

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2024.04.011

枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂对番茄枯萎病的 预防效果及其对相关抗性生化指标的影响

敖 远, 杨成德*, 郭庄园, 崔凌霄, 李柘柘, 努尔夏提·努尔买买提, 马 婷
甘肃农业大学植物保护学院/甘肃省农作物病虫害生物防治工程实验室, 甘肃 兰州 730070

摘要:【目的】以番茄为供试作物,研究枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂对番茄枯萎病的预防效果及其对番茄植株和根际土壤生化指标的影响,以期菌剂在农业生产制备和生物安全应用中提供理论依据。【方法】设置不同固态菌剂添加量(分别占育苗基质质量的 0.5%、1.0%、2.0%、3.0%和 4.0%)的试验处理组与不添加固态菌剂的对照组(CK)进行番茄育苗,番茄四叶一心后移栽至花盆进行盆栽试验,定植 6 周后按照病情程度分级法测定供试菌剂对盆栽番茄枯萎病的预防效果;并测定番茄植株过氧化氢酶活性、过氧化物酶活性、超氧化物歧化酶活性、几丁质酶活性和总巯基含量以及番茄根际土壤游离氨基酸含量、过氧化氢酶活性、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶活性和脲酶活性等生化指标。【结果】0.5%菌剂处理的番茄根际土壤中游离氨基酸含量比 CK 高 44.325%,N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶活性比 CK 高 108.848%,过氧化氢酶活性比 CK 高 16.472%,均为最高值;1.0%菌剂处理对番茄枯萎病的预防效果最佳,为 73.485%,1.0%菌剂处理的番茄植株过氧化氢酶活性比 CK 高 55.742%,过氧化物酶活性比 CK 高 47.404%,超氧化物歧化酶活性比 CK 高 39.433%,几丁质酶活性比 CK 高 209.989%、番茄根际土壤脲酶活性比 CK 高 12.063%,均为最高值;总巯基含量则以 2.0%菌剂处理最高,比 CK 高 191.304%。【结论】总体上,0.5%、1.0%和 2.0%菌剂处理均不同程度提高了番茄防御酶活性,改善了番茄根际土壤的生化性质,3.0%和 4.0%菌剂处理对番茄及其根际土壤各项生化指标影响效果不明显,甚至产生抑制作用。

关键词: 枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂; 番茄枯萎病; 防御酶; 根际土壤酶



开放科学标识码
(OSID 码)

Preventive effect of *Bacillus subtilis* 262XY2' bacterial agent on tomato fusarium wilt and its impact on biochemical indicators of plant and rhizosphere health

AO Yuan, YANG Chengde*, GUO Zhuangyuan, CUI Lingxiao, LI Zhezhe, NUERXIATI·Nuermaimaiti, MA Ting
College of Plant Protection, Gansu Agricultural University/Biocontrol Engineering Laboratory
of Crop Diseases and Pests of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract:【Aim】To provide a theoretical basis for the application of *Bacillus subtilis* in agricultural production and biosafety, this study used tomato as the experimental crop to explore the preventive effect of *Bacillus subtilis* 262XY2' on tomato fusarium wilt in potted plants and to evaluate its impact on biochemical indicators of tomato plants and rhizosphere soil health.【Method】Experimental groups treated with different amounts of solid bactericides (0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0%, and 4.0% of seedling substrate quality) and a control check (CK) with no added solid bactericides were established for tomato seedling cultivation and four tomato plant leaves were transplanted into each pot. Six weeks after planting, the preventive effect of the tested bacteriological agent on tomato fusarium wilt was determined using an established disease severity grading method. Biochemical indicators including tomato plant catalase, peroxidase, superoxide dismutase, chitinase, catalase, N-acetyl-β-D-glucosidase, and urease activities as well as total thiol and tomato rhizosphere soil free amino acid contents were quantitated.【Result】In the rhizosphere soil of tomato treated with 0.5% bactericide, the free amino acid content and N-acetyl-β-D-glucosidase and catalase activities were 44.325%, 108.848%,

收稿日期(Received): 2023-06-19 接受日期(Accepted): 2023-10-10
基金项目: 国家自然科学基金(31660148)
作者简介: 敖远, 男, 硕士研究生。研究方向: 植物病害综合防治。E-mail: 980026386@qq.com
* 通信作者(Author for correspondence), 杨成德, E-mail: yangcd@gsau.edu.cn

and 16.472% higher than those in CK, respectively. The most potent tomato fusarium wilt preventive effect was 73.485% and was achieved with 1.0% bacterial agent application. Catalase activity in tomato plants treated with 1% bacterial agent and peroxidase, superoxide dismutase, and chitinase activities were 55.742%, 47.404%, 39.433%, and 209.989% higher than those in CK, respectively. Rhizosphere soil urease activity was 12.063% higher than that in CK. All these represent the highest values. Total thiol content was highest with 2.0% bacterial treatment at 191.304% higher than that in CK. 【Conclusion】 In general, 0.5%, 1.0%, and 2.0% inocula increased tomato defense enzyme activities and improved biochemical properties of tomato rhizosphere soil to varying degrees. Higher density inocula (3.0% and 4.0%) exerted no notable effects on these biochemical indices of tomato plants and their rhizosphere soil and even had inhibitory effects.

Key words: *Bacillus subtilis* 262XY2' bacterial agent; tomato fusarium wilt; defense enzymes; rhizosphere soil enzymes

生物菌剂是一种活菌制剂,具有多种功能,如有效改善土壤理化性质、土壤微生物群落结构和土壤可持续性养分,有利于植物吸收营养元素,促进植物生长和提高植物抵御不良环境的能力(朱将伟,2020)。番茄枯萎病是一种危害番茄 *Solanum lycopersicum* L.茎部和根部的土传病害,主要使番茄维管束丧失输导功能、叶片萎黄枯死,病原菌为尖孢镰刀菌番茄专化型(*Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*, Fol)(杜浩等,2021;龙媛等,2019;王云霞,2019;杨帅等,2019)。

近年来,关于微生物菌剂在番茄种植中防病促生效果的研究报道较多(张心青等,2020;Sotoyama et al.,2016),而新型生防菌剂的开发利用成为了新的研究热点(蔡傅红等,2021;张煜琦等,2021)。枯草芽孢杆菌 262XY2'是从东祁连山高寒草地线叶嵩草 *Carex capillifolia* (Decne.) S. R. Zhang 中分离筛选得到的具有固氮、溶磷和分泌吡啶乙酸等多种功能的内生细菌,其发酵液在盆栽试验中对番茄叶斑病防治效果在 60%以上(冯中红等,2015)。其固体发酵菌剂显著增加马铃薯 *Solanum tuberosum* L.株高、根长及其体内苯丙氨酸酶活性且对马铃薯炭疽病具有良好的预防和治疗效果(刘治会等,2019);可湿性粉剂对番茄细菌性叶斑病具有良好防效,应用潜力大(郭庄园等,2022)。因此,本试验以番茄为供试作物,通过盆栽试验研究枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂对番茄枯萎病的防效及其对该病害胁迫下相关抗性指标的影响,以期对枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂的作用效果做出评价,为其在商品化开发和田间应用上奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试番茄品种为市购中蔬四号;供试菌剂为枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂,由甘肃农业大学植物保

护学院植物病原细菌及细菌多样性实验室提供,其活菌数 7×10^{14} CFU · g⁻¹。该菌剂配制参考刘治会等(2019)的方法。其中,固体基质配方为:麸皮 36.4%、稻壳粉 31.8%、玉米面 18.2%、豆粕 13.6%;碳源为 1.0%乳糖,氮源为 1.1%尿素,无机盐为 0.11% ZnSO₄,目标菌接种量为固体基质质量的 10%,固料添加量 44 g · L⁻¹,料水比 1 : 1.4,28 ℃ 条件下固体发酵 44 h,然后 65 ℃ 条件下烘干备用。

1.2 试验设计

试验于 2021 年 8—10 月进行,共设置 6 组处理,T1、T2、T3、T4、T5 分别按照微生物菌剂占基质(草炭土:蛭石:珍珠岩=3 : 1 : 1)质量的 0.5%、1.0%、2.0%、3.0%和 4.0%进行添加并充分混合,对照(CK)不添加微生物菌剂。使用 21 穴育苗盘分别加入菌剂和基质并进行育苗,每组处理 3 次重复,共育 18 盘。待番茄四叶一心后移栽到花盆(花盆规格:上口径 17.5 cm,下口径 12.8 cm,高 16.4 cm),盆栽土壤选用番茄枯萎病发生严重的设施番茄多年连作土壤(刘巍等,2023;沙月霞等,2021a,2021b)。定植 6 周后测定菌剂对自然条件下番茄枯萎病的预防效果和番茄植株及其根际土壤的生化指标。

1.3 指标测定

1.3.1 菌剂对盆栽番茄枯萎病的预防效果 番茄枯萎病分级标准:0 级,植株健康无症状;1 级,1 片或 2 片真叶萎蔫下垂或明显变黄,以致脱落;2 级,3 片或 4 片真叶变黄或全株发黄,叶片萎蔫下垂;3 级,5 片或 6 片真叶明显萎蔫下垂或真叶严重变黄,植株生长受抑制、矮化;4 级:全株严重萎蔫以致枯死(刘琴等,2020;申云鑫等,2023;肖辉等,2021)。

根据分级标准测算植株发病率、病情指数、预防效果等。其中,发病率 = 发病株数/总株数 × 100%;病情指数 = $\sum$ (各级病株数 × 相应级值)/(调查总株数 × 最高级值) × 100;预防效果 = (对照病情

指数-处理病情指数)/对照病情指数×100%

1.3.2 菌剂对盆栽番茄枯萎病预防的生化机制
参考殷陶刚和李玉泽(2019)、周礼恺(1987)的方法测定总巯基 (total sulfhydryl, -SH) 含量、几丁质酶 (chitinase) 活性、土壤游离氨基酸 (soil free amino acids, S-FAA) 含量和土壤 N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶 (soil N-acetyl-β-D-glucosidase, S-NAG) 活性; 参考关松荫(1986)的方法测定土壤过氧化氢酶 (soil catalase, S-CAT) 活性; 参考李合生(2000)的方法测定过氧化物酶 (peroxidase, POD) 活性、过氧化氢酶 (catalase, CAT) 活性和超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性; 采用王玉功等(2019)、李秀芝等(2016)改进的苯酚-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶 (soil urease, S-UE) 活性。

表 1 枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂对盆栽番茄枯萎病的预防效果
Table 1 The preventive effect of *B. subtilis* 262XY2' bacterial agent on potted tomato fusarium wilt

处理 Treatment	发病率 Incidence/%	病情指数 Disease index	预防效果 Control effect/%
CK	52.381±4.762a	32.925±2.994a	-
T1	34.920±2.749c	22.222±2.996b	32.508
T2	19.048±4.762d	8.730±3.637d	73.485
T3	22.223±2.749d	10.317±1.819d	68.665
T4	36.508±2.749bc	17.064±0.687c	48.173
T5	42.857±4.762b	23.413±2.749b	28.890

CK 不添加微生物菌剂; T1、T2、T3、T4、T5 微生物菌剂分别占基质质量的 0.5%、1.0%、2.0%、3.0%、4.0%。同列数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。
CK did not add microbial agent; the account for T1, T2, T3, T4 and T5 microbial agents were 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% and 4.0% of the substrate mass, respectively. Different lowercase letters after the same column of data indicate significant differences at 0.05 level.

2.2 枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂对番茄植株生化指标的影响

由图 1 可知, T2 和 T3 的 -SH 含量显著高于 CK ($P<0.05$), T1、T4 和 T5 与 CK 差异不显著 ($P>0.05$), 其中以 T3 为最高, T4 为最低, T3 比 T4 高 294.118%。该结果表明, 较适浓度菌剂处理可显著增加番茄植株 -SH 含量, 较低或较高浓度菌剂处理对番茄植株 -SH 含量影响不明显。

如图 2 所示, T1、T2 和 T3 的 CAT、POD 和 SOD 活性均显著高于 CK ($P<0.05$)。其中以 T2 为最高, 分别比 CK 高 55.742%、47.404% 和 39.433%, T5 为最低, 分别比 CK 低 40.715%、31.459% 和 9.744%, 并且 T2 分别比 T5 高 162.701%、115.061% 和 54.485%。T1、T2、T3 和 T4 的几丁质酶活性显著高于 CK ($P<0.05$), 而 T5 的几丁质酶活性虽高于 CK, 但差异不显著 ($P>0.05$)。其中以 T2 为最高, T5 为最低, T2 比 T5 高 183.460%。该结果表明,

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行试验数据整理和绘制图表, SPSS 23.0 软件进行数据分析, LSD 法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂对盆栽番茄枯萎病的预防效果

如表 1 所示, 菌剂处理组的番茄枯萎病发病率均显著低于 CK ($P<0.05$), T2 的发病率和病情指数最低, 分别比 CK 低 63.636% 和 73.485%, 预防效果比 T5 高 154.361%, 表明枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂对番茄枯萎病有良好预防效果, 且不同用量的菌剂对于番茄枯萎病预防效果不同, 较低用量的菌剂预防效果更佳。

低浓度的菌剂处理可显著增加番茄植株 CAT、POD、几丁质酶和 SOD 活性, 但高浓度菌剂处理对番茄植株 CAT、POD、几丁质酶和 SOD 活性影响不明显甚至产生抑制作用。

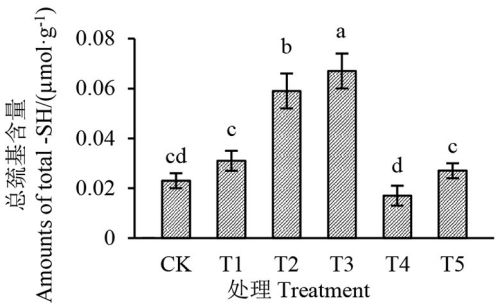


图 1 枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂对番茄植株总巯基含量的影响

Fig.1 Effects of *B. subtilis* 262XY2' bacterial agent on the total -SH content for tomato plants
不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。
Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level.

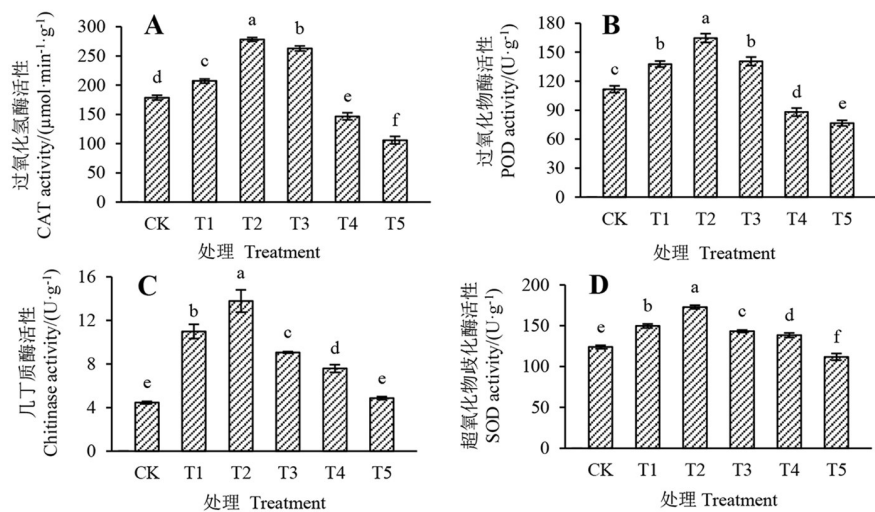


图 2 枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂对番茄植株过氧化氢酶 (A)、过氧化物酶 (B)、几丁质酶 (C) 和超氧化物歧化酶 (D) 活性的影响

Fig.2 Effects of *B. subtilis* 262XY2' bacterial agent on CAT (A), POD (B), chitinase (C) and SOD (D) activities for tomato plants
不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。
Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level.

2.3 枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂对番茄根际土壤生化指标的影响

由图 3 可知,T1 和 T2 的 S-FAA 含量和 S-UE 活性均显著高于 CK ($P<0.05$);T4 和 T5 的 S-FAA 含量和 S-UE 活性均低于 CK。其中,T1 的 S-FAA 含量最高,T2 的 S-UE 活性最高,T5 的 S-FAA 含量和 S-UE 活性最低,T1 的 S-FAA 含量比 T5 高 71.355%,T2 的 S-UE 活性比 T5 高 56.601%。T1、T2 和 T3 的 S-NAG 活性与 S-CAT 活性均显著高于 CK ($P<0.05$);T4 的 S-NAG 活性显著高于 CK

($P<0.05$),但 S-CAT 活性低于 CK;T5 的 S-NAG 活性和 S-CAT 活性均低于 CK。其中,以 T1 最高,分别比 CK 高 108.848%和 16.472%,T5 最低,分别比 CK 低 27.471%和 5.215%,同时 T1 分别比 T5 高 187.952%和 22.880%。该结果表明,较低浓度菌剂处理可显著增加番茄根际土壤 S-FAA 含量、S-NAG 活性、S-UE 活性和 S-CAT 活性,高浓度菌剂处理对番茄根际土壤 S-FAA 含量、S-NAG 活性、S-UE 活性和 S-CAT 活性影响不明显甚至产生抑制作用。

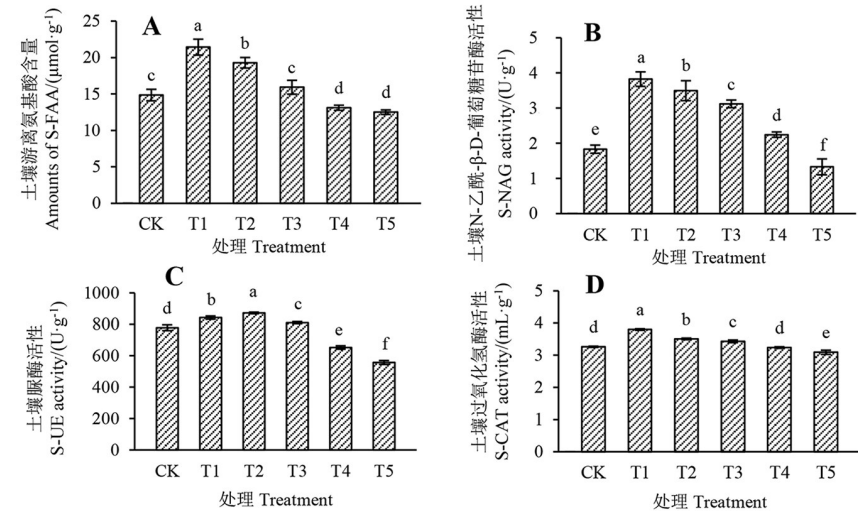


图 3 枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂对番茄植株根际土壤游离氨基酸 (A)、N-乙酰- β -D-葡萄糖苷酶 (B)、脲酶 (C) 和过氧化氢酶 (D) 的影响

Fig.3 Effects of *B. subtilis* 262XY2' bacterial agent on S-FAA (A), S-NAG (B), S-UE (C) and S-CAT (D) for tomato plants rhizosphere soil

不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。

Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level.

3 结论与讨论

微生物菌剂可以有效改善土壤生境及提高作物本身抗逆性。其机制一般被认为是活化土壤有机质,提高土壤酶活力,促进作物代谢相应的次生代谢产物来抵御逆境,如激活植物体内的防御酶活性对抗逆境以及激活植物抗病相关基因等(秦晓燕等,2019; Parrray *et al.*, 2016)。番茄枯萎病多发于开花结果期,严重危害番茄产量和品质,微生物菌剂对番茄枯萎病有良好的预防作用,如张萧萧等(2021)报道枯草芽孢杆菌 YJY19-01 菌剂对番茄枯萎病的田间防效达 75.43%;王静等(2018)报道解淀粉芽孢杆菌 B6 菌液浇灌番茄可较好的防治番茄枯萎病,防治效果为 64.35%,本试验中 1.0%菌剂对盆栽番茄枯萎病的防效最高,为 73.485%,与前述文献结果相近。

生物体内 CAT、POD、SOD 等酶类可以有效清除活性氧,在生物抗氧化系统中具有重要作用;几丁质酶可催化几丁质水解,具有抵御真菌侵染的作用;巯基主要参与修复氧化损伤的蛋白质和活性氧清除,并且对于维持蛋白质构象具有重要作用。据报道(葛红莲和刘中华,2014;葛红莲和张福丽,2014),复合菌剂 PS11 和 PS21 可显著增强黄瓜 *Cucumis sativus* L. 和小麦 *Triticum aestivum* L. 幼苗的抗氧化酶活性,复合菌剂 PS11 菌液浓度为 10^9 CFU · mL⁻¹ 时,黄瓜幼苗的 CAT 活性最强,且其 CAT 活性随菌液浓度的升高呈先升后降的变化,复合菌剂 PS21 菌液浓度为 10^8 CFU · mL⁻¹ 时,小麦幼苗的防御酶活性最强,本试验中,1%菌剂处理组番茄 CAT、POD、SOD 等抗氧化酶活性显著高于对照 ($P < 0.05$),与吴秀红等(2018)的研究结果相似。

S-FAA 和 S-UE 对土壤的微生物群落结构、微生物数量、有机物质含量、全氮和速效氮含量有直接影响,可反映土壤的氮素状况;S-NAG 是一种酸性水解酶,主要涉及几丁质或肽聚糖的降解,与机体某些病理状态密切相关;S-CAT 在 H₂O₂ 清除系统中具有重要作用。如葛红莲等(2014)报道,复合菌剂 PS11 浓度为 $10^7 \sim 10^8$ CFU · mL⁻¹ 时对大豆 *Glycine max* (L.) Merr. 幼苗和根际土壤酶活性的多项指标增效作用明显,且随着菌液浓度的升高,PS11 对大豆的促生效果及对土壤酶活性的激活作用减弱,与本试验中 0.5% 和 1.0% 菌剂处理组番茄根际土壤酶活性显著高于对照且抗氧化酶和土壤

酶活性随菌剂浓度增加基本呈先升后降趋势相似;宁琪等(2022)报道添加被孢霉菌剂可显著提高土壤 β -葡萄糖苷酶的活性;黄伟等(2019)报道菌剂浓度为 1 : 200 时,土壤脲酶、转化酶和过氧化氢酶活性最高,与本试验中 0.5% 菌剂处理组显著增加 S-NAG 活性和 1% 菌剂处理组显著增强 S-UE 活性和 S-CAT 活性的结果相似。

综上所述,低浓度的枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂可以有效预防番茄枯萎病,激活番茄植株防御酶,提高番茄根际土壤酶活性,增加游离氨基酸含量,提高植物抗逆能力,改善土壤环境,增加土壤营养。本研究中,在极端浓度下施加微生物菌剂部分指标值低于在中等浓度下施加微生物菌剂,其原因可能与枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌株在植株内部定殖情况有关,相关机理有待进一步研究。该试验的研究结果可为揭示枯草芽孢杆菌 262XY2' 菌剂的作用机制提供参考,为其商品化开发和田间大规模应用奠定基础,为该生物菌剂的生物安全性评价和标准化生产提供新思路。

参考文献

- 蔡傅红,袁志香,史雨琪,朱晶凤,韦欢,丁志鹏,张弯弯,颜歆雯,刘红霞,王晓莉,王云鹏,2021. 类芽孢杆菌 W51 菌剂制备及对番茄青枯病的防效研究. 中国生物防治学报, 37(5): 982-988.
- 杜浩,李宗锴,只佳增,周劲松,张建春,陈伟强,岳建伟,2021. 7 个香蕉品种对枯萎病的抗性评价及 3 种评价方法的对比. 生物安全学报, 30(4): 299-303.
- 冯中红,王玉琴,杨成德,薛莉,陈秀蓉,2015. 番茄细菌性叶斑病菌的拮抗菌筛选、鉴定及其拮抗性能评价. 草业学报, 24(8): 166-173.
- 葛红莲,刘中华,2014. 复合菌剂 PS21 对氧乐果胁迫下小麦幼苗生长及抗氧化酶的影响. 植物保护, 40(5): 55-61.
- 葛红莲,张福丽,2014. 复合菌剂 PS11 对黄瓜幼苗生长和生理生化指标的影响. 核农学报, 28(8): 1497-1502.
- 葛红莲,张福丽,李俐俐,2014. 复合光合菌剂对大豆幼苗生理生化特性和根际土壤酶活性的影响. 大豆科学, 33(5): 713-717.
- 关松荫,1986. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社.
- 郭庄园,杨成德,金梦军,崔凌霄,蔡锋锋,敖远,魏立娟,2022. 枯草芽孢杆菌 262XY2' 可湿性粉剂的研制. 中国生物防治学报, 38(2): 414-420.
- 黄伟,张俊花,刘倩男,张珍珍,王卫忠,李凤荣,李刚,

2019. 微生物菌肥对生菜土壤酶活性和微生物数量的影响. 湖北农业科学, 58(22): 54-57, 64.
- 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.
- 李秀芝, 黄斌, 范弟武, 卞玥, 韩建刚, 2016. 不同浸提剂及对对照设置对土壤脲酶活性测定的影响. 江苏农业科学, 44(11): 427-430.
- 刘琴, 徐健, 祁建杭, 刘怀阿, 李传明, 韩光杰, 徐彬, 陆玉荣, 孙俊, 2020. 萎彻氏链霉菌 SR-1102 对番茄枯萎病的防效及根际微生物的影响. 江苏农业学报, 36(5): 1133-1138.
- 刘巍, 王华, 杨若兰, 刘露, 张梓涵, 秦虎强, 黄丽丽, 2023. 淡紫灰链霉菌 gCLA4 对猕猴桃溃疡病预防效果及抑菌活性成分分离鉴定. 西北农业学报, 32(8): 1289-1296.
- 刘治会, 杨成德, 金梦军, 李统华, 陈星伊, 魏立娟, 崔凌霄, 杨丽萍, 2019. 枯草芽孢杆菌 262XY2' 固体发酵条件优化及对马铃薯炭疽病的防治效果. 中国生物防治学报, 35(4): 586-596.
- 龙媛, 杨宝明, 黄玉玲, 白亭亭, 徐胜涛, 尹可锁, 番华彩, 曾莉, 李迅东, 郭志祥, 李永平, 杨德荣, 李进平, 郑泗军, 2019. 施肥处理对不同抗性品种香蕉枯萎病的防控效果. 生物安全学报, 28(1): 65-70.
- 宁琪, 陈林, 李芳, 张丛志, 马东豪, 蔡泽江, 张佳宝, 2022. 被孢霉对土壤养分有效性和秸秆降解的影响. 土壤学报, 59(1): 206-217.
- 秦晓燕, 滕献有, 雷裕华, 邓飞鹏, 胡强, 覃柳兰, 梁祖珍, 2021. EM 生物菌剂对辣椒生长及辣椒枯萎病的影响. 现代农业科技 (10): 80-81, 83.
- 沙月霞, 李明洋, 伍顺华, 张昂, 2021a. 微生物菌剂拌土对盐碱地玉米茎基腐病的预防及促生效果. 中国农学通报, 37(5): 75-82.
- 沙月霞, 邢敏, 李明洋, 王晨曦, 王佳娟, 沈瑞清, 2021b. 微生物菌剂拌土对玉米茎基腐病的预防和促生效果. 安徽农业科学, 49(4): 141-144, 154.
- 申云鑫, 李铭刚, 施竹凤, 赵江源, 王楠, 李者芬, 杨明英, 陈齐斌, 杨佩文, 2023. 贝莱斯芽孢杆菌 SH-1471 可湿性粉剂研制及其对番茄枯萎病的防治效果. 中国生物防治学报, 39(4): 904-914.
- 王玉功, 刘婧晶, 刘貽熙, 马亮, 2019. 苯酚-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性影响因素的研究. 土壤通报, 50(5): 1166-1170.
- 王静, 宁燕夏, 李黄维, 刘娜, 邱佳俊, 2018. 解淀粉芽孢杆菌 B6 在番茄根部定殖及对番茄枯萎病盆栽防效初步研究. 中国植保导刊, 38(3): 19-22, 29.
- 王云霞, 2019. 番茄枯萎病的发生原因及综合防治. 农业技术与装备 (6): 89-90.
- 吴秀红, 戚厚芸, 孙婷, 成钟, 张天雨, 张振华, 2018. 内生菌根菌剂对水稻秧苗生长及生理特性的影响. 江苏农业科学, 46(21): 65-68.
- 肖辉, 程文娟, 张鹏, 张慧, 焦汝民, 王立艳, 赵杰, 潘洁, 2021. 木醋液与杀菌剂复配番茄枯萎病和灰霉病的防治效果. 江苏农业科学, 49(1): 82-87.
- 杨帅, 尤海霞, 李圣萱, 郭谱胜, 李美琴, 云英子, 王宗华, 2019. 尖孢镰刀菌番茄专化型中 SNARE 蛋白 FolSso1 的功能分析. 植物病理学报, 49(4): 530-538.
- 殷陶刚, 李玉泽, 2019. 土壤酶活性影响因素及测定方法的研究进展. 矿产勘查, 10(6): 1523-1528.
- 张萧萧, 张心青, 杨传伦, 郭南南, 车树刚, 冉新新, 王秀芝, 傅英甸, 2021. 枯草芽孢杆菌突变株 YJY19-01 抑菌效果与对番茄枯萎病防效的初步研究. 山东农业科学, 53(6): 84-88.
- 张心青, 张萧萧, 杨传伦, 郭南南, 马娜娜, 蔡倩倩, 王秀芝, 2020. 一株对番茄枯萎病有拮抗作用的枯草芽孢杆菌的 ARTP 诱变与筛选. 中国农学通报, 36(26): 44-49.
- 张煜琦, 刘勇, 陈应凤, 曾军, 贺东方, 方守国, 2021. 沼泽红假单胞菌 PSB-06 菌剂对番茄褪绿病的防效及其作用机制. 植物保护学报, 48(6): 1496-1507.
- 周礼恺, 1987. 土壤酶学. 北京: 科学出版社.
- 朱将伟, 2020. 微生物及其相关技术在农业领域的应用探讨. 绿色科技 (24): 231-232.
- PARRAY J A, JAN S, KAMILI A N, OADRI R A, EGAMB-ERDIEVA D, AHMAD P, 2016. Current perspectives on plantgrowth-promoting rhizobacteria. *Journal of Plant Growth Regulation*, 35(3): 877-902.
- SOTOYAMA K, AKUTSU K, NAKAJIMA M, 2016. Suppression of bacterial wilt of tomato by soil amendment with mushroom compost containing *Bacillus Amyloliquefaciens* IUMC7. *Journal of General Plant Pathology*, 83(1): 51-55.

(责任编辑: 郑珊珊)