

特殊生境放线菌在植物病害防治中的研究进展

樊炳君¹, 曹艳茹^{1*}, 赵洪莹², 周萍¹, 焦钰¹, 朱国兴¹, 魏薇¹

(1. 昆明学院农学与生命科学学院, 云南昆明 650214; 2. 西南林业大学林学院, 云南昆明 650224)

摘要 放线菌种类繁多, 能产生多种活性代谢产物, 在植物病害防治中发挥了重要作用。介绍了放线菌在植物病害防治中的作用机理, 论述了特殊生境放线菌在防治植物病害中的研究现状, 并对特殊生境下的放线菌在植物病害防治中的未来发展趋势进行了展望。

关键词 特殊生境; 放线菌; 植物病害; 防治机理

中图分类号 S432.1 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)02-0001-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.02.001



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress on the Application of Special Habitat Actinomycetes in the Plant Diseases Control

FAN Bing-jun¹, CAO Yan-ru^{1*}, ZHAO Hong-ying² et al (1. College of Agriculture and Life Sciences, Kunming University, Kunming, Yunnan 650214; 2. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224)

Abstract Actinomycetes, which comprise a wide variety of species and produce many bioactive secondary metabolites, play an important role in control of plant disease. Addresses the mechanism of actinomycetes in plant disease control, and introduces research status of special habitat of Actinomycetes in the prevention of plant diseases and development trend.

Key words Special habitat; Actinomycete; Plant diseases; Prevention and control mechanism

随着消费水平的提高, 人们对农作物的品种多样性和需求量与日俱增, 对农产品的品质要求也越来越高^[1]。农业生产者追求低成本、高效率的生产方式, 导致土壤生产功能退化, 如板结、酸化、次生盐渍化、污染物积累和连作障碍等问题十分突出^[2]。作物的持续连续种植会导致某些元素被过多吸收, 进而使得土壤中该营养元素缺乏, 造成土壤微生态失衡, 植株的抗病能力减弱, 病虫害发生严重。植物病害极大地制约着农业生产的产量和质量, 造成巨大的经济损失, 严重影响着国家的粮食安全和人们的生产生活^[3]。

目前, 对植物病害的控制手段主要是化学防治, 大量使用化学农药会引发病虫害产生抗药性、农药残留超标、生态环境破坏等一系列问题。为了减轻化学药剂在农业生产中造成的危害, 环境友好型的生物防治逐渐成为植物保护的重要措施。生防微生物菌剂是生物防治的重要手段之一, 具有绿色环保和防病增产等优点, 受到众多科研工作者的关注。近年, 研究较为普遍和深入的微生物生防制品主要集中在芽孢杆菌^[4]、假单胞菌^[5]、木霉菌^[5]、绿僵菌^[6]和白僵菌^[7]等细菌和真菌。放线菌作为微生物的一大类群, 种类和代谢产物丰富, 在农业生防领域也显示了独特的优势, 如应用非常成熟的阿维菌素就是由灰色链霉菌 *Streptomyces avermitilis* 产生的, 其在杀虫、杀螨、杀线虫、防治水稻螟虫等方面有着优异的表现。现今, 由于新病害产生以及原有病害抗药性的增加, 急需研发新型菌剂。特殊生境放线菌能够丰富生防放线

菌的菌种资源, 在植物病害防治中也具有极高的探索价值和应用价值。因此, 十分必要加强特殊生境下生防菌的研究。

1 放线菌在植物病害防治中的生防机制

通过利用有益生物及其代谢产物对植物病害进行控制的方式被称为植物病害生物防治^[8]。放线菌是微生物的重要类群, 由于其代谢类型和代谢产物十分丰富, 被广泛应用于植物病害的防控。从放线菌中分离获得的链霉素、阿维菌素、伊维菌素、春雷霉素和井冈霉素等农用抗生素均在农业病虫害的防治中占有重要地位^[9]。目前, 国内外阐明的生防放线菌作用机制主要有拮抗作用、竞争作用、重寄生作用和促生作用^[10-11]。

1.1 拮抗作用 拮抗作用是指生防放线菌通过分泌一些抗生素或有毒的代谢物质从而抑制甚至杀死病原菌, 其作用方式主要有: ①作用于细胞壁, 生防放线菌通过产生某些代谢产物来抑制或阻碍病原菌的细胞壁合成, 致使病原菌无法生长而死亡^[12-15]。②作用于细胞膜, 生防放线菌通过破坏病原菌的膜结构, 导致其通透性改变, 细胞内含物外渗而死亡^[16]。③作用于蛋白质合成, 生防放线菌通过分泌物质阻碍病原菌的蛋白质合成, 从而使得病原菌的生长受到抑制^[17-18]。④作用于病原微生物的代谢过程, 生防放线菌通过产生抗生素改变病原菌代谢过程中的酶活性, 导致病原菌的生长发育受到抑制, 甚至死亡^[19]。

1.2 竞争作用 竞争作用是生防放线菌发挥作用的重要机制之一。在同一个微小的环境中, 当空间、水分、营养物质等不足时, 2种或多种微生物群体就会发生争夺, 这一现象称为竞争作用。竞争作用的表现形式主要有空间竞争和营养竞争。放线菌通过产生代谢物质抑制植物病原菌的生长, 从而使生防放线菌数量明显增多, 导致其成为优势种群, 在特定的生存空间内极大地减少了病原菌的生存空间^[20]。在进行营养竞争时, 根际生防放线菌防治植物病害的主要机理之一是产生嗜铁素。嗜铁素的存在能使生防放线菌更好地吸收

基金项目 国家自然科学基金项目(31660002); 省部共建云南生物资源保护与利用国家重点实验室开放课题(2019KF005); 云南省地方本科高校(部分)基础研究联合专项资金项目(2018FH001-003); 云南省“万人计划”青年拔尖人才项目(YNWR-QNBj-2018-011); 云南省教育厅科学研究基金项目(2020Y0475)。

作者简介 樊炳君(1996—), 女, 云南昆明人, 硕士研究生, 研究方向: 资源利用与植物保护。*通信作者, 副教授, 从事微生物的多样性及功能挖掘研究。

收稿日期 2021-05-06

土壤中的铁离子,导致病原菌缺铁无法正常生长繁殖,进而达到控制植物病害的目的^[21]。

1.3 重寄生作用 重寄生作用是指利用微生物附着或缠绕于病原生物进而杀灭或降低病原生物的数量,以控制植物病害的发生和发展。生防放线菌会在病原菌的菌丝上产生附着胞并缠绕其上,使病原菌的菌丝产生畸形,最终使得病原菌生长受阻或细胞死亡^[22]。拮抗作用和重寄生作用是相互依存的,放线菌在抗生素破壁的基础上,通过重寄生作用侵入病原菌细胞达到消灭病原菌的目的^[23]。

1.4 促生作用 固氮作用、解磷作用和产生生长激素是生防放线菌常见的促生机制。生防放线菌通过促进植物体本身生长,增强寄主的抗性,达到防治病害的作用。Benson等^[24]报道弗兰克菌属(*Frankia*)放线菌具有显著的固氮作用,与植物共生形成根瘤,促进植物生长。利迪链霉菌(*Streptomyces lydicus*)通过增加豆类植物根瘤菌的数量和形态,从而加大植物对铁离子的吸收,达到促进植物生长的目的^[25]。Hamdali等^[26]研究解磷放线菌(*Streptomyces griseus*)能够增加植株芽和根的重量,显著促进小麦植株生长,同时有效降低腐霉菌(*Pythium ultimum*)对小麦的侵染。De Oliveira等^[27]研究报道,链霉菌属菌株 R18(6)具有良好的磷酸溶解性和广谱抗菌能力。

2 特殊生境下的放线菌在植物病害防治中的研究现状

特殊生境是指在结构和功能上有明显特殊性的生态环境^[28-29],其经纬度、温度、海拔、pH、压强、光照和水分等环境因子同普通环境存在很大差异。目前,针对海洋、红树林和盐碱地等特殊生境下的生防放线菌研究相对较多。

2.1 海洋放线菌在植物病害防治中的研究现状 中国管辖的海域面积约 300 万 km²,相当于陆地国土面积的 1/3,为微生物的研究和开发利用提供了巨大的资源宝库^[30]。海洋中的微生物可以吞噬垃圾、将光能转化为化学能,其天然产物还表现出了抑菌、细胞毒、抗炎等生物活性^[31-33]。在海洋的沉积物或泥样中,人们也发现了对植物病原菌有抑制效果的放线菌。王聪等^[34]在广西北部湾的海泥样品中分离得到了能够抑制香蕉枯萎病原菌的放线菌菌株。鹿连明等^[35]从浙江省玉环市海山潮间带采集的鳞笠藤壶中分离获得 1 株海洋放线菌(A3202),该菌株的发酵液对柑橘绿霉病菌的菌丝生长抑制率可达 66.82%。马桂珍等^[36]对连云港海域采集的海水、海泥、漂浮物、海洋动物及海洋植物样品进行分离筛选后发现 7 株放线菌对番茄早疫病菌(*Alternaria solani*)、茄腐皮镰刀菌(*Fusarium solani*)、芹菜斑枯病菌(*Septoria apii*)、番茄枯萎病菌(*Fusarium oxysporum* f.sp.*lycopersici*)、番茄叶霉病菌(*Fulvia fulva*)、番茄灰霉病菌(*Botrytis cinerea*)、油菜菌核病菌(*Sclerotinia sclerotiorum*)、辣椒疫霉病菌(*Phytophthora capsici*)、茄子黄萎病菌(*Verticillium dahliae*)和番茄青枯病菌(*Ralstonia solanacearum*)均有不同程度的抑制效果。闫建芳等^[37]从黄海海域海底沉积物样品分离出一株密旋链霉菌(*Streptomyces pactum*)对番茄溃疡病菌(*Clavibacter michiganensis* subsp.*michiganensis*)有较好的抑制作用,菌株和发酵

液产生的抑菌圈直径分别为 19.2 和 20.2 mm。肖珂等^[38]分离了海南海绵共附生放线菌,发现分离出的 20% 的海洋放线菌对薯蓣炭疽病菌(*Colletotrichum gloeosporioides*)有抑菌活性,14% 的菌株对橡胶炭疽病菌(*C. gloeosporioides*)有抑菌活性,12% 的菌株对香蕉枯萎病菌(*F. oxysporum* f.sp.*cubenserace*)有抑菌活性,10% 的菌株对水稻稻瘟病菌(*Magnaporthe grisea*)和木薯根腐病菌(*Lasiodiplodia theobromae*)有抑菌活性。综上可知,海洋环境中蕴藏着丰富的对植物病害有防治作用的放线菌资源。但目前植物病害防治方面的研究成果还相对较少,未来的发展空间十分巨大。

2.2 红树林放线菌在植物病害防治中的研究现状 红树林是生长在热带和亚热带海岸潮间带的湿地木本植物群落,主要由红树植物组成。为了适应海岸潮间带的环境,红树林环境形成了独特的形态结构和生理生态特征^[39]。生活在红树林生境中的微生物,经历着高盐、低光照、反复潮汐、营养物质匮乏、弱碱性等各种不利的生存条件,特殊的生境赋予了微生物独特的代谢特征,使其产生了新颖的代谢产物,且有很多具有生理活性,如抑菌、抗肿瘤、生物酶活性、生物治藻活性及肽类毒素活性等^[40-41]。已有学者开始研究红树林中的微生物多样性及代谢产物,并应用到药学、化学和农学等领域。李小群等^[42]从广西北仑河口红树林底泥样品中发现有 22 株放线菌对甘蔗鞭黑粉菌(*Ustilago scitaminea*)有抑制作用,占分离放线菌总数的 61.11%。吴家法等^[43]在 25 份茅尾海红树林样品中发现 23 株放线菌的发酵液经乙酸乙酯萃取浓缩液对至少 1 种尖孢镰刀菌(*F. oxysporum*)的菌体和孢子萌发有抑制作用。张桂兴^[44]从海南东寨港红树林和三江红树林样品中得到的 1 株灰肉色链霉菌(*Streptomyces griseo-carneus*)和 1 株兰灰链霉菌(*Streptomyces cyaneogriseus*)均具有较强的抑制香蕉镰刀菌 4 号生理小种的活性。许敏等^[45]在广东湛江红树林植物中分离筛选出 3 株具有较强杀秀丽隐杆线虫活性的放线菌。魏华等^[46]从海南省东寨港红树林土壤样品中筛选出 1 株具有杀线虫活性的菌株,该菌株发酵液稀释 20 和 40 倍后分别对根结线虫的致死率达 70.5% 和 65.0%。目前针对红树林生境中的放线菌研究多集中于物种多样性和新种的发现,在应用方面主要偏向于筛选医用抗菌活性物质、抗生素残留追踪和土壤重金属修复等问题^[47-48],在植物病害防治中的研究应用相对较少,还有待后续更加深入的研究探索。

2.3 盐碱地放线菌在植物病害防治中的研究现状 土地生态环境恶化的表现之一是土壤盐碱化,全球盐碱地土壤面积约占耕地总面积的 20%~30%。目前全球一半左右的灌溉耕地正在遭受不同程度的次生盐碱化^[49]。与普通生境中的微生物相比,含盐量较高环境下的微生物经历自然选择后,会衍生出特殊的机能、生理机制、遗传基因和代谢产物以适应生存,这些特征在医药、农业、化学工业以及环境治理方面都具有潜在的应用价值^[50]。于洋^[51]从黑龙江省西部地区杜尔伯特蒙古自治县的盐碱地土壤中筛选得到 1 株具有耐盐碱能力和良好广谱抗菌活性的放线菌(2SGS2),对大豆菌核病

的病原真菌核盘菌 (*S. sclerotiorum*) 有很明显的防病效果。潘通^[52]在大庆不长植被的盐碱土壤中筛选得到 36 株放线菌,发现其可以抑制 1 种以上的植物病原真菌,其中 1 株放线菌 S7GS2 对水稻纹枯病 (*Rhizoctonia solani*)、大豆菌核病 (*S. sclerotiorum*)、大豆疫霉病 (*Phytophthora sojae*) 和辣椒疫霉病 (*P. capsici*) 的抑制率均在 80% 以上,抑制效果较好。王彦等^[53]在河西走廊敦煌地区的盐碱土壤中分离筛选出 1 株链霉菌属菌株 16-3-10,对黄瓜枯萎病病菌有良好的拮抗效果。牛世全等^[54-55]从河西走廊黑河流域盐碱土壤中分离得到 1 株球孢链霉菌 (*Streptomyces globisporus*) 对马铃薯干腐病菌 (*F. solani*) 表现出较强的抑制作用,其发酵液对马铃薯干腐病的防效为 65.45%;该团队还从敦煌地区盐碱土中分离筛选出 1 株对黄芩根腐病菌 (*F. oxysporum*) 具有生防作用的黄色长孢链霉菌 (*Streptomyces longisporoflavus*)。随着土壤盐碱化的不断加重,深入了解和研究这一生境中的微生物,不仅对维持该生境生态平衡有着重要作用,同时也可挖掘其在植物保护中的作用。

2.4 沙漠放线菌在植物病害防治中的研究现状 沙漠环境由沙滩或沙丘构成,受强烈蒸腾作用的影响,导致水分散发较快、盐度含量较高,植物分布较少^[56]。在干旱、高温和辐射等环境压力下,生命的生存受到大大限制,且进化出了特殊功能来适应这种特殊环境。在研究沙漠微生物群落的功能时发现,微生物与沙漠生态系统的碳氮元素循环、水土的保持等息息相关^[57-58]。杨子文^[59]从沙特阿拉伯沙漠中筛选出 5 株对于青枯病致病菌茄科雷尔氏菌 (*Ralstonia solanacearum*) 有着明显拮抗作用的放线菌。夏占峰^[60]对来自吐鲁番盆地和塔里木盆地沙漠的样品进行放线菌分离,通过抑菌筛选获得了 11 株对棉花黄萎病病原菌大丽轮枝菌 (*V. dahliae*) 和尖孢镰刀菌 (*F. oxysporum*) 具有较强抑制活性的放线菌。当前,对于沙漠中的放线菌研究主要集中在多样性分析、生态修复和活性代谢物分析等方面^[61-62],生防放线菌的研究还十分少见。沙漠生态系统是最大的陆地生态群落^[63],从该生境中挖掘植物病害生防放线菌具有很大的研究空间和前景。

2.5 其他特殊生境中的放线菌在植物病害防治中的研究现状 张文婷等^[64]用平板稀释法分离纯化来自广西、江苏、陕西等地的农化废口、排污管口、污水河等特殊生境的 5 份土壤样品中的放线菌,以西瓜枯萎菌 (*F. oxysporum* f. sp. *niveum*)、茄子黄萎菌 (*V. dahliae*)、棉花枯萎菌 (*F. oxysporum* f. sp. *vasinfectum*) 为供试病原菌,筛选出 5 株对西瓜枯萎菌和茄子黄萎菌均有明显拮抗作用的菌株。尹明远等^[65]从西藏低温地区采集的 16 份土样中分离获得 22 株放线菌,其中对小麦赤霉病 (*Fusarium graminearum*) 和青稞条纹病 (*Drechslera gramineum* (Rabenh.) Shoem) 有抑菌活性的放线菌分别有 6 株和 5 株,对粉番茄灰霉病 (*B. cinerea*) 和南瓜枯萎病 (*F. oxysporum*) 有拮抗活性的菌株均有 4 株。笔者在放射性元素含量较高的白云鄂博稀土矿区和重金属含量较高的兰坪铅锌尾矿区也分离筛选出了具有抑制根腐病病原菌的拮抗放线

菌菌株。

3 发展趋势及展望

美国国家科学院、工程院和医学院在 2019 年初联合发布了一份研究报告,指出应该更加重视微生物对农业生产的影响。植物病害的发生会严重影响农作物的产量和品质,随着水体污染、土壤微生态失衡和物种多样性减少等生态问题的不断加剧,如何在保证经济价值的同时,寻找开发高效、无毒的替代化学药品的生防制品以保护好人类赖以生存的自然环境是当前研究的主题和重点。然而,常规生境中的微生物资源被大量重复开发和利用,极大地影响了植物病害生防制品开发的进度。因此,迫切需要从研究相对较少的特殊生境中筛选出有效防治植物病害发生的放线菌。已有数据表明,从研究较少的特殊生境的微生物中获得了一些新型活性化合物。有研究者从北部湾海洋微生物中分离得到 110 个化合物,其中新结构化合物有 53 个,占总数的 48%,且具有抗肿瘤、抗菌、抗病毒、抗炎等多种生物活性^[66];2015—2019 年,从海洋微生物中分离出 89 种分属于 8 类结构的抗病毒化合物,其中 35 种具有抗 H1N1 活性^[67];陈川等^[68]从塔克拉玛干沙漠生境植物中分离得到拟诺卡菌属 (*Nocardiopsis*) 菌株,并从该菌株中首次分离到广谱抗生素——蔷薇霉素。

因此,未来应当加强特殊生境放线菌资源对植物病虫害的筛选研究,在今后的研究过程中,利用极端环境中的放线菌防治植物病虫害的研究还应解决如下问题:

(1) 寻找更广阔的放线菌来源途径。针对生防放线菌目前主要的来源是植物内部和土壤环境,少数来源于海洋、红树林生境和盐碱地。不同的环境会对放线菌的生理生化特性造成一定的影响,同时使其具有特殊的功能。未来可以在更多的极端环境(例如:高寒高海拔地区、干热河谷地区、高浓度重金属环境、稀土矿区等)中寻找防治植物病虫害的放线菌。

(2) 加强对特殊生境放线菌防治植物病虫害的机理研究。研究大多局限于放线菌对 1 个或多个病原菌的抑菌效果,缺乏对抑菌机制和抑菌物质更深层次的研究。只有掌握了其机理,了解其抑制病原菌或虫害的活性物质,才能更好地将其运用到生产实际。

(3) 大量开发放线菌剂产品。当前的大部分研究都仅限于实验室条件下,相比于外界环境来说,实验室环境更易设置和控制。在外界环境中,温度、光照、水分和其他生物因素都难以控制,其抑制作用也较难稳定发挥。因此,如何提高菌剂在大田中的防治效果还有待深入研究,大批量生产具有稳定功效的放线菌剂也将是未来的发展方向。

随着对特殊生境放线菌资源研究的不断深入,人类可以获得其抑菌活性物质并解密其抑菌机理,最终将其更好地运用到实际生产中,为农业植物病害的生物防治做出贡献。

参考文献

- [1] 赵其国,周生路,吴绍华,等.中国耕地资源变化及其可持续利用与保护对策[J].土壤学报,2006,43(4):662-672.
- [2] 何文寿.设施农业中存在的土壤障碍及其对策研究进展[J].土壤,2004,

- 36(3):235-242.
- [3] SAVARY S, WILLOQUET L, PETHYBRIDGE S J, et al. The global burden of pathogens and pests on major food crops [J]. *Nature ecology & evolution*, 2019, 3(3):430-439.
- [4] 李振岐. 我国小麦品种抗条锈性丧失原因及其控制策略 [J]. *大自然探索*, 1998, 17(4):21-24.
- [5] UPAMANYA G K, BHATTACHARYA A, DUTTA P. Consortia of entomopathogenic fungi and bio-control agents improve the agro-ecological conditions for brinjal cultivation of Assam [J]. *3 Biotech*, 2020, 10(10):14-19.
- [6] ROSTAMINIA M, HABIBI D, SHAHBAZI S, et al. Effect of different species of *Pseudomonas* and *Trichoderma* on several morpho-physiological traits of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) [J]. *Acta physiologiae plantarum*, 2021, 43(1):1-8.
- [7] 徐超民, 王加亭, 李霜, 等. 绿僵菌在不同类型草原防治蝗虫的效果分析 [J]. *中国生物防治学报*, 2021, 37(5):946-955.
- [8] 刘晓飞, 侯艳, 马京求, 等. 放线菌的筛选及应用研究进展 [J]. *饲料研究*, 2020, 43(3):140-143.
- [9] 崔佳佳, 张雪洪. 微生物原农用抗生素的研发与高产策略 [J]. *生物工程学报*, 2021, 37(3):1032-1041.
- [10] 邱德文. 我国植物病害生物防治的现状与发展策略 [J]. *植物保护*, 2010, 36(4):15-18, 35.
- [11] MASSART S, JIJAKLI H M. Use of molecular techniques to elucidate the mechanisms of action of fungal biocontrol agents: A review [J]. *Journal of microbiological methods*, 2007, 69(2):229-241.
- [12] 姜钰, 董怀玉, 徐秀德, 等. 放线菌在植病生防中的研究进展 [J]. *杂粮作物*, 2005, 25(5):329-331.
- [13] AWLA H K, KADIR J, OTHMAN R, et al. Plant growth-promoting abilities and biocontrol efficacy of *Streptomyces* sp. UPMRS4 against *Pyricularia oryzae* [J]. *Biological control*, 2017, 112:55-63.
- [14] CHEN Y F, ZHOU D B, QI D F, et al. Growth promotion and disease suppression ability of a *Streptomyces* sp. CB-75 from banana rhizosphere soil [J]. *Frontiers in microbiology*, 2018, 8:1-18.
- [15] LAW J W F, SER H L, KHAN T M, et al. The potential of *Streptomyces* as biocontrol agents against the rice blast fungus, *Magnaporthe oryzae* (*Pyricularia oryzae*) [J]. *Frontiers in microbiology*, 2017, 8:1-10.
- [16] 薛磊, 薛宏宏, 赵娟, 等. 大丽轮枝菌菌体对链霉菌胞外蛋白酶活性及抑菌效果的影响 [J]. *棉花学报*, 2012, 24(1):78-84.
- [17] 马冠华, 杨镜祯, 易龙, 等. 柑橘溃疡病拮抗放线菌筛选及其抑菌机理研究 [J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(30):10547-10549, 10589.
- [18] 蒋细良, 谢德龄, 倪楚芳, 等. 中生菌素的抗生作用 [J]. *植物病理学报*, 1997, 27(2):133-138.
- [19] TOLBA S, EGAN S, KALLIFIDAS D, et al. Distribution of streptomycin resistance and biosynthesis genes in streptomycetes recovered from different soil sites [J]. *FEMS microbiology ecology*, 2002, 42(2):269-276.
- [20] 吴元华, 文才艺, 朱春玉, 等. 农抗 TS99 对烟草赤星病菌作用的研究 [J]. *中国烟草学报*, 2004, 10(4):20-22, 35.
- [21] LAZZERI L, BARUZZI G, MALAGUTI L, et al. Replacing methyl bromide in annual strawberry production with glucosinolate-containing green manure crops [J]. *Pest management science*, 2003, 59(9):983-990.
- [22] 乔宏萍, 宗兆锋. 重寄生放线菌 F46 和 PR 对灰葡萄孢的抑制作用 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(11):23-26.
- [23] EL-TARABILY K A, SIVASITHAMPARAM K. Non-streptomycete actinomycetes as biocontrol agents of soil-borne fungal plant pathogens and as plant growth promoters [J]. *Soil biology and biochemistry*, 2006, 38(7):1505-1520.
- [24] BENSON D R, SILVESTER W B. Biology of *Frankia* strains, actinomycete symbionts of actinorhizal plants. [J]. *Microbiological reviews*, 1993, 57(2):293-319.
- [25] TOKALA R K, STRAP J L, JUNG C M, et al. Novel plant-microbe rhizosphere interaction involving *Streptomyces lydicus* WYEC108 and the pea plant (*Pisum sativum*) [J]. *Applied and environmental microbiology*, 2002, 68(5):2161-2171.
- [26] HAMDALI H, HAFIDI M, VIROLLE M J, et al. Growth promotion and protection against damping-off of wheat by two rock phosphate solubilizing actinomycetes in a P-deficient soil under greenhouse conditions [J]. *Applied soil ecology*, 2008, 40(3):510-517.
- [27] DE OLIVEIRA M F, DA SILVA M G, VAN DER SAND S T. Anti-phytopathogen potential of endophytic actinobacteria isolated from tomato plants (*Lycopersicon esculentum*) in southern Brazil, and characterization of *Streptomyces* sp. R18(6), a potential biocontrol agent [J]. *Research in microbiology*, 2010, 161(7):565-572.
- [28] 唐永红, 曹庸, 卢成瑛, 等. 特殊生境微生物及其活性代谢产物研究进展 [J]. *微生物学通报*, 2006, 33(4):163-166.
- [29] 车裕斌, 韩北华. 特殊生境研究综述 [J]. *咸宁师专学报*, 1997, 17(3):72-73.
- [30] 邵全琴, 马巍巍, 贾晓峰. 我国海洋国土资源现状分析 [C]//倪绍祥, 刘彦随, 杨子生. *中国土地资源态势与持续利用研究*. 昆明: 云南科技出版社, 2004.
- [31] 高凌云. 科学家发现吞噬海洋塑料垃圾的微生物 [J]. *现代物理知识*, 2019, 31(4):36.
- [32] 王聪, 雷福厚, 谭学才, 等. 海洋拟诺卡菌来源的天然产物 [J]. *中国抗生素杂志*, 2019, 44(7):763-769.
- [33] 冯维维. 视紫红质让海洋细菌成为捕光“能手” [N]. *中国科学报*, 2019-08-13(007).
- [34] 王聪, 王坤, 姜明国, 等. 广西北部湾放线菌的分离筛选及活性产物的鉴定 [J]. *天然产物研究与开发*, 2019, 31(7):1170-1176.
- [35] 鹿连明, 蒲占潜, 胡秀荣, 等. 海洋放线菌 A3202 发酵液对柑橘绿霉病菌的抑制活性测定 [J]. *浙江柑橘*, 2018, 35(3):11-14.
- [36] 马桂珍, 暴增海, 夏振强, 等. 海洋放线菌对几种蔬菜病原菌抗菌作用的测定 [J]. *作物杂志*, 2009(5):35-38.
- [37] 闫建芳, 刘秋, 赵柏霞, 等. 番茄溃疡病生防菌 YH23 的发酵条件优化及菌种鉴定 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2019, 50(5):608-613.
- [38] 肖珂, 周双清, 许云, 等. 海绵共附生放线菌的分离鉴定与抑菌活性分析 [J]. *热带生物学报*, 2020, 11(2):156-162.
- [39] 张乔民, 张叶春. 华南红树林海岸生物地貌过程研究 [J]. *第四纪研究*, 1997(4):344-353.
- [40] 徐静. 红树林微生物天然产物化学研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2015:25-182.
- [41] 杨凯琳, 程文胜, 侯峰, 等. 海洋微生物次级代谢产物及其抑菌活性研究进展 [J]. *中国海洋药物*, 2013, 32(3):71-81.
- [42] 李小群, 于清武, 易湘西, 等. 广西北仑河口红树林底泥放线菌多样性及其拮抗甘蔗黑粉菌活性分析 [J]. *南方农业学报*, 2018, 49(4):708-713.
- [43] 吴家法, 吴思婷, 李智鸣, 等. 茅尾海红树林土壤可培养放线菌多样性及其拮抗孢囊菌活性分析 [J]. *中国抗生素杂志*, 2017, 42(4):294-301.
- [44] 张桂兴. 抗香蕉枯萎病放线菌的筛选及菌株 Da03047、Da04010 的分类鉴定 [D]. 儋州: 华南热带农业大学, 2007:28-35.
- [45] 许敏, 李静, 戴素娟, 等. 广东湛江红树林植物内生放线菌资源勘探及生物活性研究 [J]. *中国抗生素杂志*, 2016, 41(1):26-34.
- [46] 魏华, 刘敏, 鲍时翔, 等. 1株抗根结线虫红树林放线菌的筛选与鉴定 [J]. *微生物学杂志*, 2012, 32(4):13-16.
- [47] ABIDIN Z A Z, CHOWDHURY A J K, MALEK N A, et al. Diversity, antimicrobial capabilities, and biosynthetic potential of mangrove actinomycetes from coastal waters in Pahang, Malaysia [J]. *Journal of coastal research*, 2018, 82:174-179.
- [48] SANGKANU S, RUKACHAISIRIKUL V, SURIYACHADKUN C, et al. Evaluation of antibacterial potential of mangrove sediment-derived actinomycetes [J]. *Microbial pathogenesis*, 2017, 112:303-312.
- [49] 杜滢鑫, 谢宝明, 蔡洪生, 等. 大庆盐碱地九种植物根际土壤微生物群落结构及功能多样性 [J]. *生态学报*, 2016, 36(3):740-747.
- [50] 李凤霞, 郭永忠, 许兴. 盐碱地土壤微生物生态特征研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(23):14065-14067, 14174.
- [51] 于洋. 两株盐碱地土壤链霉菌的鉴定及防病促生功能的研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018:18-23.
- [52] 潘通. 大庆盐碱地放线菌筛选、抑菌活性初步探究及新种鉴定 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017:26-38.
- [53] 王彦, 牛世全, 郑豆豆, 等. 黄瓜枯萎病拮抗放线菌的筛选、鉴定及发酵条件优化 [J]. *微生物学通报*, 2019, 46(5):1062-1073.
- [54] 牛世全, 李渭娟, 李海云, 等. 河西走廊盐碱土壤中抗马铃薯干腐病放线菌的筛选鉴定 [J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(2):94-98.
- [55] 牛世全, 赵丹, 豆建涛, 等. 敦煌盐碱土中抗黄芪根腐病放线菌的筛选、鉴定及发酵条件优化 [J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(3):71-76.
- [56] WALKER I J, DAVIDSON-ARNOTT R G D, BAUER B O, et al. Scale-dependent perspectives on the geomorphology and evolution of beach-dune systems [J]. *Earth-science reviews*, 2017, 171:220-253.
- [57] POINTING S B, BELNAP J. Microbial colonization and controls in dryland systems [J]. *Nature reviews microbiology*, 2012, 10(8):551-562.

- [3] 邓留坤,董滢.中草药添加剂在动物生产中的应用[J].畜牧与饲料科学,2013,34(Z1):50-53.
- [4] 刘肖,周才琼.大蒜含硫化合物及在加工中的变化机理研究进展[J].食品与发酵工业,2019,45(5):282-288.
- [5] 余松筠.大蒜及其提取物在食品加工中的应用研究进展[J].江苏调味品副食品,2019,36(1):3-6.
- [6] ANDUALEM B. Combined antibacterial activity of stingless bee (*Apis mellipodae*) honey and garlic (*Allium sativum*) extracts against standard and clinical pathogenic bacteria[J]. Asian Pacific journal of tropical biomedicine, 2013, 3(9): 725-731.
- [7] 商春峰,周一冉,付彤.大蒜中蒜氨酸及大蒜素检测方法研究进展[J].现代食品,2018(10):36-39.
- [8] 陈帅,高彦祥.肉桂醛的调味、保鲜及稳态化研究进展[J].中国调味品,2019,44(2):156-159,167.
- [9] 侯小涛,郝二伟,秦健峰,等.肉桂的化学成分、药理作用及质量标志物(Q-marker)的预测分析[J].中草药,2018,49(1):20-34.
- [10] 孙罗美,邹胜龙.肉桂醛的研究与应用[J].广东饲料,2012,21(12):29-32.
- [11] 刘琳琪,赵晨曦,李菁凤,等.桂皮活性成分的微波萃取工艺与抗氧化作用[J].现代食品科技,2017,33(11):127-133,271.
- [12] 林红强,周柏松,谭静,等.肉桂的化学成分、药理活性及临床应用研究进展[J].特产研究,2018,40(2):65-69.
- [13] 张伟,付朝晖,刘公言,等.大蒜及其副产物的主要功效以及在动物生产中的应用[J].饲料研究,2019,42(1):126-128.
- [14] 符林瑜,林景,徐博寰.大蒜素体外抗白念珠菌生物膜作用的实验研究[J].山西医科大学学报,2019,50(4):456-460.
- [15] 杨斌,付刚果,谭艳,等.大蒜制剂在兽医临床上的应用[J].中兽医学杂志,2018(3):44-45.
- [16] 肖家顺.大蒜素/陈皮复方制剂对草鱼生长及免疫性能的影响[D].福州:福建农林大学,2010.
- [17] 余拓,叶蔚娴,王娟.肉桂提取液的抗菌效果研究及肉桂洗洁精开发[J].日用化学工业,2018,48(1):42-46.
- [18] 王帆,杨静东,王春梅,等.肉桂醛对大肠杆菌和绿脓杆菌的作用机制[J].江苏农业学报,2011,27(4):888-892.
- [19] XING F G, HUA H J, SELVARAJ J N, et al. Growth inhibition and morphological alterations of *Fusarium verticillioides* by cinnamon oil and cinnamaldehyde[J]. Food control, 2014, 46: 343-350.
- [20] 卢杨柳.肉桂醛对食源性致病菌的抑制动力学模型及其作用机制[D].郑州:河南农业大学,2016.
- [21] 康昌源,王庆奎,王静波,等.肉桂醛脂质体对3种水产动物致病菌抑菌效果比较[J].江苏农业科学,2018,46(18):176-178.
- [22] 张耀武,郑建武.大蒜素和杜仲复合添加剂对鲤鱼生长性能和肌肉品质的影响[J].科学养鱼,2010(2):65-67.
- [23] 白建.日粮添加大蒜粉对蛋鸡产蛋性能的影响[J].畜牧与兽医,2018,50(7):33-36.
- [24] 杨丽.大蒜素在罗非鱼鱼苗培育中的应用试验[J].河北渔业,2009(7):36-37.
- [25] 向泉,刘长志,周兴华.大蒜素对淡水白鲢生长影响的研究[J].水产科技情报,2002,29(5):222-225.
- [26] 汪先进,袁星,翟哲,等.饲料添加剂对卵形鲳鲹肌肉品质的影响[J].水产科技情报,2016,43(4):185-189,194.
- [27] TIHONEN K, KETTUNEN H, BENTO H M L, et al. The effect of feeding essential oils on broiler performance and gut microbiota[J]. British poultry science, 2010, 51(3): 381-392.
- [28] 王文利,张玉仙,曹靖,等.不同浓度的大蒜素对蛋鸡血液抗氧化能力和性激素水平的影响[J].中国兽医杂志,2018,54(12):102-105.
- [29] 周明,吴东,王孟春,等.肉桂醛替代肉用仔鸡日粮中抗生素的使用效果[J].中国农业大学学报,2019,24(4):94-101.
- [30] 高红梅,王明学.大蒜素及其在水产健康养殖中的应用[J].饲料工业,2004,25(10):55-57.
- [31] LEE S H, LILLEHOJ H S, JANG S I, et al. Effects of dietary supplementation with phytonutrients on vaccine-stimulated immunity against infection with *Eimeria tenella*[J]. Veterinary parasitology, 2011, 181(2/3/4): 97-105.
- [32] 刘稳.四种香精对黄颡鱼幼鱼的诱食、生长及NPY基因表达量的影响[D].武汉:武汉轻工大学,2017.
- [33] 胡晖.新型饲料添加剂大蒜素的应用研究[J].江西饲料,2009(6):20-22.
- [34] 许国焯,丁庆秋,王燕.几种诱食剂对大口鲶摄食效果的影响[J].水利渔业,2000,21(2):40-41.

(上接第4页)

- [58] REDDY B V B, KALLIFIDAS D, KIM J H, et al. Natural product biosynthetic gene diversity in geographically distinct soil microbiomes[J]. Applied & environmental microbiology, 2012, 78(10): 3744-3752.
- [59] 杨子文.沙特阿拉伯沙漠可培养放线菌多样性及抗菌活性的研究[D].广州:中山大学,2018:36-39.
- [60] 夏占峰.新疆极端环境放线菌多相分类及抑菌活性物质研究[D].武汉:华中农业大学,2015:74-90.
- [61] 李靖宇,张肖冲,陈韵,等.腾格里沙漠东南缘藻结皮与藓结皮放线菌多样性及其潜在代谢功能[J].生态学报,2020,40(5):1590-1601.
- [62] 李亚美,布合力其汗·白克力,鲍洁,等.西藏仲巴五彩沙漠放线菌资源勘探及生物活性筛选[J].微生物学通报,2018,45(8):1651-1660.
- [63] 杨昊天,王增如,贾荣亮.腾格里沙漠东南缘荒漠草地不同群落类型土壤有机碳分布及储量特征[J].植物生态学报,2018,42(3):288-296.
- [64] 张文婷,张秋丽,冀媛媛,等.特殊生境中植物枯、黄萎病拮抗放线菌的筛选及鉴定[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(9):187-192.
- [65] 尹明远,何建清,张格杰.西藏低温放线菌的多样性及其生物活性[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(6):221-227,234.
- [66] 徐新亚,杨宏,宁小清,等.北部湾海洋微生物物种多样性与化学多样性研究进展[J].广西科学,2020,27(5):433-450,461.
- [67] TENG Y F, XU L, WEI M Y, et al. Recent progresses in marine microbial-derived antiviral natural products[J]. Archives of pharmaceutical research, 2020, 43(12): 1215-1229.
- [68] 陈川,刘佳萌,蒋忠科,等.塔克拉玛干沙漠植物来源放线菌抗铜绿假单胞菌活性的筛选及菌株38-7L-1活性产物的研究[J].中国抗生素杂志,2015,40(2):81-87,115.