LC_{30}与LC_{50}棘孢木霉发酵液对亚洲玉米螟种群的致死效应分析

陈 敏[1,2] 羿超群[1] 石龙飞[1] 王 玥[1,3] 郭井菲[1] 王新华[2*] 张永军[1*]

（1. 中国农业科学院植物保护研究所，植物病虫害综合治理全国重点实验室，北京 100193；
2. 上海交通大学农业与生物学院，上海 200240；3. 安徽科技学院资源与环境学院，凤阳 233100）

摘要：为评估棘孢木霉 *Trichoderma asperellum* GDFS1009 发酵液对亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 的毒力和致死效应，利用概率值分析法分析其对亚洲玉米螟1龄幼虫的LC_{30}与LC_{50}，并通过年龄−阶段两性生命表解析LC_{30}与LC_{50}发酵液胁迫下亚洲玉米螟发育历期、繁殖参数和种群参数的变化。结果表明：棘孢木霉发酵液对亚洲玉米螟1龄幼虫的LC_{30}和LC_{50}分别为3.58×10^4个/mL和7.78×10^4个/mL。LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液均会延长亚洲玉米螟幼虫发育历期、蛹期和成虫前期，均能缩短成虫产卵前期、总产卵前期和成虫寿命；同时，LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液处理下亚洲玉米螟蛹重均显著降低，且单雌产卵量较对照分别显著降低了31.31%和71.14%。LC_{50}棘孢木霉发酵液处理极显著降低了亚洲玉米螟的净增殖率、内禀增长率、周限增长率，较对照分别下降了80.00%、9.10%和5.30%，而平均世代周期从32.90 d显著延长至35.76 d；LC_{30}棘孢木霉发酵液处理下以上种群参数与对照组相比均无显著变化。表明LC_{30}与LC_{50}棘孢木霉发酵液通过延长亚洲玉米螟发育周期与抑制繁殖力的协同作用阻碍其种群增长，具有开发为木霉制剂的潜力。

关键词：棘孢木霉；发酵液；亚洲玉米螟；两性生命表；种群合适度

Lethal effects of LC_{30} and LC_{50} fermentation broths of *Trichoderma asperellum* on population of the Asian corn borer *Ostrinia furnacalis*

Chen Min[1,2] Yi Chaoqun[1] Shi Longfei[1] Wang Yue[1,3] Guo Jingfei[1] Wang Xinhua[2*] Zhang Yongjun[1*]

（1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. College of Resource and Environment, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, Anhui Province, China）

Abstract: To evaluate the virulence and lethal effects of the fermentation broth of *Trichoderma asperellum* GDFS1009 against the Asian corn borer *Ostrinia furnacalis*, the LC_{30} and LC_{50} values against first-instar larvae were determined using probit analysis. Subsequently. An age-stage, two-sex life table was then employed to analyze changes in developmental duration, reproductive parameters, and population parameters of *O. furnacalis* under LC_{30} and LC_{50} fermentation broth treatments. The results demonstrated that the LC_{30} and LC_{50} values of *T. asperellum* fermentation broth against first-instar larvae of *O. furnacalis* were 3.58×10^4 and 7.78×10^4 spores/mL, respectively. Both LC_{30} and LC_{50} treatments prolonged larval development duration, pupal duration and the pre-adult period, while shortening the adult preoviposition period, total preoviposition period, and adult longevity. In addition, pupal weight was

基金项目：国家重点研发计划项目(2024YFD1400300)，国家玉米产业技术体系资助项目(CARS-02)

* 通信作者（Authors for correspondence），E-mail：xhwang@sjtu.edu.cn，yjzhang@ippcaas.cn

收稿日期：2025-11-04

significantly decreased under both treatments, and fecundity per female was significantly reduced by 31.31% and 71.14%, respectively. Furthermore, the LC_{50} treatment significantly decreased the net reproductive rate (R_0), intrinsic rate of increase (r), and finite rate of increase (λ) of *O. furnacalis* by 80.00%, 9.10%, and 5.30%, respectively, and significantly prolonged the mean generation time (T) from 32.90 d to 35.76 d. In contrast, these population parameters did not differ significantly between the LC_{30} treatment and the control. These findings indicate that LC_{30} and LC_{50} fermentation broths of *T. asperellum* hinder the population growth of *O. furnacalis* through the combined effects of prolonging developmental duration and suppressing fecundity, demonstrating potential for development as *Trichoderma*-based biocontrol agents.

Key words: *Trichoderma asperellum*; fermentation broth; *Ostrinia furnacalis*; two-sex life table; population fitness

亚洲玉米螟*Ostrinia furnacalis*是一种重要的鳞翅目农业害虫，可为害多种作物，在亚洲地区尤为严重（Abbas et al.，2025）。其幼虫可在玉米多个生育期造成危害，苗期可取食叶片，生长后期可蛀食茎秆和果穗，引起植株生长迟缓和倒伏，降低玉米产量，导致籽粒品质劣化，使其商品价值与食用价值下降，严重时甚至绝收（胡飞等，2020；李冰，2022；李鑫等，2022）。化学防治至今仍是亚洲玉米螟的主要防治手段之一，但长期单一施用化学农药会迅速增加害虫的抗药性，引发虫害再猖獗（纪明山，2017；Hubbard & Murillo，2024；王月琴等，2024），此外化学农药的不合理施用还会破坏生态环境，致使生物多样性衰减，土壤微生物环境稳态失衡，土壤活力降低，农产品中农药残留超标，这些都制约着农业的长期可持续优质发展（Rani et al.，2021；Ahmad et al.，2024；Zhou et al.，2025）。因此，开发新型亚洲玉米螟生物防治技术迫在眉睫。

生物防治剂可作为化学农药的有效辅助方案，木霉*Trichoderma* spp.是一类广泛存在于土壤及植物根际的丝状真菌，已被证实是一种潜力巨大的生物防治资源（Puyam，2016；Villavicencio-Vásquez et al.，2025）。目前，木霉在农业生产中被广泛用于防治植物病虫害，其通过寄生作用、营养竞争和产生多种具有抗真菌活性的代谢产物等多种机制来抑制病原菌的活性（Oyesola et al.，2025）。例如，长枝木霉*T. longibrachiatum*、侧生木霉*T. viride*、哈茨木霉*T. harzianum*和暗绿木霉*T. atroviride*能通过重寄生作用显著抑制核盘菌*Sclerotinia sclerotiorum*、齐整小核菌*S. rolfsii*及尖孢镰刀菌*Fusarium oxysporum*的菌丝生长，进而实现抑菌效果（Rajani et al.，2021）。绿色木霉*T. viride* T23则可通过营养竞争显著抑制轮枝镰刀菌*F. proliferatum*的生长（张照然，2024）。里氏木霉*T. reesei* JCM 2267在液态发酵和固态发酵条件下均可产生多种具有抗菌活性的代谢产物，对金黄色葡萄球菌*Staphylococcus aureus*、大肠杆菌*Escherichia coli*和铜绿假单胞菌*Pseudomonas aeruginosa*表现出明显的抑制作用（Wigati et al.，2024）。除此之外，木霉还能通过产生杀虫和拒食代谢物直接抑制害虫生长发育，通过定殖于植物根部激活其系统性防御反应，促使植物释放挥发性有机化合物，进而间接调控害虫种群（Poveda，2021）。例如，长枝木霉分泌的多种角质降解酶对茄白翅野螟*Leucinodes orbonalis*具有杀虫活性（Dwisandi et al.，2024）。绿色木霉产生的几丁质酶能破坏家蚕*Bombyx mori*围食膜结构，显著降低其取食效率，从而抑制幼虫发育甚至导致死亡（Berini et al.，2016）；此外，该菌还能通过定殖玉米根系，激活由水杨酸和茉莉酸介导的植物防御反应，产生挥发性化合物1-辛烯-3-醇和6-戊基-2H-吡喃-2-酮等，能使草地贪夜蛾*Spodoptera frugiperda*拒食玉米叶片（Contreras-Cornejo et al.，2018）。

木霉作为一种应用潜力较高的生物制剂，其对亚洲玉米螟生长发育的影响目前尚不明确。基于此，本研究通过LC_{30}与LC_{50}棘孢木霉*T. asperellum*发酵液处理亚洲玉米螟幼虫，利用生命表分析评估其对亚洲玉米螟的致死效应，以期为开发基于生态调控的亚洲玉米螟绿色防控策略提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试昆虫：亚洲玉米螟由中国农业科学院植物保护研究所玉米害虫课题组提供，在室内于温度（26±1）℃、相对湿度（70±5）%、光周期16 L∶8 D条件下，以自制人工饲料继代饲养至少15代，选取健

康1龄幼虫供试。

木霉发酵液：棘孢木霉菌株GDFS1009由上海交通大学农业环境微生物工程研究所提供，在28 ℃、120 r/min条件下液态发酵5 d获得发酵液原液，孢子浓度为2.0×10^7个/mL。在4 ℃下保存备用。

供试玉米：玉米品种为郑单958，种子为无包衣种子，由中国农业科学院新乡试验基地提供，在温度(26±1) ℃、相对湿度(70±5)%、光周期16 L∶8 D条件下培养至5叶期供试。

仪器：YKRD-700L智能顶光源人工气候箱，合肥右科仪器设备有限公司；SN-0745电视视频显微镜，深圳市叁诺西努科技有限公司；MA204/A电子天平，上海梅特勒-托利多仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 棘孢木霉对亚洲玉米螟的毒力测定

将棘孢木霉GDFS1009发酵液原液用无菌水梯度稀释50倍(4.0×10^5个/mL)、100倍(2.0×10^5个/mL)、300倍(1.0×10^5个/mL)、500倍(4.0×10^4个/mL)和800倍(2.5×10^4个/mL)，备用。取5叶期玉米叶片制成1 cm×1 cm的正方形叶碟，分别浸没于无菌水及棘孢木霉发酵液各稀释浓度液中10 min。取出风干后移入底部铺设有2%琼脂保湿层的24孔板中，每孔放入1片棘孢木霉发酵液处理叶片，以每孔放入1片无菌水处理叶片为对照，然后每孔接入1头亚洲玉米螟1龄幼虫。每个浓度处理3次重复，每个重复1板(即24头幼虫)。将24孔板置于温度(26±1) ℃、相对湿度(70±5)%、光周期16 L∶8 D条件下饲养，每24 h记录1次幼虫死亡情况，用镊子戳虫体腹部无反应则视为死亡。计算各处理试虫死亡率，使用PoloPlus 1.0软件采用概率值分析法计算亚致死浓度LC_{30}和致死中浓度LC_{50}及其95%置信区间，并拟合得到毒力回归方程。方程拟合优度通过χ^2检验评价，若χ^2检验对应的$P>0.05$，则表明模型拟合良好，回归方程可靠。

1.2.2 棘孢木霉处理下亚洲玉米螟的两性生命表构建

为明确LC_{30}与LC_{50}棘孢木霉发酵液对亚洲玉米螟生长发育的影响，本研究在温度(26±1) ℃、相对湿度(70±5)%、光周期16 L∶8 D条件下构建标准饲养体系。取棘孢木霉发酵液原液，分别将其浓度稀释至1.2.1计算得到的LC_{30}和LC_{50}后，采用1.2.1方法分别处理玉米叶片并铺入24孔板，以无菌水处理叶片为对照。取亚洲玉米螟1龄幼虫分别接入铺有LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液处理叶片的24孔板中，每孔1头，每个处理7次重复，每个重复1板(即24头幼虫)。每日定时观察并记录亚洲玉米螟幼虫的存活情况和蜕皮进度，统计各龄幼虫的发育历期，待幼虫发育至5龄后，转移到高3 cm、直径2 cm的独立饲养盒中单头饲养，盒盖扎孔透气，底部铺2%琼脂保湿。待饲养至幼虫化蛹后，称量蛹重，统计蛹期，并通过显微镜区分雌雄(张军等，2013)。待蛹羽化后将雌雄1∶1配对放入460 mL透明饲养杯中，用无菌脱脂纱布封口。每日为成虫提供5%蜂蜜水补充营养，观察并记录每日成虫产卵量与生存状态，直至死亡，统计成虫寿命和单雌产卵量。通过TIMING-MSChart软件对上述收集到的原始数据进行两性生命表构建(Chi et al.，2023)。

1.2.3 棘孢木霉对亚洲玉米螟存活和繁殖的影响分析

基于1.2.2构建的LC_{30}与LC_{50}棘孢木霉发酵液处理下亚洲玉米螟的两性生命表数据，计算亚洲米螟F_0代的年龄-阶段特征存活率S_{xj}(亚洲玉米螟个体从孵化开始到年龄x、阶段j的存活概率)、种群年龄-特征存活率l_x(亚洲玉米螟个体从孵化开始到特定年龄x的存活概率)、年龄-阶段特征寿命期望值e_{xj}(年龄为x在j阶段的亚洲玉米螟未来预期能够生存的时间)、种群特定年龄繁殖力m_x(亚洲玉米螟种群在年龄x的平均产卵量)、雌成虫年龄-特征繁殖力f_x(亚洲玉米螟雌成虫在年龄x的平均产卵量)和种群特定年龄繁殖率l_xm_x。$s_{xj}=\frac{n_{xj}}{N_0}$，式中，$N_0$表示生命表起始总虫数，$n_{xj}$表示第$x$虫态、第$j$处理组的存活个体数量；$l_x=\sum_{j=1}^{k}S_{xj}$，式中$k$代表处理组数；$e_{xj}=\sum_{i=x}^{\infty}\sum_{y=j}^{k}s'_{iy}$，式中$s'_{iy}$代表校正后处于年龄$i$、阶段$y$的虫态占比；$m_x=\frac{\sum_{j=1}^{k}S_{sj}f_j}{\sum_{j=1}^{k}S_{sj}}$，式中，$S_{sj}$表示各处理组环境适宜度系数，$f_j$表示第$j$处理组环境权重系数；$f_x=l_x\cdot m_x$。同时，利用TIMING-MSChart软件预测在无菌水对照、LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液处理下亚洲玉米螟种群在未来60 d的动态变化。

1.2.4 棘孢木霉对亚洲玉米螟种群参数的影响分析

根据1.2.3分析数据，计算不同浓度棘孢木霉发酵液处理下亚洲玉米螟种群的净增殖率R_0(表示在整个生命周期种群中每头雌成虫的平均产卵量)、内禀增长率r(表示在食物和空间充足、无天敌的理想条件下，种群年龄-阶段达到稳定状态后的最大瞬时增长率)、周限增长率λ(表示种群在单位时间内的增长倍数)和平均世代周期T(表示种群完成一个世代所需要的时间)。$R_0=\sum_{x=0}^{\infty}l_xm_x$，

$\sum_{x=0}^{\infty} e^{-r(x+1)} l_x m_x = 1, \lambda = e^r, T = \frac{\ln R_0}{r}$。

1.3 数据分析

使用SPSS 31.0软件对不同处理下亚洲玉米螟生长发育和繁殖参数进行正态分布检验（Shapiro-Wilk检验），若数据符合正态分布和方差齐性，则进行单因素方差分析，采用Tukey's HSD检验法进行多重比较；若数据不符合正态分布，则对数据进行对数转换后重新检验，符合后再进行方差分析和多重比较。使用Origin 2021软件作图。

2 结果与分析

2.1 棘孢木霉对亚洲玉米螟幼虫的毒力

毒力测定结果表明，棘孢木霉发酵液对亚洲玉米螟1龄幼虫的LC_{30}和LC_{50}分别为3.58×10^4个/mL和7.78×10^4个/mL，其95%置信区间分别为9.59×10^4~6.22×10^4个/mL和4.61×10^4~2.54×10^4个/mL。经检验，χ^2=3.303，P=0.999 8（P>0.05），表明模型拟合良好，实际观测值与概率单位回归模型的理论期望值之间无显著差异，该毒力回归方程可靠，计算出的LC_{30}和LC_{50}及其95%置信区间具有统计学可信度。

2.2 棘孢木霉对亚洲玉米螟生长发育和繁殖的影响

LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液处理对亚洲玉米螟的生长发育及繁殖具有调控作用，可延长各龄幼虫发育历期、蛹期和成虫前期，缩短成虫产卵前期和成虫寿命，并降低蛹重和单雌产卵量（表1）。LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液处理的亚洲玉米螟卵期、5龄幼虫发育历期和成虫产卵前期与对照均无显著差异，而1~2龄幼虫发育历期和成虫前期均较对照显著延长（P<0.05），且延长效应随剂量增加而显著增强；在LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液处理下3~4龄幼虫的发育历期均较对照延长，但LC_{30}处理与对照差异不显著，LC_{50}处理则显著长于对照（P<0.05），表明其发育速率受到了影响（表1）。在LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液处理下，亚洲玉米螟的总产卵前期分别为33.52 d和33.44 d，均显著长于对照的30.61 d（P<0.05）；化蛹后其蛹重平均分别为46.15 mg和45.13 mg，均显著低于对照的蛹重48.00 mg（P<0.05）；单雌产卵量分别为188.19粒和79.06粒，较对照分别显著降低了31.31%和71.14%（P<0.05，表1），表明棘孢木霉发酵液能显著抑制亚洲玉米螟雌成虫的繁殖能力。

表1 LC_{30}与LC_{50}棘孢木霉发酵液对亚洲玉米螟生长发育和繁殖的影响

Table 1 Effects of LC_{30} and LC_{50} of *Trichoderma* fermentation broth on the developmental and reproductive parameters of *Ostrinia furnacalis*

参数 Parameter	对照 CK	LC_{30}棘孢木霉发酵液 LC_{30} of *Trichoderma* fermentation broth	LC_{50}棘孢木霉发酵液 LC_{50} of *Trichoderma* fermentation broth
卵期 Egg duration/d	3.02±0.91 a	3.11±0.79 a	3.13±0.06 a
1龄幼虫发育历期 1st-instar larval development duration/d	3.05±0.02 c	3.41±0.04 b	3.65±0.04 a
2龄幼虫发育历期 2nd-instar larval development duration/d	3.27±0.04 c	3.43±0.04 b	3.86±0.03 a
3龄幼虫发育历期 3rd-instar larval development duration/d	3.02±0.04 b	3.26±0.04 b	3.43±0.05 a
4龄幼虫发育历期 4th-instar larval development duration/d	3.37±0.05 b	3.53±0.05 b	3.78±0.08 a
5龄幼虫发育历期 5th-instar larval development duration/d	7.02±0.06 a	7.17±0.07 a	7.33±0.16 a
蛹期 Pupal duration/d	7.18±0.97 b	7.47±0.84 a	7.67±0.12 a
成虫前期 Pre-adult period/d	29.88±0.15 c	31.23±0.18 b	32.80±0.30 a
成虫产卵前期 Preoviposition period/d	1.04±0.04 a	0.96±0.04 a	0.94±0.06 a
总产卵前期 Total preoviposition period/d	30.61±0.31 b	33.52±0.37 a	33.44±0.49 a
成虫寿命 Adult longevity/d	27.54±0.93 a	26.01±0.96 a	19.84±1.02 b
蛹重 Pupal weight/mg	48.00±0.54 a	46.15±0.84 b	45.13±1.34 b
单雌产卵量 Eggs laid per female	273.96±30.15 a	188.19±29.36 b	79.06±20.61 c

表中数据为平均数±标准误。同行不同小写字母表示经Tukey's HSD检验法检验差异显著（P<0.05）。Data in the table are presented as mean±SE. Different lowercase letters within the same row indicate significant differences based on Tukey's HSD test (P<0.05).

2.3 棘孢木霉对亚洲玉米螟存活率、寿命期望的影响

LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液处理与对照的亚洲玉米螟年龄-阶段特征存活率均存在差异，其中，LC_{30}和LC_{50}处理与对照的卵存活率都在98.00%以上，无明显差异；LC_{30}和LC_{50}处理的幼虫存活率分别为64.38%和38.75%，均低于对照的66.88%；在LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液处理下，雌成虫的存活率峰值随着发酵液浓度的增加呈下降趋势，分别降至

12.50%和8.75%，均低于对照亚洲玉米螟雌成虫的存活率峰值18.20%；雄成虫存活率也呈现相似趋势，LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液处理其存活率峰值降低至31.88%和13.75%，低于对照亚洲玉米螟雄成虫的存活率峰值37.50%（图1）。表明LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液对亚洲玉米螟雌雄成虫羽化均有明显的抑制效应，且抑制作用随浓度增加而增强，其中LC_{30}棘孢木霉发酵液处理的亚洲玉米螟雌成虫存活率峰值最低，峰值维持时间最短。

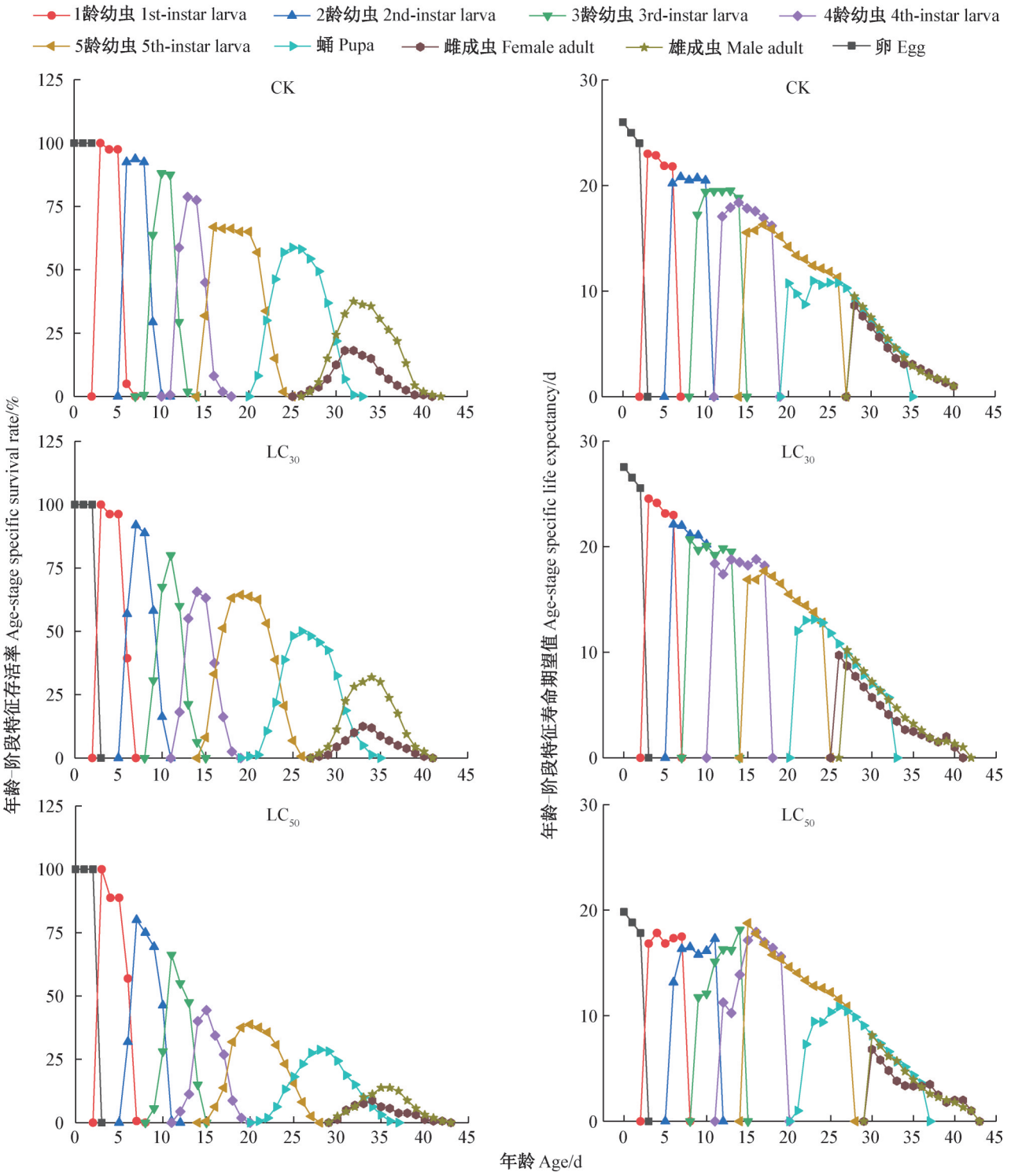


图1 LC_{30}与LC_{50}棘孢木霉发酵液处理下亚洲玉米螟的年龄-阶段特征存活率和年龄-阶段特征寿命期望值

Fig. 1 Age-stage-specific survival rate and age-stage-specific life expectancy of *Ostrinia furnacalis* treated with LC_{30} and LC_{50} of *Trichoderma* fermentation broth

LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液处理下亚洲玉米螟雌成虫的年龄-阶段特征寿命期望值分别为8.64 d和6.81 d，雄成虫的年龄-阶段特征寿命期望值分别为9.51 d和8.16 d，均明显低于对照雌雄成虫的年龄-阶段特征寿命期望值（9.71 d和10.20 d）（图1），表明LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液能削弱亚洲玉米螟种群的增长潜能与可持续性。

2.4　棘孢木霉对亚洲玉米螟种群繁衍的影响

LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液处理与对照的亚洲玉米螟种群年龄-特征存活率l_x曲线分别在32、33和34 d时急速下降；雌成虫年龄-特征繁殖力f_x曲线均出现3个繁殖高峰期，其最大繁殖力分别为77.17、59.55和32.50；种群特定年龄繁殖力m_x在32、33和38 d分别达到最大值；种群特定年龄繁殖率l_xm_x在32、33和33 d分别达到最大值（图2），表明LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液能加速亚洲玉米螟种群的衰退进程，并降低其繁殖力。

本研究进一步预测了LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液处理与对照的亚洲玉米螟繁衍60 d后的种群动态，以10个受精卵为起点，结果显示棘孢木霉发酵液处理明显抑制亚洲玉米螟种群增长（图2）。在60 d时，LC_{30}和LC_{50}棘孢木霉发酵液处理与对照的亚洲玉米螟F_0代各阶段及F_1代卵和1~4龄幼虫均已经完成发育；此时，对照的F_1代5龄幼虫和蛹发育即将完成，F_1代成虫及F_2代卵进入发育盛期，F_2代1龄幼虫刚进入发育期；LC_{30}棘孢木霉发酵液处理下F_1代5龄幼虫和蛹进入发育盛期，成虫及F_2代卵刚开始发育；LC_{50}棘孢木霉发酵液处理下F_1代5龄幼虫发育即将完成，蛹进入发育盛期，成虫及F_2代未出现（图2-B）。

2.5　棘孢木霉对亚洲玉米螟种群参数的影响

LC_{50}棘孢木霉发酵液处理下亚洲玉米螟内禀增长率、周限增长率和净增殖率均较对照显著降低了9.10%、5.30%和80.00%（P<0.05），而平均世代周期则从32.90 d显著增加至35.76 d（P<0.05），较对照增加了8.70%；而LC_{30}棘孢木霉发酵液处理下亚洲玉米螟各种群参数与对照均无显著差异（表2），表明LC_{50}棘孢木霉发酵液能显著延缓其种群的生长发育和繁殖。

3　讨论

本研究通过两性生命表分析了棘孢木霉GDFS1009菌株发酵液在LC_{30}与LC_{50}处理下对亚洲玉米螟种群动态的效应，结果表明，LC_{30}与LC_{50}发酵液处理能显著延长亚洲玉米螟幼虫总发育期与蛹期，降低幼虫的存活率，其高剂量处理对种群繁殖的抑制效果更显著。这可能是由于木霉同时分泌的多种几丁质酶、蛋白酶及毒素（如单端孢霉烯族化合物）等共同作用所致（Takahashi-Ando et al.，2020；Gutiérrez et al.，2021；Dwisandi et al.，2024）。这些物质可能对亚洲玉米螟围食膜结构造成破坏，伤害肠黏膜屏障，进而妨碍其对营养物质的消化及摄取，导致养分供给不足，生长发育受阻，最终呈现存活率降低、蛹重减轻的现象。如绿色木霉代谢产生的几丁质酶对家蚕围食膜结构造成破坏，使幼虫生长发育延缓，且蛹重变轻（Berini et al.，2016）；疣孢漆斑菌*Albifimbria verrucaria* Hmp-F73发酵液产生的单端孢霉烯族毒素对甜菜夜蛾*Spodoptera exigua*幼虫具有较强的抑制取食活性，影响其生长发育（赵丽等，2011）。此外，其他生防真菌侵染也表现出类似的高致病力与种群抑制效果。例如，FS-PNC菌株分生孢子悬浮液对3种稻飞虱亦表现出较强的致病力，其3龄若虫和成虫的累计校正死亡率分别超过70%和80%（张居念等，2025）；从感病禾谷缢管蚜*Rhopalosiphum padi*体内分离到的蝉花*Isaria cicadae* 022017-9，对禾谷缢管蚜具有较强致病力，并能显著降低其若虫和成虫的存活率、繁殖力及净增殖率（刘喆等，2025）；从自然罹病铜绿丽金龟*Anomala corpulenta*上分离的亚洲白僵菌*Beauveria asiatica* BaT，在1×10^8个/g浓度下对2龄幼虫的校正死亡率高达79.42%（王文杰等，2024）。这与本研究观察到的棘孢木霉发酵液处理后亚洲玉米螟幼虫发育变慢、死亡率上升以及蛹期推迟现象一致。另外，本研究采用的是发酵液，而非纯分生孢子悬浮液，发酵液里的多种代谢产物可能对昆虫的生长发育具有协同作用，进而增强了对亚洲玉米螟生长发育的抑制作用，与仅依靠木霉孢子进行的研究相比，发酵液产品更易于标准化、规模化生产，其结果更具有实践指导意义。

通过数据分析表明，LC_{30}与LC_{50}棘孢木霉发酵液能够显著降低亚洲玉米螟雌成虫产卵量及其蛹重。这与金龟子绿僵菌*Metarhizium anisopliae*处理下小菜蛾*Plutella xylostella*繁殖能力及蛹重降低（Zafar et al.，2020）以及球孢白僵菌*Beauveria bassiana* NJBb2101处理下褐飞虱*Nilaparvata lugens*种群繁殖力被抑制（Wang et al.，2018）等的结果相似。LC_{30}与LC_{50}棘孢木霉发酵液不仅能直接杀死亚洲玉米螟，还可通过降低群体整体适合度实现长期种群

抑制，如使亚洲玉米螟发育周期延长导致其幼虫在田间暴露时间增加，更容易被捕食性昆虫、鸟类等天敌捕食，同时也容易受到降雨、极端温度等恶劣环境影响，间接降低其种群存活率。

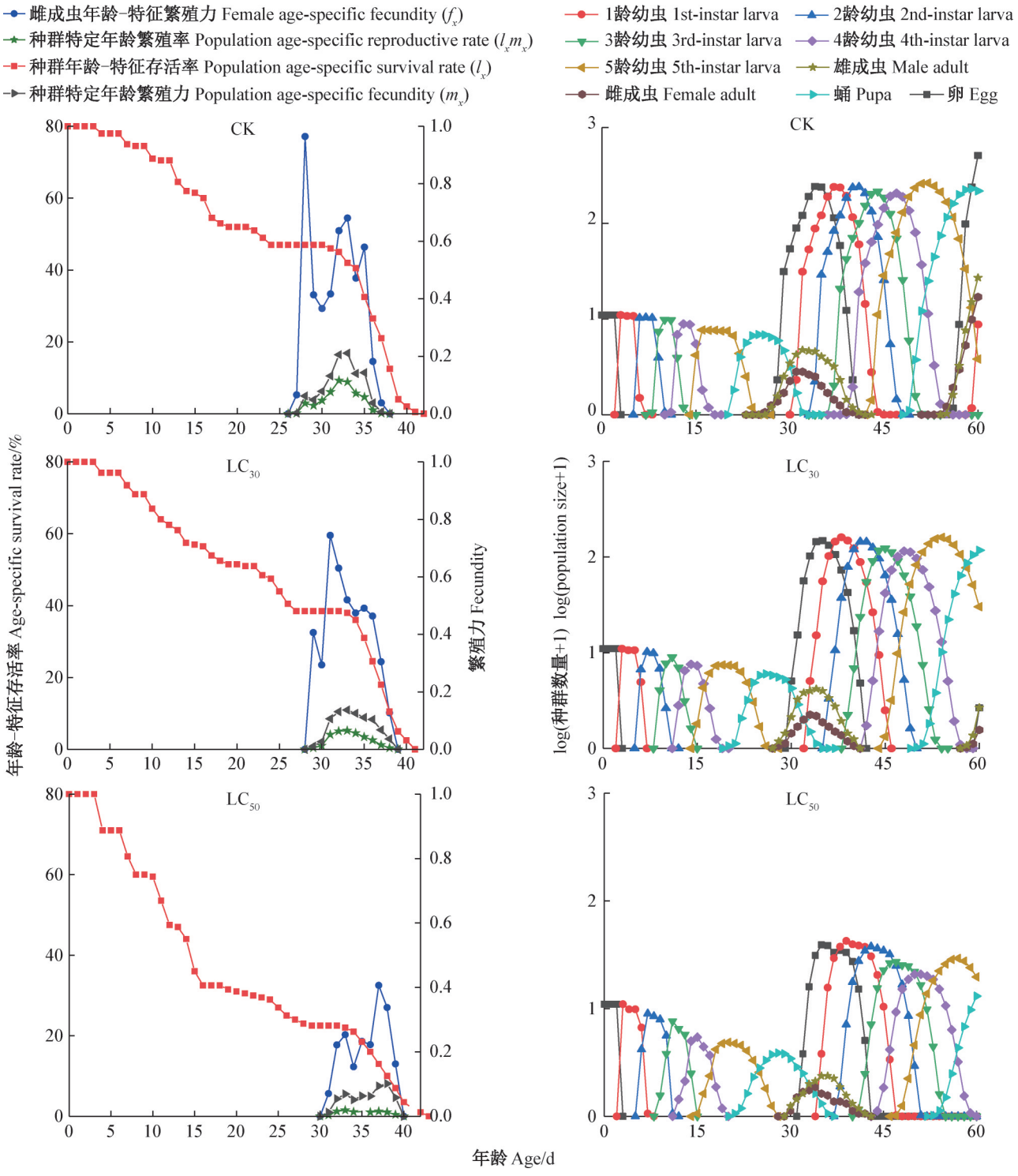


图2 LC_{30}与LC_{50}棘孢木霉发酵液处理下亚洲玉米螟的种群年龄-特征存活率和繁殖力及其种群预测结果

Fig. 2 Age-specific survival rate and fecundity and population projection of *Ostrinia furnacalis* treated with LC_{30} and LC_{50} of *Trichoderma* fermentation broth

基于昆虫生命表的分析结果，不能单纯从存活率或繁殖力判断一个种群的潜能，应对整个种群的发育数据进行整合分析，才能有效把握种群的发展趋势（齐心等，2019）。本研究发现LC_{30}与LC_{50}棘孢

木霉发酵液处理下亚洲玉米螟种群内禀增长率均降低，对照亚洲玉米螟种群的内禀增长率最高，周限增长率呈现出相似的变化趋势，且这种变化趋势具有明显的浓度依赖效应，表明LC_{30}与LC_{50}棘孢木霉发酵液极大抑制了亚洲玉米螟的世代更替能力；净增殖率的显著下降意味着棘孢木霉发酵液不仅能直接杀伤试虫，更能有效阻断残存个体在田间的世代恢复与种群扩张；而平均世代周期随着棘孢木霉发酵液处理浓度升高而逐渐缩短，但变化幅度有限，与其他参数相比，其生物学意义不显著。这表明棘孢木霉发酵液处理主要以降低繁殖产出的方式影响种群增长，而不是通过改变世代周期。

表2 LC_{30}与LC_{50}棘孢木霉发酵液对亚洲玉米螟种群参数的影响

Table 2 Effects of LC_{30} and LC_{50} of *Trichoderma* fermentation broth on the population parameters of *Ostrinia furnacalis*

参数 Parameter	对照 CK	LC_{30}棘孢木霉发酵液 LC_{30} of *Trichoderma* fermentation broth	LC_{50}棘孢木霉发酵液 LC_{50} of *Trichoderma* fermentation broth
内禀增长率 Intrinsic rate of increase/(d^{-1})	0.11±0.01 a	0.10±0.01 a	0.06±0.01 b
周限增长率 Finite rate of increase/(d^{-1})	1.12±0.01 a	1.10±0.01 a	1.06±0.01 b
净增殖率 Net reproductive rate	44.52±9.33 a	27.87±6.50 a	8.90±3.00 b
平均世代周期 Mean generation time/d	32.90±0.40 a	34.10±0.43 a	35.76±0.69 b

表中数据为平均数±标准误。同行不同小写字母表经Tukey's HSD检验法检验差异显著（P<0.05）。Data in the table are presented as mean±SE. Different lowercase letters within the same row indicate significant differences based on Tukey's HSD test (P<0.05).

综上所述，本研究发现LC_{30}与LC_{50}棘孢木霉发酵液通过延长亚洲玉米螟发育周期与抑制繁殖力的协同作用，显著制约着亚洲玉米螟种群的增长，在亚洲玉米螟的绿色防控上具有较大潜力。本研究结果可为建立棘孢木霉发酵液与低毒农药协同防控体系给予科学支撑，对农药减施增效及农业害虫绿色防控技术的发展具有重要意义。

参 考 文 献（References）

Abbas A, Saddam B, Ullah F, Hassan MA, Shoukat K, Hafeez F, Alam A, Abbas S, Ghramh HA, Khan KA, et al. 2025. Global distribution and sustainable management of Asian corn borer (ACB), *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Crambidae): recent advancement and future prospects. Bulletin of Entomological Research, 115(1): 105−120

Ahmad MF, Ali Ahmad F, Alsayegh AA, Zeyaullah M, AlShahrani AM, Muzammil K, Ali Saati A, Wahab S, Elbendary EY, Kambal N, et al. 2024. Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures. Heliyon, 10(7): e29128

Berini F, Caccia S, Franzetti E, Congiu T, Marinelli F, Casartelli M, Tettamanti G. 2016. Effects of *Trichoderma viride* chitinases on the peritrophic matrix of Lepidoptera. Pest Management Science, 72(5): 980−989

Chi H, Kavousi A, Gharekhani G, Atlihan R, Salih Özgökçe M, Güncan A, Gökçe A, Smith CL, Benelli G, Guedes RNC, et al. 2023. Advances in theory, data analysis, and application of the age-stage, two-sex life table for demographic research, biological control, and pest management. Entomologia Generalis, 43(4): 705−732

Contreras-Cornejo HA, Macías-Rodríguez L, del-Val E, Larsen J. 2018. The root endophytic fungus *Trichoderma atroviride* induces foliar herbivory resistance in maize plants. Applied Soil Ecology, 124: 45−53

Dwisandi RF, Miranti M, Prismantoro D, Alizadeh M, Mispan MS, Hermawan W, Mohamed Z, Doni F, Joshi RC. 2024. *Trichoderma* for managing lepidopteran insect pests: current understanding and future directions. Biological Control, 197: 105604

Gutiérrez S, McCormick SP, Cardoza RE, Kim HS, Yugueros LL, Vaughan MM, Carro-Huerga G, Busman M, Sáenz de Miera LE, Jaklitsch WM, et al. 2021. Distribution, function, and evolution of a gene essential for trichothecene toxin biosynthesis in *Trichoderma*. Frontiers in Microbiology, 12: 791641

Hu F, Li XY, Ma XB, Guo L, Li YM, Li XC, Tang Q. 2020. Occurrence and monitoring of Asian corn borer during spring sowing period in Xiangyang//Wei HY, Zeng JP, Xia B. Insect research of central China: volume 16. Yangling: Northwest A&F University Press, pp. 315−318 (in Chinese) [胡飞, 李新彦, 马现斌, 郭莉, 李有明, 李雄才, 唐清. 2020. 襄阳亚洲玉米螟春播期发生与监测// 魏洪义, 曾菊平, 夏斌. 华中昆虫研究: 第十六卷. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, pp. 315−318]

Hubbard CB, Murillo AC. 2024. Behavioral resistance to insecticides: current understanding, challenges, and future directions. Current Opinion in Insect Science, 63: 101177

Ji MS. 2017. Pesticide resistance in plant pests and its control countermeasures. Modern Agriculture, (2): 33−34 (in Chinese) [纪明山. 2017. 植物有害生物抗药性及治理对策. 新农业, (2): 33−34]

Li B. 2022. Resistance monitoring and selection of resistant strains of *Ostrinia furnacalis* to chlorantraniliprole. Master thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese) [李冰. 2022. 亚洲玉

米螟对氯虫苯甲酰胺的抗性监测及抗性品系的选育. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学]

Li X, Liu YQ, Fu JP, Ban LP. 2022. Current status of green control technology of Asian corn borer *Ostrinia furnacalis* in the production of fresh corn. Acta Agrestia Sinica, 30(4): 825−834 (in Chinese) [李鑫, 刘艳琪, 付婧萍, 班丽萍. 2022. 鲜食玉米生产中的亚洲玉米螟防控技术进展. 草地学报, 30(4): 825−834]

Liu Z, Liu YL, Chai YQ, Li XL, Cai RH, Liu YG. 2025. Identification of entomopathogenic fungus *Isaria cicadae* 022017-9 and its pathogenicity against the bird cherry-oat aphid *Rhopalosiphum padi*. Journal of Plant Protection, 52(4): 934−942 (in Chinese) [刘喆, 刘一伦, 柴一秋, 厉晓腊, 蔡瑞杭, 刘又高. 2025. 蝉花022017-9的鉴定以及对禾谷缢管蚜的致病性. 植物保护学报, 52(4): 934−942]

Oyesola OL, Kinge RT, Obembe OO. 2025. *Trichoderma*: a review of its mechanisms of action in plant sustainable disease control. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1492(1): 012008

Poveda J. 2021. *Trichoderma* as biocontrol agent against pests: new uses for a mycoparasite. Biological Control, 159: 104634

Puyam A. 2016. Advent of *Trichoderma* as a bio-control agent: a review. Journal of Applied and Natural Science, 8(2): 1100−1109

Qi X, Fu JW, You MS. 2019. Age-stage, two-sex life table and its application in population ecology and integrated pest management. Acta Entomologica Sinica, 62(2): 255−262 (in Chinese) [齐心, 傅建炜, 尤民生. 2019. 年龄−龄期两性生命表及其在种群生态学与害虫综合治理中的应用. 昆虫学报, 62(2): 255−262]

Rajani P, Rajasekaran C, Vasanthakumari MM, Olsson SB, Ravikanth G, Uma Shaanker R. 2021. Inhibition of plant pathogenic fungi by endophytic *Trichoderma* spp. through mycoparasitism and volatile organic compounds. Microbiological Research, 242: 126595

Rani L, Thapa K, Kanojia N, Sharma N, Singh S, Grewal AS, Srivastav AL, Kaushal J. 2021. An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. Journal of Cleaner Production, 283: 124657

Takahashi-Ando N, Matsui K, Suzuki T, Sadamatsu K, Azuhata H, Okada A, Matsuo G, Takeda H, Koizumi Y, Kimura M. 2020. Trichothecene biosynthesis in different fungal genera: resistance mechanisms, pathway enzymes, and their product applications. JSM Mycotoxins, 70(2): 67−74

Villavicencio-Vásquez M, Espinoza-Lozano F, Espinoza-Lozano L, Coronel-León J. 2025. Biological control agents: mechanisms of action, selection, formulation and challenges in agriculture. Frontiers in Agronomy, 7: 1578915

Wang WJ, Wang ZM, Li S, Bai YZ, Cao C, Wang YY, Liang GM, Yin J, Li KB. 2024. Isolation and identification of *Beauveria asiatica* and its pathogenicity against *Anomala corpulenta* larvae. Journal of Plant Protection, 51(4): 960−969 (in Chinese) [王文杰, 王志敏, 李松, 白勇章, 曹驰, 王泱洋, 梁革梅, 尹姣, 李克斌. 2024. 亚洲白僵菌的分离鉴定及其对铜绿丽金龟幼虫的致病力. 植物保护学报, 51(4): 960−969]

Wang YC, Yu N, Chu FH, Korai SK, Liu ZW. 2018. Sublethal effects of *Beauveria bassiana* sensu lato isolate NJBb2101 on biological fitness and insecticide sensitivity of parental and offspring generations of brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. Biological Control, 121: 44−49

Wang YQ, Jing DP, Liu KQ, Wang ZY, He KL. 2024. Susceptibility monitoring to Cry1Ie in Asian corn borer *Ostrinia furnacalis* from 2015 to 2021. Journal of Plant Protection, 51(2): 405−412 (in Chinese) [王月琴, 静大鹏, 刘凯强, 王振营, 何康来. 2024. 2015—2021年亚洲玉米螟对Cry1Ie杀虫蛋白的敏感性监测. 植物保护学报, 51(2): 405−412]

Wigati D, Setyowati EP, Pratiwi SUT, Nugraha AS. 2024. *Trichoderma reesei* JCM 2267, fungi-associated sponge *Stylissa flabelliformis*: effects of applied different fermentation methods on their antibacterial activity. Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research, 15(4): 243−247

Zafar J, Shoukat RF, Zhang YX, Freed S, Xu XX, Jin FL. 2020. *Metarhizium anisopliae* challenges immunity and demography of *Plutella xylostella*. Insects, 11(10): 694

Zhang J, Du Q, Wang ZY, Li QY, Wang YZ. 2013. A method for the rapid sex-determination of pupae of the Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis*. Chinese Journal of Applied Entomology, 50(5): 1484−1488 (in Chinese) [张军, 杜茜, 王振营, 李启云, 汪洋洲. 2013. 一种快速鉴别亚洲玉米螟蛹雌雄的方法. 应用昆虫学报, 50(5): 1484−1488]

Zhang JN, Hu HL, Lin LL, Zeng RJ, Liu Q, Shi LQ, Wu CZ, Xie ZX, Dong M, Jiang ZW, et al. 2025. Identification and characterization of fungal strain *Penicillium oxalicum* FS-PNC and its virulence against rice planthoppers. Journal of Plant Protection, 52(5): 1241−1253 (in Chinese) [张居念, 胡红莉, 林莉莉, 曾仁杰, 刘倩, 施龙清, 吴春珠, 解振兴, 董萌, 姜照伟, 等. 2025. 草酸青霉菌FS-PNC分离、鉴定及其对稻飞虱的毒力. 植物保护学报, 52(5): 1241−1253]

Zhang ZR. 2023. Mechanism of *Trichoderma viride* on alleviating continuous cropping obstacle in muskmelon. PhD thesis. Shenyang: Shenyang Agricultural University (in Chinese) [张照然. 2023. 绿色木霉菌缓解甜瓜连作障碍机理研究. 博士学位论文. 沈阳: 沈阳农业大学]

Zhao L, Liu L, Hu JC, Gao JM, Wang SJ. 2011. Isolation and identification of a marine fungus *Myrothecium verrucaria* Hmp-F73 producing trichothecene with insecticidal and antimicrobial activities. Chinese Journal of Biological Control, 27(3): 331−337 (in Chinese) [赵丽, 刘丽, 胡江春, 高锦明, 王书锦. 2011. 产杀虫抗菌单端孢霉烯族毒素海绵真菌 *Myrothecium verrucaria* Hmp-F73的筛选和鉴定. 中国生物防治学报, 27(3): 331−337]

Zhou W, Li MM, Achal V. 2025. A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage. Emerging Contaminants, 11(1): 100410

（责任编辑：李美娟）