



刘宇琦, 蒋露, 龚智勇, 杨沅鑫, 李军, 李超. 钠离子对球孢白僵菌致死红火蚁的增效作用研究 [J]. 环境昆虫学报, 2026, 48 (2): 589–598. LIU Yu-Qi, JIANG Lu, GONG Zhi-Yong, YANG Hang-Xin, LI Jun, LI Chao. Synergistic effect of sodium ions on the virulence of *Beauveria bassiana* against *Solenopsis invicta* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2026, 48 (2): 589–598.

钠离子对球孢白僵菌致死红火蚁的增效作用研究

刘宇琦^{1,2}, 蒋露³, 龚智勇², 杨沅鑫⁴, 李军², 李超^{2*}

(1. 新疆农业大学农学院, 农业农村部西北荒漠绿洲农林外来入侵生物防控重点实验室 (部省共建), 乌鲁木齐 830052; 2. 广东省科学院动物研究所, 广东省动物保护与资源利用重点实验室, 广东省野生动物保护与利用公共实验室, 广州 510260; 3. 深圳市野生动植物保护管理处, 深圳市林业有害生物监测防控中心, 深圳 518040; 4. 广东烟草韶关市有限公司乐昌市分公司, 广东韶关 512200)

摘要:【目的】针对球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 在红火蚁 *Solenopsis invicta* 生物防治中存在杀虫速度慢、效果不稳定的问题, 探索金属离子盐对其毒力的增效潜力, 以发展绿色、低成本的防控策略。【方法】采用室内药剂喷洒法, 系统评估 6 种金属离子盐 (NaCl、KCl、CaCl₂、MgCl₂、(NH₄)₂SO₄、FeCl₃) 在 100 mmol/L 与 150 mmol/L 浓度下与球孢白僵菌 (1×10⁷ 孢子/mL) 复配对红火蚁工蚁的致死效应; 进一步测试同一金属离子盐在不同酸碱条件下对增效作用的影响。【结果】单独施用各金属离子盐对红火蚁无显著致死活性; 但与球孢白僵菌联用后, 氯化钠表现出显著增效作用, 150 mmol/L 处理组 96 h 致死率达 97%。经浓度梯度优化, 125 mmol/L 氯化钠与菌液复配可实现 100% 致死率, 且杀虫速度显著加快——48 h 累计死亡率达 88.3%。pH 调控试验表明, 在相同浓度下, 中性条件 (pH ≈ 7) 下的氯化钠增效作用最为显著, 96 h 死亡率可达 100%, 显著优于酸性或碱性条件。【结论】氯化钠可有效提升球孢白僵菌对红火蚁的毒力及作用速率, 且其增效效果受环境 pH 显著影响, 以中性条件最优; 该复配方案简单、易得、成本低, 为红火蚁绿色生物防治提供了可行的增效策略, 具有实验室筛选、制剂开发及实际应用的参考价值。

关键词: 红火蚁; 球孢白僵菌; 金属离子盐; 复配防治; 毒力增效; 生物防治

中图分类号: Q968.1; Q965.9

文献标识码: A

文章编号: 1674–0858 (2026) 02–0589–10

Synergistic effect of sodium ions on the virulence of *Beauveria bassiana* against *Solenopsis invicta*

LIU Yu-Qi^{1,2}, JIANG Lu³, GONG Zhi-Yong², YANG Hang-Xin⁴, LI Jun², LI Chao^{2*} (1. Key Laboratory of the Pest Monitoring and Safety Control of Crops and Forests (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Animal Conservation and Resource Utilization, Guangdong Public Laboratory of Wild Animal Conservation and Utilization, Institute of Zoology, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510260, China; 3. Shenzhen Wildlife Conservation and Management Office, Shenzhen Forestry Pest Monitoring and Control Center, Shenzhen 518040, Guangdong Province, China; 4. Guangdong Shaoguan Tobacco Limited Lechang Branch, Shaoguan 512200, Guangdong Province, China)

Abstract: 【Aim】 To address the limitations of *Beauveria bassiana* in the biological control of *Solenopsis invicta*—notably its slow insecticidal action and unstable efficacy—this study investigated the synergistic

基金项目: 广东省科技计划项目 (2024B1212050005); 深圳市野生动植物保护管理处合作项目 (深动植保合同【2024】7号)

作者简介: 刘宇琦, 女, 硕士研究生, 研究方向为农业昆虫与害虫防治, E-mail: 1183838642@qq.com

*共同通讯作者 Author for correspondence: 李超, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为外来入侵害虫种群监测预警与综合防治, E-mail: lichaoyw@163.com; 李军, 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为入侵生物学研究, E-mail: junl@giabr.gd.cn

收稿日期 Received: 2025–09–05; 修回日期 Revision received: 2026–01–17; 接受日期 Accepted: 2026–01–19

potential of metal ion salts in enhancing fungal virulence, with the goal of developing a green, low-cost control strategy. **【Methods】** Using a laboratory-based spray bioassay, we systematically evaluated the lethal effects of six metal ion salts—NaCl, KCl, CaCl₂, MgCl₂, (NH₄)₂SO₄, and FeCl₃—at concentrations of 100 and 150 mmol/L when applied in combination with *Beauveria bassiana* (1×10⁷ spores/mL) against *Solenopsis invicta* workers. Furthermore, the influence of pH (under acidic, neutral, and alkaline conditions) on the synergistic efficacy of the same metal ion salt was examined. **【Results】** None of the metal ion salts exhibited significant insecticidal activity when applied alone. However, when combined with *Beauveria bassiana*, NaCl demonstrated pronounced synergism, achieving a 97% mortality rate at 150 mmol/L within 96 h. Through concentration gradient optimization, a 125 mmol/L NaCl formulation in combination with the fungal suspension resulted in 100% mortality, with a markedly accelerated kill rate—88.3% cumulative mortality observed within 48 h. Bioassays conducted under different pH conditions revealed that, at this optimal concentration, NaCl exerted the strongest synergistic effect under neutral conditions (pH ≈ 7), achieving 100% mortality within 96 h—significantly higher than under acidic or alkaline conditions. **【Conclusion】** Sodium chloride effectively enhances both the virulence and killing speed of *Beauveria bassiana* against *Solenopsis invicta*, with its synergistic efficacy being highly dependent on environmental pH and peaking under neutral conditions. This simple, readily available, and cost-effective combination presents a viable synergistic strategy for the green biological control of *S. invicta* and offers significant potential for laboratory screening, biopesticide formulation, and field application.

Key words: *Solenopsis invicta*; *Beauveria bassiana*; metal ion salts; compound prevention and control; virulence enhancement; biocontrol

红火蚁 *Solenopsis invicta* 是一种原产于南美的极具破坏性的入侵昆虫 (Tschinkel, 2013), 被世界自然保护联盟列为全球 100 种最具威胁的入侵物种之一, 作为土栖性昆虫, 红火蚁进化出了高度发达的嗅觉系统, 能够精准识别挥发性化学物质, 有效追踪食物来源和潜在威胁 (Czaczes *et al.*, 2015; Cruter and Keller, 2016; Huang *et al.*, 2020), 研究表明, 该虫是目前已知蚁科物种中破坏力最强的种类 (Zhang *et al.*, 2007)。在入侵地区, 由于缺乏天敌制约, 红火蚁对生态系统、农林生产、公共安全及人类健康构成多重威胁 (Vinson, 2013)。目前, 中国在红火蚁防控方面主要依赖化学农药防治策略。尽管该方法能够在短期内有效抑制红火蚁种群的扩散, 但由于多数化学药剂在自然环境中难以降解, 其残留物可长期存留于生态系统之中, 从而对公共健康构成潜在威胁。因此, 开发高效且生态友好的新型防治药物迫在眉睫。

自 2003 年红火蚁首次在中国台湾地区被发现以来 (Lei *et al.*, 2019), 其在我国的扩散范围持续扩大。截至 2024 年, 该入侵物种已蔓延 13 个省 (自治区、直辖市) 的 673 个县级行政区域 (不含港澳台) (王洪铭等, 2025)。特别值得注意的是, 该物

种在长江以南地区, 尤其是华南一带呈现快速扩张趋势 (Wang *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2022), 对当地生物多样性和生态环境造成严重威胁。红火蚁作为社会性昆虫, 具有群居性强、个体互动频繁、种群数量庞大等特点, 因此, 选用病原微生物作为防治手段具有独特优势。

红火蚁的入侵扩散主要通过两种途径实现: 自然传播和人为携带。凭借强大的群体竞争力和惊人的繁殖能力, 该物种不断侵占新的栖息地。这种持续扩张态势不仅危及我国生态安全, 还造成重大经济损失。因此, 红火蚁防治工作将是一项需要长期坚持的重要任务。

球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 是一种很重要的昆虫病原真菌, 其作为一种主要的微生物杀虫剂在全球主要经济体中都有登记, 因其环境友好、不易产生抗性以及安全性好等优点而广受欢迎 (Zimmermann, 2007; Sullivan *et al.*, 2022), 其寄主广泛包括鳞翅目、半翅目、鞘翅目、膜翅目、等翅目、双翅目、蜚蠊目、直翅目、缨翅目、蜉蝣目等类群的上千种节肢动物, 在农林害虫防治中占有重要地位。但白僵菌杀虫剂的防治效果受高温、干燥、紫外线等多种环境因素的影响 (Bin *et al.*, 2017; Mei *et al.*, 2020), 杀虫速度较

慢，防效不稳定，这些技术瓶颈严重制约了该生物农药的大规模推广应用。

中国在利用虫生真菌防治农林害虫方面已具备商品化产品并取得了一定的应用成效（李洋，2022），但当前虫生真菌杀虫剂仍存在生产水平低、剂型更新慢等问题。现有产品主要针对果蔬和林木害虫设计，且剂型单一，以粉剂为主（耿存娟等，2021）。多项研究表明，球孢白僵菌对多种害虫表现出良好的致病效果。冯玉元（2006）发现该菌对烟田小地老虎 *Agrotis ypsilon* 致病力效果显著，具有强致病力，侵染率超过95%，校正死亡率达98.2%，施用后烟苗受害率显著降低。徐华苹等（2021）的研究显示，不同浓度球孢白僵菌处理可导致二斑叶螨 *Tetranychus cinnabarinus* 的校正死亡率最高达到83.8%。徐文静等（2020）在玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 幼虫孵化高峰期时采用了400亿孢子/g的球孢白僵菌可湿性粉剂进行防治，防治效果超过61%，且持效期较长。此外，该菌对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 也表现出良好防效：如温绍海等（2022）发现球孢白僵菌对草地贪夜蛾具有高效致病力，校正死亡率最高可达83.33%。庞继鑫等（2022）分离出的球孢白僵菌在处理草地贪夜蛾幼虫7 d后死亡率高达90%。在红火蚁防治方面，杨佳后等（2009）筛选出4株对红火蚁敏感的球孢白僵菌菌株，其中菌株5974在5 d内即可导致半数个体死亡；龙秀珍等（2022）筛选的8株球孢白僵菌与1株淡紫孢菌在10 d内使红火蚁死亡率最高达84.7%。然而，室外环境变异性大，现有施药技术难以将有效剂量稳定传递至靶标，因此球孢白僵菌在野外防治红火蚁的效果尚不理想。在此背景下，开发具有增效作用的球孢白僵菌制剂尤为必要。

当球孢白僵菌孢子侵入昆虫体腔后，将面临宿主体液免疫系统的攻击，其中主要包括由脂肪体和血细胞合成的抗菌肽（AMPs）等免疫效应因子（Manniello *et al.*, 2021），这是宿主清除病原体的关键环节（Bulet *et al.*, 1997）。已有研究表明，高浓度的一价或二价阳离子及聚阴离子可抑制抗菌肽活性（Hancock and Diamond, 2000），部分抗菌肽甚至在150 mmol/L的NaCl处理下完全失活（Goldman *et al.*, 1997）。基于此，本研究提出一种增效策略：通过外部施加钠离子，在红火蚁体表或消化道营造高盐环境，抑制宿主免疫系统中抗菌肽的应答能力，从而为真菌的萌发与增殖创造

有利的“机会窗口”，最终达到“增效”目的。因此，将金属离子盐与球孢白僵菌联合使用，有望弥补白僵菌短期防效不足的局限性，并减少化学农药的使用，从而提升防治效率、降低施药频次，为延缓害虫抗药性提供新路径。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 菌株

供试菌株为广东省科学院动物研究所生物入侵与生态安全组保藏的球孢白僵菌菌株ZGNKY-5。

1.1.2 药剂

药剂包括氯化钾（99.5%）、氯化铁（99.0%）、氯化钙（96.0%）、氯化镁（98%）、硫酸铵（99.5%）、氯化钠（99.5%）、碳酸氢钠（99.8%）、磷酸二氢钠（99.0%），均购自广州化学制剂厂有限公司。

1.1.3 供试昆虫

红火蚁在2024年1月采集于广东省广州市白云区寮采村（113°22'E，23°24'N），海拔15.3 m。将整个蚁巢装入涂有滑石粉的塑料桶中，带回室内稳定2~3 d后采用滴水法分巢，刚开始水流缓慢，直至蚁群浮在水面后可稍微加快水流，将蚁群转移至涂有滑石粉的蓝色饲养盒（33 cm × 24 cm × 12 cm）。供以火腿肠和10%蜂蜜水（V/V）饲养，提供水试管保湿，室温为25~26℃，稳定7 d后供试。

1.1.4 仪器设备

试验主要仪器有SPX-260型生化培养箱，购自宁波东南仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 金属离子盐对红火蚁的毒力效果测定

试验采用带通气孔的透明塑料盒（直径5.0 cm，高3.3 cm）作为容器，内壁顶部涂抹滑石粉-酒精悬浊液形成防逃带（Ning *et al.*, 2019）；球孢白僵菌悬浮液浓度通过血球计数板计数法配制，选择 1×10^7 个孢子/mL，试剂选用氯化钾、氯化铁、氯化钙、氯化镁、硫酸铵、氯化钠这6种金属离子盐，参考Goldman等的研究，部分抗菌肽在150 mmol/L NaCl条件下即丧失活性（Goldman *et al.*, 1997），因此本试验将每种试剂的浓度设置为高（150 mmol/L）与低（100 mmol/L）两个水平，每个浓度设置3个重复，将健康活跃的红火蚁工蚁放入塑料盒中，

每个重复放入20头工蚁，以不加入试剂和球孢白僵菌的处理作为空白对照组，以仅加入 1×10^7 个孢子/mL球孢白僵菌的处理作为纯菌处理组，空白对照组和纯菌处理组也都各设置3个重复；药剂处理采用定量手持喷雾器（容量8 mL，单次喷液量0.2 mL/次）进行均匀喷洒，确保红火蚁体表充分接触药液。喷洒后静置15 s。将处理的工蚁置于25℃、相对湿度85%的培养箱中饲养，在处理5 d后观察并记录死亡数，死亡标准为用镊子轻触完全不动；记录数据包括药剂种类、浓度、各时间点死亡数。

1.2.2 不同金属离子盐对球孢白僵菌增效筛选试验

为评估金属离子盐与球孢白僵菌的联合毒性，试验进一步采用球孢白僵菌菌株ZGNKY-5配制浓度为 1×10^7 个孢子/mL的悬浮液，分别与6种金属离子盐（氯化钙、氯化钾、氯化钠、氯化镁、硫酸铵、氯化铁）进行混配，每种盐设置100 mmol/L与150 mmol/L两个浓度梯度，以仅加入相同浓度球孢白僵菌悬浮液的处理作为纯菌对照组，并设置不含任何试剂与菌剂的空白对照。所有处理均设3次重复，试验方法同1.2.1，采用定量喷雾方式处理红火蚁工蚁，于处理后第5天记录死亡率，用于分析不同盐类对球孢白僵菌致死红火蚁的增效作用。

1.2.3 球孢白僵菌复配制剂最佳浓度筛选及增效作用评价

在标准实验室条件下，将金属离子盐与球孢白僵菌进行复配，球孢白僵菌浓度为 10^7 孢子/mL，分别配制出75、100、125、150、175 mmol/L 5个浓度梯度的金属离子盐溶液，系统评估其对球孢白僵菌杀红火蚁的增效作用。试验方法参照1.2.1节所述，每组设置3个重复。采用标准喷洒法确保红火蚁均匀接触处理试剂，处理后连续观察5 d，每日记录红火蚁的死亡情况，最终确定最佳复配浓度。

为进一步准确评价钠离子对球孢白僵菌的增效作用，采用标准的生物测定方法计算半致死浓

度(LC₅₀)。试验设置两个处理组：(1) 球孢白僵菌单独处理组（对照组）；(2) 球孢白僵菌与75、100、125、150、175 mmol/L氯化钠复配处理组。每个试验组均设置5个球孢白僵菌浓度梯度： 1×10^4 、 1×10^5 、 1×10^6 、 1×10^7 、 1×10^8 孢子/mL。试验方法参照1.2.1，采用定量喷洒法处理红火蚁工蚁，每个处理设3次重复，每重复20头工蚁。处理后置于25℃、相对湿度85%的培养箱中饲养，第5天记录死亡数。

1.2.4 复配制剂在不同时间点对红火蚁的致死效果

筛选出合适浓度的复配制剂后，采用喷洒法使红火蚁均匀接触试剂。试验设置3个重复组和对照组，处理方法同1.2.1。分别在处理后24、48、72、96、120 h观察记录红火蚁死亡情况。通过数据统计与分析，研究复配剂在不同时间点对红火蚁的致死效果，并分别考察累计死亡率和日死亡率随时间的变化趋势。

1.2.5 同一金属离子盐不同酸碱度对白僵菌的致死增效效果

试验选取酸性盐磷酸二氢钠、碱性盐碳酸氢钠和中性盐氯化钠3种不同酸碱性质的钠离子盐类，分别与浓度为 1×10^7 个孢子/mL球孢白僵菌悬浮液进行复配。根据1.2.3中的筛选结果，将各盐溶液均配制成相同摩尔浓度的处理液，以保证钠离子浓度在试验中保持一致。试验选用体型基本一致的工蚁，每组设置3个重复，每个重复20头。具体操作方法参照1.2.1，采用喷洒法确保红火蚁均匀接触试剂。分别在24、48、72、96和120 h观察记录红火蚁死亡情况，并进行数据统计与分析，以探究不同酸碱性对金属离子增效球孢白僵菌毒力的影响。

1.2.6 数据统计

所有试验数据均采用Microsoft Excel进行初步整理与汇总。死亡率数据在进行统计分析前，首先采用Abbott公式进行校正，以消除空白对照组自然死亡率对试验结果的影响，校正公式如下：

$$\text{死亡率}(\%) = \frac{\text{死亡虫数}}{\text{供试虫数}} \times 100$$

$$\text{校正死亡率}(\%) = \frac{\text{处理组死亡率} - \text{对照组死亡率}}{1 - \text{对照组死亡率}} \times 100$$

后续统计分析均基于校正后的死亡率进行，使用SPSS 27.0统计软件进行所有统计分析，显著

性水平设定为0.05。死亡率在进行方差分析前，将进行反正弦平方根转换，以满足方差分析对数

据正态性和方差齐性的要求。转换后的数据将采用 Shapiro-Wilk 检验进行正态性检验，并采用 Levene's 检验进行方差齐性检验。若转换后的数据仍不满足参数检验的前提条件，将采用非参数检验方法，如 Kruskal-Wallis H 检验，若结果显著，则进一步采用 Dunn's 事后多重比较进行两两组间分析。

试验方法中所涉及的单因素（如不同金属离子盐种类、不同浓度）处理，在数据符合参数假设的前提下，采用单因素方差分析（One-way ANOVA），若 ANOVA 结果显示存在显著性差异，将进一步使用 Tukey's HSD 检验进行事后多重比较，以确定哪些处理组之间存在统计学差异。

对于 1.2.3 节中获得的生物测定数据，为量化氯化钠对球孢白僵菌的增效作用，需利用 SPSS 27.0 软件，对球孢白僵菌浓度对数值与对应的红火蚁校正死亡率进行概率单位分析。通过该分析计算各处理组（球孢白僵菌单独处理组与 NaCl 复配处理组）的毒力回归方程、半致死浓度（median lethal Concentration, LC_{50} ）及其 95% 置信区间。增效系数的计算公式为：

$$SR = \frac{\text{对照组 } LC_{50}}{\text{增效组 } LC_{50}}$$

根据增效评价标准（Entwistle and Rees, 1988）， $SR > 1.5$ 即判定增效剂具有显著增效作用，SR 值越大，表明增效作用越强。通过比较复配组与对照组 LC_{50} 的 95% 置信区间是否重叠，可进一步判断增效作用的显著性；若置信区间不重叠，则认为在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著。对于 1.2.4 和 1.2.5 中随时间变化的累计死亡率数据，采用概率单位分析（Probit analysis），计算各处理的半数致死时间（median lethal time, LT_{50} ）及其 95% 置信区间，通过比较不同处理组间 LT_{50} 的 95% 置信区间是否重叠，来判断其致死速度是否存在显著差异，若置信区间不重叠，则认为在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著。最后使用 GraphPad Prism 10 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同金属离子盐对红火蚁的毒力效果

在 100 mmol/L 低浓度条件下，与空白对照相比，除 1×10^7 个/mL 球孢白僵菌悬浮液组（致死率

达 52%）外，其余金属离子盐溶液组对红火蚁均未表现出显著致死作用。当金属离子盐浓度提升至 150 mmol/L 时，所有试验组仍未能对红火蚁产生明显致死效果。综合结果表明：在试验浓度范围内，金属离子盐单独使用对红火蚁的致死效果不显著（ $P > 0.05$ ）（图 1）。

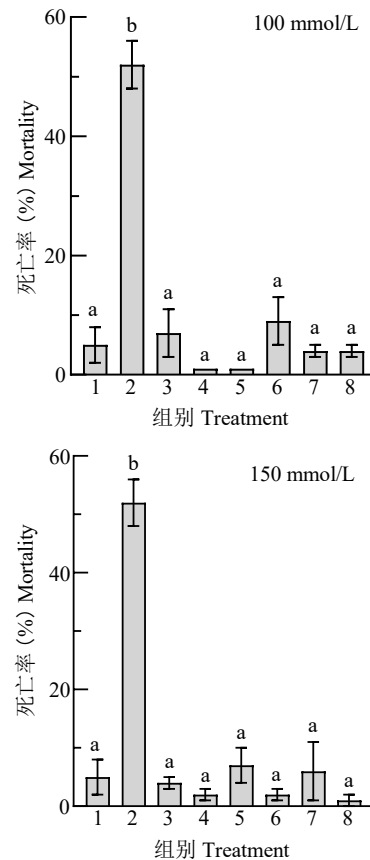


图 1 不同药剂分别在 100 mmol/L 和 150 mmol/L 浓度时对红火蚁的死亡率

Fig. 1 Mortality of *Solenopsis invicta* exposed to different compounds at concentrations of 100 mmol/L and 150 mmol/L
注：1，空白对照组；2，纯菌组；3，氯化钠；4，氯化钾；5，氯化镁；6，氯化钙；7，硫酸铵；8，氯化铁。图中不同小写字母表示经单因素方差检验差异显著（ $P < 0.05$ ），下同。Note: 1, CK; 2, *Beauveria bassiana* only; 3, NaCl; 4, KCl; 5, MgCl₂; 6, CaCl₂; 7, (NH₄)₂SO₄; 8, FeCl₃. Different lowercase letters above the bars indicated significant differences among treatments according to one-way ANOVA followed by Tukey's HSD test ($P < 0.05$). The same below.

2.2 不同金属离子盐对球孢白僵菌的增效作用筛选试验

在 100 mmol/L 低浓度条件下，不同金属离子盐与球孢白僵菌悬浮液复配后对红火蚁的致死效

果存在显著差异 ($P<0.05$)。其中, 氯化钠复配组表现出最优的致死效果, 死亡率达97%; 氯化钙复配组次之, 也具有明显的增效作用。相比之下, 氯化钾、氯化镁、硫酸铵和氯化铁等复配剂虽对红火蚁有一定致死效果, 但与纯菌悬浮液相比未呈现统计学差异。结果表明, 在测试的金属离子盐中, 仅氯化钠和氯化钙两种盐类能显著增强球孢白僵菌对红火蚁的致死效果。如图2B所示, 150 mmol/L 高浓度金属离子盐与球孢白僵菌悬浮液复配后, 显著提升了球孢白僵菌对红火蚁的致死效果。具体而言, 氯化钠复配剂表现最优, 致死率高达97%; 硫酸铵复配剂次之, 致死率为82%。此外, 氯化钾和氯化镁复配剂也展现出良好的杀虫效果, 致死率均超过70% (图2)。值得注意的是, 虽然氯化钙和氯化镁复配剂的致死效果相对较弱, 但与纯菌悬浮液处理组相比, 仍显著提高了红火蚁的死亡率。

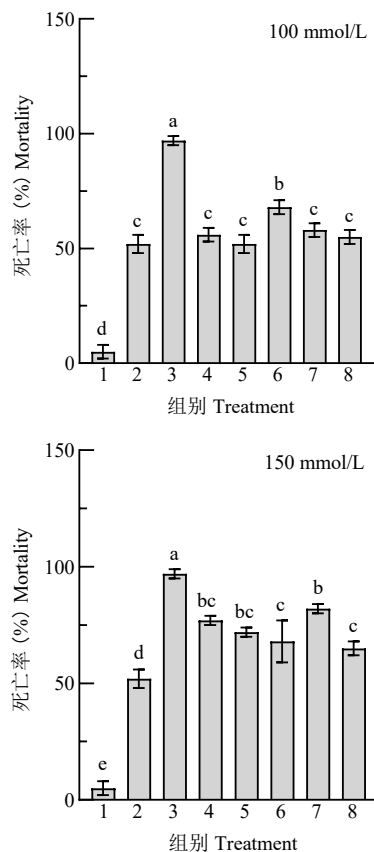


图2 不同药剂分别在100 mmol/L和150mmol/mL浓度时与球孢白僵菌复配对红火蚁的死亡率

Fig. 2 Mortality of *Solenopsis invicta* after treatment with combinations of different metal ion salts and *Beauveria bassiana* at concentrations of 100 mmol/L and 150 mmol/L

试验采用100 mmol/L (低浓度) 和150 mmol/L (高浓度) 两种金属离子盐溶液, 分别与 1×10^7 个/mL的球孢白僵菌悬浮液进行复配。结果表明, 无论是低浓度还是高浓度条件下, 氯化钠复配剂均表现出最优的致死效果。基于这一发现, 后续研究将重点探究氯化钠与球孢白僵菌的最佳复配浓度, 以期获得对红火蚁的最佳致死效果。

2.3 球孢白僵菌复配剂最佳浓度筛选

氯化钠浓度与球孢白僵菌复配剂对红火蚁的致死效果呈现先升高后降低的趋势。当氯化钠浓度低于125 mmol/L时, 随着浓度增加, 复配剂的杀虫效果逐渐增强; 超过125 mmol/L后, 杀虫效果则开始下降。在100~150 mmol/L浓度范围内, 复配剂表现出最佳的杀虫效果, 其中125 mmol/L浓度组的红火蚁死亡率达到100%, 显著优于其他浓度组 ($P<0.05$)。值得注意的是, 所有氯化钠处理组的杀虫效果均显著高于纯菌处理组, 表明氯化钠能有效增强球孢白僵菌的杀虫活性 (图3)。钠离子盐在不同浓度时对红火蚁的毒力测定结果发现氯化钠与球孢白僵菌复配显著增强对红火蚁的毒力, 增效系数SR在125 mmol/L时达到最大值89.32, 表明此时的增效作用最强, 125 mmol/L为氯化钠与球孢白僵菌复配的最佳浓度, 其 LC_{50} 为 1.11×10^5 , 比纯菌组 (9.88×10^6) 降低约89倍, 毒力显著增强 (表1)。

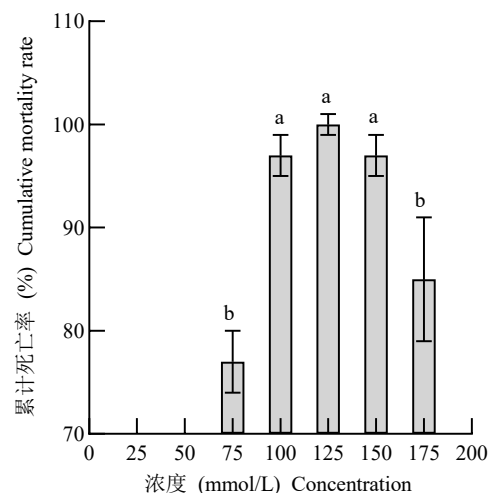


图3 氯化钠在不同浓度时对红火蚁的死亡率影响
Fig. 3 Effects of sodium chloride at different concentrations on the mortality of *Solenopsis invicta*

表1 氯化钠在不同浓度时对红火蚁的毒力测定结果

Table 1 Virulence of *Beauveria bassiana* against *Solenopsis invicta* in combination with sodium chloride at different concentrations

处理组 (nmol/L) Treatment group	毒力回归方程 Toxicity regression equation	LC ₅₀ (spores/mL)	95% 置信区间 95% confidence interval	增效系数 SR Synergistic ratio, SR
纯菌 <i>Beauveria bassiana</i> only	$y=0.264\ln x-4.258$	9.88×10^6	$5.18\times 10^6 \sim 2.16\times 10^7$	-
75	$y=0.220\ln x-3.370$	4.47×10^6	$2.18\times 10^7 \sim 1.03\times 10^8$	2.21
100	$y=0.265\ln x-3.443$	4.42×10^5	$6.80\times 10^4 \sim 2.09\times 10^6$	22.38
125	$y=0.336\ln x-3.901$	1.11×10^5	$6.00\times 10^4 \sim 1.89\times 10^5$	89.32
150	$y=0.253\ln x-3.252$	3.83×10^5	$5.00\times 10^4 \sim 1.89\times 10^6$	25.84
175	$y=0.220\ln x-3.220$	2.20×10^6	$1.09\times 10^6 \sim 4.73\times 10^6$	4.49

2.4 复配制剂在不同时间点对红火蚁的致死效果

在用 125 mmol/L 氯化钠复配球孢白僵菌处理红火蚁后, 球孢白僵菌加速毒杀过程, 在 48 h 时日死亡率达到最高 (46.7%), 随后日死亡率呈现下降趋势 (图 4); 48 h 内累计死亡率呈现快速上升趋势 (24 h 增加至 41.7%, 48 h 时增加至 88.3%), 之后增速明显放缓, 最终累计死亡率趋近 100% (图 5)。两组数据共同表明, 氯化钠与球孢白僵菌的复配处理在 48 h 左右达到最佳杀虫效果。

2.5 同一金属离子盐不同酸碱度对白僵菌的致死增效效果

在 125 mmol/L 浓度条件下, 3 种不同酸碱性质的钠盐与球孢白僵菌复配处理组均较纯菌处理组表现出显著增效作用。其中, 中性盐氯化钠复配组 (pH≈7) 的红火蚁致死效果最佳, 在 96 h 时死亡率就已达到最高值 100%; 弱酸性磷酸二氢钠 (pH<7) 复配组次之, 120 h 时死亡率为 88%; 弱碱性碳酸氢钠 (pH>7) 复配组效果相对较弱, 120 h 时死亡率为 77%。值得注意的是, 3 种钠盐复配组的致死效果均显著优于纯菌处理组 (图 6)。这一结果证实, 钠盐的酸碱性质差异确实会影响球孢白僵菌的毒力增效效果, 中性环境最有利于菌株毒力的发挥。

3 结论与讨论

本研究通过系统评价多种金属离子盐与球孢白僵菌的复配效应, 揭示了不同盐类及其浓度、作用时间及化学性质对红火蚁毒性的影响, 为开发高效、环境兼容的红火蚁生物防治剂提供了依据。

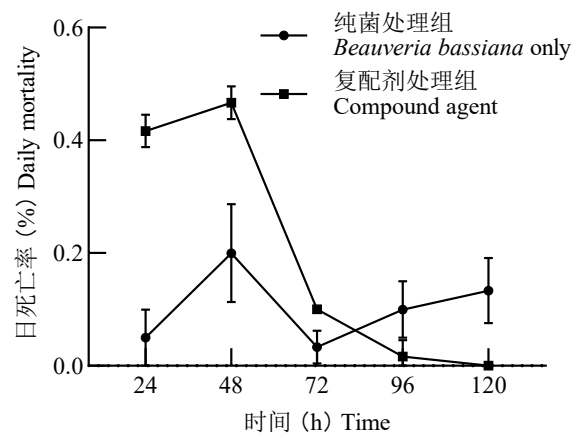


图 4 125 mmol/L 氯化钠-球孢白僵菌复配制剂对红火蚁的日死亡率

Fig. 4 Daily mortality rate of *S. invicta* treated with the combination of 125 mmol/L sodium chloride and *B. bassiana*

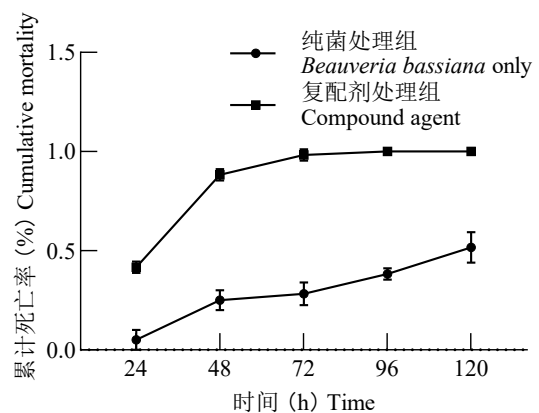


图 5 125 mmol/L 氯化钠-球孢白僵菌复配制剂对红火蚁的累计死亡率

Fig. 5 Cumulative mortality of *S. invicta* treated with the combination of 125 mmol/L sodium chloride and *B. bassiana*

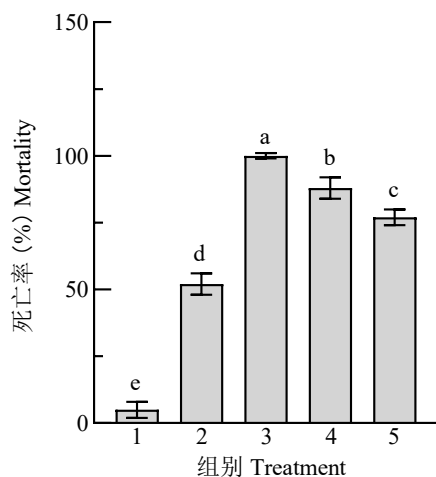


图6 不同酸碱性钠离子盐对红火蚁死亡率的影响

Fig. 6 Mortality of *S. invicta* after treatment with combinations of *B. bassiana* and sodium salts with different pH values

注：1，空白对照组；2，纯菌组；3，氯化钠复配剂；4，磷酸二氢钠复配剂；5，碳酸氢钠复配剂。Note: 1, CK; 2, *Beauveria bassiana* only; 3, NaCl compound agent; 4, NaH₂PO₄ compound agent; 5, NaHCO₃ compound agent.

试验首先表明，在100~150 mmol/L浓度范围内，所有测试金属离子盐（包括NaCl、KCl、MgCl₂等）单独作用时，对红火蚁的致死率与对照组均无显著差异（ $P>0.05$ ），这证实了金属离子盐无独立杀虫活性，排除了金属离子盐对红火蚁的毒杀干扰作用。然而，当金属离子盐与球孢白僵菌复配后，杀虫效果却发生显著变化，其中，氯化钠展现出最强增效作用：在100 mmol/L和150 mmol/L浓度下，其复配剂致死率均达97%，显著优于纯菌组（52%）及其他金属盐复配组（如氯化钙在100 mmol/L时为68%）。结果初步表明，特定无机盐可通过非毒性机制显著提升真菌杀虫剂的效能。

本研究观察到的真菌-无机盐协同效应，与已有真菌-化学药剂复配研究中的协同效应一致。例如，谢梅琼等（2023）的研究发现LC₁₀的四氯虫酰胺与真菌混用防控小菜蛾 *Plutella xylostella* 具有协同增效作用；吴慧敏等（2024）发现添加浓度在0.5 μL/mL及以上聚硅氧烷时，可显著提高低浓度金龟子绿僵菌CQMa421和球孢白僵菌ZJU435对红火蚁的致死效果；Furlong和Groden（2001）亦指出，吡虫啉的LC₂₀和LC₁₀与球孢白僵菌孢子联用对马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* 幼虫具有协同效应。

然而，与上述依赖合成化学药剂的策略不同，

本研究采用的是金属离子盐NaCl，其成本低廉、环境相容性高，且无农药残留风险。因此，本策略更适合作为现有红火蚁生物防治体系的安全补充手段，尤其适用于对化学农药敏感的生态区域（如水源、有机农场等）。此外，本研究进一步筛选出125 mmol/L为氯化钠的最优增效浓度——此时复配剂致死率最高，但浓度超过或低于125 mmol/L时死亡率显著下降（如175 mmol/L下降至85%），表明存在明确的浓度阈值效应。这一现象与Kamisaka等（1967）所报道的赤霉素在特定浓度范围内促进酵母细胞分裂与芽孢形成，超出该范围则抑制的结果一致。

时效性分析显示，125 mmol/L氯化钠-球孢白僵菌复配剂在48 h内可实现接近100%的累计死亡率快速致死，大幅缩短了防治周期，显示出良好的速效性与实际应用潜力，但需强调的是，该复配体系并非旨在完全替代现有化学或生物防治手段，而是作为现有球孢白僵菌制剂的增效模块，在综合防治（IPM）框架下发挥协同作用。从实验室到田间应用仍面临多重挑战：如喷洒法在试验中实现的高致死率，有可能因紫外线降解、降雨冲刷及土壤吸附等环境因子而显著降低；制剂的物理稳定性、持效期、最佳施用方式（如喷雾或毒饵）以及对非靶标生物（如蜜蜂、蚯蚓）的潜在风险，均需系统评估。

值得注意的是，钠盐的酸碱性也显著影响增效效果：中性盐氯化钠的增效作用最强，弱酸性盐磷酸二氢钠次之，弱碱性盐碳酸氢钠最弱（致死率77%），这一差异可能与球孢白僵菌的最适生长pH环境有关。James指出适量氮源及其他有机物可促进菌丝生长并提高孢子萌发能力（James, 2009），Karandikar等、Gao和Li等也分别强调了碳氮源、无机盐及微量元素在促进真菌生长方面的作用（Li *et al.*, 1995; Karandikar *et al.*, 1996; Gao, 2015; Gao *et al.*, 2007），这些研究共同支持了本试验中金属离子对球孢白僵菌的增效现象，进一步印证合理设计化学或无机添加剂与微生物杀虫剂的复配方案，是提升生物防治效率的一条可行路径。

基于上述增效机制，本研究开发的125 mmol/L氯化钠-球孢白僵菌复配剂在48 h内展现完全致死效果，具有田间应用前景。但实验室条件下，通过喷洒法实现的速效高致死率在田间应用中可能

面临诸多挑战。高盐复配制剂在田间可能因紫外线照射、降雨冲刷及土壤吸附等环境因子而显著降低效果。此外, 制剂的稳定性、持效期、具体施用方式(如喷雾或毒饵)以及对非靶标生物的环境风险, 均需进一步评估。未来研究应着重开展田间小区试验, 评估该复配方案在实际环境中的效果; 探索毒饵体系, 提高制剂的靶向性和环境适应性; 进行非靶标安全性评估, 确保生态安全等。通过解决这些实际应用中的瓶颈, 才能实现该复配方案的田间推广, 为红火蚁的绿色防控提供新途径。

参考文献 (References)

- Bulet P, Hetru C, Dimarcq JL, *et al.* Antimicrobial peptides in insects: structure and function [J]. *Developmental & Comparative Immunology*, 1999, 23(4-5): 329-344.
- Czaczkies TJ, Grüter C, Ratnieks FLW. Trail pheromones: An integrative view of their role in social insect colony organization [J]. *Annual Review of Entomology*, 2015, 60 (1): 581-599.
- Entwistle G, Rees TA. Enzymic capacities of amyloplasts from wheat (*Triticum aestivum*) endosperm [J]. *Biochemical Journal*, 1988, 255 (2): 391-396.
- Furlong MJ, Groden E. Evaluation of synergistic interactions between the Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) pathogen *Beauveria bassiana* and the insecticides, imidacloprid, and cyromazine [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2001, 94 (2): 344-356.
- Gao L, Sun MH, Liu XZ, *et al.* Effects of carbon concentration and carbon to nitrogen ratio on the growth and sporulation of several biocontrol fungi [J]. *Mycological Research*, 2007, 111 (1): 87-92.
- Gao L. Application of two-stage cultivation for exploring the nutritional requirements for sporulation of three biocontrol fungi [J]. *Biotechnology Research International*, 2015, 1: 682839.
- Geng CJ, Xia YG, Sun K, *et al.* Study on preventive controlling *Dendrolimus punctatus* by unmanned aerial vehicle spraying *Beauveria bassiana* [J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2021, 48 (3): 69-72. [耿存娟, 夏永刚, 孙凯, 等. 无人机喷撒白僵菌防治越冬代马尾松毛虫效果研究 [J]. 湖南林业科技, 2021, 48 (3): 69-72]
- Goldman MJ, Anderson GM, Stolzenberg ED, *et al.* Human β -defensin-1 is a salt-sensitive antibiotic in lung that is inactivated in cystic fibrosis [J]. *Cell*, 1997, 88 (4): 553-560.
- Grueter C, Keller L. Inter-caste communication in social insects [J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2016, 38: 6-11.
- Hancock REW, Diamond G. The role of cationic antimicrobial peptides in innate host defences [J]. *Trends in Microbiology*, 2000, 8 (9): 402-410.
- Huang H, Ren L, Li H, *et al.* The nesting preference of an invasive ant is associated with the cues produced by actinobacteria in soil [J]. *PLoS Pathogens*, 2020, 16 (9): e1008800.
- James RR. Effects of exogenous nutrients on conidial germination and virulence against the silverleaf whitefly for two hyphomycetes [J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2001, 77 (2): 99-107.
- Kamisaka S, Yanagishima N, Masuda Y. Effect of auxin and gibberellin on sporulation in yeast [J]. *Physiologia Plantarum*, 1967, 20 (1): 90-97.
- Karandikar A, Sharples GP, Hobbs G. Influence of medium composition on sporulation by *Streptomyces coelicolor* A3(2) grown on defined solid media [J]. *Biotechnology Techniques*, 1996, 10 (2): 79-82.
- Lei W, Ling Z, Lu YY. Impact of the red imported fire ant *Solenopsis invicta* Buren on biodiversity in South China: a review [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18 (4): 788-796.
- Li DP, Holdom DG. Effects of nutrients on colony formation, growth, and sporulation of *Metarhizium anisopliae* (Deuteromycotina: Hyphomycetes) [J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 1995, 65 (3): 253-260.
- Li Y. New biopesticides registered in China in 2021 [J]. *World Pesticide*, 2022, 44 (2): 1-8. [李洋. 2021年国内新登记的生物农药品种 [J]. 世界农药, 2022, 44 (2): 1-8]
- Long XZ, Wu YX, He Z, *et al.* Screening activity strain of entomopathogenic fungi to *Solenopsis invicta* in laboratory [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2022, 44 (6): 1493-1501. [龙秀珍, 吴雨欣, 何瞻, 等. 红火蚁活性真菌菌株的室内筛选研究 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (6): 1493-1501]
- Manniello MD, Moretta A, Salvia R, *et al.* Insect antimicrobial peptides: potential weapons to counteract the antibiotic resistance [J]. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2021, 78 (9): 4259-4282.
- Mei LJ, Chen MJ, Shang YF, *et al.* Population genomics and evolution of a fungal pathogen after releasing exotic strains to control insect pests for 20 years [J]. *The ISME Journal*, 2020, 14 (6): 1422-1434.
- Ning DD, Fan Y, Qian X, *et al.* A simple and efficient method for preventing ant escape (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Myrmecological News*, 2019, 29: 145832029.
- Pang JX, Wen SH, Du GZ, *et al.* Isolation and identification of an entomopathogenic fungus infecting the adult of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) [J]. *Plant Protection*, 2022, 48 (1): 185-190, 203. [庞继鑫, 温绍海, 杜广祖, 等. 一株侵染草地贪夜蛾成虫的球孢白僵菌的分离鉴定 [J]. 植物保护, 2022, 48 (1): 185-190, 203]
- Sullivan CF, Parker BL, Skinner M. A review of commercial *Metarhizium*- and *Beauveria*-based biopesticides for the biological control of ticks in the USA [J]. *Insects*, 2022, 13 (3): 260.
- Tschinkel WR. *The Fire Ants* [M]. Cambridge: Belknap Press, 2013.
- Vinson SB. Impact of the invasion of the imported fire ant [J]. *Insect Science*, 2013, 20(4): 439-455.
- Wang B. Control of masson pine caterpillar, *Dendrolimus punctatus* Walker (Lepidoptera: Lasiocampidae) using oil formulation of *Beauveria bassiana* with combination of chemical pesticide deltamethrin [J]. *Journal of the Kansas Entomological Society*,

- 2017, 90 (3): 227–234.
- Wang HM, Yi HM, Mao YQ, *et al.* Prevention and control strategies for *Solenopsis invicta* in the southeast coastal region of China [J]. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments*, 2025, 31 (3): 342–346. [王洪铭, 易海鸣, 毛颖清, 等. 我国东南沿海地区红火蚁防控对策 [J]. 中华卫生杀虫药械, 2025, 31 (3): 342–346]
- Wang L, Zeng L, Xu Y, *et al.* Prevalence and management of *Solenopsis invicta* in China [J]. *NeoBiota*, 2020, 54: 89–124.
- Wen SH, Pang JX, Du GZ, *et al.* Isolation and identification of two *Beauveria bassiana* strains from the infected earwig and their virulence to *Spodoptera frugiperda* larvae [J]. *Plant Protection*, 2022, 48 (4): 318–323, 362. [温绍海, 庞继鑫, 杜广祖, 等. 2株感染螻蛄的球孢白僵菌的分离鉴定及对草地贪夜蛾的毒力 [J]. 植物保护, 2022, 48(4): 318–323, 362]
- Wu HM, Bai WH, Deng JF, *et al.* Study on the toxicity of *Metarhizium anisopliae* CQMa421 and *Beauveria bassiana* ZJU435 to red imported fire ants *Solenopsis invicta* and synergistic effects of polysiloxane on the two strains [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2024, 46 (2): 377–388. [吴慧敏, 白卫辉, 邓杰夫, 等. 金龟子绿僵菌CQMa421和球孢白僵菌ZJU435对红火蚁毒力及聚硅氧烷的增效作用研究 [J]. 环境昆虫学报, 2024, 46 (2): 377–388]
- Xie MQ, Wang LJ, Han YQ, *et al.* Evaluation of the compatibility of *Isaria fumosorosea* and chemical pesticides for control of *Plutella xylostella* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2023, 45 (6): 1694–1703. [谢梅琼, 王龙江, 韩永强, 等. 玫烟色棒束孢相容性农药筛选及混用对小菜蛾的防效 [J]. 环境昆虫学报, 2023, 45 (6): 1694–1703]
- Xu HP, He XY, Jiang HL, *et al.* Pathogenicity of *Beauveria bassiana* to *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) and its indirect effects on *Phytoseiulus persimilis* (Acari: Phytoseiidae) [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2021, 37 (3): 436–442. [徐华苹, 贺小勇, 蒋洪丽, 等. 球孢白僵菌对二斑叶螨的致病性和对天敌智利小植绥螨的间接影响 [J]. 中国生物防治学报, 2021, 37 (3): 436–442]
- Xu WJ, Sui L, Gao P, *et al.* Study and application of wettable powder of *Beauveria bassiana* to control corn borer [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2020, 36 (6): 862–865. [徐文静, 隋丽, 高鹏, 等. 球孢白僵菌可湿性粉剂防治玉米螟的研究与应用 [J]. 中国生物防治学报, 2020, 36 (6): 862–865]
- Xu Y, Vargo EL, Tsuji K, *et al.* Exotic ants of the Asia-Pacific: invasion, national response, and ongoing needs [J]. *Annual Review of Entomology*, 2022, 67 (1): 27–42.
- Yang JH, Sun F, Liao KH, *et al.* Bioassay of 4 strains of *Beauveria bassiana* against *Solenopsis invicta* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2009, 31 (1): 46–51. [杨佳后, 孙钊, 廖坤宏, 等. 4株球孢白僵菌对红火蚁毒力的生物测定 [J]. 环境昆虫学报, 2009, 31(1): 46–51]
- Zhang R, Li Y, Liu N, *et al.* An overview of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) in mainland China [J]. *Florida Entomologist*, 2007, 90 (4): 723–731.
- Zimmermann G. Review on safety of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Beauveria brongniartii* [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2007, 17 (6): 553–596.