

引用本文格式 高宇晗, 孟利强, 刘治廷, 等. 立枯丝核菌对马铃薯致病性及综合防治研究进展[J]. 农业工程, 2025, 15(1): 85-92. DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.202501314. GAO Yuhan, MENG Liqiang, LIU Zhiting, et al. Research progress on pathogenicity and integrated control of *Rhizoctonia solani* Kühn to potato[J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(1): 85-92.

立枯丝核菌对马铃薯致病性及综合防治研究进展

高宇晗¹, 孟利强¹, 刘治廷¹, 姜超¹, 刁琢², 杜蓉春¹, 候婷婷¹, 曹旭¹

(1. 黑龙江省科学院微生物研究所, 黑龙江 哈尔滨 150010;

2. 大兴安岭地区农业林业科学研究院, 黑龙江 大兴安岭 165000)

摘要: 研究了以立枯丝核菌为病原菌的土传病害马铃薯黑痣病, 该病具有固定繁殖在土壤中难以根除的特点。在我国主要马铃薯种植区都有不同程度的发生, 给马铃薯的商业价值带来了严重影响。归纳总结了马铃薯黑痣病的症状、融合群、分布和发病规律等, 同时探讨了病原菌的鉴定方法和致病机制。提出了农业防治、选育抗性品种及生物防治等多种措施, 为进一步深入研究和防治马铃薯黑痣病提供了理论基础。

关键词: 马铃薯; 黑痣病; 立枯丝核菌; 融合群; 致病机制; 防治措施

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 2095-1795(2025)01-0085-08

DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.202501314

Research progress on pathogenicity and integrated control of *Rhizoctonia solani* Kühn to potato

GAO Yuhan¹, MENG Liqiang¹, LIU Zhiting¹, JIANG Chao¹, DIAO Zhuo², DU Rongchun¹, HOU Tingting¹, CAO Xu¹

(1. Institute of Microbiology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin Heilongjiang 150010, China;

2. Daxinganling Agricultural and Forestry Research Institute, Daxinganling Heilongjiang 165000, China)

Abstract: Potato black scurf, a soil-borne disease with *Rhizoctonia solani* Kühn as the causal agent was studied, which was characterized by fixed propagation in soil and is difficult to eradicate. It has occurred in different degrees in major potato growing areas in China and has brought serious influence on commercial value of potato. The symptoms, anastomosis groups, distribution, and occurrence regularity of potato black scurf were summarized, and identification method and pathogenic mechanism of pathogenic bacteria were discussed. Agricultural control, breeding resistant varieties, biological control, and other measures were proposed to provide a theoretical basis for further in-depth research and control of potato black scurf.

Keywords: potato, black scurf, *Rhizoctonia solani* Kühn, anastomosis group, pathogenic mechanism, prevention measure

0 引言

马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 是一种茄科茄属的双子叶草本块茎植物, 起源于南美洲安第斯山区^[1]。由于马铃薯适应能力强、产量高、栽培简单、营养丰富及用途广泛, 备受种植户和消费者青睐, 成为我国第4大主要粮食作物, 仅次于玉米、水稻和小麦^[2]。近年来, 马铃薯的单产呈现出良好的增长势头。然而, 与现代农业科技相比, 传统的马铃薯种植技术存在一些问题, 如关键技术研发和推广不足、马铃薯品质退

化、过量施用化肥和连作种植导致的土传病害(如病毒和虫害)等^[3]。马铃薯黑痣病是一种土传病害, 由立枯丝核菌 (*Rhizoctonia solani* Kühn) 引起, 病原菌具有较强的侵染能力, 严重影响了马铃薯的品质和产量, 制约了马铃薯的可持续发展。为了解决这些问题, 需要加强对关键技术的研发和推广, 并采取措施防止土壤退化和病害的扩散。科学合理的种植管理, 包括轮作、合理施肥和病虫害防治等措施, 可降低马铃薯的病害发生率, 提高品质和产量, 促进马铃薯产业的可持续发展。

收稿日期: 2024-05-09 修回日期: 2024-07-15

基金项目: 2023年度黑龙江省重大科技成果转化项目(CG23014); 黑龙江省科学院院长基金项目(YZ2023SW02)

作者简介: 高宇晗, 硕士生, 主要从事微生物学研究 E-mail: 810847202@qq.com

曹旭, 通信作者, 硕士, 副研究员, 主要从事微生物肥料资源发掘与土壤修复研究

E-mail: 273325760@qq.com

在线投稿

www.d1ae.com

1 马铃薯黑痣病研究现状

1.1 症状

马铃薯黑痣病是一种在马铃薯整个发育周期发生的病害,在茎块膨大期表现最为严重。当健康的种薯播种在带有黑痣病原菌的土壤中,并遭遇土壤阴冷潮湿等不良环境条件时,病原菌会开始生长和侵染。被侵染的幼芽会出现褐色病斑,严重时生长点会坏死,导致芽腐,致使出苗困难、地上植株生长不良,甚至出现缺苗和断垄情况。茎部发病会首先在近地面处形成淡红褐色凹陷长形病斑,严重时茎基部周围会变黑,表皮会腐烂形成茎溃疡。由于导管组织受损,茎部会坏死,造成植株光合作用和营养吸收受阻,从而导致植株易倾斜、倒伏甚至死亡。在成熟的块茎上会出现扁平、黑褐色的菌核,这是引起黑痣病名称的来源^[4-5]。尽管马铃薯黑痣病会降低商品价值,但不会引起块茎及其内部的腐烂。如果病菌通过皮孔或导管组织进入块茎内部,在罹病块茎与健康组织之间会形成木栓组织,导致死亡组织干枯、脱落、畸形和龟裂等症状,这种情况被称为黑色粗皮病^[6]。因此,马铃薯黑痣病在马铃薯生长发育过程中产生多样的病变表现。

1.2 发病规律及危害

马铃薯黑痣病是一种常见的植物病害,其病原菌主要通过菌核和菌丝体两种形态在土壤中的植株残体和枯枝落叶中越冬。当第2年气候适宜时,病原菌开始发芽,并以侵染植株伤口为主要途径,产生大量的菌丝体和菌核。如果将带有黑痣病斑的种薯直接播种,病原菌可通过气孔或输导组织侵染,对植株幼苗造成感染^[7-8]。感染的主要部位包括芽尖、茎尖、根、匍匐茎和块茎。研究发现,长期连作马铃薯会直接影响土壤中微生物的活性,特别是增强致病性真菌微生物的活动能力^[9]。马铃薯长期连作会释放邻苯二甲酸二丁酯和棕榈酸等根系自毒物质,这些物质可以促进立枯丝核菌的生长^[10]。在生产过程中,病原菌可随降雨和地下水漂流而进行多次侵染。当土壤中的病原菌累积到一定数量时,它们会迅速扩散,从而引发病害的暴发。

立枯丝核菌的寄生范围广泛,具有强烈的腐生能力,对许多农业和园艺作物的经济效益造成影响,如番茄、豆类、马铃薯、烟草、草莓、大豆及郁金香等。黑痣病最早在广东省等被发现,并已经遍布于主要的种植区域^[11]。

刘小娟等^[12]通过对甘肃省定西市3个县不同品种马铃薯种植区的病情调查,发现新大坪地区的病情指数和发病率最高,分别为36.74%和65.93%,陇薯7号的病情指数和发病率最高,分别为34.45%和52.99%。据报道,陕西省定边县在2018年发生了中等偏中程度

的马铃薯黑痣病,发病面积达到1.82万hm²,一般田块发病率22%~35%,重发田块的发病率可达60%~70%,并且植株幼苗死亡率高达50%,马铃薯产量受到严重影响。在2019年,该地区的马铃薯黑痣病呈中度发病状态,发病面积1.42万hm²,发病率10%~25%^[13]。

李磊等^[14]研究结果显示,黑龙江省马铃薯黑痣病发生情况日渐严重,一般年份发病率可达10%~30%,而重症地块发病率高达70%~80%。

余国平^[15]于2020—2021年对青海省海东市乐都区山区马铃薯黑痣病情况进行了调查研究,发现平均病株率23.75%,而病情严重的地块病株率超过90%,田间调查结果表明,重茬地发病情况比倒茬地更为严重,而水平梯田发病情况也比坡地更加严重。

2 病原菌生物学特征

立枯丝核菌是一种侵染马铃薯的常见病原菌,它以无性态存在。立枯丝核菌属于菌物界、半知菌类、无孢纲、无孢目和丝核菌属。其可以在马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)培养基中生长。在PDA培养基中,初始阶段菌丝呈白色,后逐渐变为褐色,并且会缠绕形成菌核,菌核的形状可以是圆形、卵圆形或不规则的形状。菌丝会形成主支和分支,分支通常成直角或锐角,并且在分支处会有典型的溢缩结构,具有隔膜。需要注意的是,立枯丝核菌的有性态为瓜亡革菌,但在大田中较难观察到,并且其持续时间较短,约14d。因此,侵染马铃薯的情况下主要以无性态的立枯丝核菌为主要形态存在^[16-17]。董爱菊^[18]研究发现,立枯丝核菌以可溶性淀粉和蔗糖等碳源,硝酸钾和蛋白胨作为氮源时,它们也能促进立枯丝核菌的良好生长;立枯丝核菌生长的适宜温度4~34℃,其中最适宜温度23~28℃;pH值6~7时立枯丝核菌生长最适宜,当pH值<2或>14时,菌丝将停止生长。

3 立枯丝核菌研究方法及分布

根据相关研究,立枯丝核菌种群由不同的类群组成,其遗传关系也非常复杂。SCHULTZ于1936年首次提出了立枯丝核菌菌丝融合群(AG)的概念。菌丝融合群是指当两个菌株配对培养时,通过光学显微镜可观察到菌丝生长和交叠现象^[19-20]。OGOSHI A^[21]于1984年建立了立枯丝核菌菌丝融合群鉴定的标准菌株。研究表明,立枯丝核菌是一个由14个菌丝融合群(AGs)组成的物种复合体,分别命名为AG-1~AG-13以及AG-BI。此外,根据融合频率、DNA分子标记、致病性、同工酶谱和遗传特征等方面的差异,再将菌丝融合群划分为不同的亚群,目前已经报道了至少24个亚群^[22]。不同的菌丝融合群在形态、培养性状、体

细胞相容性、生活史特征、寄主范围和 DNA 碱基同源性等方面存在差别。因此，不同菌丝融合群对同一作物的侵染可引起不同的病害。如 AG-2-1 可引起马铃薯黑痣病，AG-3 可引起马铃薯黑胫病、茎或匍匐茎溃烂，AG-4 可引起马铃薯植株枯萎和茎的溃烂，AG-4 HG-II 能引起马铃薯茎基腐病，AG-8 可引起马铃薯根部病害（根腐病），而 AG-9 对于马铃薯是一种弱致病菌^[23-24]。

不同地理分布的融合群存在不同，而且从同一植株的不同发病部位分离的病原菌融合群可能也不相同，因此要研究马铃薯立枯丝核菌的致病机理，需要确定菌株的菌丝融合群及其分布状况，以奠定后续研究的基础。尽管菌丝融合是一种精确有效的方法，但也存在一定的局限性。此方法无法解释融合群之间和内部遗传变异的分类学关系。因此，在研究立枯丝核菌的遗传多样性时，需要结合其他方法以实现有效研究，如同工酶谱、PCR 指纹法、Southern 杂交、脂肪酸分析和序列分析法。

随着分子生物学技术的发展，目前最常用的方法是将菌丝融合反应与 rDNA-ITS（核糖体 DNA 内转录间隔区）联合运用^[25-26]。杨帅等^[27]采用 ITS 序列分析法对黑龙江省 10 个马铃薯种植区 2012—2021 年采集的 482 株马铃薯黑痣病菌株进行了研究，结果表明，共鉴定出 5 种融合群，分别为 AG-1~AG-5；在 AG-2 和 AG-4 融合群中，又进一步鉴定出 AG-2-1、AG-2-2 III B、AG-2-2 IV、AG-4-HGI 和 AG-4-HGII 共 5 个融合亚群；不同地理分布区域的马铃薯黑痣病的优势融合群也存在差异。WOODHALL J W 等^[28]研究发现，在美国，马铃薯黑痣病主要由 AG-3 融合群引起。YARMEEVA M M 等^[29]对 2012—2020 年在欧洲，以及俄罗斯远东地区种植的马铃薯块茎和茎中的立枯丝核菌进行了调查，最常见的是 AG-3，其次是 AG-5。INOKUTI E M 等^[30]在巴西 11 个种植区的调查发现，AG-4-HGI 对马铃薯植株的侵袭远高于其他融合群。而在我国，马铃薯黑痣病的优势融合群是 AG-3，具体各类和分布如表 1 所示^[27,31-38]。

4 立枯丝核菌致病机理

研究表明，立枯丝核菌产生的致病因子对马铃薯植株造成了重要的危害。这些致病因子主要包括酶、毒素、激素和胞外多糖等。尽管对于立枯丝核菌毒素的确切成分尚无定论，但其成分可能涉及羧酸及其衍生物，以及糖类和糖胺等物质。立枯丝核菌毒素会对马铃薯的质膜造成损伤，导致寄主植物的代谢紊乱和防御能力丧失。这进一步影响了寄主植物体的生理生化反应，最终导致植物死亡^[39-40]。张笑宇等^[41]对立枯丝核菌毒素对马铃薯幼苗体内丙二醛（MDA）含量的影响进行了研究，结果表明，经过毒素处理后，马铃薯幼苗体内的 MDA 含量显著增加，细胞膜被破坏。陈转成等^[42]通过水培试验发现，电导率呈递增趋势，表明毒素侵入细胞后导致细胞膜受损，细胞膜通透性增加，从而导致细胞内物质渗出到细胞外部，使得质外体汁液的电导率显著上升。立枯丝核菌还产生多种细胞壁降解酶，其中包括多聚半乳糖醛酸酶（PG）、 β -1,4-内切葡聚糖酶（Cx）、果胶甲基半乳糖醛酸酶（PMG）和果胶甲基酯酶（PE）等^[43]。了解致病因子的作用机制有助于深入研究立枯丝核菌与马铃薯的互作关系，为制定有效的防治策略提供理论基础。

5 综合防治

马铃薯黑痣病作为一种土传病害，同时也可通过种薯进行传播，一旦在土壤中定殖，将会带来难以根除的问题^[44]。针对这一病害，需要对其各个阶段进行详细了解，综合防治方法则被认为是解决这一问题的有效途径。当前，研究主要借助选育抗性品种、实施农艺防治、采取化学防治、应用物理防治及探索生物工程等手段，以减轻黑痣病危害。

5.1 选育抗性品种

立枯丝核菌是一种寄生性病原菌，其不同范围和地理分布上具有广泛的寄主适应性，并且对不同环境具有强大的适应能力。因此，针对马铃薯黑痣病的

表 1 我国马铃薯黑痣病病原菌融合群种类及分布

Tab. 1 Species and classification of pathogen anastomosis groups of potato nigrum disease in China

地区	致病菌种融合群	优势菌丝融合群
黑龙江省	AG-1、AG-2、AG-3、AG-4、AG-5、AG-2-1、AG-2-2 IV、AG-2-2 III B、AG-4-HGI、AG-4-HGII	AG-3
甘肃省	AG2-1、AG-3、AG4-HG-II、AG-5、AG-9	AG-5
内蒙古自治区	AG-1-IB、AG-2-1、AG-3、AG4-HG-II、AG4-HG-III、AG5、AG9、AG-A	AG-3
山东省	AG1-IB、AG-3、AG-4-HGI、AG-4-HGII、AG5	AG-3
河北省	AG-1-IB	AG-1-IB
云南省	AG-3	AG-3
陕西省	AG-3-1	AG-3-1
青海省	AG-3	AG-3

防治工作具有一定挑战性。据报道, DOWLEY 等于 1972 年最早鉴定出抗马铃薯黑痣病的品种 Cherokee、Dore、ACKersegen 和 Mentor; 随后, DJDBALI 等又发现了抗黑痣病的品种 Spunta, 并指出早熟品种相对于晚熟品种对此病具有更强的抵抗力^[45]。ZHANG X Y 等^[46]研究发现, 使用立枯丝核菌 AG-2-1 及其产生毒素 (RS 毒素) 作为等效接种物的材料可开发一种快速抗病试验的方法, 同时通过评价 20 个马铃薯品系对立枯丝核菌茎溃疡病的敏感性来验证方法的有效性, 此毒素可引起幼苗足够的病害、区分品系间的抗性差异及作为马铃薯品系抗性鉴定的接种剂, 进而验证了“Desiree”表达的病害严重程度最低, 而“大西洋”“Shepody”和一些日本品系显示出高水平的茎溃疡病。贾立君等^[47]经过筛选辽宁省主栽品种, 筛选出高产抗黑痣病品种, 试验结果表明, 富金、合薯 5 号、尤金及中薯 5 号对马铃薯黑痣病都具有较好的抗性, 其中合薯 5 号产量最高, 达到 46.1 t/hm²。王喜刚等^[48]针对宁夏回族自治区马铃薯主栽品种进行了黑痣病抗性水平的评价, 通过田间和室内接种相结合的方法, 对 20 份供试品种进行了抗病性评价, 结果表明, 在供试品种中并没有发现免疫或高抗黑痣病的品种, 但筛选出了 4 个中抗品种, 分别是青薯 9 号、庄薯 3 号、陇薯 7 号和黑美人。刘小娟等^[49]评估了位于半干旱地区的甘肃省定西市不同马铃薯品种黑痣病抗病特性, 结果表明, 青薯 9 号和庄薯 3 号具有较强的抗黑痣病能力, 但其产量相对较低。而新大坪和陇薯 8 号则表现出一定的抗性, 产量、出苗率较高, 并且大中薯比例和质量也较高。要选育出具有抗性的品种, 需要对不同种植区域的不同品种进行抗性评价; 但目前的方法效果并不明显且见效较慢。因此, 为了有效防治马铃薯黑痣病, 还需要结合其他措施。

5.2 农业防治

农业防治马铃薯黑痣病的研究已经取得了一些成果。除了选择无病的种薯进行播种外, 还有其他方法可以应用于黑痣病防治。其中包含轮作倒茬、科学耕作制度和合理的施肥等措施^[50]。研究表明, 由于立枯丝核菌可以寄生在枯枝烂叶中, 因此在收获时应避免将大量可寄生的其他作物和植物的残留物留在土壤中, 如牧草、药用植物等。此外, 机械收获未成熟的马铃薯, 并将块茎重新放回土壤中稍作后熟, 再在 2~4 周后进行收获, 或者在马铃薯还未完全成熟时进行绿收获, 都可以降低马铃薯染病的概率^[4,51]。

目前, 马铃薯生产中普遍存在连茬或不合理轮作现象, 这会导致土壤有害微生物数量增多, 土壤养分比例失衡, 从而引起作物生长状况变差、产量下降和自毒物质积累等连作障碍问题^[52-53]。连作障碍的马

铃薯会导致植株营养器官发育不良, 植株矮小, 并且土传病害发生率显著增加, 如枯萎病、黑痣病、疮痂病等^[54]。因此, 轮作和合理施肥可以改善这种情况, 提高马铃薯土壤中的有机质、速效养分、全量养分及马铃薯的产量^[55]。仲彩萍等^[56]总结出了一种名为花椰菜-马铃薯-青豆-当归的轮作模式, 研究表明, 马铃薯黑痣病发病率<8%。WANG H L 等^[57]通过马铃薯-玉米轮作与马铃薯连作和玉米连坐对比发现, 马铃薯和玉米轮作维持了土壤水分平衡, 缓解了玉米连作对深层土壤水分的过度消耗, 减轻了马铃薯连作对土壤生产力的下降。张智芳等^[58]探究了栽培过程中芽长、播期和覆土厚度对土传病害黑痣病对马铃薯产量的影响, 结果表明, 马铃薯黑痣病病情指数<45%, 最优栽培方案为播期选择在 5 月 3—8 日、芽长维持 0.26~0.72 cm、覆土厚度 14.2~19.6 cm; 为了减少马铃薯幼苗受到立枯丝核菌危害的程度, 应该在低温高湿环境下适时晚播, 覆盖地膜, 并选择高垄、易排涝的地块以增加土壤温度并降低湿度, 从而在一定程度上减轻立枯丝核菌对马铃薯幼苗的危害。

5.3 化学防治

马铃薯黑痣病的化学药剂防治是目前广泛应用且有效的方法, 主要杀菌剂包括啞菌酯、噻呋酰胺、咯菌腈、氟唑菌苯胺和唑醚·氟酰胺等^[59]。王艳霞等^[60]在甘肃省定西市马铃薯田间试验中, 通过选用不同药剂处理种薯, 结果表明, 拌种处理区马铃薯黑痣病发生率和严重程度得到了抑制, 其中, 效果较好的药剂包括 22% 氟唑菌苯胺种子处理悬浮剂和 30% 唑醚·咯·噻虫种子处理可分散粉剂。王立等^[61]为了找出对马铃薯黑痣病防控效果较好且对马铃薯出苗安全性较高的方案, 选取了 0.3% 四霉素水剂、3% 中生菌素可湿性粉剂等多种药剂进行试验, 结果表明, 采用 2.5% 咯菌腈悬浮种衣剂 10 mL+0.3% 四霉素水剂 15 mL+0.136% 赤·吲乙·芸苔可湿性粉剂 2 g 的复合拌种处理, 在防治马铃薯黑痣病方面防效达到 69.66%, 增产率 40.36%。虽然化学防治方法效果好且见效快, 但土壤中残留的农药会对环境造成严重污染, 并且长期施用可能导致病原体对药剂产生抗性。因此, 在使用化学药剂时需要谨慎, 并且合理控制施用量, 以减少对环境的负面影响^[62]。

5.4 基因工程与非生物因子诱导

马铃薯黑痣病在马铃薯产区的严重程度逐渐加剧, 由于立枯丝核菌寄主范围广泛且不同品种对病原菌的敏感性不一致, 迄今为止尚无有效的抗性品种。因此, 为了根本解决这个问题, 可以通过常规育种方法改良马铃薯品种以增强其对立枯丝核菌的抵抗力^[63]。郝文胜等^[64]进行了关于提高马铃薯抗立枯丝核菌性能提升

的相关研究, 利用玉米源核糖体失活蛋白基因 (RIP) 在马铃薯中表达, 借助根癌农杆菌菌株 LBA4404 (p2301-RIP), 将 RIP 基因转化到易感品种“Favorita”中; 在温室环境下进行了盆栽试验, 并成功插入了两个携带 RIP 基因的马铃薯株系, 其中, 一个转基因株系显著提高了对由立枯丝核菌引起的马铃薯黑痣病的抗性。M'HAMDI M 等^[65] 通过同时表达来自大麦的 RIP 基因 rip30 和源自粘质沙雷氏菌 (*Serratia marcescens*) 的几丁质酶基因 chiA, 在马铃薯中改善了对立枯丝核菌的抗性。郭秀娜^[66] 利用双分子荧光互补、免疫共沉淀、CRISPR/Cas9 (基因编辑) 等方法揭示了玉米和水稻体内的 γ -氨基丁酸转氨酶 GABA-T 能够与立枯丝核菌分别通过直接促进 EG1 的降解和间接抑制 EG1 的转录两种方式抑制立枯丝核菌的侵染, 提高植物抗病能力。蒋继志等^[67] 研究表明, 通过调控非生物因子来诱导马铃薯块茎产生对立枯丝核菌侵染的抵抗能力, 如温度 35 °C 维持 4 h, 使用质量分数 0.01% 的氨基苯磺酸、氯化钾和水杨酸处理 2 h, 使用 pH 值 5 的磷酸缓冲液浸泡 20 min, 马铃薯块茎对立枯丝核菌的抑制率可达 100%; 同时, 230~265 nm 波长的紫外照射和连续黑暗处理 48 h 后均可抑制立枯丝核菌生长。赵长江等^[68] 通过增强 UV-B 辐射对立枯丝核菌的方法揭示了立枯丝核菌纤维素酶 Cx 的活性及 PG、PMG 的活性均随辐射处理时间的延长而下降, 同时经 UV-B 辐射处理后菌株致病表型减弱。上述研究结果表明, 非生物因子可以显著增强马铃薯块茎对立枯丝核菌侵染的抵抗能力。通过改良马铃薯品种并增强其对立枯丝核菌的抗性, 可以为控制黑痣病提供一种可行的方法。

5.5 生物防治

随着农业耕作模式的不断变革, 利用功能微生物防治马铃薯黑痣病已成为一种有效防治方法。李扬凡等^[69] 发现了一株名为解淀粉芽孢杆菌 HMB33604 的生防细菌, 此菌株及其发酵液对马铃薯黑痣病具有较强的防治效果, 这种生防菌还能产生泛革素、伊枯草菌素 A 和表面活性素等物质, 从而导致马铃薯黑痣病菌丝的畸形。ALFIKY A 等^[70] 通过双层平板法获得了一株名为枯草芽孢杆菌 EG21 的菌株, 显微镜观察和质谱分析发现, EG21 通过产生脂肽类抗生素对立枯丝核菌表现出较强的抑菌作用, 并且能够产生纤维素酶、果胶酶。郭成瑾等^[71] 通过平板对峙法和盆栽研究发现, 哈茨木霉 M-33 协同秸秆对马铃薯黑痣病防效高达 70.26%, 同时促进马铃薯生长, 保持土壤中菌群平衡, 降低土壤中致病真菌丰度。许丽婷等^[72] 从马铃薯根际土壤中分离筛选出一株具有产纤维素酶、蛋白酶和脂肽类活性物质能力的 XC-1 枯草芽孢杆菌菌株, 此菌株在马铃薯整个生长周期均具有防治效果, 在收获期的

生防效果可达 54.51%, 马铃薯的产量相比对照组增加 22.02%。王晨霞等^[73] 研究表明, 不同浓度的稀土螯合物和申嗪霉素使立枯丝核菌菌丝形态发生变化, 菌丝异常生长, 菌丝细胞内容物外渗, 菌丝出现不规则缢缩、畸形。尽管生物防治在植物病害的防控中取得了一定的成果, 但目前对生防菌的筛选还停留在平板试验阶段, 其效果不稳定, 容易受到环境因素的影响。

6 结束语

对于马铃薯黑痣病的研究发现, 其病原菌具有多样性, 不同融合群在各地分布规律性差且遗传变异性大, 导致黑痣病病害的防治较为困难。目前对马铃薯抗黑痣病机制及与立枯丝核菌的互作分子机制的研究还比较有限, 相关抗性基因的研究几乎没有, 这制约了马铃薯黑痣病病害有效防治方法的开发应用。为了解决这个问题, 未来的研究首先需要通过详细的研究和鉴定来准确确定不同地理区域马铃薯黑痣病的主要融合群类型及其分布情况, 加强对马铃薯黑痣病菌不同融合群动态变化的监测, 以制定相应的防治策略。其次, 明确马铃薯黑痣病致病因子和致病机制, 并揭示马铃薯主要的抗病机制和抗病因子。此外, 完善有效菌株的筛选方法并提高其对环境条件的适应性, 积极选育抗病品种, 挖掘抗性基因同样是重要的研究方向。可以利用分子标记辅助育种和田间筛选相结合的方法, 为马铃薯黑痣病病害防治提供可靠的理论基础依据。总之, 针对马铃薯黑痣病的防治, 单一措施往往效果较差, 需要采取综合的农业、化学和生物等多种防治方法, 并制定合理的施药措施。预防优于治疗, 及早发现并进行治疗也非常重要。

参考文献

- [1] KOLASA K M. The potato and human-nutrition[J]. *American Potato Journal*, 1993, 70(5): 375-384.
- [2] DOBOCH M, GEDEBO A, HAILE A, et al. Improving potato productivity through optimum agronomic management to ensure food security of smallholder farmers[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2022, 8(1): 2131995.
- [3] 苑玉金. 马铃薯种植技术及常见病虫害防治策略: 以宁津县为例[J]. *南方农机*, 2023, 54(6): 66-68, 86.
- [4] 王真, 王玉凤, 林团荣, 等. 华北区马铃薯黑痣病绿色防治技术[C]//马铃薯产业与种业创新(2022). 哈尔滨: 中国作物学会马铃薯专业委员会, 2022: 438-440.
- [5] 李树生, 李文岗, 张龙梅, 等. 马铃薯黑痣病研究进展[C]//马铃薯产业与种业创新(2022). 哈尔滨: 中国作物学会马铃薯专业委员会, 2022: 93-99.
- [6] PAL V R, MUKUL K, DEEPAK B. Survey and occurrence of black scurf of potato caused by *Rhizoctonia solani*[J]. *Plant Disease Research*,

- 2021, 36(2): 239-240.
- [7] 王鹏. 马铃薯黑痣病菌拮抗细菌的筛选及其生防机制研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2022.
WANG Peng. Screening of antagonistic bacteria against potato black scurf and study on its biocontrol mechanism[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2022.
- [8] 王德浩. 马铃薯黑痣病的生物防治及其机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
WANG Dehao. Study on the biological control of potato black scurf and its prevention mechanism[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020.
- [9] KU Y L, LI W Q, MEI X L, et al. Biological control of melon continuous cropping obstacles: weakening the negative effects of the vicious cycle in continuous cropping soil[J]. *Microbiology Spectrum*, 2022, 10(6): 1-17.
- [10] 张文明, 邱慧珍, 张春红, 等. 不同连作年限马铃薯根系分泌物的成分鉴定及其生物效应[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(12): 1811-8.
ZHANG Wenming, QIU Huizhen, ZHANG Chunhong, et al. Identification of chemicals in potato root exudates under different years of continuous cropping and their biologic effects[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(12): 1811-1818.
- [11] 张微微. 不同药剂对马铃薯主要病害及地下害虫的防治效果研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
ZHANG Weiwei. Efficacy test of different agents on the main diseases of potato and underground pests[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.
- [12] 刘小娟, 王文慧, 孙兴明, 等. 定西市马铃薯黑痣病的发生情况与药剂防效[J]. *中国植保导刊*, 2022, 42(8): 59-61.
- [13] 石玲艳, 陈泽彬, 王靖东, 等. 定边县马铃薯黑痣病综合防治技术探究[J]. *陕西农业科学*, 2021, 67(8): 95-96, 102.
SHI Lingyan, CHEN Zebin, WANG Jingdong, et al. Study on integrated control of potato *Rhizoctonia solani* in Dingbian[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 67(8): 95-96, 102.
- [14] 李磊, 陈利达, 黄艺烁, 等. 马铃薯黑痣病菌实时荧光定量 PCR 检测体系的建立及应用[J]. *农业生物技术学报*, 2021, 29(7): 1417-25.
LI Lei, CHEN Lida, HUANG Yishuo, et al. Establishment and application of real-time quantitative pcr detection system for black scurf pathogen in potato (*Solanum tuberosum*) [J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2021, 29(7): 1417-1425.
- [15] 余国平. 海东市乐都区马铃薯黑痣病发生原因分析与绿色防控技术初探[J]. *青海农技推广*, 2022(2): 23-24, 36.
- [16] LÓPEZ-CORRALES R, MICHEREFF S J, GARCÍA-ESTRADA R S, et al. First confirmed report of *Rhizoctonia solani* Ag-7 causing potato stem canker in Mexico[J]. *Plant Disease*, 2023, 107(7): 2260-2260.
- [17] JIA X H, XU J N, WU Y S, et al. Isolation, identification and artificial inoculation of *Rhizoctonia solani* on pear during storage[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2023, 9(1): 73-76.
- [18] 董爱菊. 类芽孢杆菌 QHZ11 对马铃薯黑痣病的生防机制及对马铃薯的促生效果研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
DONG Aiju. Studies on the biocontrol mechanism of *Paenibacillus jamilae* QHZ11 on black scurf disease of potato and its promoting effect for
- potat[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.
- [19] IRADUKUNDA L, WANG Y P, NKURIKIYIMFURA O, et al. Establishment and application of a multiplex pcr assay for the rapid detection of *Rhizoctonia solani* anastomosis group (AG)-3PT, the pathogen causing potato black scurf and stem canker[J]. *Pathogens*, 2022, 11(6): 627.
- [20] LI Y T, YANG N B, MU T Y, et al. Diversity of mycoviruses present in strains of binucleate *Rhizoctonia* and multinucleate *Rhizoctonia*, causal agents for potato stem canker or black scurf[J]. *Journal of Fungi*, 2023, 9(2): 214.
- [21] OGOSHI A. Ecology and pathogenicity of anastomosis and intraspecific groups of *Rhizoctonia-solani* Kuhn[J]. *Annual Review of Phytopathology*, 1987, 25(1): 125-143.
- [22] 田慧. 紫花苜蓿根腐病菌立枯丝核菌遗传多样性和进化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
TIAN Hui. Genetic diversity and evolution of *Rhizoctonia solani* associated with root rot of alfalfa[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [23] CHAUDHARY S, SHARMA S, LAL M, et al. Morphological and pathological variability of *Rhizoctonia solani* isolates from dhaincha-potato crop rotation and their mycelial compatibility relationship[J]. *Indian Phytopathology*, 2023, 76(2): 355-369.
- [24] 鲜泽轩. 哈尔滨地区甘蓝黑根病病原菌鉴定及抗源筛选[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
XIAN Zexuan. Pathogen identification and resistance screening of cabbage black root disease in Harbin[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.
- [25] 宁晓雪, 苏跃, 马玥, 等. 立枯丝核菌研究进展[J]. *黑龙江农业科学*, 2019(2): 140-3.
NING Xiaoxue, SU Yue, MA Yue, et al. Research progress on *Rhizoctonia solani*[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2019(2): 140-143.
- [26] YANG H A, SIVASITHAMPARAM K, BARTON J E, et al. Characterization of cereal bare patch isolates of *Rhizoctonia solani* by random amplified polymorphic DNA analysis[J]. *Plant Pathology*, 1995, 44(5): 811-818.
- [27] 杨帅, 郭梅, 王文重, 等. 黑龙江省马铃薯黑痣病菌融合群类型分析[J]. *中国马铃薯*, 2022, 36(3): 228-35.
YANG Shuai, GUO Mei, WANG Wenzhong, et al. Identity of the anastomosis group of potato black scurf in Heilongjiang Province [J]. *Chinese Potato Journal*, 2022, 36(3): 228-235.
- [28] WOODHALL J W, BROWN L, HARRINGTON M, et al. Anastomosis groups of *Rhizoctonia solani* and binucleate *Rhizoctonia* associated with potatoes in Idaho[J]. *Plant Disease*, 2022, 106(12): 3127-3132.
- [29] YARMEEVA M M, KOKAEVA L Y, CHUDINOVA E M, et al. Anastomosis groups and sensitivity to fungicides of *Rhizoctonia solani* strains isolated from potato in Russia[J]. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2021, 128(5): 1253-1261.
- [30] INOKUTI E M, REIS A, CERESINI P C, et al. Diversity and pathogenicity of anastomosis groups of *Rhizoctonia* associated with potato stem canker and black scurf diseases in Brazil[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2019, 153(4): 1333-1339.
- [31] YANG S, KONG Y, GUO M, et al. First report of black scurf caused by *Rhizoctonia solani* AG 2-2IV on potato tubers in Heilongjiang

- Province, China[J]. *Plant Disease*, 2022, 106(11): 2996.
- [32] 王银钰, 李青, 杨成德, 等. 甘肃省安定区马铃薯黑痣病菌菌丝融合群鉴定及其越冬能力初探[J]. *中国植保导刊*, 2020, 40(6): 11-6.
- WANG Yinyu, LI Qing, YANG Chengde, et al. Identification and overwintering ability test of *Rhizoctonia solani* anastomosis groups in potato in the Anding District of Gansu Province[J]. *China Plant Protection*, 2020, 40(6): 11-16.
- [33] 陈爱昌, 魏周全, 骆得功, 等. 甘肃省定西市马铃薯黑痣病菌菌丝融合群的鉴定及药剂筛选[J]. *植物保护*, 2016, 42(1): 197-202, 48.
- CHEN Aichang, WEI Zhouquan, LUO Degong, et al. Fungicide screening and identification of anastomosis groups of *Rhizoctonia solani* potato[J]. *Plant Protection*, 2016, 42(1): 197-202, 248
- [34] 曹春梅, 王晓娇, 许飞, 等. 内蒙古地区马铃薯黑痣病立枯丝核菌融合群及致病性研究[J]. *中国马铃薯*, 2018, 32(5): 293-302.
- CAO Chunmei, WANG Xiaojiao, XU Fei, et al. Anastomosis groups of *Rhizoctonia solani* from potato and pathogenicities in Inner Mongolia[J]. *Chinese Potato Journal*, 2018, 32(5): 293-302.
- [35] 李晓妮, 徐娜娜, 于金凤. 中国北方马铃薯黑痣病立枯丝核菌的融合群鉴定[J]. *菌物学报*, 2014, 33(3): 584-93.
- LI Xiaoni, XU Nana, YU Jinfeng, et al. Anastomosis groups of *Rhizoctonia solani* from black scurf of potato in northern China[J]. *Mycosystema*, 2014, 33(3): 584-593.
- [36] 刘霞, 冯蕊, 高达芳, 等. 云南省马铃薯黑痣病原菌融合群鉴定及8种药剂对其的毒力[J]. *植物保护*, 2016, 42(2): 165-70.
- LIU Xia, FENG Rui, GAO Dafang, et al. Anastomosis groups of *Rhizoctonia solani* and toxicity of eight fungicides against *R. solani* from black scurf of potatoes[J]. *Plant Protection*, 2016, 42(2): 165-170.
- [37] 王宇. 河北和内蒙古马铃薯黑痣病菌遗传多样性研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012.
- WANG Yu. Genetic diversity of *Rhizoctonia solani* from potato in Hebei and Inner Mongolia[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2012.
- [38] 田晓燕, 蒙美莲, 张笑宇, 等. 马铃薯黑痣病菌菌丝融合群的鉴定[J]. *中国马铃薯*, 2011, 25(5): 298-301.
- TIAN Xiaoyan, MENG Meilian, ZHANG Xiaoyu, et al. Identification of anastomosis groups of *Rhizoctonia solani* on potato plant[J]. *Chinese Potato Journal*, 2011, 25(5): 298-301.
- [39] 徐琴琴, 陈卫良, 毛碧增. 立枯丝核菌毒素的研究进展[J]. *核农学报*, 2020, 34(10): 2219-25.
- XU Qinqin, CHEN Weiliang, MAO Bizeng, et al. Research progresses in phytotoxin produced by *Rhizoctonia solani*[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(10): 2219-2225.
- [40] 张君, 拓宁, 邱慧珍, 等. 立枯丝核菌对马铃薯的致病机理研究 II: 病原菌毒素对幼苗活性氧代谢及细胞超微结构的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2016, 51(4): 20-25.
- ZHANG Jun, TUO Ning, QIU Huizhen, et al. Pathogenesis mechanism of *Rhizoctonia solani* on potato II: effects of *Rhizoctonia solani* toxin on active oxygen metabolism and cell ultrastructure of potato plantlets[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2016, 51(4): 20-25.
- [41] 张笑宇, 于肖夏, 高翔, 等. 马铃薯黑痣病菌毒素诱导马铃薯幼苗丙二醛含量、细胞膜透性及 PAL 活性的变化[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(2): 16-20.
- ZHANG Xiaoyu, YU Xiaoxia, GAO Xiang, et al. The changes on mda content, cell membrane permeability and PAL activity after inoculating with toxin of *Rhizoctonia solani* in potato[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2012, 33(2): 16-20.
- [42] 陈转成, 李孟婵, 陈建英, 等. 河西灌区马铃薯立枯丝核菌毒素对幼苗组织细胞膜伤害的影响[J]. *中国水运(下半月)*, 2018, 18(9): 117-118.
- [43] 徐琴琴. 异源 PGIP 蛋白抗水稻纹枯病分析及毒素降解菌筛选[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- XU Qinqin. Analysing of heterogenous PGIP protein against rice sheath blight and screening of toxin-degrading bacteria[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [44] 文家富, 郑小惠, 陆淑静, 等. 马铃薯黑痣病发生与田间防治试验[J]. *陕西农业科学*, 2019, 65(10): 75-78.
- [45] 董爱菊, 邱慧珍, 魏茹云, 等. 类芽孢杆菌 QHZ11 对马铃薯黑痣病的生防效果[J]. *微生物学通报*, 2021, 48(11): 4087-99.
- DONG Aiju, QIU Huizhen, WEI Ruyun, et al. The biocontrol effect of *Paenibacillus jamilae* QHZ11 on potato black scurf[J]. *Microbiology China*, 2021, 48(11): 4087-4099.
- [46] ZHANG X Y, LI D Z, HUO H L, et al. Improving evaluation of potato resistance to *Rhizoctonia solani* infection by optimizing inoculum-based method combined with toxin-based assay[J]. *Crop Protection*, 2021, 144: 105544.
- [47] 贾立君, 贾景丽, 周芳, 等. 辽宁地区马铃薯高产抗黑痣病品种的筛选: 马铃薯产业与脱贫攻坚(2018)会议论文集[C]//2018 年中国马铃薯大会. 哈尔滨: 中国作物学会马铃薯专业委员会, 2018: 256-258
- [48] 王喜刚, 郭成瑾, 张丽荣, 等. 宁夏马铃薯主栽品种对黑痣病的抗性鉴定[J]. *植物保护*, 2018, 44(3): 190-196.
- WANG Xigang, GUO Chengjin, ZHANG Lirong, et al. Identification of potato resistance to black surf caused by *Rhizoctonia solani* in Ningxiay[J]. *Plant Protection*, 2018, 44(3): 190-196.
- [49] 刘小娟, 王文慧, 杨扬, 等. 6 个马铃薯品种对黑痣病抗性初报[J]. *甘肃农业科技*, 2018, 49(2): 26-29.
- [50] 张晓连. 设施马铃薯种植技术要点与病虫害防治[J]. *农业工程技术*, 2023, 43(6): 66-67.
- [51] 王勇. 马铃薯高产栽培种植技术要点及病虫害防治策略[J]. *种子科技*, 2022, 40(16): 58-60.
- [52] 决超. 微生物菌肥与土壤改良基质对连作马铃薯土壤性质及微生物群落的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(1): 218-224.
- [53] 张筱叶. 马铃薯不同连作年限对其产量及土壤微生物的影响[J]. *广东蚕业*, 2022, 56(4): 24-26.
- [54] 胡新元, 谭雪莲, 孙小花, 等. 马铃薯长期连作对土壤真菌群落特征的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(4): 185-91.
- HU Xinyuan, TAN Xuelian, SUN Xiaohua, et al. Effects of potato continuous cropping on soil fungal community characteristics[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(4): 185-191.
- [55] KANG Y C, LIU Y, QIN S H, et al. Ridge - mulch tillage and rotation with broad bean affects soil microbial community, diversity and crop yield in a long-term potato continuous cropping field[J]. *Soil Use and Management*, 2020, 37(3): 677-688.

- [56] 仲彩萍, 孙新荣. 高寒阴湿区花椰菜-马铃薯-青豆(菜用蚕豆)-当归轮作栽培模式[J]. *蔬菜*, 2022(3): 45-47.
- [57] WANG H L, ZHANG X C, YU X F, et al. Maize-potato rotation maintains soil water balance and improves productivity[J]. *Agronomy Journal*, 2020, 113(1): 645-656.
- [58] 张智芳, 杨海鹰, 云庭, 等. 播期、芽长和覆土厚度对马铃薯黑痣病的规避效应及产量的影响[J]. *中国马铃薯*, 2014, 28(1): 43-48.
ZHANG Zhifang, YANG Haiying, YUN Ting, et al. Avoidance effect of bud length, sowing period and thickness of covering soil on *Rhizoctonia solani* and their effects on yield of potato[J]. *Chinese Potato Journal*, 2014, 28(1): 43-48.
- [59] 崔凌霄, 魏立娟, 韩相鹏, 等. 不同药剂防治马铃薯黑痣病的田间药效试验[J]. *西北农业学报*, 2019, 28(5): 815-819.
CUI Lingxiao, WEI Lijuan, HAN Xiangpeng, et al. Field efficacy test of different pesticides against potato black scurf[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(5): 815-819.
- [60] 王艳霞, 陈爱昌, 牛树君, 等. 多种药剂防治马铃薯黑痣病的应用效果比较[J]. *中国植保导刊*, 2023, 43(3): 76-78.
- [61] 王立, 惠娜娜, 李继平, 等. 不同药剂复合拌种对马铃薯黑痣病和疮痂病的田间防效[J]. *甘肃农业科技*, 2022, 53(8): 84-88.
WANG Li, HUI Nana, LI Jiping, et al. Study on the control effect of mixed seed-dressing with different pesticides against potato black scurf disease and scab[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2022, 53(8): 84-88.
- [62] 赵晓雨. 马铃薯黑痣病的有效防治药剂筛选及田间防效试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
ZHAO Xiaoyu. Screening of effective fungicides for potato black scurf and field control experiment[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019.
- [63] 张笑宇, 霍宏丽, 张冬梅, 等. 硅酸钠对马铃薯黑痣病的抗性及其抗性相关物质的影响[J]. *植物保护学报*, 2020, 47(6): 1287-96.
ZHANG Xiaoyu, HUO Hongli, ZHANG Dongmei, et al. Effects of sodium silicate on resistance to potato stem canker and its resistance-related substances[J]. *Journal of Plant Protection*, 2020, 47(6): 1287-1296.
- [64] 郝文胜, 赵永秀, 张永丰, 等. 应用玉米核糖体失活蛋白基因改善马铃薯对立枯丝核菌抗性[J]. *分子植物育种*, 2017, 15(6): 2200-2206.
HAO Wensheng, ZHAO Yongxiu, ZHANG Yongfeng, et al. Ribosome inactivating protein of maize enhanced resistance to *Rhizoctonia solani* in transgenic potato[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15(6): 2200-2206.
- [65] M'HAMDI M, CHIKH-ROUHOU H, BOUGHALLEB N, et al. Enhanced resistance to *Rhizoctonia solani* by combined expression of chitinase and ribosome inactivating protein in transgenic potatoes (*Solanum tuberosum* L.)[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2012, 10(3): 778-785.
- [66] 郭秀娜. 立枯丝核菌纤维素酶 EG1 激发功能关键位点及其互作蛋白功能研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
GUO Xiuna. Study on the key sites of cellulase EG1 elicitor function in *Rhizoctonia solani* and the function of its interacting protein[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.
- [67] 蒋继志, 吴素玉, 赵丽坤. 非生物因子诱导马铃薯块茎对立枯丝核菌的抗性[J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2005, 25(2): 167-172.
JIANG Jizhi, WU Xuyu, ZHAO Likun, et al. Resistance of potato tuber slices against *Rhizoctonia solani* induced by abiotic factors[J]. *Journal of Hebei University(Natural Science Edition)*, 2005, 25(2): 167-172.
- [68] 赵长江, 郭怀刚, 徐晶宇, 等. 增强 UV-B 辐射对立枯丝核菌抗氧化酶及细胞壁降解酶活性影响研究[J]. *植物病理学报*, 2021, 51(4): 549-558.
ZHAO Changjiang, GUO Huaigang, XU Jingyu, et al. Effects of enhanced UV-B irradiation on the antioxidant enzymes and cell wall degrading enzymes of *Rhizoctonia solani*[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2021, 51(4): 549-558.
- [69] 李扬凡, 邵美琪, 刘畅, 等. 解淀粉芽孢杆菌 HMB33604 的抑菌物质及对马铃薯黑痣病的防治效果[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(12): 2559-2569.
LI Yangfan, SHAO Meiqi, LIU Chang, et al. Identification of the antifungal active compounds from *Bacillus amyloliquefaciens* strain HMB33604 and its control efficacy against potato black scurf[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(12): 2559-2569.
- [70] ALFIKY A, L'HARIDON F, ABOU-MANSOUR E, et al. Disease inhibiting effect of strain *Bacillus subtilis* EG21 and its metabolites against potato pathogens *Phytophthora infestans* and *Rhizoctonia solani*[J]. *Phytopathology*, 2022, 112(10): 2099-2109.
- [71] 郭成瑾, 沈瑞清, 张丽荣, 等. 哈茨木霉协同秸秆对马铃薯黑痣病及根际土壤微生态的影响[J]. *核农学报*, 2020, 34(7): 1447-1455.
GUO Chengjin, SHEN Ruiqing, ZHANG Lirong, et al. Effects on biological control against potato black scurf (*Rhizoctonia solani*) and rhizosphere soil micro-ecosystem of *Trichoderma harzianum* applied together with straw[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(7): 1447-1455.
- [72] 许丽婷, 陈佳欣, 李欢欢, 等. 生防菌 XC-1 的筛选、鉴定及其对马铃薯黑痣病的防效研究[J]. *植物病理学报*, 2021, 51(3): 413-422.
XU Liting, CHEN Jiaxin, LI Huanhuan, et al. Screening, identification and detection of biocontrol effect of strain XC-1 on potato black scurf[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2021, 51(3): 413-422.
- [73] 王晨霞, 李艳, 常瑞雪, 等. 稀土螯合物抑制土传病原菌的效果及其形态毒理机制[J]. *中国稀土学报*, 2020, 38(4): 532-538.
WANG Chenxia, LI Yan, CHANG Ruixue, et al. Effect of rare earth chelate on inhibiting soil-borne pathogens and its morphological and toxicological mechanism[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2020, 38(4): 532-538.