莱氏绿僵菌 FJMR2 对草地贪夜蛾不同虫态的致病性研究*

丁雪玲[1**] 姚凤銮[1] 郑 宇[1] 赵建伟[1]
卢学松[1] 王竹红[2] 何玉仙[1***]

（1. 福建省农业科学院植物保护研究所，福建省作物有害生物监测与治理重点实验室，福建省作物有害生物绿色防控工程研究中心，福州 350013；2. 福建农林大学植物保护学院，福州 350002）

摘 要 【**目的**】为明确莱氏绿僵菌 *Metarhizium rileyi* FJMR2 对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 的生物防治潜力。【**方法**】在室内条件下，采用浸渍法测定了莱氏绿僵菌 FJMR2 对草地贪夜蛾卵、幼虫和蛹的致病性。【**结果**】当孢子浓度为 2×10^8 孢子/mL 时，草地贪夜蛾 1-5 龄幼虫和蛹的校正死亡率分别为 100%、95.78%、87.15%、64.67%、38.00%和 93.93%；草地贪夜蛾 1-5 龄幼虫和蛹的 LC_{50} 分别为 3.12×10^4、7.94×10^4、2.24×10^6、2.13×10^7、7.46×10^8 和 1.25×10^5 孢子/mL。LT_{50} 随孢子浓度的增大而缩短、随幼虫虫龄的增长而延长，当孢子浓度为 2×10^8 孢子/mL 时，草地贪夜蛾 1-5 龄幼虫和蛹的 LT_{50} 分别为 3.93、4.32、5.62、7.18、9.40 和 4.45 d。卵期为 0 h 和 24 h 的草地贪夜蛾卵经莱氏绿僵菌 FJMR2 浸渍处理后，孵化率分别为 84.53%和 89.77%，初孵化 3 d 的幼虫存活率分别为 1.81%和 3.02%，均显著低于对照组。【**结论**】莱氏绿僵菌 FJMR2 对草地贪夜蛾 1-4 龄幼虫和蛹具有较强侵染致病能力，同时显著降低卵的孵化率和初孵幼虫存活率。

关键词 莱氏绿僵菌；草地贪夜蛾；虫态；致病性；生物防治

The pathogenicity of *Metarhizium rileyi* FJMR2 to different age classes of *Spodoptera frugiperda*

DING Xue-Ling[1**] YAO Feng-Luan[1] ZHENG Yu[1] ZHAO Jian-Wei[1]
LU Xue-Song[1] WANG Zhu-Hong[2] HE Yu-Xian[1***]

(1. Institute of Plant Protection, Fujian Academy of Agricultural Science, Fujian Key Laboratory for Monitoring and Integrated Management of Crop Pests, Fujian Engineering Research Center for Green Pest Management, Fuzhou 350013, China; 2. College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract [**Objectives**] To evaluate the potential of *Metarhizium rileyi* FJMR2 as a biocontrol agent for *Spodoptera frugiperda*. [**Methods**] The pathogenicity of FJMR2 to the larvae, pupae and eggs of *S. frugiperda* was tested using the leaf dipping method under laboratory conditions. [**Results**] A spore concentration of 2×10^8 spores/mL achieved a corrected mortality of 1st to 5th instar larvae and pupae of 100%, 95.78%, 87.15%, 64.67%, 38.00% and 93.93%, respectively. LC_{50} values of 1st to 5th instar larvae and pupae were 3.12×10^4, 7.94×10^4, 2.13×10^7, 7.46×10^8 and 1.25×10^5 spores/mL, respectively. LT_{50} values decreased with increasing spore concentration and increased with larval instar. At a spore concentration of 2×10^8 spores /mL, LT_{50} values of 1st to 5th instar larvae and pupae were 3.93, 4.32, 5.62, 7.19, 9.41 and 4.45 d, respectively. In addition, the hatching rate of 0-hour-old eggs and 24-hour-old eggs were 84.53% and 89.77%, respectively, and the survival rates of newly hatched larvae inoculated with FJMR2 were 1.81% and 3.02%, respectively; significantly lower than that of the

*资助项目 Supported projects：福建省属公益类科研院所基本科研专项（2020R1024009）；福建省“5511”协同创新项目（XTCXGC2021011，XTCXGC2021017）；福建省农业科学院创新团队项目（CXTD2021002-1）；福建省科技厅引导性项目（2020N0026）

**第一作者 First author，E-mail：xue95711@163.com
***通讯作者 Corresponding author，E-mail：yuxianhe_faas@sina.cn

收稿日期 Received：2021-09-15；接受日期 Accepted：2021-12-10

control. [**Conclusion**] The FJMR2 strain was highly pathogenic to 1st to 4th instar larvae and pupae of *S. frugiperda*, reducing both the hatching rate of eggs and the survival rate of newly hatched larvae. It consequently has high potential as a biological control for *S. frugiperda*.

Key words *Metarhizium rileyi*; *Spodoptera frugiperda*; insect states; pathogenicity; biological control

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*（J. E. Smith）属于鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae，起源于美洲，被联合国粮农组织列为全球重大迁飞性农业害虫，主要为害玉米、水稻及甘蔗等作物，具有适生区域广、繁殖能力强、迁飞速度快和防治难度大等特点（Sparks，1979；Montezano *et al.*，2018）。草地贪夜蛾自 2019 年 1 月入侵我国后，现已扩散至全国大部分地区，给农业生产造成严重威胁，尤其是玉米种植区，因草地贪夜蛾为害已造成重大经济损失（王磊等，2019；杨普云等，2019）。福建地处亚热带，气候温暖湿润，光照充足，是草地贪夜蛾周年繁殖区。该地区因常年种植玉米，为草地贪夜蛾的越冬提供了优良条件，防治难度较大（邱良妙等，2020）。

针对草地贪夜蛾在我国的迁飞路径和为害特点，国内植保工作者已提出多种监测防治手段，并提出利用杀虫剂防治的应用策略（刘妤玲等，2019），但过度依赖农药可导致草地贪夜蛾产生抗药性。在草地贪夜蛾的起源地美国及巴西等国家，由于长期依靠化学防治，导致该虫对传统杀虫剂产生了高水平抗性（Al-Sarar *et al.*，2006；李永平等，2019）。鉴于此，利用昆虫病原真菌（徐毓笛等，2020）、捕食性天敌（孙贝贝等，2020）、寄生性天敌（汤印等，2020）等生物资源进行草地贪夜蛾的防治已被报道。其中，利用昆虫病原微生物实施“以菌治虫”是害虫生物防治的关键措施之一，也是害虫绿色防控体系发展的趋势，对科学持续控害及保护生态平衡具有重要意义。国内外研究表明，金龟子绿僵菌、球孢白僵菌和莱氏绿僵菌对草地贪夜蛾低龄幼虫有一定的防治效果（Akutse *et al.*，2019；赵胜园等，2019）。彭国雄等（2019）在室内条件下测定了金龟子绿僵菌 CQMa421 对草地贪夜蛾的杀虫活性，发现该菌对草地贪夜蛾低龄幼虫具有杀虫活性，对高龄幼虫没有杀虫活性。徐毓迪等（2020）研究发现分离自北京市的球孢白僵菌 bbbj 对草地贪夜蛾 3 龄幼虫的毒力最强，LC_{50} 为 3.37×10^5 孢子/mL。墨西哥和巴西等国家很多地区的玉米种植区内均发现大量被莱氏绿僵菌感染的草地贪夜蛾幼虫（Ruiz-Nájera *et al.*，2013；Ordóñez-García *et al.*，2015）。莱氏绿僵菌作为一种重要的昆虫病原真菌，在世界范围内分布广泛，主要侵染夜蛾科害虫，并且能引起害虫的田间流行病（Martins *et al.*，2005；Erika *et al.*，2018）。国内有关莱氏绿僵菌防治草地贪夜蛾的研究刚起步。如郑亚强等（2019）从云南省玉米种植区草地贪夜蛾幼虫上分离获得一株莱氏绿僵菌，以高浓度孢子接种草地贪夜蛾 3 龄幼虫后致死率达 100%。雷妍圆等（2020）从广州野外感菌草地贪夜蛾幼虫上分离获得一株莱氏绿僵菌，孢子悬浮液浓度为 1×10^9 孢子/mL 时，对草地贪夜蛾 2 龄幼虫致死率达 100%。但有关莱氏绿僵菌对草地贪夜蛾生命周期不同虫态的杀虫活性的研究相对缺乏，不能全面评价其对草地贪夜蛾的控制作用。因此，本研究从罹病的草地贪夜蛾幼虫上分离获得一株高毒力莱氏绿僵菌 FJMR2，测试其对草地贪夜蛾不同虫态的致病性，旨在为田间利用该菌防治草地贪夜蛾提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试菌株及虫源

供试菌株采自福建省漳州南郊玉米田罹病草地贪夜蛾幼虫，经室内分离、纯化，最后鉴定为莱氏绿僵菌，菌株编号为 FJMR2，中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心保藏编号为 CGMCC No.18553。

草地贪夜蛾幼虫采自福建省漳州市玉米田，室内饲养条件为温度（26±1）℃、相对湿度 65%±5%、光周期 14L∶10D，经继代饲养后选取所需各虫态备用。

1.2　供试培养基及人工饲料

供试培养基为萨氏麦芽糖琼脂酵母（SMAY）培养基，称取蛋白胨 10 g、麦芽糖 40 g、酵母浸粉 2 g 和琼脂 20 g，用蒸馏水定容至 1 000 mL，121 ℃高温灭菌 20 min。人工饲料的配制参考李子园等（2019）的方法。

1.3　菌株培养及孢子悬浮液制备

将莱氏绿僵菌 FJMR2 接种于 SMAY 固体培养基，并置于温度为（26±1）℃的恒温光照培养箱中培养 10-15 d，收集孢子，用无菌 0.05%吐温-80 水溶液悬浮，经磁力搅拌器搅拌 30 min，待孢子完全被打散均匀后，通过无菌纱布过滤，采用血球计数板计数，最后将孢子浓度依次调整为 2×10^4、2×10^5、2×10^6、2×10^7 和 2×10^8 孢子/mL，以 0.05%吐温-80 无菌水作为空白对照。

1.4　莱氏绿僵菌 FJMR2 对草地贪夜蛾幼虫的致病力测定

采用浸渍法测定菌株 FJMR2 对草地贪夜蛾 1-5 龄幼虫的致病力。挑取大小一致的各龄幼虫放入配置好的不同浓度梯度的孢子悬浮液中浸渍 10 s，取出晾干并单头移入洁净的透明塑料盒中（直径为 3 cm，高为 3 cm），置于温度为（26±1）℃、相对湿度为 65%±5%、光周期为 14L：10D 的人工气候箱中以人工饲料饲养。每日观察并记录试虫的死亡情况，连续观察 10 d。每处理 3 次重复，每重复 30 头幼虫，同时以 0.05%的吐温-80 水溶液处理的草地贪夜蛾幼虫作为对照。死亡幼虫及时挑出保湿培养。

1.5　莱氏绿僵菌 FJMR2 对草地贪夜蛾蛹的致病力测定

采用浸渍法对草地贪夜蛾蛹进行致病力测定。将大小一致且在 12 h 内化蛹的新鲜蛹放入不同浓度梯度的孢子悬浮液中浸渍 10 s，取出晾干后移入洁净的透明塑料盒（直径为 6 cm，高为 5 cm）中，塑料盒内放入棉球保湿，每个塑料盒中放入 5 头蛹。然后置于温度为（26±1）℃、相对湿度为 65%±5%、光周期为 14 L：10 D 的人工气候箱中培养。每日观察记录蛹的死亡情况（用镊子多次触动蛹体均无反应则视为死亡），连续观察 10 d。每处理 3 次重复，每重复 30 头蛹，同时以 0.05%的吐温-80 水溶液处理的蛹作为对照。死亡蛹及时挑出保湿培养。

1.6　莱氏绿僵菌 FJMR2 对草地贪夜蛾的杀卵作用

在体视显微镜 20 倍物镜下，挑取产后 0、24 和 48 h 的草地贪夜蛾卵，分别浸入浓度为 2×10^7 孢子/mL 的孢子悬浮液中，10 s 后取出，晾干后放入洁净的塑料盒（直径为 6 cm，高为 5 cm）中并加棉球进行保湿，置于温度为（26±1）℃、相对湿度为 65%±5%、光周期为 14 L：10 D 的人工气候箱中培养。每个处理 30 粒卵，每个处理 3 次重复。每日检查并记录卵的孵化情况，并将孵化后的幼虫置于加有人工饲料的塑料盒中继续饲养，记录初孵幼虫死亡数量，计算卵孵化率和初孵幼虫存活率。

1.7　数据处理

试验数据通过 Excel 2010 和 SPSS 17.0 软件进行统计分析，采用 Duncan’s 新复极差法进行检验，并利用 Probit 方法计算菌株对各虫态的毒力回归方程、致死中浓度（LC_{50}）和半致死时间（LT_{50}）。

死亡率（%）= 死虫数/试虫总数×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。

2　结果与分析

2.1　草地贪夜蛾幼虫、蛹和成虫感染莱氏绿僵菌 FJMR2 的症状

草地贪夜蛾 1-5 龄幼虫均可被莱氏绿僵菌 FJMR2 侵染。经莱氏绿僵菌 FJMR2 侵染后 1 d，各龄幼虫取食量、取食行为、表皮颜色特征与对照组均无明显差异。1-3 龄幼虫在莱氏绿僵菌 FJMR2 侵染后 3 d 出现反应迟钝，取食量降低，侵染后 4 d 开始出现死亡，侵染 5 d 后大量死亡，死亡虫体初始柔软，后逐渐僵硬。4 龄和 5 龄幼虫侵染后 5 d，部分幼虫背部出现黑斑，侵染 6 d

后出现死亡。

以 4 龄幼虫为例，刚死亡时虫体柔软，2 h 后僵硬（图 1：A），保湿培养 1 d 后，体表长出致密白色菌丝（图 1：B），保湿培养 3 d 后虫体表面覆盖绿色分生孢子（图 1：C），保湿培养 5 d 后孢子颜色变深散落（图 1：D）。蛹感染后 4 d 出现死亡，5 d 后大量死亡，刚死亡时蛹体发黑（图 1：E），保湿培养 2 d 后从气门、节间等部位长出白色菌丝（图 1：F），随后产生分生孢子（图 1：G）。残存活蛹羽化后的成虫部分出现死亡现象，经保湿培养 2 d 后体表长出白色菌丝（图 1：H），后期长出分生孢子（图 1：I）。

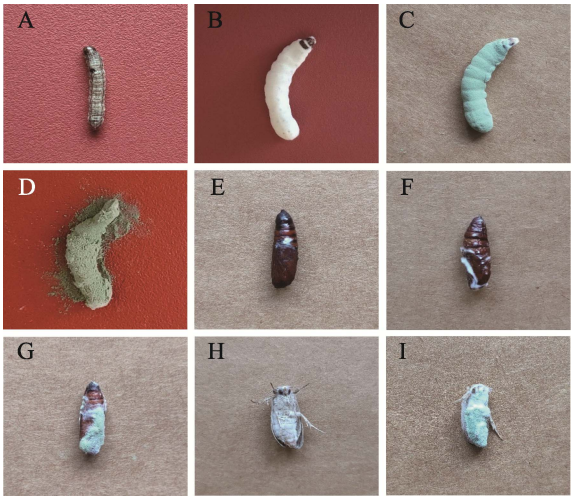

图 1　草地贪夜蛾幼虫、蛹和成虫感染莱氏绿僵菌 FJMR2 的症状

Fig. 1　Symptoms of different states of *Spodoptera frugiperda* inoculated by strain *Metarhizium rileyi* FJMR2

A. 幼虫死亡 1 d 内；B. 幼虫死亡后 1 d；C. 幼虫死亡后 3 d；D. 幼虫死亡后 5 d；E. 蛹死亡 1 d 内；F. 蛹死亡后 2 d；G. 蛹死亡后 5 d ；H. 成虫死亡后 2 d；I. 成虫死亡后 5 d。

A. The larvae died within 1 day; B. The larvae died 1 day later; C. The larvae died 3 days later; D. The larvae died 5 days later; E. The pupa died within 1 day; F. The pupa died 2 days later; G. The pupa died 5 days later; H. The adult died 2 days later; I. The adult died 5 days later.

2.2　莱氏绿僵菌 FJMR2 对草地贪夜蛾幼虫和蛹的致死率

研究发现，莱氏绿僵菌 FJMR2 不同孢子浓度悬浮液对草地贪夜蛾 1-5 龄幼虫和蛹均有致病力（图 2）。经 2×10^4 孢子/mL 浓度处理后 9 d，1-5 龄幼虫的校正死亡率分别为 40.76%、31.33%、21.89%、13.55%和 4.53%，蛹的校正死亡率为 43.56%。随孢子浓度的升高，菌株 FJMR2 对 1-5 龄幼虫和蛹的致死率逐渐升高。当孢子浓度为 2×10^8 孢子/mL 时，1 龄幼虫的校正死亡率为 100%，2-5 龄幼虫的校正死亡率分别为 95.78%、87.15%、64.67%和 38.00%，蛹的校正死亡率为 93.93%。

2.3　FJMR2 对草地贪夜蛾幼虫和蛹的致死中浓度 LC_{50}

莱氏绿僵菌 FJMR2 不同浓度孢子悬浮液处理 9 d 后对 1-5 龄幼虫和蛹的致死率均达到最大值，根据死亡率计算出各虫态的致死中浓度 LC_{50}（表 1）。结果显示，随着幼虫龄期的增大，致死中浓度 LC_{50} 增大，该菌株对草地贪夜蛾 1-5 龄幼虫的 LC_{50} 分别为 3.12×10^4、7.94×10^4、2.24×10^6、2.13×10^7 和 7.46×10^8 孢子/mL，对蛹的 LC_{50} 为 1.25×10^5 孢子/mL。综合以上结果表明，草地贪夜蛾 1-3 龄幼虫和蛹对该菌株较敏感，4-5 龄幼虫次之。

2.4　FJMR2 对草地贪夜蛾幼虫和蛹的半致死时间 LT_{50}

随莱氏绿僵菌 FJMR2 孢子悬浮液浓度的增加，草地贪夜蛾幼虫和蛹的半致死时间 LT_{50} 缩短（表 2）。在浓度为 2×10^4 - 2×10^8 孢子/mL 的范围内，1 龄幼虫 LT_{50} 从 7.79 d 降至 3.93 d，2 龄幼虫 LT_{50} 从 8.54 d 降至 4.32 d，3 龄幼虫 LT_{50} 从 10.67 d 降至 5.62 d，蛹的 LT_{50} 从 11.46 d 降至 4.45 d；在 2×10^6 - 2×10^8 孢子/mL 范围内，4 龄幼虫 LT_{50} 从 9.79 d 降至 7.18 d；在 2×10^7 - 2×10^8 孢子/mL 范围内，5 龄幼虫 LT_{50} 从 10.84 d 降至 9.40 d。

2.5　莱氏绿僵菌 FJMR2 对草地贪夜蛾的杀卵作用

莱氏绿僵菌 FJMR2 对草地贪夜蛾卵的发育历期无显著影响（$P>0.05$），但对卵孵化率和初

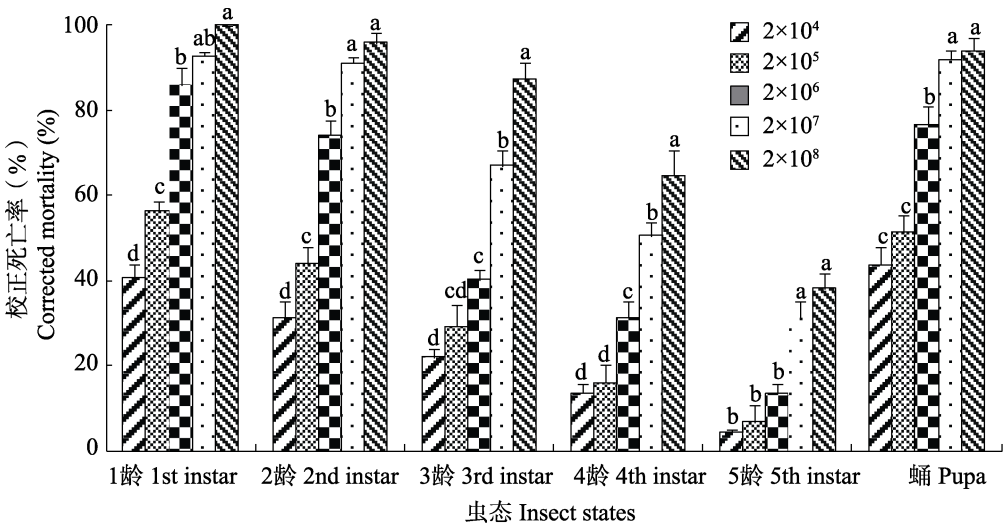

图 2　菌株 FJMR2 接种 9 d 后草地贪夜蛾幼虫和蛹的校正死亡率

Fig. 2　Corrected mortality of *Spodoptera frugiperda* larvae and pupa treated with *Metarhizium rileyi* strain FJMR2 inoculated after 9 days

图中数据为平均值±标准误，同一组柱上标有不同小写字母表示同一龄期幼虫不同接种浓度下的校正死亡率差异显著（$P < 0.05$，Duncan's 新复极差法检验）。

Data are mean ± SE, histograms with different lowercase letters in the same series indicate significant differences at the same insect stage between different concentrations at the 0.05 level by Duncan's new multiple range test.

表 1　莱氏绿僵菌 FJMR2 对草地贪夜蛾幼虫和蛹的致死中浓度 LC_{50}

Table 1　LC_{50} values of *Metarhizium riley* strain FJMR2 to *Spodoptera frugiperda* larvae and pupa

虫态 Insect morphology	回归方程 Regression equation	LC_{50} (spores/mL)	95%置信区间 95% confidence limits	χ^2	*df*
1 龄 1st instar	y=0.656x - 2.949	3.12×10^4	6.27×10^4 - 3.31×10^5	1.895	3
2 龄 2nd instar	y=0.649x - 3.178	7.94×10^4	6.27×10^4 - 3.31×10^5	1.170	3
3 龄 3rd instar	y=0.463x - 2.941	2.24×10^6	8.74×10^6 - 5.76×10^6	2.637	3
4 龄 4th instar	y=0.410x - 3.005	2.13×10^7	7.35×10^6 - 9.68×10^7	0.846	3
5 龄 5th instar	y=0.390x - 3.459	7.46×10^8	1.31×10^8 - 3.84×10^{10}	0.897	3
蛹 Pupa	y=0.509x - 2.593	1.25×10^5	3.50×10^4 - 3.10×10^5	4.894	3

孵幼虫存活率影响显著（P<0.05）（表 3）。经莱氏绿僵菌 FJMR2 处理后，卵期 0 h 卵和 24 h 卵的孵化率分别为 84.53%和 89.77%，均显著低于对照组卵孵化率（95.52%）；48 h 卵的孵化率和对照组无显著差异（P>0.05）。进一步统计初孵幼虫存活率，发现卵期为 0、2 和 48 h 的卵经莱氏绿僵菌 FJMR2 处理后，初孵幼虫存活率仅为 1.81%，3.02%和 16.26%，均显著低于对照组初孵幼虫存活率（81.50%）。综合以上结果表明，莱氏绿僵菌 FJMR2 能显著降低卵的孵化率，并对初孵幼虫具有较高杀虫活性。

3　讨论

莱氏绿僵菌是一种重要的虫生真菌，主要侵染夜蛾科害虫（Ordóñez-García *et al.*，2015；Mallapur *et al.*，2018）。本文作者田间调查发现，莱氏绿僵菌是感染福建地区草地贪夜蛾的优势种病原菌，现已从罹病草地贪夜蛾幼虫上成功分离莱氏绿僵菌 FJMR2。已有研究表明，大部分感染草地贪夜蛾的病原真菌菌株仅对草地贪夜

表 2 莱氏绿僵菌 FJMR2 对草地贪夜蛾幼虫和蛹的半致死时间 LT_{50}

Table 2 LT_{50} values of *Metarhizium riley* strain FJMR2 to *Spodoptera frugiperda* larvae and pupa

浓度（孢子/mL） Concentrations (spores/mL)	LT_{50} (d)					
	1 龄 1st instar	2 龄 2nd instar	3 龄 3rd instar	4 龄 4th instar	5 龄 5th instar	蛹 Pupa
2×10^4	7.79±0.40Ba	8.54±0.16Ba	10.67±0.23A	—	—	11.46±0.61Aa
2×10^5	7.20±0.12Ba	7.82±0.05Bb	9.91±0.44Aab	—	—	9.85±0.42Ab
2×10^6	5.18±0.21Cb	6.09±0.30BCc	9.40±0.52Ab	9.79±0.36Ab	—	9.85±0.42Ab
2×10^7	4.24±0.19Dc	4.84±0.11Dd	6.72±0.37Cc	8.24±0.48Bc	10.84±1.46Aa	5.20±0.07Dd
2×10^8	3.93±0.05Dc	4.32±0.15Dd	5.62±0.24Cc	7.10±0.33Bc	9.40±0.46Aa	4.45±0.17Dd

表中数据为平均值±标准误；同行数据后标有不同大写字母表示同一接种浓度不同龄期下的 LT_{50} 经 Duncan's 新复极差法检验存在显著性差异（$P<0.05$）；同列数据后标有不同小写字母表示同一龄期不同接种浓度下的 LT_{50} 经 Duncan's 新复极差法检验存在显著性差异（$P<0.05$）。— 表示草地贪夜蛾幼虫的最终死亡率低于 50%，无法估算 LT_{50}。

Data in the table are mean ± SE, and followed by different uppercase letters in the same row indicate significant differences in LT_{50} values at the same concentration between different insect stages, while followed by different lowercase letters in the same column indicate significant differences in LT_{50} values at the same insect stage between different concentrations at 0.05 level by Duncan's new multiple range test, respectively. — indicates the mortality of infected larvae less than 50%, LT_{50} values cannot be estimated.

表 3 莱氏绿僵菌 FJMR2 对草地贪夜蛾卵期、卵孵化率和初孵幼虫存活率的影响

Table 3 Effects of *Metarhizium riley* strain FJMR2 on the egg-hatching time, egg-hatching rate and larvae survival rate of *Spodoptera frugiperda*

处理 Treatments	卵期（d） Egg-hatching time (d)	卵孵化率（%） Egg-hatching rate (%)	孵化后 3 d 幼虫的存活率（%） Survival rate of larvae 3 days after hatching (%)
0 h 卵 0-hour-old eggs	3.25±0.50a	84.53±2.67c	1.81±2.23c
24 h 卵 24-hour-old eggs	3.25±0.50a	89.77±2.26b	3.02±2.66c
48 h 卵 48-hour-old eggs	3.00±0.00a	95.52±1.81a	16.26±3.86b
对照 CK	3.00±0.00a	94.19±2.10a	81.50±5.74a

表中数据为平均值±标准误，同列数据后标有不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$，Duncan's 新复极差法）。

Data in the table are mean ± SE, and followed by different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$，Duncan's new multiple range test).

蛾低龄幼虫有较好的防效（郑亚强等，2019；雷妍圆等，2020），而对 3 龄以上的高龄幼虫及其它虫态的防效不显著（Yu and Mccord，2007）。本研究室内致病力测定发现，菌株 FJMR2 对草地贪夜蛾 1-4 龄幼虫均表现出较强的致病力，校正死亡率在 64.67%-100.00% 之间，LT_{50} 在 4.86-7.10 d 之间。另外，菌株 FJMR2 可显著降低草地贪夜蛾卵的孵化率，并且导致初孵化幼虫快速死亡。当用浓度为 2×10^7 孢子/mL 的莱氏绿僵菌孢子悬浮液处理卵时，孵化后 3 d 的幼虫存活率仅为 1.81%-16.26%，表明菌株 FJMR2 能有效降低草地贪夜蛾幼虫的虫口基数。这一结果为确定草地贪夜蛾最佳防治时期提供了重要依据。

草地贪夜蛾的蛹期较长，这也加大了对其防治的难度。本研究发现，FJMR2 能侵染草地贪夜蛾蛹，且致死率在 90%以上，大大降低了蛹的羽化率。而龙秀珍等（2021）的研究发现，莱氏绿僵菌 CDTLJ1 对草地贪夜蛾蛹的致死率仅有 20%，造成致病性差异的原因可能是菌株地理来源不同。地下土壤具有更好的保湿保温能力，又可避免紫外线的照射，为孢子的萌发和侵染创造了有利的条件，这也是绿僵菌等杀虫真菌能有效防治土壤中栖息害虫的原因（Ma *et al.*，2019）。土壤被认为是虫生真菌的天然储藏库，在土壤中施加菌剂以防治地下害虫或某发育阶段在土壤中完成的害虫，被认为是一种有效且可持续的害

虫防控策略（Garrido-Jurado *et al.*，2015；Rogge *et al.*，2017）。因此，可以考虑在土壤中添加菌剂，达到对草地贪夜蛾持续控害的目的。

综上所述，莱氏绿僵菌 FJMR2 菌株对草地贪夜蛾 1-4 龄幼虫、蛹和卵均具有高杀虫活性，可同时控制草地贪夜蛾不同虫态的种群数量，是草地贪夜蛾极具潜力的生防菌株。但本研究是基于稳定的室内环境条件下取得的，在实际应用中该菌株能否在复杂的自然环境中发挥对草地贪夜蛾的持续控制作用，仍有待深入研究。另外，本研究只是对草地贪夜蛾前期蛹的致病性进行了测定，由于草地贪夜蛾蛹期较长，为明确蛹的最佳防治时间后续还需对中期蛹和后期蛹的致病力进行测定。

参考文献 (References)

Al-Sarar A, Hall FR, Downer RA, 2006. Impact of spray application methodology on the development of resistance to cypermethrin and spinosad by fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith). *Pest Management Science*, 62(11): 1023–1031.

Akutse KS, Kimemia JW, Ekesi S, Khamis FM, Ombura OL, Subramanian S, 2019. Ovicidal effects of entomopathogenic fungal isolates on the invasive fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Applied Entomology*, 143(6): 626–634.

Erika PG, Carlos E, Carlos EC, Martha LC，Laura FV, 2018. *Metarhizium rileyi* biopesticide to control *Spodoptera frugiperda*: Stability and insecticidal activity under glasshouse conditions. *Fungal Biology*, 122(11): 1069–1076.

Garrido-Jurado I, Fernández-Bravo M, Carlos C, Quesada-Moraga E, 2015. Diversity of entomopathogenic Hypocreales in soil and phylloplanes of five Mediterranean cropping systems. *Journal of Invertebrate Pathology*, 130: 97–106.

Lei YY, Wang DS, Xue ZH, Lyu LH, Huang SH, Zhang YP, 2020. Identification of a *Metarhizium* strain and its pathogenicity to *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Guangzhou area. *Journal of Southern Agriculture*, 51(6): 1265–1273. [雷妍圆, 王德森, 薛志洪, 吕利华, 黄少华, 章玉苹, 2020. 广州地区一株绿僵菌的鉴定及其对草地贪夜蛾的致病力测定. 南方农业学报, 51(6): 1265–1273.]

Li YP, Zhang S, Wang XJ, Xie XP, Liang P, Zhang L, Gu SH, Gao XW, 2019. Current status of insecticide resistance in *Spodoptera frugiperda* and strategies for its chemical control. *Plant Protection*, 45 (4): 14–19. [李永平, 张帅, 王晓军, 解晓平, 梁沛, 张雷, 谷少华, 高希武, 2019. 草地贪夜蛾抗药性现状及化学防治策略. 植物保护, 45(4): 14–19.]

Li ZY, Dai QX, Kuang ZL, Liang MR, Wang L, Lu YY, Chen KW, 2019. Effects of three artificial diets on development and reproduction of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith). *Journal of Environmental Entomology*, 41(6): 1147–1154. [李子园, 戴钎萱, 邝昭琅, 梁铭荣, 王磊, 陆永跃, 陈科伟, 2019. 3 种人工饲料对草地贪夜蛾生长发育及繁殖力的影响. 环境昆虫学报, 41(6): 1147–1154.]

Liu YL, Zhang YS, Zhang S, Wang QQ, Rui CH, 2019. Control efficacy of five ultra-low volume liquid insecticides against *Spodoptera frugiperda* in corn field. *Plant Protection*, 45(5): 102–105. [刘好玲, 张永生, 张生, 王芹芹, 芮昌辉, 2019. 5 种杀虫剂超低容量液剂对玉米田草地贪夜蛾的防治效果. 植物保护, 45(5): 102–105.]

Long XZ, Gao XY, Zeng XR, He A, Wei DW, Jiang XD, Zeng T, Yu YH, 2021. Screening of a *Metarhizium rileyi* strain and its virulences to *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Chinese Journal Biological Control*, 37(6): 1111–1119. [龙秀珍, 高旭渊, 曾宪儒, 何瞻, 韦德卫, 江小冬, 曾涛, 于永浩, 2021. 一株莱氏绿僵菌的筛选及其对草地贪夜蛾的毒力. 中国生物防治学报, 37(6): 1111–1119.]

Ma T, Wang HF, Liang SP, Xiao Q, Cao PR, Chen X, Niu Y, He YR, Sun ZH, Wen XJ, Wang C, 2019. Effects of soil-treatment with fungal biopesticides on pupation behaviors, emergence success and fitness of tea geometrid, *Ectropis grisescens* (Lepidoptera: Geometridae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 22(1): 208–214.

Mallapur CP, Naik AK, Hagari S, Praveen T, Patil RK, Lingappa S, 2018. Potentiality of *Nomuraea rileyi* (Farlow) Samson against the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) infesting maize. *Journal Entomology and Zoology Studies*, 6(6): 1062–1067.

Martins T, Oliveira L, Garcia P, 2005. Larval mortality factors of *Spodoptera littoralis* in the Azores. *Biocontrol*, 50(5): 761–770.

Montezano DG, Specht A, Sosa-Gómez DR, Roque-Specht VF, Sousa-Silva JC, Paula-Moraes, Peterson JA, Hunt TE, 2018. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. *African Entomology*, 26(2): 286–301.

Ordóñez-García M, Rios-Velasco C, Berlanga-Reyes DI, Acosta-Muñiz CH, Salas-Marina MÁ, Cambero-Campos OJ, 2015. Occurrence of natural enemies of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Chihuahua, Mexico. *Florida Entomologist*, 98(3): 843–847.

Peng GX, Zhang SL, Xia YX, 2019. Laboratory efficacy of insecticidal fungi for control of *Spodoptera frugiperda*. *Chinese*

Journal Biological Control, 35(5): 729–734. [彭国雄, 张淑玲, 夏玉先, 2019. 杀虫真菌对草地贪夜蛾不同虫态的室内活性. 中国生物防治学报, 35(5): 729–734.]

Qiu LM, Liu QQ, Tian XH, Chen YS, Huang XY, Lin RK, Yang XJ, Liu BP, Wang ZH, He YX, Zhan ZX, 2020. Cold hardiness and overwintering ability of fall armyworm *Spodoptera frugipera* populations in Fujian province. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(6): 1299–1310. [邱良妙, 刘其全, 田新湖, 陈益生, 黄晓燕, 林仁魁, 杨秀娟, 刘必炮, 王竹红, 何玉仙, 占志雄, 2020. 福建省草地贪夜蛾种群的耐寒性与越冬能力研究. 应用昆虫学报, 57(6): 1299–1310.]

Rogge SA, Mayerhofer J, Enkerli J, Bacher S, Grabenweger G, 2017. Preventive application of an entomopathogenic fungus in cover crops for wireworm control. *Biocontrol*, 62(5): 613–623.

Ruiz-Nájera RE, Ruiz-Estudillo RA, Sánchez-Yánez JM, Molina-Ochoa J, Steven R. Skoda SR, Coutiño-Ruiz R, Pinto-Ruiz R, Guevara-Hernández F, Foster JE, 2013. Occurrence of entomopathogenic fungi and parasitic nematodes on *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) larvae collected in central Chiapas, México. *Florida Entomologist*, 96(2): 498–503.

Sun BB, Hou ZR, Dong M, Li JP, Guo XH, Yin Z, 2020. Functional response of *Orius sauteri* to the 1st-instar larvae of fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Plant Protection*, 47(4): 845–851. [孙贝贝, 侯峥嵘, 董民, 李金萍, 郭喜红, 尹哲, 2020. 东亚小花蝽对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的捕食作用. 植物保护学报, 47(4): 845–851.]

Sparks AN, 1979. A review of the biology of the fall armyworm. *Florida Entomology*, 62(2): 82–87.

Tang Y, Guo JF, Wang QY, Tai HK, Gao ZP, He KL, Wang ZY, 2020. Three larval parasitic wasps of *Spodoptera frugiperda* were found in Dehong prefecture of Yunnan province. *Plant Protection*, 46(3): 254–259. [汤印, 郭井菲, 王勤英, 太红坤, 高祖鹏, 何康来, 王振营, 2020. 云南省德宏州发现 3 种草地贪夜蛾幼虫寄生蜂. 植物保护, 46(3): 254–259.]

Wang L, Chen KW, Lu YY, 2019. Long-distance spreading speed and trend predication of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in China. *Journal of Environmental Entomology*, 41(4): 683–694. [王磊, 陈科伟, 陆永跃, 2019. 我国草地贪夜蛾入侵扩张动态与发生趋势预测. 环境昆虫学报, 41(4): 683–694.]

Xu YD, Wei HS, Shi JW, Chen HH, Shi WP, Tan SQ, 2020. Comparison of virulence of three *Beauveria bassiana* strains against fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Plant Protection*, 47(4): 867–874. [徐毓笛, 魏红爽, 石嘉伟, 陈宏灏, 石旺鹏, 谭树乾, 2020. 三株球孢白僵菌对草地贪夜蛾的毒力比较. 植物保护学报, 47(4): 867–874.]

Yang PY, Zhu XM, Guo JF, Wang ZY, 2019. Strategy and advice for managing the fall armyworm in China. *Plant Protection*, 45(4): 1–6. [杨普云, 朱晓明, 郭井菲, 王振营, 2019. 我国草地贪夜蛾的防控对策与建议. 植物保护, 45(4): 1–6.]

Yu SJ, Mccord EJ, 2007. Lack of cross-resistance to indoxacarbin insecticide-resistance *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and *Plutella axylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Pest Management Science*, 63(1): 63–67.

Zhao SY, Yang XM, Sun XX, Zhang HW, Zhang S, Wu KM, 2019. Laboratory control efficacy of commonly-used bioinsecticides against *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 45(3): 21–26. [赵胜园, 杨现明, 孙小旭, 张浩文, 张生, 吴孔明, 2019. 常用生物农药对草地贪夜蛾的室内防效. 植物保护, 45(3): 21–26.]

Zheng YQ, Hu HF, Fu YF, Jin XH, Zhang X, Yang BY, Zhang ZH, Huang ML, Li YC, Chen B, Li ZY, 2019. Isolation and identification of entomopathogenic fungi *Metarhizium rileyi* isolated from *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith). *Plant Protection*, 45(5): 65–70. [郑亚强, 胡惠芬, 付玉飞, 金新华, 张栩, 杨宝云, 张志红, 黄明亮, 李永川, 陈斌, 李正跃, 2019. 草地贪夜蛾莱氏绿僵菌的分离鉴定. 植物保护, 45(5): 65–70.]