

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.008

引用格式:王誉喆,崔竣岭,王嘉瑞,等.两种生防菌对苜蓿主要害虫的防效及土壤根际微生态的影响[J].草地学报,2026,34(7):2429–2439

WANG Yu-zhe, CUI Jun-ling, WANG Jia-rui, et al. Effects of Two Biocontrol Fungi on Major Alfalfa Pests and Rhizosphere Microecology[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2429–2439

两种生防菌对苜蓿主要害虫的防效及土壤根际微生态的影响

王誉喆^{1,2}, 崔竣岭³, 王嘉瑞^{1,2}, 李知秋^{1,2}, 王颖¹, 孙伟¹, 张蓉¹,
班丽萍^{2*}, 魏淑花^{1*}

(1. 宁夏农林科学院植物保护研究所, 宁夏银川 750002; 2. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193;
3. 银川市公园管理中心, 宁夏银川 750000)

摘要:本研究在宁夏农林科学院植物保护研究所芦花台试验基地苜蓿田,间施3年球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 及金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae*,发现两种生防菌对牛角花齿蓟马具有较高防效,防治效果平均分别为34.8%和30.3%。与对照组相比,间施3年球孢白僵菌后,土壤理化性质得到显著改善,速效磷、有机碳分别增加了67.2%,41.7%,改善效果超过金龟子绿僵菌;土壤酶活性提高,蔗糖酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶分别增加了36.91%,64.20%,31.03%。金龟子绿僵菌使蔗糖酶活性较对照增加了30.32%、过氧化氢酶活性增加了24.42%。与土壤细菌相比,两种生防菌处理组对土壤真菌结构改变较大,部分有益菌如鞘氨醇单胞菌丰度增加,部分病原菌如镰刀菌占比下降。本研究为害虫生物防治及宁夏地区草地农业可持续发展提供了理论依据和实践参考。

关键词:苜蓿害虫;生物防治;土壤理化性质;根际微生态

中图分类号:S812.6;S154.3;S151.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2429-11

Effects of Two Biocontrol Fungi on Major Alfalfa Pests and Rhizosphere Microecology

WANG Yu-zhe^{1,2}, CUI Jun-ling³, WANG Jia-rui^{1,2}, LI Zhi-qiu^{1,2}, WANG Ying¹, SUN Wei¹,
ZHANG Rong¹, BAN Li-ping^{2*}, WEI Shu-hua^{1*}

(1. Institute of Plant Protection, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan, Ningxia 750002, China; 2. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Yinchuan Park Management Center, Yinchuan, Ningxia 750000, China)

Abstract: This study was conducted in an alfalfa field at the Luhutai experimental site of the Institute of Plant Protection, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, where *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* were applied in alternate rows for three consecutive years. The results showed that both entomopathogenic fungi provided effective control of *Odontothrips loti*, with average control efficacies of 34.8% and 30.3%, respectively. Compared with the control, three years of *B. bassiana* application significantly improved soil physicochemical properties, with available phosphorus and soil organic carbon increasing by 67.2% and 41.7%, respectively, showing greater improvement than *M. anisopliae*. Soil enzyme activities were also enhanced, with increases of 36.91% in sucrase, 64.20% in alkaline phosphatase, and 31.03% in catalase. Application of *M. anisopliae* increased sucrase activity by 30.32% and catalase activity by 24.42%.

收稿日期:2026-02-23;修回日期:2026-03-25

基金项目:宁夏自然科学基金项目(2024AAC02065);宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范课题(NGSB-2021-15-04);国家牧草产业技术体系-盐池综合试验站(CARS-34);国家自然科学基金项目(32573603)资助

作者简介:王誉喆(2000-),女,汉族,河南信阳人,博士研究生,主要从事草地植物保护方向研究,E-mail:13782910269@163.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:lipingban@cau.edu.cn; weishuhua666@163.com

relative to the control. Compared with the soil bacterial community, soil fungal community structure was more strongly altered by the two biocontrol fungal treatments. Meanwhile, the relative abundance of beneficial taxa such as *Sphingomonas* increased, whereas the proportion of pathogenic fungi such as *Fusarium* declined. Overall, this study provides a theoretical basis and practical reference for pest biological control and the sustainable development of grassland agriculture in the Ningxia region.

Key words: Alfalfa pests; Biological translation; Soil physical and chemical properties; Rhizosphere microecology

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)素有“牧草之王”的称号,属于豆科植物,广泛应用于农业生产中作为优质饲草^[1]。良好的适口性、高产量以及极高的营养价值,使苜蓿成为草地养殖业中重要的饲草资源^[2,3]。宁夏处于我国优质苜蓿主产带,受乳业与草畜一体化需求拉动,近十余年苜蓿产业持续发展;全国尺度研究与行业报告均将宁夏与甘肃、内蒙古、新疆等并列为重点供给区,进口苜蓿对国内奶业仍具有重要补充作用,这凸显了提高宁夏地区苜蓿单产与稳产、降低病虫害损失的现实意义^[4]。自农业农村部农牧交错带农业结构调整意见提出“建设现代饲草料产业体系,扩大苜蓿、燕麦草等优质牧草的种植”以来,苜蓿产业发展十分迅速^[4,5]。

害虫是制约苜蓿生产的重要因素^[6],常见的苜蓿害虫如牛角花齿蓟马 *Odontothrips loti*、普通大蓟马 *Megalurothrips usitatus*,属于缨翅目(Thysanoptera)、蓟马科(Thripidae)。牛角花齿蓟马取食苜蓿的幼嫩组织,导致苜蓿枝叶干枯、变形、生长受阻^[7,8],普通大蓟马更偏爱取食苜蓿花蕾,严重时甚至导致果荚无法生成^[9,10];苜蓿斑蚜 *Therioaphis trifolii* 隶属于半翅目 Hemiptera 斑蚜科 Drepanosiphidae,豌豆蚜 *Acyrtosiphon pisum* 隶属半翅目 Hemiptera 蚜科 Aphididae,两种蚜虫均为刺吸式口器,以植物韧皮部汁液为食,可通过掠夺营养及传播病毒影响苜蓿生长^[11,12]。牛角花齿蓟马是宁夏地区紫花苜蓿产区虫害优势种,其取食行为对苜蓿造成直接损害,而且其还传播多种植物病毒,导致苜蓿产量下降及品质受损。

化学防治迄今仍是控制蓟马田间种群规模的核心手段^[13],但受限于蓟马体型微小,且常潜藏于花器内部活动、取食为害,喷施药剂难以精准触达防治对象,导致实际防控工作面临较大挑战^[14,15],并且传统化学防治手段易导致环境生态风险及人体健康隐患^[16],因此安全绿色的生防菌剂受到越来越广泛的关注。昆虫病原真菌(Entomopathogenic Fungi,简称EPF)是一类能够感染和致死昆虫的真菌,具有天然的生物防治作用,被广泛应用于农业害虫防治中^[17]。目前已有以金龟子绿僵菌 *Metarhi-*

zium anisopliae^[18,19]、球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 等EPF^[20-22]为生物防治菌剂防治豇豆蓟马、水稻纵卷叶螟、玉米螟等害虫的成功案例,但针对苜蓿害虫的相关应用研究较少。土壤微生物生态如土壤酶活性及土壤微生物结构等是农业生产中重要的参考因素,目前也少有关于EPF对于土壤微生物生态影响的相关报道,正确评估EPF对草地微生物生态的改变有助于排除潜在生态风险^[23-24]。本研究旨在探索并评估金龟子绿僵菌和球孢白僵菌在苜蓿害虫防治中的应用潜力,以及这两种EPF对土壤健康及微生物群落结构的影响。通过系统分析,明确其在控制害虫的同时,是否对土壤生态及微生物群落产生潜在的副作用或积极影响,将害虫防治这一单一领域的研究扩展到土壤健康等领域,为农业生产提供更为多样化的生物防治策略。

1 材料与方法

1.1 材料

田间施用供试菌剂为金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 菌株 IMI330189 的 $1.0 \times 10^{10} \cdot \text{g}^{-1}$ 孢子可湿性粉剂和球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 菌株 B094 的 2.0×10^{10} 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ 孢子可湿性粉剂,由中国农业科学院植物保护研究所提供。

仪器:3WBD-16A 农药喷雾器,北京中保绿农业科技集团有限公司。

1.2 试验方法

本研究试验区位于宁夏银川市西夏区芦花台宁夏农林科学院植物保护研究所农业部病虫害银川试验站苜蓿地($38^{\circ}39'01''\text{N}$, $106^{\circ}08'56''\text{E}$),面积为 0.3333 ha,种植的苜蓿品种为‘WL363HQ’。于每年土壤解冻、苜蓿返青前进行田间操作。球孢白僵菌(*Beauveria bassiana*)和金龟子绿僵菌(*Metarhizium anisopliae*)采用间歇施用方式,即分别于2021年、2023年和2025年进行施用,而在2022年和2024年不进行施用。施用时将菌剂与土壤拌匀后,采用沟施方式均匀施入苜蓿根际周围,施用深度

为2~3 cm。两种生防菌剂的施用量均 $3.75\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 。每个处理设4次重复,每个重复小区面积为 $5.5\text{ m}\times 5\text{ m}$,试验期间不采取其他防治措施;苜蓿每年刈割4次。

1.2.1 调查方式 2025年7月30日,按五点取样法将每处试验区划分为5个边长为1 m的小区,采用百枝条法调查苜蓿害虫的数量,每个小区随机取5个点,每点取20条苜蓿枝条,将蓟马、蚜虫等小型害虫拍打在长30 cm、宽40 cm的白瓷盘中,统计苜蓿害虫的数量,并计算施用的两种生防菌对牛角花齿蓟马、普通大蓟马、苜蓿斑蚜、豌豆蚜的防治效果。

$$CE(\%) = \left[\frac{(CK - PT)}{CK} \right] \times 100$$

CK为不同时间内未防治区虫口数;PT为不同时间内防治区虫口数。

1.2.2 土壤样品采集与鉴定 采集1.2.1处理后的苜蓿根际土壤,采用随机五点取样法在每个采样地随机采集苜蓿根际0~20 cm的土壤,每5个点采集的样品混匀为1个重复(150~200 g)用于土壤理化性质测定,土壤样品通过2 mm筛网后,分装至50 mL无菌离心管中用于土壤微生物组测序。利用凯氏定氮法测定土壤样本中全氮含量。硝态氮含量利用双波长比色法测定,全磷、速效磷含量利用钼锑抗比色法测定,利用ICP-aes法测定全钾、速效钾含量。有机碳含量利用重铬酸钾容量法测定,利用电位测定法测定土壤pH值。

用于微生物组分析的样品经液氮速冻后送至生物公司进行微生物组二代测序。

1.2.3 数据处理 试验数据以均值±标准误差表示,采用SPSS 20.0进行单因素方差分析(ANOVA),组间差异显著性以Duncan法检验($P < 0.05$)。QIIME2分析土壤样本的物种覆盖度及多样性指数。主成分分析R(v4.4.2)中的vegan包进行标准化处理与降维分析。采用ggplot2进行土壤微生物组成数据可视化。

2 结果与分析

2.1 两种生防菌对田间主要害虫防治效果

由图1可见,牛角花齿蓟马是园林场苜蓿田的优势害虫,其虫口密度远高于其他害虫。在对照组中,牛角花齿蓟马的数量最高,平均虫口密度约为150头·百枝条⁻¹;普通大蓟马平均虫口密度约为27

头·百枝条⁻¹;苜蓿斑蚜和豌豆蚜平均虫口密度均约为5头·百枝条⁻¹。在间施球孢白僵菌3年和间施金龟子绿僵菌3年的苜蓿田中,牛角花齿蓟马虫口密度分别约为98头·百枝条⁻¹和105头·百枝条⁻¹,均显著低于对照组;普通大蓟马虫口密度分别约为19头·百枝条⁻¹和24头·百枝条⁻¹;苜蓿斑蚜虫口密度分别约为6头·百枝条⁻¹和5头·百枝条⁻¹;豌豆蚜虫口密度分别约为6头·百枝条⁻¹和8头·百枝条⁻¹。普通大蓟马、苜蓿斑蚜和豌豆蚜在3种处理间差异均不显著,且虫口密度较低。

田间防治效果数据显示,两种生防菌对田间主要害虫牛角花齿蓟马具有显著的防治效果。间施3年球孢白僵菌对牛角花齿蓟马的平均防效为34.8%,最高防效达到56.1%;间施3年金龟子绿僵菌平均防效为30.3%,最高防效37.6%(图2)。但两种生防菌对普通大蓟马、苜蓿斑蚜和豌豆蚜等密度较低田间害虫的防治效果不稳定,未形成持续一致的抑制作用。

2.2 两种生防菌对土壤理化性质及酶活性的影响

与对照组相比,间施3年球孢白僵菌后,园林场

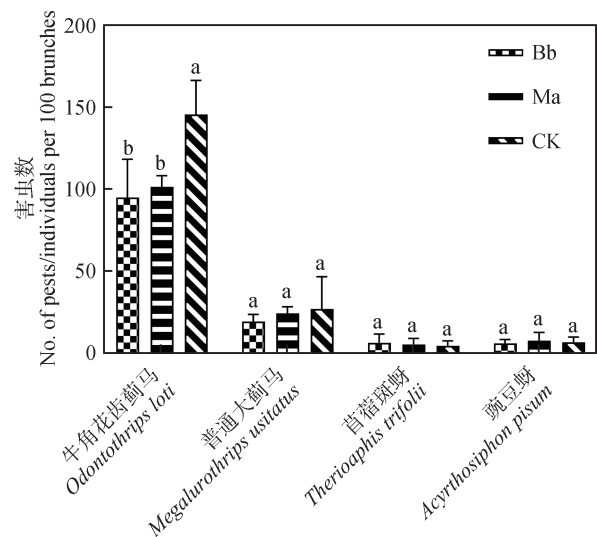


图1 苜蓿田不同处理间主要害虫数量

Fig. 1 Abundance of major insect pests under different treatments in the alfalfa field

注:图中Bb是球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 处理组, Ma是金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 处理组, CK是清水对照组, 不同小写字母表示经Duncan氏新复极差法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同

Note: In the figure, Bb represents the *Beauveria bassiana* treatment, Ma represents the *Metarhizium anisopliae* treatment, and CK represents the water control. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments according to Duncan's multiple range test at $P < 0.05$. The same applies below

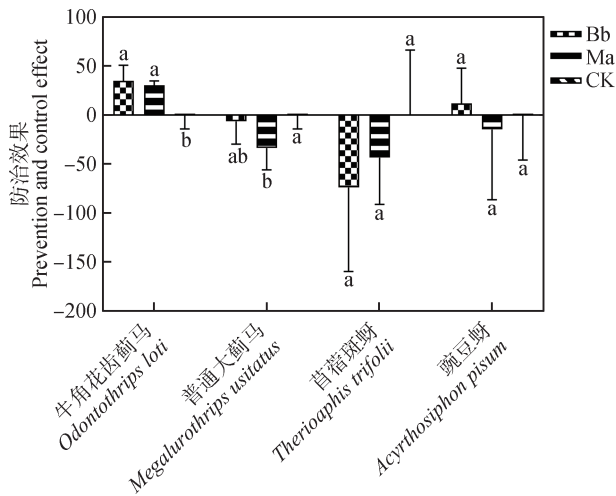


图2 不同处理对苜蓿田间主要害虫防治效果

Fig. 2 Control efficacy of different treatments against major insect pests in the alfalfa field

土壤全氮含量增加了20.7%,全磷含量增加了15.5%,全钾含量增加了1.29%,总碳含量增加了0.38%(图3),在养分方面,碱解氮含量增加了19.0%,速效磷含量增加了67.2%,速效钾含量增加了20.9%,有机碳含量增加了41.7%,pH值略下降(图3)。总体来看,施用白僵菌3年后,土壤理化性质多数指标均有所提升,白僵菌处理对土壤养分,尤其是速效磷和有机碳的提升效果显著。

间施3年金龟子绿僵菌后,与对照组相比,园林场土壤全氮含量增加了3.45%,全磷含量增加了4.12%,全钾含量增加了5.25%,总碳含量下降了13.42%。碱解氮含量增加了1.28%,速效磷含量增加了17.8%,速效钾含量下降了6.0%,有机碳含量增加了15.7%,pH值上升(图3)。与白僵菌相

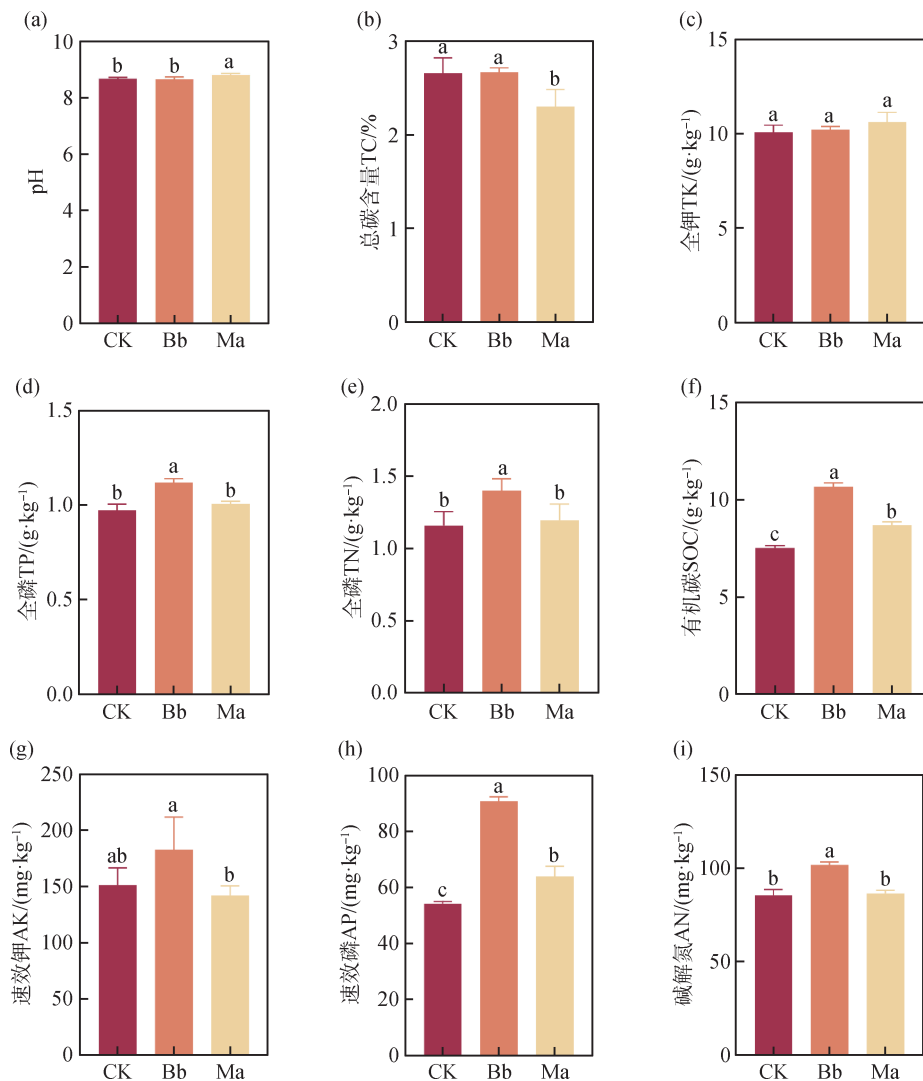


图3 苜蓿田不同处理间土壤理化性质

Fig. 3 Soil physicochemical properties under different treatments in the alfalfa field

比,金龟子绿僵菌对土壤理化性质的改善幅度整体较小,且在部分指标上呈现下降趋势。

2.3 两种生防菌对土壤酶活性的影响

与对照组相比,施用3年白僵菌后土壤中脲酶活性增加了约6.08%、蔗糖酶活性增加了约36.91%、

酸性磷酸酶活性增加了约13.78%、碱性磷酸酶活性增加了约64.20%、过氧化氢酶活性增加了约31.03%(图4)。间施3年金龟子绿僵菌后,土壤酶活性呈现分化响应:蔗糖酶和过氧化氢酶活性分别提高了30.32%和24.42%,而脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性分别降低了6.82%,10.22%和13.83%。

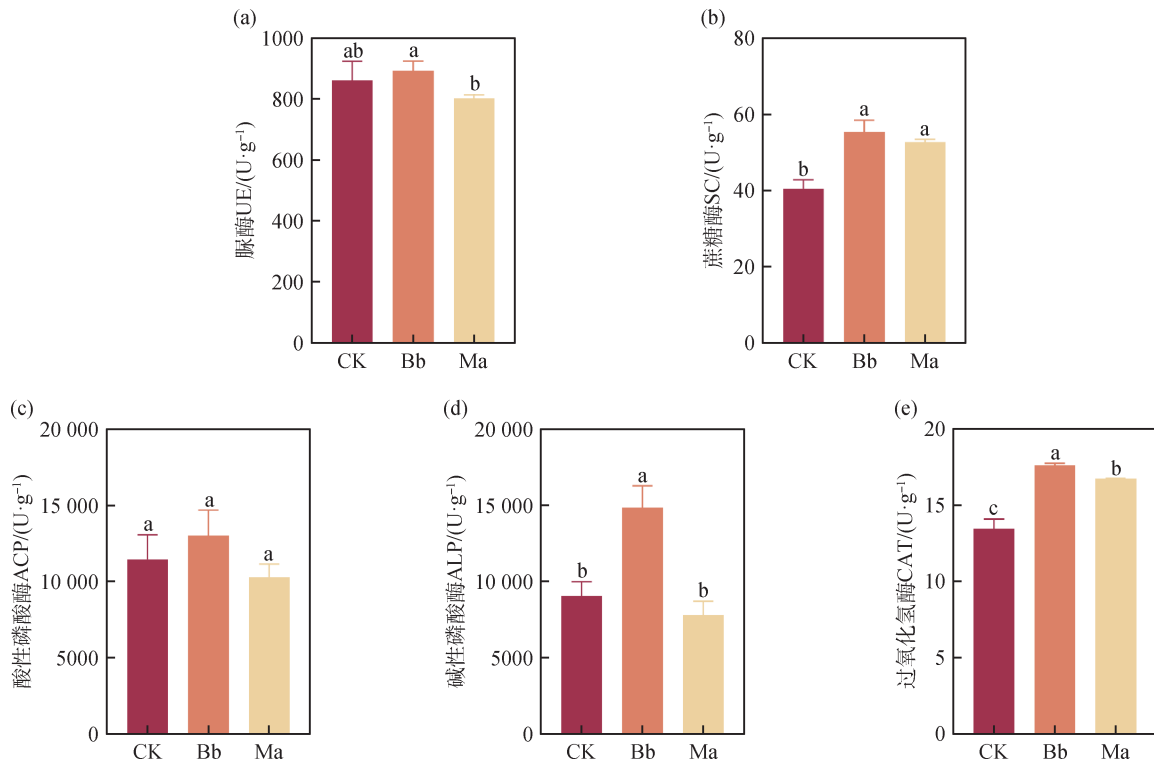


图4 苜蓿田不同处理间土壤酶活性

Fig. 4 Soil enzyme activity under different treatments in the alfalfa field

2.4 土壤微生物群落的测序饱和度评估

处理组及对照组的土壤细菌及真菌的稀疏曲线均随测序深度快速上升后趋于平缓,并在高测序深度趋于平缓,说明本研究的测序深度能够覆盖大部分可检出的微生物类群。对照组的ASV丰富度始终高于白僵菌(Bb)和绿僵菌(Ma)处理,而Bb与Ma处理的稀疏曲线走势接近,末端平台高度基本一致。细菌稀疏曲线在约15 000~20 000 reads后增幅明显减缓,真菌稀疏曲线在约20 000~30 000 reads后趋于稳定(图5)。总体上,稀疏曲线表明测序覆盖充分,在当前抽样与测序深度条件下,对照组的细菌和真菌丰富度整体高于两种生防菌处理,而两种生防菌处理之间的差异较小。

2.5 两种生防菌对土壤微生物多样性的影响

各组样本在测序过程中对细菌物种覆盖度良好,Good's coverage均大于0.98(图6)。Chao1指

数与Observed_species反映的丰富度在三组间差异均不显著,中位数水平呈CK>Bb>Ma的趋势,说明对照组细菌物种数量更高。Simpson指数相近,说明不同处理对优势种群作用并不明显。Pielou_e指数Ma>Bb>CK,Shannon指数CK>Bb>Ma,在本研究条件下,白僵菌与绿僵菌处理未显著改变园林场土壤细菌群落的Alpha多样性特征。

土壤真菌测序覆盖度高于细菌,均高于0.99,测序数据可信度较高。Chao1与Observed_species指数表现为CK>Bb>Ma,Shannon与Simpson指数的中位数均表现为CK>Ma>Bb(图7),综合考虑物种丰富度与群落均匀度后,对照组多样性水平最高,间施3年白僵菌后土壤真菌多样性较低,Shannon指数、Simpson指数及Pielou_e指数均呈边缘性显著,各处理组无统计学意义上显著差异。

2.6 土壤微生物主成分分析

在土壤细菌群落的PCA分析中,PC1与PC2共

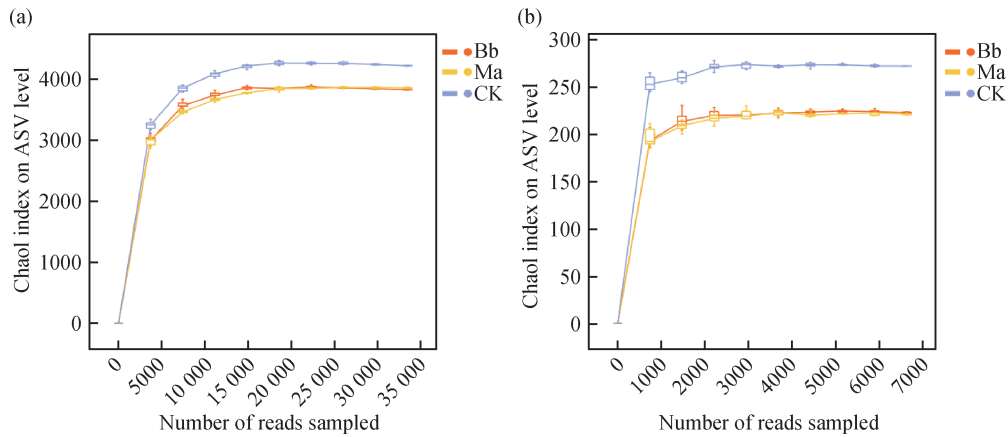


图 5 苜蓿田不同处理间土壤稀释度曲线

Fig. 5 Soil rarefaction curves under different treatments in the alfalfa field

注:(a)土壤细菌稀释度曲线;(b)土壤真菌稀释度曲线

Note:(a) Soil bacterial rarefaction curves; (b) Soil fungal rarefaction curves

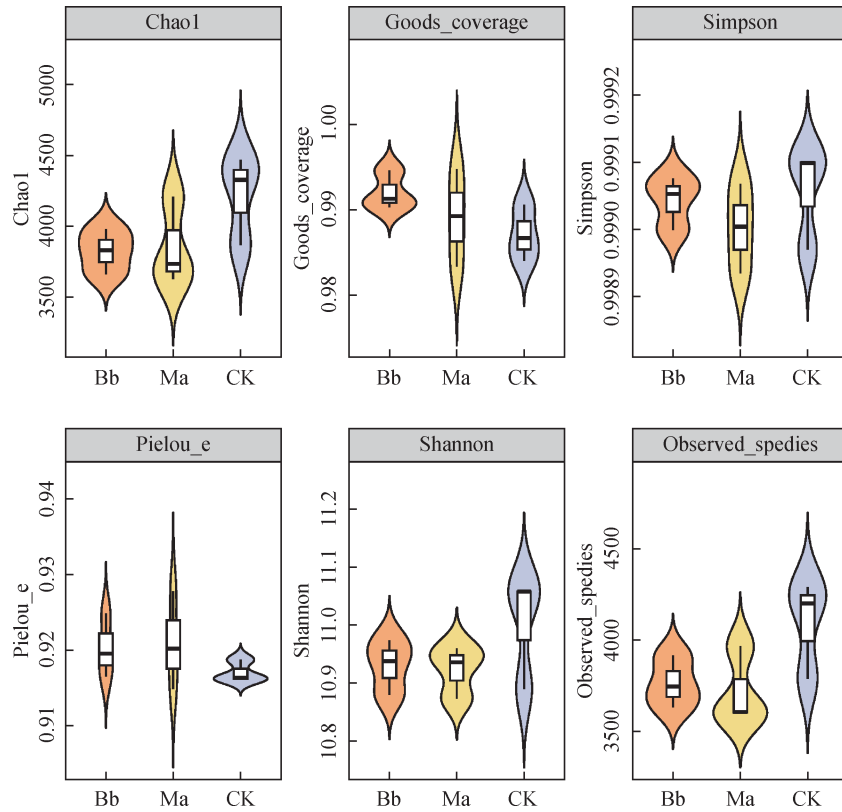


图 6 苜蓿田不同处理间土壤细菌 Alpha 多样性

Fig. 6 Alpha diversity of soil bacteria under different treatments in the alfalfa field

解释了总变异的 64.3%, 其中 PC1 占比 46.0%, PC2 占比 18.3% (图 8a)。不同处理组在 PC1 轴上呈现明显的梯度分离, 对照组样本相对聚集, 与 Bb、Ma 处理组完全分开; Bb 与 Ma 处理组则在 PC1 轴上存在部分重叠, 但在 PC2 轴上趋势相似, 说明两种处理对细菌群落结构的影响存在一定差异 (图 8a)。这一结果表明, Bb 与 Ma 处理均改变了土壤细菌群落的物种组成, 且金龟子绿僵菌及球孢白僵菌

的引入对本土细菌群落产生了一定影响。

土壤真菌群落的 PCA 分析显示, PC1 与 PC2 共解释了总变异的 95.9%, 其中 PC1 占比 86.8%, PC2 占比 9.1% (图 8b)。PC1 聚集了驱动群落分异的核心因子。三组在 PC1 轴上呈现清晰的线性分离, 无明显重叠, 且组内样本分布紧凑, 说明处理效应稳定且组内变异较小, 但两个处理组与对照组相比更为聚集 (图 8b)。

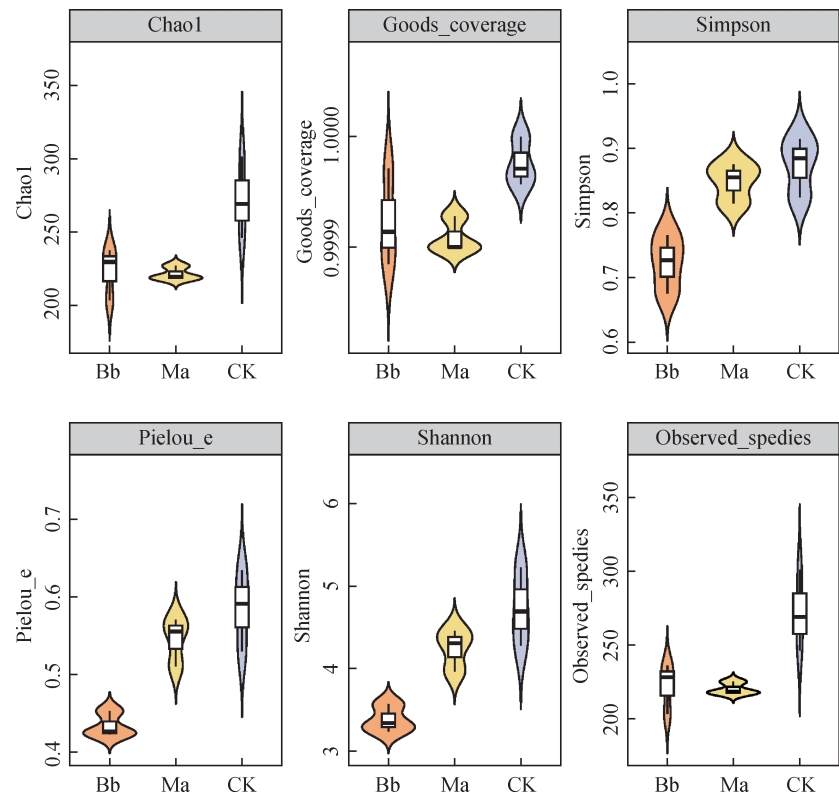


图 7 苜蓿田不同处理间土壤真菌 Alpha 多样性

Fig. 7 Alpha diversity of soil fungi under different treatments in the alfalfa field

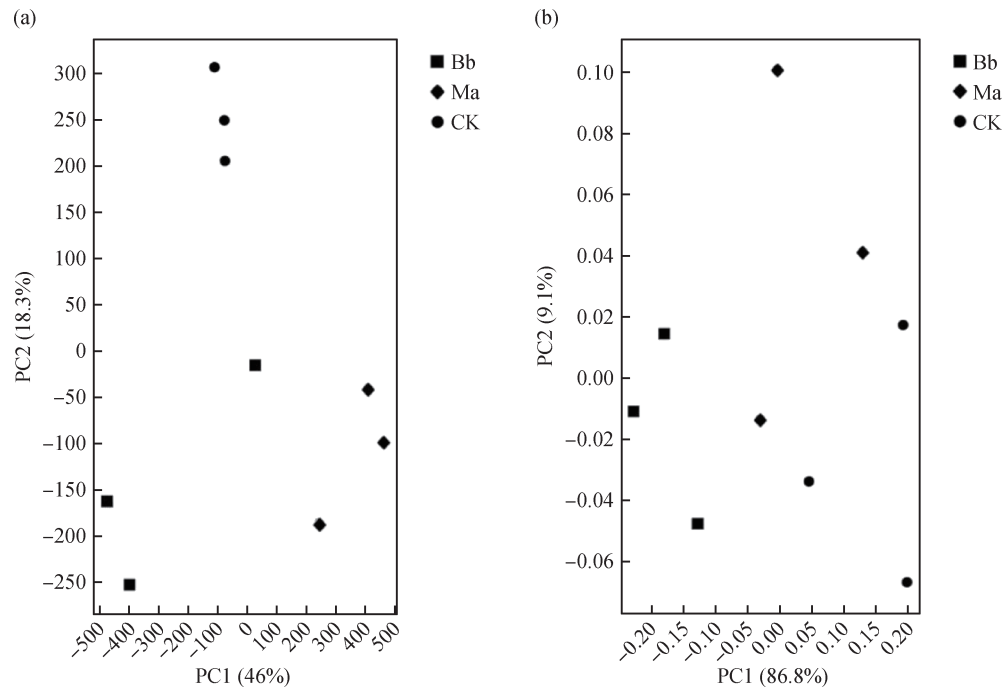


图 8 苜蓿田不同处理间土壤微生物主成分分析

Fig. 8 Principal component analysis of soil microbial communities under different treatments in the alfalfa field

注:(a)土壤真菌PCA分析;(b)土壤细菌PCA分析
Note:(a) PCA analysis of soil fungi; (b) PCA analysis of soil bacteria

2.7 两种生防菌对土壤微生物组结构的影响
在园林场土壤细菌群落中,放线菌门 Actinobac-

teriota、变形菌门 Proteobacteria、酸杆菌门 Acidobacte-
riota、绿弯菌门 Chloroflexi 与芽单胞菌门 Gemmati-

monadota 为主要类群, 占据相对丰度 80% 以上(图 9a)。与对照组相比, Bb 与 Ma 处理组均表现为放线菌门 Actinobacteriota、绿弯菌门 Chloroflexi 上升, 拟杆菌门 Bacteroidota 与变形菌门 Proteobacteria 变化较小。属水平上与上述门水平趋势相对应, 施用生防

菌后, 放线菌门 Actinobacteriota 中诺卡氏微杆菌属 *Nocardioideis*、黏细菌门 Myxococcota 中海阳菌属 *Haliangium*、芽单胞菌门 Gemmatimonadota 中芽单胞菌属 *Gemmatimonas* 及变形菌门 Proteobacteria 中鞘氨醇单胞菌属 *Sphingomonas* 占比略提高(图 9b)。

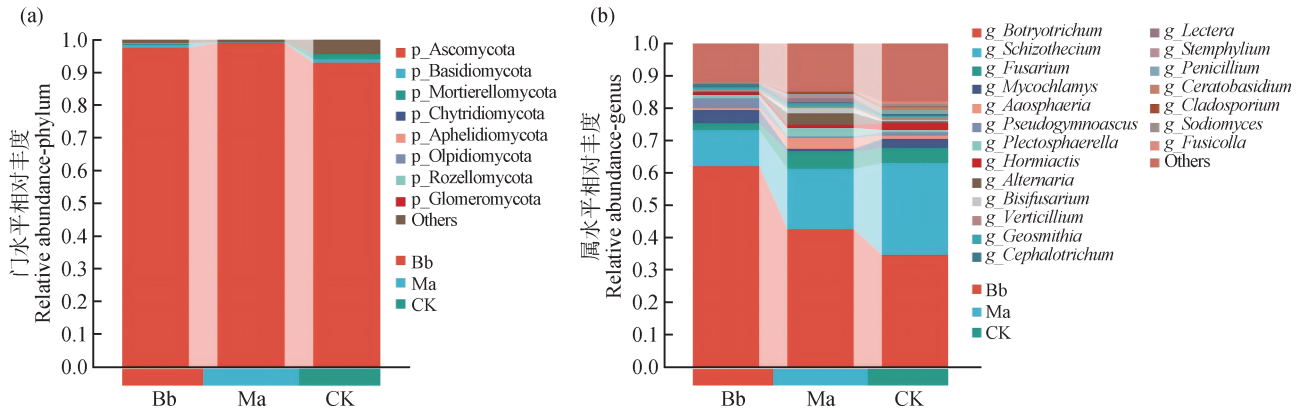


图 9 苜蓿田不同处理组土壤细菌物种组成(a: 土壤细菌门水平物种组成; b: 土壤细菌属水平物种组成)

Fig. 9 Comparison of soil bacterial species composition among different treatment groups in the alfalfa field (a: Composition of soil bacterial taxa at the phylum level; b: Composition of soil bacterial taxa at the genus level)

在园林场土壤真菌群落中, 子囊菌门 Ascomycota 为绝对优势种, 担子菌门 Basidiomycota 为次要优势种(图 10a); 与对照组相比, Bb 组与 Ma 组的门水平真菌群落结构总体稳定。间施 3 年白僵菌土壤中具有潜在生防作用或能提高土壤养分分解的小壳针孢属 *Plectosphaerella*、伪裸囊菌属 *Pseudogymno-*

ascus、瓶梗霉属 *Botryotrichum* 相对丰度上升, 常见引起植物根腐病的病原菌镰刀菌属 *Fusarium* 丰度下降(图 10b)。链格孢属 *Alternaria* 与小壳针孢属 *Plectosphaerella* 在间施 3 年金龟子绿僵菌土壤中相对丰度占比略有提升, 但瓶梗霉属 *Botryotrichum* 等可能存在生防功能的类群丰度也有提升(图 10b)。

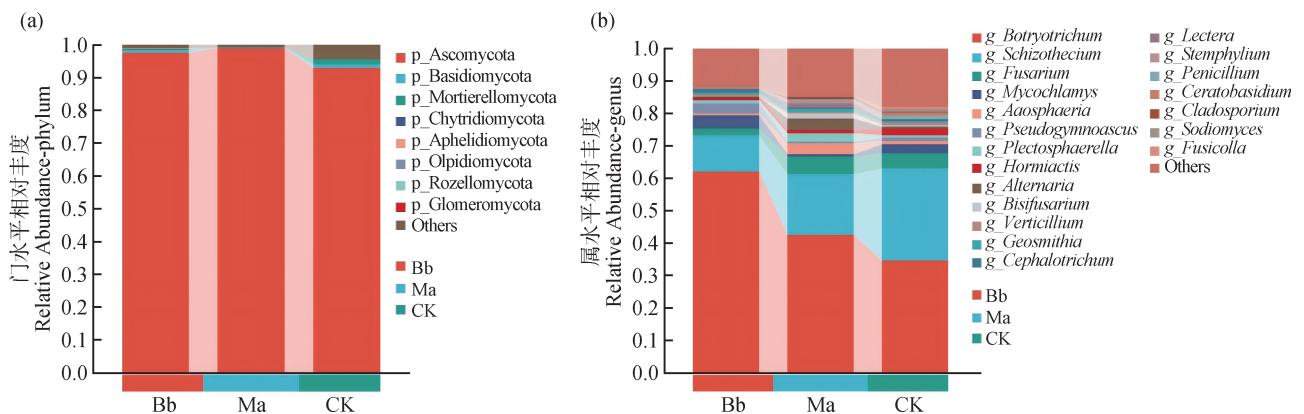


图 10 苜蓿田不同处理组土壤真菌物种组成(a: 土壤真菌门水平物种组成; b: 土壤真菌属水平物种组成)

Fig. 10 Comparison of soil fungal species composition among different treatment groups in the alfalfa field (a: Composition of soil Fungal taxa at the phylum level; b: Composition of soil Fungal taxa at the genus level)

3 讨论

本研究系统比较了球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 和金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisoplia* 在苜蓿害虫抑制与根际调控方面均表现出多层次作用。相关研究已证实, *B. bassiana* 与 *M. anisopliae* 除了

作为典型的昆虫致病真菌外, 还能以内生或根际互作的形式参与植物—微生物系统, 通过直接感染缨翅目害虫或诱导植株免疫等途径产生双重效应^[25-28]。本研究表明两种生防菌处理均能显著压低牛角花齿蓟马密度, 其中间施 3 年的白僵菌防效最高, 虫口数减少约 34.8%, 优于金龟子绿僵菌处理

组。然而,相较于对牛角花齿蓟马的显著控制效果,两种生防菌对普通大蓟马、苜蓿斑蚜及豌豆蚜等田间次要害虫的调控效应则相对有限,且未形成持续一致的抑制作用。具体表现为,尽管间施生防菌区的牛角花齿蓟马虫口密度显著低于对照组,但普通大蓟马、斑蚜及豌豆蚜的虫口数量在各处理组间差异不显著,其种群密度维持在较低水平,这一现象可能与害虫自身生物学特性及种群基数差异密切相关。

土壤理化指标与酶活性结果显示,施用白僵菌后土壤速效磷增加67.2%、有机碳增加41.7%,这些指标的显著提升,以及对脲酶、蔗糖酶、磷酸酶与过氧化氢酶等多种关键酶活性的增强,说明白僵菌在改良土壤各项理化性质方面极具潜力。金龟子绿僵菌处理组的土壤改良幅度相对温和,但在蔗糖酶、过氧化氢酶方面依然呈正向响应,表明不同EPF强度上存在差异。酶活常可作为碳、氮、磷循环过程的敏感指征^[29],已有研究显示,EPF接种可改变根际碳流与底物供给,进而选择性影响真菌群落结构与功能类群,尤其与几丁质酶、蛋白酶等相关的代谢活性提升有关^[30-31]。这表明白僵菌可能通过其分泌的酶类促进了有机物的降解和养分的矿化,从而促进了土壤肥力的提升。相比之下,金龟子绿僵菌虽然在酶活性方面表现不如白僵菌显著,但其在蔗糖酶和过氧化氢酶的促进作用依然表明其在改善土壤微生物活性方面具有一定的潜力。此外,本研究证明EPF作为生防菌剂的使用不仅改善了土壤理化性质和酶活性,还能通过调节土壤微生物群落的结构,进一步增强土壤生态系统的稳定性和可持续性。曾有研究在稻田中施用球孢白僵菌与化学药剂,证明白僵菌比化学药剂有更好的促生作用及土壤改良能力,佐证了这一结论^[30]。未来的研究可以进一步探讨不同生防菌剂对土壤生态功能的长效影响,特别是在不同气候和土壤类型下的应用效果,提供更为细致的田间指导。

高通量测序结果进一步表明,细菌群落对EPF处理整体较为稳健,无论Alpha多样性或主要类群构成均保持相对稳定;而真菌群落则更为敏感,呈现出可见的组间差异。球孢白僵菌处理下潜在病原指征属(如*Fusarium*)的相对丰度下降,而金龟子绿僵菌处理的变化幅度有限,这说明EPF可能通过资源竞争、微生物对抗或改变根际底物结构影响真菌群落的竞争格局,从而对病原相关类群产生选择

性压力^[30]。这一结果与前人研究一致,即EPF在田间体系中既可能抑制缨翅目害虫,又可能通过微生物互作促进植株健康^[31, 33]。但本研究中的差异丰度仅代表相对丰度变化,尽管*Fusarium*丰度的下降可能表明病原风险有所降低,但缺乏苜蓿根腐病等田间病害的直接验证,难以将群落变化直接等同为病害风险的降低。功能层面的推断仍需结合后续的分离培养、拮抗活性与功能组学证据进一步验证^[34]。因此,后续研究需要结合田间实验数据,如病害发生率和损失量,来进一步确认菌株在实际生产中的防治效果。

4 结论

球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 和金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 在苜蓿田间表现出抑制害虫及调控根际微生态的双重作用,金龟子绿僵菌处理后土壤微生物结构、理化性质及酶活性则展现出较稳定但相对温和的响应。该结果为宁夏地区苜蓿害虫绿色防控及根际生态调控中生防菌剂的科学选择与合理应用提供理论依据。未来研究需结合EPF在根际的长期定殖机制、功能基因表达、病原对抗试验及病害监测等多源证据,进行更完整的机制探究,并深入研究EPF与捕食性天敌、其它微生物菌剂等绿色防控措施的协同潜力,以提升绿色生物防治技术在开放田间条件下的稳定性与可持续性。

参考文献

- [1] 张德,龙会英. 8个紫花苜蓿品种在干热区生产性能和营养价值评价[J]. 中国草地学报, 2024, 46(1): 70-77
ZHANG D, LONG H Y. Evaluation of production performance and nutritional value of eight alfalfa varieties in the hot-arid zone[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(1): 70-77
- [2] 岳彦红,齐晓,王彦荣,等. 35个10龄紫花苜蓿品种的持久性比较[J]. 草业学报, 2014, 23(1): 58-64
YUE Y H, QI X, WANG Y R, et al. Persistence of 35 Medicago sativa varieties at the 10th year after establishment[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(1): 58-64
- [3] 初建香,张立中. 紫花苜蓿的品质特性及其在动物生产中的应用[J]. 中国饲料, 2022(11): 91-95
CHU J X, ZHANG L Z. The quality characteristics and application of alfalfa in animal production[J]. China Feed, 2022(11): 91-95
- [4] WANG Q B, ZOU Y. China's alfalfa market and imports: development, trends, and potential impacts of the U. S. - China

- trade dispute and retaliations[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(4):1149-1158
- [5] 孙启忠, 玉柱, 徐春城. 我国苜蓿产业亟待振兴[J]. 草业科学, 2012(2):314-319
- SUN Q Z, YU Z, XU C C. Urgency of further developing alfalfa industry in China[J]. Pratacultural Science, 2012(2):314-319
- [6] RODRÍGUEZ D, COY-BARRERA E. Overview of updated control tactics for western flower Thrips[J]. Insects, 2023, 14(7):649
- [7] 李楠, 马晓霞, 王新谱. 苜蓿重要害虫牛角花齿蓟马研究进展[J]. 中国植保导刊, 2019, 39(11):31-35
- LI N, MA X X, WANG X P. Research progress on a major insect pest of Alfalfa *Odontothrips loti*[J]. China Plant Protection, 2019, 39(11):31-35
- [8] 乔浪, 张志强, 班丽萍, 等. 紫花苜蓿田牛角花齿蓟马诱集技术优化研究[J]. 中国生物防治学报, 2023, 39(6):1351-1360
- QIAO L, ZHANG Z Q, BAN L P, et al. Optimization trapping technology for controlling *Odontothrips loti* (Haliday) (Thysanoptera, Thripidae) in alfalfa field[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2023, 39(6):1351-1360
- [9] TANG L D, YAN K L, FU B L, et al. The life table parameters of *Megalurothrips usitatus* (Thysanoptera: Thripidae) on four leguminous crops[J]. The Florida Entomologist, 2015, 98(2):620-625
- [10] SRINIVASAN R, PAOLA S, LIN M Y, et al. Development and validation of an integrated pest management strategy for the control of major insect pests on yard-long bean in Cambodia[J]. Crop Protection, 2019, 116:82-91
- [11] 傅祖英, 罗攸宁, 苗森, 等. 南方小花蝽对苜蓿斑蚜不同龄期的捕食作用[J]. 中国生物防治学报: 1-11.
- FU Z Y, LUO Y N, MIAO M, et al. Predation of *Orius similis* on different instars of the spotted alfalfa aphid in alfalfa[J]. Chinese Journal of Biological Control:1-11.
- [12] 崔晓宁, 席驳鑫, 彭斌, 等. 不同温度下微小花蝽对豌豆蚜和牛角花齿蓟马的捕食作用[J]. 中国生物防治学报, 2025, 41(2):276-283
- CUI X N, XI B X, PENG B, et al. Predatory functional response of *Orius minutus* to *Acyrtosiphon pisum* and *Odontothrips loti* at different temperatures[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2025, 41(2):276-283
- [13] 王彭, 刘叙杆, 黄正谊. 5种药剂对不同地区蓟马田间优势种群的敏感度测定[J]. 农药, 2016, 55(7):527-529
- WANG P, LIU X G, HUANG Z Y. Laboratory bioassay of five insecticides on against field dominant populations of Thrips[J]. Agrochemicals, 2016, 55(7):527-529
- [14] 叶火春, 王琴, 闫超, 等. 甲维盐与啮虫脒对豇豆蓟马的联合毒力及田间防效[J]. 热带农业科学, 2020, 40(2):76-81
- YE H C, WANG Q, YAN C, et al. The field efficacy and joint toxicity of emamectin benzoate and acetamiprid against cowpea Thrips[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2020, 40(2):76-81
- [15] 刘奎, 唐良德, 李鹏, 等. 几种杀虫剂对豆大蓟马的毒力测定及复配增效作用[J]. 热带作物学报, 2014, 35(8):1615-1618
- LIU K, TANG L D, LI P, et al. Toxicity and synergistic effect of the complex formulation of several insecticides to *Megalurothrips usitatus* (bagnall) [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2014, 35(8):1615-1618
- [16] LUO Y N, HAN C, TU X B, et al. Evaluation of trap systems for monitoring of *Odontothrips loti* and *Frankliniella occidentalis*: a pilot field trial[J]. Insects, 2026, 17(1):84
- [17] 严森, 任小云, 王登杰, 等. 昆虫病原真菌在害虫防治中对天敌生物的影响研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2023, 39(1):221-230
- YAN S, REN X Y, WANG D J, et al. The research progress on the effects of entomopathogenic fungi on natural enemies [J]. Chinese Journal of Biological Control, 2023, 39(1):221-230
- [18] LI J, XIA Y X. Host - pathogen interactions between *Metarhizium* spp. and locusts[J]. Journal of Fungi, 2022, 8(6):602
- [19] 彭国雄, 张淑玲, 夏玉先. 金龟子绿僵菌 CQMa421 农药及应用情况[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(6):850-857
- PENG G X, ZHANG S L, XIA Y X. *Metarhizium anisopliae* CQMa421 and its application status[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2020, 36(6):850-857
- [20] WU S Y, HE Z, WANG E D, et al. Application of *Beauveria bassiana* and *Neoseiulus barkeri* for improved control of *Frankliniella occidentalis* in greenhouse cucumber [J]. Crop Protection, 2017, 96:83-87
- [21] TADESSE MAWCHA K, MALINGA L, MUIR D, et al. Recent advances in biopesticide research and development with a focus on microbials[J]. F1000Research, 2025, 13:1071
- [22] 王小武, 蒋旭东, 丁新华, 等. 新疆荒漠绿洲区亚洲玉米螟越冬幼虫4种主要病原真菌生物学特性及致病力测定[J]. 中国生物防治学报, 2023, 39(2):305-312
- WANG X W, JIANG X D, DING X H, et al. Biological characteristics and pathogenicity of four dominant pathogenic fungi of overwintering larvae of *Ostrinia furnacalis* in Xinjiang Desert oasis region[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2023, 39(2):305-312
- [23] 迟晓雪, 曹薇, 王畅, 等. 复合改良措施对退化草甸草原土壤酶活性与微生物群落的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(4):1403-1412
- CHI X X, CAO W, WANG C, et al. Effects of combined restoration measures on soil enzyme activities and microbial communities in degraded meadow steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1403-1412
- [24] 谭红妍, 陈宝瑞, 闫瑞瑞, 等. 草地土壤微生物特性及其对人为干扰响应的研究进展[J]. 草地学报, 2014, 22(6):1163-1170
- TAN H Y, CHEN B R, YAN R R, et al. Research progress on grassland soil microbial characteristics and their responses to anthropogenic disturbance[J]. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(6):1163-1170
- [25] JABER L R, OWNLEY B H. Can we use entomopathogenic

- fungi as endophytes for dual biological control of insect pests and plant pathogens?[J]. *Biological Control*, 2018, 116:36-45
- [26] BEHIE S W, MOREIRA C C, SEMENTCHOUKOVA I, et al. Carbon translocation from a plant to an insect-pathogenic endophytic fungus[J]. *Nature Communications*, 2017, 8:14245
- [27] WEI Q Y, LI Y Y, XU C, et al. Endophytic colonization by *Beauveria bassiana* increases the resistance of tomatoes against *Bemisia tabaci*[J]. *Arthropod-Plant Interactions*, 2020, 14(3): 289-300
- [28] ZHANG Q K, WANG D J, LIU S, et al. Reproductive disruption induced by *Beauveria bassiana* in *Frankliniella occidentalis* as a potential long-term biocontrol strategy[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2025, 212:106464
- [29] MIR Y H, AHMAD GANIE M, SHAH T I, et al. Soil microbial and enzyme activities in different land use systems of the Northwestern Himalayas[J]. *PeerJ*, 2023, 11:e15993
- [30] BARELLI L, WALLER A S, BEHIE S W, et al. Plant microbiome analysis after *Metarhizium amendment* reveals increases in abundance of plant growth-promoting organisms and maintenance of disease-suppressive soil[J]. *Plos One*, 2020, 15(4): e0231150
- [31] PAVA-RIPOLL M, ANGELINI C, FANG W G, et al. The rhizosphere-competent entomopathogen *Metarhizium anisopliae* expresses a specific subset of genes in plant root exudate[J]. *Microbiology*, 2011, 157(1):47-55
- [32] DU W, ZHOU J, JIANG P, et al. Effects of *Beauveria bassiana* and acephate on enzyme activities and microbial diversity in paddy soil[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2013, 59(12): 562-567
- [33] ZAHN D K, HAVILAND D R, STANGHELLINI M E, et al. Evaluation of *Beauveria bassiana* for management of Citrus thrips (Thysanoptera: Thripidae) in California blueberries[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2013, 106(5):1986-1995
- [34] BRUCK D J. Ecology of *Metarhizium anisopliae* in soilless potting media and the rhizosphere: implications for pest management[J]. *Biological Control*, 2005, 32(1):155-163

(责任编辑 彭露茜)