山东农业大学学报(自然科学版),2026,57(5):828-836 VOL.57 NO.5 2026
Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition) doi:10.3969/j.issn.1000-2324.2026.05.004

Fusarium annulatum 引起的草莓根腐病及其药剂敏感性分析

刘 爱[1,2],孙正意[1],任创岭[1],邹永洲[3],史秀娟[4],刘 峰[1*],李北兴[1*]

1. 山东农业大学植物保护学院,山东 泰安 271018
2. 南京林业大学林草学院,南方林业可持续发展协同创新中心,江苏 南京 210037
3. 济南市农业技术推广服务中心,山东 济南 250004
4. 济南市农业科学研究院,山东 济南 250316

摘 要: 由镰孢菌属(*Fusarium* spp.)引起的草莓根腐病严重危害草莓生产且防治困难。2023年在山东省淄博市暴发根腐病的草莓种植园中,成功分离并纯化到FA3/4两株致病菌。该地患病草莓呈现根部坏死、维管束变色、叶片枯萎和整株枯死等症状。为明确致病菌种类,采用形态学观察结合ITS、*EF*及*RPB2*多基因联合系统发育分析对FA3/4进行鉴定,结果表明致病菌为*Fusarium annulatum*。通过草莓植株接种致病性分析和柯赫氏法则对FA3进行验证,发现发病症状与田间一致,并从中再次分离得到该致病菌。*Fusarium annulatum*虽为已知菌种,但本研究在国内首次报道其可引起草莓根腐病,同时测定了23种杀菌剂对该病原菌的室内活性,确定氟环唑、丙环唑、四霉素和抑霉唑等对该菌毒力较高,为该病害进一步防治提供参考。

关键词: 草莓根腐病;*Fusarium annulatum*;鉴定;毒力测定

中图法分类号: S482.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2324(2026)05-0828-09

Analysis of Strawberry Root Rot Caused by *Fusarium annulatum* and Fungicide Sensitivity of the Pathogen

LIU Ai[1,2], SUN Zheng-yi[1], REN Chuang-ling[1], ZOU Yong-zhou[3], SHI Xiu-juan[4], LIU Feng[1*], LI Bei-xing[1*]

1. *College of Plant Protection/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018,China*
2. *College of Forestry and Grassland/Nanjing Forestry University, Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing 210037, China*
3. *Ji'nan District Agricultural Technology Service Center, Ji'nan 250004, China*
4. *Ji'nan Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250316,China*

Abstract: Strawberry root rot caused by *Fusarium* spp. poses a severe threat to strawberry production and is difficult to control. In 2023, two pathogenic strains, FA3/4, were successfully isolated and purified from strawberries plantations in Zibo City, Shandong Province, where root rot had broken out. Infected strawberry exhibits symptoms such as root necrosis, vascular discoloration, leaf wilting, and complete plant death. To identify the pathogen, morphological observation is combined with multi-gene phylogenetic analysis using ITS, *EF*, and *RPB2* sequences, confirming that the pathogen is *F. annulatum*. Pathogenicity is verified through strawberry plant inoculation tests and Koch's postulates, where symptoms match field observations, and the pathogen is successfully isolated again from the plants. Although *F. annulatum* is a known species, this study is the first in China to report its ability to cause strawberry root rot. Additionally, the in vitro activity of 23 fungicides against this pathogen is evaluated, identifying fluoxastrobin, propiconazole, tebuconazole, and azoxystrobin as highly effective against its virulence, providing a reference for further disease control strategies.

Keywords: Strawberry root rot disease; *Fusarium annulatum*; identification; toxicity determination

草莓(*Fragaria* × *ananassa* Duch.)富含维生素、矿物质及酚类化合物等多种营养物质,是全球重要的经济作物之一[1]。草莓根腐病严重影响草莓的产量与品质[2,3]。镰孢菌(*Fusarium* spp.)是造成草莓根腐病的主要致病菌,主要通过侵染草莓的根系维管束导致根腐和枯萎,乃至死亡[4,5]。引起草莓根腐病的镰孢菌种类多样,目前已报道木贼镰孢菌(*Fusarium equiseti*)、腐皮镰孢菌(*Fusarium solani*)以及层出镰孢菌(*Fusarium proliferatum*)等[6,7]。新的致病菌正不

收稿日期: 2025-09-18 **修回日期:** 2026-09-09
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1401203);山东省蔬菜产业技术体系(SDARS-05)
第1作者简介: 刘 爱(1999-),女,硕士研究生,研究方向:农药学。E-mail:la17866709661@163.com
***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:libeixing@126.com;fliu@sdau.edu.cn

断被发现和鉴定，其分布存在显著的区域性差异，进一步增加了病害防治难度。研究表明，即便是遗传学背景极为相近的两种镰孢菌，对同一药剂的敏感性也可能存在差异。如亚洲镰孢菌（*Fusarium asiaticum*）对琥珀酸脱氢酶抑制剂类（SDHIs）杀菌剂的敏感性显著低于禾谷镰孢菌（*Fusarium graminearum*）[8]。可见，明确致病镰孢菌种类是草莓根腐病精准防控的重要前提。

目前，登记用于草莓根腐病防治的化学药剂仅有棉隆和异硫氰酸烯丙酯两种，应用技术复杂，在生产中普及率不高。而用于防治由镰孢菌引起草莓枯萎病的化学药剂单剂，也仅有氰烯菌酯一种，其余均以混剂形式登记。因此，亟需筛选防治该病害的新药剂。

本研究调查采集了山东淄博地区的草莓根腐病病株，采用形态学、分子生物学与室内接种相结合的方法进行病原菌分离鉴定，首次明确 *Fusarium annulatum* 可引起草莓枯萎死亡。在此基础上，通过室内抑菌活性测定 23 种化学药剂的敏感性，为进一步田间应用提供了理论依据。

1　材料方法

1.1　供试药剂及培养基

DNA 提取试剂盒以及 PCR 扩增试剂盒 2×Taq PCR Mix，上海生工生物工程股份有限公司；次氯酸钠溶液，生工生物工程（上海）股份有限公司；95% 氰烯菌酯和 94% 氰霜唑原药，江苏省农药研究所股份有限公司；98% 氟啶胺和 97% 戊唑醇原药，山东潍坊润丰化工股份有限公司；95% 乙蒜素原药，南阳神圣农化科技有限公司；50% 大蒜素原药，成都新朝阳作物科学股份有限公司；98% 氟唑菌酰羟胺和 92% 吡唑萘菌胺原药，先正达作物保护有限公司；98% 氟唑菌酰胺原药，陕西美邦药业集团股份有限公司；15% 四霉素原药，辽宁微科生物工程有限公司；95% 氟唑菌苯胺和 96% 氟吡菌酰胺原药，拜耳股份公司；96% 啶酰菌胺原药，青岛润农化工有限公司；97% 苯醚甲环唑原药，湖南比德生化科技股份有限公司；97% 氯氟醚菌唑原药，巴斯夫欧洲公司；95% 丙环唑原药，山东康乔生物科技有限公司；98% 丙硫菌唑原药，山东京博农化科技股份有限公司；95% 粉唑醇和 97% 氟环唑原药，江苏丰登作物保护股份有限公司；94% 腈菌唑原药，科迪华农业科技有限责任公司；95% 烯唑醇原药，江苏七洲绿色化工股份有限公司；98% 抑霉唑原药，辽宁众辉生物科技有限公司；99% 十三吗啉原药，江苏富比亚化学品有限公司。四霉素用无菌水配制成 1.0×10^4 μg/mL 的母液。氰霜唑、氟啶胺和腈菌唑溶于丙酮，其他原药溶于甲醇，用含有 1% 吐温-80 的去离子水制备成等浓度的母液。于 4 ℃黑暗条件下保存，备用于室内试验。所有对照处理均包含等量相溶剂和吐温-80。马铃薯葡萄糖琼脂培养基（PDA）：马铃薯 200 g、葡萄糖 20 g、琼脂 20 g，去离子水定容至 1 000 mL；马铃薯葡萄糖液体培养基（PDB）：土豆 200 g，葡萄糖 20 g，去离子水定容至 1 000 mL。水琼脂培养基（WA）：琼脂粉 20 g，葡萄糖 20 g，加去离子水定容至 1 000 mL；上述培养基于 121 ℃条件下灭菌 30 min，室温密封保存备用。

康乃馨叶片水琼脂培养基（CLA）[9]：将新鲜的康乃馨叶片冲洗干净，切成约 5 mm×5 mm 大小的小块。随后将其置于 65~75 ℃的电热鼓风干燥箱中干燥 4~5 h，并将干燥后的叶片进行高压蒸汽灭菌处理，然后将其均匀分散在无菌 WA 培养基表面，使其均匀地分散在致病菌菌饼周围。

1.2　供试仪器

Olympus IX-71 光学显微镜，宁波舜宇仪器有限公司；LDZX-40BI 立式自动电热压力蒸汽灭菌锅，上海申安医疗器械厂。

1.3　致病菌分离及形态学鉴定

病株于 2023 年 3 月自山东省淄博市淄川区草莓种植园（118.1°E，36.8°N）采集。选取病健交界处的组织经 75% 乙醇消毒 15 s、1% 次氯酸钠消毒 1 min 后，用无菌去离子水清洗 3 次。随后置于含 25 mg/mL 链霉素的无菌 PDA 平板上，在 25 ℃黑暗条件下培养 3 d。并采用单孢分离技术对菌株进行纯化，于相同条件下培养 4 d 后拍摄菌落生长状态。纯化后的菌株用无菌 30%（v/v）甘油悬浮液在−20 ℃条件下封存，备用。

大分生孢子的获取：将菌株接种于 CLA 培养基，于 25 ℃黑暗条件下培养 10 d 后进行观察和测量（数量≥50 个）。小分生孢子的获取：取

5个菌饼(d=5 mm)放置于含100 mL无菌PDB培养基的三角瓶中,于25 ℃、200 rpm全黑暗条件下振荡培养3 d。然后用无菌滤纸过滤分生孢子,在显微镜下观察孢子(数量≥50个)形态并测量,试验重复3次。

1.4 致病菌分子生物学鉴定

在形态学鉴定的基础上,进一步进行分子生物学鉴定[10]。

(1)总DNA的提取

根据试剂盒说明书,提取纯化好的致病菌DNA。提取后的DNA样品储存在-20 ℃冰箱中。

(2)目的基因片段扩增及测序

为保证鉴定结果的准确性,本研究采用多位点系统发育分析方法进行鉴定[11]。所用目的基因序列及对应菌株信息见表1,扩增体系见表2。扩增后的序列送至生工生物工程(上海)股份有限公司进行测序。

表1 本文所用目的基因[12-14]

Table 1 Target genes used in the study

基因 Gene	序列5'~3' Sequence	延伸温度/℃ Extension temperature
ITS	ITS4:TCCTCCGCTTATTGATATGC ITS5:GGAAGTAAAAGTCGTAACAAGG	55-60
EF	*EF*-1αF:ATGGGTAAGGARGACAAGAC *EF*-1αR:GGARGTACCAGTSATCATG	
RPB2	5f2:GGGGWGAYCAGAAGAAGGC 11ar:GCRTGGATCTTRTCRTCSACC	

注:R=A/G;S=C/G;W=A/T;Y=C/T。

Note: R=A/G; S=C/G; W=A/T; Y=C/T.

表2 PCR反应体系

Table 2 PCR reaction system

成分 Components	剂量/mL Dosage
引物F Primer F (20 μM)	1
引物R Primer R (20 μM)	1
2×Taq Master Mix	12.5
ddH_2O	9.5
模板DNA Template DNA	1
总体系 Total system	25

(3)构建系统发育树

将测序数据提交至美国国家生物技术信息中心(NCBI)GenBank数据库(https://submit.ncbi.nlm.nih.gov/subs/genome/),利用BLAST工具(https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi)对测序结果进行比对分析,并收集高度相似的已登记序列。采用MEGA 7.0软件及最大似然法(Bootstrap=1 000)对上述序列进行多基因联合系统发育分析,构建系统发育树[15]。其中,所用镰孢菌种类和GenBank登录号详见表3。

1.5 致病菌致病性分析

接种前,选取根系洁白、无腐烂且生长一致的健康草莓苗(品种与采样地一致)。洗净根部后,经70%酒精浸泡30 s,再用无菌水反复冲洗至无酒精残留,确保植株表面无菌[11]。按照1.3部分所述方法制备分生孢子悬浮液,通过血球计数板调节浓度为1×10^7个/mL,随后与灭菌后的基质土混合(100 mL/盆),用于草莓苗的栽种。设置清水对照组。每个处理重复3次,每次重复包括10株草莓苗,试验进行3次。分别于第7、14和21 d进行病害分级并计算发病率和病情指数[16]。病害分级方法在前人研究的基础上,向更精细化的病害发病程度评估方向进行改良[11,16]:

0级:草莓生长情况与对照组相似,无任何发病症状;

1级:少部分根系变黑有新生根生成,短缩茎变色面积≤30%,叶片正常;

2级:部分根系变黑,有少量新生根,30%<短缩茎变色面积≤60%,老叶边缘开始枯萎;

3级:部分根系变黑且无新生根,60%<短缩茎变色面积≤80%,老叶全部枯萎;

4级:仅存极少量未完全变黑的根系,短缩茎变色面积>80%,无新叶生成,心叶开始枯萎;

5级:根系完全变黑死亡,短缩茎腐烂甚至中空,叶片完全干枯。

表 3 系统发育树中所用镰孢菌种类

Table 3 *Fusarium* spp. used in the phylogenetic tree

编号 Number	菌株 Strains	GenBank登录号 GenBank accession number		
		RPB2	*EF*	ITS
001	*Fusarium arcuatisporum* NRRL 32997	GQ505802	GQ505624	GQ505713
002	*Fusarium citri* MAFF 150446	LC685190	LC685061	LC685057
003	*Fusarium compactum* KUNCC 3431	PP719218	PP719217	PP946846
004	*Fusarium annulatum* LC11490	MW474459	MW580513	-
005	*Fusarium annulatum* LC11527	MW474460	MW580514	-
006	*Fusarium guilinense* NRRL 32865	GQ505792	GQ505614	GQ505703
007	*Fusarium sulawesiense* NJC33	ON685322	ON685319	ON646200
008	*Fusarium scirpi* NRRL 26922	GQ505779	GQ505601	GQ505690
009	*Fusarium nanum* NRRL32868	GQ505795	GQ505617	GQ505706
010	*Fusarium luffae* NRRL 31167	GQ505786	GQ505608	GQ505697
011	*Fusarium lacertarum* MRC2609	MH582185	MH582435	MH582459
012	*Fusarium irregulare* FSP	MN200601	MN200600	-
013	*Fusarium ipomoeae* NRRL 34034	GQ505814	GQ505636	GQ505725
014	*Fusarium humuli* HZ10-5	-	OM655189	OM432489
015	*Fusarium hainanense* NRRL 28714	GQ505782	GQ505604	GQ505693
016	*Blackwellomyces* sp.（outgroup）	PQ523834	PQ523839	PP989311

1.6　柯赫氏法则验证

接种后第21 d再次从发病部位进行组织分离，得到的分离物再与致病菌进行形态学和基因序列比对，完成柯赫氏法则验证。

1.7　菌丝生长抑制率的测定

以氰烯菌酯为对照药剂，采用菌丝生长速率法测定22种镰孢菌类病害防治常用的化学药剂对*F. annulatum*的菌丝生长抑制活性[3]。将药剂母液稀释并配制成系列浓度，使药剂在培养基中的最终浓度为0、0.01、0.1、1、10、50和100 μg/mL。从菌落边缘取5 mm菌饼置于含不同浓度药剂的PDA平板中央，每个处理设3次重复，试验重复3次。4 d后采用十字交叉法测量菌丝直径，计算菌丝生长抑制率，并用SPSS统计分析软件（版本24.0，IBM公司）的几率值回归分析来计算其EC_{50}和EC_{90}值[10]。

2　结果与分析

2.1　致病菌形态学鉴定

经组织分离、纯培养后的菌落形态呈粉白色，菌丝羊毛般细密，形状为规整圆形至椭圆形（图1 a和b）。菌丝生长后期会产生粉色沉淀，平均生长速率为5.75 mm/d。菌丝细长，粗细均匀（图1c）。大分生孢子呈镰刀状，顶端细胞钝圆，基部细胞略呈钩状，大小为（7.9~20.8）×（1.0~2.2）μm，2~4个隔膜。小分生孢子有0~1个隔膜，呈椭圆形，大小为（6.5~15.2）×（1.3~4.9）μm（图1d）。上述与藤仓镰孢菌复合种（*F. fujikuroi* species complex）所描述的*F. annulatum*的特征相符合[17]。

2.2　致病菌分子生物学鉴定

通过进一步的系统发育树分析表明（图2），

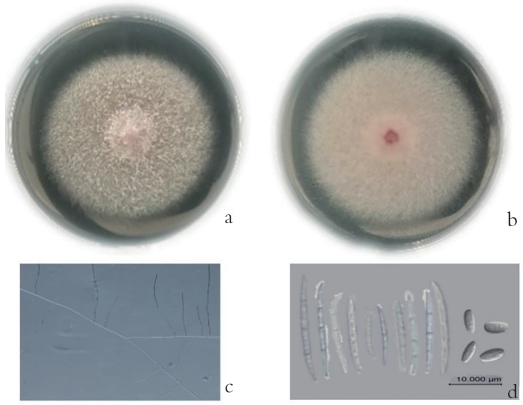

图1 草莓根腐病病原菌菌落（a和b）、菌丝（c）和分生孢子（d）形态

Fig. 1 Morphology of colonies (a and b), mycelium (c) and conidia (d) of strawberry root pathogen

FA3~4 与 *F. annulatum* 参考菌株 LC11527 相似度为 100%，并在系统发育树中聚在一起，自展值为 100%。结合分离物的形态学特征，明确这类菌株被鉴定为 *F. annulatum*。作为第一次在草莓上发现的镰孢菌，将其序列提交到 GenBank 官网，获得登录号：ITS：PV195263 和 PV195264、*EF*：PV207319 和 PV207320、*RPB2*：PV207321 和 PV207322。

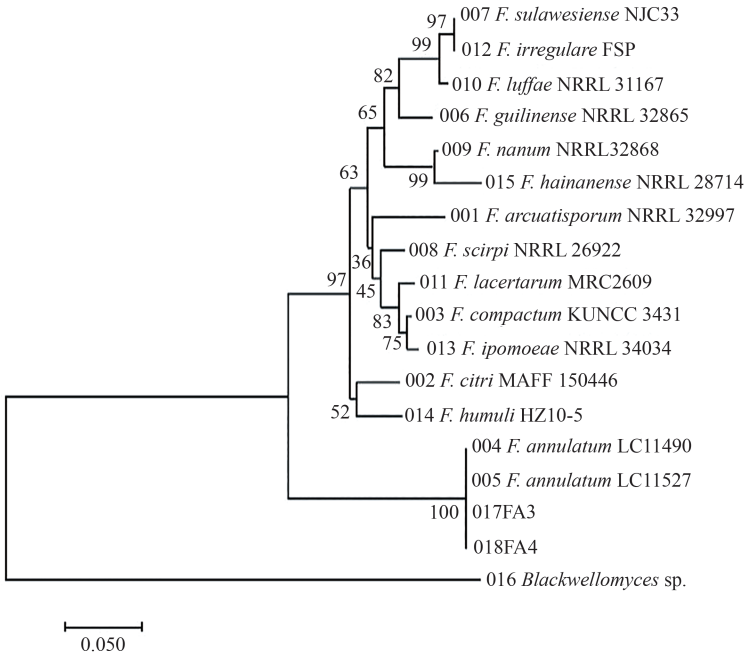

图 2 基于 ITS、*EF*、*RPB2* 构建系统发育树

Fig. 2 Phylogenetic tree based on ITS, *EF*, and *RPB2*

2.3 致病菌致病性测定及柯赫氏法则验证

室内将 *F. annulatum* 接种于草莓苗。接种后 7~14 d，致病菌逐步侵入维管束系统，导致维管束从中心向两侧逐渐变色并蔓延。接种 14 d 后，病原菌在维管组织内快速扩散，引起老叶迅速枯萎，且植株停止产生新根与新叶，最终导致地上部叶片完全枯萎、整株死亡。接种后第 21 d，*F. annulatum* 引起草莓根腐病害的发病率为 97.35 ± 1.08%，病情指数为 90.55 ± 0.76（图 3a），与田间发病症状一致（图 3b）。对照植株生长良好，无任何发病症状。

用组织分离法对发病草莓进行再分离，发现所得病原菌与原接种病原菌形态一致，且序列高度一致。

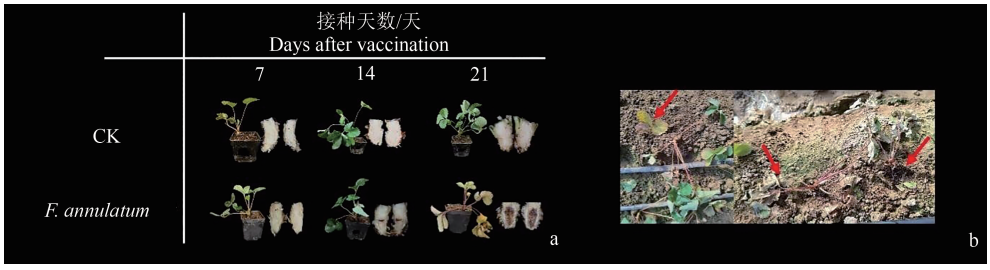

图 3 接种 *Fusarium annulatum* 不同天数后草莓植株发病状况（a），田间发病症状（b）

Fig. 3 Disease symptoms in strawberry plants at different days after inoculation with *Fusarium annulatum* (a), field disease symptom (b)

2.4 菌丝生长抑制率测定结果

各类化学药剂对 *F. annulatum* 的抑菌活性存在显著差异，结合 EC_{50} 值和 EC_{90} 值综合评估毒力大小，并按毒力由高到低排序（表 4）。其中，氟

表 4 23种杀菌剂对 *Fusarium annulatum* 菌丝生长的毒力
Table 4 Toxicity of 23 fungicides against *Fusarium annulatum* to mycelial growth

杀菌剂 Fungicides	菌丝生长/μg·mL^{-1} Mycelial growth	
	EC_{50}	EC_{90}
氟环唑 Epoxiconazole	0.02±0.002	0.18±0.004
丙环唑 Propiconazole	0.05±0.003	0.28±0.02
四霉素 Tetramycin	0.29±0.02	0.80±0.06
抑霉唑 Imazalil	0.05±0.003	1.25±0.67
氰烯菌酯 Phenamacril	0.09±0.02	5.44±0.15
苯醚甲环唑 Difenoconazole	0.05±0.01	28.84±9.07
氯氟醚菌唑 Mefentrifluconazole	0.17±0.08	28.44±4.42
氟啶胺 Fluazinam	0.05±0.001	35.10±5.40
乙蒜素 Ethylicin	4.09±0.16	14.67±0.77
腈菌唑 Myclobutanil	0.55±0.09	39.35±5.84
粉唑醇 Flutriafol	0.69±0.41	60.16±6.28
吡唑萘菌胺 Isopyrazam	0.72±0.02	>100
氟唑菌酰羟胺 Pydiflumetofen	2.70±0.05	>100
烯唑醇 Diniconazole	15.28±4.90	>100
氟唑菌酰胺 Fluxapyroxad	16.67±0.39	>100
十三吗啉 Tridemorph	20.42±3.98	>100
大蒜素 Allicin	>100	>100
氰霜唑 Cyazofamid	>100	>100
氟唑菌苯胺 Penflufen	>100	>100
氟吡菌酰胺 Fluopyram	>100	>100
啶酰菌胺 Boscalid	>100	>100
丙硫菌唑 Prothioconazole	>100	>100
戊唑醇 Tebuconazole	>100	>100

注：所得 EC_{50} 和 EC_{90} 值（μg/mL）为平均值±标准差。
Note: The values of EC_{50} and EC_{90} (μg/mL) are presented as the mean ± standard deviation.

环唑的抑菌活性最明显，显著低于氰烯菌酯。以氰烯菌酯为对照，除氟环唑外，四霉素虽 EC_{50} 值较高，但 EC_{90} 值显著低于氰烯菌酯，并且丙环唑和抑霉唑也表现出良好的抑菌活性。相比之下，苯醚甲环唑、氯氟醚菌唑、氟唑菌苯胺、氟吡菌酰胺、啶酰菌胺、丙硫菌唑和戊唑醇对 *F. annulatum* 的室内抑菌活性相对较低。

3　讨论

草莓根腐病作为全球广泛发生的病害，严重时可造成80%以上的产量损失，对草莓生产构成显著威胁[18]。镰孢菌属是引起草莓根腐病的主要致病菌类群[19]。据报道，*F. annulatum* 可侵染郁金香（球茎腐烂病）、刺梨（腐烂病）及山黧豆（根腐病）等多种作物，导致严重产量损失[20-22]。本研究首次在中国报道由 *F. annulatum* 引起的草莓根腐病。而草莓作为设施园艺的典型经济作物，*F. annulatum* 之所以会侵染草莓可能与该菌的强适应性以及广泛的寄主范围有关。此外，种苗带菌以及农具、人畜携带是草莓上致病菌的重要来源之一，再加上镰孢菌适应性强、繁殖力高，可在极端环境下存活多年，并在环境适宜时迅速扩散，造成严重损失[23]。此外，草莓设施栽培中普遍存在连作障碍，在这种情况下，致病菌经逐年累积进一步加剧了该状况[24]。

此外，就 *F. annulatum* 而言，其形态特征与其他镰孢菌高度相似，仅凭形态学特征难以准确区分[11]。随着技术发展，现已通过整合形态学与分子生物学方法实现致病菌的精准鉴定[25]。在分子鉴定体系中，系统发育分析是核心手段，本研究通过ITS、*EF* 和 *RPB2* 三基因联合分析实现了准确鉴定，进一步提升了结果的可靠性[26]。同

时，设施草莓连作年限延长导致土壤中镰孢菌总种群量累积，增加了*F. annulatum*与草莓根系的接触概率，使其从非优势菌种或非致病菌转变为优势致病菌[27,28]。本研究的致病性测试证实，*F. annulatum*可导致草莓叶片枯萎、茎基部维管束变色等典型症状，且维管束病变一旦发生便快速扩展，与田间症状一致，充分表明该菌对草莓具有较严重破坏性。此外，*F. annulatum*能产生大量大型分生孢子和小型分生孢子，这一特性显著增强了其传播能力以及在不良土壤环境中的存活能力。后续可结合多组学技术解析该病原菌侵染草莓的关键致病基因与机制，为精准防控提供理论支撑。近期研究还表明*F. annulatum*具有广泛的寄主范围，能够引发多种作物病害且防控难度大，已成为威胁农业生产的重要病原菌[21,22]。

供试的23种化学药剂对*F. annulatum*菌丝生长的抑制活性差异显著，这与药剂的作用机制密切相关。例如，通过干扰致病菌线粒体呼吸电子传递链发挥作用的SDHI类杀菌剂对病原菌抑制作用中等（抑制率>50%），但达不到高抑制水平（抑制率>90%）[29]。相比之下，氟环唑、丙环唑和抑霉唑表现出较高的菌丝抑制活性，这与其为甾醇脱甲基抑制剂（DMIs）类作用机制有关[30,31]。值得注意的是，即使作用机制相同的同类杀菌剂，活性也存在显著差异。如苯醚甲环唑（EC_{50}=0.05±0.01 μg/mL，EC_{90}=28.84±9.07 μg/mL）与丙硫菌唑（100 μg/mL：抑制率<50%），推测可能与精细靶标位点存在差异有关[32,33]。此外，DMIs类药剂普遍抑制孢子萌发作用较弱，这要求在防治多循环病害时尽量与其他作用方式的杀菌剂复配使用，改善药剂适应性[34,35]。四霉素作为多作用位点杀菌剂，兼具广谱抑菌特性，已在多种病害防治中呈现出优异效果[36,37]。然而，该药剂在多种作物上存在药害风险，因此在田间实际防治中，需明确其安全施用范围并精确控制施用剂量[38]。同时，可改良所筛选药剂的剂型，可连同生防菌及抗病品种构建绿色防控体系，降低单一防控的风险。鉴于此，上述药剂的抑菌活性还需进一步扩展到对孢子萌发和芽管伸长的抑制，并最终以安全性、田间防效为评判标准。此外，还可拓展病原菌宿主范围检测，以评估其对近缘作物的潜在威胁并制定综合防控措施。

4 结论

本研究明确*F. annulatum*能够引起草莓根腐病，氟环唑、丙环唑、四霉素和抑霉唑等四种药剂对其毒力相对较高，后续可进一步验证其田间药效表现。

参考文献

[1] Wu C C, Men C L, Wang Y Q, et al. α-lipoic acid maintains quality by modulating phenolic metabolism and antioxidant capacity in postharvest strawberry [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 223: 113457.

[2] Koike T S. Crown rot of strawberry caused by *Macrophomina phaseolina* in California [J]. Plant Disease, 2008, 92(8): 1253.

[3] Paredes D G S L D B, Muñoz R F. Effect of different fungicides in the control of *Colletotrichum acutatum*, causal agent of anthracnose crown rot in strawberry plants [J]. Crop Protection, 2002, 21(1): 11-15.

[4] Yuan G S, Shi J H, Zen C, et al. Integrated analysis of transcriptomics and defense-related phytohormones to discover hub genes conferring maize *Gibberella* ear rot caused by *Fusarium graminearum* [J]. BMC Genomics, 2024, 25(1): 733.

[5] Husan A, Miah M A, Zakaria L, et al. *Fusarium* species associated with bakanae disease of rice in Bangladesh [J]. Plant Disease, 2024, 81: 308.

[6] 张艳婷. 草莓茎基腐病的病原菌鉴定、生物学特性及生物-化学协同控制技术[D]. 杭州:浙江农林大学, 2021.

[7] Eduardo L L D, Maria V, Diego J A, et al. Genetic diversity and vegetative compatibility of *Fusarium solani* species complex of strawberry in Spain [J]. Phytopathology, 2019, 109(12): 2142-2151.

[8] 陈稳产. 亚洲镰孢菌与禾谷镰孢菌对琥珀酸脱氢酶抑制剂敏感性差异的分子机制[D]. 南京:南京农业大学, 2021.

[9] 黎妍妍, 杨雯婷, 许汝冰, 等. 湖北雪茄烟草根腐病的病原鉴定[J]. 烟草科技, 2025, 58(04): 45-52.

[10] Qader A A A Z, Thanoon H A. Molecular identification of *Rhizoctonia solani* isolated from cucumber (*Cucumis sativus* L.) and its biological control [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024, 1371(3): 032007.

[11] Sherimbetov G A, Adilov S B, Ruzmetov O R D. First report of *Exserohilum pedicellatum* causing

root rot of wheat (*Triticum aestivum* L.) in Uzbekistan [J]. Plant Disease, 2024, 109(2): 493.

[12] Wang M M, Chen Q, Diao Y Z, et al. *Fusarium incarnatum-equiseti* complex from China [J]. Persoonia, 2019, 43: 70-89.

[13] White T J, Bruns T, Lee S, et al. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics [J]. PCR Protocols: A guide to the Methods and Applications, 1990, 18(1): 315-322.

[14] O'Donnell K, Kistler H C, Cigelnik E, et al. Multiple evolutionary origins of the fungus causing Panama disease of banana: concordant evidence from nuclear and mitochondrial gene genealogies [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1998, 95(5): 2044-2049.

[15] Koichiro T, Glen S, Sudhir K. MEGA11: Molecular evolutionary genetics analysis version 11 [J]. Molecular Biology and Evolution, 2021, 38(7): 3022-3027.

[16] 任晶晶,刘政源,王 勇,等.草莓根腐病防控生物药剂筛选与 田间防治效果验证[J].农药学学报,2022, 24(06): 1456.

[17] Yilmaz N, Sandoval D M, Limbard L, et al. Redefining species limits in the *Fusarium fujikuroi* species complex [J]. Persoonia, 2021, 46: 129-162.

[18] Sorokhaibam N S, Abhilasha A L. Efficacy of pseudomonas fluorescensand organic amendments against black root rot disease caused by *Rhizoctonia solani* in strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) [J]. Journal of Experimental Agriculture International, 2024, 46, 338-350.

[19] Sun X H, Xin Z M, Xin X Q, et al. First report of strawberry root rot caused by *Fusarium falciforme* in China [J]. Plant Disease, 2024, 108: 2233.

[20] Liu Q, Miura S, Liao T, et al. First report of *Fusarium annulatum* causing bulb rot disease of Tulip [J]. Horticulturae, 2025, 11(5): 518.

[21] Wang R L, Feng S, Luo X, et al. First report of *Rosa roxburghii* rot disease caused by *Fusarium annulatum* in China [J]. Plant Disease, 2024, 108 (10): 3187.

[22] Soufiani G M, Abrinbana M, Pouralibaba R H. Identification and pathogenicity assessment of *Fusarium* species associated with grass pea yellowing and wilting in Iran [J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2025, 136: 102587.

[23] K V, Reddy B, Jayalakshmi R. A review on *Fusarium* wilt of Chickpea caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *Ciceris* and its biology [J]. Journal of Experimental Agriculture International, 2025, 47(9): 149-162.

[24] 赵 帆.不同连作年限草莓根际土壤微生物多样性变化[D].合肥:安徽大学, 2018.

[25] Li S, Tam Y K, Hartman G L. Molecular differentiation of *Fusarium solani* f. sp. *glycines* from other *F. solani* based on mitochondrial small subunit rDNA sequences [J]. Phytopathology, 2000, 90: 491-497.

[26] Irangegani Y, Pirnia M, Taheri A, et al. Phylogenetic analyses of *Fusarium oxysporum* species complex on banana in Iran and evaluation of some essential oils on the growth, sporulation and spore germination of the fungus [J]. European Journal of Plant Pathology, 2023, 167: 183-195.

[37] 田春丽,姚丽娟,鲁晓民,等.不同连作年限设施草莓土壤微生物群落结构分析[J].中国土壤与肥料, 2024(08):102-110.

[28] 王博申,张博源,张迎鋆,等.草莓连作根腐病原菌及根际真菌群落变化多样性研究[J].中国果树,2024 (02):82-88.

[29] Cai S, Chen X, Cao S, et al. Inhibitory activities of SDHI fungicides against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* and biological role of FoSDHC1 [J]. Plant Disease, 2026(ja).

[30] Liu Y H, Ma T L, Dong Y, et al. Bioactivity of mefentrifluconazole against different *Fusarium* spp. [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2022, 186: 105169.

[31] Kahiu M M, Kaminski E J. Discriminatory dose determination for DMI fungicides for *Clarireedia jacksonii* and mycelial growth variation across active ingredients [J]. Crop Science, 2024, 65(1): 21418.

[32] King M K, Rodíguez G M L, Kaczmarek J, et al. Decreased DMI sensitivity of *Plenodomus biglobosus* (phoma of oilseed rape) associated with CYP51 substitution G476S [J]. Pest Management Science, 2025.

[33] Yuan Z, Ma H, Jin Y, et al. Fitness and resistance mechanism of *Fusarium graminearum* from fields to demethylation inhibitor (DMI) fungicides in China [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(21): 12630-12642.

[34] Culbreath A, Taylor N K, Cantonwine E, et al. Mixing elemental sulfur or chlorothalonil with QoI and DMI fungicides for management of late leaf spot

of peanut [J]. Plant Disease, 2024, 109(1): 162-169.

[35] Helps J, Ruiz L F, Zerihun A, et al. Do growers using solo fungicides affect the durability of disease control of growers using mixtures and alternations? The case of spot-form net blotch in western Australia [J]. Phytopathology, 2024, 114(3): 590-602.

[36] Li W Z, Long Y H, Yin X H, et al. Antifungal activity and mechanism of tetramycin against *Alternaria alternata*, the soft rot causing fungi in kiwifruit [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2023, 192: 105409.

[37] Yuan W J, Li J X, Chen H, et al. Identification, biological characterization, and fungicide screening of pathogen causing southern blight in *Aster tataricus* [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2022, 47(11): 2915-2923.

[38] Xie X, Zhou Q, Lin D. Toxic effect of tetracycline exposure on growth, antioxidative and genetic indices of wheat [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2011, 18(4): 566-575.