受基质有机态磷素底物含量的影响，在基质中加入甲基营养型芽孢杆菌菌剂后，前期碱性磷酸酶活性逐渐提高，分解出的无机磷被植株吸收利用，加速生长，后期随着基质有机磷含量的降低，碱性磷酸酶活性亦逐渐降低，但是长势相对较弱的植株对磷元素的吸收较少，所以其酶活性依然停留在较高水平，而不同品种间酶活性表现出的差异性可能与品种及秧苗长势有关。同时，结合育苗结束基质中的有效态氮含量的测定结果同样可以证明，添加菌剂的处理中，促进了基质氮素形态的转化，育苗结束时基质 NH_4^+-N 含量与植株长势结果相反，其原因可能是在高菌剂用量下，基质中氮素转化酶活性显著提高，有机态氮转化为矿质态氮的速度加快，由于在 0.50 g/株处理下植株长势最强，对速效氮的吸收量大于 0.75、0.25 g/株处理下的植株，而 0.75 g/株处理下植株长势次之，所以造成基质中剩余 NH_4^+-N 含量与植株长势呈相反趋势。

土壤酶活性可影响作物生长，并进一步影响作物产量和品质形成[46]。试验结果表明，基质酶活性与秧苗生理、壮苗指数、根系生长及生物量指标间表现出一定的相关性。除壮苗指数外，蔗糖酶活性与秧苗叶绿素含量和根系活力呈极显著正相关，与 *G*、根系生长指标、生物量之间均呈显著正相关，过氧化氢酶与根系生长指标（根表面积、根体积、根直径）、根干质量间呈显著正相关，与叶绿素含量呈极显著正相关，而脲酶活性仅与叶绿素含量呈显著正相关，碱性磷酸酶活性与上述指标间无相关性。可见过氧化氢酶和蔗糖酶活性与秧苗根系生长指标间相关性较强，同时，脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均与叶绿素含量呈极显著正相关，可能与微生物缓解高温胁迫对光合作用造成的抑制有一定关系。但本试验仅初步分析了基质酶活性与黄瓜秧苗生长和生理指标的相关性，未涉及深入影响机制，因此需做进一步研究。

4　结论

（1）甲基营养型芽孢杆菌（5×10^{10} CFU/g）对夏季黄瓜秧苗生长具有促进作用，具体表现为：促进黄瓜秧苗形态和根系发育，缩短育苗周期，提高秧苗地上和根系鲜/干质量、壮苗指数和生长函数，但其促生作用存在剂量效应，且无明显品种效应。

（2）甲基营养型芽孢杆菌可通过刺激根系生长和提高根系活力以加速植株对元素的吸收、提高秧苗叶片中叶绿素含量以改善其光合效率、提高基质酶活性以加速基质有机养分向速效养分的转化等途径发挥作用。

（3）基质酶活性与黄瓜秧苗生长、生理等指标间存在相关性，其中蔗糖酶活性整体相关性最强，除壮苗指数外，与秧苗叶绿素含量、根系活力、根干质量呈极显著正相关，与 *G*、根系生长指标、生物量之间均呈显著正相关；过氧化氢酶与根系生长指标（根长和根尖数除外）、根干质量间呈显著正相关，与叶绿素含量呈极显著正相关；而脲酶仅与叶绿素含量呈显著正相关。

（4）在夏季高温期黄瓜穴盘育苗生产中，基质按 0.5 g/株用量添加甲基营养型芽孢杆菌菌剂效果最优。

参　考　文　献

[1] 曹亮亮. 不同基质和穴盘规格对甜瓜穴盘苗生长的影响[D]. 杭州：浙江大学，2013.
CAO Liangliang. Effects of different matrix and plug size on melon plug seedling growth[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)

[2] 柴文臣，阎世江，张微. 蔬菜工厂化育苗关键技术研究现状与对策[J]. 山西农业科学，2017，45(7)：1188－1192.
CHAI Wenchen, YAN Shijiang, ZHANG Wei. Research status and suggestion of key technology of vegetable factory seedling [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(7): 1188－1192. (in Chinese)

[3] 李俊，李建明，曹凯，等. 西北地区设施农业研究现状及存在的问题[J]. 中国蔬菜，2013(6)：26－29.
LI Jun, LI Jianming, CAO Kai, et al. Present status and existing problems of studies on protected agriculture in northwest China [J]. Chinese Vegetables, 2013(6): 26－29. (in Chinese)

[4] 何晓明，林毓娥，陈清华，等. 高温对黄瓜幼苗生长、脯氨酸含量及 SOD 酶活性的影响[J]. 上海交通大学学报（农业科学版），2002，20(1)：30－33.
HE Xiaoming, LIN Yu'e, CHEN Qinghua, et al. Effects of heat strees on seedling growth proline contents and SOD activity in cucumbers[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2002, 20(1): 30－33. (in Chinese)

[5] 李建建，徐晓昀，聂书明，等. 高温胁迫对黄瓜幼苗生长的影响[J]. 红河学院学报，2007，5(5)：10－13.

LI Jianjian, XU Xiaoyun, NIE Shuming, et al. Influence of high temperature stress on growth in cucumber seedlings[J]. Journal of Honghe University, 2007,5(5):10 - 13. (in Chinese)
[6] 田婧,郭世荣. 黄瓜的高温胁迫伤害及其耐热性研究进展[J]. 中国蔬菜,2012(18):43 - 52.
TIAN Jing, GUO Shirong. Research progress on high temperature stress injury and heat tolerance of cucumber[J]. Chinese Vegetables, 2012(18): 43 - 52. (in Chinese)
[7] SHI Q H, BAO Z Y, ZHU Z J, et al. Effects of different treatments of salicylic acid on heat tolerance, chlorophyll fluorescence, and antioxidant enzyme activity in seedlings of *Cucamis sative* L[J]. Plant Growth Regulation, 2006, 48(2):127 - 135.
[8] 明村豪,蒋芳玲,胡宏敏,等. 幼苗徒长程度对黄瓜植株生长发育及产量、品质的影响[J]. 中国蔬菜,2011(4):29 - 34.
MING Cunhao, JIANG Fangling, HU Hongmin, et al. Effects of different leggy extent seedlings on cucumber growth, yield and quality[J]. Chinese Vegetables, 2011(4):29 - 34. (in Chinese)
[9] 房世波,沈斌,谭凯炎,等. 大气和温度升高对农作物生理及生产的影响[J]. 中国生态农业学报,2010,18(5):1118 - 1124.
FANG Shibo, SHEN Bin, TAN Kaiyan, et al. Effect of elevated CO_2 concentration and increased temperature on physiology and production of crops[J]. Journal of Chinese Ecological Agriculture, 2010, 18(5):1118 - 1124. (in Chinese)
[10] 张中典,张大龙,李建明,等. 黄瓜气孔导度、水力导度的环境响应及其调控蒸腾效应[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6):139 - 147.
ZHANG Zhongdian, ZHANG Dalong, LI Jianming, et al. Environmental response of stomatal and hydraulic conductances and their effects on regulating transpiration of cucumber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):139 - 147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160618&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.018. (in Chinese)
[11] 杨东清,王振林,倪英丽,等. 高温和外源 ABA 对不同持绿型小麦品种籽粒发育及内源激素含量的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(11):2109 - 2125.
YANG Dongqing, WANG Zhenlin, NI Yingli, et al. Effect of high temperature stress and spraying exogenous ABA post-anthesis on grain filling and grain yield in different types of stay-green wheat[J]. Scientia Agricultural Sinica, 2014, 47(11): 2109 - 2125. (in Chinese)
[12] 李佳川,杨瑞平,张显. 灌水高温闷棚处理对温室连作土壤修复效果的影响[J]. 北方园艺,2016(15):172 - 175.
LI Jiachuan, YANG Ruiping, ZHANG Xian. Effect of irrigation and high temperature tightly greenhouse on enzyme activity changes in continuous cropping soil[J]. Northern Horticulture, 2016(15): 172 - 175. (in Chinese)
[13] BERENDSEN R L, PIETERSE C M, BAKKER P A. The rhizosphere microbiome and plant health[J]. Trends in Plant Science, 2012, 17(8): 478 - 486.
[14] CROWLEY D E. Microbial siderophores in the plant rhizosphere[M]//BARTON L L, ABADIA J. Iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms. Springer, Dordrecht, 2006: 169 - 198.
[15] 张莹,秦宇轩,尚庆茂,等. 解淀粉芽孢杆菌 L - S60 与黄瓜互作特性研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(2):258 - 265.
ZHANG Ying, QIN Yuxuan, SHANG Qingmao, et al. Characteristics of interaction between *Bacillus amyloliquefaciens* L - S60 and cucumber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 258 - 265. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190229&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.029. (in Chinese)
[16] ESITKEN A, PIRLAK L, TURAN M, et al. Effects of floral and foliar application of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield, growth and nutrition of sweet cherry[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 110(4): 324 - 327.
[17] HAN Jigang, SUN Lei, DONG Xiuzhu, et al. Characterization of a novel plant growth-promoting bacteria strain *Delftia tsuruhatensis* HR4 both as a diazotroph and a potential biocontrol agent against various plant pathogens[J]. Systematic and Applied Microbiology, 2005,28(1): 66 - 76.
[18] PINEDA A, ZHENG S J, VAN LOON J J, et al. Helping plants to deal with insects: the role of beneficial soil-borne microbes[J]. Trends in Plant Science, 2010, 15(9):507 - 514.
[19] 刘方春,马海林,杜振宇,等. 根际促生细菌应用方式下金银花生长与根际环境特征[J/OL]. 农业机械学报,2016, 47(11):163 - 170.
LIU Fangchun, MA Hailin, DU Zhenyu, et al. *Lonicera japonica* thunb. growth and its rhizosphere environment characteristics with application of plant growth-promoting rhizobacteria[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(11): 163 - 170. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20161122&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.022. (in Chinese)
[20] MADHAIYAN M, POONGUZHALI S, KWON S W, et al. *Bacillus methylotrophicus* sp. nov., a methanol-utilizing, plant-growth promoting bacterium isolated from rice rhizosphere soil[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2010, 60(10): 2490 - 2495.
[21] 吕倩,胡江春,王楠,等. 南海深海甲基营养型芽孢杆菌 SHB114 抗真菌脂肽活性产物的研究[J]. 中国生物防治学报, 2014,30(1):113 - 120.
LÜ Qian, HU Jiangchun, WANG Nan, et al. Anti-fungal lipopeptides produced by *Bacillus methylotrophicus* SHB114 isolated from South China sea[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2014, 30(1): 113 - 120. (in Chinese)
[22] 康兴娇,申红妙,贾招闪,等. 葡萄霜霉病生防菌甲基营养型芽胞杆菌 T3 的鉴定及其防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2016,32(6):775 - 782.
KANG Xingjiao, SHEN Hongmiao, JIA Zhaoshan, et al. Identification of *Bacillus methylotrophicus* T3 and its control effect on grape downy mildew[J]. Chinese Journal of Biological Control,2016,32(6):775 - 782. (in Chinese)
[23] 何科奭,陈大跃,孙丽娟,等. 不同风况和开窗配置对夏季单栋塑料温室微气候的影响[J/OL]. 农业机械学报,2017, 48(12):58 - 64.
HE Keshuang, CHEN Dayue, SUN Lijuan, et al. Effects of wind regime and vent configuration on microclimatein tunnel greenhouses in summer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):58 - 64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20171238&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.038. (in Chinese)
[24] 柴立龙,马承伟,袁小艳,等. 基于 Exergy 研究的地源热泵降温系统性能分析[J]. 农业机械学报,2009, 40(2):146 - 150.
CHAI Lilong, MA Chengwei, YUAN Xiaoyan, et al. Performance analysis on ground source heat pump cooling system based on exergy research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 146 - 150. (in Chinese)

[25] 王立涵,王翔,李世斌,等.高温胁迫下外源物质对黄瓜幼苗叶绿素荧光和抗氧化酶活性的影响[J].安徽农学通报,2019,25(10):20 - 22.
WANG Lihan, WANG Xiang, LI Shibin, et al. Effects of exogenous substances on chlorophyll fluorescence parameters and antioxidant enzyme activities in leaves of cucumber seedlings under high temperature stress[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2019, 25(10): 20 - 22. (in Chinese)
[26] 水德聚,石瑜,曹亮亮,等.外源水杨酸预处理对高温胁迫下白菜耐热性和光合特性的影响[J].植物生理学报,2012,48(4):386 - 392.
SHUI Deju, SHI Yu, CAO Liangliang, et al. Effects of exogenous SA pretreatment on thermotolerance and photosynthesis in pakchoi under high temperature stress[J]. Plant Physiology Journal, 2012, 48(4): 386 - 392. (in Chinese)
[27] 任杰.不同配比基质及微生物菌剂对黄瓜穴盘育苗及生长发育的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
REN Jie. Effects of different proportion of substrate and microbial agents on seedling raising and growth and development of cucumber[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013. (in Chinese)
[28] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
[29] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
[30] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
[31] 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.
ZHOU Dongmei. Plant-microbe interactions to improve plant resistance to biotic and abiotic stress[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese)
[32] MENG X H, MIAO Y Z, LIU Q M, et al. *Tg*SWO from *Trichoderma guizhouense* NJAU4742 promotes growth in cucumber plants by modifying the root morphology and the cell wall architecture[J]. Microbial Cell Factories, 2019(18):148.
[33] 康少辉,苏浴源,栗淑芳,等.不同浓度枯草芽孢杆菌对黄瓜秧苗长势和质量的影响[J].河北农业科学,2014,18(3):52 - 53,56.
KANG Shaohui, SU Yuyuan, LI Shufang, et al. Effects of different concentrations of bacillus subtilis on the growth and quality of cucumber seedlings[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2014, 18(3): 52 - 53, 56. (in Chinese)
[34] 魏赛金,王世强,李昆太,等.链霉菌 702 对水稻种子萌发、幼苗生长及土壤微生物的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(5):853 - 861.
WEI Saijin, WANG Shiqiang, LI Kuntai, et al. Effects of streptomyces 702 on seed germination and seedling growth of rice and soil microbes[J]. Journal of Agro- Environmental Science, 2014, 33(5): 853 - 861. (in Chinese)
[35] 孙中华,赵铂锤,陈仕红.枯草芽孢杆菌 B67 对黄瓜幼苗生长发育的影响[J].中国瓜菜,2017,30(2):15 - 18.
SUN Zhonghua, ZHAO Bochui, CHEN Shihong. Effect of *Bacillus subtilis* B67 on the growth and development of cucumber seedlings[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2017, 30(2): 15 - 18. (in Chinese)
[36] 柳艳艳,骆洪义,王凤忠,等.巨大芽孢杆菌(BM002)生物有机肥对油菜生长发育的影响[J].山东农业科学,2012,44(7):63 - 66.
LIU Yanyan, LUO Hongyi, WANG Fengzhong, et al. Effect of *Bacillus megaterium* (BM002) microbial organic fertilizer on growth and development of rape[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2012, 44(7): 63 - 66. (in Chinese)
[37] 蒋婧,宋明华.植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用[J].植物生态学报,2010,34(8):979 - 988.
JIANG Jing, SONG Minghua. Review of the roles of plants and soil microorganisms in regulating ecosystem nutrient cycling [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(8): 979 - 988. (in Chinese)
[38] 李天来,李淼.短期昼间亚高温胁迫对番茄光合作用的影响[J].农业工程学报,2009,25(9):220 - 225.
LI Tianlai, LI Miao. Effect of short-term daytime sub—high temperature stress on photosynthesis of tomato leaves[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 220 - 225. (in Chinese)
[39] 杨小飞,郭房庆.高温逆境下植物叶片衰老机理研究进展[J].植物生理学报,2014,50(9):1285 - 1292.
YANG Xiaofei, GUO Fangqing. Research advances in mechanisms of plant leaf senescence under heat stress[J]. Plant Physiology Journal, 2014, 50(9): 1285 - 1292. (in Chinese)
[40] 潘璐,刘杰才,李晓静,等.高温和加富 CO_2 温室中黄瓜 Rubisco 活化酶与光合作用的关系[J].园艺学报,2014,41(8):1591 - 1600.
PAN Lu, LIU Jiecai, LI Xiaojing, et al. Correlation between Rubisco activase and photosynthesis of cucumber in greenhouse under high temperature and elevated CO_2[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2014, 41(8): 1591 - 1600. (in Chinese)
[41] 孙胜楠,王强,孙晨晨,等.黄瓜幼苗光合作用对高温胁迫的响应与适应[J].应用生态学报,2017,28(5):1603 - 1610.
SUN Shengnan, WANG Qiang, SUN Chenchen, et al. Response and adaptation of photosynthesis of cucumber seedlings to high temperature stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(5): 1603 - 1610. (in Chinese)
[42] 张洁,李天来.短时间亚高温处理及其恢复对番茄光合特性的影响[J].农业工程学报,2007,23(1):162 - 167.
ZHANG Jie, LI Tianlai. Effects of short time sub-high temperature treatment and its recovery on photosynthetic characteristics of tomato[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1): 162 - 167. (in Chinese)
[43] 李伟,胡江春,王书锦.海洋细菌 3512A 对黄瓜枯萎病的防治及促进植株生长的效应[J].沈阳农业大学学报,2008,39(2):182 - 185.
LI Wei, HU Jiangchun, WANG Shujin. Growth- promotion and biocontrol of cucumber fusarium wilt by Marine *Bacillus subtilis* 3512A [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2008,39(2): 182 - 185. (in Chinese)
[44] 刘丽英,丁文龙,曹雅杰,等.苹果连作生防细菌 B6 对平邑甜茶幼苗生物量及连作土壤环境的影响[J].应用生态学报,2018,29(12):4165 - 4171.
LIU Liying, DING Wenlong, CAO Yajie, et al. Effects of antagonistic bacteria B6 against the pathogens of apple replant disease on the bio-mass of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings and soil environment under replanting[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(12): 4165 - 4171. (in Chinese)
[45] 闫杨,刘月静,王帅珂,等.生防芽孢杆菌对黄瓜根际土壤酶活性的影响[J].江苏农业科学,2019,47(7):108 - 111.
YAN Yang, LIU Yuejing, WANG Shuaike, et al. Effect of biocontrol bacillus on the enzyme activity of the rhizosphere soil of cucumber[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019,47(7): 108 - 111. (in Chinese)
[46] DICK W A. Influence of long-term tillage and crop rotation combinations on soil enzyme activities[J]. Soil Science Society of America Journal,1984,48(3):569 - 574.