

微生物杀虫剂联合施用对草地贪夜蛾幼虫的防治效果



朱凯辉¹ 贾静静² 秦 双² 涂雄兵^{1*} 吉训聪^{2*}

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193; 2. 海南省农业科学院植物保护研究所, 海南省农业科学院农产品质量安全与标准研究中心, 海口 571100)

摘要: 为提高微生物杀虫剂对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 的防治效果, 利用球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* IPPB343、IPPB1237 与金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* IPPM330189 三种昆虫病原真菌, 斜纹夜蛾核型多角体病毒 (*Spodoptera litura* nuclear polyhedrosis viruses, SLNPV)、甘蓝夜蛾核型多角体病毒 (*Mamestra brassicae* nuclear polyhedrosis viruses, MBNPV) 2 种昆虫病毒和短稳杆菌 *Empedobacter brevis* 昆虫病原细菌, 设置 9 种联合施用药剂组合, 评价 6 种微生物杀虫剂单独使用以及不同药剂联合施用组合对草地贪夜蛾幼虫的毒力以及田间防治效果。结果表明, 与 6 种微生物杀虫剂单独使用相比, 9 种联合施用组合均能提升微生物杀虫剂对草地贪夜蛾的毒力水平与田间防治效果。施药后 7 d 时, 金龟子绿僵菌 IPPM330189+MBNPV 药剂组合的防治效果最好且增效最明显, 对草地贪夜蛾的田间防治效果达到 88.75%, 协同毒力指数为 23.78。此外, 金龟子绿僵菌 IPPM330189+短稳杆菌悬浮剂药剂组合施药后 7 d 对草地贪夜蛾的田间防治效果达到 87.45%, 协同毒力指数也可达到 21.72。表明微生物杀虫剂联合施用可显著提升其对草地贪夜蛾的防治效果。

关键词: 草地贪夜蛾; 昆虫病原真菌; 昆虫病毒; 昆虫病原细菌; 生物源杀虫剂; 联合施用; 防治效果

Control effect of insect pathogenic fungi combined with biogenic insecticides on the larvae of fall armyworm *Spodoptera frugiperda*

Zhu Kaihui¹ Jia Jingjing² Qin Shuang² Tu Xiongbing^{1*} Ji Xuncong^{2*}

(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. Research Center of Quality Safety and Standards for Agricultural Products of Hainan Academy of Agricultural Sciences, Institute of Plant Protection, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou 571100, Hainan Province, China)

Abstract: To improve the control effect of microbial insecticides against fall armyworm *Spodoptera frugiperda*, three types of insect pathogenic fungi, including *Beauveria bassiana* strains IPPB343, IPPB1237, and *Metarhizium anisopliae* strain IPPM330189, in addition to two kinds of insect viruses, *S. litura* nuclear polyhedrosis virus (SLNPV) and *Mamestra brassicae* nuclear polyhedrosis viruses (MBNPV), along with one species of insect bacteria *Empedobacter brevis* were utilized. Nine pesticide combinations, including fungi+bacteria and fungi+viruses, were established. The toxicity and field control effects of six microbial insecticides used individually and in different combinations of pesticides against *S. frugiperda* larvae were evaluated. The results showed that compared to the use of six microbial insecticides alone, all nine mixed combinations exhibited enhanced toxicity level and field control effectiveness.

基金项目: 国家现代农业产业技术体系(CARS-34)

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: txb1208@163.com, jixuncong1008@163.com

收稿日期: 2022-12-22

against *S. frugiperda*. Seven days post-application, the combination of *M. anisopliae* IPPM330189 and MBNPV displayed the best control effect, achieving an 88.75% field control rate with a synergistic toxicity index of 23.78. Furthermore, the combination of *M. anisopliae* IPPM330189 and *E. brevis* suspension achieved an 87.45% control rate with a synergistic toxicity index of 21.72. These results indicated that the mixed use of microbial insecticides significantly enhances control efficacy against *S. frugiperda* in the field.

Key words: *Spodoptera frugiperda*; entomopathogenic fungi; entomopathogenic virus; entomopathogenic bacteria; biogenic insecticides; combined application; control effect

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*, 又称秋黏虫, 属鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae 灰翅夜蛾属 *Spodoptera* (郭井菲等, 2018), 是原产于美洲热带地区的一类重大杂食性与迁飞性害虫 (黄建荣等, 2022; 李国平等, 2022)。自 2019 年 1 月首次在我国云南省监测到草地贪夜蛾后, 已迅速扩散至我国华北地区, 累计发生面积达 100 万 hm^2 以上, 并对我国粮食生产安全构成了严重威胁 (齐国君等, 2020; 吴孔明, 2020)。化学防治仍为当前草地贪夜蛾的主要防控方法 (丁奎婷等, 2023), 但由于长期广泛且不合理地施用化学农药导致大量有毒物质进入土壤, 造成大气与水源污染, 影响农作物品质与人类的生存质量 (Antle, 1994), 故喷施生物农药是当前草地贪夜蛾防治的首选, 其中昆虫生防菌是生物农药的主要组成部分 (刘春来, 2017)。

昆虫病原真菌对多种农林业害虫具有较高的防控效果, 同时可以减缓害虫抗药性的产生并保护生态环境。白僵菌、绿僵菌具有产孢能力强且生长迅速的优点, 对鞘翅目和鳞翅目等农林业害虫表现出明显的致死效果 (姜玉英等, 2019)。其中球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 与金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 是草地贪夜蛾防治方面研究与应用最广泛的 2 类昆虫病原真菌 (张维等, 2019)。Cruz-Avalos et al. (2019) 通过分析 14 种病原真菌对草地贪夜蛾卵与幼虫的致病效果发现, 金龟子绿僵菌对草地贪夜蛾卵与幼虫的致病率达到了 100%; 球孢白僵菌对卵和幼虫的致病率达到了 92% 和 75%。但在田间由于温度不适宜、雨水冲刷等客观因素的影响下, 昆虫病原真菌的防治效果会被明显削弱。为提升昆虫病原真菌对害虫的田间防治效果, 与生物源杀虫剂的联合施用是提高病原真菌防治效果的有效途径, 高书晶等 (2009) 对亚洲小车蝗 *Oedaleus asiaticus* 联合施用 5 mg/L 联苯菊酯与 10^7 个/mL 的金龟子绿僵菌孢子悬浮液, 发现二者联合施用具有明显的增效作用; Sharififard et al. (2011) 研究发现金

龟子绿僵菌和亚致死剂量的多杀菌素相互作用也存在增效作用, 能显著提高其对家蝇 *Musca domestica* 的防治效果, 并缩短致死时间。

本研究选取 3 种昆虫病原真菌球孢白僵菌 IP-PB343、IPPB1237 与金龟子绿僵菌 IPPM330189 以及短稳杆菌 *Bacillus brevis* 悬浮剂、甘蓝夜蛾核型多角体病毒 (*Mamestra brassicae* nuclear polyhedrosis viruses, MBNPV) 与斜纹夜蛾核型多角体病毒 (*Spodoptera litura* nuclear polyhedrosis viruses, SLNPV) 3 种生物源杀虫剂, 设置 9 种联合施用处理, 分别在实验室与田间条件下进行生物学毒力测定, 筛选出田间防治草地贪夜蛾幼虫效果较好的药剂配比, 以期为制订草地贪夜蛾防治措施的提供新思路。

1 材料与方 法

1.1 材 料

供试昆虫: 于 2022 年 7 月 10 日至 7 月 15 日在海南省海口市石山镇道育村采集草地贪夜蛾幼虫, 带回实验室建立实验室种群, 参考苏湘宁等 (2019) 配制人工饲料饲养其 3~4 代后, 以卵块孵化后的 3 龄幼虫为研究对象进行室内生物学测定。培养条件为温度 (26 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 60%~80%、光周期 L16 h:D 8 h。

供试真菌及药剂: 球孢白僵菌 IPPB343、IP-PB1237 与金龟子绿僵菌 IPPM330189 可湿性粉剂, 均由中国农业科学院植物保护研究所草地害虫组提供, 于 -20°C 保存。浓度为 2×10^9 PIB/mL 的 MBNPV 悬浮剂、浓度为 1×10^9 PIB/mL 的 SLNPV 悬浮剂和原液浓度为 1×10^{10} 个/mL 的短稳杆菌悬浮剂, 维驹农药助剂专营店提供。

仪器: PRX-2000D 智能人工气候箱, 宁波海曙赛福实验仪器厂; 3WZ-300 大型农药喷雾器, 山东浩阳机械有限公司。

1.2 方法

1.2.1 对草地贪夜蛾3龄幼虫致死中浓度的测定

用蒸馏水将球孢白僵菌 IPPB343、IPPB1237 和金龟子绿僵菌 IPPM330189 可湿性粉剂分别用蒸馏水溶解配制成浓度为 1×10^6 、 2×10^6 、 3×10^6 、 4×10^6 、 5×10^6 、 6×10^6 、 7×10^6 和 8×10^6 个/mL 的孢子悬浮液, 将 MBNPV 悬浮剂用蒸馏水溶解配制成浓度为 1×10^6 、 2×10^6 、 3×10^6 、 4×10^6 、 5×10^6 、 6×10^6 、 7×10^6 和 8×10^6 PIB/mL 的悬浮液, 将 SLNPV 用蒸馏水溶解配制成浓度为 0.5×10^5 、 1×10^5 、 1.5×10^5 、 2×10^5 、 2.5×10^5 、 3×10^5 、 3.5×10^5 和 4×10^5 PIB/mL 的悬浮液, 将短稳杆菌悬浮剂用蒸馏水溶解配制成浓度为 0.5×10^6 、 1×10^6 、 1.5×10^6 、 2×10^6 、 2.5×10^6 、 3×10^6 、 3.5×10^6 和 4×10^6 PIB/mL 的悬浮液, 以上药剂处理均以蒸馏水作为对照处理组。

称取人工饲料 2 g 平铺于直径 9 cm 的培养皿上, 接入草地贪夜蛾 3 龄幼虫, 每个培养皿接入 1 头草地贪夜蛾幼虫, 以防止幼虫之间相互取食, 定殖 30 min, 用喷壶将 2 mL 不同浓度的单一试剂均匀喷施在培养皿中, 每个处理 20 头幼虫, 每个处理重复 3 次。72 h 后分别观察并统计培养皿中死亡幼虫的头数, 并计算死亡率。并利用 Origin 2019 软件进行数据处理, 得到每个单一药剂在 72 h 时对草地贪夜蛾 3 龄幼虫的毒力回归方程、致死中浓度 LC_{50} 、95% 置信区间和相关系数。

1.2.2 混合喷施对草地贪夜蛾幼虫协同毒力的测定

根据各微生物杀虫剂 LC_{50} , 后续试验的昆虫病原真菌与生物杀虫剂田间试验采用以下浓度: 5×10^6 个/mL 球孢白僵菌 IPPB343 孢子悬浮液、 5×10^6 个/mL 球孢白僵菌 IPPB1237 孢子悬浮液、 5×10^6 个/mL 金龟子绿僵菌 IPPM330189 孢子悬浮液、 5×10^5 PIB/mL SLNPV 悬浮液、 5×10^5 PIB/mL MBNPV 悬浮液和 5×10^5 PIB/mL 短稳杆菌悬浮剂。本试验设置 9 种联合施用药剂组合, 分别为: (1) 球孢白僵菌 IPPB343+SLNPV; (2) 球孢白僵菌 IPPB1237+MBNPV; (3) 球孢白僵菌 IPPB343+短稳杆菌; (4) 球孢白僵菌 IPPB1237+SLNPV; (5) 球孢白僵菌 IPPB343+MBNPV; (6) 球孢白僵菌 IPPB1237+短稳杆菌; (7) 金龟子绿僵菌 IPPM330189+SLNPV; (8) 金龟子绿僵菌 IPPM330189+MBNPV; (9) 金龟子绿僵菌 IPPM330189+短稳杆菌, 以蒸馏水作为对照处理组。参考 1.2.1 方法测定不同联合施用药剂组合对草地贪夜蛾 3 龄幼虫的毒力, 处理后第 3 天与第 7 天观察并统计培养皿中幼虫死亡的数量, 分别计算 2 个时

间点的死亡率, 即混剂实际死亡率。

同时, 参考 1.2.1 方法分别测定球孢白僵菌 IPPB343、IPPB1237、金龟子绿僵菌 IPPM330189、SLNPV、MBNPV 和短稳杆菌单一杀虫剂对草地贪夜蛾 3 龄幼虫的毒力, 以蒸馏水为对照处理组。处理后第 3 天和第 7 天观察并统计培养皿中幼虫死亡数量, 计算死亡率。利用公式 $P_m = 1 - (1 - P_a) \times (1 - P_b)$ 计算混剂理论死亡率, 其中 P_a 、 P_b 分别为各单独试剂处理后的试虫死亡率。利用上述试验所得实际混剂死亡率与混剂理论死亡率计算协同毒力指数, 协同毒力指数 = (实际混剂死亡率 - 理论混剂死亡率) / 理论混剂死亡率 $\times 100$ 。以协同毒力指数值来判定 2 种药剂的联合作用, 协同毒力指数 > 20 时为增效作用, $-20 \leq$ 协同毒力指数 ≤ 20 时为相加作用, 协同毒力指数 < -20 时为拮抗作用。

1.2.3 联合施用地草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果测定

2022 年 6 月在海南省海口市石山镇道育村玉米田进行田间防治效果测定, 3 种昆虫病原真菌和 3 种生物源杀虫剂的浓度同 1.2.2, 试验共设计 15 个处理, 其中 (1)~(6) 处理为 6 种微生物药剂的单剂处理, (7)~(15) 处理同 1.2.2 的联合施用处理, 每个处理用水量均为 1.8 L, 以同体积的清水喷施作为对照处理, 每个处理重复 3 次, 共 48 个小区, 每小区面积为 30 m^2 , 且为防止药剂喷施对临近施药小区造成干扰, 小区间隔控制在 5 m 以上。待试验田草地贪夜蛾幼虫处于 1~3 龄期时进行施药, 施药期为玉米小喇叭口期 (2022 年 6 月 22 日), 采用两步稀释法进行施药, 施药当天为晴天。施药当天 6:00 调查虫口基数, 药后 3 d 和 7 d 分别调查每处理活虫数, 采取五点取样法进行调查, 每点定株调查 20 株玉米。根据调查结果计算防治效果。防治效果 = (施药前的幼虫数 - 施药后的幼虫数) / 防治前的活虫数 $\times 100\%$ 。

1.3 数据分析

采用 Origin 2019 软件进行数据处理, 利用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 杀虫剂对草地贪夜蛾3龄幼虫致死中浓度

在实验室条件下, 施药后 72 h, 3 种昆虫病原真菌、2 种昆虫病原病毒与 1 种昆虫病原细菌对草地贪夜蛾幼虫均具有一定的抑制效果。其中 SLNPV 对草地贪夜蛾幼虫的毒力较高, LC_{50} 为 4.75×10^5 PIB/mL, 而球孢白僵菌 IPPB343 对草地贪夜蛾幼虫的毒力较低, LC_{50} 为 5.28×10^6 个/mL (表 1)。

表1 6种微生物杀虫剂对草地贪夜蛾3龄幼虫的72 h致死中浓度

Table 1 72 h median lethal concentration of six microbial insecticides against 3rd instar larvae of *Spodoptera frugiperda*

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	LC ₅₀ / ($\times 10^6$ 个/mL/ $\times 10^5$ PIB/mL)	χ^2
球孢白僵菌 IPPB343 <i>Bombyx batryticatus</i> IPPB343	$y=0.10x-0.05$	0.98	5.28±0.13	6.94
球孢白僵菌 IPPB1237 <i>Bombyx batryticatus</i> IPPB1237	$y=0.11x-0.01$	0.97	4.67±0.18	4.86
金龟子绿僵菌 IPPM330189 <i>Metarhizium anisopliae</i> IPPM330189	$y=0.09x+0.08$	0.99	4.83±0.09	6.18
SLNPV	$y=0.12x-0.09$	0.99	4.75±0.14	2.67
MBNPV	$y=0.10x+0.04$	0.99	4.84±0.08	5.28
短稳杆菌 <i>Bacillus brevis</i>	$y=0.11x-0.01$	0.99	5.00±0.12	4.94

表中数据为平均数±标注误。Data are mean±SE.

2.2 杀虫剂对草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果

在田间条件下,施药后3 d,3种昆虫病原真菌对草地贪夜蛾幼虫的防治效果为16.82%~31.74%,其中金龟子绿僵菌 IPPM330189 的防治效果达到30.00%以上;2种昆虫病原病毒与1种昆虫病原细菌对草地贪夜蛾幼虫的防治效果为47.83%~55.53%,其中短稳杆菌与MBNPV的田间防治效果均达到了50.00%以上(表2)。

施药后7 d,3种昆虫病原真菌对草地贪夜蛾幼

虫的防治效果为37.91%~49.84%,其中金龟子绿僵菌 IPPM330189 的田间防治效果接近50.00%;2种昆虫病原病毒与1种昆虫病原细菌对草地贪夜蛾幼虫的防治效果为58.94%~73.32%,其中MBNPV的田间防治效果达到了70.00%以上(表2)。表明MBNPV对草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果最强,而球孢白僵菌 IPPB343 与 IPPB1237 在田间条件下对草地贪夜蛾幼虫防治效果较差。

表2 6种微生物杀虫剂对草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果

Table 2 Field control effect of six microbial insecticides on larvae of *Spodoptera frugiperda*

处理 Treatment	浓度 Concentration	施药前虫口数 No. of insects before application	施药后3 d 3 days post-application		施药后7 d 7 days post-application	
			幼虫数 Larval number	防治效果 Control effect/%	幼虫数 Larval number	防治效果 Control effect/%
球孢白僵菌 IPPB343 <i>Bombyx batryticatus</i> IPPB343/ (个/mL)	5×10^6	7.10±3.55 a	5.83±1.45 ab	16.82±1.68 c	4.01±1.17 b	43.32±6.24 bc
球孢白僵菌 IPPB1237 <i>Bombyx batryticatus</i> IPPB1237/(个/mL)	5×10^6	6.28±3.33 a	4.40±1.42 b	29.91±3.16 b	3.92±1.13 bc	37.91±5.94 c
金龟子绿僵菌 IPPM330189 <i>Metarhizium anisopliae</i> IPPM330189/(个/mL)	5×10^6	7.33±3.27 a	5.01±1.28 b	31.74±5.22 b	3.68±1.33 bc	49.84±6.31 b
SLNPV/(PIB/mL)	5×10^5	8.05±3.58 a	4.22±0.40 bc	47.83±5.16 a	3.31±0.62 c	58.94±5.81 a
MBNPV/(PIB/mL)	5×10^5	8.85±3.43 a	4.91±1.47 b	55.53±5.24 a	2.36±1.19 c	73.32±4.26 a
短稳杆菌 <i>Bacillus brevis</i> /(PIB/mL)	5×10^5	7.98±3.95 a	3.63±1.99 c	54.94±4.18 a	2.54±1.38 c	68.25±6.27 a
清水对照组 CK	-	8.23±2.46 a	7.16±3.16 a	-	6.18±2.64 a	-

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经Duncan氏新复极差法检验差异显著($P < 0.05$)。Data are mean±SE. Different letters in the same column indicate significant difference by Duncan's new multiple range test ($P < 0.05$).

2.3 微生物杀虫剂联合喷施对草地贪夜蛾幼虫的毒力

当昆虫病原真菌与生物源杀虫剂联合施用后第3天与第7天时,都具有相加或增效的效果。其中,

球孢白僵菌 IPPB343 与 MBNPV 联合施用第7天后,增效效果较为明显,协同毒力指数为21.94;球孢白僵菌 IPPB1237 与 MBNPV 联合施用第7天后,增效

效果较为明显,协同毒力指数为24.13。金龟子绿僵菌 IPPM330189 与 SLNPV 联合施用后第3天时协同毒力指数为20.01,第7天时协同毒力指数为21.76;金龟子绿僵菌 IPPM330189 与短稳杆菌联合施用后第3天时协同毒力指数为21.53,第7天时协同毒力

指数为21.72;金龟子绿僵菌 IPPM330189 与 MBNPV 联合施用后第3天时协同毒力指数为23.78,第7天协同毒力指数为22.43(表3)。表明在实验室条件下金龟子绿僵菌 IPPM330189 与 MBNPV 的药剂组合效果最好,毒力最强。

表3 6种微生物杀虫剂混合喷施对3龄草地贪夜蛾幼虫毒力测定联合作用结果

Table 3 Results of the joint toxicity test of six microbial insecticides on larvae of *Spodoptera frugiperda*

处理 Treatment	处理时间 Processing time/d	混剂实际 死亡率 Mortality of mixed spray/%	混剂理论 死亡率 Theoretical mortality of mixed spray/%	协同毒力 指数 Synergetic virulence index	联合作用 Joint effect
球孢白僵菌 IPPB343+SLNPV	3	58.43	53.45	9.45	相加 Additive
<i>Bombyx batryticatus</i> IPPB343+SLNPV	7	69.45	61.93	12.12	相加 Additive
球孢白僵菌 IPPB343+ MBNPV	3	69.25	60.87	13.82	相加 Additive
<i>Bombyx batryticatus</i> IPPB343+MBNPV	7	75.47	66.82	21.94	增效 Synergetic
球孢白僵菌 IPPB343+短稳杆菌	3	64.53	58.72	9.95	相加 Additive
<i>Bombyx batryticatus</i> IPPB343+ <i>Bacillus brevis</i>	7	71.54	64.55	10.93	相加 Additive
球孢白僵菌 IPPB1237+SLNPV	3	66.83	56.44	18.43	相加 Additive
<i>Bombyx batryticatus</i> IPPB1237+SLNPV	7	73.41	67.15	9.35	相加 Additive
球孢白僵菌 IPPB1237+MBNPV	3	76.32	65.47	16.75	相加 Additive
<i>Bombyx batryticatus</i> IPPB1237+MBNPV	7	87.65	70.63	24.13	增效 Synergetic
球孢白僵菌 IPPB1237+短稳杆菌	3	65.85	59.71	10.22	相加 Additive
<i>Bombyx batryticatus</i> IPPB1237+ <i>Bacillus brevis</i>	7	76.96	68.86	11.84	相加 Additive
金龟子绿僵菌 IPPM330189+ SLNPV	3	86.41	65.47	20.01	增效 Synergetic
<i>Metarhizium anisopliae</i> IPPM330189+SLNPV	7	90.38	74.22	21.76	增效 Synergetic
金龟子绿僵菌 IPPM330189+ MBNPV	3	87.33	70.61	23.78	增效 Synergetic
<i>Metarhizium anisopliae</i> IPPM330189+MBNPV	7	95.65	78.14	22.43	增效 Synergetic
金龟子绿僵菌 IPPM330189+短稳杆菌	3	83.6	68.44	21.53	增效 Synergetic
<i>Metarhizium anisopliae</i> IPPM330189+ <i>Bacillus brevis</i>	7	92.12	75.98	21.72	增效 Synergetic

2.4 杀虫剂联合施用对草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果

在田间条件下,施药后第3天,球孢白僵菌 IPPB343 与 2 种昆虫病原病毒、1 种昆虫病原细菌联合施用对草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果为48.83%~68.11%,其中,球孢白僵菌 IPPB343 与 MBNPV 联合施用田间防治效果最好;施药后第7天,球孢白僵菌 IPPB343 与 2 种昆虫病原病毒、1 种昆虫病原细菌混合喷施对草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果为61.55%~71.52%,田间防治效果均达到了60.00%以上,其中,球孢白僵菌 IPPB343 与 MBNPV 联合施用的田间防治效果最好(表4)。

施药后第3天,球孢白僵菌 IPPB1237 与 2 种昆虫病原病毒、1 种昆虫病原细菌混合喷施对草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果为58.42%~60.35%,其中,球孢白僵菌 IPPB1237 与 MBNPV 联合施用田间防治效果最好;施药后第7天,球孢白僵菌 IP-

PB1237 与 2 种昆虫病原病毒、1 种昆虫病原细菌联合施用对草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果为64.81%~73.82%,其中,球孢白僵菌 IPPB1237 与 MBNPV 联合喷施田间防治效果达到了70.00%以上(表4)。

施药后第3天,金龟子绿僵菌 IPPM330189 与 2 种昆虫病原病毒、1 种昆虫病原细菌联合施用对草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果为74.62%~80.04%;施药后第7天,金龟子绿僵菌 IPPM330189 与 2 种昆虫病原病毒、1 种昆虫病原细菌联合施用对草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果为85.41%~88.75%,其中,金龟子绿僵菌 IPPM330189 与 MBNPV 联合施用田间防治效果最好(表4)。可见,金龟子绿僵菌 IPPM330189 与 MBNPV 为防治草地贪夜蛾幼虫的最佳组合。

表4 6种微生物杀虫剂联合施用对草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果

Table 4 Field control effect of six microbial insecticides combined spraying on *Spodoptera frugiperda*

处理 Treatment	死亡率 Mortality/%	施药后3 d		施药后7 d	
		3 days post-application		7 days post-application	
		幼虫数 Larval number	防治效果 Control effect/%	幼虫数 Larval number	防治效果 Control effect/%
球孢白僵菌 IPPB343+SLNPV <i>Bombyx batryticatus</i> IPPB343+SLNPV	8.03±3.52	4.13±0.38 b	48.83±5.23 c	3.15±0.36 b	61.55±5.29 c
球孢白僵菌 IPPB343+MBNPV <i>Bombyx batryticatus</i> IPPB343+MBNPV	9.88±4.18	3.08±1.16 bc	68.11±5.81 ab	2.93±1.07 b	71.52±6.10 b
球孢白僵菌 IPPB343+短稳杆菌 <i>Bombyx batryticatus</i> IPPB343+ <i>Bacillus brevis</i>	9.01±3.28	3.96±1.66 b	56.11±7.21 b	2.9±1.26 b	67.93±5.32 bc
球孢白僵菌 IPPB1237+SLNPV <i>Bombyx batryticatus</i> IPPB1237+SLNPV	10.05±4.12	4.18±0.46 b	58.42±3.43 b	3.58±0.90 b	64.81±5.85 b
球孢白僵菌 IPPB1237+MBNPV <i>Bombyx batryticatus</i> IPPB1237+MBNPV	7.65±3.56	3.03±1.04 c	60.35±5.82 b	2.06±0.95 c	73.82±6.35 b
球孢白僵菌 IPPB1237+短稳杆菌 <i>Bombyx batryticatus</i> IPPB1237+ <i>Bacillus brevis</i>	8.26±4.02	3.73±1.38 b	55.93±4.18 b	2.91±1.04 bc	67.82±5.02 b
金龟子绿僵菌 IPPM330189+SLNPV <i>Metarhizium anisopliae</i> IPPM330189+SLNPV	8.13±3.35	2.08±0.27 cd	74.62±3.93 ab	1.20±0.48 d	85.41±4.87 a
金龟子绿僵菌 IPPM330189+MBNPV <i>Metarhizium anisopliae</i> IPPM330189+MBNPV	7.53±2.98	1.57±1.06 d	80.04±2.91 a	1.11±0.97 d	88.75±4.55 a
金龟子绿僵菌 IPPM330189+短稳杆菌 <i>Metarhizium anisopliae</i> IPPM330189+ <i>Bacillus brevis</i>	7.33±3.15	1.82±0.88 d	75.12±6.45 ab	1.58±0.69 d	87.45±6.89 a
清水对照组 CK	8.33±3.67	7.55±3.45 a	-	7.19±3.49 a	-

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验差异显著 ($P < 0.05$)。Data are mean±SE. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference by Duncan's new multiple range test ($P < 0.05$).

3 讨论

本研究结果显示,昆虫微生物杀虫剂单独使用对草地贪夜蛾幼虫具有一定的防治作用,但防治效果偏低,施药7 d后3种昆虫病原真菌对草地贪夜蛾幼虫的防治效果为37.91%~49.84%。赵宗祥等(2022)研究结果显示, 1×10^8 个/mL 罗伯茨绿僵菌 *Metarhizium robertsii* 对草地贪夜蛾的 LT_{50} 为7.18 d,处理后第11天的累计校正死亡率为70.37%,而在本试验中, 5×10^6 个/mL 绿僵菌 IPPM330189 施用7 d后,对田间草地贪夜蛾幼虫的防治效果仅为49.8%。本研究结果还显示, 5×10^6 个/mL 球孢白僵菌 IPPB343 与 IPPB1237 施用7 d后对草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果仅为40.00%左右,无法达到有效防治挽回害虫造成的作物产量损失,但发现 5×10^5 PIB/mL SLNPV、MBNPV 和短稳杆菌3种生物源杀虫剂对草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果为58.94%~73.32%,这与陈思汉等(2019)等的研究结果类似,在其试验结果中,10亿 PIB/mL MBNPV 对草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果为66.92%。可见,在本试验中,生物源杀虫剂单独使用对草地贪夜蛾的田间防治效果略

高于昆虫病原真菌单独使用的防治效果,其仍有提高的空间。

为提升该药剂对草地贪夜蛾幼虫的防控能力,本试验测定昆虫病原真菌与生物农药联合施用后对草地贪夜蛾幼虫的田间防治效果,结果显示,联合施用可增强昆虫微生物杀虫剂对草地贪夜蛾幼虫的防治效果,全部是相加作用或者增效作用,其中 MBNPV 对昆虫病原真菌的增效作用较好,在田间试验中,金龟子绿僵菌 IPPM330189 与 MBNPV 联合施用对草地贪夜蛾幼虫的防治效果达到了88.75%,二者的协同毒力指数在喷施7 d时为22.43,具有增效作用。与蒋春艳(2022)试验结果类似,其发现 1.92×10^8 个/mL 金龟子绿僵菌与 1.92×10^8 IU/L 苏云金芽胞杆菌 *Bacillus thuringiensis* 联合施用对黄曲跳甲虫 *Phyllotreta striolata* 的致死率为94.1%,协同毒力指数为165.0,具有明显的增效作用。表明金龟子绿僵菌 IPPM330189 与 MBNPV 为防治草地贪夜蛾幼虫的最佳药剂组合。

昆虫病原真菌与常用杀虫剂的相容性是当今害虫综合防治体系的重点研究内容,对减少农药用量、简化害虫防控技术、降低防治成本并提高防治效果

具有重要的应用价值(彭国雄等,2017)。本研究利用实验室条件与田间条件共同证实联合施用可增强昆虫病原真菌与生物农药对草地贪夜蛾幼虫的防治效果,为草地贪夜蛾田间防治提供依据。

参 考 文 献 (References)

- Antle JM, Pingali PL. 1994. Pesticides, productivity, and farmer health: a Philippine case study. *American Journal of Agricultural Economics*, 76(3): 418–430
- Chen SH, Xia Q, Deng YX, Feng J. 2019. Screening test on the control effect of several biological pesticides against *Spodoptera frugiperda*. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, (S1): 57–59 (in Chinese) [陈思汉, 夏青, 邓玉仙, 冯晶. 2019. 几种生物农药对草地贪夜蛾防效筛选试验. 云南农业科技, (S1): 57–59]
- Cruz-Avalos AM, de los Angeles Bivián-Hernández M, Ibarra JE, Del Rincón-Castro MC. 2019. High virulence of Mexican entomopathogenic fungi against fall armyworm, (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Economic Entomology*, 112(1): 99–107
- Ding KT, Du SJ, Yang NW, Liu WX, Guo JY. 2023. Research progress on comprehensive control techniques of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in China. *Journal of Biosafety*, 32(4): 291–302 (in Chinese) [丁奎婷, 杜素洁, 杨念婉, 刘万学, 郭建洋. 2023. 草地贪夜蛾综合防控技术研究进展. 生物安全学报, 32(4): 291–302]
- Gao SJ, Liu AP, Xu LB, Cao YX, Wang N. 2009. Interactive effect of *Metarhizium anisopliae* and bifenthrin on the mortalities of *Oedaleus asiaticus* in laboratory bioassays. *Agrochemicals*, 48(11): 836–837, 845 (in Chinese) [高书晶, 刘爱萍, 徐林波, 曹艺潇, 王宁. 2009. 金龟子绿僵菌与联苯菊酯对亚洲小车蝗协同作用的生物测定. 农药, 48(11): 836–837, 845]
- Guo JF, Zhao JZ, He KL, Zhang F, Wang ZY. 2018. Potential invasion of the crop-devastating insect pest fall armyworm *Spodoptera frugiperda* to China. *Plant Protection*, 44(6): 1–10 (in Chinese) [郭井菲, 赵建周, 何康来, 张峰, 王振营. 2018. 警惕危险性害虫草地贪夜蛾入侵中国. 植物保护, 44(6): 1–10]
- Huang JR, Wang GS, Tian CH, Li SK, Zhang YJ, Li GP, Feng HQ. 2022. Classification methods of the damaged maize plant leaves by fall armyworm *Spodoptera frugiperda* and its performance in the control efficacy assessment of insecticides in the field. *Journal of Plant Protection*, 49(5): 1482–1492 (in Chinese) [黄建荣, 王根松, 田彩红, 李松科, 张永军, 李国平, 封洪强. 2022. 草地贪夜蛾为害玉米叶片程度的分级法及其在田间药效评价中的应用效果. 植物保护学报, 49(5): 1482–1492]
- Jiang CY. 2022. Effects of *Metarhizium anisopliae* and insecticides on combined toxicity test and protective enzyme activities of *Phyllostreta striolata*. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 34(3): 158–162, 171 (in Chinese) [蒋春艳. 2022. 金龟子绿僵菌与杀虫剂对黄曲条跳甲联合毒力测定和保护酶活性影响. 江西农业学报, 34(3): 158–162, 171]
- Jiang YY, Liu J, Xie MC, Li YH, Yang JJ, Zhang ML, Qiu K. 2019. Observation on law of diffusion damage of *Spodoptera frugiperda* in China in 2019. *Plant Protection*, 45(6): 10–19 (in Chinese) [姜玉英, 刘杰, 谢茂昌, 李亚红, 杨俊杰, 张曼丽, 邱坤. 2019. 2019年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测. 植物保护, 45(6): 10–19]
- Li GP, Liu B, Zhang DM, Li SK, Huang B, Tao ZL, Huang JR, Wang GS, Tian CH, Zhang YJ, et al. 2022. Yield losses and control thresholds of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* on grain corn in Huang-Huai-Hai summer corn region. *Journal of Plant Protection*, 49(5): 1472–1481 (in Chinese) [李国平, 刘彬, 张大明, 李松科, 黄博, 陶子龙, 黄建荣, 王根松, 田彩红, 张永军, 等. 2022. 黄淮海夏玉米区草地贪夜蛾为害籽粒玉米的产量损失与防治阈值. 植物保护学报, 49(5): 1472–1481]
- Liu CL. 2017. Application of entomopathogenic fungi in biological control of agricultural and forestry pests. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, (3): 68–73 (in Chinese) [刘春来. 2017. 昆虫病原真菌在农林害虫生物防治中的应用. 黑龙江农业科学, (3): 68–73]
- Peng GX, Xie JQ, Xia YX. 2017. Compatibilities of *Metarhizium anisopliae* CQMa421 with insecticides and germicides. *Chinese Journal of Biological Control*, 33(6): 747–751 (in Chinese) [彭国雄, 谢佳沁, 夏玉先. 2017. 金龟子绿僵菌 CQMa421 与杀虫剂、杀菌剂的兼容性. 中国生物防治学报, 33(6): 747–751]
- Qi GJ, Su XN, Zhang YP, Lei YY, Guo Y, Huang SH, Xiao Y, Yuan X, Shi QX, Zhang ZF. 2020. Research progress in monitoring and early warning, prevention and control of *Spodoptera frugiperda*. *Guangdong Agricultural Sciences*, 47(12): 109–121 (in Chinese) [齐国君, 苏湘宁, 章玉苹, 雷妍圆, 郭义, 黄少华, 肖勇, 袁曦, 石庆型, 张振飞. 2020. 草地贪夜蛾监测预警与防控研究进展. 广东农业科学, 47(12): 109–121]
- Sharififard M, Mossadegh M, Vazirianzadeh B, Zarei-Mahmoudabadi A. 2011. Interactions between entomopathogenic fungus, *Metarhizium anisopliae* and sublethal doses of spinosad for control of house fly, *Musca domestica*. *Iranian Journal of Arthropod-Borne Diseases*, 5(1): 28–36
- Su XN, Li CY, Huang SH, Liu WL, Zhang YP, Pan ZP. 2019. Optimization of artificial diet and rearing condition of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J.E Smith). *Journal of Environmental Entomology*, 41(5): 992–998 (in Chinese) [苏湘宁, 李传瑛, 黄少华, 刘伟玲, 章玉苹, 潘志萍. 2019. 草地贪夜蛾人工饲料及饲养条件的优化. 环境昆虫学报, 41(5): 992–998]
- Wu KM. 2020. Management strategies of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China. *Plant Protection*, 46(2): 1–5 (in Chinese) [吴孔明. 2020. 中国草地贪夜蛾的防控策略. 植物保护, 46(2): 1–5]
- Zhang W, Peng GX, Xia YX. 2019. Current status, problems and prospects of entomopathogenic fungi in controlling fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. *Chinese Journal of Biological Control*, 35(5): 674–681 (in Chinese) [张维, 彭国雄, 夏玉先. 2019. 昆虫病原真菌防控草地贪夜蛾的现状、问题与展望. 中国生物防治学报, 35(5): 674–681]
- Zhao ZX, Wang MW, Li L, Wu JN, Wang MR, Li SG. 2022. Virulence and effects of *Metarhizium robertsii* AAU-4 on the growth and development of larvae of *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition*, 53(1): 60–65 (in Chinese) [赵宗祥, 王明伟, 李蕾, 吴俊南, 王梦茹, 李世广. 2022. 罗伯茨绿僵菌 AAU-4 对草地贪夜蛾幼虫的毒力及生长发育的影响. 山东农业大学学报: 自然科学版, 53(1): 60–65]