

球孢白僵菌和金龟子绿僵菌与四种药剂混配使用对棉蚜的毒力

张宇^{1,2} 刘冰² 张金林^{1*} 陆宴辉^{2,3*}

(1. 河北农业大学植物保护学院, 保定 071000; 2. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害综合治理国家重点实验室, 北京 100193; 3. 中国农业科学院西部农业研究中心, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 为评价不同生防真菌对棉蚜 *Aphis gossypii* 的杀虫效果及其与杀虫剂混配的应用潜力, 采用室内浸渍法测定球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 和金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 孢子悬浮液对新疆棉蚜种群的毒力, 并评价这 2 种微生物菌剂与氟啶虫胺腈、双丙环虫酯、吡虫啉和苦参碱 4 种杀虫剂混配后对棉蚜的增效作用。结果表明: 经球孢白僵菌和金龟子绿僵菌处理后第 7 天对棉蚜的 LC_{90} 分别为 4.6×10^8 CFU/mL 和 1.5×10^8 CFU/mL。浓度为 1×10^8 CFU/mL 的球孢白僵菌和金龟子绿僵菌分别与浓度为 LC_{50} 的 4 种不同杀虫剂混配使用对其孢子萌发率均无显著影响, 且提高了对棉蚜的毒力, 其中球孢白僵菌和金龟子绿僵菌与氟啶虫胺腈混配使用效果最佳, 药后 72 h 棉蚜的校正死亡率分别达到 96.44% 和 93.05%; 与双丙环虫酯混配使用后 72 h 棉蚜的校正死亡率分别为 84.48% 和 81.71%; 与苦参碱混配使用后 72 h 棉蚜的校正死亡率分别为 82.11% 和 77.28%; 与吡虫啉混配使用后 72 h 棉蚜的校正死亡率分别为 84.14% 和 60.58%; 均显著高于球孢白僵菌和金龟子绿僵菌单独使用下棉蚜的校正死亡率。表明这 2 种微生物菌剂在棉蚜防治应用中潜力巨大, 与供试 4 种不同杀虫剂混配使用后对棉蚜的毒力显著提高, 可用于棉蚜绿色防控技术开发。

关键词: 球孢白僵菌; 金龟子绿僵菌; 棉蚜; 毒力; 协同增效; 农药减施

Toxic efficiency of biocontrol fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* jointly with four insecticides on controlling cotton aphid *Aphis gossypii*

Zhang Yu^{1,2} Liu Bing² Zhang Jinlin^{1*} Lu Yanhui^{2,3*}

(1. College of Plant Protection, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei Province, China; 2. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 3. Western Agricultural Research Center, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changji 831100, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

Abstract: To assess and explore the potential application of different biocontrol fungi against cotton aphid *Aphis gossypii* on cotton, the toxicity of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* spore suspensions to the Xinjiang cotton aphid population was determined using a dipping method under laboratory conditions. Furthermore, their synergistic toxicity with four insecticides (sulfoxaflor, afidopyropen, imidacloprid, and matrine) were assessed. The results showed that the LC_{90} values of *B. bassiana* and *M. anisopliae* against *A. gossypii* after seven days were 4.6×10^8 CFU/mL and 1.5×10^8 CFU/mL, respectively. The spore germination rate was not significantly affected by the combined use of 1×10^8 CFU/mL fungal suspension and the four insecticides at their respective LC_{50} , and the combined treatments signifi-

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD1400300), 国家棉花产业技术体系(CARS-15-19)

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: zhangjinlin@hebau.edu.cn, luyanhui@caas.cn

收稿日期: 2024-02-24

cantly enhanced the toxicity to *A. gossypii*. Among them, the highest corrected mortality rates after 72 h were observed in the combined treatment of sulfoxaflor+*B. bassiana* (96.44%) and sulfoxaflor+*M. anisopliae* (93.05%), followed by afidopyropen+*B. bassiana* (84.48%) and afidopyropen+*M. anisopliae* (81.71%), matrine+*B. bassiana* (82.11%) and matrine+*M. anisopliae* (77.28%), and imidacloprid+*B. bassiana* (84.14%) and imidacloprid+*M. anisopliae* (60.58%). All combinations exhibited significantly higher mortality rate against *A. gossypii* than *B. bassiana* or *M. anisopliae* alone. These results indicate the significant potential of these two fungal agents for controlling *A. gossypii*. Their combined use with the four insecticides significantly enhances toxicity and offers scientific support for developing green control techniques for *A. gossypii*.

Key words: *Beauveria bassiana*; *Metarhizium anisopliae*; *Aphis gossypii*; toxicity; synergistic effect; pesticide reduction

新疆维吾尔自治区(简称新疆)是我国最大的棉花产区,2023年棉花种植面积和产量分别占全国的84.98%和91.00%(国家统计局,2023)。棉蚜 *Aphis gossypii* 是新疆棉区的主要害虫,严重为害棉花并导致其减产(潘洪生等,2018)。长期以来,防治棉蚜的主要手段是使用化学杀虫剂,但其大量使用导致棉蚜抗药性不断增加,同时会杀伤大量天敌,破坏棉田生物多样性及生态平衡(Delnat et al., 2020; Mahas et al., 2023; 石丹丹等,2023)。因此,研发对棉蚜防效高且对天敌安全的杀虫剂已成为棉田害虫可持续治理的关键一环,其中以菌治虫是一种潜在的有效途径(田晶等,2023)。

白僵菌 *Beauveria* 和绿僵菌 *Metarhizium* 是2种重要的昆虫病原真菌,基于其生物活性成分制成的菌剂具有致病力强、持效期长、对非靶标生物安全和对环境友好等特点,既可以从昆虫的体壁、节间膜或呼吸道、消化道等部位直接侵染昆虫,还能通过浸种、灌根、叶片喷洒等方式定殖到植物体内进而形成共生体,在促进植物生长的同时还能降低害虫为害程度(王露露等,2022),对天敌的影响也相对较小(严森等,2023)。近年来,中国农业科学院植物保护研究所研发了用于小型害虫防治的球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 和金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 产品,其中球孢白僵菌产品可有效防治西花蓟马 *Frankliniella occidentalis*、葱蓟马 *Thrips alliorum*、甘蓝蚜 *Brevicoryne brassicae* 和二斑叶螨 *Tetranychus urticae*(王海鸿等,2020;刘胜等,2023),金龟子绿僵菌产品对西花蓟马(裴松松等,2021)、草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 低龄幼虫(彭国雄等,2019)等害虫均有较高防效,还可诱导苜蓿植株提高对苜蓿斑蚜 *Therioaphis trifolii* 的抗性(刘蓉等,2024)。但这些白僵菌和绿僵菌产品对棉蚜的防治

潜力还缺乏相关研究。

张谦等(2023)研究报道,单独使用生防菌防治害虫往往见效慢,而与化学药剂混配使用能提升防效,延缓害虫抗药性的产生。例如,球孢白僵菌和氟啶虫酰胺混配使用明显增加了烟粉虱 *Bemisia tabaci* 若虫与成虫的死亡率(Wari et al., 2020);王峰等(2017)研究表明 2×10^6 CFU/mL 球孢白僵菌分别与吡虫啉、乐果、高效氯氟菊酯混配使用后对萝卜蚜 *Lipaphis erysimi* 的增效作用显著,防效高达97%以上;Nawaz et al.(2022)将金龟子绿僵菌与氟啶虫酰胺混配处理后3 d棉蚜的死亡率达到91.68%,而单独使用金龟子绿僵菌处理后棉蚜的死亡率仅为17.08%。本实验室前期研究表明双丙环虫酯(南杰,2022)、氟啶虫胺脒(Dai et al., 2021;黄庆超等,2021;李娜等,2021)和苦参碱(刘佳美等,2021)这3种杀虫剂对棉蚜的防效较好,同时对多异瓢虫 *Hippodamia variegata* 等天敌的毒性低(南杰等,2022;Liu et al., 2023)。因此,探索球孢白僵菌和金龟子绿僵菌与不同类型杀虫剂减量混配使用对于棉田蚜虫绿色防控具有重要意义。本研究通过室内测定已登记的球孢白僵菌和金龟子绿僵菌可湿性粉剂对新疆棉蚜种群的毒力,进一步评价二者分别与双丙环虫酯、氟啶虫胺脒、吡虫啉、苦参碱混配使用对棉蚜的防效,以期发展为棉蚜绿色防控技术、减少棉田化学农药使用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试棉花和蚜虫:棉花品种为中棉所49,种子由中国农业科学院棉花研究所提供,在温度(25±1)℃、相对湿度(60±5)%、光周期16 L:8 D条件下盆栽种植,生长至4~5叶期备用。棉蚜于2023年6月

采自中国农业科学院植物保护研究所库尔勒基地棉田(种植品种为中棉所49),在室内相同品种棉花盆栽苗上继代饲养多代后取无翅成蚜供试。

供试药剂:150亿孢子/g球孢白僵菌可湿性粉剂,河北中保绿农作物科技有限公司;100亿孢子/g金龟子绿僵菌可湿性粉剂,宁夏中微泰克生物技术有限责任公司。50 g/L双丙环虫酯(afidopyropen)可分散液剂,巴斯夫欧洲公司;22%氟啶虫胺胍(sulfoxaflor)悬浮剂,科迪华农业科技有限责任公司;70%吡虫啉(imidacloprid)水分散粒剂,拜耳作物科学公司;20%苦参碱(matrine)母药,由西北农林科技大学植物保护学院提供。

试剂和仪器:本试验所用试剂均为国产分析纯。RXZ-500 D型智能人工气候箱,宁波江南仪器厂;L18-Y22A高速破壁调理机,九阳股份有限公司;SMZ800N体式解剖镜、C-LEDS显微镜,尼康精机(上海)有限公司;MARIENFELD血球计数板,德凡(常州)辅泰仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 球孢白僵菌和金龟子绿僵菌孢子悬浮液的制备

采用逐步稀释法配制不同浓度的生防菌孢子悬浮液。称取150亿孢子/g球孢白僵菌可湿性粉剂70 g,溶解于950 mL蒸馏水中,混匀获得浓度为 1×10^9 CFU/mL的母液;取母液100 mL,加900 mL蒸馏水混匀,即获得 1×10^8 CFU/mL孢子悬浮液;依次配制浓度为 1×10^7 、 1×10^6 、 1×10^5 和 1×10^4 CFU/mL的孢子悬浮液。称取100亿孢子/g金龟子绿僵菌可湿性粉剂100 g,溶解于950 mL蒸馏水中,混匀获得浓度为 1×10^9 CFU/mL的母液,采用相同方法依次配制得到浓度为 1×10^8 、 1×10^7 、 1×10^6 、 1×10^5 和 1×10^4 CFU/mL的孢子悬浮液。

1.2.2 球孢白僵菌和金龟子绿僵菌对棉蚜的毒力测定

采用浸渍法接虫。用孔径0.106 mm的白色尼龙纱网套在直径7 cm、高5 cm、上下开口的透明塑料圆桶内做成兜状以方便接虫,每个重复均选30头新出棉蚜无翅成蚜,用小毛笔挑到纱网兜中,需确保棉蚜口针完整,让携带成蚜的纱网穿出圆桶底部朝下分别浸没在浓度为 1×10^4 、 1×10^5 、 1×10^6 、 1×10^7 、 1×10^8 、 1×10^9 CFU/mL的球孢白僵菌和金龟子绿僵菌孢子悬浮液中,浸渍2 s后取出,用滤纸拭去残留在纱网上的悬浮液,并自然晾干。以浸入等量清水中的棉蚜为空白对照。取温室盆栽的新鲜棉叶剪成直径2.1 cm的圆片,在相应浓度的孢子悬浮液中完全浸湿后,正面朝下平铺在盛有约2 mm深的1%琼脂

培养基(1 g琼脂粉溶于100 mL蒸馏水)的12孔板中,再将浸过药的试虫用小毛笔转移到12孔板内的棉叶上,平均每孔放置3头试虫,置于温度(25 ± 1) °C、相对湿度(60 ± 5)%、光周期16 L:8 D的人工气候箱中培养。每个浓度处理4个重复。逐日记录新产若蚜数量和死亡成蚜数量,同时移除若蚜,将死亡成蚜单头挑出,接到1个新的带有1%琼脂培养基的12孔板中,保湿培养2 d,在解剖镜下观察菌丝生长情况,有菌丝长出的蚜虫尸体可认为系微生物菌剂致死,连续统计7 d,根据各处理蚜虫死亡情况计算其校正死亡率。校正死亡率=(处理组累计死亡率-对照组累计死亡率)/(1-对照组累计死亡率) $\times 100\%$;累计死亡率=(初始虫数-处理后存活虫数)/初始虫数 $\times 100\%$ 。根据不同剂量下死亡率拟合获得毒力回归方程,并计算球孢白僵菌和金龟子绿僵菌对棉蚜的90%致死浓度 LC_{90} 和致死中浓度 LC_{50} 。

1.2.3 混配杀虫剂对生防菌孢子萌发的影响

本课题组前期研究测得50 g/L双丙环虫酯可分散液剂、20%苦参碱母药、22%氟啶虫胺胍悬浮剂和70%吡虫啉水分散粒剂对棉蚜的 LC_{50} 分别为5.21、657.69、16.9和13.62 mg(a.i.)/L(Dai et al., 2021;刘佳美等,2021;南杰,2022)。分别取30 mL浓度为 1×10^8 CFU/mL的球孢白僵菌和金龟子绿僵菌孢子悬浮液,分别加入根据 LC_{50} 换算的药液体积或质量,即3.13 μ L的50 g/L双丙环虫酯可分散液剂、2.30 μ L的22%氟啶虫胺胍悬浮剂、0.58 mg的70%吡虫啉水分散粒剂和98.64 μ L的20%苦参碱母药,得到不同组合的混配药液。分别以加入0.6 mL 2%葡萄糖溶液的球孢白僵菌和金龟子绿僵菌孢子悬浮液处理为对照。将混配药液分别放置2、4、6、8和10 h,视为5个时间处理,用于观察不同杀虫剂对这2种生防菌孢子萌发的影响。每个处理4个重复。处理后将药剂以8 000 r/min离心5 min,去掉上清液,将沉淀转移至预先配制并灭菌的200 mL 2%葡萄糖培养液中,于(26 ± 1) °C、150 r/min条件下摇培24 h,取出后用血球计数板在显微镜下观察并统计孢子萌发数。孢子吸水膨胀后产生芽管,以芽管长度大于孢子短半径视为已萌发。孢子萌发率=萌发孢子数/检查孢子数 $\times 100\%$ 。

1.2.4 生防菌与杀虫剂混配对棉蚜的毒力测定

基于1.2.1和1.2.2结果,选择 1×10^8 CFU/mL浓度的球孢白僵菌和金龟子绿僵菌孢子悬浮液作为混配对象以及单剂对照,同时以 1×10^7 CFU/mL浓度的2个微生物菌剂作为单剂的低剂量对照,以清水

处理为空白对照。在 30 mL 浓度为 1×10^8 CFU/mL 的球孢白僵菌和金龟子绿僵菌悬浮液中分别加入 3.13 μ L 的 50 g/L 双丙环虫酯可分散液剂、2.30 μ L 的 22% 氟啶虫胺胍悬浮剂、0.58 mg 的 70% 吡虫啉水分散粒剂和 98.64 μ L 的 20% 苦参碱母药,使得药剂中混配杀虫剂的有效含量为各自的 LC_{50} ,共 13 个处理,每个处理 4 个重复,每个重复 36 头棉蚜无翅成蚜。处理后的试虫同样采用叶子圆片法饲养,方法同 1.2.2,连续观察 7 d,逐日记录新产若蚜数量和死亡蚜虫数量,并及时将二者移除。根据棉蚜存活情况计算各处理的试虫死亡率,死亡率=(初始虫数-处理后存活虫数)/初始虫数 \times 100%。

1.3 数据分析

采用 SPSS 22 软件对球孢白僵菌和金龟子绿僵

菌单独及混配不同杀虫剂使用后的蚜虫死亡率及这 2 种生防菌分别与 4 种杀虫剂混配后的孢子萌发率进行单因素方差分析,应用最小显著差异(least significant difference, LSD)法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 球孢白僵菌和金龟子绿僵菌对棉蚜的室内毒力

用球孢白僵菌和金龟子绿僵菌孢子悬浮液处理后,棉蚜累计死亡率随孢子浓度升高和时间延长逐渐上升,处理后 48 h 累计死亡率均不足 40.00%,随后累计死亡率快速增加,处理后 144 h 高剂量组(1×10^8 、 1×10^9 CFU/mL)的棉蚜累计死亡率均接近或超过 80.00%,处理后 168 h(第 7 天), 1×10^9 CFU/mL 最高浓度处理下棉蚜累计死亡率均超过 90.00%(图 1)。

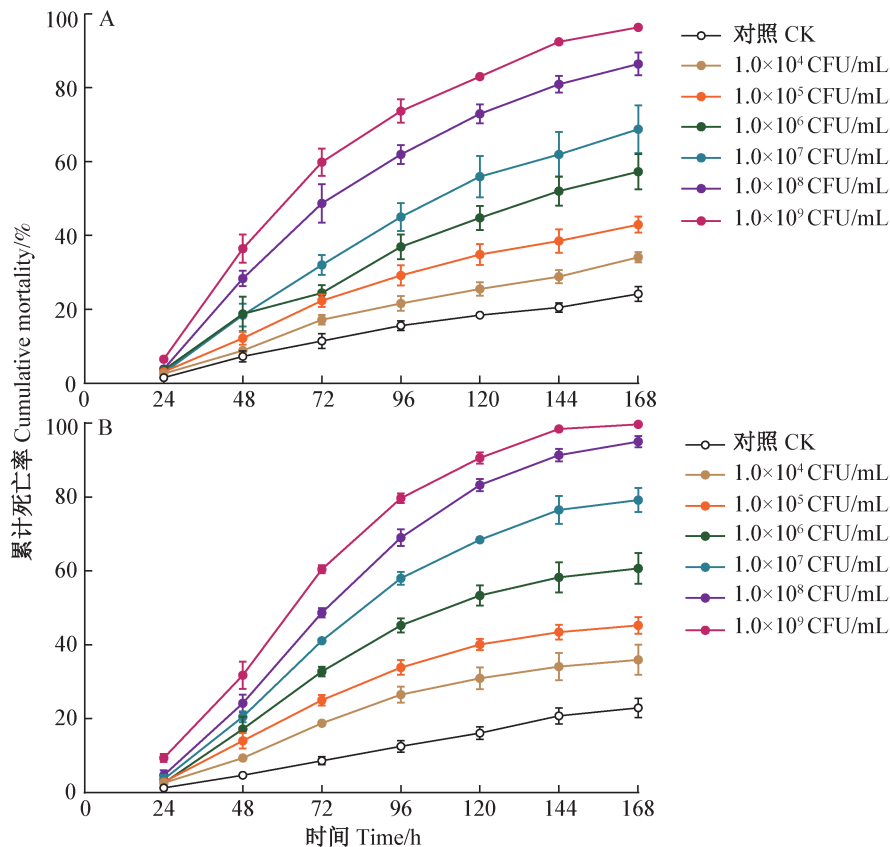


图 1 不同剂量球孢白僵菌(A)和金龟子绿僵菌(B)处理下棉蚜的累计死亡率

Fig. 1 Cumulative mortality of *Aphis gossypii* under different doses of *Beauveria bassiana* (A) and *Metarhizium anisopliae* (B)

1×10^9 CFU/mL 球孢白僵菌孢子悬浮液处理后第 6 天,棉蚜的校正死亡率为 90.47%,显著高于其他浓度处理($F_{5,18}=49.9, P<0.001$); 1×10^8 CFU/mL 和 1×10^9 CFU/mL 浓度处理后第 7 天,棉蚜的校正死亡率分别为 82.27%和 95.15%(表 1)。 1×10^8 CFU/mL 和 1×10^9 CFU/mL 金龟子绿僵菌孢子悬浮液处理后第 6 天,棉蚜的校正死亡率分别为 89.01%和 98.12%,第 7 天

时棉蚜的校正死亡率分别为 93.53%和 99.68%;这 2 个浓度处理下的棉蚜校正死亡率无显著差异,但均显著高于其他浓度处理下的校正死亡率(第 6 天: $F_{5,18}=87.6, P<0.001$;第 7 天: $F_{5,18}=92.8, P<0.001$;表 1)。球孢白僵菌和金龟子绿僵菌处理后第 7 天对棉蚜的 LC_{50} 分别为 2.1×10^6 CFU/mL 和 8.9×10^5 CFU/mL, LC_{90} 分别为 4.6×10^8 CFU/mL 和 1.5×10^8 CFU/mL(表 1)。

表1 球孢白僵菌和金龟子绿僵菌对棉蚜的毒力

Table 1 Toxicities of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* against *Aphis gossypii*

微生物菌剂 Microbial agent	时间 Time/d	回归方程 Regression equation	LC ₅₀ /(CFU/mL)	LC ₉₀ /(CFU/mL)	R ²	P
球孢白僵菌 <i>B. bassiana</i>	1	y=0.006x-0.017	1.5×10 ⁸⁶	6.8×10 ¹⁵²	0.627	0.061
	2	y=0.057x-0.230	6.4×10 ¹²	6.7×10 ¹⁹	0.938	<0.001
	3	y=0.097x-0.373	1.0×10 ⁹	1.3×10 ¹³	0.919	0.003
	4	y=0.138x-0.579	6.6×10 ⁷	5.2×10 ¹⁰	0.931	0.002
	5	y=0.145x-0.519	1.1×10 ⁷	6.1×10 ⁹	0.991	<0.001
	6	y=0.164x-0.578	3.7×10 ⁶	1.0×10 ⁹	0.991	<0.001
	7	y=0.171x-0.581	2.1×10 ⁶	4.6×10 ⁸	0.993	<0.001
金龟子绿僵菌 <i>M. anisopliae</i>	1	y=0.012x-0.046	3.1×10 ⁴⁵	6.8×10 ⁷⁸	0.682	0.043
	2	y=0.044x-0.128	1.9×10 ¹⁴	2.3×10 ²³	0.976	<0.001
	3	y=0.090x-0.265	3.2×10 ⁸	8.8×10 ¹²	0.991	<0.001
	4	y=0.125x-0.326	4.1×10 ⁶	1.2×10 ⁸	0.996	<0.001
	5	y=0.151x-0.444	1.8×10 ⁶	8.0×10 ⁸	0.991	<0.001
	6	y=0.175x-0.551	1.0×10 ⁶	2.0×10 ⁸	0.987	<0.001
	7	y=0.180x-0.571	8.9×10 ⁵	1.5×10 ⁸	0.981	<0.001

x代表微生物菌剂剂量的对数值, y为棉蚜校正死亡率转换的概率值。x represents the logarithm of concentrations of microbial agent, y represents the probability value of the corrected mortality rate of *Aphis gossypii*.

2.2 混配杀虫剂对生防菌孢子萌发的影响

1×10⁸ CFU/mL 球孢白僵菌孢子悬浮液分别与双丙环虫酯、氟啶虫胺脒、吡虫啉和苦参碱混配处理后2、4、6、8和10 h, 球孢白僵菌分生孢子萌发率介于84.29%~91.55%之间, 与球孢白僵菌单独使用时的分生孢子萌发率(90.62%~91.55%)均无显著差异(表2)。1×10⁸ CFU/mL 金龟子绿僵菌孢子悬浮液与

这4种杀虫剂混配处理后2、4、6、8和10 h, 金龟子绿僵菌分生孢子萌发率介于84.56%~93.94%之间, 与金龟子绿僵菌单独使用时的分生孢子萌发率(90.07%~93.94%)均无显著差异, 表明将这4种杀虫剂分别与2种微生物菌剂混配后对其孢子萌发无影响(表2)。

表2 球孢白僵菌和金龟子绿僵菌与4种杀虫剂混配处理对其孢子萌发的影响

Table 2 Effect of mixed treatments of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* with four insecticides on spore germination

微生物菌剂 Microbial agent	时间 Time/h	孢子萌发率 Spore germination rate/%				
		菌剂单用 Microbial agent used alone	菌剂与不同杀虫剂混配 Microbial agent mixed with different insecticides			
		1×10 ⁸ CFU/mL	+苦参碱 +Matrine	+吡虫啉 +Imidacloprid	+双丙环虫酯 +Afidopyropen	+氟啶虫胺脒 +Sulfoxafloer
球孢白僵菌 <i>B. bassiana</i>	2	90.80±2.47 a	91.55±3.56 a	90.62±1.80 a	91.23±1.80 a	91.09±2.56 a
	4	91.55±3.56 a	87.77±1.87 a	86.58±2.06 a	87.16±2.46 a	84.29±2.82 a
	6	91.09±2.56 a	88.50±4.27 a	87.40±0.43 a	85.00±3.36 a	89.90±0.51 a
	8	90.62±1.80 a	88.65±1.91 a	87.83±4.54 a	87.85±3.12 a	85.81±3.64 a
	10	91.23±1.80 a	85.79±1.24 a	87.48±2.79 a	87.68±2.04 a	84.66±1.57 a
金龟子绿僵菌 <i>M. anisopliae</i>	2	91.08±2.22 a	84.56±1.59 a	85.25±1.38 a	85.91±3.77 a	89.18±1.71 a
	4	91.53±1.20 a	89.97±0.95 a	87.49±1.86 a	86.96±0.85 a	88.69±1.58 a
	6	90.07±1.10 a	87.11±1.72 a	89.99±0.76 a	87.41±2.90 a	87.24±1.45 a
	8	93.94±1.86 a	88.67±0.50 a	90.03±1.80 a	89.08±2.02 a	89.31±1.70 a
	10	90.36±1.26 a	88.62±1.50 a	89.01±1.12 a	89.20±1.79 a	88.24±3.24 a

表中数据为平均数±标准误。同行相同小写字母表示经LSD法检验差异不显著(P>0.05)。Data are mean±SE. Same lowercase letters in the same row indicate no significant difference by LSD test (P>0.05).

2.3 生防菌与杀虫剂混配对棉蚜的毒力

1×10⁸ CFU/mL 的球孢白僵菌和金龟子绿僵菌孢子悬浮液分别与不同杀虫剂混配使用后, 棉蚜的

累计死亡率均明显增加(图2)。球孢白僵菌孢子悬浮液与不同杀虫剂混配处理后24 h, 棉蚜校正死亡率差异明显, 其中, 与双丙环虫酯及氟啶虫胺脒混配

处理后的校正死亡率分别为48.37%和44.00%，均显著高于与吡虫啉和苦参碱混配处理下的校正死亡率(23.72%和24.15%)，球孢白僵菌与这4种杀虫剂混配后对棉蚜的毒力均明显高于球孢白僵菌单独使用时(1×10^7 、 1×10^8 CFU/mL)的校正死亡率($F_{5,18}=25.2$, $P<0.001$)；处理后48 h，球孢白僵菌与氟啶虫胺腈混配处理下棉蚜的校正死亡率达85.78%，其次是分别与双丙环虫酯、吡虫啉混配处理下的校正死亡率(70.19%和70.28%)，明显高于与苦参碱混配处理下的校正死亡率58.33%和球孢白僵菌单独使用时的校正死亡率($\leq 22.17\%$)($F_{5,18}=63.2$, $P<0.001$)；处理后72 h，球孢白僵菌与氟啶虫胺腈混配处理下棉蚜的校正死亡率达96.44%，其次是分别与双丙环虫酯、吡虫啉、苦参碱混配处理下的校正死亡率，分别为84.48%、84.14%和82.11%，均显著高于球孢白僵菌单独使用时棉蚜的校正死亡率($F_{5,18}=76.1$, $P<0.001$ ；表3)。

金龟子绿僵菌孢子悬浮液与不同杀虫剂混配使用也明显提升了对棉蚜的毒力(图2、表3)。处理后24 h，金龟子绿僵菌与氟啶虫胺腈混配处理下棉蚜的校正死亡率为23.91%，显著高于其他混配处理及2个金龟子绿僵菌对照的校正死亡率($\leq 12.53\%$)($F_{5,18}=6.9$, $P<0.001$)；处理后48 h，与氟啶虫胺腈混配处理下棉蚜的校正死亡率最高为66.79%，其次为与双丙环虫酯、吡虫啉、苦参碱混配处理下的校正死亡率，分别为55.43%、45.16%和32.99%，均显著高于金龟子绿僵菌单独使用时的校正死亡率($F_{5,18}=23.5$, $P<0.001$)；处理后72 h，与氟啶虫胺腈混配处理下棉蚜的校正死亡率达93.05%，与双丙环虫酯、苦参碱、吡虫啉混配处理下棉蚜的校正死亡率分别为81.71%、77.28%和60.58%，均显著高于金龟子绿僵菌单独使用的校正死亡率($F_{5,18}=103.0$, $P<0.001$ ；表3)。

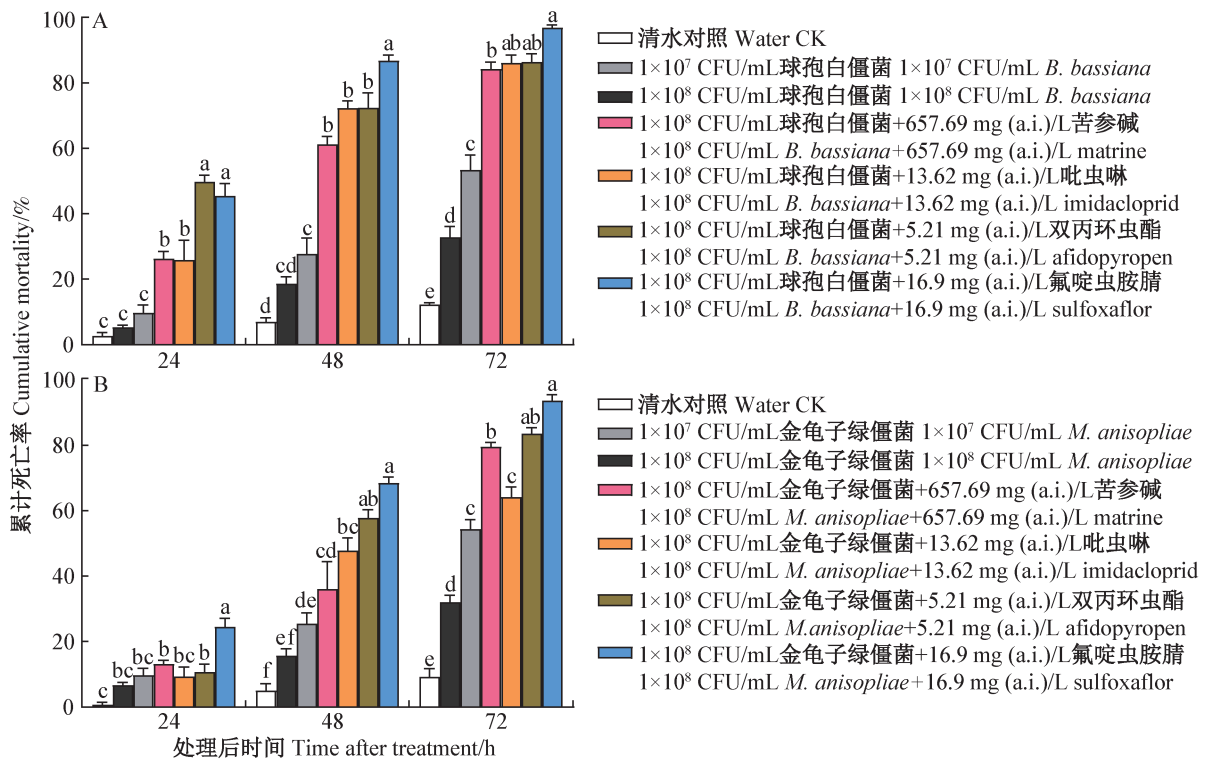


图2 球孢白僵菌(A)和金龟子绿僵菌(B)与其他LC₅₀剂量杀虫剂混配处理下棉蚜的累计死亡率

Fig. 2 Cumulative mortality of *Aphis gossypii* under treatments of *Beauveria bassiana* (A) and *Metarhizium anisopliae* (B) mixed with other insecticides at the LC₅₀ dose

图中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示经LSD法检验相同时间下不同处理间差异显著($P<0.05$)。Data are mean±SE. Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments at the same time by LSD test ($P<0.05$).

3 讨论

当前，球孢白僵菌与金龟子绿僵菌在温室或田间害虫防治中已有较多应用，但主要集中在其登记防治对象蓟马。如王海鸿等(2020)报道温室大棚

辣椒上喷施1 800~3 000 g/hm²的150亿孢子/g球孢白僵菌可湿性粉剂，对西花蓟马的防效可达74%以上；裴松松等(2021)用金龟子绿僵菌菌株F2-M18-8-4孢子悬浮液对花生田进行喷雾处理，施药15 d后西花蓟马虫口减退率达79.52%，同时对花生也有较

好的保叶和增产效果。本研究于室内测定了150亿孢子/g球孢白僵菌可湿性粉剂和100亿孢子/g金龟子绿僵菌可湿性粉剂对新疆棉区棉蚜的毒力,发现这2种微生物菌剂以 1×10^8 CFU/mL浓度单独处理7 d后棉蚜的校正死亡率均在90.00%以上,LC₅₀分别为 2.1×10^6 CFU/mL和 8.9×10^5 CFU/mL。除棉蚜外,本课题组同时测试了这2种菌剂对棉长管蚜 *Acyrtosiphon gossypii* 和花蓟马 *Frankliniella intonsa* 的室内毒力,发现 1×10^8 CFU/mL浓度的球孢白僵菌和金龟子绿僵菌孢子悬浮液处理棉长管蚜后第6天的校

正死亡率分别达到100.0%和98.4%,处理花蓟马第7天的校正死亡率也分别达到88.7%和81.6%(未发表数据)。这表明与对农药登记中靶标害虫蓟马的田间防效相比,上述2种生防菌产品对新疆棉田蚜虫、蓟马同样具有较好的控制潜力,而田间效果还有待研究验证。需要说明的是本研究所测药剂为商业化制剂而非原药,这有利于已有产品在新作物上的扩展登记及推广应用,但制剂中含有的助剂可能影响微生物对棉蚜等害虫的控制效果,这一点在后续交互研究中应予以关注。

表3 球孢白僵菌和金龟子绿僵菌与4种杀虫剂混配处理下棉蚜的校正死亡率

Table 3 Corrected mortality of *Aphis gossypii* under treatments of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* mixed with four insecticides

微生物菌剂 Microbial agent	时间 Time/h	校正死亡率 Corrected mortality/%					
		菌剂单用 Microbial agent used alone		菌剂与不同杀虫剂混配 Microbial agent mixed with different insecticides			
		1×10^7 CFU/mL	1×10^8 CFU/mL	+苦参碱 +Matrine	+吡虫啉 +Imidacloprid	+双丙环虫酯 +Afidopyropen	+氟啶虫胺胍 +Sulfoxaflor
球孢白僵菌 <i>B. bassiana</i>	24	2.68±0.62 d	7.29±2.73 cd	24.15±3.14 b	23.72±6.65 bc	48.37±2.53 a	44.00±3.67 a
	48	12.52±1.58 c	22.17±6.02 c	58.33±2.78 b	70.28±2.15 ab	70.19±5.15 ab	85.78±1.96 a
	72	23.50±3.58 c	46.81±5.24 b	82.11±2.31 a	84.14±2.74 a	84.48±2.89 a	96.44±0.92 a
金龟子绿僵菌 <i>M. anisopliae</i>	24	6.02±1.27 b	8.98±2.68 b	12.53±1.49 b	8.66±3.00 b	10.04±2.47 b	23.91±3.00 a
	48	11.16±2.82 e	21.38±4.48 de	32.99±7.61 cd	45.16±3.15 bc	55.43±3.43 ab	66.79±2.18 a
	72	25.08±0.54 e	49.54±3.77 d	77.28±1.89 b	60.59±2.88 c	81.71±2.32 b	93.05±1.99 a

表中数据为平均数±标准误。同行不同小写字母表示经LSD法检验不同处理间差异显著($P < 0.05$)。Data are mean±SE. Different lowercase letters in the same row indicate significant differences among different treatments by LSD test ($P < 0.05$).

长期使用单一杀虫剂会引发害虫抗药性发展快、用药量增加等问题,将不同类型的杀虫剂混配或交替使用是解决该难题的有效途径。因此,在前期研究基础上,本研究重点评价了球孢白僵菌和金龟子绿僵菌分别与22%氟啶虫胺胍悬浮剂、50 g/L双丙环虫酯可分散液剂、70%吡虫啉水分散粒剂和20%苦参碱母药等不同类型的杀虫剂混配使用对棉蚜的致死作用,发现混配后并未影响球孢白僵菌与金龟子绿僵菌的孢子萌发率,对棉蚜的毒力明显增加,球孢白僵菌与这4种杀虫剂混配使用后72 h棉蚜的校正死亡率均超过80.00%,而金龟子绿僵菌与这4种杀虫剂混配使用后72 h棉蚜的校正死亡率也在60.00%以上;氟啶虫胺胍与球孢白僵菌和金龟子绿僵菌混配使用效果最好,药后72 h棉蚜的校正死亡率分别为96.44%和93.05%;2种微生物菌剂与双丙环虫酯混配使用后的防效也在80.00%以上,与吡虫啉、苦参碱混配使用后防效也较好。郭继元等(2024)报道中等浓度(4×10^7 孢子/mL)球孢白僵菌菌株GZGY-1-3孢子悬浮液分别与70%吡虫啉可湿性粉剂、25%噁虫嗪水分散粒剂和20%呋虫胺悬浮剂这3种烟碱

类化学农药复配后,对室内盆栽高粱上高粱蚜 *Melanaphis sacchari* 的致死作用显著提升,其中与呋虫胺的复配效果最佳,处理7 d后致死率高达97.67%;张谦等(2023)发现金龟子绿僵菌可分散油悬浮剂分别与50%氟啶虫胺胍水分散粒剂、50 g/L双丙环虫酯可分散液剂和10%氟啶虫酰胺水分散粒剂混配后对棉花上苗蚜的增效作用显著。综上所述,与低浓度(剂量)的化学药剂结合使用是提高微生物菌剂防治效果及速效性的重要手段。

棉田化学农药的大量使用增加了棉蚜的抗药性,同时也杀伤了瓢虫等大量有益天敌,使田间益害比降低,这是导致棉蚜再猖獗的主要原因(吴孔明和刘芹轩,1992)。最新研究发现,农田景观中非作物(Yang et al., 2019a; Liu et al., 2022)和小宗作物(Liu et al., 2018; Xue et al., 2023; Yang et al., 2023)在天敌保育和生物控害中发挥着重要作用(Yang et al., 2021),但广谱性杀虫剂对天敌的杀伤作用明显,大量使用杀虫剂会显著削弱这些景观因子的生态调控功能(Yang et al., 2019b; Pan et al., 2023)。因此,减少化学农药对有益天敌的干扰与误伤,提升农田生

态系统中有益生物的控害作用,是实现棉蚜可持续治理的关键所在(陆宴辉,2021)。研究证实,氟啶虫胺胍(Dai et al., 2021; 李娜等, 2021)、双丙环虫酯(南杰,2022)和苦参碱(刘佳美等,2021)等新型杀虫剂对棉蚜毒力高,对天敌安全性好(Dai et al., 2020; 黄庆超等,2021; Liu et al., 2023)。将这些高效低毒杀虫剂按 LC_{50} 剂量与球孢白僵菌、金龟子绿僵菌这2种微生物菌剂混配使用后对棉蚜的致死作用明显增强。将不同生防菌与其他药剂混配使用可以降低化学杀虫剂的用量及减少对天敌的可能误伤,有效提高微生物菌剂对靶标害虫的防治效果,增强其速效性,在破解化学杀虫剂大量使用导致蚜虫再猖獗的难题上有一定的应用潜力,对于推动棉田化学农药持续减施、促进棉蚜的绿色防控具有重要意义。下一步可重点开展此类微生物菌剂与特定杀虫剂混配后的区域性示范应用以及田块、景观等不同尺度的生态效益评估,以充分挖掘这类微生物菌剂在棉花蚜虫区域性防控中的应用潜力,为提升棉花蚜虫的绿色防控水平提供科学方案。

致谢:中国农业科学院植物保护研究所涂雄兵研究员为本研究提供了微生物菌剂产品,特此致谢!。

参 考 文 献 (References)

- Dai CC, Ricupero M, Puglisi R, Lu YH, Desneux N, Biondi A, Zappalà L. 2020. Can contamination by major systemic insecticides affect the voracity of the harlequin ladybird? *Chemosphere*, 256: 126986
- Dai CC, Ricupero M, Wang ZQ, Desneux N, Biondi A, Lu YH. 2021. Transgenerational effects of a neonicotinoid and a novel sulfoximine insecticide on the harlequin ladybird. *Insects*, 12(8): 681
- Delnat V, Janssens L, Stoks R. 2020. Effects of predator cues and pesticide resistance on the toxicity of a (bio)pesticide mixture. *Pest Management Science*, 76(4): 1448–1455
- Guo JY, Pan CB, Pan ZP, Zhang XM, Chen XJ, Wang XW, Tang JH, Yan S, Wu SY. 2024. Control efficiency of three pesticides combined with *Beauveria bassiana* against *Melanaphis sacchari*. *Chinese Journal of Biological Control*, 40(2): 274–281 (in Chinese) [郭继元, 潘昌滨, 潘自平, 张锡梅, 陈晓杰, 王小武, 唐继洪, 严森, 吴圣勇. 2024. 三种药剂与球孢白僵菌对高粱蚜虫的协同控制作用. *中国生物防治学报*, 40(2): 274–281]
- Huang QC, Dai CC, Zhang JP, Chen J, Lu YH. 2021. Toxicities of 21 pesticides against major cotton insect pests and their safety to variegated ladybird *Hippodamia variegata* in Xinjiang. *Journal of Plant Protection*, 48(5): 1114–1124 (in Chinese) [黄庆超, 戴长春, 张建萍, 陈静, 陆宴辉. 2021. 21种化学药剂对新疆棉田主要害虫毒力及对多异瓢虫的安全性. *植物保护学报*, 48(5): 1114–1124]
- Li N, Liu B, Lu YH. 2021. Effects of sulfoxaflor on *Aphis gossypii* and natural enemies in Xinjiang cotton field. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 58(11): 2062–2068 (in Chinese) [李娜, 刘冰, 陆宴辉. 2021. 氟啶虫胺胍对新疆棉田棉蚜及其天敌种群的影响. *新疆农业科学*, 58(11): 2062–2068]
- Liu B, Yang L, Zeng YD, Yang F, Yang YZ, Lu YH. 2018. Secondary crops and non-crop habitats within landscapes enhance the abundance and diversity of generalist predators. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 258: 30–39
- Liu JM, Liu B, Wang PL, Lu YH. 2021. Toxicity of three botanical insecticides to *Aphis gossypii* and their selectivity to *Hippodamia variegata*. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 58(11): 2069–2076 (in Chinese) [刘佳美, 刘冰, 王佩玲, 陆宴辉. 2021. 植物源杀虫剂对棉蚜毒力及多异瓢虫的安全性评价. *新疆农业科学*, 58(11): 2069–2076]
- Liu JM, Liu YT, Liu B, Dai CC, Wang PL, Lu YH. 2023. Life-table parameters, functional response, flight ability, and cross-generational effects of matrine demonstrate its safety to *Hippodamia variegata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Journal of Economic Entomology*, 116(3): 742–751
- Liu R, Cai N, Nong XQ, Wang GJ, Tu XB, Feng SQ, Zhang ZH. 2024. Effects of entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* on alfalfa growth promotion and anti-aphid induction. *Journal of Plant Protection*, 51(2): 442–449 (in Chinese) [刘蓉, 蔡霓, 农向群, 王广君, 涂雄兵, 冯士骞, 张泽华. 2024. 金龟子绿僵菌对苜蓿生长的影响及对苜蓿抗蚜性的诱导作用. *植物保护学报*, 51(2): 442–449]
- Liu S, Liu Z, Wang SY, Zhang QK, Lei ZR, Wang HH. 2023. Combined use of *Beauveria bassiana* and food lure for control of the western flower thrip. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(2): 297–304 (in Chinese) [刘胜, 刘召, 王帅宇, 张起恺, 雷仲仁, 王海鸿. 2023. 球孢白僵菌与食诱剂对西花蓟马的联合作用. *中国生物防治学报*, 39(2): 297–304]
- Liu YT, Liu B, Li Q, Sun MX, Li ML, Wyckhuys KAG, Wang PL, Lu YH. 2022. Perennial flowering plants sustain natural enemy populations in Gobi desert oases of southern Xinjiang, China. *Insects*, 13(5): 399
- Lu YH. 2021. Ever-evolving advances in the researches of cotton insect pest management in China. *Journal of Plant Protection*, 48(5): 937–939 (in Chinese) [陆宴辉. 2021. 与时俱进的中国棉花害虫治理研究. *植物保护学报*, 48(5): 937–939]
- Mahas JW, Steury TD, Huseeth AS, Jacobson AL. 2023. Imidacloprid-resistant *Aphis gossypii* populations are more common in cotton-dominated landscapes. *Pest Management Science*, 79(3): 1040–1047
- Nan J. 2022. Efficacy of afidopyropen on controlling *Aphis gossypii* and the biosafety to *Hippodamia variegata*. Master thesis. Urumqi: Xinjiang Agricultural University (in Chinese) [南杰. 2022. 双丙环虫酯对棉蚜防治效果及多异瓢虫安全性评价. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆农业大学]
- Nan J, Liu B, Lu YH. 2022. Effects of afidopyropen on the life parameters, predatory function and flight ability of variegated ladybird *Hippodamia variegata*. *Journal of Plant Protection*, 49(6): 1799–1808 (in Chinese) [南杰, 刘冰, 陆宴辉. 2022. 双丙环虫酯对多异瓢虫生命参数、捕食功能与飞行能力的影响. *植物保护学报*, 49(6): 1799–1808]

- National Bureau of Statistics of China. 2023. Announcement of the National Bureau of Statistics on cotton production in 2023. 2023-12-25 (in Chinese) [国家统计局. 2023. 国家统计局关于2023年棉花产量的公告. 2023-12-25]
- Nawaz A, Razzaq F, Razzaq A, Gogi MD, Fernández-Grandon GM, Tayib M, Ayub MA, Sufyan M, Shahid MR, Qayyum MA, et al. 2022. Compatibility and synergistic interactions of fungi, *Metarhizium anisopliae*, and insecticide combinations against the cotton aphid, *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae). Scientific Reports, 12(1): 4843
- Pan HS, Jiang YY, Wang PL, Liu J, Lu YH. 2018. Research progress in the status evolution and integrated control of cotton pests in Xinjiang. Plant Protection, 44(5): 42–50 (in Chinese) [潘洪生, 姜玉英, 王佩玲, 刘建, 陆宴辉. 2018. 新疆棉花害虫发生演替与综合防治研究进展. 植物保护, 44(5): 42–50]
- Pan YF, Yang L, Liu HN, Wang KT, Wang HN, Li HQ, Lu YH. 2023. Frequent insecticide applications in cotton fields offset the positive impact of surrounding semi-natural habitats on in-field lady-beetle abundance. Entomologia Generalis, 43(6): 1077–1087
- Pei SS, Wu X, Li RJ, Zhao D, Lu XJ, Guo W. 2021. Screening of efficient *Metarhizium anisopliae* strains for *Frankliniella occidentalis* and its application in peanut field. Chinese Journal of Biological Control, 37(4): 732–739 (in Chinese) [裴松松, 吴轩, 李瑞军, 赵丹, 陆秀君, 郭巍. 2021. 对西花蓟马高效金龟子绿僵菌菌株筛选及在花生田间的应用效果. 中国生物防治学报, 37(4): 732–739]
- Peng GX, Zhang SL, Xia YX. 2019. Laboratory efficacy of insecticidal fungi for control of *Spodoptera frugiperda*. Chinese Journal of Biological Control, 35(5): 729–734 (in Chinese) [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]
- Shi DD, Zhang S, Liang P. 2023. The current status of insecticide resistance in the cotton aphid, *Aphis gossypii* Glover and the management strategies. Plant Protection, 49(5): 270–278 (in Chinese) [石丹丹, 张帅, 梁沛. 2023. 棉蚜抗药性现状及治理策略. 植物保护, 49(5): 270–278]
- Tian J, Meng H, Yang ZQ, Ma RY. 2023. Pathogenicity of entomopathogenic fungi *Cordyceps fumosorosea* and *Beauveria bassiana* against mites *Tetranychus cinnabarinus* and *Tetranychus urticae*. Journal of Plant Protection, 50(4): 1072–1081 (in Chinese) [田晶, 孟豪, 杨忠钦, 马瑞燕. 2023. 玫烟色虫草和球孢白僵菌对朱砂叶螨和二斑叶螨的致病力评价. 植物保护学报, 50(4): 1072–1081]
- Wang F, Zheng PF, Nong XQ, Wang GJ, Cao GC, Zhang ZH. 2017. Synergistic effect of *Beauveria bassiana* and three pesticides on *Lipaphis erysimi*. Chinese Journal of Biological Control, 33(6): 752–759 (in Chinese) [王峰, 郑鹏飞, 农向群, 王广君, 曹广春, 张泽华. 2017. 球孢白僵菌与三种农药对萝卜蚜的协同防治效果. 中国生物防治学报, 33(6): 752–759]
- Wang HH, Liu S, Wang SY, Lei ZR. 2020. Research and development of wettable powder of *Beauveria bassiana* and its control and application to *Frankliniella occidentalis*. Chinese Journal of Biological Control, 36(6): 858–861 (in Chinese) [王海鸿, 刘胜, 王帅宇, 雷仲仁. 2020. 150亿孢子/g球孢白僵菌可湿性粉剂的研发及对西花蓟马的防治应用. 中国生物防治学报, 36(6): 858–861]
- Wang LL, Wang H, Xiong Y, Zhou X, Wang J, Wang JH, Wu SR. 2022. Advances in the control of crop pests by using entomopathogenic fungi. Journal of Tropical Biology, 13(3): 309–314 (in Chinese) [王露露, 王辉, 熊焰, 周霞, 王军, 王健华, 伍苏然. 2022. 虫生真菌防治农作物害虫的研究进展. 热带生物学报, 13(3): 309–314]
- Wari D, Okada R, Takagi M, Yaguchi M, Kashima T, Ogawara T. 2020. Augmentation and compatibility of *Beauveria bassiana* with pesticides against different growth stages of *Bemisia tabaci* (Gennadius); an *in vitro* and field approach. Pest Management Science, 76(9): 3236–3252
- Wu KM, Liu QX. 1992. Study on the resurgence caused by insecticides for cotton aphid, *Aphis gossypii*. Acta Ecologica Sinica, 12(4): 341–347 (in Chinese) [吴孔明, 刘芹轩. 1992. 杀虫剂诱使棉蚜再猖獗的研究. 生态学报, 12(4): 341–347]
- Xue ZX, Peng TX, Liu B, Liu YT, Zhang ZJ, Wyckhuys KAG, Wang PL, Lu YH. 2023. Licorice strips enhance predator-mediated biological control in China's cotton crop. Pest Management Science, 79(2): 781–791
- Yan S, Ren XY, Wang DJ, Zhang Y, Zhang ZK, Guo JY, Wang HH, Lei ZR, Wu SY. 2023. The research progress on the effects of entomopathogenic fungi on natural enemies. Chinese Journal of Biological Control, 39(1): 221–230 (in Chinese) [严森, 任小云, 王登杰, 张烨, 张治科, 郭继元, 王海鸿, 雷仲仁, 吴圣勇. 2023. 昆虫病原真菌在害虫防治中对天敌生物的影响研究进展. 中国生物防治学报, 39(1): 221–230]
- Yang F, Liu B, Zhu YL, Wyckhuys KAG, van der Werf W, Lu YH. 2021. Species diversity and food web structure jointly shape natural biological control in agricultural landscapes. Communications Biology, 4(1): 979
- Yang L, Xu L, Liu B, Zhang Q, Pan YF, Li Q, Li HQ, Lu YH. 2019a. Non-crop habitats promote the abundance of predatory ladybeetles in maize fields in the agricultural landscape of northern China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 277: 44–52
- Yang L, Zhang Q, Liu B, Zeng YD, Pan YF, Li ML, Lu YH. 2019b. Mixed effects of landscape complexity and insecticide use on ladybeetle abundance in wheat fields. Pest Management Science, 75(6): 1638–1645
- Yang YX, Zhang Y, Zhang JH, Wang AY, Liu B, Zhao M, Wyckhuys KAG, Lu YH. 2023. Plant volatiles mediate *Aphis gossypii* settling but not predator foraging in intercropped cotton. Pest Management Science, 79(11): 4481–4489
- Zhang Q, Wang Y, Dong M, Feng GY, Lin YZ, Liang QL, Wang SL, Qi H. 2023. Control of cotton seedling aphids using *Metarhizium anisopliae* combined with reduced-dosages chemical pesticides. Chinese Journal of Biological Control, 39(4): 797–803 (in Chinese) [张谦, 王燕, 董明, 冯国艺, 林永增, 梁青龙, 王树林, 祁虹. 2023. 金龟子绿僵菌与化学农药减量联用对棉花苗蚜的防控效果. 中国生物防治学报, 39(4): 797–803]