马晓冉,金鑫,韩茜,等.魔芋软腐病的病原检测及治理策略[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(1):10-20.
Ma X R, Jin X, Han X, et al.Pathogen detection and treatment strategies of konjac soft rot[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(1):10-20.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202408005

魔芋软腐病的病原检测及治理策略

马晓冉[1],金鑫[2],韩茜[1],牛义[3],马冠华[1],郑阳[4*],陈国康[1*]

(1.西南大学 植物保护学院,重庆 400716;2.宜宾市农业科学院,四川 宜宾 644600;3.西南大学 园艺园林学院,重庆 400716;
4.重庆市农业科学院 蔬菜花卉研究所,重庆 401329)

摘　要:魔芋是我国重要的经济作物之一,可以大量合成葡甘聚糖。魔芋软腐病是魔芋生产上最为严重的土传病害,对魔芋产量造成重大的损失,严重制约了我国魔芋产业的发展。因此,魔芋软腐病的防治是魔芋生产中的一项重要工作。本文主要从魔芋软腐病病原检测技术、防治策略等方面进行综述,除常规PCR检测技术外,还阐述新的检测技术在魔芋软腐病上的应用,并概述了目前主要防治魔芋软腐病方法,例如化学防治、生物防治、农业防治等,以期为魔芋软腐病的病原快速检测和综合防控提供指导意义。

关键词:魔芋软腐病; 病原菌; 鉴定方法; 综合防控
中图分类号:S432.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)01-0010-11

Pathogen detection and treatment strategies of konjac soft rot

Ma Xiaoran[1], Jin Xin[2], Han Xi[1], Niu Yi[3], Ma Guanhua[1], Zheng Yang[4*], Chen Guokang[1*]

(*1.College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2.Yibin Academy of Agricultural Sciences, Yibin 644600, China; 3.College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400716; 4.Institute of Vegetable and Flower, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China*)

Abstract: Konjac is an important cash crop in China, known for its ability to synthesize glucomannan in large quantities. However, konjac soft rot disease is the most severe soil-borne disease affecting konjac production. It causes significant losses in konjac yield and poses a major challenge to the development of China′s konjac industry. Thus, the prevention and control of konjac soft rot have become critical tasks for ensuring sustainable konjac production. This paper reviewed the pathogen detection technologies and control strategies for konjac soft rot. In addition to conventional PCR detection technology, the application of novel detection technologies in identifying konjac soft rot was discussed. Current strategies for preventing and controlling of konjac soft rot were summarized, including chemical control, biological control, and agricultural practices. These approaches provide valuable insights and guidance for the integrated management of Konjac soft rot.

Keywords: Konjac soft rot, Pathogen, Identification method, Comprehensive prevention and control

魔芋(*Amorphophallus Konjac*)是天南星科(Araceae)魔芋属(*Amorphophallus*)的单子叶多年生草本植物,块茎可大量合成葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)。葡甘聚糖可以减缓并减少葡萄糖吸收、延缓肥胖和缓慢减肥,因此被大量应用在食品、农业、医药和化工等生产领域[1-2],有着极高的应用价值。魔芋主要分布在中国、日本以及东南亚等地。其在中国拥有悠久的栽培历史,

收稿日期:2024-08-04　　**修回日期**:2024-11-20
基金项目:重庆市蔬菜全产业链绿色生产关键技术集成与示范推广(FWLX20240100055);宜宾市以突破连作障碍瓶颈为核心的白魔芋高产技术研发(XNDX2022020006)
作者简介:马晓冉(ORCID:0009-0008-4175-7292),硕士研究生,E-mail:2351572015@qq.com
*通信作者:陈国康(ORCID:0009-0000-1859-7691),副教授,硕士生导师,研究方向:植物细菌病害及防控,E-mail:2291965247@qq.com;
郑阳(ORCID:0009-0003-7048-0847),副研究员,研究方向:蔬菜抗性育种与病害防治,E-mail:7752822@qq.com

迄今被发现并命名的魔芋有20余种,占世界总数的22.6%[3],但主要种植品种是花魔芋和白魔芋。在我国,魔芋主要分布于秦岭以南的高海拔地区,主要包括贵州、云南、四川、湖北、陕南等地区的山区[4]。近30年来,我国致力于发展魔芋产业,目前已经是世界魔芋原料生产与供给中心[5]。随着脱贫攻坚和乡村振兴的深入推进,魔芋已经成为四川山区的支柱产业[6]。

由欧文氏菌属(*Erwinia*)演变而成的果胶杆菌属(*Pectobacterium*)和迪基氏菌属(*Dickeya*)是魔芋软腐病的致病菌,属于革兰氏阴性菌。研究发现,群体感应机制(quomm scnsing,QS)是魔芋软腐病病原菌引起魔芋发病的机制,该机制由Fuqua等[7]于1994首次提出。所谓群体感应,是指细菌通过分泌的信号分子,并可以感知其在胞外浓度变化,进而调控某些基因的特异表达及生理功能和生活习性[8]。氮-酰基高丝氨酸内酯类物质(N-acyl homoserine lactones,N-AHLs)是群体感应系统(QS)中最重要的胞间信号分子,也是目前研究最多的信号分子。生物荧光和致病因子的产生、质粒DNA转移、生物膜形成等都依赖AHL群体感应系统。AHL合成酶(I蛋白)和AHL受体(R蛋白)是AHL群体感应系统的重要部分。LuxI蛋白酶会催化SAM和ACP合成AHL,AHL通过细胞膜释放到胞外,细菌浓度增加,AHL浓度随之增加,当积累到一定浓度阈值时,与细胞膜内LuxR蛋白N端特异性结合,AHL-LuxR复合物产生,诱导启动子PluxI开始转录,相应基因表达,合成大量细胞降解酶,并分泌到胞外,细胞壁降解,导致细胞死亡,因此植物组织腐烂,软腐病发生[9]。

魔芋软腐病从生长期到贮藏期都可以发病[10-11],病原菌随病残体在土壤或球茎中越冬,次年从伤口或气孔侵入(图1)。植株一旦发病,便很难控制,产量一般损失20%~30%,严重时可能绝收[12]。一般情况下,每年6月开始发病,7-8月到达发病高峰期,9月随着天气降温病情逐渐稳定。魔芋的地上部分和地下部分均能受到危害[13]。若种芋带病,地下球茎最开始腐烂,进而影响到地上部分,植株半边叶片会变黄萎蔫,随着病原菌逐渐侵入,整株叶片发黄萎蔫,球茎表面有褐色水渍状病斑,内部腐烂变软,菌脓呈黄褐色或灰白色,有严重的恶臭味[14];地上部分发病时,根基部、叶柄或叶轴初期产生水渍状条形病斑,后期组织变黑腐烂塌陷,呈沟槽状,严重时整株枯萎、倒伏,散发恶臭[15],极大的影响魔芋生长和产量。



A:整株;B:块茎;C:茎秆

A: whole plant; B: tubers; C: stalk

图1　魔芋软腐病田间发病症状

Fig. 1　Symptoms of Konjac soft rot in the field

目前针对魔芋软腐病缺乏系统性论述,其田间防控也集中在魔芋生育期施用化学药剂。为此,本文较系统综述了魔芋软腐病病原菌鉴定、检测方法、化学药剂防治、生物防治、栽培调控技术等方面的最新进展,重点阐述优势病菌果胶杆菌的检测和防治技术,为魔芋软腐病的综合防治提供重要参考依据。

1　魔芋软腐病病原菌

1.1　魔芋软腐病病原菌研究进展

魔芋软腐病的主要病原菌包括果胶杆菌(*Pectobacterium*)和迪基氏菌(*Dickeya*)。果胶杆菌(*Pectobacterium*)属于肠杆菌科(Enterobacteriaceae),Hauben等[16]基于16S rDNA序列分析,将原属于欧文氏杆菌属(*Erwinia*)中能产生果胶酶并能引起植物软腐症状的细菌重新分类,形成独立的果胶杆菌属(*Pectobacterium*),将*E. carotovora*已有的4个亚种上升为种,即*Erwinia. carotovorum*重新命名为*P. carotovorum*[17]。在随后的研究中,*P. carotovorum*基于遗传学差异、生态位和致病性上的特异性进一步被细分为3个亚种*P. carotovorum* subsp. *carotovorum*、*P. carotovorum* subsp. *odoriferum*和*P. carotovorum* subsp. *brasiliense*[18]。这些亚种的划分不仅基于遗传差

异,还考虑了他们在生态位和致病性上的特异性。Nabhan等[19]基于分子生物学分析将某些寄主来源偏向于单子叶植物的*P. carotovorum*菌株(包括PC1菌株)划分到*P. aroidearum*。

2005年*Erwinia chrysanthemi*被提升为属水平,并更名为迪基氏菌(*Dickeya*),将原来的6个亚种重新建立为6个新物种,分别为*D. chrysanthemi*、*D. dadantii*、*D. dianthicola*、*D. dieffenbachiae*、*D. paradisiaca*和*D. zeae*[16,20]。后续*D. dieffenbachiae*重新分类为*D. dadantii*的亚种,即*D. dadantii* subsp. *dieffenbachiae*[21],进一步细化了迪基氏菌属的分类系统。最近研究中,我国科学家从中国梨树溃疡病分离得到一株菌株,经过鉴定分析,被划分迪基氏菌属的一个新种,命名为*Dickeya fangzhongdai*[22]。

目前我国已经报道,胡萝卜软腐果胶杆菌胡萝卜亚种(*P. carotovorum* subsp. *carotovorum*)、*P. aroidearum*、方中达氏迪克菌(*D. fangzhongdai*)可以引起魔芋软腐病的发生。

1.2 不同地区的魔芋软腐病病原菌

对表1进行深入分析,可以发现魔芋软腐病病原菌在不同地区间存在差异,即便是同一地区的病原菌之间也表现出多样性,具体差异体现在以下几个方面。

表1 不同魔芋软腐病致病菌的分布地区

Table 1 Distribution regions of pathogenic bacteria of different konjac soft rot diseases

致病菌 Pathogen	分布地区 Distribution regions
P. aroidearum	湖北宜昌;贵州赫章、威宁、六盘水;云南西双版纳、德宏、富源、楚雄;四川宜宾
P. carotovorum	陕西安康、汉中;湖北十堰;贵州赫章、威宁
D. fangzhongdai	湖北宜昌;贵州赫章、威宁、六盘水
F. concentricum	云南曲靖

首先,在陕南地区,通过对陕南地区(安康、汉中),通过形态特征、biolog分析、16S rDNA序列比对,确定该地区魔芋软腐病病原菌为胡萝卜软腐果胶杆菌(*P. carotovorum*)[23];其次,在湖北地区,对宜昌魔芋软腐病病原菌鉴定可知其致病菌主要分为2类:*P. aroidearum*和*D. fangzhongdai*,其中*P. aroidearum*占主导地位[24]。而在十堰市,其致病菌为*P. carotovorum* subsp. *carotovorum*[25],即湖北地区存在3种魔芋软腐病病原菌;在贵州地区,通过对赫章、威宁等地区的魔芋软腐病病原菌进行基于5个管家基因的分子鉴定,确定该地域存在3种致病菌:海芋果胶杆菌(*P. aroidearum*)、胡萝卜果胶杆菌(*P. carotovorum*)以及方中达氏迪克菌(*D. fangzhongdai*)[26],而在六盘水地区,致病菌为*P. aroidearum*和*D. fangzhongda*[27];最后,在云南地区(双版纳州、德宏、富源、楚雄),魔芋软腐病致病菌为*P. aroidearum*[28-29]。

除了致病细菌外,致病真菌轮纹镰刀菌(*Fusarium concentricum*)也可以导致魔芋软腐发生[30]。因此根据不同地区的致病菌不同,可因地制宜,选择不同方法防治魔芋软腐病。

2 魔芋软腐病病原菌的检测技术

2.1 微生物快速鉴定系统

魔芋软腐病的传统鉴定方法通常涵盖对田间病害症状的细致观察,以及病原菌在选择性CVP(结晶紫果胶酸盐)培养基上独特的形态特征。同时,还涉及使用油镜或电镜详细探究病原菌微观结构,以及对生理生化特性的深入分析[31-32]。尽管这些方法简单易行,但往往耗时较长,且由于种内病原菌在形态及生理生化特性上的相似性,难以达到精准鉴定的要求。为解决这一问题,1989年,美国BIOLOG公司开发了高度灵敏且分辨率高的Biolog微生物鉴定系统。主要是检测病原菌对95种碳源的利用情况快速鉴定病原菌种类[33-34]。该系统通过96孔Biolog细菌生理生化鉴定板,成功对菌株KR22100335和KR22101013进行准确鉴定,KR22100335与模式菌株*D. fangzhongdai* JS5一致,KR22101013与菌株*P. aroidearum* KC20-1一致[27]。即使这样,微生物快速鉴定系统(Biolog)鉴定结果也可能在种和亚种水平存在误差,因此,为确定确保鉴定的准确性和可靠性,仍需结合其他鉴定技术进行综合分析和相互佐证。

2.2 免疫学检测

酶联免疫吸附技术(ELISA)作为当前植物细菌性及病毒病害诊断中广泛应用的免疫学手段,其在检测研究领域中占据重要地位[35]。基于抗原与抗体之间的高度特异性识别,使免疫快速检测方法成为研究热点。通过棋盘滴定法的准确测定,确定抗原和抗血清在检测中的最适工作浓度为10^6 CFU/mL,其两者的比例为1∶10 000,这一优化条件下,ELISA对魔芋软腐病病原菌检测灵

敏度高达10^3 CFU/mL,进一步研究显示,当抗血清与其他细菌标准菌株进行交叉反应时,均呈现阴性结果,充分证明该方法在检测中的高特异性[36]。

2.3　分子生物学检测

2.3.1　常规PCR检测

PCR的分子检测技术因其准确性、特异性和便捷性,在植物细菌性软腐菌检测中得到广泛应用。当前,研究者主要依赖16S rDNA特异性引物精准检测*Pectobacterium* spp. 和*Dickeya* spp.,二者特异性引物分别为Y1/Y2和ADE1/ADE2,此外,也运用16S-23S rDNA ITS (Intergenic transcribed spacer)引物(G1/L1)扩增[37-39],崔双采[32]用限制性内切酶对G1/L1扩增产物进行酶切,通过PCR-RFLP技术鉴定出待测菌株为*P. aroidearum*。随着分子生物学技术的不断进步,魔芋软腐病的鉴定已经能够借助更快速、精准、灵敏度高的新型检测技术完成。

2.3.2　环介导等温扩增技术(LAMP)

LAMP扩增技术,是一种新型恒温核酸扩增技术,由Notomi等于2000年研发。其显著特点包括高度特异性、扩增效率和反应速度,并且不需要复杂精密的仪器,甚至在保温杯中也可以完成[40]。该技术关键在于通过精准的基因组比对筛选最佳的LAMP检测引物。在实验中,LAMP技术展现出极佳的检测能力,能够检测到低至到50 fg/μL的*P. aroidearum*基因组DNA,这一检测技术相较于传统PCR提升了100倍。进一步,当应用于人工接种病原菌的土壤样品检测时,LAMP技术能够检测到低至1.2×10^4CFU/g浓度的*P. aroidearum*。鉴于这些优势,LAMP技术为早期田间土壤检测提供了强有力的工具,有助于实现魔芋软腐病的早防早控[24]。

2.3.3　实时荧光定量PCR技术

实时荧光定量PCR技术因其灵敏度高、特异性强、结果清晰等特点[41],被用于病原菌定量研究。为定量检测田间土壤软腐病病原菌,对软腐病的发生早期预警,研究者基于TaqMan荧光探针实时荧光定量PCR技术,利用*P. carotovorum* subsp. *carotovorum*的Fyu A基因序列设计特异性引物PCC1/PCC2/PCC3,可魔芋根际土壤中软腐病病原菌的动态监测[42]。孙苗苗[24]进一步将活性荧光染料EMA与实时荧光定量PCR技术相结合,建立了*P. aroidearum*的活体检测技术。EMA-qPCR技术能够实现对活菌DNA的选择性扩增,有效避免假阳性结果的出现,因此特别适用于田间魔芋组织样品中*P. aroidearum*的检测,并且可以实现活体菌的定量分析。

综上所述,实时荧光定量PCR技术不仅可以有效监测土壤中病原菌含量,更能在病原菌含量尚未引发魔芋发病症状时实现早期预警,从而及时采取防控措施,有效控制病害的蔓延,减少由此带来的经济损失。

3　魔芋软腐病的综合防治

3.1　化学防治

在农作物生长过程中,使用化学药剂是减少病虫害发生的关键手段。当前,在魔芋生产中,一般采用化学药剂控制软腐病发生。魔芋软腐病作为一种细菌性土传病害[43],防治困难,且由于种芋易携带病菌,因此防治工作需要贯穿整个栽培过程(表2)[44]。

表2　防治魔芋软腐病药剂

Table 2　Chemicals for preventing and controlling soft rot disease of konjac

时期 Periods	杀菌剂 Chemicals
栽种前(土壤消毒) Before plant (soil disinfection)	氯化苦、三元消毒粉
栽种前(种芋消毒) Before plant (seed tuber disinfection)	40%甲醛溶液、高锰酸钾溶液、固型种球包衣剂
出苗后 After emergence	20%噻菌铜悬浮剂、50%氯溴异氰尿酸可溶粉剂、0.3%四霉素水剂、80%乙蒜素乳油

在魔芋栽种前,土壤消毒是预防病害的重要环节。常用的消毒方法包括药剂熏蒸与撒施。例如,氯化苦熏蒸土壤可有效减少土壤中病原菌[45],此外,有研究表明三元消毒粉对土壤中的细菌也有良好的灭杀效果[46]。

对于种芋的消毒处理同样不可或缺,通过使用40%甲醛溶液或高锰酸钾溶液浸泡种芋,可以显著降低软腐病[47],同时,固型种球包衣剂不仅可以促进魔芋发芽生长和增产,还可以显著减少土壤中病原菌含量,从而控制软腐病的发生[48]。

魔芋出苗后,需要根据其发病规律和发病程度制定相应的防治策略。在种植过程中,防治软腐病

的化学杀菌剂包括各种含铜制剂、异氰尿酸类杀菌剂、噻唑类等[45,49]。田间防治实验中,20%噻菌铜悬浮剂防治效果最好,药后10 d防效达到82.86%,并增产42.1%,50%氯溴异氰尿酸可溶粉剂防治效果次之[50]。经室内毒力测定,5%溴菌腈微乳剂有显著的抑制效果[51]。除化学杀菌剂外,目前有部分农用抗生素类和新型植物仿生农药用于魔芋软腐病的防治。研究发现,0.3%四霉素水剂和80%乙蒜素乳油对菌株的抑制效果较强[52]。

3.2 生物防治

长久以来,化学药剂在魔芋软腐病的防治中占主导地位,然而其带来的环境污染、对人畜安全的潜在威胁以及病原菌的抗药性增加等问题不容忽视。相比之下,通过有益生物或代谢产物来抑制动、植物病害发生的生物防治,因其环保且人畜友好的方法,逐渐受到研究者的重视。目前,生物防治魔芋软腐病的主要手段包括利用生防细菌和生防放线菌,而生防真菌应用相对较少。

3.2.1 生防细菌

在生物防治魔芋软腐病的研究中,生防细菌有至关重要的地位,特别是芽孢杆菌和溶杆菌类。芽孢杆菌通过分泌抗菌物质,使细胞壁或者细胞膜溶解,有效抑制病原菌生长[53],另一方面,溶杆菌通过产生溶菌物质,降解软腐病病原菌活性,从而降低发病率[54]。

研究证实,枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、成团泛生菌(*Pantoea agglomerans*)以及解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)对魔芋软腐病病原菌有显著的抑菌效果[55]。其中,*Bacillus. subtilis*对土传病害的防治效果尤为显著,其中就包括魔芋软腐病[56],其有独特的防病机理,即通过分泌拮抗物质,抑制魔芋软腐病病原菌的生长[57]。此外,贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)对魔芋软腐病发生有显著的抑制作用,在平板对峙和盆栽防效试验中,明显降低了魔芋发病率及病情指数[29]。

值得一提的是,从健康魔芋根表土壤分离出的苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*)也表现出一定的促进魔芋生长和对魔芋软腐病的抗性[58-59]。然而,在巨大芽孢杆菌的应用上,目前仍存在争议。有报道指出,巨大芽孢杆菌L2流分LE4-3可以抑制*P. carotovorum*的生长[60]。也有研究指出,巨大芽孢杆菌ZX001会通过球茎伤口侵入魔芋,会产生多种酶使魔芋果肉腐烂,促进软腐病的发生[61]。综上所述,在利用生防菌防治时,要综合考虑不同生防菌的特性和潜在风险。

3.2.2 生防放线菌

在防治魔芋软腐病的生防放线菌中,有较多研究的是链霉菌(*Streptomycetaceae*)。链霉菌(*Streptomycetaceae*)因其孢子产量大,抗逆性强,存活时间长等特点,被用于植物病害防治[62]。

从魔芋土壤中筛选出5株有较强拮抗效果且已经应用到盆栽和大田试验中的放线菌,分别是娄彻氏链霉菌(*Streptomyces rochei*)、黄三素链霉菌(*Streptomyces flavotricin*i)、密旋链霉菌(*Streptomyces pactum*)、濑里予链霉菌(*Streptomyces senoensis*)、肉质链霉菌(*Streptomyces carnosus*),均能改善魔芋农艺性状,进而增强对病害的抵抗能力[63-64]。其中娄彻氏链霉菌"D74"可分泌胞外蛋白酶使病原菌细胞壁溶解,达到抑制魔芋软腐病菌生长的作用,其活菌制剂不仅可以防病还能促进魔芋生长,显著改善魔芋品质[65]。此外,经研究证实,弗氏链霉菌(*Streptomyces fradiae*)的一个新亚种SJK18,同样可以减少软腐病的发生[66]。综上所述,目前已发现对魔芋软腐病有拮抗作用的放线菌均有促生防病作用。

3.2.3 生防真菌

目前主要利用粘帚霉属(*Gliocladium* sp.)和木霉属(*Trichoderma* spp.)防治魔芋软腐病。2种真菌的抑病机制截然相反,粘帚霉属真菌T. N. C73的次级代谢产物可以抑制*Pectobacterterium carotovorum* subsp. *carotovorum*的生长[67];而木霉属(*Trichoderma* spp.)是通过产生挥发性复合物,从而诱导激发植物主动防御软腐病病原菌[68]。

然而,田间防治时生防菌的选择较为有限,且受环境因素影响较大,导致防治效果往往不如室内平板试验。因此,近几年,软腐病的防治策略已从单一的化学药剂转为与生防菌结合的方式,既可以减少化学农药的污染,又能控制软腐病的发生,提高魔芋产量。例如,娄彻氏链霉菌菌剂"D74"与钾肥配施在魔芋连作中显示出良好的促生防病效果,且优于单施菌剂或单施钾肥[69]。同样,枯草芽孢杆菌微囊粒剂与72%农用硫酸链霉素可溶性粉剂配合使用也提高了植株的抗性,降低发病率、提高魔芋产量[70]。因此发掘更多生防

菌及研究其与化学农药复配使用,将成为未来研究重点方向。

3.3　农业防治

目前,对魔芋软腐病的农业防治研究主要集中在魔芋与其他作物间作、根际细菌微生物群落以及抗病品种的选育方面。

3.3.1　海拔对魔芋软腐病的影响

不同栽培措施对魔芋软腐病的发生流行有巨大影响。海拔对魔芋根际微生物多样性和软腐病发生有一定的影响,在魔芋相同生育期不同海拔高度时,软腐病发病率与种植海拔的呈负相关,与根际土壤微生物总量呈正相关[71]。研究表明,在低海拔地区,避雨栽培(塑料膜搭建避雨环境+遮阳网)不仅能有效降低魔芋软腐病等病害的发生,且能有效降低杂草对魔芋土传性病害的影响[72]。

3.3.2　间作对魔芋软腐病的影响

研究证实,间作可以有效抑制土传病害的发生。目前,根际土壤微生物群落对病害发生的影响已经受到科学家的重视。*Pectobacterterium carotovorum* subsp. *carotovorum*侵染魔芋后,显著改变了根际土壤细菌和真菌群落,放线菌门、绿松菌门、芽孢杆菌门等丰度降低,子囊菌和镰刀菌的相对丰度低于健康植株[73]。而通过间作,土壤微生物多样性及有益微生物类型和相对丰度增加,土传病害的发生减少[74]。在生产上,与魔芋间作的作物主要是玉米。玉米魔芋间作显著增加了根际土壤中芽孢杆菌的含量,尖孢镰孢菌含量降低,土壤环境改善[75]。

丛枝菌根真菌(*arbuscular mycorrhizal fungi*,AMF)是土壤中重要的有益微生物,可与维管植物建立菌根共生关系,帮助植物吸收生长发育所需营养物质,排斥致病菌,减少土传病害发生[76-77]。但软腐病致病菌会改变AMF群落组成和丰度,致病菌含量越高,AMF总侵染率、侵染强度和孢子密度越低[78]。在陕南地区,魔芋与刺槐间作时,AMF可以促进刺槐根际分泌物从刺槐至魔芋根际的转运,加快魔芋对磷的吸收,改善魔芋农艺性状,并且根际细菌多样性增加,有益微生物相对丰度增加,因此植株抗病能力增强,发病率降低[79-80]。

综上所述,魔芋与其他植物间作可以增加土壤中有益微生物相对丰度,降低魔芋软腐病的发生。

3.3.3　抗病品种的选育

发掘抗病品种是提高魔芋抗病能力的有效方法之一。我国魔芋选育工作落后,抗病品种较少。通过远缘杂交花魔芋和白魔芋,选育出我国第一个高抗软腐病、高繁殖系数、高产量的品种:'安魔128'[81]。此外,从花魔芋品种中选育出的'渝魔1号'和'云芋1号'也具有抗软腐病的能力[82-83]。

除了传统杂交育种外,基因工程育种在魔芋上也有应用。2000年,从芽孢杆菌中克隆的基因*aiiA*产生的蛋白质可以降解软腐病病原菌间产生的信号分子N-AHLs,使得发病率降低[84]。2004年,从苏云金芽孢杆菌中扩增出*aiiA*基因,经纯化得到的AiiA蛋白能减少魔芋软腐病的发生[85]。2009年通过农杆菌转化的方法将合成的*aiiA*基因并导入魔芋,减少了魔芋软腐病的发生[86]。但截至目前,仍没有转基因魔芋用于实际生产,日后仍需加强对转基因魔芋的研究。

4　展望

魔芋起源于热带雨林下层,喜阴喜湿,宜种植在高海拔地区,但在栽培时极易感染软腐病,不利于魔芋种质资源的保存。除此之外,目前魔芋资源的保存机制不够成熟,收集到的魔芋资源没有得到有效保存,我国栽培魔芋品种繁多,但在魔芋的品种选育与抗性育种方面的工作严重滞后。

目前国内对魔芋软腐病的研究主要集中在病原菌鉴定、化学药剂和生防菌防治以及栽培措施对根际细菌的影响等方面,而病害快速诊断技术尚未大面积使用,加强对抗性品种的选育和利用,挖掘魔芋抗病相关基因,利用转基因技术,培育出抗病、高产的魔芋品种以及利用化学药剂和生防菌剂相结合仍是未来魔芋软腐病研究领域的重要方向。

基于目前研究现状,提出一种防治魔芋软腐病的策略,在种植时魔芋与其他高大作物间作,达到遮阳、提高土壤微生物多样性的效果,例如刺槐、玉米,在魔芋种植早期,利用快速检测技术实时监测土壤中病原菌含量,做到及时精准防治,可有效降低土壤中病原菌含量和发病率。发病时可用芽孢杆菌或肉质链霉菌等生防菌剂,必要时,可采用噻菌铜或氯溴异氰尿酸防治。综上所述,加强以预防为主的综合防治仍是魔芋生产中的必要措施。

参 考 文 献

[1]桑鲁燕,周桢,周小华,等. 魔芋葡甘聚糖的研究现状[J]. 食品安全质量检测学报,2016,7(4):1382-1386.
Sang L Y, Zhou Z, Zhou X H, et al. Research situation of konjac glucomannan[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2016,7(4):1382-1386.

[2]赵培城,张晶晶,周绪霞,等.魔芋葡甘露聚糖及其衍生物在食品工业中的应用[J].核农学报,2015,29(1):101-105.
Zhao P C, Zhang J J, Zhou X X, et al. Application of konjac glucomannan and its derivatives in food industry [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015,29(1): 101-105.

[3]白立伟,牛义,刘海利,等.魔芋种质资源及育种研究进展[J].南方农业,2016,10(4):48-52.
Bai L W, Niu Y, Liu H L, et al. Research progress of konjac germplasm resources and breeding [J]. South China Agriculture, 2016,10(4): 48-52.

[4]刘佩瑛.魔芋学[M].北京:中国农业出版社, 2004:127-143.
Liu P Y. Konjac Studies [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2004:127-143.

[5]周燚.苏云金芽胞杆菌AHL内酯酶功能及其抗魔芋软腐病研究[D].武汉:华中农业大学, 2006.
Zhou Y. Study on the function of *Bacillus thuringiensis* AHL lactonase and its resistance to konjac soft rot [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2006.

[6]龙治坚,张瑜,黄琳涵,等. 四川省魔芋栽培种植现状与春耕生产技术建议[J]. 四川农业科技,2022(10):17-20.
Long Z J, Zhang Y, Huang L H, et al. Current situation of *Amorphophallus konjac* cultivation in Sichuan Province and technical suggestions for spring ploughing production [J]. Sichuan Agricultural Science and Technology,2022(10):17-20.

[7]Fuqua W C, Winans S C, Greenberg E P. Quorum sensing in bacteria: the LuxR-LuxI family of cell density-responsive transcriptional regulators[J]. Journal of Bacteriology, 1994, 176 (2):269-275.

[8]葛玮珍. 魔芋软腐病发病过程动态研究及基于QS系统的防治研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
Ge W Z. Dynamic study on the onset process of konjac soft rot and its control based on QS system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2013.

[9]王健,乐超银,郭政宏,等. 魔芋软腐病致病机理及其生物防治[J]. 安徽农业科学,2009,37(30):14746-14748.
Wang J, Le C Y, Guo Z H, et al. Pathogenic mechanism and biological control of konjac soft rot disease [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2009,37(30):14746-14748.

[10]代雪凤,朱丽,张盛林,等. 魔芋软腐病拮抗放线菌筛选[J]. 西南大学学报(自然科学版),2021,43(11):9-17.
Dai X F, Zhu L, Zhang S L, et al. Screening of antagonistic actinomycetes against *Amorphophallus* soft rot[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2021, 43 (11):9-17.

[11]钟宇,牛莉莎,曾雨洁,等. 魔芋软腐病拮抗菌GZA12的分离鉴定及其防病促生作用[J]. 微生物学报,2024,64(10):3916-3931.
Zhong Y, Niu L S, Zeng Y J, et al. An antagonistic bacterial strain GZA12 against soft rot of konjac: isolation, identification, and application in disease prevention and growth promotion[J]. Acta Microbiologica Sinica,2024,64(10):3916-3931.

[12]丁自立,万中义,矫振彪,等. 魔芋软腐病研究进展和对策[J]. 中国农学通报,2014,30(4):238-241.
Ding Z L, Wan Z Y, Jiao Z B, et al. Progress and countermeasures for soft rot disease of *Amorphophallus konjac* [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(4): 238-241.

[13]吴金平. 魔芋软腐病病原菌及其拮抗菌的研究[D]. 武汉:武汉大学,2010.
Wu J P. Study on pathogenic bacteria and antagonistic bacteria of konjac soft rot[D]. Wuhan: Wuhan University,2010.

[14]袁尚勇. 魔芋软腐菌生物学特性测定及软腐病防治方法研究[D]. 武汉:华中农业大学,2008.
Yuan S Y. Determination of biological characteristics of *Amorphophallus konjac* soft rot fungi and study on control methods of soft rot [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2008.

[15]文永萍. 魔芋软腐病为害与防治[J]. 云南农业,2023,(5):56-57.
Wen Y P. Damage and control of konjac soft rot[J]. Yunnan Agriculture, 2023, (5): 56-57.

[16]Hauben L, Moore E R B, Vauterin L, et al. Phylogenetic position of phytopathogens within the Enterobacteriaceae[J]. Systematic and Applied Microbiology,1998,21(3):384-397.

[17]Gardan L, Gouy C, Christen R, et al. Elevation of three subspecies of *Pectobacterium carotovorum* to species level: *Pectobacterium atrosepticum* sp. nov., *Pectobacterium betavasculorum* sp. nov. and *Pectobacterium wasabiae* sp. nov[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology,2003,53(Pt 2):381-391.

[18]Pritchard L, Glover R H, Humphris S, et al. Genomics and taxonomy in diagnostics for food security: soft-rotting enterobacterial plant pathogens [J]. Analytical Methods, 2016,8(1):12-24.

[19]Nabhan S, De Boer S H, Maiss E, et al. *Pectobacterium aroidearum* sp. nov., a soft rot pathogen with preference for monocotyledonous plants [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2013, 63(Pt 7): 2520-2525.

[20]Samson R, Legendre J B, Christen R, et al. Transfer of *Pectobacterium chrysanthemi* (Burkholder et Al. 1953) Brenner et Al. 1973 and *Brenneria paradisiaca* to the genus *Dickeya* gen. nov. as *Dickeya chrysanthemi* comb. nov. and *Dickeya paradisiaca* comb. nov. and delineation of four novel species, *Dickeya dadantii* sp. nov., *Dickeya dianthicola* sp. nov., *Dickeya dieffenbachiae* sp. nov. and *Dickeya zeae* sp. nov[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology,2005,55(Pt 4):1415-1427.

[21]Brady C L, Cleenwerck I, Denman S, et al. Proposal to reclassify *Brenneria quercina* (Hildebrand and Schroth 1967)

Hauben et al. 1999 into a novel genus, *Lonsdalea* gen. nov., as *Lonsdalea quercina* comb. nov., descriptions of *Lonsdalea quercina* subsp. quercina comb. nov., *Lonsdalea quercina* subsp. iberica subsp. nov. and *Lonsdalea quercina* subsp. britannica subsp. nov., emendation of the description of the genus *Brenneria*, reclassification of *Dickeya dieffenbachiae* as *Dickeya dadantii* subsp. dieffenbachiae comb. nov., and emendation of the description of *Dickeya dadantii* [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2012, 62(Pt 7): 1592-1602.

[22] Tian Y L, Zhao Y Q, Yuan X L, et al. *Dickeya fangzhongdai* sp. nov., a plant-pathogenic bacterium isolated from pear trees (*Pyrus pyrifolia*) [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2016, 66(8): 2831-2835.

[23]卢美欢,李利军,马英辉,等.陕南地区魔芋软腐病病原菌的鉴定及生长特性研究[J].陕西农业科学,2018,64(02):59-62,78.
Lu M H, Li L J, Ma Y H, et al. Identification of pathogenic bacteria of konjak soft rot and its growth characters [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2018, 64(2): 59-62,78.

[24] 孙苗苗. 魔芋软腐病病原鉴定及快速检测技术研究[D]. 武汉:华中农业大学,2019.
Sun M M. Study on pathogen identification and rapid detection technology of konjac soft rot [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.

[25] 张卓然,杨柳,王东歧,等. 十堰市部分地区魔芋腐烂病发病类型和重要致病菌[J]. 中国农业科技导报,2021,23(12):116-124.
Zhang Z R, Yang L, Wang D Q, et al. Symptom types and casual pathogens of *Amorphaphallus konjac* rot disease in several fields located in Shiyan City [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(12): 116-124.

[26] 黄露,周兵正,安星宇,等. 贵州魔芋软腐病菌多基因分子鉴定及其致病力分析[J]. 植物保护,2023,49(4):115-124.
Huang L, Zhou B Z, An X Y, et al. Molecular identification based on multiple genes and pathogenicity analysis of soft rot pathogens of *Amorphophallus konjac* in Guizhou [J]. Plant Protection, 2023, 49(4): 115-124.

[27] 冯道,黄显进,刘羽,等. 六盘水地区魔芋软腐病病原菌鉴定及侵染特性研究[J]. 中国蔬菜,2024(2):68-77.
Feng D, Huang X J, Liu Y, et al. Identification and infected characteristics of pathogens causing soft rot on konjac (*Amorphophallus konjac*) in Liupanshui [J]. China Vegetables, 2024(2): 68-77.

[28] 魏环宇,魏薇,杨敏,等. 云南省珠芽魔芋(*Amorphophallus bulbifer*)软腐病病原菌鉴定[J]. 植物病理学报,2020,50(4):381-386.
Wei H Y, Wei W, Yang M, et al. Identification of a soft rot disease pathogen of *Amorphophallus bulbifer* in Yunnan Province [J]. Acta Phytopathologica Sinica, 2020, 50(4): 381-386.

[29] 崔双,陈昌龙,冯佳豪,等. 魔芋软腐病致病菌*Pectobacterium aroidearum*的特征及贝莱斯芽孢杆菌的生防效果[J]. 中国蔬菜,2021(3):83-93.
Cui S, Chen C L, Feng J H, et al. Characterization of *Pectobacterium aroidearum* causing konjac soft rot and biocontrol effect of *Bacillus velezensis* [J]. China Vegetables, 2021(3): 83-93.

[30] 李竹梅,董坤,张延安,等. 花魔芋软腐病病原真菌分离鉴定[J]. 广西植物,2024,44(2):333-344.
Li Z M, Dong K, Zhang Y A, et al. Isolation and identification of pathogenic fungi from soft rot tissue of *Amorphophallus konjac* corm [J]. Guihaia, 2024, 44(2): 333-344.

[31] Cuppels D. Evaluation of selective media for isolation of soft-rot bacteria from soil and plant tissue [J]. Phytopathology, 1974, 64(4): 468.

[32] 崔双. 魔芋软腐病病原菌的鉴定、生物学特性及贝莱斯芽孢杆菌的防效[D]. 海口:海南大学,2021.
Cui S. Identification, biological characteristics and control effect of Bacillus velez on soft rot of *Amorphophallus konjac* [D]. Haikou: Hainan University, 2021.

[33] 郭璐璐. 柏树溃疡病病原菌鉴定、生物学特性研究及室内药剂筛选[D]. 重庆:西南大学,2023.
Guo L L. Identification, biological characteristics and indoor pesticide screening of the pathogen of cypress canker [D]. Chongqing: Southwest University, 2023.

[34] Ališ, Van Gijsegem F, Pédron J, et al. Diversity within the novel *Dickeya fangzhongdai* sp., isolated from infected orchids, water and pears [J]. Plant Pathology, 2018, 67(7): 1612-1620.

[35] 颜健华,何奇松,蒋家霞,等. A型口蹄疫病毒结构蛋白VP1的原核表达、纯化及鉴定[J]. 南方农业学报,2016,47(2):301-305.
Yan J H, He Q S, Jiang J X, et al. Prokaryotic expression, purification and identification of structural protein VP1 of foot-and-mouth disease virus serotype A [J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, 47(2): 301-305.

[36] 张小芳,张海燕,王永吉,等. 魔芋软腐病菌血清学检测方法的建立[J]. 西南农业学报,2017,30(7):1576-1581.
Zhang X F, Zhang H Y, Wang Y J, et al. Establishment of serological detection method against soft rot pathogen of *Amorphophallus konjac* [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(7): 1576-1581.

[37] Darrasse A, Priou S, Kotoujansky A, et al. PCR and restriction fragment length polymorphism of a pel gene as a tool to identify *Erwinia carotovora* in relation to potato diseases [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1994, 60(5): 1437-1443.

[38] Nassar A, Darrasse A, Lemattre M, et al. Characterization of *Erwinia chrysanthemi* by pectinolytic isozyme polymorphism and restriction fragment length polymorphism analysis of PCR-amplified fragments of pel genes [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, 62(7): 2228-2235.

[39] Toth I K, Avrova A O, Hyman L J. Rapid identification and

differentiation of the soft rot erwinias by 16S-23S intergenic transcribed spacer-PCR and restriction fragment length polymorphism analyses [J]. Applied and Environmental Microbiology,2001,67(9):4070-4076.

[40] Notomi T, Okayama H, Masubuchi H, et al. Loop-mediated isothermal amplification of DNA [J]. Nucleic Acids Research,2000,28(12):E63.

[41] 吴静,吴茂森,何晨阳. 实时定量PCR的原理及其在植物病理学研究中的应用[J]. 植物保护,2007,33(6):123-128.
Wu J, Wu M S, He C Y. Principles of real-time quantitative PCR and its application in plant pathology [J]. Plant Protection,2007,33(6):123-128.

[42] 卢美欢,李利军,马英辉,等. 魔芋软腐病病原菌TaqMan荧光探针PCR技术的建立及应用[J]. 植物保护学报,2019,46(5):1100-1109.
Lu M H, Li L J, Ma Y H, et al. Establishment and application of TaqMan fluorescence probe real-time PCR detection for the pathogen of konjac soft rot[J]. Journal of Plant Protection, 2019,46(5):1100-1109.

[43] 张先平,李爱玲,王胜宝,等. 魔芋软腐病发生规律与防治技术研究[J]. 西北农业学报,2002,11(1):78-81.
Zhang X P, Li A L, Wang S B, et al. A study on occurrence rule and control technology of soft rot of *Amorphophallus*[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2002, 11(1): 78-81.

[44] 古洪辉,汪正香,蒋雄,等. 魔芋软腐病及其防治研究进展[J]. 农学学报,2018,8(9):15-19.
Gu H H, Wang Z X, Jiang X, et al. Soft rot of *Amorphophallus* and its control research progress[J]. Journal of Agriculture,2018,8(9):15-19.

[45] 黄丹枫,刘佩英. 魔芋组培快繁技术的应用研究[J]. 上海农学院学报,1991,9(2):162-164.
Huang D F, Liu P Y. Study on the application of tissue culture and rapid propagation technology of *Amorphophallus konjac* [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science),1991,9(2):162-164.

[46] 马崇坚,彭诚聪. 魔芋块茎组织培养及植株再生[J]. 江苏农业科学,2007,35(3):103-105.
Ma C J, Peng C C. Tissue culture and plantlet regeneration of *Amorphophallus albus* tubers [J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2007,35(3):103-105.

[47] 杨群辉,何翔,杨佩文,等. 种球包衣剂防治魔芋软腐病试验研究[J]. 西南农业学报,2020,33(2):313-318.
Yang Q H, He X, Yang P W, et al. Treatment of *Amorphophallus konjac* soft rot disease by bulbs coating chemicals [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2020,33(2):313-318.

[48] 苏娜,钟伏付,杨廷宪,等. 魔芋防病栽培技术体系研究[J]. 中国植保导刊,2010,30(9):32-34.
Su N, Zhong F F, Yang T X, et al. Study on disease prevention cultivation technology system of *Amorphophallus konjac*[J]. China Plant Protection,2010,30(9):32-34.

[49] 王红岩,杨殿林,郭邦利,等. 魔芋绿色防病高效栽培技术[J]. 中国生物防治学报,2019,35(6):987-991.
Wang H Y, Yang D L, Guo B L, et al. Green and high-effective disease control and cultivation techniques of *Amorphophallus konjac*[J]. Chinese Journal of Biological Control,2019,35(6):987-991.

[50] 田虹,向富勇,储昌斌,等. 不同药剂对魔芋软腐病防效研究[J]. 现代农业科技,2019(11):98-99.
Tian H, Xiang F Y, Chu C B, et al. Control effects of different agents on konjac soft rot[J]. Modern Agricultural Science and Technology,2019(11):98-99.

[51] 罗林丽,赵兴丽,周罗娜,等. 1株白魔芋软腐病病原菌鉴定及其室内药剂筛选[J]. 南方农业学报,2022,53(11):3137-3146.
Luo L L, Zhao X L, Zhou L N, et al. Identification of a pathogen causing soft rot on *Amorphophallus albus* and laboratory screening for bactericide[J]. Journal of Southern Agriculture,2022,53(11):3137-3146.

[52] 和积飞. 不同药剂防治永胜县魔芋软腐病药效试验[J]. 现代农业科技,2018(24):103,105.
He J F. Efficacy test of different chemicals to control konjac soft rot in Yongsheng county [J]. Modern Agricultural Science and Technology,2018(24):103,105.

[53] Cawoy H, Mariutto M, Henry G, et al. Plant defense stimulation by natural isolates of Bacillus depends on efficient surfactin production [J]. Molecular Plant-Microbe Interactions,2014,27(2):87-100.

[54] 吴亚鹏,姬广海,陈云兰,等. 生防细菌13-1对魔芋软腐病的控制及机理研究[J]. 中国生物防治,2010,26(2):193-199.
Wu Y P, Ji G H, Chen Y L, et al. Biocontrol effect and mechanisms of Lysobacter antibioticus 13-1 against soft rot pathogen of *Amorphophallus konjac*[J]. Chinese Journal of Biological Control,2010,26(2):193-199.

[55] 周丽洪,李淼,姬广海,等. 防治软腐病的魔芋内生细菌的筛选与鉴定[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2015,30(4):547-553.
Zhou L H, Li M, Ji G H, et al. The screening and identification of endophytic bacteria of *Amorphophallus konjac* against *Erwinia carotovora* var. carotovora[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2015, 30(4):547-553.

[56] 胡亚杰,韦建玉,卢健,等. 枯草芽孢杆菌在农作物生产上的应用研究进展[J]. 作物研究,2019,33(2):167-172.
Hu Y J, Wei J Y, Lu J, et al. Research progress of *Bacillus subtilis* application in crops production[J]. Crop Research, 2019,33(2):167-172.

[57] 覃剑锋,陈波,蔡阳光,等. 不同生物菌剂对魔芋软腐病田间防效试验[J]. 广西农学报,2020,35(6):16-19,10.
Qin J F, Chen B, Cai Y G, et al. Study on the field control effect of different biological fungicide on konjac soft rot[J]. Journal of Guangxi Agriculture,2020,35(6):16-19,10.

[58] 李辉,李雷林,高媛,等. 一株拮抗魔芋软腐病的苏云金芽胞杆菌研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2019,41(3):108-112.

Li H, Li L L, Gao Y, et al. Isolation and screening of *Bacillus thuringiensis* against soft rot of konjac[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2019, 41(3): 108-112.

[59] 何斐,张忠良,崔鸣,等. 健康魔芋根表土壤优势细菌鉴定及其抗病促生作用[J]. 西北农业学报,2015,24(8):75-83.
He F, Zhang Z L, Cui M, et al. Identification, disease resistance and growth-promoting effect of dominant bacteria in the rhizosplane soil of healthy *Amorphophallus konjac*[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2015, 24(8): 75-83.

[60] 赵妗颐,肖洋,杨龙,等. 巨大芽孢杆菌L2发酵产物对魔芋软腐病菌的抑菌机制[J]. 食品科学,2019,40(21):14-20.
Zhao J Y, Xiao Y, Yang L, et al. Antibacterial mechanism of fermentation product from *Bacillus megaterium* L2 against *Erwinia carotovora* subsp. carotovora[J]. Food Science, 2019,40(21):14-20.

[61] 李梦飞,陈田雨,向凌月,等. 巨大芽孢杆菌ZX001的分离鉴定及其与魔芋软腐病发生的关系[J]. 中国农学通报,2019,35(21):103-109.
Li M F, Chen T Y, Xiang L Y, et al. *Bacillus megaterium* strain ZX001: isolation and identification and its relationship with konjac soft rot disease[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(21): 103-109.

[62] 何斐,崔鸣. 魔芋软腐病生物防治研究进展[J]. 陕西农业科学,2017,63(1):64-67.
He F, Cui M. Research progress on biological control of konjac soft rot[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2017, 63(1): 64-67.

[63] 何斐,张忠良,崔鸣,等. 生防放线菌剂对魔芋根域微生物区系的影响[J]. 应用与环境生物学报,2015,21(2):221-227.
He F, Zhang Z L, Cui M, et al. Effect of biocontrol actinomycetes agents on microflora in the root-zone of *Amorphophallus konjac* K. Koch ex N. E. Br K. Koch ex N. E. Br[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2015, 21(2): 221-227.

[64] 何斐,张忠良,崔鸣,等. 魔芋根域优势真菌鉴定和化感作用及其生防放线菌的筛选[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(4):157-167.
He F, Zhang Z L, Cui M, et al. Identification and allelopathic effect of dominant fungi in root-zone of *Amorphophallus konjac* and screening of the bio-control actinomycetes[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 157-167.

[65] 何斐,张忠良,崔鸣,等. 放线菌'D74'对魔芋的防病促生作用[J]. 园艺学报,2015,42(2):367-376.
He F, Zhang Z L, Cui M, et al. Disease prevention and growth promotion effects of actinomycete strain D74 on *Amorphophallus konjac*[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2015, 42(2): 367-376.

[66] 叶晶龙. 魔芋软腐病拮抗放线菌的分离、鉴定及其应用的初步研究[D]. 宜昌:三峡大学,2012.
Ye J L. Isolation, identification and application of antagonistic actinomycetes against soft rot of konjac[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2012.

[67] Saputra H, Puspita F, Nugroho T. Production of an antibacterial compound against the plant pathogen *Erwinia carotovora* subs. *carotovora* by the biocontrol strain *Gliocladium* sp. T. N. C73[J]. International Journal of Agricultural Technology, 2013, 9: 1157-1165.

[68] Aguado-Santacruz G A, Moreno·G6mez B, Rasc6n Cruz Q, et a1. Biofertilizers as complements to synthetic and organic fertilization. In: Fertilizers: Components, uses in agriculture and environmental impacts[M]. Nova Publishers: 2014, 127-154.

[69] 何斐,崔鸣,李川,等. 菌剂与钾肥配施对连作魔芋生长、生理代谢和发病率的影响[J]. 西北农业学报,2020,29(7):1095-1105.
He F, Cui M, Li C, et al. Effects of agent and potassium fertilizer on plant growth, physiological metabolism and disease incidence in continuous cropping of *Amorphophallus konjac*[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2020, 29(7): 1095-1105.

[70] 杨会英. 菌剂与药剂配施对云南保山魔芋生长、软腐病发生及产量的影响[J]. 农业工程技术,2023,43(19):28-30.
Yang H Y. Effects of combined application of microbial agents and chemicals on growth, soft rot and yield of *Amorphophallus konjac* in Baoshan, Yunnan Province[J]. Agricultural Engineering Technology, 2023, 43(19): 28-30.

[71] 徐佳欣,刘芳,吴三林,等. 海拔对魔芋根际微生物区系和软腐病发生的影响[J]. 南方农业学报,2018,49(1):79-84.
Xu J X, Liu F, Wu S L, et al. Effects of altitude on rhizosphere microbial flora and soft rot in *Amorphophallus konjac*[J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(1): 79-84.

[72] 邹强. 不同栽培措施对低海拔地区花魔芋生长和土传病害发生的影响[D]. 绵阳:西南科技大学,2021.
Zou Q. Effects of different cultivation measures on the growth and soil-borne diseases of *Amorphophallus parviflora* in low altitude areas[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.

[73] Yang M, Qi Y, Liu J N, et al. Different response mechanisms of rhizosphere microbial communities in two species of *Amorphophallus* to *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* infection[J]. Plant Pathology Journal, 2023, 39(2): 207-219.

[74] 付学鹏,吴凤芝,周新刚. 间作防控作物土传病害的机理研究进展[J]. 江苏农业科学,2016,44(1):16-20.
Fu X P, Wu F Z, Zhou X G. Research progress on the mechanism of intercropping to prevent and control soil-borne diseases of crops[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(1): 16-20.

[75] 邵梅,杜魏甫,许永超,等. 魔芋玉米间作魔芋根际土壤尖孢镰孢菌和芽孢杆菌种群变化研究[J]. 云南农业大学学报,2014,29(6):828-833.
Shao M, Du W F, Xu Y C, et al. The population change of konjac's rhizosphere soil *Fusarium oxysporum* and *Bacillus*

spp. in intercropping of konjac and maize system[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2014, 29(6): 828-833.

[76] Schütz L, Saharan K, Mäder P, et al. Rate of hyphal spread of arbuscular mycorrhizal fungi from pigeon pea to finger millet and their contribution to plant growth and nutrient uptake in experimental microcosms[J]. Applied Soil Ecology, 2022, 169: 104156.

[77] Cai X Y, Zhao H H, Liang C, et al. Effects and mechanisms of symbiotic microbial combination agents to control tomato *Fusarium crown* and root rot disease[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 629793.

[78] 何斐,田孝威,雷雨俊,等. 连作花魔芋软腐病株与健株根域丛枝菌根真菌群落多样性[J]. 微生物学报, 2022, 62(8): 3092-3108.
He F, Tian X W, Lei Y J, et al. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the root zone of *Amorphophallus konjac* with and without soft rot under continuous cropping[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2022, 62(8): 3092-3108.

[79] 何斐,李川,Faisal SHAH,等. 丛枝菌根菌丝桥介导刺槐-魔芋间碳转运和磷吸收[J]. 植物生态学报, 2023, 47(6): 782-791.
He F, Li C, Shah F, et al. Carbon transport and phosphorus uptake in an intercropping system of *Robinia pseudoacacia* and *Amorphophallus konjac* mediated by arbuscular mycorrhizal hyphal networks[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(6): 782-791.

[80] 何斐,刘欢,李川,等. 间作刺槐对魔芋根际细菌群落结构及软腐病发生的影响[J]. 核农学报, 2024, 38(4): 755-766.
He F, Liu H, Li C, et al. Effects of intercropping with *Robinia pseudoacacia* on rhizosphere bacterial community structure and soft rot disease development in *Amorphophallus konjac*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(4): 755-766.

[81] 郭邦利,段龙飞,蔡阳光,等. 魔芋抗病新品种选育与繁育[EB/OL]. (2020-05-12)[2024-11-20]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=th5-mUcNE0Pwuy3cI1AE46BROlsthBTQvkcDVtT9L2K3VkjcfDMB4KJ3nS5VZJY8eV8H6buoy4SqomLm6q4ANRsJUol63KR9lh1nXDxpdfkgb_Ztnlqx_vpoJM1WXuw7l8glTa4G5r7srKj8G5emtzKl_WUAzgBdBQJqeH0g7HI=&uniplatform=NZKPT.
Guo B L, Duan L F, Cai Y G, et al. Konjac disease-resistant new varieties breeding and breeding[EB/OL]. (2020-05-12)[2024-11-20]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=th5-mUcNE0Pwuy3cI1AE46BROlsthBTQvkcDVtT9L2K3VkjcfDMB4KJ3nS5VZJY8eV8H6buoy4SqomLm6q4ANRsJUol63KR9lh1nXDxpdfkgb_Ztnlqx_vpoJM1WXuw7l8glTa4G5r7srKj8G5emtzKl_WUAzgBdBQJqeH0g7HI= &uniplatform=NZKPT.

[82] 牛义,张大学,刘海利,等. 魔芋新品种渝魔1号的选育[J]. 中国蔬菜, 2010(2): 88-90.
Niu Y, Zhang D X, Liu H L, et al. A new konjac variety—′Yumo No. 1′[J]. China Vegetables, 2010(2): 88-90.

[83] 李勇军,王玲,陈建华,等. 魔芋新品种‘云芋1号’[J]. 园艺学报, 2010, 37(2): 339-340.
Li Y J, Wang L, Chen J H, et al. A new cultivar of *Amprophophallus konjac* K. Koch ‘Yunyu 1′[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2010, 37(2): 339-340.

[84] Dong Y H, Xu J L, Li X Z, et al. AiiA, an enzyme that inactivates the acylhomoserine lactone quorum-sensing signal and attenuates the virulence of *Erwinia carotovora*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2000, 97(7): 3526-3531.

[85] 周燚,孙明,喻子牛. 苏云金芽胞杆菌AiiA蛋白对魔芋软腐病菌的抗病活性[J]. 武汉大学学报(理学版), 2004, 50(6): 761-764.
Zhou Y, Sun M, Yu Z N. Activity of *Bacillus thuringiensis* AiiA protein against soft rot disease for *Amorphophallus konjac* caused by *Erwinia. carotovora* pv. *carotovora*[J]. Wuhan University Journal (Natural Science Edition), 2004, 50(6): 761-764.

[86] Ban H F, Chai X L, Lin Y J, et al. Transgenic *Amorphophallus konjac* expressing synthesized acyl-homoserine lactonase (aiiA) gene exhibit enhanced resistance to soft rot disease[J]. Plant Cell Reports, 2009, 28(12): 1847-1855.

(编辑:吕俊俐)