爪哇虫草菌CJ01的分离鉴定及其对烟粉虱的控害效果评价

王乔弟[1,2] 阳良旭[1,2] 林 威[1,2] 黄国华[1,2*]

（1. 湖南农业大学，植物病虫害生物学与防控湖南省重点实验室，长沙 410128；2. 岳麓山实验室，长沙 410128）

摘要：为筛选高效的烟粉虱*Bemisia tabaci*生防菌株，从其僵虫中分离虫生真菌，结合形态学特征和ITS序列分析对其进行鉴定，系统测定其生物学特性，并采用喷雾法测定其对烟粉虱成虫的毒力及田间防效。结果表明：从烟粉虱僵虫中分离获得1株虫生真菌菌株，经鉴定为爪哇虫草菌*Cordyceps javanica*，命名为CJ01。该菌株在28 ℃、pH 7.0、24 h全光照条件下生长良好，使用麦芽提取物培养基培养时，其产孢量和生长速度均较高，培养至第7天产孢量为2.38×10^8个/皿。在室内，当该菌株孢子悬浮液浓度为1.0×10^8个/mL时，处理后3 d烟粉虱成虫累计校正死亡率可达83.93%；LC_{50}为5.50×10^6个/mL。该菌株在田间试验中控害效果优异，施药14 d后对茄子田中烟粉虱的防效可达68.56%。表明爪哇虫草菌CJ01对烟粉虱的毒力较好，具有进一步研究和开发为生防制剂的潜力。

关键词：爪哇虫草菌；烟粉虱；致病力；田间试验；鉴定；生物学特性

Isolation and identification of *Cordyceps javanica* strain CJ01 and evaluation of its biocontrol efficacy against tobacco whitefly *Bemisia tabaci*

Wang Qiaodi[1,2] Yang Liangxu[1,2] Lin Wei[1,2] Huang Guohua[1,2*]

（1. Hunan Provincial Key Laboratory for Biology and Control of Plant Diseases and Insect Pests, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan Province, China; 2. Yuelushan Laboratory, Changsha 410128, Hunan Province, China）

Abstract: To identify an effective biocontrol agent against tobacco whitefly *Bemisia tabaci*, an entomopathogenic fungus was isolated and identified from naturally infected whitefly cadavers. The isolate was identified based on morphological characteristics and ITS sequence analysis. Its biological characteristics were systematically evaluated, and its virulence against *B. tabaci* adults and field control efficacy were determined using a spray bioassay. The results showed that a single entomopathogenic fungal isolate was obtained and identified as *Cordyceps javanica*, designated CJ01. The strain grew well at 28 ℃, pH 7.0, under continuous light (24 h), and exhibited relatively high sporulation and growth rate on malt extract agar (MEA). The spore yield reached 2.38×10^8 conidia/plate after 7 days of cultivation. Under laboratory conditions, treatment with a spore suspension of 1.0×10^8 conidia/mL resulted in a cumulative corrected mortality of 83.93% in adult *B. tabaci* at 3 days after treatment, with an LC_{50} of 5.50×10^6 conidia/mL. In field trials, the strain showed excellent control efficacy against *B. tabaci* on eggplant, reaching 68.56% at 14 days after application. These results indicate that *C. javanica* CJ01 possesses strong virulence against *B. tabaci* and has considerable potential for further development as a microbial biocontrol agent.

基金项目：国家大宗蔬菜产业技术体系项目（CARS-23-C08）

* 通信作者（Author for correspondence），E-mail：ghhuang@hunau.edu.cn

收稿日期：2025-12-14

Key words: C*ordyceps javanica*; *Bemisia tabaci*; virulence; field trial; identification; biological characteristics

烟粉虱*Bemisia tabaci*属半翅目粉虱科，是一种全球性农业害虫（De Barro et al.，2011）。该虫具有多食性和强适应性，目前记录已有600多种寄主植物，这使得烟粉虱能够迅速入侵新的生态环境，对当地的生物多样性造成破坏（Xia et al.，2021；Gong et al.，2024）。烟粉虱作为小型刺吸式口器昆虫，可通过多重机制协同作用对寄主植物造成复合伤害，例如直接取食植物汁液导致其生长发育受到阻碍，叶片黄化、枯萎，甚至死亡；分泌蜜露造成煤污病进一步影响植株的光合作用使其生长受阻；传播多种植物病毒，如番茄黄化曲叶病毒（tomato yellow leaf curl virus，TYLCV）、黄瓜花叶病毒（cucumber mosaic virus，CMV）和番茄褪绿病毒（tomato chlorosis virus，ToCV）等30余种，导致番茄、烟草、棉花等重要经济作物产生系统性症状，严重时甚至绝收（De Barro et al.，2011；Wang & Blanc，2021；Wang et al.，2022；Liang et al.，2025）。对烟粉虱的防治目前仍以化学防治为主，该方法具有成本低、见效快、使用简单等特点，应用普遍（Horowitz et al.，2020；Maluta et al.，2021）。然而，由于烟粉虱世代重叠严重，连续用药使得其抗药性问题日益突出，已对多种药剂产生了不同程度的抗性（胡明鑫等，2023；Ji et al.，2024）。此外，在烟粉虱抗药性逐渐增强的背景下，化学农药用量也逐渐增加，这必然会对自然环境造成一定破坏。因此，亟需探寻绿色高效的生物防治资源，为烟粉虱绿色防控新技术的研发提供备选资源。

利用昆虫病原微生物（尤其是昆虫病原真菌）进行害虫防治，是替代化学农药最具潜力的绿色生防手段之一。目前，在烟粉虱的真菌防治研究中，报道较多且应用较成熟的主要有座壳孢*Aschersonia* spp.、玫烟色棒束孢*Isaria fumosorosea*、蜡蚧轮枝菌*Verticillium lecanii*和球孢白僵菌*Beauveria bassiana*（Sani et al.，2020；Li et al.，2024）等菌种。另外，爪哇虫草菌*Cordyceps javanica*（原为*Isaria javanica*）是一种寄主广泛的昆虫病原真菌。如任丽梅等（2022）发现爪哇棒束孢*Isaria javanica*菌株GZQ-1对烟粉虱2龄若虫具有强致病力，致死率为92.68%，展现出高效防治烟粉虱的潜力。然而，相较于上述主要生防菌种，目前用于防治烟粉虱的爪哇虫草菌优良菌株的筛选、评价及其应用研究仍显不足，且多数研究仅停留在室内毒力测定阶段，缺乏从田间自然发病种群中筛选并经过严格大田试验验证的优良野生型菌株。

本研究拟从田间自然罹病的烟粉虱成虫中分离和筛选高效菌株，通过形态学和分子生物学方法对分离菌株进行鉴定，系统测定优良菌株对温度、pH、光照和培养基的适应性，并通过室内毒力测定和田间药效试验对其生防潜力进行全面评价，旨在为烟粉虱的绿色防控提供具有实际应用价值的候选菌株，为新型微生物杀虫剂的开发提供理论依据和菌株资源。

1 材料与方法

1.1 材料

供试僵虫：自广州市从化区扶桑花叶片上采集罹病死亡的烟粉虱成虫，虫体表面长满白色菌丝，带回实验室后于4 ℃保存供试。

供试虫源：烟粉虱为采集自湖南农业大学耘园基地的野生种群，寄主植物为辣椒。采回后被隔离饲养在实验室温室内的黄瓜苗上继代繁殖，取羽化24 h之内的成虫供试。饲养条件为温度（28±1）℃、光周期12 L∶12 D、相对湿度（75±5）%。

供试植物：黄瓜品种为津优1号，购自电商平台，于温室内培养，条件同烟粉虱饲养。生长期间黄瓜苗置于干净的长113 cm×宽59 cm×高50 cm养虫笼内隔离培养，待生长至4~5叶期供试。

供试培养基：马铃薯葡萄糖琼脂（potato dextrose agar，PDA）培养基配方为马铃薯200 g、葡萄糖20 g、琼脂18 g、蒸馏水1 L；马铃薯蔗糖琼脂（potato sucrose agar，PSA）培养基配方为马铃薯200 g、蔗糖20 g、琼脂18 g、蒸馏水1 L；沙氏葡萄糖琼脂（Sabouraud dextrose agar，SDA）培养基配方为蛋白胨10 g、葡萄糖40 g、琼脂15 g、蒸馏水1 L；沙氏葡萄糖酵母浸膏（Sabouraud dextrose agar with yeast extract，SDAY）培养基配方为蛋白胨10 g、葡萄糖40 g、琼脂15 g、酵母浸膏2 g、蒸馏水1 L；麦芽提取物（malt extract agar，MEA）培养基配方为麦芽浸粉30 g、蛋白胨3 g、琼脂15 g、蒸馏水1 L；改良马丁琼脂（modified Martin broth，MMB）培养基配方为蛋白胨5 g、磷酸氢二钾1 g、硫酸镁0.5 g、酵母浸出粉2 g、葡萄糖20 g、琼脂15 g、蒸馏水1 L。

试剂和仪器：D3195 HP Fungal DNA提取试剂盒，广州飞扬生物工程有限公司；其他试剂均为国产分析纯。DYY-6C电泳仪，北京六一生物科技有限公司；Gel Logic 212化学发光成像系统、S1000™ PCR仪，美国Bio-Rad公司；AxioCamMRc倒置显微镜，德国Carl Zeiss公司；GZX-150BSH-III光照培养箱，上海新苗医疗器械制造有限公司；3WBS-16背负式手动喷雾器，兰陵县保农植保机械有限公司。

1.2 方法

1.2.1 菌株的分离纯化

使用无菌蒸馏水清洗供试僵虫体表污迹，自然晾干后，使用75%酒精浸泡30~45 s进行表面消毒，再经2%次氯酸钠消毒2 min，最后用无菌蒸馏水冲洗3次，沥干水分后将虫体接于PDA培养基上，置于温度28 ℃、光周期12 L∶12 D、相对湿度(50±5)%的光照培养箱中培养3~6 d，待其长出菌丝后在虫体周围挑取菌丝转移至新的PDA培养基上纯化培养，重复3次，确保获得遗传纯净的菌株，单孢分离选出长势较好的菌株接种于PDA斜面培养基，于4 ℃保藏备用。

1.2.2 分离菌株的形态特征观察

将分离菌株的分生孢子点接于PDA平板中央，于27 ℃倒置培养，每日观察菌落形态及颜色。培养5~7 d后，挑取新鲜菌丝于灭菌载玻片上，并用乳酸酚棉蓝染液染色，在倒置显微镜下观察菌株菌丝、产孢结构和孢子形态的显微结构。共观察4个视野，测量50个分生孢子。

1.2.3 分离菌株的分子生物学鉴定

取分离菌株的菌丝体，用D3195 HP Fungal DNA提取试剂盒提取真菌基因组DNA，选用真菌通用引物ITS1(5′-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3′)/ITS4(5′-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3′)对其rDNA-ITS序列进行PCR扩增。本研究所用引物由擎科生物科技有限公司合成。50 μL PCR扩增体系：2×Master Mix 25 μL、DNA模板5 μL、正反向引物各2.5 μL、ddH_2O 15 μL。PCR反应程序：95 ℃预变性3 min；95 ℃变性15 s，58 ℃退火15 s，72 ℃延伸2 min，35个循环；72 ℃终延伸5 min。取扩增产物送擎科生物科技有限公司进行测序。将测序所得序列利用Clustal X 2.0、BioEdit 7.0软件进行剪切、多序列比对和拼接处理后，在NCBI数据库中进行BLAST比对，下载与目标序列高度相似的序列，使用MEGA 11.0软件采用邻接法构建系统进化树，进化树分支的置信度采用bootstrap法分析，重复次数为1 000次。

1.2.4 分离菌株的生物学特性测定

以PDA培养基为基础培养基，分别测定不同温度、光周期、pH对菌株菌丝生长和产孢量的影响。采用划线法将分离菌株接种至PDA培养基上进行活化，于温度28 ℃、光周期12 L∶12 D、相对湿度(50±5)%条件下培养2 d，使用直径5 mm的灭菌打孔器在菌落边缘打取菌饼备用。用灭菌接种环挑取菌饼接至新的PDA平板中心，分别置于24、26、28、30、32、34 ℃恒温培养箱中暗培养，pH自然，3 d后每隔2 d定时采用十字交叉法测量菌落直径，同时记录菌落形态变化，直至长出孢子停止观察。在每个长出孢子的培养皿中加入15 mL灭菌0.1%吐温80水溶液清洗菌落，对孢子进行洗脱，摇匀并稀释至适宜浓度后用血球计数板在倒置显微镜下统计孢子数量，计算每皿产孢量，确定分离菌株菌丝生长和产孢的最佳培养温度。在最适培养温度下，设置24 L、12 L∶12 D、24 D三个光周期处理，pH自然；在最适温度和光周期下，设置pH 4、5、6、7、8、9六个处理；在最适温度、光周期、pH条件下，设置SDA、PDA、SDAY、MEA、MMB、PSA六个培养基处理；采用上述方法测定分离菌株的菌落直径和产孢量，筛选最适分离菌株生长的光周期、pH和培养基。上述所有试验处理均设3次重复。

1.2.5 分离菌株的室内毒力测定

将分离菌株接种至1.2.4筛选出的最适培养基MEA平板上，并调节为最适pH，于最适温度和最佳光周期条件下活化2 d，再将其转接到新的MEA平板上培养10 d。待菌株大量产孢后，加入少量灭菌0.1%吐温80无菌水溶液，并用刮刀轻刮菌丝从而收集分生孢子。将菌液倒入灭菌烧杯中，将堆积的孢子打散使其均匀悬浮，用4层灭菌医用纱布过滤。使用血球计数板统计所得孢子浓度，分别将其配制成浓度为1.0×10^5、1.0×10^6、1.0×10^7和1.0×10^8个/mL的孢子悬浮液。取上述不同浓度孢子悬浮液分别喷施至经表面消毒的4~5叶期离体黄瓜叶片上，每片喷雾量4 mL。待晾干后将叶片置于铺有湿润滤纸的直径9 cm培养皿中，对照喷施等量含0.1%吐温80的无菌水，每皿接入60头羽化24 h之内的烟粉虱成虫(1个重复)，每个处理3个重复。将培养皿置于温度(28±1) ℃、光周期12 L∶12 D条件下培养，待观察到烟粉虱体表已长满白色菌丝体确定为被感染，同时每天记录死亡虫数并计算死亡率和校正死亡率，共记录3 d。死亡率=处理死亡总虫数/处理总虫数×

100%；校正死亡率=（处理组死亡率−对照组死亡率）/（1−对照组死亡率）×100%。运用Probit概率值分析法求出毒力回归方程、不同致死浓度LC_{25}和LC_{50}、半致死时间LT_{50}、95%置信区间、卡方值、相关系数。

1.2.6　*分离菌株的田间防效评价*

2024年10月在湖南省常德市安乡县安康村安兴村蔬菜基地烟粉虱为害严重的温室大棚开展田间试验。大棚种植作物为茄子，每垄长42 m，宽2 m，84穴/行，双行种植，共8垄。在大棚中设置16个小区，每个小区长15 m、宽2 m，小区随机分布，小区之间设置1~2 m宽过道作为隔离带。分离菌株孢子悬浮液处理浓度分别为1.0×10^8、1.0×10^7、1.0×10^6个/mL，以喷施等量含0.1%吐温80的无菌水作为对照，每个处理4个重复，每个重复1个小区。用背负式手动喷雾器将上述4个处理均匀喷雾于茄子叶片正反面，每个小区喷施1 500 mL。喷雾处理后大棚保持高湿环境24 h，然后正常管理。分别于施药前、施药后7 d和14 d调查活虫数并计算虫口减退率和防效。虫口减退率=（施药前活虫数−施药后活虫数）/施药前活虫数×100%；防效=（处理区虫口减退率−对照区虫口减退率）/（100−对照区虫口减退率）×100%。

1.3　数据分析

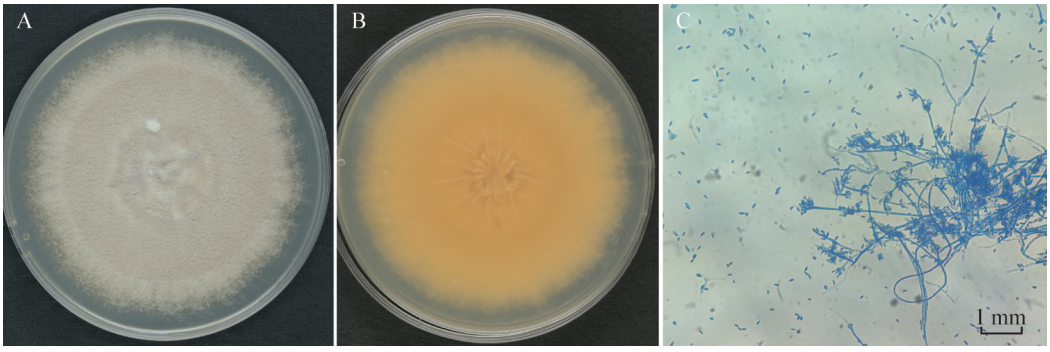
试验数据用Excel 2021、SPSS 20.0统计软件进行处理分析，应用Tukey's检验法进行差异显著性检验。采用Graphpad Prism 10软件绘图。

2　结果与分析

2.1　烟粉虱僵虫上分离菌株的鉴定

2.1.1　*形态学特征*

从罹病烟粉虱成虫中分离得到1株真菌，命名为CJ01，在PDA培养基上培养初期菌丝呈白色，质地绒状，背面呈米白色；至产孢时，孢子层为粉状，长势均匀，菌落呈浅棕色粉末状（图1-A、B）。在倒置显微镜下，分生孢子无色，近椭圆形、圆形或长卵形，营养菌丝细长无色；分生孢子梗形成穗状产孢结构（图1-C）。



A：菌落正面；B：菌落反面；C：产孢结构和分生孢子。A: Front of the colony; B: reverse of the colony; C: conidiogenous structures and conidia.

图1　菌株CJ01在PDA培养基上的形态特征

Fig. 1　Morphological characteristics of strain CJ01 cultured on PDA medium

2.1.2　*分子生物学鉴定结果*

对菌株CJ01的rDNA-ITS序列进行PCR扩增，得到大小约521 bp的目的条带。将扩增产物进行测序，所得rDNA-ITS序列片段与GenBank中爪哇虫草菌相关序列的相似度介于99.62%~99.81%之间。系统进化树显示，菌株CJ01与爪哇虫草菌属一个遗传分支且有较高支持度（图2）。综合形态特征鉴定和rDNA-ITS序列分析，将菌株CJ01最终鉴定为爪哇虫草菌*Cordyceps javanica*。

2.2　菌株CJ01的生物学特性

2.2.1　*不同温度对菌株CJ01菌丝生长和产孢的影响*

菌株CJ01在不同培养温度下均能生长，在培养初期（1~3 d）温度对菌丝生长没有显著影响，培养至第9天，菌落直径随着温度升高呈现先升高后降低的趋势，其中28 ℃最适其生长，菌落直径最大，达47.66 mm，显著高于其他温度处理下的菌落直径；34 ℃下菌株菌丝生长受到显著抑制，菌落直径为41.14 mm，显著低于其余温度处理下的菌落直径（图3-A）。培养到第9天时，菌株CJ01在28 ℃下的产孢量最高，达1.58×10^8个/皿，显著高于其余温度处理（图3-B）。综合分析，菌株CJ01最适生长和产孢的温度是28 ℃。

2.2.2　*不同光周期对菌株CJ01菌丝生长和产孢的影响*

光照对菌丝生长具有显著调控作用，培养初期

24 h光照和12 h光照处理的菌落直径没有显著差异；培养至第9天，菌落直径随光照时长的增加呈明显上升趋势，其中在24 h全光照下菌丝生长最快，菌落直径最大，达48.93 mm；12 h光照处理次之，菌落直径达47.66 mm；二者均显著大于黑暗条件下的菌落直径（图4-A）。培养9 d时，菌株CJ01的产孢量随着光照时长的增加而增加，在24 h全光照下产孢量为2.24×10⁸个/皿，与12 h光照培养下的产孢量2.18×10⁸个/皿无显著差异，但二者均显著高于黑暗条件下培养时的产孢量0.93×10⁸个/皿（图4-B）。综上所述，黑暗条件不利于菌株CJ01的生长和产孢，24 h全光照更适宜菌株CJ01生长和产孢。

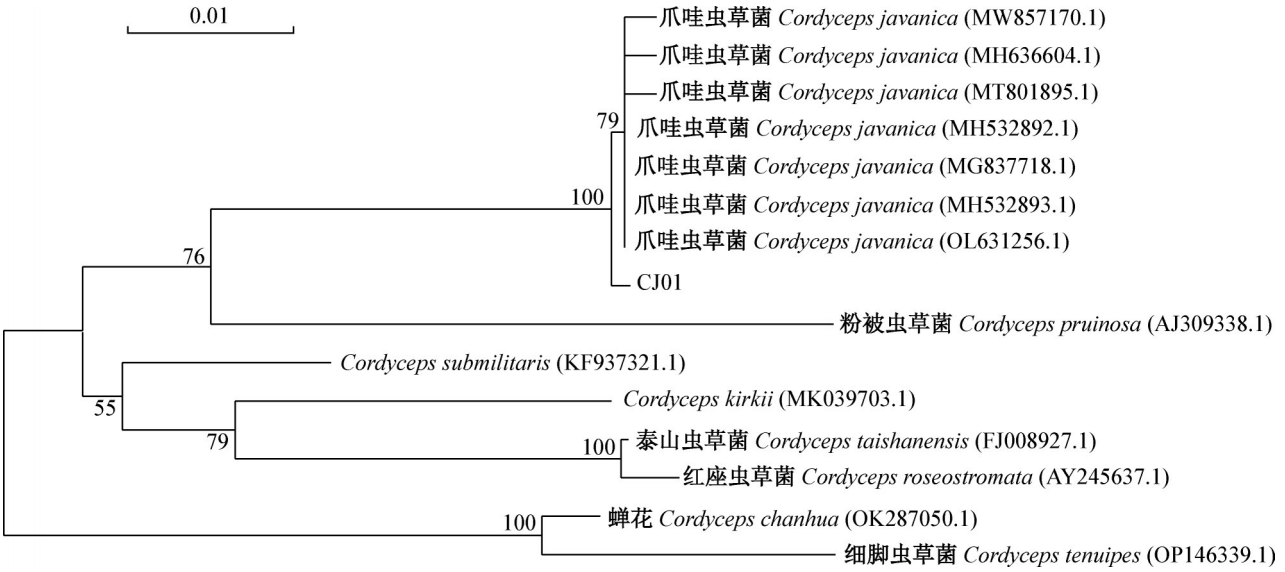


图2 基于rDNA-ITS序列采用邻接法构建菌株CJ01及相关菌株的系统进化树

Fig. 2 Neighbor-joining phylogenetic tree of strain CJ01 and related strains based on rDNA-ITS sequences

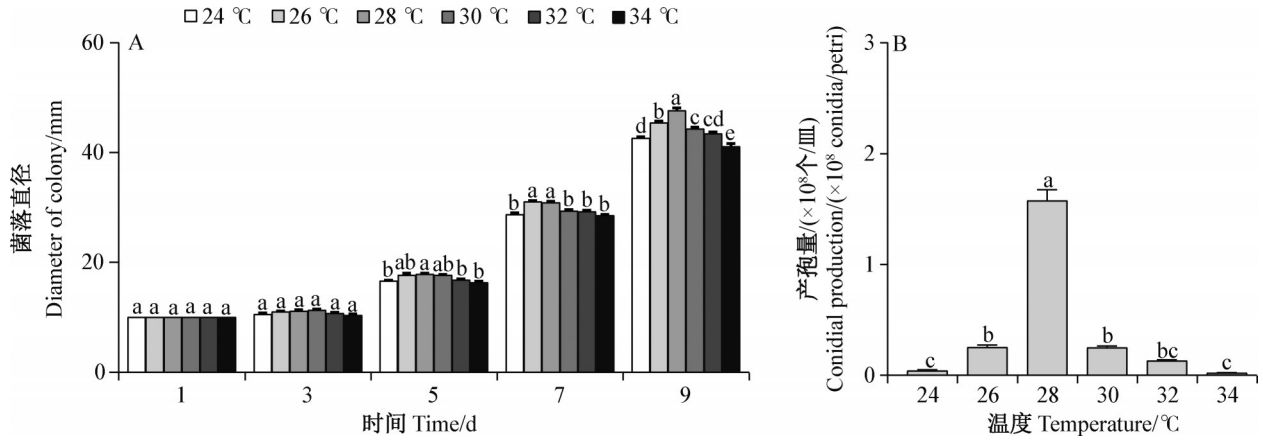


图3 不同温度对菌株CJ01菌丝生长（A）和产孢量（B）的影响

Fig. 3 Effects of different temperatures on mycelial growth (A) and conidial production (B) of strain CJ01

图中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示不同温度处理间经Tukey's检验法检验差异显著（P<0.05）。Data are presented as the mean±SE. Different lowercase letters indicate significant differences among temperature treatments as determined by Tukey's test (P<0.05).

2.2.3 不同pH对菌株CJ01菌丝生长和产孢的影响

菌株CJ01对酸碱环境的耐受范围较广，在pH 4~9内均能生长，但不同pH条件下菌落直径存在显著差异，生长至第9天时，菌株在pH为7条件下生长最快，菌落直径达47.66 mm，显著高于其他pH条件下的菌落直径；在pH 6条件下菌落直径次之，为42.55 mm；在pH 9和pH 4条件下菌丝生长受到显著抑制，菌落直径最小，分别为15.00 mm和15.78 mm，显著小于其他pH条件下的菌落直径（图5-A）。培养9 d后，pH 7条件下菌株CJ01的产孢量最大，为

4.43×10⁸个/皿，显著高于其他pH条件下的产孢量，且产孢量随pH的增大呈先增加后减少的趋势，在pH为4和9条件下的产孢量最低，均为0.41×10⁸个/皿（图5-B）。综合分析发现pH过高或过低都不利于菌丝生长和产孢，在培养过程中要控制菌株生长的酸碱环境，最适菌株CJ01生长和产孢的pH为7。

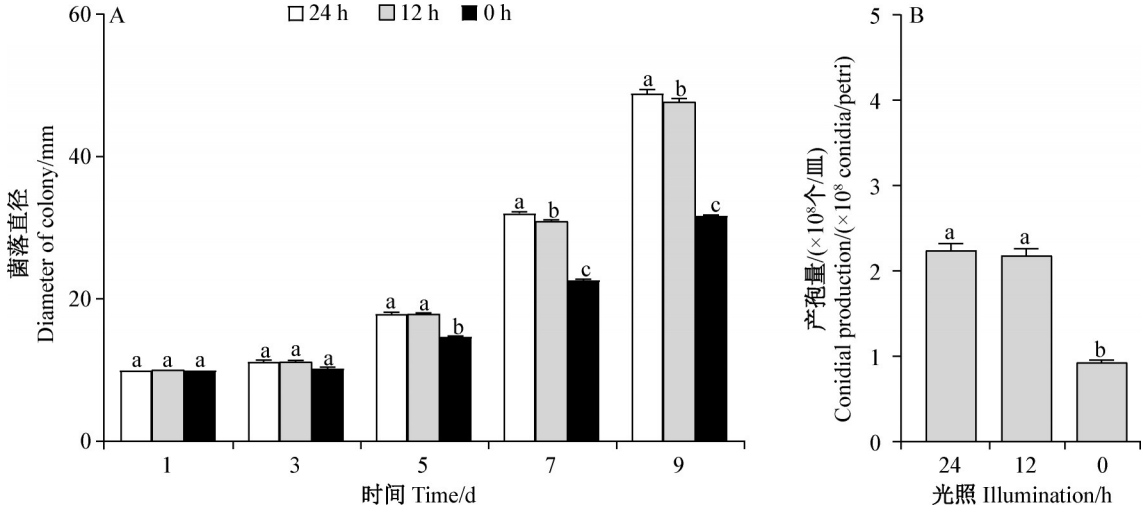


图4 不同光周期对菌株CJ01菌丝生长（A）和产孢量（B）的影响

Fig. 4　Effects of different photoperiods on mycelial growth (A) and conidial production (B) of strain CJ01

图中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示不同光照处理间经Tukey's检验法检验差异显著（P<0.05）。Data are presented as the mean±SE. Different lowercase letters indicate significant differences among different photoperiod treatments as determined by Tukey's test (P<0.05).

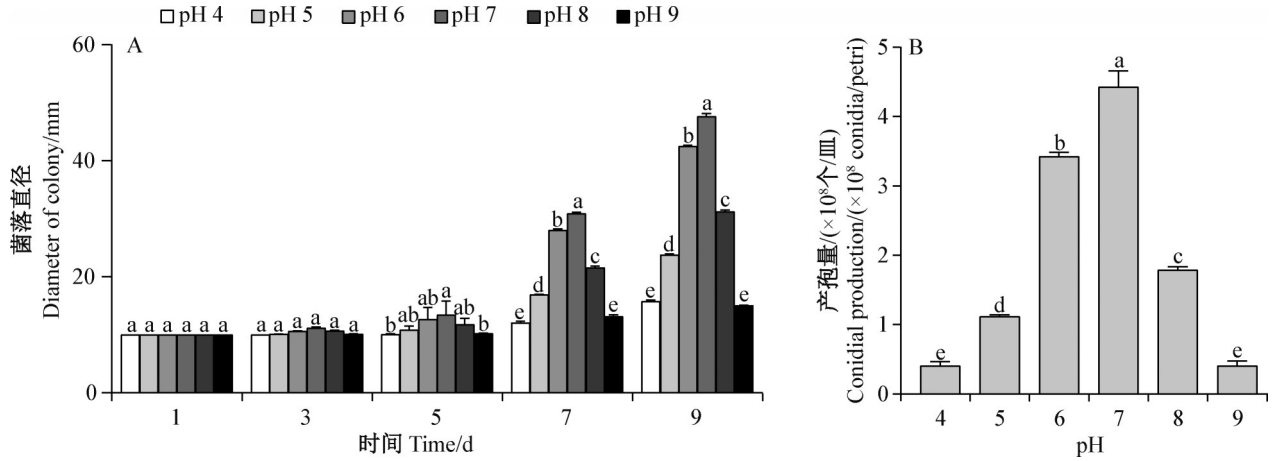


图5 不同pH对菌株CJ01菌丝生长（A）和产孢量（B）的影响

Fig. 5　Effects of different pH values on mycelial growth (A) and conidial production (B) of strain CJ01

图中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示不同pH处理间经Tukey's检验法检验差异显著（P<0.05）。Data are presented as the mean±SE. Different lowercase letters indicate significant differences among pH treatments as determined by Tukey's test (P<0.05).

2.2.4　不同培养基对菌株CJ01菌丝生长和产孢的影响

菌株CJ01在各培养基上的菌落直径均无显著差异，培养7 d后，在SDA培养基上培养的菌丝生长最快，菌落直径最大，为28.18 mm；在MEA培养基上培养时次之，菌落直径为26.8 mm（图6-A）。菌株CJ01在6种培养基上生长7 d后，在MMB和MEA培养基上培养时的产孢量显著大于在其他4种培养基上培养时的产孢量，分别为2.53×10⁸个/皿和2.38×10⁸个/皿，在PSA培养基上培养时产孢量最少，仅为0.85×10⁸个/皿，显著低于其他培养基处理（图6-B）。综合分析发现MEA培养基最适用于菌株CJ01生长和产孢。

2.3　菌株CJ01对烟粉虱的室内毒力

菌株CJ01对烟粉虱具有毒力，其孢子悬浮液可

成功侵染烟粉虱成虫，且不同浓度孢子悬浮液对烟粉虱的毒力存在显著差异，随着孢子悬浮液浓度升高，烟粉虱的累计校正死亡率也升高（表1）。在1×10^8个/mL孢子悬浮液处理下，烟粉虱3 d累计校正死亡率为83.93%，此时致死中时间LT_{50}为2.32 d（表1）。此浓度下菌株CJ01的LC_{25}及LC_{50}分别为8.81×10^5个/mL和5.50×10^6个/mL，95%置信区间分别为5.15×10^5~1.37×10^6个/mL和3.72×10^6~8.24×10^6个/mL，拟合得到的回归方程为y=26.787x−22.323（χ^2=23.217，df=10，R=0.965）。

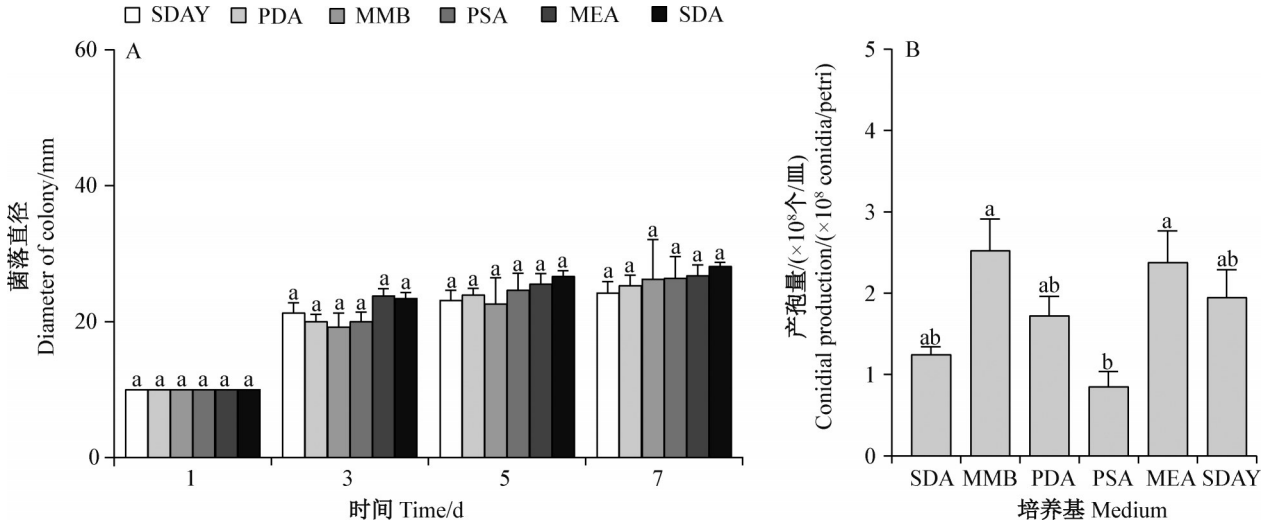


图6 不同培养基对菌株CJ01菌丝生长（A）及产孢量（B）的影响

Fig. 6 Effects of different culture media on mycelial growth (A) and conidial production (B) of strain CJ01

图中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示不同培养基处理间经Tukey's检验法检验差异显著（P<0.05）。Data are presented as the mean±SE. Different lowercase letters indicate significant differences among culture media as determined by Tukey's test (P<0.05).

表1 菌株CJ01对烟粉虱的LT_{50}

Table 1 Median lethal time (LT_{50}) of strains CJ01 against *Bemisia tabaci*

浓度/(个/mL) Concentration/(conidia/mL)	3 d累计校正死亡率 Cumulative corrected mortality at 3 d/%	回归方程 Regression equation	LT_{50}（95%置信区间） LT_{50} (95% confidence interval)/d	P	χ^2(df)
1×10^8	83.93±3.09 a	y=−2.419+6.609x	2.32（1.97−2.78）	0.000	77.813（7）
1×10^7	60.71±4.74 b	y=−1.876+4.017x	2.93（2.27−6.34）	0.000	98.642（7）
1×10^6	28.57±4.74 c	y=−2.399+3.694x	>3.00	0.000	36.274（7）
1×10^5	5.357±1.79 d	y=−3.210+3.386x	>3.00	0.026	15.874（7）

y和x分别为期望概率值和时间对数。表中校正死亡率数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经Tukey's检验法检验差异显著（P<0.05）。In the regression equation, y and x represent the probit value of corrected mortality and the logarithm of time, respectively. Corrected mortality values are presented as the mean±SE. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences according to Tukey's test (P<0.05).

2.4 菌株CJ01对烟粉虱的田间防效

利用爪哇虫草菌CJ01孢子悬浮液对茄子大棚内的烟粉虱进行防治，其防效随着孢子悬浮液浓度的升高呈现明显上升趋势，其防效在首次施药后7 d和14 d时分别为35.94%和68.56%（表2）。

3 讨论

爪哇虫草菌是重要的农业害虫生防真菌，其不同菌株间生物学特性及致病力随寄主与地理位置的不同而存在差异。邓嘉茹等（2020；2025）从自然界中分离的爪哇棒束孢IJID001~IJID008对埃及吹绵蚧*Icerya aegyptiaca*的毒力各不相同，且优势菌株IJID003对扶桑绵粉蚧*Phenacoccus solenopsis*也表现出高致病力。薛锐等（2023）和邓竣丹等（2021）对球孢白僵菌的研究同样表明，不同菌株的生物学特性及其对红棕象甲*Rhynchophorus ferrugineus*和松

墨天牛 *Monochamus alternatus* 的毒力存在明显分化。这些结果说明即使是同一菌种的不同菌株因寄主和地理位置存在差异，导致其生物学特性和致病力也存在差异。本研究从罹病烟粉虱中分离鉴定得到爪哇虫草菌菌株CJ01，其生物学特性也呈现出自身特点，通过对不同条件下的菌落直径及产孢量进行测定，发现28 ℃是该菌株生长最佳温度，温度升高至34 ℃时，该菌株生长缓慢，说明菌株CJ01耐热能力较弱，因此在田间应用时盛夏高温可能成为其限制因子。此外，该菌株在24 h全光照下菌丝生长和产孢量最大；在pH 7的中性环境中表现最佳，过酸或过碱环境均不利于其生长。在培养基筛选方面，菌株CJ01在SDA培养基中生长最快，在MMB培养基上产孢量最多。然而，该菌株在MEA培养基上生长的菌落直径与在SDA培养基上培养时无显著差异，而产孢量与在MMB培养基上培养时无显著差异。综合考虑菌株扩繁速度与孢子产量，MEA培养基在两方面均表现出最佳的平衡性，被认为是用于后续发酵培养的最适选择。

表2　菌株CJ01对茄子大棚内烟粉虱的防效

Table 2　Control efficacy of strain CJ01 against *Bemisia tabaci* in an eggplant greenhouse

浓度/(个/mL) Concentration/ (conidia/mL)	虫口基数 Initial insect population	药后7 d　7 days after treatment		药后14 d　14 days after treatment	
		虫口减退率 Pest population reduction/%	防效 Control efficacy/%	虫口减退率 Pest population reduction/%	防效 Control efficacy/%
1×10^8	520.50	36.84±1.31	35.94±3.32 a	63.87±2.72	68.56±3.30 a
1×10^7	398.25	23.85±3.59	22.19±7.44 ab	44.13±5.36	51.29±6.20 a
1×10^6	419.75	6.17±4.40	5.04±5.31 b	6.44±8.18	19.29±7.22 b
对照CK	520.00	0.49±6.24	–	−16.68±8.66	–

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经Tukey's检验法检验差异显著（$P<0.05$）。Data are presented as the mean±SE. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences according to Tukey's test ($P<0.05$).

近年来，利用病原微生物、天敌昆虫等开展烟粉虱的生物防治一直是国内外学者们研究的重点与热点之一。利用虫生真菌防治烟粉虱已经取得一定成效，如利用球孢白僵菌、玫烟色棒束孢和蜡蚧轮枝菌等虫生真菌能较好地防治烟粉虱（郑宇等，2019；景亮亮等，2020；Wang et al.，2024）。但是不同虫生真菌对烟粉虱的毒力差异巨大，例如球孢白僵菌在相对湿度为100%的室内条件下对烟粉虱3龄若虫的LC_{50}为1.97×10^5个/mL，而玫烟色拟青霉菌 *Paecilomyces fumosoroseus* 对烟粉虱3龄若虫的LC_{50}则高达1.86×10^{19}个/mL（刘召和雷仲仁，2014）。本研究评价了分离自罹病烟粉虱的爪哇虫草菌CJ01对烟粉虱的致病力，发现其能侵染烟粉虱成虫，且随着孢子浓度增加，烟粉虱死亡率升高。对烟粉虱成虫的侵染试验结果表明，在室内爪哇虫草菌侵染烟粉虱成虫3 d时的LC_{50}为5.50×10^6个/mL，其毒力效果显著优于玫烟色拟青霉菌。另外，害虫的防御机制是影响田间防效的关键变量，一方面，害虫体壁基因的表达关乎真菌的穿透效率（Sun et al.，2025）；另一方面，烟粉虱体内共生菌如立克次氏体 *Rickettsia* 的快速扩散能形成生物屏障，阻断爪哇虫草菌的增殖与传播（Zhao et al.，2023）。这些发现提示CJ01菌株的高毒力可能与其能突破这些多重免疫防御有关。

基于室内毒力测定结果，本研究进一步利用MEA培养基规模化生产的孢子悬浮液开展了设施大棚茄子田间烟粉虱的防效试验，结果表明在1.0×10^8个/mL浓度处理后14 d的防效达68.56%，展现出较好的田间控制效果。鉴于菌株CJ01不耐高温的生物学特性，在盛夏高温季节施用可能降低其杀虫活性；而24 h全光照最有利于其生长和产孢，建议在设施栽培环境中可通过合理调节施药时间（如避开极端高温时段）并结合棚内光照条件，有望进一步提升防效。综合室内毒力与田间防效，爪哇虫草菌CJ01对茄子田间烟粉虱具有良好的生防潜力，可作为该害虫生物防治的候选菌株，未来可通过优化施药时间、施用浓度及与其他环境友好型措施（如天敌昆虫的协同使用）相结合，实现更高效、可持续的防控效果。

参 考 文 献（References）

De Barro PJ, Liu SS, Boykin LM, Dinsdale AB, 2011. *Bemisia tabaci*: a statement of species status[J]. Annual Review of Entomology, 56: 1−19

Deng JD, Zhuang WX, Liu YJ, Song LW, Zhang LW, 2021. Pathogenicity of white muscardine fungus *Beauveria bassiana* against Japa-

nese pine sawyer beetle *Monochamus alternatus* and its compatibility with ectoparasitic beetle *Dastarcus helophoroides*[J]. Journal of Plant Protection, 48(3): 602−609 (in Chinese) [邓竣丹, 庄文欣, 刘玉军, 宋丽文, 张龙娃, 2021. 球孢白僵菌对松墨天牛的致病力及其与花绒寄甲的相容性[J]. 植物保护学报, 48(3): 602−609]

Deng JR, Sun LH, Bi KK, Zhang JA, Tang LH, Yu XB, 2020. Screening and identification of the entomopathogenic fungus isolated from Egyptian fluted scale *Icerya aegyptiaca* and bioassay of its pathogenicity[J]. Journal of Plant Protection, 47(1): 53−64 (in Chinese) [邓嘉茹, 孙龙华, 毕可可, 张劲蔼, 唐立鸿, 余晓碧, 2020. 埃及吹绵蚧昆虫病原真菌的筛选、鉴定及其致病性测定[J]. 植物保护学报, 47(1): 53−64]

Deng JR, Sun LH, Xu SL, Zhang JA, Bi KK, 2025. Screening of potential entomopathogenic fungal biocontrol strains against *Phenacoccus solenopsis* Tinsley and its preliminary application[J]. Plant Protection, 51(2): 61−71 (in Chinese) [邓嘉茹, 孙龙华, 徐树兰, 张劲蔼, 毕可可, 2025. 扶桑绵粉蚧优良病原真菌的筛选及其初步应用[J]. 植物保护, 51(2): 61−71]

Gong C, Guo ZJ, Hu Y, Yang ZZ, Xia JX, Yang X, Xie W, Wang SL, Wu QJ, Ye WF, et al., 2024. A horizontally transferred plant fatty acid desaturase gene steers whitefly reproduction[J]. Advanced Science, 11(10): 2306653

Horowitz AR, Ghanim M, Roditakis E, Nauen R, Ishaaya I, 2020. Insecticide resistance and its management in *Bemisia tabaci* species[J]. Journal of Pest Science, 93(3): 893−910

Hu MX, Yang ZZ, Li Y, Zhang N, Wang F, Bai YC, Jiao XG, Zhang LX, Liu BM, 2023. Cryptic *Bemisia tabaci* species harboring tomato yellow leaf curl virus and endosymbionts and insecticide resistance monitoring in Tianjin[J]. Journal of Plant Protection, 50(1): 101−110 (in Chinese) [胡明鑫, 杨泽众, 李妍, 张楠, 王芳, 白义川, 焦晓国, 张李香, 刘佰明, 2023. 天津市烟粉虱隐种鉴定及其携带TYLCV、内共生菌[J]. 植物保护学报, 50(1): 101−110]

Ji Y, Zheng HX, Zhang CJ, Tan X, He C, Fu BL, Du TH, Liang JJ, Wei XG, Gong PP, et al., 2024. Dynamic monitoring of the insecticide resistance status of *Bemisia tabaci* across China from 2019—2021[J]. Pest Management Science, 80(2): 341−354

Jing LL, Jiang L, Xie T, Zhang XX, Hong B, Jia YX, 2020. Influences of subculture on the virulence to *Bemisia tabaci* and conidial production of the entomopathogenic fungus *Verticillium lecanii*[J]. Plant Protection, 46(5): 70−76 (in Chinese) [景亮亮, 姜灵, 谢婷, 张晓霞, 洪波, 贾彦霞, 2020. 不同培养基继代培养蜡蚧轮枝菌对产孢量和烟粉虱毒力的影响[J]. 植物保护, 46(5): 70−76]

Li YP, Mbata GN, Simmons AM, Shapiro-Ilan DI, Wu SH, 2024. Management of *Bemisia tabaci* on vegetable crops using entomopathogens[J]. Crop Protection, 180: 106638

Liang P, Zeng Y, Ning J, Wu XJ, Wang WL, Ren J, Wu QJ Yang X, Wang SL, Guo ZJ, et al., 2025. A plant virus manipulates both its host plant and the insect that facilitates its transmission[J]. Science Advances, 11(9): eadr4563

Liu Z, Lei ZR, 2014. Screening of high pathogenic entomopathogenic to tobacco whitefly, *Bemisia tabaci* (Gennadius) [J]. China Vegetables(3): 37−40 (in Chinese) [刘召, 雷仲仁, 2014. 对烟粉虱具有高致病力的虫生真菌筛选[J]. 中国蔬菜(3): 37−40]

Maluta NKP, Lopes JRS, Fiallo-Olivé E, Navas-Castillo J, Lourenção AL, 2021. Foliar application of systemic insecticides disrupts feeding behavior of the whitefly *Bemisia tabaci* MEAM1 and the transmission of tomato chlorosis virus in potato plants[J]. Journal of Pest Science, 94(4): 1265−1276

Ren LM, Su ZQ, Ou D, Shaukat A, Qiu BL, 2022. Pathogenicity evaluation of two *Isaria* strains for whitefly *Bemisia tabaci* biological control[J]. Plant Health and Medicine, 1(3): 86−93 (in Chinese) [任丽梅, 苏正钦, 欧达, Shaukat A, 邱宝利. 2022. 2株烟粉虱高致病力病原棒束孢菌株的毒力测定[J]. 植物医学, 1(3): 86−93]

Sani I, Ismail SI, Abdullah S, Jalinas J, Jamian S, Saad N, 2020. A review of the biology and control of whitefly, *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae), with special reference to biological control using entomopathogenic fungi[J]. Insects, 11(9): 619

Sun S, Sun M, Du PF, Niu HT, Zhang ZC, Zhao DX, Liu XD, Guo HF, 2025. Protective roles of chitin synthase gene 1 in *Nilaparvata lugens* against *Cordyceps javanica* and insecticides[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 209: 106324

Wang SF, Guo HJ, Zhu-Salzman K, Ge F, Sun YC, 2022. PEBP balances apoptosis and autophagy in whitefly upon arbovirus infection[J]. Nature Communications, 13: 846

Wang X, Yuan Q, He LQ, Wang Z, Li GY, Wang ZY, Liu H, 2024. Biological and physiological effects in *Bemisia tabaci* feeding on tomatoes endophytically colonized by *Beauveria bassiana*[J]. Pest Management Science, 80(8): 4085−4097

Wang XW, Blanc S, 2021. Insect transmission of plant single-stranded DNA viruses[J]. Annual Review of Entomology, 66: 389−405

Xia JX, Guo ZJ, Yang ZZ, Han HL, Wang SL, Xu HF, Yang X, Yang FS, Wu QJ, Xie W, et al., 2021. Whitefly hijacks a plant detoxification gene that neutralizes plant toxins[J]. Cell, 184(7): 1693−1705

Xue R, Chen J, Fu YF, Sun GL, He YY, Wang G, Chen B, Du GZ, 2023. Isolation and identification of a *Beauveria* strain infecting the larvae of *Rhynchophorus ferrugineus*[J]. Plant Protection, 49(4): 131−139 (in Chinese) [薛锐, 陈杰, 付玉飞, 孙淦琳, 何艳艳, 王广, 陈斌, 杜广祖, 2023. 一株侵染棕榈象甲幼虫的白僵菌的分离鉴定及其毒力[J]. 植物保护, 49(4): 131−139]

Zhao DoX, Zhang ZC, Niu HT, Guo HF, 2023. Pathogens are an important driving force for the rapid spread of symbionts in an insect host[J]. Nature Ecology & Evolution, 7(10): 1667−1681

Zheng Y, Ding XL, Yao FL, Lu XS, Zhuo H, He YX, 2019. Identification of *Isaria fumosorosea* FZ-01 and evaluation of its bio-control potential against *Bemisia tabaci*[J]. Chinese Journal of Biological Control, 35(6): 876−883 (in Chinese) [郑宇, 丁雪玲, 姚凤銮, 卢学松, 卓辉, 何玉仙, 2019. 玫烟色棒束孢FZ-01鉴定及对烟粉虱的防治潜力评估[J]. 中国生物防治学报, 35(6): 876−883]

（责任编辑：李美娟）