

苏代发,代庆忠,严聪文,等. 草莓根腐病及其生物防治研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(24):16–26.

doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2022.24.003

草莓根腐病及其生物防治研究进展

苏代发¹, 代庆忠¹, 严聪文¹, 张振荣², 董琼娥², 田云霞², 周文星², 陈杉艳², 杨俊誉¹, 童江云², 崔晓龙¹

(1. 云南大学生命科学学院, 云南昆明 650091; 2. 昆明市农业科学研究院, 云南昆明 650034)

摘要:随着草莓栽培面积及范围的不断扩大,各类病害接踵而来,草莓根腐病作为草莓种植业中的重要真菌性病害,在草莓种植区均有不同程度地发生。为明确国内外引发草莓根腐病的病原菌多样性及其分类学地位,对全球引起草莓根腐病的病原菌进行了统计与分析;综述了田间症状、组织分离法和分子生物学检测(主要有常规 PCR、巢式 PCR、多重 PCR 和实时定量 PCR)等的草莓根腐病病原菌检测方式。在此基础上,对当前用于生物防治的拮抗微生物、生物防治剂/杀菌剂和植物源提取物进行了论述。以期为研究人员在草莓根腐病的病原菌分离、科赫法则验证、分类鉴定及生防菌的分离与筛选提供理论依据。

关键词:草莓;根腐病;病原菌;生防菌;生物防治

中图分类号:S436.68⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2022)24–0016–10

草莓(strawberry)属于蔷薇科(Rosaceae)草莓属(*Fragaria*)多年生宿根性草本植物,在园艺学属于浆果类果树,其果肉鲜美、富含多种维生素 C,素有“水果皇后”之称,是一种重要的经济作物^[1–2]。草莓栽培因其具有结果早、周期短、见效快等优点,作为一种高收益的果树而在全球广泛种植^[3]。根据联合国粮食及农业组织(FAO)统计,全球草莓种植面积与产量逐年增加,而我国作为世界主要草莓生产国,自 1994 年以来,我国大陆草莓产量一直稳居世界第一(<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>)。随着草莓产业的迅速发展、栽培面积的扩大和土地多年连作,导致草莓病害频发,严重制约草莓产业的健康发展^[4]。草莓根腐病是草莓根部重要病害,在多年种植草莓的重茬地块上病症尤为突出,具有发病广、危害重的特点,表现出叶片发黄、变褐、坏死、卷缩、萎焉以及黄枯干死的现象,严重时可导致整个草莓园区绝产;草莓根腐病在世界草莓主产区均有发生,国内外均有草莓根腐

病发生的报道^[5]。目前,已报道的草莓根腐病的病原菌达 20 多种^[4],主要有镰刀菌属(*Fusarium*)、炭疽菌属(*Colletotrichum*)、丝核菌属(*Rhizoctonia*)、柱孢菌属(*Cylindrocarpon*)和拟盘多毛孢属(*Pestalotiopsis*)等真菌^[6]。草莓根腐病的防治包括农业防治、化学防治及生物防治等,在实际草莓生产过程中,化学防治仍为草莓根腐病的主要防治方式;虽然化学防治具有见效快等优点,但仍然存在农残超标等问题会对人体健康造成危害^[7]。随着生态农业、绿色农业及可持续农业的发展,各国对农药残留问题都进行严格把关和控制,化学防治与当前提倡的绿色农业相悖;生物防治因具有防治效果好、无污染、成本低、可持续发展等优点而备受研究者关注^[8]。本文对草莓根腐病病原菌的种类与分类、分子检测及生物防治进行综述,以期为草莓根腐病研究提供理论依据。

1 草莓根腐病概述

1.1 草莓根腐病分类

草莓感染了根腐病病原菌后,整个植株生长势明显减弱。根据草莓根部感染后呈现的症状,可以分为草莓根腐病(strawberry root rot)、草莓白根腐病(strawberry dematophora crown root rot)、草莓鞋带冠根腐病(strawberry armillaria crown and root rot)、草莓红心根腐病(red core root rot)、草莓红中柱根腐病(red stele root rot)和草莓黑根腐(strawberry black root rot)等^[4,9–10],不同文献中关于根腐病的描述

收稿日期:2022–01–06

基金项目:国家自然科学基金(编号:31960220,31660089);农业资源环境关键技术研发及推广应用项目(编号:昆财农[2021]1号文件)。

作者简介:苏代发(1994—),男,云南南涧人,博士研究生,从事草莓微生物生态学研究。E-mail:daifasu@mail.ynu.edu.cn。

通信作者:童江云,农业技术推广研究员,从事植物营养与土壤肥料技术推广研究,E-mail:tjy671207@126.com;崔晓龙,博士,研究员,从事微生物生态学与系统学研究,E-mail:xlcul@ynu.edu.cn。

不同。

1.2 国内外草莓根腐病病原菌

目前已报道的草莓根腐病的病原菌达 20 多种^[4],但鲜见引起该病害的具体病原菌的相关报道。本文以“草莓根腐病”为关键词,从中文数据库中国知网、万方、维普、英文数据库 Web of Science 进行搜索,归纳整理关于草莓根腐病病原菌的相关文献并结合美国植物病理学会(The American Phytopathological Society,简称 APS)关于草莓根腐病病原菌的记录(<https://www.apsnet.org/edcenter/resources/commonnames/Pages/Strawberry.aspx>)以及旗下期刊 Plant Disease 对草莓根腐病病原菌的相关报道,总结出当前以草莓为宿主且能导致草莓根腐病的病原菌共有 49 个种,属于 27 个属(表 1)。

随着我国草莓种植面积逐年增加,加之连作及重茬,草莓根腐病在国内也有报道^[38]。通过对国内报道草莓根腐病的文献进行整理本文总结出引起国内草莓根腐病的病原菌有 30 种、18 属(表 1),可知文献中导致我国草莓根腐病的病原菌镰刀菌属菌种类型较多。

根据最新文献,部分病原菌分类已做调整,将 *Pestalotiopsis clavispora* 重新命名为 *Neopestalotiopsis clavispora*,即 *N. clavispora* \equiv *P. clavispora* \equiv *Pestalotia clavispora*^[39-40],其中 *N. clavispora* 现已被接受并广泛使用。根据 MycoBank 数据库(<https://www.mycobank.org/page/Basic%20names%20search>)记录, *Pythium helicoides* 现已更名为 *Phytopyrium helicoides*。Walker 等研究表明, *Gnomoniopsis fructicola* \equiv *Gnomonia fragariae* \equiv *Gnomonia fructicola*^[41]。Sogonov 等研究表明, *G. fructicola* \equiv *G. fructicola*^[42],而 Senanayake 等研究表明, *Paragnomonium fragariae* \equiv *G. fragariae*^[43-44]。Moročko - Bičevska 等在前人的基础上对 *P. fragariae* 进行了重新阐述^[30];根据 MycoBank 和 Index Fungorum 数据库(<http://www.speciesfungorum.org/Names/SynSpecies.asp?RecordID=552724>)记录, *P. fragariae* 为现行使用名, *G. fructicola*、*G. fragariae* 和 *G. fructicola* 均为 *P. fragariae* 的同种异名(synonyms)。

双核 *Rhizoctonia fragariae* 和多核 *Rhizoctonia solani* 均能导致草莓黑根腐病发生^[45],根据菌丝融合试验(hyphal anastomosis reactions),可以将双核丝

核菌(BNR)分为 19 个菌丝融合群(anastomosis groups)(融合群 AG - A 到 AG - S,现已将 AG - T 归入 AG - A, AG - U 归入到 AG - P),MNR 分为 13 个(融合群 AG - 1 到 AG - 13)菌丝融合群^[46-48]。根据当前的报道,BNR 融合群中的 AG - A、AG - B(o)、AG - C、AG - F、AG - G、AG - I 和 AG - K 均能导致草莓根腐病,部分文献对草莓根腐病的病原菌未进行确切描述,将其统称为 *Rhizoctonia fragariae*;MNR 融合群中的 AG - 2 - 1、AG - 4、AG - 5 和 AG - 6 均能导致草莓根腐病,同时部分文献对草莓根腐病的病原菌未进行确切描述,只是将其统称为 *Rhizoctonia solani*^[46-50]。

1.3 草莓根腐病病原菌的检测

根据相关文献报道,草莓根腐病的检测/鉴定方法可以归为根据田间症状进行鉴定、组织分离法检测与鉴定、分子生物学检测^[36,51-52]。虽然文献中关于植病的检测技术还包括电子显微镜检测与免疫学检测技术,但未见单独或专门将电子显微镜检测应用于草莓根腐病的检测与鉴定的报道,而关于免疫学检测技术仅见于 1988 年 Amouzou - Alladaye 等将其应用于检测 *Phytophthora fragariae*^[53-54],故本文将不展开关于电子显微镜检测与免疫学检测技术的论述。

1.3.1 田间症状 草莓感染了根腐病菌后,根据其在草莓根部呈现的症状,可以将草莓根腐病分为草莓根腐病、草莓白根腐病、草莓鞋带冠根腐病、草莓红心根腐病、草莓红中柱根腐病和草莓黑根腐^[4,9-10]。草莓根腐病整体上表现为草莓植株整株枯萎死亡。草莓红心/中柱根腐病的主要症状为草莓苗下部叶片变为紫褐色,新叶黄化、早衰,植株矮化、枯萎至死亡,根部须根呈现褐变腐烂,最终致主根变褐、萎缩,切开根基部可看到中柱呈现暗红色^[9,55-58]。草莓黑根腐病的主要症状为草莓苗矮小,生长缓慢,须根数量减少,多表现为黑褐色腐烂,根茎横切面维管束褐变、坏死,最终导致整株枯萎死亡^[9,56]。根据草莓植株田间症状来判断,对相关人员的知识储备和专业技能要求较高,加之患病植株后期整体症状较为类似,难免出现错判与误判,一般人员难以掌握,且准确性难以保证。

1.3.2 组织分离方法 根据病原菌对不同物质的需求,选择相应培养基对病原菌进行分离与培养,通过观察菌落形态、颜色、气生菌丝状态及显微形态等表征对病原菌进行鉴定^[36,52,57]。该方法虽然

表 1 全球草莓根腐病原菌分类及根腐病类型

属	种	根腐病类型
链格孢属(<i>Alternaria</i>)	交链格孢(<i>A. alternata</i>) *	根腐病 ^[11]
密环菌属(<i>Armillaria</i>)	高卢密环菌(<i>A. gallica</i>)	密环根腐病 ^[12]
	密环菌(<i>A. mellea</i>) *	鞋带冠根腐病 ^[13-14]
生赤壳属(<i>Bionectria</i>)	淡色生赤壳菌(<i>B. ochroleuca</i>)	根腐病 ^[15]
葡萄座腔菌属(<i>Botryosphaeria</i>)	落叶松葡萄座腔菌(<i>B. laricina</i>) *	根腐病 ^[16]
毛壳菌属(<i>Chaetomium</i>)	金色毛壳菌(<i>C. aureum</i>) *	根腐病 ^[15]
	巴西毛壳菌(<i>C. brasiliense</i>) *	根腐病 ^[15]
	球毛壳菌(<i>C. globosum</i>) *	根冠腐病 ^[17]
刺盘孢属(<i>Colletotrichum</i>)	胶孢炭疽菌(<i>C. gloeosporioides</i>) *	根腐病 ^[15]
	暹罗刺盘孢菌(<i>C. siamense</i>) *	根冠腐病 ^[18]
盾壳霉属(<i>Coniothyrium</i>)	<i>C. fragariae</i>	黑根腐病 ^[6]
	伏克盾壳霉(<i>C. fuckelii</i>)	黑根腐病 ^[19]
弯孢菌属(<i>Curvularia</i>)	新月弯孢菌(<i>C. lunata</i>)	根腐病 ^[20]
<i>Dactyloectria</i>	<i>D. alcacerensis</i> *	黑根腐病 ^[21]
	<i>D. torresensis</i> *	黑根腐病 ^[22]
镰刀菌属(<i>Fusarium</i>)	锐顶镰刀菌(<i>F. acuminatum</i>) *	根腐病 ^[23]
	木贼镰刀菌(<i>F. equiseti</i>) *	根腐病 ^[23]
	变红镰刀菌(<i>F. incarnatum</i>)	根腐病 ^[23]
	尖孢镰刀菌(<i>F. oxysporum</i>) *	根腐病 ^[23]
	茄病镰刀菌(<i>F. solani</i>) *	根腐病 ^[23]
	三线镰刀菌(<i>F. tricinctum</i>) *	根腐病 ^[15]
<i>Hainesia</i>	绒边胶盘孢菌(<i>H. lythri</i>)	黑根腐病 ^[6]
花顶孢属(<i>Idriella</i>)	<i>I. lunata</i>	根腐病 ^[6]
土赤壳属(<i>Ilyonectria</i>)	大双孢土赤壳菌(<i>I. macrodidyma</i>) *	根冠腐病 ^[24]
	<i>I. novozelandica</i> *	根腐病 ^[25]
壳孢属(<i>Macrophomina</i>)	菜豆壳孢菌(<i>M. phaseolina</i>)	根腐病 ^[26]
<i>Neofusicoccum</i>	<i>N. kwambonambiense</i> *	根腐病 ^[27]
<i>Neonectria</i>	<i>N. radicola</i> *	根腐病 ^[15]
新拟盘多毛孢属(<i>Neopestalotiopsis</i>)	棒状拟盘多毛孢菌(<i>N. clavispora</i>) *	根冠腐病 ^[28]
	<i>N. rosae</i> *	根腐病、冠腐病和叶斑 ^[29]
<i>Paragonomia</i>	<i>fragariae</i>	根腐病 ^[30]
茎点霉属(<i>Phoma</i>)	短小茎点霉菌(<i>P. exigua</i>)	根冠病 ^[31]
	<i>P. terrestris</i>	灰败根腐病 ^[6]
疫霉属(<i>Phytophthora</i>)	<i>P. bisheria</i>	根腐病 ^[32]
	恶疫霉(<i>P. cactorum</i>) *	疫霉根冠腐病 ^[33]
	柑橘生疫霉(<i>P. citricola</i>)	疫霉根冠腐病 ^[6]
	柑橘褐腐疫霉(<i>P. citrophthora</i>)	疫霉根冠腐病 ^[6]
	<i>P. cyptogera</i>	根腐病 ^[6]
	草莓疫霉(<i>P. fragariae</i>) *	红心/红中柱根腐病 ^[34]
	大雄疫霉(<i>P. megasperma</i>)	疫霉根冠腐病 ^[APS]
	烟草疫霉(<i>P. nicotianae</i>)	疫霉根冠腐病 ^[6]
疫腐霉属(<i>Phytopythium</i>)	旋柄腐霉(<i>P. helicoides</i>) *	根冠腐病 ^[35]
小不整球壳属(<i>Plectosphaerella</i>)	黄瓜织球壳菌(<i>P. cucumerina</i>) *	根腐病 ^[15]
腐霉属(<i>Pythium</i>)	林栖腐霉(<i>P. sylvaticum</i>) *	根腐病 ^[15]
	终极腐霉(<i>P. ultimum</i>) *	黑根腐病 ^[36]
丝核菌属(<i>Rhizoctonia</i>)	草莓花枯病菌(<i>R. fragariae</i>) *	黑根腐病 ^[6]
	立枯丝核菌(<i>R. solani</i>) *	黑根腐病 ^[37]
座坚壳属(<i>Rosellinia</i>)	褐座坚壳菌(<i>R. necatrix</i>)	白根腐病 ^[6]
葡萄穗霉属(<i>Stachybotrys</i>)	黑葡萄穗霉(<i>S. chartarum</i>) *	根腐病 ^[15]
轮枝菌属(<i>Verticillium</i>)	未命名 *	根腐病 ^[15]

注:表中病原菌均为以草莓为宿主且能导致草莓根腐病发生的病原菌; * 表示国内已报道的草莓根腐病原菌。

能检测出活菌数量,但病原菌需要时间进行分离与培养,无法应用于现场的快速、准确鉴定^[36]。就目前关于草莓根腐病的研究,主要是基于组织分离法得到病原菌的纯培养物,结合菌落形态、显微形态和分子检测技术,以确定病原菌最终的分类地位。组织分离法虽然耗时、耗力,但是在病原菌研究方面有着不可替代的作用。

1.3.3 分子生物学检测技术 根据田间症状或组织分离法对草莓根腐病病原菌进行检测与鉴定,无法满足当下对病原菌快速、准确检测的需求,分子生物学检测技术应运而生。分子检测技术种类繁多,当前关于草莓根腐病病原菌的分子生物学检测以基于聚合酶链式反应 (PCR) 扩增为主,包括常规 PCR (conventional PCR)、巢式 PCR (nested PCR)、多重 PCR (multiplex PCR) 和实时定量 PCR (quantitative real-time PCR, 简称 qPCR) 等^[59-60]。

1.3.3.1 常规 PCR PCR 检测技术作为一种快速、高效的方法,在草莓根腐病检测中被广泛使用^[36]。目前,关于草莓根腐病病原菌的分子鉴定主要都是基于 ITS 通用引物和特异性引物进行常规 PCR 扩增与产物测序,并经数据库比对后确定其分类地位。考虑到在口岸等地区,对于检疫过程要求快速、准确,常规 PCR 扩增无法满足其需求,新的检测技术应运而生。

1.3.3.2 巢式 PCR 一种变异的 PCR,使用 2 对 PCR 引物扩增完整的片段:第 1 对 PCR 引物扩增片段和普通 PCR 相似;第 2 对引物称为巢式引物,其结合在第 1 次 PCR 产物内部,使得第 2 次 PCR 扩增片段短于第 1 次扩增^[61]。Lacourt 等构建了用于检测 *P. fragariae* 和 *P. cactorum* 的巢式 PCR 体系,该体系灵敏度高,可用于草莓植株中 2 种病原菌的检测^[62]。Bonants 等通过巢式 PCR、PCR-ELISA 和实时定量 PCR [TaqMan 和分子信标 (molecular beacon) 探针] 方法检测了草莓植株中的病原真菌 *P. fragariae*^[63-65]。Hughes 等构建了 1 组用于检测 *P. fragariae* 的巢式 PCR 体系,并进行了比较分析,结果表明所设计的 3 组 PCR 引物表现相当^[66]。Bhat 等构建了用于特异性检测 *Phytophthora cactorum* 的巢式 PCR 体系:首先用通用引物 ITS1/ITS4 进行第 1 轮扩增,然后用特异性引物 BPhycacL87FRG/BPhycacR87RRG 和 BPhycacL89FRG/BPhycacR176RRG 进行第 2 轮扩增,该体系能检测出草莓根、冠及叶柄中的病原菌^[67]。

1.3.3.3 多重 PCR 多重 PCR 检测技术是在同一 PCR 反应体系中加入 2 对及以上引物,同时扩增出多个核酸片段的 PCR 反应,其基本原理与常规 PCR 相同,在食品、卫生、医疗等方面应用很多,主要用于检测细菌和真菌^[52]。Li 等建立了一种检测 *Phytophthora nicotianae* 和 *P. cactorum* 的多重 PCR 体系,该体系能检测出日本栽培草莓中包含的 2 种病原菌^[68]。Liao 等构建了一种多重 PCR 体系,该体系能快速、特异、高通量地检测病原菌 *P. rubi* (PRSF/PRSR)、*P. fragariae* (PFSF/PFSR) 和 *P. × cambivora* (PCSF/PCSR)^[69]。Ishiguro 等构建了用于检测 *Pythium* 的多重 PCR 体系,该体系适用于检测环境中的病原菌 *Pythium aphanidermatum* (AsPyF/AsAPH2B)、*P. helicoides* (kkhel F1mod2/kkkel R2) 和 *P. myriotylum* (AsPyF/kkMYRR)^[70]。张阳等构建了用于检测草莓根腐病病原菌的多重 PCR 体系,该体系可用于检测土壤中的病原菌尖孢镰刀菌 (CO11-F/CO11-R)、森林腐霉 (PY5-F/PY5-R)、立枯丝核菌 (SLN1-F/SLN1-R) 和棒形拟盘多毛孢 (NP3-F/NP3-R)^[71]。

1.3.3.4 实时定量 PCR 实时定量 PCR 是一种在 DNA 扩增反应中,以荧光化学物质标记引物并测定每次 PCR 循环后产物总量的方法^[72],具有高分辨率、高精准度、高灵敏度等特点。根据所用荧光化学材料的不同,qPCR 主要分为荧光染料法 (SYBRGreen I) 和荧光探针法 (TaqMan、Molecular Beacon、FRET 和 Amplifluor) 2 种^[72]。Li 等建立了用于检测 *P. nicotianae* 和 *P. cactorum* 的特异性引物及 TaqMan 探针的双重实时定量 PCR 方法,该方法简便、可靠,可用于检测草莓植株及土壤中的 2 种菌^[73]。de la Lastra 等建立了用于检测 *Fusarium solani* 的特异性引物及 TaqMan 探针的实时定量 PCR 方法,该方法可用于快速检测土壤及草莓植株 *F. solani*^[74]。Pastrana 等构建了用于检测 *Macrophomina phaseolina* 和 *P. cactorum* 的特异性引物及 TaqMan 探针的实时定量 PCR 方法,可用于土壤中病原菌检测^[75]。Burkhardt 等构建了检测 *M. phaseolina* 的实时定量 PCR 体系,可用于检测草莓植株和土壤样品中的病原菌 *M. phaseolina*^[76]。Verdecchia 等建立了用于检测 *P. cactorum* 的特异性引物及 SYBR Green I 染料的双重实时定量 PCR 方法,该方法灵敏度高,可检测出土壤及未见症状样品中的 *P. cactorum*^[77]。

1.3.3.5 环介导等温扩增(loop-mediated isothermal amplification, LAMP)技术 LAMP 技术是一种新型的核酸扩增分子技术,其反应体系由 dNTPs、Bst DNA 聚合酶、引物及 DNA 模板等组成;在等温条件下与 Bst DNA 聚合酶作用,4 或 6 种特异性引物与目标基因的不同区域相结合,最终扩增形成长度不一的茎环状 DNA^[78];该技术具有特异性强、操作简便、成本低等特点,同时还能快速、高效地检测病原物质^[79-80]。Takahashi 等构建了用于检测 *P. helicoides* 的 LAMP 体系,该体系的灵敏性优于 PCR 结果,可用于田间快速、有效的检测 *P. helicoides* 进而避免出现相应的经济损失^[81]。Shen 等构建了用于检测 *Pythium ultimum* 的 LAMP 体系,该体系的灵敏度超过常规 PCR (1 000 倍),可用于快速、特异、灵敏的检测纯培养物以及感染植物组织中的病原菌 *P. ultimum*^[82]。

2 草莓根腐病的生物防治

在草莓实际生产中,化学防治依旧是草莓根腐病防治的主要方式,虽然具有防效高、速度快、杀虫抗菌谱广、成本低、使用简单等优点,但诸如农药残留及病原菌产生抗药性等问题随之而来^[7,83-84]。与传统化学药剂防治相比,利用一些有益微生物或者微生物代谢产物对农作物病害进行有效地防治的生物防治,因其具有无抗药性、对环境无污染、人畜友好等优点而备受研究人员的青睐^[85]。有益微生物可通过生物间的竞争作用、抗菌作用、重寄生作用、交叉保护作用及诱发抗病性等达到抑制某些病原物的存活和活动的目的^[86-88]。

研究人员对于草莓根腐病的生物防治相关工作包括拮抗微生物的分离与鉴定、盆栽与大田试验以及微生物菌剂和植物源农药抑制草莓根腐病等。目前,根据研究人员的工作,可以将拮抗微生物分为细菌、真菌和放线菌三大类;在三大类拮抗微生物中,拮抗细菌的相关研究远远多于拮抗真菌与放线菌;在拮抗细菌中,以芽孢杆菌属细菌研究最多(表 2)。

研究人员在拮抗微生物的分离、鉴定、筛选及活性评价的基础上,以拮抗微生物为基础,开发出了相应的生物防治剂/杀菌剂。María 等研究了可湿性粉剂 Prodigy® (主要成分为 10^8 CFU/g 棘孢木霉 T18) 和液体制剂 Fusbact® (主要成分为 10^7 CFU/mL 巨大芽孢杆菌 B157 和侧孢杆菌 B197)

对草莓土传病害壳孢菌 TOR-99 和茄腐镰孢菌 FPOST-81 的防控效果,体外试验表明木霉菌和芽孢杆菌对 2 种病原菌的抑制率均超过 36%,温室试验和田间试验对根腐病的防效分别为 100%、81%^[113]。Parikka 等研究了商业菌根菌剂 Myko-Ymppi® (*Rhizophagus intraradices*)、荧光假单胞菌 PsAS34 和生物杀菌剂 Prestop® (*Gliocladium catenulatum*) 对红心根腐病致病菌 (*P. fragariae*) 的防治效果,结果表明 Prestop® 对红心根腐病的防效最好:发病症状少且在草莓根部未检测到病原菌孢子的存在^[114]。孟祥东发明了一种含有伯克霍尔德菌 (*Burkholderia phytofirmans*) 且对草莓根腐病具有防治作用的微生物菌剂,使用该菌剂后草莓根腐病的发病率降低到 0.91%^[115]。吴慧玲等发明了一种含有黄赭色链霉菌 SQ11 和多黏类芽孢杆菌 JZB120001 活性成分的菌剂,该菌剂对包括草莓根腐病在内的多种植物病害均有防治效果^[116]。吉沐祥等发明了一种含有短短小芽孢杆菌 TW 和木霉菌的可湿性粉剂,该粉剂对草莓根腐病的 30 d 防效可达 72.4%^[117]。刘政源研究了包括枯草芽孢杆菌、多黏类芽孢杆菌和哈茨木霉菌在内的 3 种微生物菌剂对草莓根腐病病原菌茄腐镰刀菌和尖孢镰刀菌的田间防治效果,发现枯草芽孢杆菌菌剂的防效最好,69.25%;多黏类芽孢杆菌和哈茨木霉菌菌剂的防效分别为 63.14%、59.74%^[118]。Wang 等发明了一种含有解淀粉芽孢杆菌、胶质芽孢杆菌和绿木霉菌剂-土曲霉的复合微生物菌剂,该菌剂对由镰刀菌引起的根腐病有防治效果^[119]。孟祥东发明了一种以栖稻假单胞菌 (*Pseudomonas oryzihabitans*) 为主的微生物菌剂,使用该菌剂后草莓根腐病的发病率低至 0.28%^[120]。

除了生防菌及其菌剂外,研究人员通过研究发现,包括植物提取物等在内的植物源提取物也对草莓根腐病病原菌有抑制作用。蒋继志等研究了 4 种葱属 (*Allium*) 植物 (大蒜、韭菜、洋葱和葱) 的水提物和 8 种常见中草药 (丁香、大黄、黄连、连翘、生地、桔梗、生姜和花椒) 的水煎剂对引起草莓根腐病的病原菌立枯丝核菌和胶孢炭疽菌的体外抑制试验,结果表明大蒜和韭菜的水提物以及丁香和大黄的水煎剂在较高浓度下对 2 种病原菌均有较强的抑制作用而在较低浓度下则无抑制作用,连翘水煎剂只对胶孢炭疽菌有极强的抑制作用而对立枯丝核菌无明显影响^[121]。甄文超等研究了药用植物提取液

表 2 草莓根腐病拮抗微生物

病原菌	生防菌类型	生防菌
高卢密环菌(<i>A. gallica</i>)	真菌	深绿木霉 ^[12]
密环菌(<i>A. mellea</i>)	真菌	哈茨木霉 ^[13]
落叶松葡萄座腔菌(<i>B. laricina</i>)	细菌	解淀粉芽孢杆菌 ^[16]
胶孢炭疽菌(<i>C. gloeosporioides</i>)	细菌	多黏类芽孢杆菌 ^[89]
暹罗炭疽菌(<i>C. siamense</i>)	细菌	贝莱斯芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌 ^[90]
尖孢镰刀菌(<i>F. oxysporum</i>)	细菌	枯草芽孢杆菌 ^[90-94] 贝莱斯芽孢杆菌 ^[7,90] 解淀粉芽孢杆菌 ^[95-96] 多黏类芽孢杆菌 ^[93] 荧光假单胞菌 ^[94] 真菌 <i>Neosartorya udagawae</i> ^[97] 哈茨木霉 ^[98-100] 白色木霉、绿色木霉和钩状木霉 ^[99] 长枝木霉、黄绿木霉和平菇木霉 ^[100]
	放线菌	白刺链霉菌 ^[101] 吸水链霉菌 ^[102] 藤黄类诺卡氏菌 ^[103]
茄病镰刀菌(<i>F. solani</i>)	细菌	短小芽孢杆菌 ^[104]
	真菌	拟康宁木霉和棘孢木霉 ^[105] 哈茨木霉 ^[99,105] 钩状木霉、白色木霉和绿色木霉 ^[99]
菜豆壳球孢菌(<i>M. phaseolina</i>)	真菌	白色木霉、哈茨木霉、绿色木霉和钩状木霉 ^[99]
棒状拟盘多毛孢菌(<i>N. clavispota</i>)	细菌	解淀粉芽孢杆菌、贝莱斯芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌 ^[8]
<i>P. fragariae</i>	真菌	非致病性镰刀菌 ^[106]
恶疫霉(<i>P. cactorum</i>)	细菌	荧光假单胞菌 ^[107] 普氏沙雷氏菌 ^[108] 土生拉乌尔菌、荧光假单胞菌和解淀粉芽孢杆菌 ^[109]
	真菌	出芽短梗霉 ^[110]
草莓疫霉(<i>P. fragariae</i>)	细菌	荧光假单胞菌和枯草芽孢杆菌 ^[111] 土生拉乌尔菌、荧光假单胞菌和解淀粉芽孢杆菌 ^[109]
立枯丝核菌(<i>R. solani</i>)	细菌	短小芽孢杆菌 ^[104]
	真菌	白色木霉、绿色木霉和钩状木霉 ^[99] 哈茨木霉 ^[98-100] 黄绿木霉、平菇木霉和长枝木霉 ^[100] 灰黄青霉和土曲霉 ^[112]

注:表中所列病原菌均以草莓为宿主且能导致草莓根腐病发生。

对立枯丝核菌、尖孢镰刀菌和大丽轮枝菌的抑制作用,发现丁香、川芎、百部、青麸杨和苦参 5 种药用植物分别对 3 种病原性真菌有较强的抑制作用^[122]。郭会婧等研究发现,4 种葱属植物(大蒜、韭菜、洋葱和葱)和 4 种植物茎叶(杨树叶、柳树叶、银杏叶和茴香茎)的混配型水提物对引起草莓病害的立枯丝核菌有抑制作用,其中葱属植物混配型提取液抑菌

效果优于其他 4 种植物混配提取液^[123]。吴迪发明了一种含有肉桂醛和楝提取物等植物源生物农药,该农药对草莓病害具有很好地防治效果,其防效超过 69.2%^[124]。张华发明了一种包含松针等植物源的杀菌剂,该杀菌剂对草莓根腐病的灭菌率超过 94.6%^[125]。黄朝纲发明了一种含有愈创木酚和哈茨木霉的组合物,该组合物能有效治疗草莓根腐病

并提高草莓的抗病能力^[126]。张国前等发明了一种以棉籽饼为主料、臭椿叶等为辅料的防治剂,该制剂能有效杀灭草莓根腐病病原菌,提高草莓成活率,较大程度地防治根腐病^[127]。

3 总结与展望

本文对已发表的关于草莓根腐病病原菌、基于 PCR 扩增为主的分子检测技术和生物防治研究进展进行了综述,为研究草莓根腐病方面的研究人员在草莓根腐病病原菌分离与鉴定、科赫法则验证、拮抗微生物筛选等方面提供理论或文献依据。

草莓根腐病是草莓生产中导致绝产的真菌性病害,因其致病病原菌多样,给该病的防治带来诸多不便。本文对国内外报道的草莓根腐病病原菌进行了归类。研究人员以草莓根腐病病原菌为靶标,筛选得到了很多对病原菌具有抑制作用的拮抗菌,但是当前的相关工作主要集中于拮抗菌的筛选,而对拮抗菌相关产品的研发、拮抗菌与病原菌的互作机制研究等后续工作,相对缺乏或不足。虽然已有关于表 1 所列病原菌基因组的相关报道,但是考虑到菌株特异性、分离宿主及相关记录不够完善,当前已获得基因组信息的菌株无法明确其能否在以草莓为宿主并经感染后使该植株出现根腐病症状;因此本文没有对草莓根腐病病原菌基因组相关研究展开叙述,而草莓根腐病病原菌基因组的解析也将是未来的研究热点之一。

近年来,合成生物学家致力于获取生物系统的组成成分,通过重新组装的方式构建人工微生物生态系统,并由此提出了合成微生物群落(synthetic microbial community),即将 2 种及以上遗传背景完全解析的微生物在确定的环境条件下共同培养构建而成的人工群落体系^[128-130]。对于草莓根腐病相关研究者而言,尝试以合成微生物群落的方式将现阶段分离得到的各类拮抗菌制成微生物菌剂并应用于草莓实际生产,或将是未来一段时间内的主要工作。制成的菌剂既能有效防控草莓根腐病的发生,也符合当前可持续农业发展要求。

参考文献:

[1] 雷家军,张运涛,赵密珍. 中国草莓[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,2011.

[2] 苏代发,童江云,杨俊誉,等. 中国草莓属植物种质资源的研究、开发与利用进展[J]. 云南大学学报(自然科学版),2018,40(6):1261-1276.

[3] 朱 丽,陈晓东,乔玉山,等. 不同配比基质对草莓母苗生长和抽生匍匐茎的影响[J]. 江西农业大学学报,2021,43(3):547-554.

[4] 赵秀娟,王树桐,张凤巧,等. 草莓根腐病研究进展[J]. 中国农学通报,2006,22(8):419-422.

[5] 宁志怨,董 玲,廖华俊,等. 安徽省长丰县草莓根腐病病原的鉴定[J]. 安徽农业大学学报,2017,44(1):130-134.

[6] Husaini A M, Neri D. Strawberry: growth, development and diseases [M]. London: CAB I Publishing, 2016.

[7] 姚锦爱,黄 鹏,赖宝春,等. 贝莱斯芽胞杆菌 ZZBV-3 的鉴定及其对草莓根腐病的防效[J]. 中国生物防治学报,2021,37(1):172-177.

[8] 王梦园,杜延全,蔡威威,等. 复合菌剂防治草莓根腐病的效果研究[J]. 中国农业科技导报,2020,22(6):100-110.

[9] 郭书普. 新版果树病虫害防治彩色图鉴[M]. 北京:中国农业大学出版社,2010:158-159.

[10] Nellist C F. Disease resistance in polyploid strawberry [M]//Hytönen T, Graham J, Harrison R. The genomes of rosaceous berries and their wild relatives. Cham: Springer Cham, 2018: 79-94.

[11] 朱晓琴,宋自力,裴冬丽. 河南省商丘市草莓根腐病病原菌的分离和鉴定[J]. 植物保护学报,2017,44(2):349-350.

[12] Pellegrini A, Prodanutti D, Pertot I. Use of bark mulch pre-inoculated with *Trichoderma atroviride* to control *Armillaria* root rot [J]. Crop Protection, 2014, 64: 104-109.

[13] Raziq F, Fox R T V. Combinations of fungal antagonists for biological control of *Armillaria* root rot of strawberry plants [J]. Biological Agriculture & Horticulture, 2005, 23(1): 45-57.

[14] Prodanutti D, Vanblaere T, Gobbin D, et al. Genetic diversity of *Armillaria* spp. infecting highbush blueberry in northern Italy (Trentino region) [J]. Phytopathology, 2009, 99(6): 651-658.

[15] 张 阳,刘正坪,魏艳敏,等. 北京昌平地区草莓根腐病菌种类鉴定[J]. 中国农学通报,2015,31(18):278-284.

[16] 黄 静,赵 佳,陈 哲,等. 一株侵染草莓的落叶丛葡萄座腔菌的分离鉴定及拮抗菌筛选[J]. 北方园艺,2018(3):55-60.

[17] Alam M W, Gleason M L, Amin M, et al. First report of root and crown rot of strawberry caused by *Chaetomium globosum sensu lato* in Punjab, Pakistan [J]. Plant Disease, 2017, 101(5): 837.

[18] 韩永超,向发云,曾祥国,等. 草莓根颈腐烂病的病原鉴定[J]. 中国农业科学,2014,47(1):53-60.

[19] Pertot I, Kuflik T, Gordon I, et al. Identifier: a web-based tool for visual plant disease identification, a proof of concept with a case study on strawberry [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 84: 144-154.

[20] Verma V S, Gupta V K. First report of *Curvularia lunata* causing root rot of strawberry in India [J]. Plant Disease, 2010, 94(4): 477.

[21] 孙 倩,张 玮,燕继晔,等. 草莓根腐病的 *Dactylonectria* 病原菌鉴定[J]. 植物病理学报,2022,52(2):276-280.

[22] Erper I, Ozer G, Alkan M, et al. First report of *Dactylonectria torresensis* causing black root rot of strawberries in Kyrgyzstan [J]. Journal of Plant Pathology, 2021, 103(1): 379-380.

- [23] Ayoubi N, Soleimani M J. Morphological and molecular identification of pathogenic *Fusarium* spp. on strawberry in Iran [J]. *Sydowia*, 2016, 68: 163 – 171.
- [24] 申光辉, 薛泉宏, 赵 娟. 草莓土赤壳菌根腐病原鉴定及生物学特性[J]. *西北农业学报*, 2018, 27(7): 1032 – 1040.
- [25] 史芳芳, 汪 泉, 李向泉, 等. 草莓根腐病原菌 *Ilyonectria novozelandica* 的 PCR 快速检测方法: CN106520935A [P]. 2017 – 03 – 22.
- [26] Javadi A, Amin M. Antifungal activity of methanol and n – hexane extracts of three *Chenopodium* species against *Macrophomina phaseolina* [J]. *Natural Product Research*, 2009, 23(12): 1120 – 1127.
- [27] Zhan Y J, Peng W J, Xu Z Q, et al. First report on *Neofusicoccum kwambonambiense* causing strawberry root rot on strawberry in China [J]. *Journal of Plant Pathology*, 2021, 103(3): 1003 – 1004.
- [28] Gilardi G, Bergeretti F, Gullino M L, et al. First report of *Neopestalotiopsis clavispora* causing root and crown rot on strawberry in Italy [J]. *Plant Disease*, 2019, 103(11): 2959.
- [29] Rebollar – Alviter A, Silva – Rojas H V, Fuentes – Aragón D, et al. An emerging strawberry fungal disease associated with root rot, crown rot and leaf spot caused by *Neopestalotiopsis rosae* in Mexico [J]. *Plant Disease*, 2020, 104(8): 2054 – 2059.
- [30] Moročko – Bičevska I, Fatehi J, Sokolova O. Reassessment of *Paragnomonina* (Sydowiellaceae, Diaporthales) and typification of *Paragnomonina fragariae*, the cause of strawberry root rot and petiole blight [J]. *Fungal Biology*, 2019, 123(11): 791 – 803.
- [31] Fang X L, Phillips D, Li H, et al. Severity of crown and root diseases of strawberry and associated fungal and oomycete pathogens in Western Australia [J]. *Australasian Plant Pathology*, 2011, 40(2): 109 – 119.
- [32] Abad Z G, Abad J A, Coffey M D, et al. *Phytophthora bisheria* sp. nov., a new species identified in isolates from the Rosaceous raspberry, rose and strawberry in three continents [J]. *Mycologia*, 2008, 100(1): 99 – 110.
- [33] de los Santos B L, Porras M, Blanco C, et al. First report of *Phytophthora cactorum* on strawberry plants in Spain [J]. *Plant Disease*, 2002, 86(9): 1051.
- [34] Bonants P, Weerd M H D, van Gent – Pelzer M, et al. Detection and identification of *Phytophthora fragariae* Hickman by the polymerase chain reaction [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 1997, 103(4): 345 – 355.
- [35] Zhan Y J, Peng W J, Xu Z Q, et al. First report of *Phytophthora helicoides* causing root and crown rot on strawberry in China [J]. *Plant Disease*, 2020, 104(9): 2528.
- [36] 盛娟媛. 草莓根腐病原鉴定及分子检测技术研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012: 1 – 8.
- [37] Asad – Uz – Zaman M, Bhuiyan M R, Khan M A I, et al. Integrated options for the management of black root rot of strawberry caused by *Rhizoctonia solani* Kuhn [J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2015, 338(2): 112 – 120.
- [38] 夏 冰, 郑书恒, 胡学军. 草莓根腐病发生规律与综合防治技术 [J]. *中国植保导刊*, 2020, 40(8): 30 – 34.
- [39] Maharachchikumbura S S N, Hyde K D, Groenewald J Z, et al. *Pestalotiopsis* revisited [J]. *Studies in Mycology*, 2014, 79: 121 – 186.
- [40] Chamorro M, Aguado A, de los Santos B. First report of root and crown rot caused by *Pestalotiopsis clavispora* (*Neopestalotiopsis clavispora*) on strawberry in Spain [J]. *Plant Disease*, 2016, 100(7): 1495.
- [41] Walker D M, Castlebury L A, Rossman A Y, et al. Systematics of genus *Gnomoniopsis* (Gnomoniaceae, Diaporthales) based on a three gene phylogeny, host associations and morphology [J]. *Mycologia*, 2010, 102(6): 1479 – 1496.
- [42] Sogonov M V, Castlebury L A, Rossman A Y, et al. Leaf – inhabiting genera of the Gnomoniaceae, Diaporthales [J]. *Studies in Mycology*, 2008, 62: 1 – 77.
- [43] Senanayake I C, Maharachchikumbura S S N, Jeewon R, et al. Morphophylogenetic study of Sydowiellaceae reveals several new Genera [J]. *Mycosphere*, 2017, 8(1): 172 – 217.
- [44] Moročko I, Fatehi J. Molecular characterization of strawberry pathogen *Gnomonia fragariae* and its genetic relatedness to other *Gnomonia* species and members of Diaporthales [J]. *Mycological Research*, 2007, 111(5): 603 – 614.
- [45] Sharon M, Freeman S, Kuninaga S, et al. Genetic diversity, anastomosis groups and virulence of *Rhizoctonia* spp. from strawberry [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2007, 117(3): 247 – 265.
- [46] Fang X L, Finnegan P M, Barbetti M J. Wide variation in virulence and genetic diversity of binucleate *Rhizoctonia* isolates associated with root rot of strawberry in Western Australia [J]. *PLoS One*, 2013, 8(2): e55877.
- [47] Yang G H, Li C Y. General description of *Rhizoctonia* species complex [M] // Cumagun C J. *Plant pathology*. Shanghai: InTech, 2012: 41 – 52.
- [48] Sharon M, Sneh B, Kuninaga S, et al. Classification of *Rhizoctonia* spp. using rDNA – ITS sequence analysis supports the genetic basis of the classical anastomosis grouping [J]. *Mycoscience*, 2008, 49(2): 93 – 114.
- [49] Botha A, Denman S, Lamprecht S C, et al. Characterisation and pathogenicity of *Rhizoctonia* isolates associated with black root rot of strawberries in the Western Cape Province, South Africa [J]. *Australasian Plant Pathology*, 2003, 32(2): 195 – 201.
- [50] Dinler H, Benlioglu S, Benlioglu K. *Rhizoctonia fragariae* causes black root rot on strawberry seedlings in Turkey [J]. *Australasian Plant Disease Notes*, 2018, 13(1): 23.
- [51] 杨万凤, 刘 翔, 刘天鸿. 草莓角斑病菌检测鉴定技术研究进展 [J]. *植物检疫*, 2010, 24(3): 40 – 45.
- [52] 朱林慧. 进境水果及种苗检疫性疫霉分子检测方法的建立 [D]. 重庆: 西南大学, 2015: 5 – 12.
- [53] Amouzou – Alladaye E, Dunez J, Clerjeau M. Immunoenzymatic detection of *Phytophthora fragariae* in infected strawberry plants [J]. *Phytopathology*, 1988, 78(8): 1022 – 1026.

- [54] Pekárová B, Kratka J, Slovacek J. Utilization of immunochemical methods to detect *Phytophthora fragariae* in strawberry plants[J]. Plant Protection Science, 2001, 67(3): 391–408.
- [55] 陈 哲, 黄 静, 赵佳, 等. 草莓红中柱根腐病的研究进展[J]. 生物技术通报, 2017, 33(3): 37–44.
- [56] 高 苇, 杨利娟, 刘亚全, 等. 设施草莓根腐病的病原及其综合防治技术[J]. 天津农业科学, 2021, 27(2): 36–39.
- [57] 张梦影. 昌黎县草莓根腐病病原鉴定、生物学特性及室内毒力测定[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2018: 4–5.
- [58] Reddy P P. Sustainable crop protection under protected cultivation [M]. Singapore: Springer Singapore, 2016: 245–260.
- [59] Mirmajlessi S M, Destefanis M, Gottsberger R A, et al. PCR – based specific techniques used for detecting the most important pathogens on strawberry: a systematic review[J]. Systematic Reviews, 2015, 4(1): 9.
- [60] Rajapaksha P, Elbourne A, Gangadoo S, et al. A review of methods for the detection of pathogenic microorganisms[J]. Analyst, 2019, 144(2): 396–411.
- [61] 张 静. 猪圆环病毒 3 型巢式 PCR 检测方法的建立及应用 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019: 8–10.
- [62] Lacourt I, Bonants P J M, van Gent – Pelzer M P, et al. The use of nested primers in the polymerase chain reaction for the detection of *Phytophthora fragariae* and *P. cactorum* in strawberry [J]. Acta Horticulturae, 1997(439): 829–838.
- [63] Bonants P J M, Weerdt M H D, van Gentpelzer M P E, et al. The use of nested PCR for the detection of *Phytophthora fragariae* in strawberry [M]//Dehne H W, Adam G, Diekmann M, et al. Diagnosis and identification of plant pathogens. Dordrecht: Springer Dordrecht, 1997: 43–45.
- [64] Bonants P J M, van Gent – Pelzer M P E, Hooftman R, et al. A combination of baiting and different PCR formats, including measurement of real – time quantitative fluorescence, for the detection of *Phytophthora fragariae* in strawberry plants [J]. European Journal of Plant Pathology, 2004, 110(7): 689–702.
- [65] Bonants P J M, van Gent – Pelzer M P E, Weerdt M H D. Characterization and detection of *Phytophthora fragariae* in plant, water and soil by molecular methods[J]. EPPO Bulletin, 2000, 30(3/4): 525–531.
- [66] Hughes K J D, Inman A J, Cooke D E L. Comparative testing of nested PCR – based methods with bait – plant tests for detecting *Phytophthora fragariae* var. *fragariae* in infected strawberry roots from fruit crops in the UK[J]. EPPO Bulletin, 2000, 30(3/4): 533–538.
- [67] Bhat R G, Browne G T. Specific detection of *Phytophthora cactorum* in diseased strawberry plants using nested polymerase chain reaction [J]. Plant Pathology, 2010, 59(1): 121–129.
- [68] Li M Z, Asano T, Suga H, et al. A multiplex PCR for the detection of *Phytophthora nicotianae* and *P. cactorum*, and a survey of their occurrence in strawberry production areas of Japan [J]. Plant Disease, 2011, 95(10): 1270–1278.
- [69] Liao F, Huang G M, Zhu L H, et al. Quadruplex PCR detection of three quarantine *Phytophthora* pathogens of berries [J]. European Journal of Plant Pathology, 2019, 154(4): 1041–1049.
- [70] Ishiguro Y, Asano T, Otsubo K, et al. Simultaneous detection by multiplex PCR of the high – temperature – growing *Pythium* species: *P. aphanidermatum*, *P. helicoideis* and *P. myriotylum* [J]. Journal of General Plant Pathology, 2013, 79(5): 350–358.
- [71] 张 阳, 刘正坪, 高 硕, 等. 草莓根腐病菌多重 PCR 检测体系的建立 [C]//彭友良, 缪卫国. 中国植物病理学会 2015 年学术年会论文集. 北京: 中国农业出版社, 2015: 105.
- [72] 黄 珏, 王正亮, 潘海波, 等. 基于 DNA 检测的动物性水产品鉴别技术研究进展[J]. 水产科学, 2021, 40(6): 934–942.
- [73] Li M Z, Inada M, Watanabe H, et al. Simultaneous detection and quantification of *Phytophthora nicotianae* and *P. cactorum*, and distribution analyses in strawberry greenhouses by duplex real – time PCR[J]. Microbes and Environments, 2013, 28(2): 195–203.
- [74] de la Lastra E, Basallote – Ureba M J, de los Santos B, et al. A TaqMan real – time polymerase chain reaction assay for accurate detection and quantification of *Fusarium solani* in strawberry plants and soil[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 237: 128–134.
- [75] Pastrana A M, Basallote – Ureba M J, Aguado A, et al. Potential inoculum sources and incidence of strawberry soilborne pathogens in Spain[J]. Plant Disease, 2017, 101(5): 751–760.
- [76] Burkhardt A, Ramon M L, Smith B, et al. Development of molecular methods to detect *Macrophomina phaseolina* from strawberry plants and soil[J]. Phytopathology, 2018, 108(12): 1386–1394.
- [77] Verdecchia E, Ceustermans A, Baets D, et al. Quantitative PCR for detection and quantification of *Phytophthora cactorum* in the cultivation of strawberry[J]. European Journal of Plant Pathology, 2021, 160(4): 867–882.
- [78] Notomi T, Okayama H, Masubuchi H, et al. Loop – mediated isothermal amplification of DNA [J]. Nucleic Acids Research, 2000, 28(12): e63.
- [79] 应淑敏, 郭 俭, 王教瑜, 等. 环介导等温扩增技术在植物病原物检测中的应用[J]. 植物保护学报, 2020, 47(2): 234–244.
- [80] 秦文韬, 王忠跃, 张 昊. 环介导恒温扩增技术在植物病原物检测中的应用[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(3): 169–174.
- [81] Takahashi R, Fukuta S, Kuroyanagi S, et al. Development and application of a loop – mediated isothermal amplification assay for rapid detection of *Pythium helicoideis* [J]. FEMS Microbiology Letters, 2014, 355(1): 28–35.
- [82] Shen D Y, Li Q L, Yu J, et al. Development of a loop – mediated isothermal amplification method for the rapid detection of *Pythium ultimum* [J]. Australasian Plant Pathology, 2017, 46(6): 571–576.
- [83] 李金鞠, 廖甜甜, 潘 虹, 等. 土壤有益微生物在植物病害防治中的应用[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(23): 4753–4757.
- [84] 李青杰, 朱佳红, 吴佳佳, 等. 河北保定地区草莓根腐病病原鉴定及室内毒力测定[J]. 河北农业大学学报, 2021, 44(2): 15–20.
- [85] 冶福春, 马文林, 杨晓龙. 枯草芽胞杆菌 Qh – 618 对燕麦叶斑病防治效果研究[J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(4): 785–

- 795.
- [86] 姚琳. 微生物生物防治的研究综述[J]. 林区教学, 2009(5): 123–125.
- [87] 张亮, 盛浩, 袁红, 等. 根际促生菌防控土传病害的机理与应用进展[J]. 土壤通报, 2018, 49(1): 220–225.
- [88] 姬彦飞, 董欣欣, 田野, 等. 根际促生菌的生防机理及用作生防制剂的潜能[J]. 中国农学通报, 2021, 37(14): 141–149.
- [89] 高菲, 卜春亚, 靳永胜, 等. 草莓根腐病拮抗细菌的分离筛选与鉴定[J]. 广东农业科学, 2012, 39(3): 4–8.
- [90] 付莉媛. 北京地区草莓根腐病致病菌的分离鉴定及拮抗菌筛选[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2021: 32–33.
- [91] 刘双, 赵晓燕, 杨瑞, 等. 3 株拮抗细菌对草莓根腐病菌 C16–4 的抑菌作用[J]. 北京农学院学报, 2015, 30(1): 31–35.
- [92] 卜春亚, 孙晔, 张天蔚, 等. 一株草莓根腐尖孢镰刀菌拮抗内生细菌的分离鉴定及抑菌特性[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(2): 300–304.
- [93] 王树雪, 魏艳敏, 尚巧霞, 等. 三株拮抗细菌的鉴定及抑菌作用研究[J]. 中国生物防治学报, 2013, 29(4): 647–654.
- [94] 汪雪静, 卜春亚, 靳永胜, 等. 草莓根腐病拮抗细菌的分离与鉴定[J]. 园艺学报, 2011, 38(9): 1657–1666.
- [95] 雷白时, 王笑颖, 姜军坡, 等. 草莓根腐病生防芽孢杆菌的筛选鉴定与盆栽防效试验[J]. 河北农业大学学报, 2016, 39(3): 19–22.
- [96] 陈哲, 黄静, 赵佳, 等. 草莓根腐病的病原菌分离鉴定及拮抗菌 CM3 的抑制作用研究[J]. 生物技术通报, 2018, 34(2): 135–141.
- [97] 吴锦兰, 魏希颖. 防治草莓重茬病多功能内生菌株的筛选及鉴定[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 105–111.
- [98] 齐素敏, 冉新炎, 韩广泉, 等. 哈茨木霉 NBL–Z1 定殖动态及对草莓根腐病防治效果[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(17): 124–127.
- [99] Ahmed M F A, El–Fiki I A I. Effect of biological control of root rot diseases of strawberry using *Trichoderma* spp. [J]. Research Journal of Applied Sciences, 2017, 7(3): 482–492.
- [100] 徐佳美, 张璨, 刘奇志, 等. 4 种木霉菌株对 5 种草莓病原真菌的抑制作用[C]//张涛涛, 雷家军. 草莓研究进展(IV). 北京: 中国农业出版社, 2015: 291–299.
- [101] 王辰. 白刺链霉菌(*Streptomyces albospinus*) CT205 活性成分的分离纯化及其对草莓根腐病的生防效应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015: 39–58.
- [102] 沈婷. 放线菌 B04 分离鉴定及其固体发酵制剂对草莓根腐病生防效应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016: 33–48.
- [103] 高森, 张方博, 张树清. 一株藤黄类诺卡氏菌及其应用: CN111394270A[P]. 2020–07–10.
- [104] Abd–El–Kareem F, Elshahawy I E, Abd–Elgawad M M M. Application of *Bacillus pumilus* isolates for management of black rot disease in strawberry [J]. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 2021, 31(1): 25.
- [105] 张鹤, 杜国栋, 宋亚楠, 等. 防治草莓根腐病的木霉菌筛选、鉴定及其防病效果[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(6): 654–660.
- [106] Moročko–Bičevska I, Fatehi J, Gerhardson B. Biocontrol of strawberry root rot and petiole blight by use of non–pathogenic *Fusarium* sp. strains [J]. Acta Horticulturae, 2014(1049): 599–605.
- [107] Agustí L, Bonaterra A, Moragrega C, et al. Biocontrol of root rot of strawberry caused by *Phytophthora cactorum* with a combination of two *Pseudomonas fluorescens* strains [J]. Journal of Plant Pathology, 2011, 93(2): 363–372.
- [108] Kurze S, Bahl H, Dahl R, et al. Biological control of fungal strawberry diseases by *Serratia plymuthica* HRO–C48 [J]. Plant Disease, 2001, 85(5): 529–534.
- [109] Anandhakumar J, Zeller W. Biological control of red stele (*Phytophthora fragariae* var. *fragariae*) and crown rot (*P. cactorum*) disease of strawberry with rhizobacteria [J]. Journal of Plant Diseases and Protection, 2008, 115(2): 49–56.
- [110] Iqbal M, Jamshaid M, Zahid M A, et al. Biological control of strawberry crown rot, root rot and grey mould by the beneficial fungus *Aureobasidium pullulans* [J]. BioControl, 2021, 66(4): 535–545.
- [111] Gupta M, Bhardwaj L N, Sharma R C. Biological control of red stele of strawberry with bacterial antagonists [J]. Acta Horticulturae, 2005(696): 363–366.
- [112] 申光辉, 薛泉宏, 张晶, 等. 草莓根腐病拮抗真菌筛选鉴定及其防病促生作用[J]. 中国农业科学, 2012, 45(22): 4612–4626.
- [113] María P A, José B M, Ana A, et al. Biological control of strawberry soil–borne pathogens *Macrophomina phaseolina* and *Fusarium solani*, using *Trichoderma asperellum* and *Bacillus* spp. [J]. Phytopathologia Mediterranea, 2016, 55(1): 109–120.
- [114] Parikka P K, Vestberg M, Karhu S T, et al. Possibilities for biological control of red core (*Phytophthora fragariae*) [J]. Acta Horticulturae, 2017(1156): 751–756.
- [115] 孟祥东. 一种对草莓根腐病具有防治作用的微生物菌剂: CN108587941A[P]. 2018–09–28.
- [116] 吴慧玲, 田兆丰, 白雪莲, 等. 防治草莓根腐病等蔬菜真菌病害的菌剂及其所用菌株: CN107603914A[P]. 2018–01–19.
- [117] 吉沐祥, 庄义庆, 李国平, 等. 含有短短小芽孢杆菌 TW 和木霉菌的组合物: CN102342300A[P]. 2012–02–08.
- [118] 刘政源. 杨凌设施草莓主要病虫害防治的生物源药剂初步筛选[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 34–35.
- [119] Wang Z, Teng H, Wang M, et al. New *Bacillus amyloliquefaciens* useful for preparing into microbial inoculum, microbial inoculum and other microbial inoculum, and fertilizer for preventing and treating root rot: CN111205999–A[P]. 2020–05–29.
- [120] 孟祥东. 一种用于防治草莓根腐病菌的生物菌剂: CN108633914A[P]. 2018–10–12.
- [121] 蒋继志, 梁宁. 植物提取物对草莓根腐病原真菌的抑制作用[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2005, 25(4): 399–404.
- [122] 甄文超, 曹克强, 代丽, 等. 利用药用植物源土壤添加物控制

黄凯文,马 珍,苦君月,等. 土壤有机碳损失机制研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(24):26-32.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.24.004

土壤有机碳损失机制研究进展

黄凯文¹, 马 珍¹, 苦君月¹, 张珍明², 姜 鑫¹, 黄先飞¹

(1. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵州贵阳 550001;

2. 贵州省生物研究所, 贵州贵阳 550008)

摘要:土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,土壤有机碳作为土壤碳库的重要组成部分,由于其储量巨大且性质较为活跃,其产生的任何微小变化都将对全球气候产生影响。近年来,土壤有机碳在全球碳循环、气候变化及农业发展等领域备受关注。因此,明晰土壤有机碳的损失机制对于应对气候变化、生态环境保护及农业可持续发展等具有重要意义。本文主要从自然和人为两大方面对土壤有机碳的损失机制进行探讨,其中自然因素主要由气候变化(温度、降水、CO₂ 浓度)、土壤侵蚀(水蚀、风蚀)引起的土壤有机碳损失;人为因素主要由土地利用/覆被类型的变化(将富含有机质的森林、草地和湿地土壤转变为农田土壤)以及农田管理措施(耕作、施肥)引起的土壤有机碳损失,最后根据国内外学者的研究结论和思路提出建议与展望,以期土壤有机碳损失的进一步研究提供理论依据。

关键词:土壤有机碳;损失机制;气候变化;土壤侵蚀;土地利用;农田管理

中图分类号:P593;S153.6⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)24-0026-07

全球气候变暖已成为不争的事实,其主要原因是近代人类活动造成温室气体的大量排放。为应对这一问题,国际社会做出了不少努力,我国也于 2016 年加入《巴黎协定》并在 2020 年又向世界郑重承诺力争于 2030 年前实现碳达峰,于 2060 年前实现碳中和,体现了大国责任与担当^[1]。土壤是陆地

生态系统中最大的碳库,土壤有机碳不仅是土壤肥力的主要组成部分,而且是土壤健康的重要评价指标,同时对土壤微域环境具有调节作用,是全球碳循环、气候变化等方面研究的核心^[2-3]。全球土壤有机碳储量约为 1 500 Pg,是大气碳库的 2 倍,是植物碳库的 2~4 倍^[4]。由于土壤有机碳库储量巨大,其产生的任何微小变动,都可能造成全球碳循环失衡,大气 CO₂ 浓度强烈波动,引发气候问题。有关土壤碳循环及有机碳的转化机制见图 1。因此,研究土壤有机碳的损失机制对全球气候变暖、土壤资源利用等领域至关重要。目前,国内有关土壤有机碳的研究论文主要集中在有机碳储量估算、时空分布及影响因素分析等方面,而对土壤有机碳损失机制缺乏系统评述。笔者梳理了国内外相关研究,主要从自然和人为两大方面综述土壤有机碳的损失

收稿日期:2022-03-08

基金项目:中国博士后科学基金(编号:2020M673582XB);贵州省普通高等学校青年科技人才成长项目(编号:黔教合 KY 字[2021]302)。

作者简介:黄凯文(1996—),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事土壤有机碳的损失与转化机制研究。E-mail: hkw334420@163.com。

通信作者:黄先飞,博士,副研究员,主要从事环境科学研究。E-mail: hxfswjs@gznu.edu.cn。

草莓再植病害的研究[J]. 中国农业科学,2005,38(4):730-735.

[123] 郭会婧,蒋继志,孙琳琳,等. 几种植物提取液混配对草莓立枯丝核菌的抑制作用[C]//彭友良. 中国植物病理学会 2006 年学术年会论文集. 北京:中国农业科学技术出版社,2006:448-453.

[124] 吴 迪. 一种防治草莓病害的植物源生物农药:CN104872203A[P]. 2015-09-02.

[125] 张 华. 一种防治草莓根腐病的植物源杀菌剂:CN105941504A[P]. 2016-09-21.

[126] 黄朝纲. 一种基于愈创木酚治疗草莓根腐病的组合物及施用方法:CN106982828A[P]. 2017-07-28.

[127] 张国前,郑 阳,张 健. 一种利用棉籽饼制备的草莓根腐病防治剂:CN106070342A[P]. 2016-11-09.

[128] Großkopf T, Soyer O S. Synthetic microbial communities[J]. Current Opinion in Microbiology, 2014, 18: 72-77.

[129] de Roy K, Marzorati M, van den Abbeele P, et al. Synthetic microbial ecosystems: an exciting tool to understand and apply microbial communities[J]. Environmental Microbiology, 2014, 16(6): 1472-1481.

[130] Vorholt J A, Vogel C, Carlström C I, et al. Establishing causality: opportunities of synthetic communities for plant microbiome research[J]. Cell Host & Microbe, 2017, 22(2): 142-155.