

引用格式:

邓璇璇, 匡炜, 方宝华, 张亚, 刘双清. 金龟子绿僵菌制剂对二化螟的防效及体内相关酶活性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(4): 65–69.

DENG X X, KUANG W, FANG B H, ZHANG Y, LIU S Q. Effects of *Metarhizium anisopliae* preparation against *Chilo suppressalis* and on related enzyme activities in vivo[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2024, 50(4): 65–69.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 金龟子绿僵菌制剂对二化螟的防效及体内相关酶活性的影响

邓璇璇<sup>1,2</sup>, 匡炜<sup>2</sup>, 方宝华<sup>2</sup>, 张亚<sup>1</sup>, 刘双清<sup>1\*</sup>

(1.湖南农业大学植物保护学院, 湖南长沙 410128; 2.湖南省水稻研究所, 湖南长沙 410125)

**摘要:** 用剂量为  $1.6 \times 10^7$ /mL 的金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂处理二化螟幼虫, 测定该制剂对二化螟幼虫的毒力及其对幼虫总蛋白含量及过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)等 3 种保护酶活性和羧酸酯酶(CarE)、乙酰胆碱酯酶(AChE)、碱性蛋白酶(AKP)和谷胱甘肽 S-转移酶(GSTs)等 4 种解毒酶活性的影响。结果表明: 经金龟子绿僵菌制剂处理后, 二化螟幼虫的存活率呈持续下降趋势, 半致死时间(LT<sub>50</sub>)为 7.23 d, 第 10 天死亡率为 56.89%, 说明金龟子绿僵菌制剂对二化螟幼虫具有显著毒力; 金龟子绿僵菌制剂处理 3 d 时, 二化螟幼虫蛋白质含量最高; POD、CAT、SOD 等 3 种保护酶活性分别在处理 2、4、5 d 时达到最高, 分别为 198.76、19.59 和 12.90 U/mg, 均显著高于对照组相应酶的活性; 4 种解毒酶 GSTs、AChE、CarE 和 AKP 最高活性分别约为对照组的 1.68、1.68、1.27 和 1.62 倍, 说明经金龟子绿僵菌制剂 CQMa421 处理后, 二化螟幼虫体内稳态遭到破坏, 进而受到毒害。

**关键词:** 金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂; 二化螟; 毒力; 保护酶; 解毒酶

中图分类号: S433.4

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)04-0065-05

### Effects of *Metarhizium anisopliae* preparation against *Chilo suppressalis* and on related enzyme activities in vivo

DENG Xuanxuan<sup>1,2</sup>, KUANG Wei<sup>2</sup>, FANG Baohua<sup>2</sup>, ZHANG Ya<sup>1</sup>, LIU Shuangqing<sup>1\*</sup>

(1.College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Hunan Rice Research Institute, Changsha, Hunan 410125, China)

**Abstract:** *Chilo suppressalis*(*C. suppressalis*) larvae were treated with *Metarhizium anisopliae*(*M. anisopliae*) CQMa421 preparation at the recommended field dose of  $1.6 \times 10^7$  cells/mL. The toxicity of *M. anisopliae* CQMa421 preparation to *C. suppressalis* larvae as well as the larval total protein content and activities of catalase(CAT), peroxidase(POD), superoxide dismutase(SOD), carboxylesterase(CarE), acetylcholinesterase(AChE), alkaline protease(AKP) and glutathione S-transferases(GSTs) were determined. The results showed that the survival rate of *C. suppressalis* larvae showed a continuous decreasing trend after treatment with *M. anisopliae* CQMa421 preparation, preparation with the LT<sub>50</sub> of 7.23 d and the mortality rate of 56.89% on the 10th day of treatment, indicating that the *M. anisopliae* CQMa421 preparation had significant toxicity to *C. suppressalis* larvae. The protein content of *C. suppressalis* larvae was the highest at 3 d of *M. anisopliae* CQMa421 preparation treatment. At 2, 4 and 5 d after treatment, the activities of three protective enzymes, POD, CAT and SOD, reached the highest with 198.76, 19.59 and 12.90 U/mg, respectively, which were significantly higher compared to the control. The highest activities of four detoxification enzymes, GSTs, AChE, CarE and AKP, were 1.68, 1.68, 1.27 and 1.62 times higher than those of the control, respectively. The results indicate that the homeostasis of *C. suppressalis*

收稿日期: 2024-01-12

修回日期: 2024-05-10

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFD1401104); 湖南创新型省份建设专项(2023NK2016, 2022NK2011)

作者简介: 邓璇璇(1999—), 女, 湖南永州人, 硕士研究生, 主要从事水稻虫害生物防治技术研究, 3103601483@qq.com; \*通信作者, 刘双清, 博士, 副教授, 主要从事水稻病虫害生物防治资源挖掘与利用研究, liushuangqing@hunau.edu.cn

larvae was disrupted by the treatment of *M. anisopliae* CQMa421 preparation, which in turn exerted a toxic effect on the larvae.

**Keywords:** *Metarhizium anisopliae* CQMa421 preparation; *Chilo suppressalis*; virulence; protective enzyme; detoxifying enzyme

二化螟(*Chilo suppressalis*)属鳞翅目螟蛾科害虫, 主要分布于温带和亚热带地区, 危害水稻后造成减产<sup>[1-2]</sup>。二化螟的寄主有水稻、茭白、高粱和玉米等禾本科作物以及蚕豆等豆科和油菜等十字花科植物<sup>[3]</sup>。水稻不同生育时期都可能发生二化螟危害<sup>[4]</sup>。化学防治仍然是防治二化螟为害的主要措施, 但面临药害和抗药性等诸多问题。

绿僵菌(*Metarhizium anisopliae*)是一种广谱性的生防真菌<sup>[5]</sup>, 已有不少利用绿僵菌控制害虫种群数量、摄食行为的报道。SHAH 等<sup>[6]</sup>将绿僵菌制剂接种在无菌土壤上, 发现可致黄粉虫(*Tenebrio molitor*)幼虫死亡, 死亡率高达 76%。ZHANG 等<sup>[7]</sup>证明绿僵菌对德国小蠊(*Blattella germanica*)具有较强的毒性, 经过绿僵菌处理的 1~3 龄若虫和成虫累计死亡率分别达到 100%和 96.67%。WANG 等<sup>[8]</sup>将绿僵菌接种后的白背飞虱(*Sogatella furcifera*)进行转录组测序, 筛选出与嗅觉相关的基因 *ORs* 和 *OBP*s, 表明绿僵菌可以调节与嗅觉相关基因的表达, 从而影响昆虫摄食偏好。金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂是新近出现的具有环保、高效特点的真菌杀虫剂生防产品, 作为一种昆虫内寄生真菌, 金龟子绿僵菌主要通过无性繁殖的方式侵入寄主昆虫体壁, 进入昆虫血腔后能够迅速繁殖成酵母状, 产生大量虫菌体并分泌毒素, 这些毒素能够抑制昆虫的免疫系统, 加速昆虫死亡<sup>[9]</sup>; 因此, 越来越多的研究者将其作为环保型化学农药的替代品<sup>[10]</sup>。已有研究发现金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂可以将二化螟种群抑制到较低水平<sup>[11]</sup>, 对二化螟具有毒性作用<sup>[12]</sup>。

谭格等<sup>[13]</sup>研究发现, 金龟子绿僵菌侵染斜纹夜蛾(*Spodoptera litura*)幼虫后, 幼虫体内的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)在抵抗金龟子绿僵菌侵染以及保护自身的过程中发挥作用。李贝贝等<sup>[14]</sup>的研究结果表明, 飞蝗(*Locusta migratoria*)感染绿僵菌后体内 SOD 和 POD 活性均显著高于对照的活性, 使得飞蝗体内清除自由基的能力增强, 可以有效减少机体的损伤。尹仙枫等<sup>[15]</sup>研究 FKBP52 蛋白和绿僵菌混合后对西花蓟马(*Frankliniella*

*occidentalis*)体内羧酸酯酶(CarE)和谷胱甘肽 S-转移酶(GSTs)活性的影响, 结果显示, 经处理的西花蓟马体内 CarE 和 GSTs 活性被激活或被抑制均与侵染时间有关。王正浩等<sup>[16]</sup>研究绿僵菌对东亚飞蝗中肠的 AChE 和 GSTs 活性的影响, 发现这 2 种酶活性均先升高后下降, 可能是前期受到绿僵菌刺激导致活性提高, 但随着时间延长, 绿僵菌的毒力作用加大, 寄主自身机体紊乱, 2 种酶活性下降。李燕翠等<sup>[17]</sup>发现不同绿僵菌菌株对暗黑腮金龟(*Holotrichia parallela*)幼虫体内的 AKP 等多种酶活性影响不显著, 可能这个酶系并不能反映绿僵菌对暗黑腮金龟的侵染过程。

笔者测定金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂对二化螟幼虫的毒力和二化螟幼虫的保护酶和解毒酶活性的影响, 评估制剂对二化螟的防效, 探索二化螟幼虫体内的生理变化过程, 以期应用生防菌对二化螟进行可持续防控提供新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

从湖南省水稻研究所试验基地的水稻叶片上采集未接触过农药的二化螟卵块, 置于室内人工气候箱中, 在(26±1) °C、相对湿度 70%~80%的条件下孵化, 用新鲜茭白饲养至 3 龄。

金龟子绿僵菌 CQMa421 可分散油悬浮剂(8.0×10<sup>9</sup> 个/mL), 购自重庆聚立信生物工程有限公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂对二化螟毒力的测定

采用浸虫法<sup>[18]</sup>处理 3 龄二化螟幼虫: 用无菌水将金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂稀释成 1.6×10<sup>7</sup>/mL 的悬浮液, 将二化螟幼虫浸入悬浮液中, 5 s 后取出, 用吸水纸吸干体表水分。以 0.05%吐温-80 的无菌水为空白对照, 每个处理重复 3 次, 每重复处理 30 头。每隔 24 h 观察幼虫的活动状态, 连续记录 10 次。用细毛刷轻触幼虫,

虫体不动即视为死亡。逐日统计幼虫死亡数量，参照文献[19]的方法计算制剂对二化螟的半致死时间(LT<sub>50</sub>)。

### 1.2.2 二化螟幼虫蛋白质含量和保护酶及解毒酶活性的测定

分别于制剂处理后第 1、2、3、4、5、6、7 天，称取体质量约 0.1 g 的二化螟幼虫虫体，用液氮处理，加入 1 mL PBS 提取缓冲液(pH7.0)，冰浴匀浆，于 10 000 r/min、4 °C 离心 10 min，收集上清液，按照试剂盒(上海酶联生物科技有限公司生产)说明书测定幼虫蛋白质含量和超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)等 3 种保护酶活性及羧酸酯酶(CarE)、乙酰胆碱酯酶(AChE)、碱性蛋白酶(AKP)和谷胱甘肽 S-转移酶(GSTs)等 4 种解毒酶活性。

### 1.3 数据分析

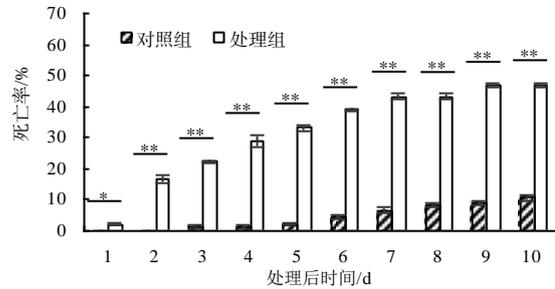
运用 SPSS 27.0 进行数据分析，选用单因素 ANOVA 检验，对数据进行 Tukey 法差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂对二化螟幼虫的毒力

二化螟 3 龄幼虫被金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂处理后的死亡率如图 1 所示。从处理后第 2 天开始，二化螟幼虫死亡率急剧上升，每天的死亡率

均显著升高。经计算，金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂对二化螟幼虫的半致死时间(LT<sub>50</sub>)为 7.23 d。二化螟幼虫被侵染死亡后，几天内在其体表即出现墨绿色的菌丝，表明该制剂对二化螟具较好的防效。



“\*\*”和“\*\*\*”分别表示空白对照组与处理组间的差异有统计学意义 ( $P<0.05$ ,  $P<0.01$ )。

图 1 金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂处理后二化螟 3 龄幼虫的死亡率

Fig.1 Virulence of *Metarhizium anisopliae* CQMa421 against *Chilo suppressalis* 3rd instar larvae

### 2.2 金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂对二化螟幼虫蛋白质含量的影响

金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂处理后二化螟幼虫的蛋白质含量列于表 1。处理组与对照组之间的蛋白质含量存在差异，在第 1、3、5 天时，处理组幼虫的蛋白质含量显著升高；在第 3 天时，处理组幼虫的蛋白质含量达到最大值，为 1 998.07 U/mg，约为同期对照组的 1.25 倍，与第 2 天相比，增幅约为 7.90%。

表 1 金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂处理后二化螟幼虫的蛋白质含量和保护酶活性

处理后时间/d	蛋白质含量		CAT 活性		SOD 活性		POD 活性	
	处理	对照	处理	对照	处理	对照	处理	对照
1	(1 800.61±9.60)a	(1 542.52±22.14)b	(14.77±0.23)a	(10.14±0.09)b	(12.57±0.18)a	(7.40±0.12)b	(198.76±3.10)a	(134.04±3.06)b
2	(1 851.81±8.52)a	(1 892.10±19.86)a	(19.24±0.17)a	(9.18±0.16)b	(12.35±0.07)a	(6.65±0.09)b	(185.71±2.97)a	(99.37±2.55)b
3	(1 998.07±23.86)a	(1 592.98±15.63)b	(16.12±0.14)a	(11.82±0.28)b	(11.60±0.10)a	(7.26±0.13)b	(148.77±1.02)a	(128.35±1.93)b
4	(1 916.33±7.29)b	(2 026.32±16.14)a	(19.59±0.32)a	(8.95±0.07)b	(12.31±0.12)a	(5.74±0.10)b	(127.86±3.05)a	(107.98±0.76)b
5	(1 994.50±8.82)a	(1 728.92±13.53)b	(17.49±0.33)a	(10.96±0.33)b	(12.90±0.13)a	(5.69±0.09)b	(144.17±3.32)a	(127.70±1.82)b
6	(1 732.52±8.05)a	(1 711.58±10.62)a	(17.77±0.27)a	(12.51±0.22)b	(12.67±0.08)a	(6.05±0.09)b	(156.34±3.05)a	(105.56±1.98)b
7	(1 597.05±8.87)b	(1 961.35±9.54)a	(18.69±0.15)a	(8.99±0.11)b	(11.90±0.10)a	(6.79±0.05)b	(156.05±1.43)a	(110.85±1.38)b

同行不同字母表示相同时间空白对照与处理间的差异有统计学意义 ( $P<0.05$ )。

### 2.3 金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂对二化螟幼虫保护酶活性的影响

金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂处理二化螟幼虫

的保护酶活性测定结果列于表 1。在第 4 天，二化螟体内的 CAT 活性上升至最高，为 19.59 U/mg，约为同期对照组的 2.19 倍，与第 3 天相比，CAT 活

性增幅约为 21.53%。POD 活性存在明显的下降趋势,第 4 天其活性降至最低值,为 127.86 U/mg,约为同期对照组的 1.18 倍,与第 3 天相比,降幅约为 14.06%。结果显示,经过连续 7 d 对二化螟幼虫的酶活测定,第 7 天时,处理组的 CAT、SOD 和 POD 活性均显著高于对照组的。

## 2.4 金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂对二化螟幼虫解毒酶活性的影响

金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂处理后第 7 天,二化螟幼虫体内的 GSTs 活性达到最大值(表 2),

为 36.92 U/mg,约为同期对照组的 1.68 倍,与第 6 天相比,增幅约为 50.08%。AChE 活性在第 2 天时升至最大,为 140.67 U/mg,约为同期对照组的 1.68 倍,与第 1 天相比,增幅约为 18.66%。处理后第 7 天,CarE 活性最低,为 129.52 U/mg,约为同期对照组的 1.06 倍,与第 6 天相比,降幅为 5.22%。处理后第 2 天 AKP 活性降至最低值,为 217.38 U/mg,约为对照组的 1.17 倍,与第 1 天相比,降幅约为 27.17%。连续 7 d 的 GSTs、AChE、CarE 和 AKP 的活性测定结果表明,第 7 天时处理组与对照组酶活性均存在显著差异。

表 2 金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂处理二化螟幼虫的解毒酶活性

处理后 时间/d	GSTs 活性		CarE 活性		AChE 活性		AKP 活性	
	处理	对照	处理	对照	处理	对照	处理	对照
1	(27.11±0.52)a	(21.46±0.14)b	(143.87±1.37)a	(112.91±1.26)b	(118.55±0.93)a	(67.70±1.66)b	(298.49±3.35)a	(199.21±2.30)b
2	(27.98±0.29)a	(20.29±0.45)b	(142.17±1.97)a	(120.98±1.87)b	(140.67±2.74)a	(83.54±1.66)b	(217.38±1.36)a	(186.07±3.84)b
3	(23.79±0.44)a	(21.84±0.14)b	(139.00±1.79)a	(112.64±0.83)b	(103.65±0.37)a	(68.00±1.34)b	(248.77±1.67)a	(179.68±0.63)b
4	(23.94±0.13)a	(23.77±0.55)a	(139.78±0.97)a	(112.46±1.73)b	(87.80±1.78)a	(66.85±1.18)b	(271.47±1.52)a	(216.41±2.34)b
5	(27.14±0.40)a	(23.03±0.58)b	(134.55±1.23)a	(116.91±1.24)b	(103.79±1.42)a	(76.29±1.66)b	(295.87±4.39)a	(213.09±3.28)b
6	(24.60±0.26)a	(24.17±0.44)a	(136.66±2.01)a	(121.69±1.79)b	(98.53±0.95)a	(88.09±1.43)b	(300.59±5.11)a	(184.98±2.74)b
7	(36.92±0.48)a	(21.98±0.47)b	(129.52±1.26)a	(122.11±1.45)b	(115.76±0.67)a	(62.79±1.76)b	(283.12±4.63)a	(188.27±2.60)b

同行不同字母表示空白对照与处理间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

## 3 结论与讨论

本研究结果表明,剂量为  $1.6\times 10^7$  mL 的金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂对二化螟的半数致死时间为 7.23 d,第 10 天的累计死亡率为 56.89%,说明金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂对二化螟具有较好的防效。

经金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂处理后,二化螟幼虫的蛋白质含量总体呈下降趋势,幼虫的 SOD 活性在第 5 天上升到最高,随着孢子在虫体增殖速度提高,后期其活性被抑制且下降明显;由于早期二化螟幼虫体内产生了大量毒素,使得 POD 合成受阻,活性逐渐下降,而后期可能由于产生的毒素少,其活性开始缓慢上升;CAT 活性随着处理时间的延长明显上升,可能在一定程度上激活二化螟的保护酶系统<sup>[20]</sup>。这表明 3 种保护酶在二化螟对金龟子绿僵菌 CQMa421 制剂的氧化应激反应中发挥重要作用。

二化螟体内的 CarE、AChE 和 AKP 的活性因早期虫体内孢子萌发量不大,受到金龟子绿僵菌 CQMa421 的抑制作用较小,酶活性较高;随着孢子的繁殖和积累,酶活性总体下降。而 GSTs 活性在二化螟幼虫受到金龟子绿僵菌 CQMa421 侵染

后,早期明显受到抑制,但随着时间的推移,在后期可能由于虫体受到不利环境的刺激或药物的胁迫作用,导致酶活性急剧上升<sup>[21]</sup>。

病原真菌侵入寄主体内后,会激活寄主产生应激反应,导致一系列与寄主体内代谢相关的酶活性发生变化,使得寄主体内稳态失衡,出现一系列病理变化<sup>[22]</sup>。当绿僵菌侵染昆虫后,其毒力会激发宿主体内酶活性发生变化<sup>[23]</sup>,幼虫体内的防御与修复机制被激活,但随着生防制剂处理时间的延长,幼虫体内的防御与修复系统逐渐被突破,最终导致其死亡。

## 参考文献:

- [1] YANG L P, WANG S Y, WANG R F, et al. Floating chitosan-alginate microspheres loaded with chlorantraniliprole effectively control *Chilo suppressalis*(Walker) and *Sesamia inferens*(Walker) in rice fields[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 783: 147088.
- [2] WANG P, LI M J, BAI Q R, et al. Performance of *Trichogramma japonicum* as a vector of *Beauveria bassiana* for parasitizing eggs of rice striped stem borer, *Chilo suppressalis*[J]. *Entomologia Generalis*, 2021, 41(2): 147-155.

- [3] REYES-ESPINOSA F, MÉNDEZ-ÁLVAREZ D, PÉREZ-RODRÍGUEZ M A, et al. In silico study of the resistance to organophosphorus pesticides associated with point mutations in acetylcholinesterase of Lepidoptera: *B. mandarina*, *B. mori*, *C. auricilius*, *C. suppressalis*, *C. pomonella*, *H. armigera*, *P. xylostella*, *S. frugiperda*, and *S. litura*[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(10): 2404.
- [4] WEI Y B, YAN R, ZHOU Q L, et al. Monitoring and mechanisms of chlorantraniliprole resistance in *Chilo suppressalis*(Lepidoptera: Crambidae) in China[J]. Journal of Economic Entomology, 2019, 112(3): 1348–1353.
- [5] BRUNER-MONTERO G, WOOD M, HORN H A, et al. Symbiont-mediated protection of *Acromyrmex* leaf-cutter ants from the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*[J]. mBio, 2021, 12(6): e0188521.
- [6] SHAH S, ASH G J, WILSON B A L. Resporulation of *Metarhizium anisopliae* granules on soil and mortality of *tenebrio molitor*: Implications for wireworm management in sweetpotato[J]. Annals of Applied Biology, 2023, 182(1): 65–76.
- [7] ZHANG X C, JIANG M, ZANG Y N, et al. *Metarhizium anisopliae* is a valuable grist for biocontrol in beta-cypermethrin-resistant *Blattella germanica*(L.)[J]. Pest Management Science, 2022, 78(4): 1508–1518.
- [8] WANG Y R, HAN L J, XIA Y X, et al. The entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* affects feeding preference of *Sogatella furcifera* and its potential targets, identification[J]. Journal of Fungi, 2022, 8(5): 506.
- [9] LI C Z, HUANG W Y, ZHOU T T, et al. Mutation of a prenyltransferase results in accumulation of subglutinols and destruxins and enhanced virulence in the insect pathogen, *Metarhizium anisopliae*[J]. Environmental Microbiology, 2022, 24(3): 1362–1379.
- [10] NOWAK M, BERNAT P, MROZIŃSKA J, et al. Acetamidiprid affects destruxins production but its accumulation in *Metarhizium* sp. spores increases infection ability of fungi[J]. Toxins, 2020, 12(9): 587.
- [11] PENG G X, XIE J Q, GUO R, et al. Long-term field evaluation and large-scale application of a *Metarhizium anisopliae* strain for controlling major rice pests[J]. Journal of Pest Science, 2021, 94(3): 969–980.
- [12] 魏琪, 朱旭晖, 何佳春, 等. 5 种微生物杀虫剂对 3 种水稻主要害虫的室内毒力比较及致死表型观察[J]. 植物保护, 2022, 48(4): 165–174.
- [13] 谭格, 李天铭, 周志成, 等. 金龟子绿僵菌对斜纹夜蛾幼虫的生防效果、抗氧化酶活性和肠道细菌群落的影响[J]. 微生物学报, 2021, 61(5): 1171–1183.
- [14] 李贝贝, 田野, 杜桂林, 等. 丝氨酸蛋白酶抑制剂 Serpin1 对绿僵菌侵染飞蝗的影响[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(5): 729–736.
- [15] 尹仙枫, 朱凯辉, 王芳, 等. 绿僵菌与 FKBP52 联合使用对西花蓟马的毒力[J]. 植物保护学报, 2024, 51(1): 178–185.
- [16] 王正浩, 贾苗, 张彦丰, 等. 不同蛋白酶抑制剂对绿僵菌侵染东亚飞蝗的影响[J]. 中国生物防治学报, 2016, 32(6): 756–761.
- [17] 李燕翠, 张彦丰, 刘春琴, 等. 绿僵菌不同转化子毒力差异与胞外酶的相关性分析[J]. 中国生物防治学报, 2014, 30(6): 759–765.
- [18] YUE Y, JIANG M F, HU H Y, et al. Isolation, identification and insecticidal activity of the secondary metabolites of *Talaromyces purpureogenus* BS5[J]. Journal of Fungi, 2022, 8(3): 288.
- [19] 熊浩明, 魏柏青, 魏荣杰, 等. 用 SPSS 软件计算鼠疫菌半数致死量(LD<sub>50</sub>) [J]. 中国人兽共患病学报, 2013, 29(11): 1127–1130.
- [20] 周敏, 王富豪, 张明浩, 等. 敌草胺对油菜抗氧化酶活性及相关基因表达的影响[J]. 西北农业学报, 2024, 33(5): 941–950.
- [21] 王泽华, 杨帆, 高恬恬, 等. 芫荽精油对桃蚜的杀虫活性及其保护酶和解毒酶活性的影响[J]. 昆虫学报, 2024, 67(3): 366–373.
- [22] 张彦丰, 王正浩, 农向群, 等. 绿僵菌侵染对东亚飞蝗中肠保护酶和解毒酶的影响[J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(6): 876–881.
- [23] CAO G C, JIA M, ZHAO X, et al. Different effects of *Metarhizium anisopliae* strains IMI330189 and IBC200614 on enzymes activities and hemocytes of *Locusta migratoria* L[J]. PLoS One, 2016, 11(5): e0155257.

责任编辑: 罗慧敏  
英文编辑: 罗维