生物技术通报
· 研究报告 · BIOTECHNOLOGY BULLETIN 2026, 42(10):269-281

加拿大一枝黄花病原菌鉴定及其复配制剂的生防效果

靳文涛[1#] 李迎新[2, 3, 4#] 杨绍红[1] 刘应高[1] 翟森[3] 蒋平[3] 宋雷[3] 李姝江[1*]
（1.四川农业大学林学院,成都 611130; 2.区域现代农业与环境保护省部共建协同创新中心,淮安 223300; 3.中铁二十三局集团有限公司,成都 610072; 4.南京大学人工智能与生物医药研究院,南京 210023）

摘 要:【目的】获取能有效防治加拿大一枝黄花（*Solidago canadensis* L.）的病原菌，将其与化学除草剂进行复配，并评估复配制剂的盆栽防治效果。【方法】对染病的加拿大一枝黄花植株叶片和根部进行组织分离，筛选对加拿大一枝黄花具有致病性的真菌，通过形态学与分子生物学方法对其进行鉴定。在此基础上，筛选与该菌相容性良好的化学除草剂，研制复配可湿性粉剂，开展盆栽防效试验。【结果】分离得到的致病菌鉴定为大豆间座壳菌（*Diaporthe sojae*）SC02菌株。复配可湿性粉剂的配方为：3%吐温80，1%木质素磺酸钠，0.9%黄腐酸，0.5 μL/mL 20%氯氟吡氧乙酸，7%高岭土，40% SC02菌株孢子（1×10^9 CFU/mL）。盆栽试验结果表明，在浓度为0.83–1.25 g/L时，该复配制剂对加拿大一枝黄花的株防效达70%–90%，鲜重防效达63%–73%，且未发现对周围其他植物产生不良影响。【结论】以SC02复配的可湿性粉剂质量符合国家要求，对加拿大一枝黄花株防效近90%，且复发率低，防除效果良好。

关键词： 加拿大一枝黄花；大豆间座壳菌；复配可湿性粉剂；生物防治
DOI: 10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2025-1218

Pathogen Identification and Its Compound Formulations' Control Efficacy against *Solidago canadensis*

JIN Wen-tao[1#] LI Ying-xin[2, 3, 4#] YANG Shao-hong[1] LIU Ying-gao[1] ZHAI Sen[3] JIANG Ping[3] SONG Lei[3] LI Shu-jiang[1*]
（1. *College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu* 611130; 2. *Collaborative Innovation Center of Regional Modern Agriculture & Environmental Protection Co-constructed by the Province and Ministry, Huai'an* 223300; 3. *China Railway 23rd Bureau Group Co., Ltd., Chengdu* 610072; 4. *Nanjing University Institute of Artificial Intelligence Biomedicine, Nanjing* 210023）

Abstract:【Objective】This study aimed to isolate pathogenic fungi with high efficacy against Canadian goldenrod (*Solidago canadensis* L.), develop a combined formulation integrating the fungal agent with a chemical herbicide, and evaluate its control efficacy in pot experiments.【Method】Pathogenic fungi from diseased *S. canadensis* leaves and roots were isolated, screened, and identified via morphological and molecular methods. Furthermore, chemical herbicides compatible with the fungi were screened, and a compound wettable powder was developed. The control efficacy of this formulation was then tested in pot experiments.【Result】The isolated pathogen was identified as *Diaporthe sojae* strain SC02. The compound wettable powder formulation consisted of the following components: 3% Tween 80, 1% sodium lignosulfonate, 0.9% fulvic acid, 0.5 μL/mL 20% fluroxypyr, 7% kaolin, and 40% SC02 strain spores (1×10^9 CFU/mL). Pot experiment results showed that at concentrations ranging from 0.83 to 1.25 g/L, the compound formulation achieved a plant control efficacy of 70%–90% and a fresh weight control efficacy of 63%–73% against *S. canadensis*, with no adverse effects observed on surrounding plants.【Conclusion】The wettable powder formulated with SC02 meets national quality standards, exhibits nearly 90% control efficacy against *S. canadensis* plants, and has a low recurrence rate, demonstrating satisfactory weed control performance.

Keywords: *Solidago canadensis*; *Diaporthe sojae*; combined wettable powder; biological control

收稿日期： 2025-11-11
基金项目： 校企合作项目（LQS-KYHT-2023-002）
*通信作者： 李姝江 14087@sicau.edu.cn
#同等贡献

加拿大一枝黄花（*Solidago canadensis* L.）为菊科（Asteraceae）一枝黄花属（*Solidago*）多年生草本植物，又称黄花草、黄莺、百根草或霸王花，叶披针形或线状披针形。加拿大一枝黄花在入侵地常形成单一优势种群落，不仅影响生态系统各功能群之间的相互作用，还会破坏生态系统的结构与功能，严重威胁本地生物多样性，甚至可能导致特定本地物种的局部灭绝[1]。由于其强烈的入侵性和生态危害，该物种已被广泛认定为恶性外来杂草，并先后被列入《中国外来入侵物种名单》及《重点管理外来入侵物种名录》[2]。

目前，化学防治仍是控制外来入侵杂草的有效手段，但其长期大规模使用易导致土壤和大气污染，破坏生态平衡。与化学农药相比，生物防治具有较低的生态风险和较好的安全性以及不易引发抗药性等优势，尤其适用于自然生态系统或荒耕野地中入侵生物的大规模治理。然而，生物防治也存在生效周期长、易受环境条件制约等局限。生物农药与化学农药各具优缺点，将二者科学结合，充分发挥各自优势，可为推进可持续农业的发展提供重要支撑[3-4]。已有研究表明：草甘膦与新型原卟啉原氧化酶抑制剂X18002复配使用，可使草甘膦用量减少750.0 g/hm^2，该复配处理在速效性方面优于单用草甘膦，在持效性方面优于单用X18002，对小飞蓬、狗尾草等入侵植物显示出显著的协同防治效果[5]。此外，将尖孢镰刀菌与草甘膦复配使用，可显著增强镰刀菌对空心莲子草防御酶的影响，从而有效抑制其生长[6]。另一研究发现，黏质沙雷氏菌Ha1与多种化学除草剂复配后，能够提升病原菌的活性，增强对马唐、稗草等杂草的抑制效果，进而提高整体防治效能[7]。因此，除草剂复配不仅能扩大杀草谱，还可降低用药量和使用成本，实现对抗性杂草的高效防控。然而，目前针对加拿大一枝黄花的微生物复配防治研究尚不多见，且加拿大一枝黄花拥有强大的根系繁殖能力，其发达的根系中每条根状茎都会进行分支，分支顶端均有芽，可在第2年再次萌发生长为完整植株，除之不尽，对加拿大一枝黄花的长效防控措施仍较为薄弱。在此背景下，开发能够有效预防或治理加拿大一枝黄花的生物防治方法，具有重要的现实意义。

本研究以加拿大一枝黄花为研究对象，通过对发病植株进行病原菌分离与鉴定，筛选出对该入侵植物具有致病性的真菌菌株。在此基础上，进一步筛选与上述真菌相容性良好的化学除草剂，并研制微生物-除草剂复合制剂。通过盆栽试验评估其防控效果，以期为加拿大一枝黄花的治理及防治提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试材料 自四川省龙泉驿区加拿大一枝黄花入侵地采集长势基本一致、生长良好、根部保留完好的加拿大一枝黄花200株，高度为70-80 cm；健康的非寄主植物容器苗各20株：一年生香樟（*Cinnamomum camphora* L.），均高70 cm，一年生楠木（*Phoebe zhennan* S. K. Lee & F. N. Wei），均高50 cm，由中铁二十三局龙泉驿区苗圃园提供，种植于四川农业大学成都校区第五教学楼大棚内，温度25-28 ℃，相对湿度70%-80%，16 h光照/8 h黑暗。

1.1.2 试验试剂 20%氯氟吡氧乙酸（浓度1 μL/mL），25%环嗪酮（浓度0.02 g/mL），41%草甘膦异丙胺盐（浓度0.02 g/mL），48%三氯吡氧乙酸丁氧基乙酯（浓度10 μL/mL）购自江苏中旗作物保护股份有限公司；10%精草铵膦胺盐（浓度10 μL/mL），20%唑草酮（浓度1 μL/mL），20%二甲四氯水剂（浓度5 μg/mL）购自江苏明德立达作物科技有限公司；高岭土，硅藻土，膨润土购自成都市科龙化工试剂厂；硅胶购自青岛海浪硅胶干燥剂有限公司；黄腐酸购自西陇化工股份有限公司；糊精，木质素磺酸钠，木质素磺酸钙，PEG2000购自成都市科龙化工试剂厂；吐温80，吐温20购自成都市科隆化学品有限公司；海藻酸钠购自成都市科隆化学品有限公司；真菌基因组DNA提取试剂盒购自北京索莱宝科技有限公司。

1.2 方法

1.2.1 病原菌分离、筛选与鉴定

（1）病原菌的分离。2023年10月从四川省成都市龙泉驿区加拿大一枝黄花入侵区域内采摘患病植株，利用组织分离法分离病原菌[8]。纯化后，将菌株再次接种到PDA培养基上备用。

（2）病原菌寄主专一性与致病性测定。在防治过程中，需确保病原菌对加拿大一枝黄花具有高度

专一性。因此，在进行专一性测定时，优先选用该入侵种分布区内有代表性的非靶标植物作为试验对象[9]。将分离获得的菌株于PDA培养基中培养5 d后，取菌落边缘直径7 mm的菌丝块，分别接种于健康盆栽的加拿大一枝黄花、楠木和香樟植株上。每种植株各选择5株，其中4株作为重复，1株作为对照，以此进行专一性致病测定。其中叶部接种采用针刺法[10-11]，接种时在健康嫩叶上使用医用针头轻轻戳刺叶片，刺出的圆形孔洞组合形成的大小形状需与菌饼相似，同时将菌丝块倒置放在健康嫩叶上，用湿纱布包裹后在外层用保鲜膜包裹保湿，每种菌至少3次重复，并设置对照，以观察病原菌对寄主植物的侵染能力及对非寄主植物的潜在影响[12]，同时依据科赫法则观测叶片发病症状并对发病叶片再次进行病原菌分离鉴定，对病原菌进行验证。由于非寄主植物多为木本，而加拿大一枝黄花为草本，为降低接种误差，根部接种采用离体根部接种法[13]，接种后的观察项目与叶部接种一致。病害严重度按0-5级标准进行评估[14]。

（3）病原菌的鉴定。形态学鉴定：将筛选所得致病效果最佳的病原菌菌株分别接种于PDA培养基中心，于25 ℃恒温培养5 d。肉眼观察菌落的培养特性与宏观形态，包括菌落颜色、表面褶皱、质地、边缘特征、菌丝密度及气味等。待病原菌产孢后，采用正置显微镜观察其微观形态结构，包括菌丝形态、粗细、孢子大小与形状等。最后，综合培养性状和显微形态特征，参照真菌鉴定手册[15]对该病原菌进行比对鉴定。

分子生物学鉴定：采用DNA提取试剂盒将提取得到的供试菌株的DNA作为模板，采用真菌通用引物*ITS*1/*ITS*4、特异性引物延伸因子-1（*EF*-1α）、钙调素基因（*CAL*）和组蛋白3基因（*HIS*）片段分别对供试菌株基因组DNA进行扩增[16-17]（表1）。PCR总反应体系为25 μL，分别为模板DNA：1 μL，上游引物：1 μL，下游引物：1 μL，ddH_2O：9.5 μL，Super Mix：12.5 μL；PCR反应程序：预变性94 ℃，5 min；（变性94 ℃，30 s；退火55 ℃，1 min；延伸72 ℃，30 s）重复30个循环，终延伸72 ℃，5 min；4 ℃保存。

将测序结果在NCBI GenBank数据库分析比较，根据比对结果确定建树用序列集，通过多基因联合建树分析，运用MEGA11做同源性分析并用邻接法构建系统发育树，确定目标真菌的系统进化地位。

表1　实时荧光定量PCR引物

Table 1　Primers for RT-qPCR

基因名称 Gene name	引物名称 Primer name	序列 Sequence（5′-3′）
ITS	ITS1	TCCCTAGCTGAACCTCCCC
	ITS4	TCCTCCGCTTATTGATATCC
CAL	CAL-F	GAGTTCAAGGAGGCCTTCTCCC
	CAL-R	CATCTTCTGGCCATCATGG
EF-1α	B.d-F	CATCGAGAAGTTCGAGAAGG
	B.d-R	TACTTGAAGGAACCCTTACC
HIS	H3F	AGGTCCACTGGTGGCAAG
	H3R	GCGGGCGAGCTGGATGTCCTT

1.2.2　加拿大一枝黄花复配除草剂筛选

（1）单剂测定。采用盆栽试验法。试验共设置8个处理组，包括7种化学除草剂处理及1组清水对照，每个处理重复10株。待加拿大一枝黄花株高40-50 cm时进行叶面喷雾处理，每株施用100 mL药液，均匀喷湿茎叶至液滴开始下滴为止。施药后15 d观察并记录植株受害症状与死亡率。

（2）相容性测定。将7种化学除草剂与病原菌分别进行相容性试验[18]。

①孢子悬浮液的配制。将病原菌于PDA培养基上培养至产生大量孢子，刮取孢子，加入10 mL无菌水，用振荡器充分振荡混合均匀后，通过血球板计数法测定孢子浓度[19]。

孢子数量=（N/5）×25×10×10^3×稀释倍数×孢子悬浮液体积

②除草剂对菌株生长影响。采用含药平板法。将7种化学除草剂分别加入PDA培养基中，以购买除草剂时的推荐浓度制备成含药平板，每种处理做4次重复。接入病原菌后于28 ℃黑暗条件下培养10 d。采用十字交叉法测量菌落直径用于初筛。筛选出病原菌可以存活的化学除草剂，再以推荐浓度为中心设置浓度梯度进行复筛，依据菌落直径指标再次进行筛选。

③产孢量的测定。将步骤②中复筛的除草剂梯度浓度制成含药平板，并接种病原菌，每种处理做4

次重复，培养至产孢后刮取孢子，加入10 mL无菌水，用磁力振荡器充分振荡混合均匀后制成孢子悬浮液，通过血球板计数法测定孢子浓度。每个处理设置3次重复[20]。

④孢子萌发率的测定。将步骤②中复筛的除草剂梯度浓度与孢子悬浮液以1∶1比例混合，（25±1）℃下振荡培养48 h，以不加化学药剂的孢子悬浮液为对照，每个处理设置3次重复。计算孢子萌发率[14]。

综合步骤②③④，以菌落直径、产孢量、孢子萌发率3项指标，最终筛选出与病原菌生长相容性最佳的除草剂。

孢子萌发率（%）=萌发孢子数/调查孢子总数×100%

校正孢子萌发率（%）=（对照组萌发率−处理组萌发率）/（100−对照组萌发率）×100%

1.2.3 复配可湿性粉剂的研制与质量检测

（1）载体筛选。分别将高岭土、硅藻土、膨润土、硅胶[21-22]等载体分别按5%的浓度加入到固体培养基PDA中并接种病原菌，以菌落平均直径、产孢量为筛选指标。

（2）助剂筛选。紫外保护剂：分别将海藻酸钠、糊精和黄腐酸按0.5%的浓度添加至PDA固体培养基中[23-24]，设两个对照组：CK1（紫外照射、无保护剂）和CK2（无紫外、无保护剂），并全部接种病原菌。处理组培养2 d后，置于38 W、365 nm紫外灯下照射6 h，随后转移至28 ℃恒温培养箱中培养，待对照组菌落长满整个平板时，测量各处理菌落直径并统计产孢量。

分散剂：分别将木质素磺酸钠、木质素磺酸钙和亚甲基双甲基萘磺酸钠按3%的浓度加入PDA培养基[25-27]，接种病原菌后于28 ℃恒温培养，待对照组菌落长满时，记录菌落直径与产孢量。

润湿剂：润湿性能参照GB/T 5451-2001标准，以润湿时间≤1 min为合格。分别测试吐温20、吐温80和PEG2000在1%、3%和5%浓度下的润湿效果[28]。将上述润湿剂按3%添加量加入PDA培养基并接种病原菌，于28 ℃恒温培养至对照组菌落长满，测定菌落直径和产孢量。

（3）助剂配比优化。在单因素试验的基础上，选定润湿剂（1%−5%）、分散剂（1%−5%）和紫外保护剂（0.5%−0.9%）3个因素[25, 29]作为自变量（表2），并加入前期筛选得到的最佳浓度除草剂，以菌落直径和产孢量为评价指标，设计正交试验，以确定制剂的最佳配比及实现最大产孢量时各助剂的最适浓度。

表2 三种助剂最佳配比筛选

Table 2 Screening of the optimal ratio of three adjuvants

序号 Serial number	实验因素 Experimental factor		
	润湿剂 Wetting agent（%）	分散剂 Dispersant（%）	紫外保护剂 UV protectant（%）
1	1	1	0.5
2	5	3	0.5
3	3	5	0.5
4	5	1	0.7
5	3	3	0.7
6	1	5	0.9
7	3	1	0.9
8	1	3	0.9
9	5	5	0.9

（4）可湿性粉剂的加工。将孢子悬浮液与优化后的载体、助剂及除草剂按配比混合，充分搅拌至溶解，形成均匀混合液。随后于30 ℃条件下烘干（温度超过35 ℃易导致病原菌失活），直至样品重量变化趋于稳定。最后采用高速万能粉碎机进行粉碎处理，制备成可湿性粉剂。

（5）可湿性粉剂质量指标的检测。润湿时间检测参考GB/T 5451-2001[30]；悬浮率检测参考GB/T 14825-1993[31-32]；含孢量检测参考单孢萌发法；pH值检测参考GB/T 1601-1993[33]；细度参考GB/T 16150-1995[34]；起泡性参考GB/T 28137-2011[35]；干燥减量参考GB/T 30361-2013[36]；贮存稳定性参考NY/T 2293.1-2012。

1.2.4 盆栽防效试验 称取1 g所制粉剂，稀释浓度为20、10、5、2.5、1.25、0.83、0.63、0.5 g/L，共设8个处理组；以化学除草剂氯氟吡氧乙酸处理作为阳性对照（CK1），无菌水处理作为空白对照（CK2）。选取生长健康的加拿大一枝黄花100株，每个处理组重复10株，每株均匀喷施100 mL相应药液至茎叶完全湿润。于施药后20 d计算株防效与鲜重防效[37]。

株防效（%）=［1−（对照组药前杂草株数×处理

组药后杂草株数）/（对照组杂草株数×处理组杂草株数）］×100%

鲜重防效（%）=［（空白对照组杂草鲜质量–处理组杂草鲜质量）/空白对照组杂草鲜质量］×100%

1.2.5　数据处理与分析　抑菌率以及孢子数量等数据的处理采用Microsoft Excel 2020进行；对病原菌与7种化学除草剂的相容性、助剂筛选和配比、盆栽防效试验结果分别进行显著性分析，使用单因素ANOVA检验方法，采用SPSS 26.0进行；表格绘制采用Microsoft Excel 2020。

2　结果

2.1　病原菌分离结果

2.1.1　病原菌分离纯化　共分离纯化得到菌株100株，通过形态学鉴定将其分为7种菌株，分别编号为1–7（表3），其中SC02分离率最高，叶部为43%，根部为69%。将7株菌株试管保存，留待寄主专一性与致病性测定。

2.1.2　病原菌寄主专一性与致病性测定　由表4可知，仅SC02能够在有效防控加拿大一枝黄花的同时，对其周围非寄主植物不产生明显影响。如图1所示，菌株SC02、SC06和SC07均可在加拿大一枝黄花叶片上引起明显病斑，但SC06在另两种非寄主植物叶片上也表现出致病性，因此排除；SC07虽仅侵染加拿大一枝黄花，但所致病斑较小，致病能力有限；而SC02对加拿大一枝黄花叶片致病力较强，且对其他非寄主植物基本无致病作用。由图1与表4根部病级结果进一步得出，在3种候选病原菌中，仅SC02能够对加拿大一枝黄花根部造成显著影响。

表3　病原菌的分离结果

Table 3　Isolation results of pathogenic fungi

编号 No.	叶片分离株数 Number of leaf isolates	叶片分离率 Leaf separation rate (%)	根部分离株数 Number of root isolates	根部分离率 Root separation rate (%)
SC01	7	7	0	0
SC02	43	43	69	69
SC03	4	4	0	0
SC04	5	5	12	12
SC05	10	10	0	0
SC06	17	17	0	0
SC07	14	14	19	19

表4　筛选菌对加拿大一枝黄花及其非寄主植株的致病性

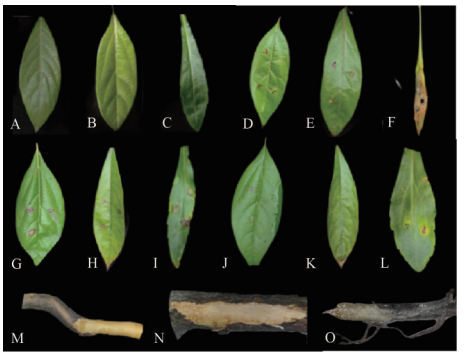
Table 4　Pathogenicity of screened strains against *S. canadensis* and its non-host plants

编号	叶部病级 Leaf disease grade			根部病级 Root disease grade		
No.	加拿大一枝黄花 *S. canadensis*	香樟 *C. camphora*	楠木 *P. zhennan*	加拿大一枝黄花 *S. canadensis*	香樟 *C. camphora*	楠木 *P. zhennan*
SC01	1	2	1	0	0	0
SC02	5	1	0	5	0	0
SC03	1	0	1	0	0	0
SC04	2	2	2	0	0	1
SC05	2	3	3	0	0	0
SC06	1	4	5	0	0	0
SC07	4	5	4	1	0	0

综上，最终选定SC02作为目标菌株。为确证其病原性，自发病叶片与根部的病健交界处重新分离并纯化病原菌，经鉴定与SC02菌株特性一致，符合科赫氏法则。

2.2　病原菌鉴定

（1）形态学鉴定。SC02培养6 d后，菌落正面为白色（图2-A），背面有少量姜黄色色素沉积，菌丝浓密，气生菌丝较发达（图2-B）；第12天开始产孢，菌丝减少，至16–20 d，菌株产孢达到最大（图2-C）。有性型特征（图2-D）显示，子囊壳呈黑色，球状或近球状，聚生，埋生于基质内，具有伸出于基质外的乳突状突起，突起（喙）长728.2–2 278.3 μm；子囊壳直径为261.5–303.2 μm。子囊单囊壁，无柄、棍棒状，内含8个子囊孢子，顶端有明显的顶环，子囊大小（图2-E）为(60.18–72.97)×(12.25–16.61)μm。子囊孢子透明，重叠单列，椭圆形或梭形，大小为(9.02–12.66)×(3.23–4.54)μm。观察到无性型分生孢子，α分生孢子大小为(5.4–7.0)×

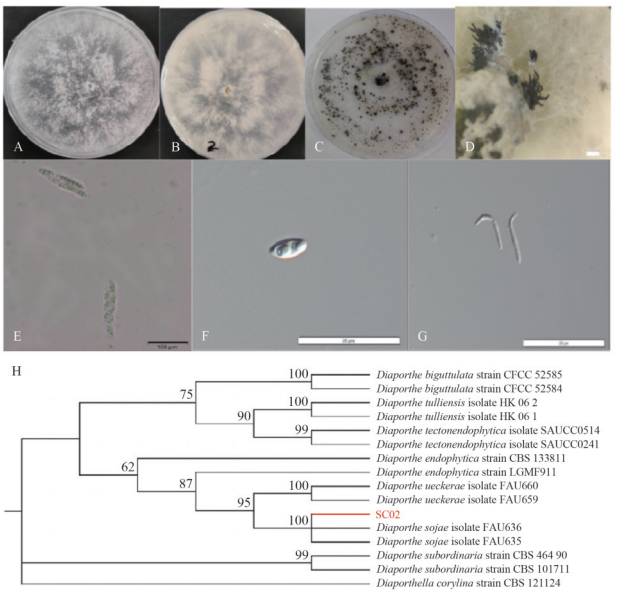


A–C：叶片无菌琼脂块对照（香樟、楠木、加拿大一枝黄花，下同）；D–F：叶片接种SC02；G–I：叶片接种SC06；J–L：叶片接种SC07；M–O：根部接种SC02

A–C: Leaf sterile agar block control (*C. camphora*, *P. zhennan*, *S. canadensis*, the same below); D–F: leaf inoculation with SC02; G–I: leaf inoculation with SC06; J–L: leaf inoculation with SC07; M–O: root inoculation with SC02

图1 叶片与根部接种图

Fig. 1 Leaf and root inoculation diagram



A：菌落图正面；B：菌落图背面；C：产孢培养基；D：子囊壳；E：子囊；F：α分生孢子；G：β分生孢子；H：菌株的系统发育进化树

A: Front view of the colony; B: back view of the colony; C: sporulation medium; D: ascus shell; E: ascus; F: α-conidia; G: β-conidia; H: phylogenetic tree of strains

图2 SC02菌株鉴定结果

Fig. 2 Identification results of SC02 strain

(2.0–3.1)μm，单胞，纺锤形至椭圆形，一端钝一端尖，无色，无分隔，含2个或多个油球（图2-F）。β分生孢子大小为(17.7–23.5)×(1.3–1.8)μm，单胞，钩状或弯曲状，基部为截形，无色，无分隔（图2-G）。依据上述形态学特征，初步将该病原菌鉴定为间座壳属（*Diaporthe*）。

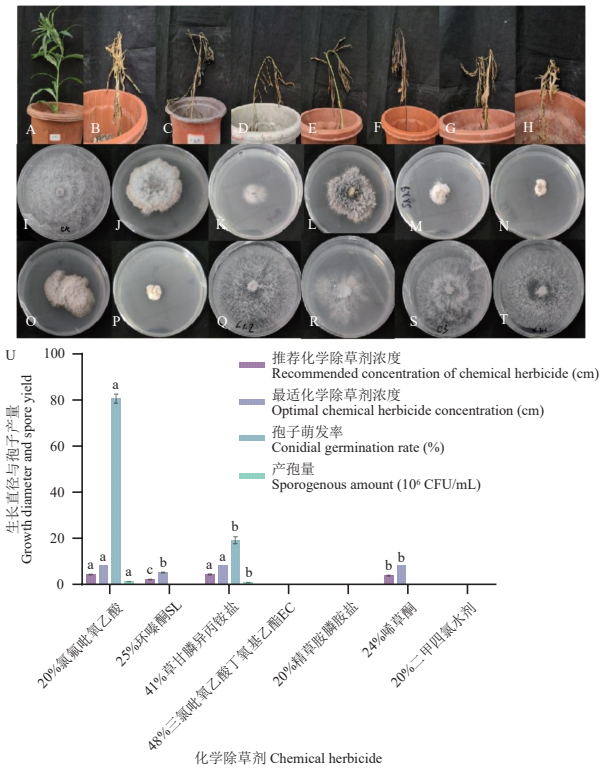
（2）分子生物学鉴定。提取SC02的DNA，对其ITS、TEF1、CAL、H3共计4个基因序列进行PCR扩增并测序。将SC02菌株的各DNA序列提交GenBank数据库获得登录号（ITS：PQ836619；TEF1：PQ863323；CAL：PQ868940；H3：PQ863324）并在NCBI中进行BLAST比对，在GenBank中下载用于鉴定的其他相关菌株的序列，使用4个基因序列联合构建系统发育树。如图2-H所示，该病原菌与大豆间座壳菌（*D. sojae*）聚为一类，遗传同源性最为显著，支持率达到100%。因此，依据形态学和分子鉴定，将分离所得的病原菌SC02鉴定为大豆间座壳菌（*Diaporthe sojae*）。

2.3 加拿大一枝黄花复配除草剂筛选

在单剂试验中，7种化学除草剂均能致加拿大一枝黄花死亡（图3-A–H），由表5可知20%氯氟吡氧乙酸，20%二甲四氯水剂两种除草剂对加拿大一枝黄花效果最好，在致死率100%的同时致死时间最短，4 d即可令加拿大一枝黄花完全死亡。

同时，将7种化学除草剂按照表5中推荐浓度加入PDA培养基制备平板，接种SC02菌株，培养7 d后发现，该菌在含20%氯氟吡氧乙酸、25%环嗪酮SL、41%草甘膦异丙铵盐及24%烯草酮的处理平板上均能生长（图3-I–P）。

对上述4种化学除草剂筛选最适生长浓度，结果如图3-Q–T所示，菌株SC02在含0.01 g/mL的25%环嗪酮SL平板中生长最差，相同培养时间内菌丝甚至无法长满整个平板（图3-R）；而在41%草甘膦异丙铵盐与24%烯草酮处理中，虽存在菌株可生长的浓度范围，但其除草活性已显著降低，最适生长浓度仅分别为5 μg/mL与0.1 μL/mL，无法有效防治加拿大一枝黄花。20%氯氟吡氧乙酸在推荐浓度1 μL/mL处理下菌落生长直径达4.2 cm，最适浓度0.5 μL/mL处理下菌落生长直径达8 cm，孢子萌发率在80%以上，产孢量维持在1.22×10^6 CFU/mL，均显著高于其他处理（$P<0.001$）。综上，20%氯氟吡氧乙酸在最适浓度0.5 μL/mL下与病原菌表现出非常优良的相容性（图3-Q，U）。因此，最终确定以0.5 μL/mL的20%氯氟吡氧乙酸作为后续复配制剂中的化学除草



A–H：单剂实验，分别为CK、20%氯氟吡氧乙酸、25%环嗪酮、41%草甘膦异丙铵盐、48%三氯吡氧乙酸丁氧基乙酯、10%精草胺膦胺盐、20%烯草酮、20%二甲四氯水剂组；I–P：化学除草剂推荐浓度筛选平板实验，分别为CK、20%氯氟吡氧乙酸、25%环嗪酮SL、41%草甘膦异丙铵盐、48%三氯吡氧乙酸丁氧基乙酯EC、10%精草胺膦胺盐、24%烯草酮、20%二甲四氯水剂组；Q–T：化学除草剂最适浓度筛选平板实验，20%氯氟吡氧乙酸、25%环嗪酮SL、41%草甘膦异丙铵盐、24%烯草酮组；U：加拿大一枝黄花复配除草剂筛选柱状图，图中推荐浓度为购买农药时官方推荐稀释浓度，最适浓度为推荐浓度稀释后病原菌最优生长浓度，不同小写字母表示同一时间不同处理间的差异显著性（P<0.001），下同

A–H: Single-dose test. CK, 20% clopyralid, 25% carfentrazone, 41% glyphosate isopropylamine salt, 48% triclopyr butoxyethyl ester, 10% quizalofop-p-ethyl, 20% flumioxazin, 20% dimethachlor aqueous solution group, respectively. I–P: Screening plate for recommended concentrations of chemical herbicides. CK, 20% clopyralid, 25% carfentrazone SL, 41% glyphosate isopropylamine salt, 48% triclopyr butoxyethyl ester EC, 10% quizalofop-p-ethyl, 24% flumioxazin, 20% dimethachlor aqueous solution group, respectively. Q–T: Screening plate for optimal concentrations of chemical herbicides. 20% clopyralid, 25% carfentrazone SL, 41% glyphosate isopropylamine salt, 24% flumioxazin group, respectively. U: Bar chart of screening results for compound herbicides against *S. canadensis*. The recommended concentration refers to the dilution concentration officially recommended for the purchased herbicide. The optimal concentration indicates the dilution of the recommended concentration that supports the optimal growth of the pathogen. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at the same time (P<0.001), the same below

图3　复配除草剂筛选结果

Fig. 3　Screening results of compound herbicides

剂组分。

2.4　可湿性粉剂的研制与质量检测

2.4.1　载体和润湿剂、紫外保护剂、分散剂的筛选结果　根据4种载体的筛选结果（图4-V），与对照组相比，硅胶、高岭土和膨润土均表现出较好的生物相容性（图4-A–G）。其中，硅胶处理效果最佳，病原菌产孢量为3.44×10^9 CFU/mL，高于对照组的3.25×10^9 CFU/mL；高岭土与膨润土次之，产孢量分别为2.68×10^9 CFU/mL和1.53×10^9 CFU/mL，与对照差异显著（P<0.001）。而硅藻土的生物相容性最差，其产孢量仅为其他处理的约十分之一。在悬浮性能方面，硅胶、高岭土、膨润土和硅藻土的悬浮率依次为70%、75%、52%和64%，其中高岭土的悬浮率最高，且符合相关标准要求。综合生物相容性、悬浮率、经济成本及实际操作等因素，最终确定高岭土为该可湿性粉剂的最佳载体。

三种润湿剂的润湿时间测定结果如表6所示。所有润湿剂的润湿时间均小于1 min，符合标准要求。其中，吐温80的润湿时间最短，在5%浓度下约为10 s，显著优于其他处理（P<0.001）。从生物相容性来看（图4-F–I、图4-W），吐温80处理下病原菌的菌落直径与对照组相同；其产孢量为2.39×10^9 CFU/mL，显著高于吐温20处理下的2.08×10^9 CFU/mL（P<0.001）。此外，病原菌在PEG2000处理下无法生长。因此，综合润湿性能与生物相容性，最终选择吐温80作为可湿性粉剂的润湿剂。

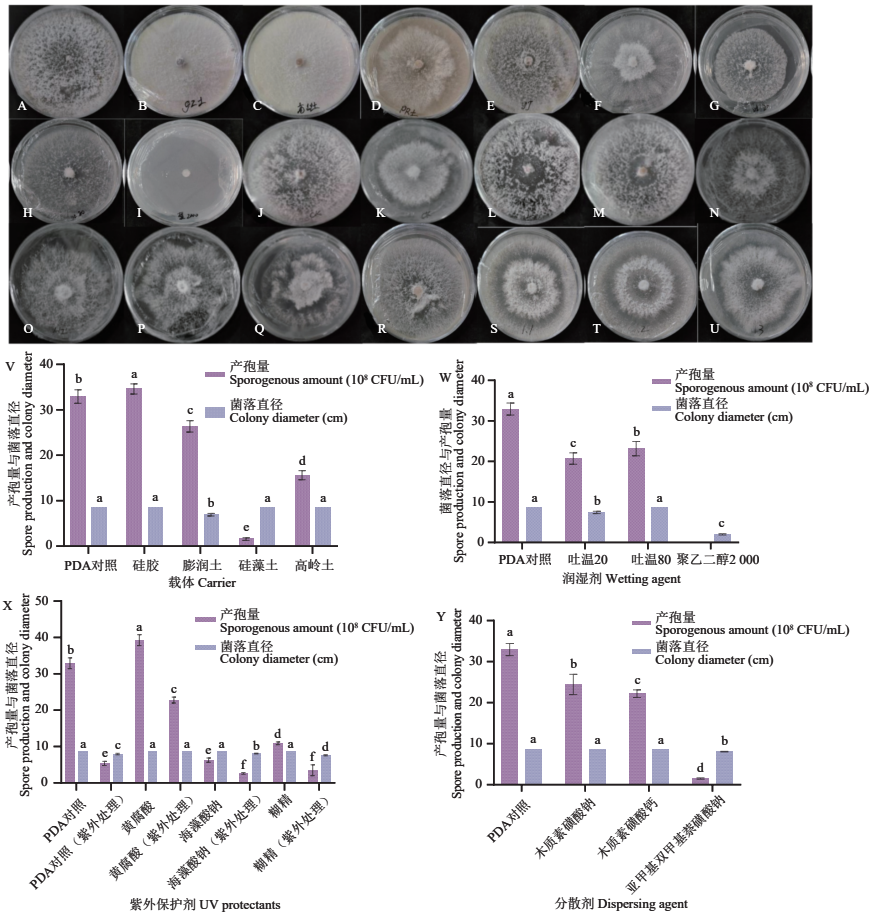
紫外保护剂的初筛结果如图4-J–Q和图4-X所示。与对照组相比，黄腐酸的紫外保护效果最为显著，在紫外处理后产孢量从3.96×10^9 CFU/mL下降至2.25×10^9 CFU/mL，显著优于海藻酸钠和糊精（P<0.001）。此外，黄腐酸还对病原菌的产孢具有一定促进作用，在黄腐酸处理下病原菌产孢量还要高于对照组的3.25×10^9 CFU/mL。因此，确定选用黄腐酸作为紫外保护剂。

三种分散剂对大豆间座壳菌SC02产孢量的影响结果如图4-R–U及图4-Y所示。分散剂中木质素磺酸钠和木质素磺酸钙处理下的菌落生长直径均与对照组相同。然而，木质素磺酸钠处理组的产孢量更高，达2.5×10^9 CFU/mL，较木质素磺酸钙处理组高出0.34×10^9 CFU/mL（P<0.001）。亚甲基双甲基萘磺

表5 化学除草剂单剂筛选结果

Table 5 Screening results of individual chemical herbicide

化学除草剂 Chemical herbicides	推荐浓度 Recommended concentration	死亡率 Mortality rate (%)	死亡时间 Time of death (d)	死亡症状 Symptoms of death
20%氯氟吡氧乙酸	1 μL/mL	100	4	全株死亡,茎秆叶片全部萎蔫枯死
25%环嗪酮SL	0.02 g/mL	100	8	全株死亡,但有少量叶片茎秆泛绿,短时间未完全失活
41%草甘膦异丙铵盐	0.02 g/mL	100	6	全株死亡,但部分茎秆短时间未失活
48%三氯吡氧乙酸丁氧基乙酯EC	10 μL/mL	90	9	大部分植株枯死,但有少量植株茎秆存活
10%精草胺膦胺盐	10 μL/mL	100	8	全株死亡,茎秆叶片全部萎蔫枯死
24%烯草酮	1 μL/mL	100	5	全株死亡,茎秆叶片全部萎蔫枯死
20%二甲四氯水剂	5 μg/mL	100	4	全株死亡,茎秆叶片全部萎蔫枯死



A-E:载体(CK、硅藻土、高岭土、膨润土、硅胶)筛选结果;F-I:润湿剂(CK、吐温20、吐温80、PEG2000)筛选结果;J-Q:紫外保护剂(CK、紫外处理CK、黄腐酸、紫外处理黄腐酸、海藻酸钠、紫外处理海藻酸钠、糊精、紫外处理糊精)筛选结果;R-U:分散剂(CK、木质素磺酸钠、木质素磺酸钙、亚甲基双甲基萘磺酸钠)筛选结果;V-Y:载体、润湿剂、紫外保护剂、分散剂筛选结果

A-E: Carrier (CK, diatomaceous earth, kaolin, bentonite, silica gel) screening results. F-I: Wetting agent (CK, Tween 20, Tween 80, PEG 2000) screening results. J-Q: Ultraviolet protection agent (CK, UV-treated CK, humic acid, UV-treated humic acid, sodium alginate, UV-treated sodium alginate, dextrin, UV-treated dextrin) screening results. R-U: Dispersant (CK, sodium lignosulfonate, calcium lignosulfonate, methylene bis-naphthalenesulfonate) screening results. V-Y: Screening results for carrier, wetting agent, ultraviolet protection agent, and dispersant

图4 载体与3种助剂筛选结果

Fig. 4 Screening results for carriers and three adjuvants

表6　不同润湿剂润湿时间测定

Table 6　Determination of wetting time of different wetting agents

润湿剂 Wetting agents	润湿时间 Wetting time (±SE) (s)		
	1%	3%	5%
吐温20 Tween 20	32±0.58b	20±0.52b	11±1.88b
吐温80 Tween 80	24±0.68c	14±1.28c	10±0.75b
PEG2000	54±0.78a	45±1.05a	36±0.62a

酸钠处理组的产孢量仅为0.16×10^9 CFU/mL，显著低于木质素磺酸钠。综合以上结果，木质素磺酸钠在维持菌落生长的同时表现出更优的促进产孢能力，因此被选定为本制剂的分散剂。

2.4.2　助剂配比筛选结果　由图5结果表明，第4组与第7组处理下的病原菌菌落直径保持在7 cm左右，显著高于其他处理组的2–3 cm，并且第7组处理的产孢量为1.79×10^9 CFU/mL，显著优于第4组的1.47×10^9 CFU/mL（P<0.001），因此确定序号7所对应的组合（润湿剂3%、分散剂1%、紫外保护剂0.9%）为最佳配方（图5）。

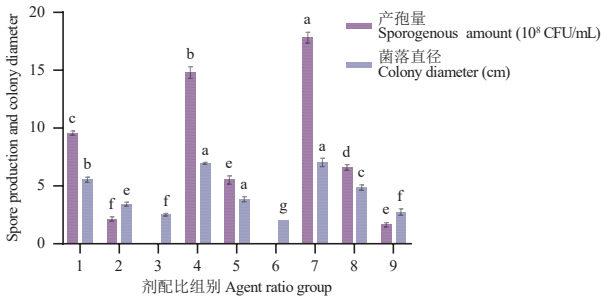


图5　三种助剂最佳配比筛选结果

Fig. 5　Screening results of the optimal ratio of three additives

2.4.3　可湿性粉剂复配剂质量检测　检测结果参见表7，制剂活孢子含量为1.65×10^9 CFU/g，润湿时间、悬浮率、pH、细度、起泡性、干燥减量、贮存稳定性各项指标均符合相关国家标准（NY/T 2293.1-2012）。

综上，得到了一种大豆间座壳菌SC02的复配可湿性粉剂，包含40%的SC02孢子液（1×10^9 CFU/mL）、3%润湿剂吐温80、1%分散剂木质素磺酸钠、0.9%紫外保护剂黄腐酸、7%载体高岭土、0.5 μL/mL 20%氯氟吡氧乙酸。

表7　大豆间座壳菌SC02可湿性粉剂复配剂质量检测结果

Table 7　Quality test results of wettable powder mixture of *D. sojae* SC02

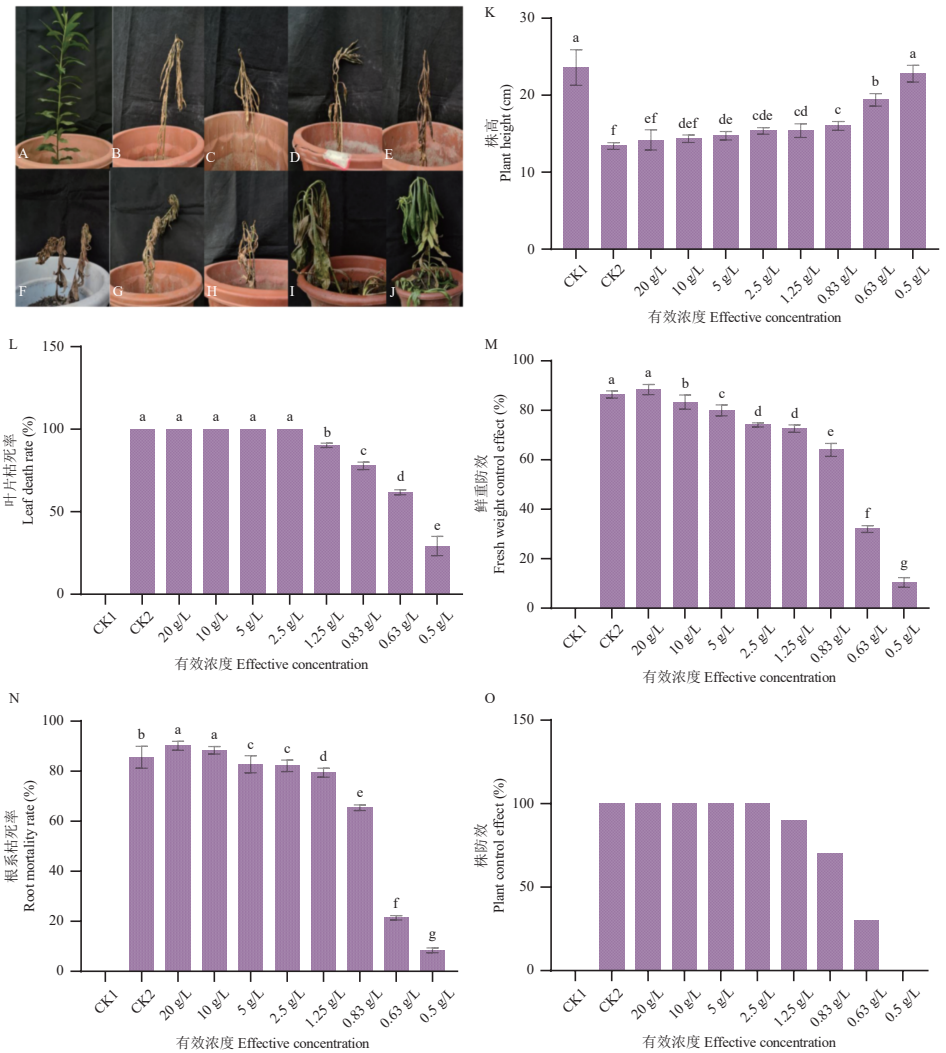
指标 Index	国家标准值 National standards	测量值 Measured value
润湿时间 Wetting time (s)	≤180	36±1
悬浮率 Suspensibility (%)	≥70	74
含孢量 Spore content (CFU/g)	–	1.65×10^9
pH	5.0–8.0	6.5
细度 Fineness (%)	≥90	92
起泡性 Frothiness (mL)	≤10 mL	7 mL
干燥减量 Drying reduction (%)	≤6	5.65
贮存稳定性 Storage stability (%)	≥80	≥81.5

2.5　盆栽防效试验

如图6所示，接种20 d后，大豆间座壳菌SC02可湿性粉剂复配剂在不同浓度下对加拿大一枝黄花均表现出良好的防治效果。喷药处理的植株在所有生物量指标（株高、叶片数量、鲜重、根系）上均显著降低（P<0.001），表明制剂严重抑制了植株的生长。由图6-K–O可知，在2.5 g/L及以上浓度时，目标杂草致死率可达100%，且在此高浓度区间，其防治效果优于化学除草剂对照组。在低浓度区间（0.5–0.63 g/L），药效显著下降，致死率仅维持在30%及以下。从株高变化可见，低浓度区间植株株高接近清水处理组，说明植株在处理后即使受到损伤，也依然能够恢复，表明该浓度范围不适合用于实际防治。而浓度在0.83–1.25 g/L下，该复配剂对加拿大一枝黄花的株防效为70%–90%，鲜重防效达63%–73%，根系枯死率为65%–80%，仍表现出良好的抑制效果，可导致植株最终死亡。同时，在所有处理组下，发生显著变化的梯度均在0.83 g/L浓度以下，说明制剂药效在0.83 g/L浓度后呈梯度递减趋势。

3　讨论

加拿大一枝黄花是一种危害严重的外来入侵植物，具有生长迅速、传播能力强和抗逆性高等特点[38]。目前，化学防治因其高效性仍是控制该入侵种的主要手段。草甘膦作为内吸型除草剂的代表，被广泛用于加拿大一枝黄花的防除。叶梅荣等[39]使用7.5 mL/L 41%草甘膦水剂处理加拿大一枝黄花



A–J:CK1清水、CK2氯氟吡氧乙酸,20、10、5、2.5、1.25、0.83、0.63、0.5 g/L稀释浓度处理效果;K–O:盆栽防治试验中株高、叶片枯死率、鲜重防效、根系枯死率、株防效结果

A–J: CK1 distilled water, CK2 clopyralid, 20, 10, 5, 2.5, 1.25, 0.83, 0.63, 0.5 g/L dilution concentration treatment effect. K–O: Plant height, leaf necrosis rate, fresh weight control effect, root necrosis rate, and plant control effect results in potted control trials

图6 盆栽试验结果

Fig. 6 Results of the pot experiments

30 d后，其对地上部和根系的鲜重防效分别达到71.94%和68.33%，株防效为87.22%。然而，加拿大一枝黄花常入侵人类活动频繁的区域，如田边、林缘和路旁，草甘膦的非选择性灭杀特性易对周边作物、人畜及环境造成负面影响。本研究选用氯氟吡氧乙酸作为化学防治药剂，其对加拿大一枝黄花的鲜重防效超过80%，株防效达90%以上，效果优于前人研究结果，且在保证高效防控的同时对环境更友好。此外，生物防治作为化学防治的替代策略也显示出潜力。前人研究发现，齐整小核菌SC64菌株对入侵植物加拿大一枝黄花具有较强的致病性，所制备的生物农药在施药28 d后株防效为43%–71%，但其效果易受空气湿度制约[40]。本研究从加拿大一枝黄花植株中分离出大豆间座壳菌SC02，该菌株稳定性更高、致病速度更快，在适宜条件下最快15 d即可引起全面发病，表现出良好的应用前景。

单一化学防治或生物防治均存在一定局限性，因此，复配使用已成为目前防控入侵植物的主流策

略。例如，单独使用氯氟吡氧乙酸时，加拿大一枝黄花的根腐率最高仅为58%；而与草甘膦异丙胺盐复配后，根内药剂浓度显著提高，根腐率提升至80%，但该研究对地上部分的防效不佳，仅为30%[41]。与之相比，本研究将氯氟吡氧乙酸与病原真菌大豆间座壳菌SC02复配使用，该复配处理在根腐率上达到了80%以上的同等优异效果，同时叶片枯死率达90%以上，表明其对地上与地下部分均具有优良的防控效果。该复配处理综合株防效达90%，复发率显著降低，防治效果突出，同时使化学除草剂用量减少50%，进一步证明了生物辅助策略在除草剂研发与应用中的重要作用。通过分离、纯化与专一致病性测定，本研究成功获得一株对加拿大一枝黄花具有强致病性的大豆间座壳菌菌株。在此基础上，系统筛选了载体、紫外保护剂、分散剂、润湿剂及化学除草剂，并通过正交试验优化配比，最终确定可湿性粉剂的配方为：3%吐温80、1%木质素磺酸钠、0.9%黄腐酸、0.5 μL/mL的20%氯氟吡氧乙酸、7%高岭土，以及40%浓度为1×10^9 CFU/mL的SC02菌株孢子液。该制剂经验证符合国家相关标准。与现有研究相比，本试验将化学除草剂与致病真菌复配使用，丰富了对加拿大一枝黄花的防治选择，在保证优良防效的同时，显著降低了化学除草剂用量，减轻了环境负担，延长了药剂持效期。该复配制剂在浓度为0.83–1.25 g/L时对加拿大一枝黄花的株防效可达90%，鲜重防效为73%，相比单一化学除草剂氯氟吡氧乙酸具有污染小、效果更持久的优势。

4　结论

大豆间座壳菌SC02能有效防治加拿大一枝黄花，将其与化学除草剂20%氯氟吡氧乙酸复配制成可湿性粉剂后，对加拿大一枝黄花的株防效达90%，鲜重防效为73%，防除效果良好，应用前景广阔。

参考文献

[1] 鞠瑞亭, 李慧, 石正人, 等. 近十年中国生物入侵研究进展 [J]. 生物多样性, 2012, 20(5): 581-611.
Ju RT, Li H, Shi ZR, et al. Progress of biological invasions research in China over the last decade [J]. Biodivers Sci, 2012, 20(5): 581-611.

[2] Theoharides KA, Dukes JS. Plant invasion across space and time: factors affecting nonindigenous species success during four stages of invasion [J]. New Phytol, 2007, 176(2): 256-273.

[3] 杨昌洪, 肖晓华, 刘春, 等. 噬菌核霉可湿性粉剂防治油菜菌核病试验示范 [J]. 南方农业, 2016, 10(19): 19-21.
Yang CH, Xiao XH, Liu C, et al. Experimental demonstration on control of *Sclerotinia sclerotiorum* with wettable powder [J]. South China Agric, 2016, 10(19): 19-21.

[4] 陈娥. 顶孢霉可湿性粉剂和微粉剂的药效评价及田间应用技术研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
Chen E. Evaluation and field application technology of WP and MDP of *Acremonium hansfordii* [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016.

[5] 王均伟, 黄晓慧, 杨然迪, 等. 草甘膦与新型原卟啉原氧化酶抑制剂X18002复配减量应用研究 [J]. 农药学学报, 2023, 25(4): 817-828.
Wang JW, Huang XH, Yang RD, et al. Study on usage reduction of glyphosate mixed with a novel protoporphyrinogen oxidase inhibitor-X18002 [J]. Chin J Pestic Sci, 2023, 25(4): 817-828.

[6] 何丽烂, 区焯林, 王芳, 等. 尖孢镰刀菌与草甘膦复配对空心莲子草防御酶的影响 [J]. 广东农业科学, 2011, 38(22): 78-79, 86.
He LL, Ou ZL, Wang F, et al. Influence of *Fusarium oxysporum* mixed with Glyphosate on *Alternanthera philoxeroides* defense enzymes [J]. Guangdong Agric Sci, 2011, 38(22): 78-79, 86.

[7] 李鑫, 郭冉, 杨娟, 等. 黏质沙雷氏菌Ha1培养条件优化及其与化学除草剂复配研究 [J]. 杂草学报, 2020, 38(2): 21-32.
Li X, Guo R, Yang J, et al. Optimization of culture conditions of *Serratia marcescens* Ha1 and its compounding with herbicides [J]. J Weed Sci, 2020, 38(2): 21-32.

[8] 商美妮. 木霉固体发酵培养条件优化及含木霉生物基质育苗效应研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
Shang MN. Study on optimization of solid fermentation culture conditions of *Trichoderma* and the effect of biological substrate containing *Trichoderma* on seedling growth [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.

[9] 翟森, 靳文涛, 柳丽杰, 等. 龙泉山森林公园入侵植物加拿大一枝黄花的调查及风险性分析 [J]. 安徽农业科学, 2025, 53(9): 118-122.
Zhai S, Jin WT, Liu LJ, et al. Investigation and risk analysis of invasive plant *Solidago canadensis* in longquanshan forest park [J]. J Anhui Agric Sci, 2025, 53(9): 118-122.

[10] 王前程, 张迎迎, 戴陶宇, 等. 拟康宁木霉T-51菌株对番茄枯萎病的生物防治及其机理研究 [J]. 西北植物学报, 2022, 42(6): 974-982.
Wang QC, Zhang YY, Dai TY, et al. Study on biological control effect and mechanism of *Trichoderma koningiopsis* T-51 on tomato *Fusarium* wilt [J]. Acta Bot Boreali Occidentalia Sin, 2022, 42(6): 974-982.

[11] 袁树忠, 何平平, 廉吉衷, 等. 一种镰刀菌对空心莲子草的致病力与寄主专一性测定 [J]. 中国生物防治, 2006(2): 137-141.

Yuan SZ, He PP, Lian JZ, et al. Host range and pathogenicity of a *Fusarium* species to *Alternanthera philoxeroides* [J]. Chin J Biol Control, 2006(2): 137-141.

[12] 李思, 尚晓静, 张富美, 等. 蓝莓根部内生木霉分离鉴定及其拮抗作用 [J]. 核农学报, 2022, 36(8): 1569-1578.
Li S, Shang XJ, Zhang FM, et al. Diversity of endophytic *Trichoderma* in the roots of blueberries and its antagonistic effects [J]. J Nucl Agric Sci, 2022, 36(8): 1569-1578.

[13] 司璐, 吴彤, 甄锦程, 等. 大兴安岭凋落物中可培养真菌分离、鉴定及活性筛选 [J]. 中国农学通报, 2022, 38(26): 118-123.
Si L, Wu T, Zhen JC, et al. Isolation, identification and activity screening of culturable fungi from litter in the greater Hinggan Mountains [J]. Chin Agric Sci Bull, 2022, 38(26): 118-123.

[14] 闫佳佳, 万璐, 尤梦瑶, 等. 产香兰素内生真菌GP20的鉴定及发酵条件研究 [J]. 中国调味品, 2022, 47(11): 44-49.
Yan JJ, Wan L, You MY, et al. Study on identification and fermentation conditions of vanillin-producing endophytic fungus GP20 [J]. China Condiment, 2022, 47(11): 44-49.

[15] 巨亚雯, 陈亚丽, 徐蓬, 等. 植物生长调节剂与磺酰脲类除草剂混用对防除麦田杂草的协同增效作用 [J]. 杂草学报, 2022, 40(4): 43-49.
Ju YW, Chen YL, Xu P, et al. Synergistic interaction of plant growth regulators mixed with sulfonylurea herbicides on weeding in wheat fields [J]. J Weed Sci, 2022, 40(4): 43-49.

[16] 张英财, 农向群, 张泽华, 等. 18种化学农药与绿僵菌相容性研究 [J]. 中国生物防治学报, 2012, 28(2): 186-191.
Zhang YC, Nong XQ, Zhang ZH, et al. Compatibility of eighteen chemical pesticides with *Metarhizium anisopliae* [J]. Chin J Biol Control, 2012, 28(2): 186-191.

[17] 朱文珊. 长枝木霉拌种对芸豆生长及根际土壤酶活性的影响 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2022.
Zhu WS. Effects of seed dressing in *Trichoderma longibrachiatum* on kidney bean growth and enzyme activities in rhizosphere soil [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2022.

[18] 何祖传, 周健, 张洪泉, 等. 化学除草剂对加拿大一枝黄花的防除效果试验 [J]. 现代农业科技, 2020(10): 82, 88.
He ZC, Zhou J, Zhang HQ, et al. Effect of chemical herbicide on *Solidago canadensis* L [J]. Mod Agric Sci Technol, 2020(10): 82, 88.

[19] 韩敏, 张海艳, 洪爱梅, 等. 几种除草剂对加拿大一枝黄花的防除效果评价 [J]. 世界农药, 2024, 46(10): 56-62.
Han M, Zhang HY, Hong AM, et al. Evaluation of the control effects of several herbicides on *Solidago canadensis* [J]. World Pestic, 2024, 46(10): 56-62.

[20] 王博, 李嘉, 马莉莉, 等. 异丙甲草胺乳油不同用量防治玉米田禾本科杂草田间药效试验 [J]. 云南农业科技, 2021(5): 36-38.
Wang B, Li J, Ma LL, et al. Field experiments of metolachlor EC with different amounts on grassy weeds in corn field [J]. Yunnan Agric Sci Technol, 2021(5): 36-38.

[21] 咸洪泉, 李雅华. 木霉菌株Td31代谢产物对立枯丝核菌的拮抗作用 [J]. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(5): 566-570.
Xian HQ, Li YH. The antagonism of metabolite by Trichoderma. Td31 to *Rhizoctonia solani* [J]. J Shenyang Agric Univ, 2009, 40(5): 566-570.

[22] 孙文. 短短芽胞杆菌ch2-22发酵动力学与水分散粒剂的研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
Sun W. Study on fermentation kinetics of *Brevibacillus brevis* Ch2-22 and preparation of water dispresible granule [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017.

[23] 陈慧. 绛红褐链霉菌颗粒剂的研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
Chen H. Reseach of granule formulation for *Streptomyces* purpeofuscus [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2015.

[24] 古丽君, 徐秉良, 张德瑞, 等. 深绿木霉病原菌制剂加工工艺研究: 中国植物保护学会2009年学术年会[C], 武汉, 2009.
Gu LJ, Xu BL, Zhang DR, et al. Study on Processing Technology of *Trichoderma atroviride* Pathogen Preparation[C]. Proceedings of the 2009 Annual Conference of the China Society of Plant Protection, Wuhan, 2009.

[25] 戴启星. 长枝木霉T6菌株可湿性粉剂研制及复配菌剂协同增效作用研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
Dai QX. Development of *Trichoderma longibrachiatum* T6 wettable powder and synergistic compounding agents [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.

[26] 邹益泽. 草茎点霉水分散粒剂的研发及其对鸭跖草防除效果研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
Zou YZ. Development of *Phoma herbarum* WG and its control effect against *Commelina communis* L. [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.

[27] 王建锋, 陆宁海. 木霉菌在农业中的研究与应用前景 [J]. 安徽农学通报, 2008, 14(14): 41-43, 136.
Wang JF, Lu NH. Rogress in agriculture research with *Trichoderma* [J]. Anhui Agric Sci Bull, 2008, 14(14): 41-43, 136.

[28] 叶素丹, 冯明光. 生防真菌耐旱特性的生理生化基础及其利用 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2383-2387.
Ye SD, Feng MG. Physiological and biochemical bases of xero-tolerance of fungal biocontrol agents and their application [J]. Chin J Appl Ecol, 2004, 15(12): 2383-2387.

[29] 杨肖. 金龟子绿僵菌和小檗碱复配及其可湿性粉剂和水分散粒剂的制备 [D]. 北京: 北京化工大学, 2021.
Yang X. Preparation of *Metarhizium anisopliae* and berberine and their wettable powder and water dispersible granuie [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.

[30] 农药可湿性粉剂润湿性测定方法: GB/T 5451-2001 [S]. 2001.

Test method for wettability of pesticide wettable powders: GB/T 5451-2001 [S]. 2001.

[31] 农药可湿性粉剂悬浮率剂测定方法: GB/T 14825-1993 [S]. 1993.
Test method for suspensibility of pesticide wettable powders: GB/T 14825-1993 [S]. 1993.

[32] 冯月. 木霉菌株产酶培养及其特定底物酶解过程研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
Feng Y. Studies on cellulase-produced fermentation of *Trichoderma* strains and enzymatic hydrolysis of the specific substrate [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.

[33] 农药pH值的测定方法: GB/T 1601-1993 [S]. 1993.
Test method for pH value of pesticides: GB/T 1601-1993 [S]. 1993.

[34] 国家技术监督局. 农药粉剂、可湿性粉剂细度测定方法: GB/T 16150—1995 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Seive test for dustable and wettable powders of pesticides: GB/T 16150—1995 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.

[35] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 农药持久起泡性测定方法: GB/T 28137-2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Testing method of persistent foaming for pesticides: GB/T 28137-2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.

[36] 农药干燥减量的测定方法: GB/T 30361-2013 [S]. 2013.
Test method for drying reduction of pesticides: GB/T 30361-2013 [S]. 2013.

[37] 周欣欣, 张宏军, 张佳, 等. 除草剂田间药效试验申请应注意的几个问题 [J]. 农药科学与管理, 2012, 33(7): 8-12.
Zhou XX, Zhang HJ, Zhang J, et al. Several problems that should be paid attention to in the application of herbicide field efficacy test [J]. Pestic Sci Adm, 2012, 33(7): 8-12.

[38] 常悦, 李玉静, 李周旭, 等. 基于Maxent和ArcGIS加拿大一枝黄花适生区预测 [J]. 农学学报, 2024, 14(3): 40-47.
Chang Y, Li YJ, Li ZX, et al. Prediction of suitable growing areas of *Solidago canadensis* L. based on maxent and ArcGIS [J]. J Agric, 2024, 14(3): 40-47.

[39] 叶梅荣, 刘庆安, 马纪忠, 等. 41%草甘膦水剂对加拿大一枝黄花的防除效果 [J]. 江苏农业科学, 2010, 38(2): 130-132.
Ye MR, Liu QA, Ma JZ, et al. Controlling effects of 41% glyphosate aqueous solution on *Solidago canadensis* L [J]. Jiangsu Agric Sci, 2010, 38(2): 130-132.

[40] 李玲燕. 生物除草剂齐整小核菌SC64颗粒剂的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
Li LY. A study on solid granule of bioherbicide *Sclerotium rolfsii* strain SC64 [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.

[41] 曹晶晶, 谷涛, 张自常, 等. 防除不同生境下加拿大一枝黄花的除草剂研究 [J]. 杂草学报, 2024, 42(4): 82-90.
Cao JJ, Gu T, Zhang ZC, et al. Research on herbicides for controlling *Solidago canadensis* L. in different habitats [J]. J Weed Sci, 2024, 42(4): 82-90.

（责任编辑　朱琳峰）