

烟管菌 M-1 对小麦苗期赤霉病的防效及其生理生化机制分析

李素平 冯 笑 朱云云 李 勇* 汪文强 杨红军

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 为研制高效的生物农药, 利用自主分离的烟管菌 *Bjerkandera adusta* 生防菌株 M-1, 通过平板对峙试验和温室盆栽生防试验研究其对小麦苗期赤霉病的防效及其生理生化机制。结果表明, 菌株 M-1 及其发酵液对小麦赤霉病致病菌禾谷镰孢菌 *Fusarium graminearum* 的抑制率分别为 57.71% 和 72.95%; 且均能降低小麦赤霉病的发病率和病情指数, 防效分别为 88.10% 和 77.18%, 与化学药剂多菌灵的防效相当; 同时使与抗病性相关的叶片超氧化物歧化酶活性较对照分别提高了 35.37% 和 29.09%, 过氧化氢酶活性提高了 87.51% 和 25.15%, 过氧化物酶活性提高了 43.95% 和 38.74%, 苯丙氨酸解氨酶活性提高了 40.74% 和 7.82%, 可诱导植株产生抗病反应, 提高抗病能力; 也使细胞膜透性分别降低了 35.94% 和 32.15%, 丙二醛含量降低了 41.76% 和 3.23%, 能减轻病菌对细胞膜的伤害; 并能增加叶绿素含量和硝酸还原酶活性, 提高 N、P、K 的含量及吸收量, 使株高较对照分别增加了 13.33% 和 8.31%, 生物量增加了 34.45% 和 17.59%。表明菌株 M-1 对小麦苗期赤霉病有较好的防效, 不仅能提高小麦幼苗的抗病能力, 还能促进其生长。

关键词: 烟管菌; 小麦赤霉病; 禾谷镰孢菌; 生长

Analysis of the control effect of biocontrol fungus strain *Bjerkandera adusta* M-1 on wheat seedling scab and its physiological and biochemical mechanism

Li Suping Feng Xiao Zhu Yunyun Li Yong* Wang Wenqiang Yang Hongjun

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to develop efficient biological pesticides, the self-isolated biocontrol strain *Bjerkandera adusta* M-1 was used to study its control effect on wheat seedling scab and physiological and biochemical mechanisms by using confrontation culture and greenhouse pot experiments. The results showed that strain M-1 and its fermentation broth inhibited the growth of *Fusarium graminearum*, with an inhibition rate of 57.71% and 72.95%, respectively; moreover, both reduced the incidence and disease index of scab, and the control effect reached 88.10% and 77.18%, respectively, equivalent to the effect of chemical pesticide carbendazim. Besides, strain M-1 and its fermentation broth increased the enzyme activity related to disease resistance in leaves, such as superoxide dismutase (by 35.37% and 29.09%), catalase (by 87.51% and 25.15%), peroxidase (by 43.95% and 38.74%), and phenylalanine ammonia-lyase (by 40.74% and 7.82%), inducing plant to produce disease resistance reaction and raise the ability of disease resistance. In addition, strain M-1 and its fermentation broth decreased the cell membrane permeability (by 35.94% and 32.15%) and malondialdehyde content (by 41.76% and 3.23%), reducing damage to cell membranes by pathogenic fungi. Meanwhile, strain M-1 and its fer-

基金项目: 科技部农业科技成果转化资金项目(2013GB2F100396), 重庆市基础研究与前沿探索专项(cstc2018jcyjAX0616)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: liyongwf@swu.edu.cn

收稿日期: 2018-10-09

mentation broth improved the chlorophyll content and nitrate reductase activity, promoted nitrogen, phosphorus, potassium content and absorption, and increased the plant height (by 13.33% and 8.31%) and biomass (by 34.45% and 17.59%). The results suggested that strain M-1 had a good control effect on wheat seedling scab, and could not only improve the disease resistance of wheat seedlings, but also promote their growth.

Key words: *Bjerkandera adusta*; wheat scab; *Fusarium graminearum*; growth

小麦赤霉病又被称为烂麦头、红麦头、麦穗枯,该病在全球普遍发生,是麦田中的一种毁灭性病害,多发生于潮湿和半潮湿区域,气候湿润多雨的温带地区受害尤重(O'Donnell et al., 2004; Starkey et al., 2007),在小麦的各个生长阶段均能造成危害,引起穗腐、茎腐、苗腐,其中以穗腐危害最重。我国是世界上小麦赤霉病危害最严重的国家(Champeil et al., 2004),年均发病面积超过 533.33 万 hm^2 (马忠华等, 2016),严重威胁小麦安全生产。小麦赤霉病的致病菌主要是禾谷镰孢菌 *Fusarium graminearum* (Champeil et al., 2004),该病菌侵染小麦后,可产生多种真菌毒素,其中以脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)毒性最强,这些毒素会污染麦粒及多种小麦制品,能引起人和哺乳动物呕吐、腹泻、头晕等急性毒性症状和免疫功能下降等慢性毒性症状,严重威胁粮食安全和人畜健康(Ehlin et al., 1997; 陈云等, 2017)。因此,小麦赤霉病已成为世界上高度关注的一种病害(Teich, 1989; Gilbert & Tekauz, 2000; 宋益民等, 2018)。

目前,小麦赤霉病的防治主要依赖于化学农药,苯并咪唑类杀菌剂多菌灵一直是我国小麦赤霉病防治的主要药剂(宋益民等, 2018)。由于药剂的长期单一使用,导致病原菌抗药性上升,防病效果降低,且该药残留时间长,残留量高,大量施用不仅影响农产品的安全(Siranidou & Buchenauer, 2001),还会导致土壤水体、大气环境质量的不断恶化。所以,开发新型的天然拮抗微生物以及作用机理独特且对人畜和生态环境无害的生防杀菌剂是农药发展的重要方向(Schulz et al., 2002)。近年来,已从多种生态环境中分离获得了拮抗真菌,并对其进行了小麦赤霉病的生防研究(Backman & Sikora, 2008; Mejia et al., 2008)。Khan et al. (2004)在美国的不同地域环境下进行了一系列田间试验,研究了 3 种芽胞杆菌和 4 种酵母菌对小麦赤霉病的拮抗作用,证明它们均能有效降低小麦赤霉病的发病程度;dal Bello et al. (2002)从小麦根际分离到 1 株哈茨木霉 *Trichoderma harzianum*,发现其对小麦赤霉病菌具有较强的抑制作用;

Palazzini et al. (2013)在阿根廷对粉红黏帚霉 *Gliocladium roseum* 菌株 016 和 1457 的大田试验结果表明,施用 90 d 后田间小麦茎秆中赤霉病菌含量减少 73%, 180 d 后小麦茎秆中未检测到赤霉病菌;Xue et al. (2009)研究发现粉红黏帚霉菌株 ACM941 能使小麦赤霉病发病率显著降低 46%,产量损失减少 49%, DON 含量减少 21%,该产品已在加拿大注册登记;Schisler et al. (2011; 2015)研究发现分离自小麦花药的浅黄隐球酵母 *Cryptococcus magnus* 菌株 OH182.9 单独使用及与其它生防因子混合使用均能显著降低赤霉病发病率并减少 DON 的产生,该生防真菌已作为商业化预备菌剂在美国进行田间药效评估。但是目前能够替代化学农药多菌灵的生物农药还较少。

烟管菌 *Bjerkandera adusta* 属于多孔菌科黑管菌属,是一种木腐型真菌,多分布在枯木、倒木及枯枝落叶区域。由于其能够产生漆酶,目前国内外对其研究多集中在其漆酶合成、纤维素及木质素降解等方面(Iwahara et al., 2000; 彭滢钊, 2014),而烟管菌在生物防治植物病害方面的研究鲜有报道。本研究团队成员张旭辉等(2017)从西南大学国家重点野外台站紫色土肥力与肥料效益监测基地土壤中分离获得烟管菌菌株 M-1,其菌丝和发酵液对西瓜蔓枯病具有较好的生防作用,温室盆栽试验中也有较好的防效且高于常用的化学农药多菌灵,在生物防治中有巨大的应用潜力。然而,烟管菌对小麦赤霉病的生物防治还鲜有报道。因此,本研究利用自主分离的烟管菌菌株 M-1,以常用化学农药多菌灵为对照,通过平板对峙试验和温室盆栽生防试验研究菌株 M-1 对小麦苗期赤霉病的防效及其生理生化机制,以期小麦的安全生产及赤霉病的有效生物防治提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试作物及土壤:小麦品种为新麦 18,购于四川绵阳特研种业有限公司;土壤为西南大学国家重点野外台站紫色土肥力与肥料效益监测基地的紫色

土,过10目筛、高压蒸汽灭菌后,备用。

供试菌种及药剂:菌株 M-1 由西南大学重庆市农业资源与环境重点实验室从国家重点野外台站紫色土肥力与肥料效益监测基地分离筛选获得,禾谷镰孢菌由西南大学植物生态病理研究所惠赠;苯并咪唑类杀菌剂多菌灵(carbendazim),四川国光农化股份有限公司,有效成分含量为50%。

培养基:马铃薯葡萄糖琼脂(potato dextrose agar, PDA)培养基:去皮马铃薯200 g、葡萄糖20 g、琼脂15~20 g、蒸馏水1 L, pH 自然;基础液体培养基:葡萄糖20 g、NH₄Cl 10 g、MgSO₄ 1 g、CaCl₂ 1 g、KH₂PO₄ 2 g、蒸馏水1 L, pH 自然。

试剂及仪器:本试验所用试剂均为国产分析纯。JH722型可见分光光度计,上海菁华科技仪器有限公司;T6新世纪紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;DHP-9272型电热恒温培养箱,上海齐欣科学仪器有限公司;DDS-12A 数字电导率仪,上海鹏顺科学仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 菌株 M-1 对禾谷镰孢菌抑制效果的测定

通过平板对峙试验测定菌株 M-1 活体菌对禾谷镰孢菌的体外抑菌效果(向亚萍等,2015)。将保藏的菌株 M-1 或病原菌禾谷镰孢菌分别接种到 PDA 平板上,28℃暗培养5 d,待菌落长满平板后,备用。在已活化培养好的菌株 M-1 和禾谷镰孢菌的菌落边缘打取直径5 mm的菌饼,分别接种至新的 PDA 平板上,二者接种点相距3 cm构成2点对峙,以加入0.4 mg/mL 多菌灵3 mL的 PDA 平板为药剂对照组,以只接禾谷镰孢菌的 PDA 平板为空白对照组,每个处理3次重复。于28℃下暗培养72 h后,测量各处理病原菌菌落半径,分别计算菌株 M-1 和多菌灵对禾谷镰孢菌的抑制率。抑制率=(对照菌落半径-处理菌落半径)/对照菌落半径×100%。

通过液体培养液抑菌试验测定菌株 M-1 发酵液对禾谷镰孢菌的抑制效果(Campanile et al., 2007)。取活化好的直径5 mm的 M-1 菌饼5块,接种至装有100 mL 基础液体培养基的250 mL 三角瓶中,28℃下以150 r/min 摇床振荡培养5 d,离心后取上清液,用0.22 μm 无菌过滤器滤去上清液中的残留菌体,制得菌株 M-1 无菌发酵液。取菌株 M-1 无菌发酵液3 mL 与温度为50℃左右的 PDA 培养基15 mL 混合均匀后倒平板,待冷却凝固后,再接种禾谷镰孢菌,以加入0.4 mg/mL 多菌灵3 mL 的 PDA 平板为药剂对照组,以加入3 mL 灭菌基础液体培养基的 PDA

平板作为空白对照,于28℃下暗培养72 h后,测量各处理病原菌菌落半径。每个处理3次重复。根据上述公式分别计算菌株 M-1 发酵液和多菌灵对禾谷镰孢菌的抑制率。

1.2.2 菌株 M-1 对小麦苗期赤霉病的防效

向1.2.1中活化培养好的菌株 M-1 或病原菌 PDA 平板中加入5 mL 无菌水,用枪头轻轻将培养基表面的分生孢子刮下,将所得分生孢子悬浮液置于已灭菌的50 mL 三角瓶中,剧烈振荡后用8层纱布过滤2次,并用无菌水洗滤2~3次,最终使滤液体积达到10 mL。所得菌株 M-1 和病原菌分生孢子悬浮液用血球计数法计数后,用基础液体培养基均稀释至分生孢子浓度为 4.5×10^5 个/mL,备用。

将小麦品种新麦18的种子先用75%酒精浸泡5 min,再用20%次氯酸钠溶液处理3 min,然后无菌水冲洗数次,于28℃恒温培养箱内催芽,种子发芽后播于盛有无菌营养土的育苗盘,继续恒温培养。待小麦幼苗长至2片子叶时移栽至装有2 kg 无菌土的花盆中,每盆3株,成活后,保留1株,不施肥,缓苗20 d后,分别进行5个处理:(1)先浇灌 4.5×10^5 个/mL 禾谷镰孢菌分生孢子悬浮液10 mL,24 h后浇灌蒸馏水10 mL;(2)先浇灌 4.5×10^5 个/mL 禾谷镰孢菌分生孢子悬浮液10 mL,24 h后浇灌基础液体培养基10 mL;(3)先浇灌 4.5×10^5 个/mL 禾谷镰孢菌分生孢子悬浮液10 mL,24 h后浇灌 4.5×10^5 个/mL 的菌株 M-1 分生孢子悬浮液10 mL;(4)先浇灌 4.5×10^5 个/mL 禾谷镰孢菌分生孢子悬浮液10 mL,24 h后浇灌 M-1 菌株发酵液10 mL;(5)先浇灌 4.5×10^5 个/mL 禾谷镰孢菌分生孢子悬浮液10 mL,24 h后浇灌0.08 mg/mL 多菌灵10 mL。每个处理3盆,4次重复,共60盆。处理后每隔5 d调查统计1次小麦植株的发病情况以及病情级别,共统计3次;并分别计算发病率、病情指数和防效。病情分级标准如下:0级:无病斑,或发病茎叶小于1%;1级:有小块病斑,发病茎叶为1%~25%;2级:有大块病斑,发病茎叶为26%~50%;3级:有大量病斑,枯萎卷曲,发病茎叶为51%~75%;4级:植株有大量病斑,发病茎叶为76%~90%;5级:发病茎叶为90%以上或全株病死。发病率=发病株数/调查株数×100%;病情指数= Σ (各级病叶数×相应级数)/(调查总叶数×最高级数)×100;防效=(对照组病情指数-处理组病情指数)/对照组病情指数×100%。

1.2.3 菌株 M-1 对小麦幼苗生理生化指标的影响

按1.2.2方法播种管理小麦,缓苗20 d后分别进

行3个处理:(1)浇灌基础液体培养基10 mL;(2)浇灌 4.5×10^5 个/mL菌株M-1分生孢子悬浮液10 mL;(3)浇灌菌株M-1发酵液10 mL。每个处理组12株,4次重复。处理后第22天采集各处理小麦叶片,测定防御酶活性、细胞膜透性和丙二醛含量;处理后第35天收获各处理小麦植株,测定叶绿素含量、硝化还原酶活性、营养成分含量以及生物量。

防御酶活性测定:称取0.5 g小麦叶片,加少量聚乙烯吡咯烷酮、0.05 mol/mL磷酸缓冲液(pH 6.0)5.0 mL及少许石英砂,在冰浴条件下充分研磨成匀浆,于4℃下以10 000 r/min离心10 min,所得上清液即为酶液。超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性测定采用氮蓝四唑法(沈文彪等,1996),反应液为130 mmol/L甲硫氨酸0.6 mL、750 μ mol/L氯化硝基四氮唑蓝0.6 mL、20 μ mol/L核黄素0.6 mL、100 μ mol/L乙二胺四乙酸二钠0.6 mL、50 mmol/L磷酸缓冲(pH 7.5)3 mL、待测酶液2.0 mL、蒸馏水0.5 mL,暗对照进行遮光处理,其余在4 000 lx光强下照射20 min后,于可见分光光度计560 nm波长处测定吸光值。过氧化氢酶(catalase, CAT)活性测定采用紫外吸收法(杨兰芳等,2009),反应液为待测酶液0.1 mL、0.05 mol/mL磷酸缓冲液(pH 7.8)6 mL、蒸馏水1 mL,在25℃预热后逐管加入0.1 mol/L H_2O_2 0.4 mL,每加完1管迅速倒入比色皿中并立即计时,于紫外分光光度计240 nm波长处测定吸光值。过氧化物酶(peroxidase, POD)活性测定采用愈创木酚法(李忠光和龚明,2008),反应液为待测酶液0.05 mL、0.3%愈创木酚4 mL、0.3% H_2O_2 0.05 mL,在37℃水浴中混合均匀,于可见分光光度计470 nm波长处测定吸光值。苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia-lyase, PAL)活性测定采用齐绍武等(2004)方法,反应液为0.1 mol/L硼酸缓冲液(含0.025 mol/L L-苯丙氨酸,二者比例为2:1, pH 8.8)3 mL、待测酶液1.0 mL,4℃下反应1 h后,加6 mol/L HCl 1.0 mL终止反应,于紫外可见分光光度计290 nm波长处测定吸光值。

采用电解质渗透法测定小麦叶片细胞膜透性(袁琳等,2005)。取小麦叶片0.5 g置于大试管中,加入蒸馏水20 mL,抽气15 min,静置,用电导仪测定第1次电导值(L_1),然后煮沸30 min,冷却后测定第2次电导值(L_2),测定蒸馏水的电导值(L_0),计算相对电导值 $= (L_1 - L_0) / (L_2 - L_0) \times 100\%$ 。相对电导值越大,说明细胞膜透性越大。

采用硫代巴比妥酸比色法测定小麦叶片丙二醛

含量(尹亚丽等,2010)。取小麦叶片0.5 g于放有0.05 mol/L磷酸缓冲液(pH 7.8)4 mL和少量石英砂的研钵中研磨,匀浆于4℃下以4 000 r/min离心20 min,取上清液1.0 mL,加入2%硫代巴比妥酸1 mL、三氯乙酸溶液3 mL,混匀后于沸水浴中反应15 min,冰浴迅速冷却后,3 000 r/min下离心10 min,于紫外可见分光光度计532 nm和600 nm波长处测定吸光值。

采用昌梦雨等(2016)方法测定小麦叶片叶绿素含量。称取小麦叶片0.2 g于研钵中,加入少量石英砂和95%乙醇3 mL,研磨成浆,再加95%乙醇10 mL,继续研磨至组织变白,静置4~5 min。将研钵中的提取液过滤到25 mL的棕色容量瓶中,用95%乙醇将研钵及滤纸上的叶绿素全部冲洗至容量瓶,最后用95%乙醇定容,摇匀。以95%乙醇为空白,在可见分光光度计665 nm和649 nm波长处测定吸光值。

采用磺胺比色法(李忠光和龚明,2009)测定小麦叶片中硝酸还原酶活性。称取小麦叶片0.5 g于研钵中置于低温冰箱30 min,取出后于冰浴中加少量石英砂及提取缓冲液4 mL,研磨至匀浆,转移至离心管中于4℃下以4 000 r/min下离心15 min,上清液即为粗酶液。取粗酶液0.4 mL于10 mL试管中,加入含0.1 mol/L KNO_3 的磷酸缓冲液1.2 mL和NADH溶液0.4 mL,混匀后在25℃水浴中保温30 min,对照不加NADH溶液,而以0.1 mol/L磷酸缓冲液(pH 7.5)0.4 mL代替。保温结束后立即加入磺胺溶液1 mL终止酶反应,再加入萘基乙烯胺溶液1 mL,显色15 min后以4 000 r/min下离心5 min,取上清液在可见分光光度计540 nm波长处测定吸光值。另外称取小麦叶片0.5 g,经 H_2SO_4 - H_2O_2 消煮法消煮后,分别以凯氏定氮法、钼锑抗分光光度法和火焰分光光度法(张韫,2011)分析N、P、K的含量并计算其吸收量。将各处理所有小麦植株测量株高后,于105℃杀青,80℃烘干后称取生物量。

1.3 数据分析

使用SPSS 21.0统计软件对试验数据进行单因素方差分析,采用最小显著差数(LSD)法检验各处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 菌株M-1对禾谷镰孢菌的抑制效果

菌株M-1活体菌和发酵液对小麦赤霉病原菌均有较好的抑制效果。菌株M-1活体菌对禾谷镰孢菌的抑制率为57.71%,较化学药剂多菌灵处理组显

著提高 27.11%; 菌株 M-1 发酵液对禾谷镰孢菌的抑制率达到 72.95%, 较多菌灵处理显著提高 60.68% (图 1)。

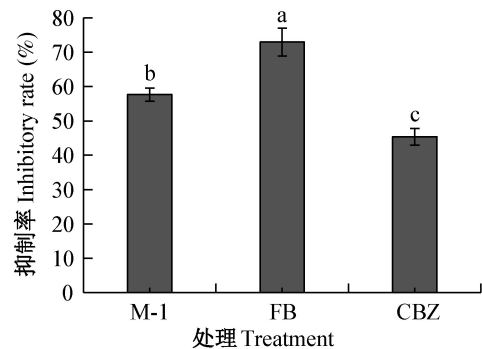


图 1 不同处理对禾谷镰孢菌的抑制率
Fig. 1 The inhibitory rate of different treatments against *Fusarium graminearum*

M-1: 菌株 M-1 活体菌; FB: 菌株 M-1 发酵液; CBZ: 多菌灵。图中数据为平均数±标准差。不同小写字母表示经 LSD 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。M-1: Strain M-1; FB: fermentation broth of strain M-1; CBZ: carbendazim. Data are mean±SE. Different letters indicate significant difference at $P<0.05$ level by LSD test.

2.2 菌株 M-1 对小麦苗期赤霉病的防效

小麦幼苗接种禾谷镰孢菌后, 植株赤霉病发病率高达 85.42%。菌株 M-1 分生孢子悬浮液、发酵液和化学农药多菌灵处理小麦幼苗后, 赤霉病的发病率和病情指数均有一定降低, 其中, 发病率分别降低了 53.66% ($P<0.05$)、20.49% 和 31.71% ($P<0.05$); 病情指数分别显著降低了 88.10%、77.82% 和 81.07% ($P<0.05$, 表 1)。菌株 M-1 分生孢子悬浮液和发酵液处理对小麦赤霉病的防效分别达到 88.10% 和 77.18%, 与常用化学农药多菌灵的防效相当。

2.3 菌株 M-1 对小麦生理生化指标的影响

2.3.1 对小麦叶片防御酶活性的影响

浇灌菌株 M-1 分生孢子悬浮液和发酵液后, 小麦叶片 SOD、CAT、POD 及 PAL 活性均有一定增加, SOD 活性分别较对照显著增加了 35.37% 和 29.09% ($P<0.05$); CAT 活性分别较对照增加了 87.51% 和 25.15%, 且前者较对照显著增加 ($P<0.05$); POD 活性分别较对照显著增加了 43.95% 和 38.74% ($P<0.05$); PAL 活性分别较对照增加了 40.74% ($P<0.05$) 和 7.82%, 且前者较对照显著增加 (表 2)。

表 1 菌株 M-1 对小麦苗期赤霉病的防效

Table 1 Control efficacy of strain M-1 on wheat seedling scab

处理 Treatment	发病率 (%) Incidence	病情指数 Disease index	防效 (%) Control efficacy
禾谷镰孢菌 <i>Fusarium graminearum</i>	85.42±5.24 a	42.79±9.53 a	—
禾谷镰孢菌+基础液体培养基 <i>Fusarium graminearum</i> +basic liquid medium	68.34±7.61 ab	28.24±4.31 a	—
禾谷镰孢菌+菌株 M-1 分生孢子悬浮液 <i>Fusarium graminearum</i> +conidial suspension of strain M-1	39.58±3.99 b	5.09±3.36 b	88.10±7.86 a
禾谷镰孢菌+菌株 M-1 发酵液 <i>Fusarium graminearum</i> +fermentation broth of strain M-1	67.92±3.99 ab	9.49±3.30 b	77.18±5.92 a
禾谷镰孢菌+多菌灵 <i>Fusarium graminearum</i> +carbendazim	58.33±5.24 b	8.10±4.23 b	81.08±9.89 a

表中数据为平均数±标准差。同列不同小写字母表示经 LSD 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by LSD test.

表 2 菌株 M-1 对小麦叶片防御酶活性的影响

Table 2 Effects of different treatments on activities of enzymes related to disease resistance in wheat leaves

处理 Treatment	超氧化物歧化酶 SOD (U/g FW)	过氧化氢酶 CAT (U·g ⁻¹ FW·min ⁻¹)	过氧化物酶 POD (U·g ⁻¹ FW·min ⁻¹)	苯丙氨酸解氨酶 PAL (U·g ⁻¹ FW·min ⁻¹)
基础液体培养基 Basic liquid medium	107.09±2.19 b	18.41±3.20 b	275.33±11.61 b	162.00±15.76 b
菌株 M-1 分生孢子悬浮液 Conidial suspension of strain M-1	144.97±7.68 a	34.52±4.41 a	396.33±16.90 a	228.00±22.74 a
菌株 M-1 发酵液 Fermentation broth of strain M-1	138.24±7.21 a	23.04±1.88 ab	382.00±21.55 a	174.67±23.70 b

表中数据为平均数±标准差。同列不同小写字母表示经 LSD 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by LSD test.

2.3.2 对小麦叶片细胞膜透性及丙二醛含量的影响

浇灌菌株 M-1 分生孢子悬浮液和发酵液后,小麦叶片细胞膜透性和丙二醛含量均有一定的降低,其中,细胞膜透性分别较对照显著降低了 35.94% 和

32.15% ($P<0.05$, 图 2-A), 丙二醛含量分别较对照降低了 41.76% ($P<0.05$) 和 3.23% (图 2-B), 且前者较对照显著降低。

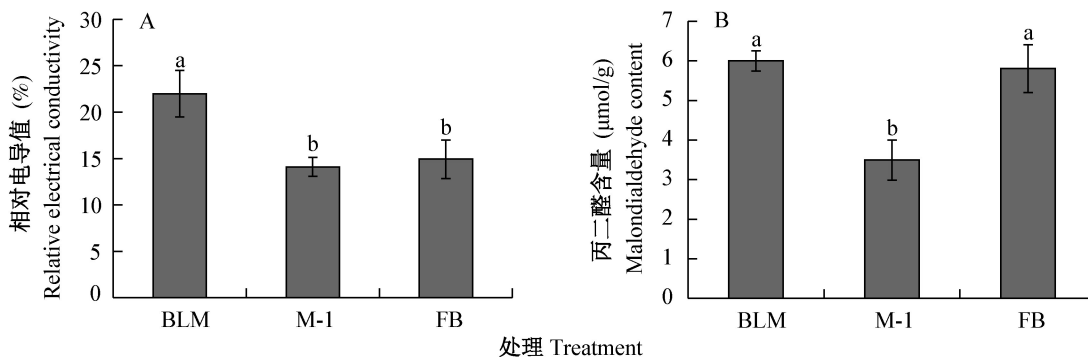


图 2 菌株 M-1 对小麦叶片细胞膜透性(A)及丙二醛含量(B)的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on membrane permeability (A) and malondialdehyde (B) in wheat leaves

BLM: 基础液体培养基; M-1: 菌株 M-1 分生孢子悬浮液; FB: 菌株 M-1 发酵液。图中数据为平均数±标准差。柱上不同小写字母表示经 LSD 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。BLM: Basic liquid medium; M-1: conidial suspension of strain M-1; FB: fermentation broth of strain M-1. Data are mean±SE. Different letters on the bars indicate significant difference at $P<0.05$ level by LSD test.

2.3.3 对小麦叶片叶绿素含量和硝化还原酶活性的影响

浇灌菌株 M-1 分生孢子悬浮液和发酵液后,小麦叶片叶绿素含量分别较对照显著增加了 87.45%

和 87.37% ($P<0.05$, 图 3-A); 小麦叶片硝化还原酶活性分别较对照增加了 23.78% ($P<0.05$) 和 7.38% (图 3-B), 且前者较对照显著增加。

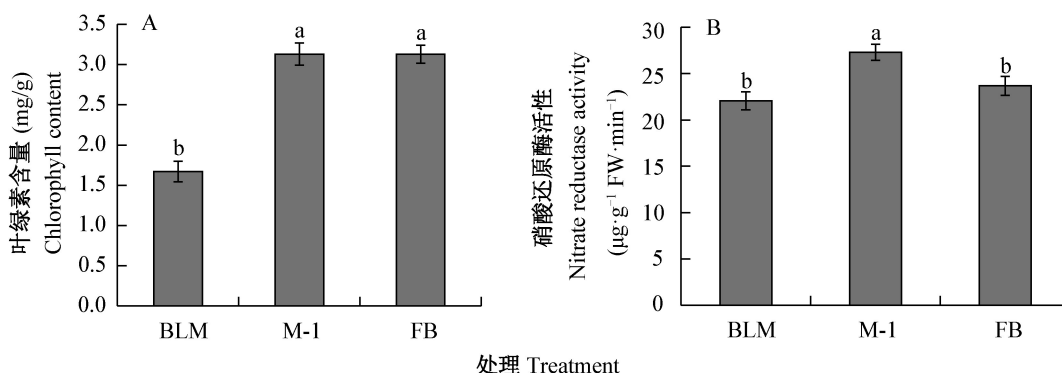


图 3 菌株 M-1 对小麦叶片叶绿素含量(A)和硝酸还原酶活性(B)的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on chlorophyll content (A) and nitrate reductase activity (B) in wheat leaves

BLM: 基础液体培养基; M-1: 菌株 M-1 分生孢子悬浮液; FB: 菌株 M-1 发酵液。图中数据为平均数±标准差。柱上不同小写字母表示经 LSD 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。BLM: Basic liquid medium; M-1: conidial suspension of strain M-1; FB: fermentation broth of strain M-1. Data are mean±SE. Different letters on the bars indicate significant difference at $P<0.05$ level by LSD test.

2.3.4 对小麦叶片 N、P、K 含量及吸收量的影响

浇灌菌株 M-1 分生孢子悬浮液后,小麦叶片中 N、P、K 的含量及吸收量均显著增加,其中 N、P、K 的含量依次较对照显著增加了 39.82%、15.38% 和 22.94% ($P<0.05$), N、P、K 的吸收量较对照显著增加了 85.19%、54.73% 和 66.79% ($P<0.05$); 浇灌菌株

M-1 发酵液后,小麦叶片中 N、P、K 的含量和吸收量均有所增加,其中, N、P、K 的含量依次较对照增加了 7.96%、11.54% 和 6.42%, 且 P 含量较对照显著增加 ($P<0.05$), N、P、K 的吸收量依次较对照增加了 26.69%、30.63% 和 25.70% (表 3), 且 N 和 P 的吸收量较对照显著增加 ($P<0.05$)。

2.3.5 对小麦株高及生物量的影响

浇灌菌株 M-1 分生孢子悬浮液和发酵液后, 小麦株高和生物量均有一定增加, 其中, 株高分别较对

照增加了 13.33% ($P<0.05$) 和 8.31% (图 4-A), 生物量分别较对照增加了 34.45% ($P<0.05$) 和 17.59% (图 4-B), 且前者均较对照显著增加。

表 3 不同处理对小麦叶片氮、磷、钾含量及吸收量的影响

Table 3 Effects of different treatments on N, P and K contents and absorption in wheat leaves

处理 Treatment	含量 Content (%)			吸收量 Absorption (mg/plant)		
	N	P	K	N	P	K
基础液体培养基 Basic liquid medium	1.13±0.03 b	0.26±0.00 b	1.09±0.05 b	19.52±1.69 c	4.44±0.34 b	18.64±0.77 b
菌株 M-1 分生孢子悬浮液 Conidial suspension of strain M-1	1.58±0.09 a	0.30±0.00 a	1.34±0.05 a	36.15±1.40 a	6.87±0.48 a	31.09±2.14 a
菌株 M-1 发酵液 Fermentation broth of strain M-1	1.22±0.04 ab	0.29±0.01 a	1.16±0.02 b	24.73±0.92 b	5.80±0.33 a	23.43±1.30 b

表中数据为平均数±标准差。同列不同小写字母表示经 LSD 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by LSD test.

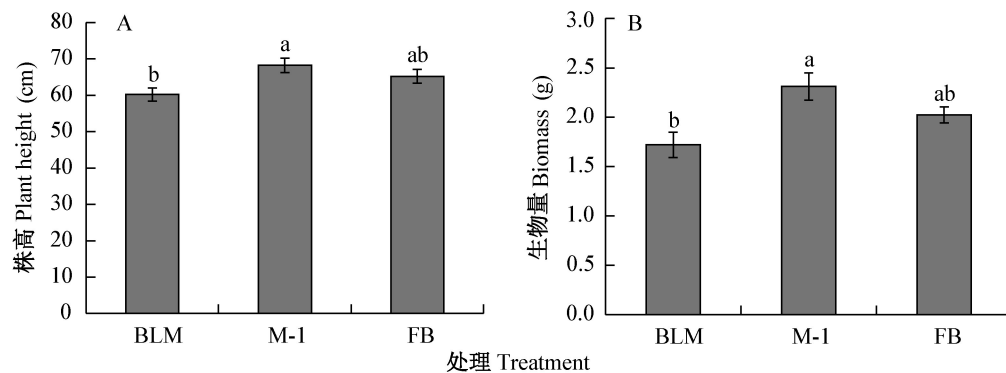


图 4 菌株 M-1 对小麦株高(A)及生物量(B)的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on plant height (A) and biomass (B) of wheat

BLM: 基础液体培养基; M-1: 菌株 M-1 分生孢子悬浮液; FB: 菌株 M-1 发酵液。图中数据为平均数±标准差。柱上不同小写字母表示经 LSD 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。BLM: Basic liquid medium; M-1: conidial suspension of strain M-1; FB: fermentation broth of strain M-1. Data are mean±SE. Different letters on the bars indicate significant difference at $P<0.05$ level by LSD test.

3 讨论

烟管菌为木腐真菌, 多分布在枯木、腐木及枯枝落叶上。目前, 国内外关于烟管菌的研究主要集中在纤维素降解(褚衍亮等, 2015)、木质素降解(Moody et al., 2018)、漆酶合成(彭滢钞等, 2014)及有机污染物的生物处理(Andriani & Tachibana, 2016)等方面, 而在生物防治方面的研究较少。Domanski (1982) 研究表明, 烟管菌能够有效防治褐腐病在栎树上发生; 汪华等(2015)发现 1 株新多孔烟管菌 *Bjerkandera* sp., 对土传根腐病菌 *Fusarium solani*、立枯病菌 *Rhizoctonia solani*、纹枯病菌 *Rhizoctonia cerealis* 等具有很强的抑制作用, 以该菌株制备的散粒剂用于田间根部病害的防效显著。本研究结果表明, 菌株 M-1 活体菌及其发酵液均能有效抑制禾谷镰孢

菌的生长, 抑制率分别达到 57.71% 和 72.95%, 效果显著优于常用化学农药多菌灵; 施用菌株 M-1 分生孢子悬浮液和发酵液后还可显著降低小麦赤霉病的发病率和病情指数, 说明菌株 M-1 对小麦苗期赤霉病的防效显著, 具有进一步开发为生物菌剂的潜力。

在病原菌、生防菌、植株三者相互作用过程中, 生防菌可作为植物激活剂诱导植物系统获得抗病性, 与病原物诱导的植物系统获得抗性基本类似(赵建等, 2014; 刘晓光等, 2007)。前者的作用机制主要是通过组织木质化、增强细胞机械屏障和产生植保素, 涉及到 PAL、POD、CAT 及 SOD 等催化的生物化学反应(庄敬华等, 2005; Chen et al., 2010; 齐爱勇等, 2011), 这些酶活性与植物抗病性呈正相关(唐佳频等, 2014)。贾瑞莲等(2015)发现寡雄腐霉 *Pythium oligandrum* 发酵液对番茄灰霉病的生防机制可

能是增强番茄叶片抗病性相关酶SOD及CAT活性,诱导番茄植株对病原菌产生防御作用。本研究结果表明,菌株M-1分生孢子悬浮液使温室小麦叶片SOD、CAT、POD及PAL活性均显著升高,其发酵液使温室小麦叶片SOD和POD活性显著提高,表明菌株M-1分生孢子悬浮液及其发酵液可能是通过提高小麦相关防御酶的活性来增强小麦的抗病能力。

当植物遭受病原菌的侵害或其它逆境伤害时会造成其细胞选择透性的改变或丧失,因此细胞膜透性常作为植物抗逆性强弱的标志(张治安和陈展宇,2008)。丙二醛是叶片膜脂的过氧化产物,其含量高低反应了活性氧的代谢以及对细胞膜的破坏程度,与植物的逆境危害程度呈负相关(吴洪生等,2008),因此,丙二醛含量可作为鉴定植物抗病性的生化指标之一。本试验中,菌株M-1分生孢子悬浮液和发酵液均使小麦叶片的细胞膜透性显著降低,同时前者还使小麦叶片丙二醛含量显著降低,说明菌株M-1分生孢子悬浮液和发酵液通过降低细胞膜透性和丙二醛含量,进而减轻病菌对小麦的侵害,有效保护植物细胞膜,提高小麦的抗病能力。

本试验结果表明,菌株M-1分生孢子悬浮液和发酵液均能增加小麦叶片的叶绿素含量和硝酸还原酶活性,提高N、P、K的含量及吸收量,增加小麦的株高和生物量,促进光合作用、物质转化和养分的有效吸收,进而促进小麦生长(齐曼·尤努斯等,2011),健康的植株也有利于提高其对病菌的抗性,类似于寡雄腐霉对烟草(赵建等,2013)、番茄(贾瑞莲等,2015)、辣椒(耿明明和黄建国,2016)等作物生长的影响。综上所述,烟管菌菌株M-1对温室小麦苗期赤霉病有较好的防效,既能提高小麦幼苗的抗病能力,又能促进其生长,在小麦苗期赤霉病的生物防治中具有良好的应用前景。

参 考 文 献 (References)

- Andriani A, Tachibana S. 2016. Lignocellulosic materials as solid support agents for *Bjerkandera adusta* SM46 to enhance polycyclic aromatic hydrocarbon degradation on sea sand and sea water media. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 8: 310–320
- Backman PA, Sikora RA. 2008. Endophytes: an emerging tool for biological control. *Biological Control*, 46(1): 1–3
- Campanile G, Ruscellia, Luisi N. 2007. Antagonistic activity of endophytic fungi towards *Diplodia corticola* assessed by *in vitro* and *in planta* tests. *European Journal of Plant Pathology*, 117(3): 237–246
- Champeil A, Dore T, Fourbet JF. 2004. *Fusarium* head blight: epidemiological origin of the effects of cultural practices on head blight attacks and the production of mycotoxins by *Fusarium* wheat grains. *Plant Science*, 166(6): 1389–1415
- Chang MY, Wei XN, Wang QY, Hu YL, Li CH, Tang YL. 2016. A comparative study of different extraction methods for plant chlorophyll. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 32(27): 177–180 (in Chinese) [昌梦雨, 魏晓楠, 王秋悦, 胡雨龙, 李承杭, 唐延林. 2016. 植物叶绿素含量不同提取方法的比较研究. 中国农学通报, 32(27): 177–180]
- Chen F, Wang M, Zhang Y, Luo JM, Yang XR, Wang XL. 2010. Quantitative changes of plant defense enzymes and phytohormone in biocontrol of cucumber *Fusarium* wilt by *Bacillus subtilis* B579. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 26(4): 675–684
- Chen Y, Wang JQ, Yang RM, Ma ZH. 2017. Current situation and management strategies of *Fusarium* head blight in China. *Plant Protection*, 43(5): 11–17 (in Chinese) [陈云, 王建强, 杨荣明, 马忠华. 2017. 小麦赤霉病发生危害形势及防控对策. 植物保护, 43(5): 11–17]
- Chu YL, Wang N, Yu H. 2015. Identification of a mulberry branch fiber degrading fungal strain and determination of its cellulose degrading activity. *Science of Sericulture*, 41(1): 127–133 (in Chinese) [褚衍亮, 王娜, 余晗. 2015. 一株桑枝纤维降解菌株的鉴定及纤维素降解能力测定. 蚕业科学, 41(1): 127–133]
- dal Bello GM, Monaco CI, Simon MR. 2002. Biological control of seedling blight of wheat caused by *Fusarium graminearum* with beneficial rhizosphere microorganisms. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 18(7): 627–636
- Domanski S. 1982. *Bjerkandera adusta* on young *Quercus rubra* and *Quercus robur* injured by late spring frosts in the Upper Silesia Industrial District of Poland. *Forest Pathology*, 12(6): 406–413
- Ehlin G, Cockburn A, Snowdon P, Buschhaus H. 1997. The significance of the *Fusarium* toxin deoxynivalenol (DON) for human and animal health. *Cereal Research Communications*, 25(3): 443–447
- Geng MM, Huang JG. 2016. Acute toxicity of fermentation broth produced from *Pythium oligandrum* and its influence on the growth and control of pepper seedling anthrax. *Journal of Plant Protection*, 43(2): 307–313 (in Chinese) [耿明明, 黄建国. 2016. 寡雄腐霉发酵液的动物毒性及对辣椒的促生防病效应. 植物保护学报, 43(2): 307–313]
- Gilbert J, Tekauz A. 2000. Review: recent developments in research on *Fusarium* head blight of wheat in Canada. *Canada Journal of Plant Pathology*, 22(1): 1–8
- Iwahara K, Honda Y, Watanabe T, Kuwahara M. 2000. Polymerization of guaiacol by lignin-degrading manganese peroxidase from *Bjerkandera adusta* in aqueous organic solvents. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 54(1): 104–111
- Jia RL, Geng MM, Yuan L. 2015. Influences of *Pythium oligandrum* broth on the growth and botrytis control of tomato seedlings in greenhouses. *Journal of Plant Protection*, 42(5): 827–833 (in Chinese) [贾瑞莲, 耿明明, 袁玲. 2015. 寡雄腐霉发酵液对温

- 室番茄生长及灰霉病的防治作用. 植物保护学报, 42(5): 827–833]
- Khan NI, Schisler DA, Boehm MJ, Lipps PE, Slininger PJ. 2004. Field testing of antagonists of *Fusarium* head blight incited by *Gibberella zeae*. Biological Control, 29(2): 245–255
- Li ZG, Gong M. 2008. Improvement of guaiacol method for determination of plant peroxidase activity. Plant Physiology Communications, 44(2): 323–324 (in Chinese) [李忠光, 龚明. 2008. 愈创木酚法测定植物过氧化物酶活性的改进. 植物生理学通讯, 44(2): 323–324]
- Li ZG, Gong M. 2009. Improvement of sulfa colorimetry method for determination of nitrate reductase activity in plant tissues. Plant Physiology Communications, 45(1): 67–68 (in Chinese) [李忠光, 龚明. 2009. 磺胺比色法测定植物组织硝酸还原酶活性的改进. 植物生理学通讯, 45(1): 67–68]
- Liu XG, Gao KX, Kang ZS, He BL. 2007. Systemic resistance induced by biocontrol agents in plants and its biochemical and cytological mechanisms. Chinese Journal of Applied Ecology, 18(8): 1861–1868 (in Chinese) [刘晓光, 高克祥, 康振生, 何邦令. 2007. 生防菌诱导植物系统抗性及其生化和细胞学机制. 应用生态学报, 18(8): 1861–1868]
- Ma ZH, Yin YN, Chen Y. 2016. Research progress of wheat scab occurrence rules and its prevention and control technology. //Chen WQ. Scientific innovation in plant protection and targeted poverty alleviation in agriculture — China Plant Protection Society, Annual Conference in 2016. Beijing: China Science and Technology Press, pp. 1 (in Chinese) [马忠华, 尹燕妮, 陈云. 2016. 小麦赤霉病发生规律及其防控技术研究进展. //陈万权. 植保科技创新与农业精准扶贫——中国植物保护学会2016年学术年会论文集. 北京: 中国农业科学技术出版社, pp. 1]
- Mejia LC, Rojas EI, Maynard Z, van Bael S, Arnold AE, Hebbard P, Samuels GJ, Robbins N, Herre EA. 2008. Endophytic fungi as biocontrol agents of *Theobroma cacao* pathogens. Biological Control, 46(1): 4–14
- Moody SC, Dudley E, Hiscox J, Boddy L, Eastwood DC. 2018. Interdependence of primary metabolism and xenobiotic mitigation characterizes the proteome of *Bjerkandera adusta* during wood decomposition. Applied and Environmental Microbiology, 84(2): e01401-17
- O'Donnell K, Ward TJ, Geiser DM, Corby Kistler H, Aoki T. 2004. Genealogical concordance between the mating type locus and seven other nuclear genes supports formal recognition of nine phylogenetically distinct species within the *Fusarium graminearum* clade. Fungal Genetics and Biology, 41(6): 600–623
- Palazzini JM, Groenenboom-De Haas BH, Torres AM, Köhl J, Chulze SN. 2013. Biocontrol and population dynamics of *Fusarium* spp. on wheat stubble in Argentina. Plant Pathology, 62(4): 859–866
- Peng YC. 2014. The research of *Bjerkandera fumosa* mutagenized to improve laccase production. Master Thesis. Changsha: Central South University of Forestry & Technology (in Chinese) [彭滢钲. 2014. 烟色烟管菌诱变提高漆酶产量的研究. 硕士学位论文. 长沙: 中南林业科技大学]
- Peng YC, Cao FX, Dong XJ, Peng JQ, Hu SX. 2014. Screen high-producing laccase strain of *Bjerkandera fumosa* through UV and ^{60}Co composite mutagenesis. Biotechnology Bulletin, (9): 120–124 (in Chinese) [彭滢钲, 曹福祥, 董旭杰, 彭继庆, 胡双喜. 2014. 紫外、 ^{60}Co 复合诱变选育烟色烟管菌漆酶高产突变株. 生物技术通报, (9): 120–124]
- Qi AY, Zhao XS, Liu DQ. 2011. Research of biological control in plant diseases by *Bacillus* spp. Chinese Agricultural Science Bulletin, 27(12): 277–280 (in Chinese) [齐爱勇, 赵绪生, 刘大群. 2011. 芽孢杆菌生物防治植物病害研究现状. 中国农学通报, 27(12): 277–280]
- Qi SW, Guan CY, Liu CL. 2004. Relationship between some enzyme activity and resistance to *Sclerotinia sclerotiorum* of rapeseed cultivars. Acta Agronomica Sinica, 30(3): 270–273 (in Chinese) [齐绍武, 官春云, 刘春林. 2004. 甘蓝型油菜品系一些酶的活性与抗菌核病的关系. 作物学报, 30(3): 270–273]
- Qiman · Yunus, Muhtar · Zari, Tayer · Ahmat. 2011. Root activity and photosynthetic characteristics of *Elaeagnus oxycarpa* seedlings under drought stress. Chinese Journal of Applied Ecology, 22(7): 1789–1795 (in Chinese) [齐曼·尤努斯, 木合塔尔·扎热, 塔衣尔·艾合买提. 2011. 干旱胁迫下尖果沙枣幼苗的根系活力和光合特性. 应用生态学报, 22(7): 1789–1795]
- Schisler DA, Boehm MJ, Paul PA, Rooney AP, Dunlap CA. 2015. Reduction of *Fusarium* head blight using prothioconazole and prothioconazole-tolerant variants of the *Fusarium* head blight antagonist *Cryptococcus flavecens* OH 182.9. Biological Control, 86: 36–45
- Schisler DA, Paul PA, Boehm MJ, Bradley CA, Dunlap CA. 2011. Antagonist *Cryptococcus flavecens* OH 182.9 3C colonization of wheat heads when applied with triazole fungicides and the effect on scab. Phytopathology, 101(S): 160–160
- Schulz B, Boyle C, Draeger S, Rommert AK, Krohn K. 2002. Endophytic fungi: a source of novel biologically active secondary metabolites. Mycological Research, 106(9): 996–1004
- Shen WB, Xu LL, Ye MB, Zhang RX. 1996. The suitable condition for determination SOD activity by nitro blue tetrazolium (NBT) photoreduction method. Journal of Nanjing Agricultural University, 19(2): 101–102 (in Chinese) [沈文彪, 徐朗莱, 叶茂炳, 张荣铤. 1996. 氮蓝四唑光化还原法测定超氧化物歧化酶活性的适宜条件. 南京农业大学学报, 19(2): 101–102]
- Siranidou E, Buchenauer H. 2001. Chemical control of *Fusarium* head blight on wheat. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, 108(3): 231–243
- Song YM, Cong GL, Chen HG. 2018. Efficacy of carbendazim and its mixtures for controlling wheat scab. Journal of Plant Protection, 45(2): 352–358 (in Chinese) [宋益民, 丛国林, 陈怀谷. 2018. 多菌灵及其复配制剂防治小麦赤霉病的应用效果. 植物保护学报, 45(2): 352–358]
- Starkey DE, Ward TJ, Aoki T, Gale LR, Kistler HC, Geiser DM, Suga H, Toth B, Varga J, O'Donnell K. 2007. Global molecular surveillance reveals novel *Fusarium* head blight species and trichothecene toxin diversity. Fungal Genetics and Biology, 44(11): 803–814

- 1191–1204
- Tang JP, Shao ZZ, Zhang ZT, Li GY, Jing XP, Yu ZN, Zhang JB. 2014. Mechanism of antagonistic bacteria *Pseudomonas putida* 1A00-316 from the South Pole soil against *Meloidogyne incognita*. Chinese Journal of Application and Environmental Biology, 20(6): 1046–1051 (in Chinese) [唐佳频, 邵宗泽, 张智涛, 李光玉, 景雪萍, 喻子牛, 张吉斌. 2014. 南极土壤来源的恶臭假单胞菌 1A00316 抗南方根结线虫的机制. 应用与环境生物学报, 20(6): 1046–1051]
- Teich AH. 1989. Epidemiology of wheat (*Triticum aestivum* L.) scab caused by *Fusarium* spp.//Chelkowski J. *Fusarium: mycotoxins, taxonomy and pathogenicity*. Amsterdam: Elsevier BV, pp. 269–282
- Wang H, Yu DZ, Guo J. 2015. The identification and antibacterial activity of *Bjerkandera adusta* strain Gaoshi 15.//Chen WQ. Green pest control and quality safety of agricultural products — China Plant Protection Society, Annual Conference in 2015. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, pp. 590 (in Chinese) [汪华, 喻大昭, 郭坚. 2015. 一株多孔烟管菌菌株高氏 15 号的鉴定及抑菌活性研究.//陈万权. 病虫害绿色防控与农产品质量安全——中国植物保护学会 2015 年学术年会论文集. 北京: 中国农业科学技术出版社, pp. 590]
- Wu HS, Yin XM, Liu DY, Ling N, Bao W, Ying RR, Zhu YY, Guo SW, Shen QR. 2008. Inhibition of root cell transmembrane potential and leaf anti-stress enzymes of watermelon seedling by fusaric acid. Scientia Agricultura Sinica, 41(9): 2641–2650 (in Chinese) [吴洪生, 尹晓明, 刘东阳, 凌宁, 包蔚, 应蓉蓉, 朱毅勇, 郭世伟, 沈其荣. 2008. 镰刀菌酸毒素对西瓜幼苗根细胞跨膜电位及叶细胞有关抗逆酶的抑制. 中国农业科学, 41(9): 2641–2650]
- Xiang YP, Chen ZY, Luo CP, Zhou HF, Liu YF. 2015. The antifungal activities of *Bacillus* spp. and its relationship with lipopeptide antibiotics produced by *Bacillus* spp. Scientia Agricultura Sinica, 48(20): 4064–4076 (in Chinese) [向亚萍, 陈志谊, 罗楚平, 周华飞, 刘永锋. 2015. 芽孢杆菌的抑菌活性与其产脂肽类抗生素的相关性. 中国农业科学, 48(20): 4064–4076]
- Xue AG, Voldeng HD, Savard ME, Fedak G, Tian X, Hsiang T. 2009. Biological control of *Fusarium* head blight of wheat with *Clonostachys rosea* strain ACM941. Canadian Journal of Plant Science, 31(2): 169–179
- Yang LF, Pang J, Peng XL, Yan JJ. 2009. Measurement of catalase activity in plants by ultraviolet spectrophotometry. Modern Agricultural Science and Technology, (20): 364–366 (in Chinese) [杨兰芳, 庞静, 彭小兰, 闫静静. 2009. 紫外分光光度法测定植物过氧化氢酶活性. 现代农业科技, (20): 364–366]
- Yin YL, Guo YJ, Ni Y, Han L, Tang H. 2010. Changes in physiological and biochemical indexes of alfalfa leaves under procymidone stress and sclerotinia challenge. Journal of Plant Protection, 37(3): 283–284 (in Chinese) [尹亚丽, 郭彦军, 倪郁, 韩龙, 唐华. 2010. 腐霉利与菌核病菌胁迫下紫花苜蓿理化指标的变化. 植物保护学报, 37(3): 283–284]
- Yuan L, Kerim · Ali, Zhang LQ. 2005. Effects of NaCl stress on active oxygen metabolism and membrane stability in *Pistacia vera* seedlings. Acta Phytocologica Sinica, 29(6): 985–991 (in Chinese) [袁琳, 克热木·伊力, 张利权. 2005. NaCl 胁迫对阿月浑子实生苗活性氧代谢与细胞膜稳定性的影响. 植物生态学报, 29(6): 985–991]
- Zhang XH, Zhang HN, Li Y, Wang WQ. 2017. Screening and identification of biocontrol fungi against *Didymella bryoniae* and optimization of fermentation conditions. China Biotechnology, 37(5): 76–86 (in Chinese) [张旭辉, 张红楠, 李勇, 汪文强. 2017. 抑制西瓜蔓枯病菌的生防真菌筛选、鉴定及发酵条件优化. 中国生物工程杂志, 37(5): 76–86]
- Zhang Y. 2011. Tutorial on physical and chemical analysis of soil, water and plants. Beijing: China Forestry Publishing House (in Chinese) [张韞. 2011. 土壤、水和植物理化分析教程. 北京: 中国林业出版社]
- Zhang ZA, Chen ZY. 2008. Experimental technology of plant physiology. Changchun: Jilin University Press, pp. 178–179 (in Chinese) [张治安, 陈展宇. 2008. 植物生理学实验技术. 长春: 吉林大学出版社, pp. 178–179]
- Zhao J, Huang JG, Yuan L, Shi DA, Du WR, Xing XJ. 2014. Influences of the fermentation broth of *Pythium oligandrum* on the growth and botrytis control of tomato seedlings. Acta Ecologica Sinica, 34(23): 7093–7100 (in Chinese) [赵建, 黄建国, 袁玲, 时安东, 杜如万, 邢小军. 2014. 寡雄腐霉发酵液对番茄生长的影响及对灰霉病的防治作用. 生态学报, 34(23): 7093–7100]
- Zhao J, Wu YK, Yuan L, Du RW, Yang YH, Huang JG. 2013. Effects of the fermentation broth of *Pythium oligandrum* on the growth of flue-cured tobacco and the effect of prevention and treatment on tobacco. Journal of Plant Protection, 40(1): 68–72 (in Chinese) [赵建, 吴叶宽, 袁玲, 杜如万, 杨宇虹, 黄建国. 2013. 寡雄腐霉发酵液对烤烟生长的影响及对烟草黑胫病的防治作用. 植物保护学报, 40(1): 68–72]
- Zhuang JH, Gao ZG, Yang CC, Chen J, Xue CY, Mu LX. 2005. Biocontrol of *Fusarium* wilt and induction of defense enzyme activities on cucumber by *Trichoderma viride* strain T23. Acta Phytopathologica Sinica, 35(2): 179–183 (in Chinese) [庄敬华, 高增贵, 杨长城, 陈捷, 薛彩云, 牟连晓. 2005. 绿色木霉菌 T23 对黄瓜枯萎病防治效果及其几种防御酶活性的影响. 植物病理学报, 35(2): 179–183]

(责任编辑:李美娟)