北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

两种丛枝菌根真菌定殖青山杨后对舞毒蛾的抗性研究

赵佳齐 方静 谭明涛 武帅 任英杰 孟昭军 严善春

Effects of arbuscular mycorrhizal fungal colonization on *Populus pseudo-cathayana* × *P. deltoides* resistance to *Lymantria dispar* larvae

Zhao Jiaqi, Fang Jing, Tan Mingtao, Wu Shuai, Ren Yingjie, Meng Zhaojun, Yan Shanchun

引用本文:
赵佳齐, 方静, 谭明涛, 武帅, 任英杰, 孟昭军, 严善春. 两种丛枝菌根真菌定殖青山杨后对舞毒蛾的抗性研究[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(3):53–59. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220144
Zhao Jiaqi, Fang Jing, Tan Mingtao, Wu Shuai, Ren Yingjie, Meng Zhaojun, Yan Shanchun. Effects of arbuscular mycorrhizal fungal colonization on *Populus pseudo–cathayana* × *P. deltoides* resistance to *Lymantria dispar* larvae[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(3):53–59. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220144

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220144

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

LdNPV对CO_2胁迫下舞毒蛾生长发育及生化酶活性影响

Effects of LdNPV on growth, development and biochemical enzymatic activities of *Lymantria dispar* under CO_2 concentration stress

北京林业大学学报, 2019, 41(9): 139–146. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180199

丛枝菌根真菌对银中杨叶片物质代谢及化学防御的影响

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on metabolism and chemical defense of *Populus alba* × *P. berolinensis* leaves

北京林业大学学报, 2021, 43(5): 86–92. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200172

3种植物次生代谢物质对舞毒蛾的杀虫活性分析

Insecticidal activity analysis of three plant secondary metabolites on *Lymantria dispar*

北京林业大学学报, 2017, 39(11): 75–81. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170214

锌胁迫对银中杨生长发育和化学防御的影响

Effects of Zn stress on growth development and chemical defense of *Populus alba* 'berolinensis' seedlings

北京林业大学学报, 2018, 40(11): 42–48. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180131

转录组分析氧化胁迫对毛白杨悬浮细胞生长发育的影响

Effects of oxidative stress on growth and development of suspension cells of *Populus tomentosa* by transcriptome analysis

北京林业大学学报, 2019, 41(9): 90–98. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190157

基于MaxEnt模型对舞毒蛾全球适生区的预测及分析

Prediction and analysis of the global suitability of *Lymantria dispar* based on MaxEnt

北京林业大学学报, 2021, 43(9): 59–69. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200416

DOI:10.12171/j.1000−1522.20220144

两种丛枝菌根真菌定殖青山杨后对舞毒蛾的抗性研究

赵佳齐 方 静 谭明涛 武 帅 任英杰 孟昭军 严善春
（东北林业大学林学院，森林生态系统可持续经营教育部重点实验室，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘要:【目的】研究丛枝菌根真菌（AMF）对青山杨抗虫性的影响以及舞毒蛾对 AMF 定殖青山杨的适应能力，为 AMF 定殖青山杨后抗虫性的研究提供科学依据。**【方法】**分别以对照（CK，无 AMF 定殖）、根内根孢囊霉（GI）或摩西管柄囊霉（GM）定殖的青山杨叶片饲喂舞毒蛾幼虫，统计 3、4、5 龄幼虫的体重、体长、头壳宽和食物利用率，测定 4、5 龄幼虫解毒酶酸性磷酸酯酶（ACP）和碱性磷酸酯酶（AKP）的活性。**【结果】**GI 组 3、4 龄幼虫的体重显著高于对照组（$P < 0.05$），5 龄与对照组差异不显著，GM 组 5 龄幼虫的体长、体重、头壳宽、食物利用率均显著高于对照组。GI 组 3 龄幼虫取食量显著高于对照组（$P < 0.05$），4、5 龄显著低于对照组，GM 组 5 龄显著高于对照组，3、4 龄与对照组差异不显著。GI 组 ACP 显著低于对照组（$P < 0.05$），AKP 在 4 龄显著高于对照组，5 龄 AKP 活性显著低于对照组。GM 组两种解毒酶活性均显著高于对照组。**【结论】**GI 定殖的青山杨能促进舞毒蛾低龄幼虫的生长，对舞毒蛾老熟幼虫的生长影响不显著。GM 定殖青山杨叶片促进了舞毒蛾幼虫的生长发育，提高了食物的利用效率，激发了幼虫体内磷酸酯酶活性，表明舞毒蛾对 GM 定植的青山杨有更好的适应性。AMF 对树木及植食性昆虫的影响具有种类特异性，GI 定殖对青山杨的抗虫性的影响呈中性，GM 定殖对青山杨的抗舞毒蛾产生负效应。

关键词：丛枝菌根真菌；青山杨；舞毒蛾；生长发育；解毒酶活性
中图分类号：S763.42 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)03−0053−07
引文格式：赵佳齐，方静，谭明涛，等. 两种丛枝菌根真菌定殖青山杨后对舞毒蛾的抗性研究［J］. 北京林业大学学报，2024，46(3)：53−59. Zhao Jiaqi, Fang Jing, Tan Mingtao, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungal colonization on *Populus pseudo-cathayana* × *P. deltoides* resistance to *Lymantria dispar* larvae［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(3): 53−59.

Effects of arbuscular mycorrhizal fungal colonization on *Populus pseudo-cathayana* × *P. deltoides* resistance to *Lymantria dispar* larvae

Zhao Jiaqi Fang Jing Tan Mingtao Wu Shuai Ren Yingjie Meng Zhaojun Yan Shanchun
(School of Forestry, Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management of Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: ［**Objective**］This paper explores the effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the resistance of Qingshan poplar (*Populus pseudo-cathayana* × *P. deltoides*) to the gypsy moth (*Lymantria dispar*) larvae and the adaptability of *L. dispar* larvae to the AMF colonization, so as to provide a scientific basis for the study of insect resistance of Qingshan poplar colonized by AMF. ［**Method**］The spongy moth larvae were fed with fresh leaves of Qingshan poplar seedlings, which were treated with *Glomus intraradices* or *G. mosseae* or untreated (CK: control). The body mass, length, head capsule width and food utilization of the 3rd, 4th and 5th instars of *L. dispar* larvae were measured, and the activities of acid phosphatase (ACP) and alkaline phosphatase (AKP) of the 4th and 5th instars of larvae were determined. ［**Result**］The body mass of the 3rd/4th instar larvae in GI group was significantly higher than that in the

收稿日期: 2022−04−13 **修回日期:** 2023−10−16
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项（2572019CP11）。
第一作者: 赵佳齐。主要研究方向：昆虫化学生态。Email: 1010722956@qq.com 地址：150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号东北林业大学林学院。
责任作者: 严善春，教授，博士生导师。主要研究方向：昆虫化学生态。Email: yanshanchun@126.com 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

control group, but there was no significant difference in the body mass of the 5th instar larvae between the GI group and the control group. The body length, mass, head capsule width and food utilization of the 5th instar larvae in the GM group were significantly higher than those in the control group. Food intake of the 3rd instar larvae in the GI group was significantly higher than that in the control group, but the reverse was true for the 4th and 5th instars; the food intake of the 5th instar larvae in the GM group was significantly higher than that in the control group, but there was no significant difference in food intake of the 3rd and 4th instars between the GM group and the control group. The ACP activity of the 4th and 5th instars in the GI group was significantly lower than that in the control group, and AKP activity of the 4th instar in the GI group was significantly higher than that in the control group, whereas the reverse was true for the 5th instar. On the other hand, the activities of these two detoxifying enzymes in the GM group were significantly higher than those in the control group. [**Conclusion**] The GI treatment enhances the growth of younger (3rd and 4th instars) *L. dispar* larvae, but not that of the mature (5th instar) larvae. The GM treatment increases the growth and development of *L. dispar* larvae, improves their food utilization efficiency, and stimulates their phosphatase activity, indicating that the spongy moth larvae might have a better adaptability to the GM-colonized Qingshan poplar trees. The effects of AMF on trees and herbivorous insects seem to be species-specific. GI colonization doesn't affect Qingshan poplar's resistance to the insect, while GM colonization reduces Qingshan poplar's resistance to the insect.

Key words: arbuscular mycorrhiza fungi; *Populus pseudo-cathayana* × *P. deltoides*; *Lymantria dispar*; growth and development; detoxification enzyme activity

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhiza fungi，AMF)属于球囊菌门(Glomeromycata)，能够与超过 80%的陆地植物形成共生关系[1]。AMF 从植物中吸收碳水化合物[2]，反过来为植物提供磷酸盐、铵和微量营养素等矿物质[3]。AMF 在改善植物生长发育的同时已逐渐应用于经济型农作物害虫的综合防治，并且取得了一定的防治效益[4]。除此之外，AMF 定殖是否可以提高林木的抗虫性已成当前研究的热点。

AMF 对植食性昆虫的影响存在 3 种情况，即正效应(约占 45%)、负效应(35%)、变化不定和无影响(20%)[5]。例如：Wang 等[6]发现摩西管柄囊霉(*Glomus mosseae*，GM)定殖的长叶车前草(*Plantago lanceolata*)已被证明可以抑制甜菜夜蛾(*Spodoptera exigua*)幼虫的相对生长速率，并且通过昆虫的植食作用改变梓醇在环烯醚萜苷水平中所占的比例；而 Khaitov 等[7]发现 GM 定殖的菜豆(*Phaseolus vulgaris*)提高了二斑叶螨(*Tetranychus urticae*)的繁殖率；Minton 等[8]通过研究烟草天蛾(*Manduca sexta*)取食根内根孢囊霉(*Glomus intraradices*，GI)定殖的东方龙葵(*Solanum ptycanthum*)时发现烟草天蛾的体重与对照组无显著差异。菌根定殖对植物抗虫性影响的多态性可能与 AMF 的种类、昆虫的取食方式、食性广度、寄主植物种类、植物的营养与次生物质代谢等方面有关[9]。此外，昆虫对寄主植物的化学防御具有反防御机制。通常，昆虫在取食植物时会根据食物的质量调节自身的适应能力，尤其在取食一些不利于自身的食物时，其解毒机制被激活[10]。其中，磷酸酯酶可以分为酸性磷酸酯酶(acid phosphatases，ACP)和碱性磷酸酯酶(alkaline phosphatases，AKP)，是一种广泛存在于昆虫体内的重要解毒酶，具有代谢一些杀虫剂，解毒部分外源物质的作用[11−12]。

青山杨(*Populus pseudo-cathayana* × *P. deltoides*)幼苗−舞毒蛾(*Lymantria dispar*)幼虫互作系统，由于青山杨幼苗的速生特性[13−14]和舞毒蛾幼虫的发育特性[15−16]，是分析木本植物对昆虫抗性的极好模型。本研究以 1 年生青山杨和舞毒蛾幼虫为研究对象，对青山杨分别接种根内根孢囊霉(GI)和摩西管柄囊霉(GM)，通过舞毒蛾幼虫的生长发育、食物利用和解毒酶活性分析 GI 或 GM 定殖对青山杨抗虫性的影响，进而为研究 AMF 对林业害虫的防治提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试剂

供试菌株：根内根孢囊霉(菌株号 BJ09)和摩西管柄囊霉(菌株号 GZ01A)(由甘肃省农业科学院提供)通过宿主玉米(*Zea mays*)和三叶草(*Trifolium pratense*)扩繁完成，菌剂中包含孢子、菌丝、根段和沙子，其中孢子含量 15 个/g。

供试植物：1 年生青山杨扦插苗(为避免自然环境中菌根侵染样本植株干扰试验研究结果，故供试植物选择 1 年生青山杨扦插苗)。

供试土壤:草炭土、蛭石、沙子体积比为 1∶1∶1,混合后在 121 ℃ 下高压灭菌 2 h。

供试昆虫:舞毒蛾卵块采自东北林业大学校园,饲料购自中国林业科学院森林生态环境与保护研究所。

供试试剂盒:总蛋白(TP)、酸性磷酸酯酶(ACP)、碱性磷酸酯酶(AKP)测定试剂盒购自南京建成生物工程研究所。

1.2　主要仪器与设备

高压蒸汽灭菌器,普和希株式会社生物医疗公司(MLS-3781L-PC);光照培养箱,东京理化器械株式会社(MTI-202B);电子分析天平,赛多利斯科学仪器有限公司(QYINTIX224-1CN);高速离心机,长沙湘智离心机仪器有限公司(TGL22M);电热恒温水浴锅,上海森信实验仪器有限公司(DK-S26);紫外可见光分光光度计,安玛西亚中国有限公司(ULtrospec5300pro)。

1.3　试验方法

1.3.1　杨树苗的培养及接菌处理

试验前将花盆用 0.3%$KMnO_4$ 溶液浸泡 2 h 进行消毒处理,每盆装入 1.3 kg 灭菌土壤,放置于东北林业大学育种苗圃温室。试验设置 1 个对照(CK)组和 2 个处理组,处理组分别接入丛枝菌根菌 GI 和 GM,每 1.3 kg 土壤混入菌剂 20 g,CK 组不加菌剂。每盆移栽 1 株青山杨扦插苗,每组 300 盆,共计 900 盆,定期浇水除草。在开始饲喂昆虫前(青山杨扦插苗栽植 80 d 后),从每组随机各选取 5 株样树,每株至少选取 50 小段须根根样,根据 Phillips 等[17]方法测定菌根定殖率。

1.3.2　舞毒蛾幼虫饲养

舞毒蛾卵经 10% 甲醛溶液浸泡消毒,消除病毒的影响。置于恒温培养箱孵化,温度(25 ± 1) ℃,湿度为(70 ± 1)%,光周期 16L∶8D(光照/黑暗时间为 8 h/16 h)。待幼虫孵出后用人工饲料喂养至 2 龄[18]。将刚蜕皮的 2 龄幼虫分为 3 组,每组 90 头,分别摘取栽植 80 d 后的处理组和对照组叶片进行喂养,每 2 d 更换一次叶片,观察幼虫的生长发育状况。每组的 3、4、5 龄幼虫各取 30 头,测量其体重、体长、头壳宽。用电子分析天平称量每头幼虫体重,将幼虫放在 1 mm 网格纸上测定幼虫体长和头壳宽,并拍照保存图像。

1.3.3　舞毒蛾幼虫食物利用测定

在幼虫开始进入 3 龄、4 龄、5 龄时,分别从 3 组中各选取蜕皮不超过 24 h 的幼虫 24 头,并将每组所选的幼虫分为 3 个重复,继续用对应组的叶片饲养 48 h,测定各重复组取食前鲜叶、取食后残叶和幼虫粪便的质量(湿质量);计算取食量、食物消耗率、转化率和利用率[19]。

$$I_{48} = (m_I - m_F)/(1 - L/m_I)$$

式中:I_{48} 为 48 h 幼虫取食量,g;m_I 为取食前叶片鲜质量,g;m_F 为取食后叶片鲜质量,g;L 为对照叶片失水量,g。

$$E_{AD} = I_{48}/m_E \times 100\%$$

式中:E_{AD} 为食物消耗率,%;m_E 为排粪质量,g。

$$E_{CI} = (m_{BF} - m_{BI})/(I_{48} - m_E) \times 100\%$$

式中:E_{CI} 为食物转化率,%;m_{BF} 为取食后幼虫体重,g;m_{BI} 为取食前幼虫体重,g。

$$E_{CD} = (m_{BF} - m_{BI})/I_{48} \times 100\%$$

式中:E_{CD} 为食物利用率,%。

1.3.4　解毒酶活力测定

试验期间收集各处理组新蜕皮的 4 龄和 5 龄幼虫放置于−40 ℃ 冰箱备用。取 3 头相同处理的舞毒蛾同龄幼虫放置于玻璃匀浆器中,加入 5 mL 预冷的生理盐水(0.90%NaCl),在冰浴条件下充分研磨成匀浆后倒入 10 mL 离心管中,于 4 ℃ 条件下 10 000 r/min 下离心 10 min,上清液即为酶提取液[20]。采用试剂盒测定解毒酶 ACP 和 AKP 活力,每组测 3 个重复。酶液中组织蛋白含量采用总蛋白测定试剂盒(TP)进行测定。酶活计算公式:酸性磷酸酯酶(U/g) = (测定 OD 值/标准 OD 值) × 标准管含酚的量/(待测样本蛋白浓度 × 取样量);碱性磷酸酯酶(金氏单位/g) = (测定 OD 值/标准 OD 值) × 标准管含酚的量/(待测样本蛋白浓度 × 取样量)。

1.4　数据处理与分析

各龄期舞毒蛾图像使用 Image J-v1.8.0 软件测量体长和头壳宽,采用 SPSS 19.0 对舞毒蛾幼虫体重、体长、头壳宽、取食量、食物消耗率、食物转化率、食物利用率、ACP 活性、AKP 活性进行单因素方差分析,以 LSD 法进行多重比较。使用 Excel 2016 统计数据的平均值和标准误差并做图。

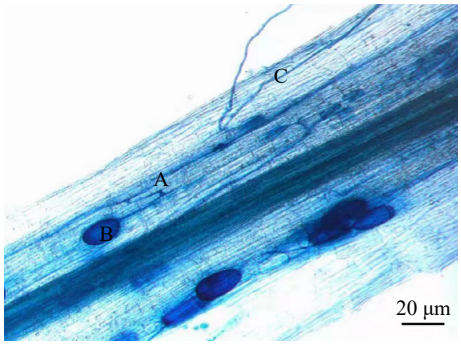
2　结果与分析

2.1　青山杨根部 GI 和 GM 的定殖率

由图 1 可知 AMF 在青山杨根系中侵染定殖成功,图中可看到丛枝、泡囊和菌丝结构。在青山杨扦插苗栽植 80 d 后,其根部 GI 和 GM 定殖率如图 2 所示。GI 定殖率为 62.1%,GM 定殖率为 60.8%,未在 CK 组中检测到菌根定殖。

2.2　GI、GM 定殖青山杨对舞毒蛾幼虫体重的影响

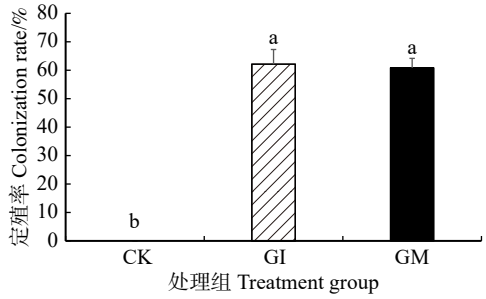
舞毒蛾幼虫取食 GI 或 GM 定殖的青山杨叶片对其体重的影响如图 3 所示。3 龄幼虫体重,GI 和



A.丛枝 Arbuscule; B.泡囊 Vesicle; C.菌丝 Hypha

图 1 青山杨根系中 AMF 的结构

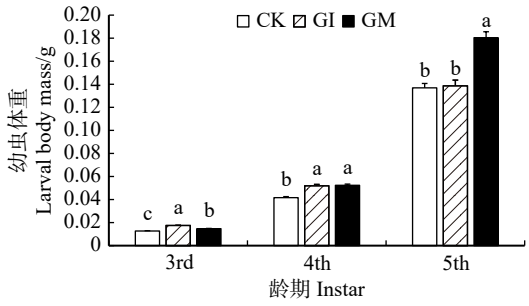
Fig. 1 Structure of AMF in the roots of *Populus pseudo-cathayana* × *P. deltoides*



CK.对照; GI.根内根孢囊霉; GM.摩西管柄囊酶。不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。数据均为平均值 ± 标准差($n = 5$)。下同。CK, control; GI, *Glomus intraradices*; GM, *Glomus mosseae*. Different lowercase letters indicate significant difference among varied groups ($P < 0.05$). The data annotation in the picture is average value ± SD ($n = 5$). The same below.

图 2 栽植 80 d 后青山杨扦插苗根部 GI、GM 的定殖率

Fig. 2 Colonization rate of GI and GM at 80 d after planting



数据均为平均值 ± 标准差($n = 30$); 不同小写字母表示同一龄期不同组之间差异显著($P < 0.05$)。下同。The data annotation in the picture is average value ± SD ($n = 30$); different lowercase letters indicate that there is significant difference among different groups at the same age ($P < 0.05$). The same below.

图 3 各试验组舞毒蛾幼虫的体重

Fig. 3 Larvae body mass of spongy moth in each treatment group

GM 组均显著高于 CK 组($P < 0.05$),同时 GI 组显著高于 GM 组($P < 0.05$)。4 龄幼虫体重,GI、GM 组均显著高于 CK 组($P < 0.05$),但 GI 组和 GM 组差异不显著($P > 0.05$)。5 龄幼虫体重,GI 组与 CK 组差异不显著,GM 组显著高于 CK 组($P < 0.05$)。

2.3 GI、GM 定殖青山杨对舞毒蛾幼虫体长和头壳宽的影响

舞毒蛾幼虫取食 GI 或 GM 定殖的青山杨叶片对其体长和头壳宽的影响分别见图 4 和图 5。3 龄幼虫体长,GI 组显著高于 CK 组和 GM 组($P < 0.05$),GM 组与 CK 差异不显著($P > 0.05$)。4 龄幼虫体长各组之间均不显著($P > 0.05$)。5 龄幼虫体长,GI 组与 CK 组差异不显著($P > 0.05$),GM 组显著高于 CK 组和 GI 组($P < 0.05$)。3 龄幼虫头壳宽,GI 组显著高于 CK 组和 GM 组($P < 0.05$),GM 组与 CK 差异不显著($P > 0.05$)。4 龄 GI 组与 CK 组和 GM 组差异均不显著($P > 0.05$),GM 组显著高于 CK 组($P < 0.05$),5 龄 GI 组和 CK 组差异不显著($P > 0.05$),GM 组显著高于 CK 组和 GI 组($P < 0.05$)。

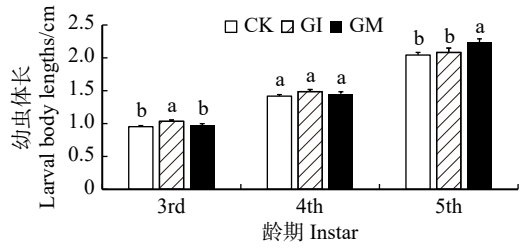


图 4 各试验组舞毒蛾幼虫的体长

Fig. 4 Larvae body length of spongy moth in each treatment group

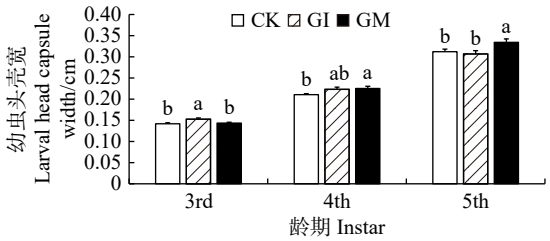
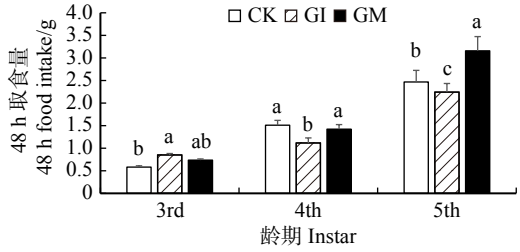


图 5 各试验组舞毒蛾幼虫的头壳宽

Fig. 5 Larvae head capsule width of spongy moth in each treatment group

2.4 GI、GM 定殖青山杨对舞毒蛾幼虫取食量的影响

GI 或 GM 定殖的青山杨叶片对舞毒蛾幼虫取食量的影响如图 6 所示。3 龄幼虫取食量,GI 组显著高于 CK 组($P < 0.05$),GM 组与 CK 组和 GI 组差



数据均为平均值 ± 标准差($n = 3$)。The data annotation in the picture is average value ± SD ($n = 3$).

图 6 各试验组舞毒蛾幼虫的取食量

Fig. 6 Larvae food intake of spongy moth in each treatment group

异均不显著($P > 0.05$);4 龄幼虫取食量,GI 组显著低于 CK 组和 GM 组($P < 0.05$),GM 组与 CK 组差异不显著($P > 0.05$)。5 龄幼虫取食量,GI 组显著低于 CK 组和 GM 组($P < 0.05$),GM 组显著高于 CK 组($P < 0.05$)。

2.5　GI、GM 定殖青山杨对舞毒蛾幼虫食物消耗率的影响

取食 GI 或 GM 处理的青山杨叶片对舞毒蛾幼虫食物消耗率的影响如图 7 所示。3 龄幼虫食物消耗率,GI 组显著高于 GM 组和 CK 组($P < 0.05$),GM 组与 CK 组差异不显著($P > 0.05$);4 龄幼虫食物消耗率,GI 组与 CK 组差异不显著($P > 0.05$),GM 组显著高于 CK 组和 GI 组($P < 0.05$);5 龄幼虫食物消耗率,各处理组间差异均不显著($P > 0.05$)。

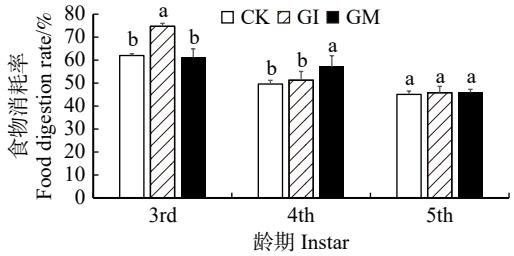


图 7　各试验组舞毒蛾幼虫的食物消耗率

Fig. 7　Larvae food digestion rate of spongy moth in each treatment group

2.6　GI、GM 定殖青山杨对舞毒蛾幼虫食物转化率的影响

取食 GI 或 GM 定殖的青山杨叶片对舞毒蛾幼虫食物转化率的影响如图 8 所示。3 龄幼虫食物转化率,GI 组与 CK 组差异不显著($P > 0.05$),GM 组显著高于 GI 组与 CK 组($P < 0.05$);4 龄幼虫食物转化率各处理组和对照组差异均不显著($P > 0.05$);5 龄幼虫食物转化率,GI 组与 CK 组和 GM 组差异均不显著($P > 0.05$),GM 组显著高于 CK 组($P < 0.05$)。

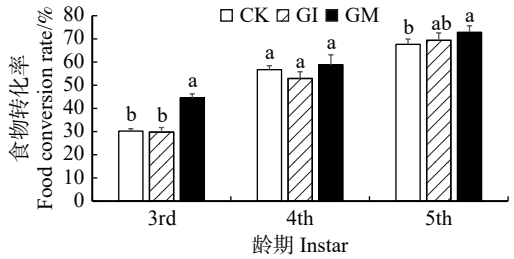


图 8　各试验组舞毒蛾幼虫的食物转化率

Fig. 8　Larvae food conversion rate of spongy moth in each treatment group

2.7　GI、GM 定殖青山杨叶片对舞毒蛾幼虫食物利用率的影响

取食 GI 或 GM 定殖的青山杨叶片对舞毒蛾幼虫食物利用率的影响如图 9 所示。GI 组食物利用率,3 龄时显著高于 CK 组($P < 0.05$),4 龄和 5 龄时 GI 组和 CK 组食物利用率差异不显著($P > 0.05$)。GM 组食物利用率,3 龄、4 龄显著高于 CK 组和 GI 组($P < 0.05$),5 龄显著高于 CK 组($P < 0.05$),与 GI 组差异不显著($P > 0.05$)。

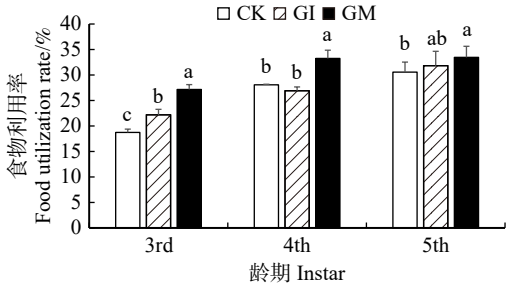


图 9　各试验组舞毒蛾幼虫的食物利用率

Fig. 9　Larvae food utilization rate of spongy moth in each treatment group

2.8　GI、GM 定殖青山杨对舞毒蛾幼虫 ACP 和 AKP 酶活性的影响

舞毒蛾幼虫取食 GI 或 GM 定殖的青山杨对其 ACP 和 AKP 的影响如图 10 和图 11 所示。ACP 活性,4 龄和 5 龄幼虫 GI 组显著低于 CK 组和 GM 组($P < 0.05$),GM 组显著高于 CK 组($P < 0.05$)。AKP 活性,4 龄幼虫 GI 组显著高于 CK 组($P < 0.05$),GM 组显著高于 CK 组和 GI 组($P < 0.05$);5 龄幼虫 GI 组显著低于 CK 组($P < 0.05$),GM 组显著高于 CK 组和 GI 组($P < 0.05$)。

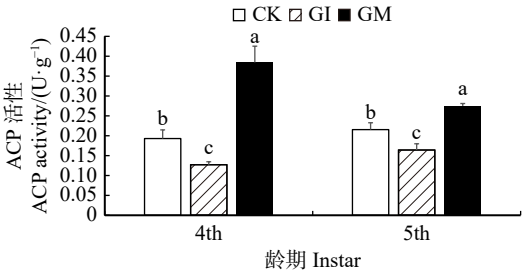


图 10　各试验组舞毒蛾幼虫 ACP 的活性

Fig. 10　Larvae acid phosphatase activity of spongy moth in each treatment group

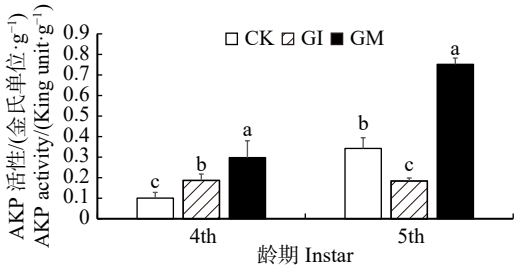


图 11　各试验组舞毒蛾幼虫 AKP 的活性

Fig. 11　Larvae alkaline phosphatase activity of spongy moth in each treatment group

3 结论与讨论

菌根定殖下植物对植食性昆虫的生长影响不尽相同[21−22]。本研究 GI 定殖的青山杨对舞毒蛾幼虫的生长发育影响呈阶段特异性，表现为：在 3、4 龄时呈促进作用，5 龄呈中性作用。而 GM 定殖的青山杨对舞毒蛾幼虫的生长发育表现出一种促进效应，表现为：体重、取食量增加，食物转化率、食物利用率提高。这表明植物对昆虫的生长受菌根的种类特异性影响。

食物消耗率、食物转换率、食物利用率是表示植食性昆虫对寄主植物取食利用效率的重要营养参数[23]。菌根定殖可能通过改变植物的物质代谢影响昆虫的食物利用。Selvaraj 等[24]发现，接种 GI 的黑吉豆（*Vigna mungo*）降低了斜纹夜蛾（*Spodoptera litura*）的食物转化率与食物利用效率，抑制了幼虫的生长。这与我们的发现不同，本研究中 GM 组舞毒蛾幼虫食物转化率、食物利用率显著提高，这与其体重增长趋势一致，舞毒蛾幼虫生长受到促进的原因可能是 GM 提高了青山杨叶片的营养，增强了舞毒蛾幼虫的嗜食性。而在 GI 定殖下的青山杨对舞毒蛾 4、5 龄幼虫的食物利用和生长表现出一种中性效应，这就凸显了菌根定殖植物后对植食性昆虫影响的特异性。

目前，大量研究指出，在多种植食性昆虫中，ACP、AKP 活性的增强对于提高昆虫应对胁迫压力的能力至关重要[25−26]。姜礅[27]研究发现，在 Zn 胁迫下，4 龄和 5 龄舞毒蛾幼虫体内的 ACP、AKP 活性均显著高于对照，发育历期没有被延长，解毒酶 ACP 和 AKP 能积极响应舞毒蛾幼虫抵御 Zn 的胁迫。本研究发现，GI 组幼虫 ACP 活性受到抑制，AKP 活性在 4 龄时高于对照但在 5 龄时 AKP 低于对照，这可能是 GI 组幼虫生长发育在 4 龄后不再显著增长的原因。GM 组幼虫 ACP 与 AKP 活性均得到显著促进且幼虫生长发育良好，说明舞毒蛾幼虫体内的解毒酶能积极响应取食接种 GM 的青山杨后的解毒过程。

同样的菌种对不同树种抗虫性的影响也呈不同的趋势。武帅[28]研究了 GI 和 GM 分别定殖银中杨（*Populus alba* × *P. berolinensis*）后对舞毒蛾的影响，结果发现：GI 和 GM 均能提高银中杨叶片的防御蛋白活性和次生代谢物含量，但对舞毒蛾的影响却不相同，GI 定殖对舞毒蛾的生长发育有促进作用，而 GM 定殖则抑制了舞毒蛾的生长与取食。而在本研究中，GI 定殖对青山杨的抗虫性起中性作用；GM 定殖降低了青山杨的抗虫性。表明 AMF 对植物和植食性昆虫的影响具有种类特异性。本研究结果为今后针对不同树种的 AMF 菌种选择和植食性昆虫生态防治提供了理论依据。

参 考 文 献

[1] Ivanov S, Austin J, Berg R H, et al. Extensive membrane systems at the host–arbuscular mycorrhizal fungus interface[J]. Nature Plants, 2019, 5(2): 194−203.

[2] Bao X Z, Wang Y T, Olsson P, et al. Arbuscular mycorrhiza under water-carbon-phosphorus exchange between rice and arbuscular mycorrhizal fungi under different flooding regimes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 129(2): 169−177.

[3] Limpens E, Geurts R. Transcriptional regulation of nutrient exchange in arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. Molecular Plant, 2018, 11(12): 1421−1423.

[4] Dabré É E, Lee S J, Hijri M, et al. The effects of mycorrhizal colonization on phytophagous insects and their natural enemies in soybean fields[J]. PLoS One, 2021, 16(9): 257−285.

[5] Vannette R L, Hunter M D. Mycorrhizal fungi as mediators of defense against insect pests in agricultural systems[J]. Agricultural and Forest Entomology, 2009, 11(4): 351−358.

[6] Wang M G, Martij B T, Wim P, et al. Effects of the timing of herbivory on plant defense induction and insect performance in ribwort plantain (*Plantago lanceolata*) depend on plant mycorrhizal status[J]. Journal of Chemical Ecology, 2015, 41(11): 1006−1017.

[7] Khaitov B, Patiño-Ruiz J D, Pina T, et al. Interrelated effects of mycorrhiza and free-living nitrogen fixers cascade up to aboveground herbivores[J]. Ecology and Evolution, 2015, 5(17): 3756−3768.

[8] Minton M M, Barber N A, Gordon L L, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on herbivory defense in two solanum (Solanaceae) species[J]. Plant Ecology and Evolution, 2016, 149(2): 157−164.

[9] 高春梅, 王淼焱, 弥岩, 等. 丛枝菌根真菌与植食性昆虫的相互作用 [J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3481−3489.
Gao C M, Wang M Y, Mi Y, et al. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and herbivorous insects[J]. Acta Ecological Sinica, 2014, 34(13): 3481−3489.

[10] 彭露, 严盈, 刘万学, 等. 植食性昆虫对植物的反防御机制 [J]. 昆虫学报, 2010, 53(5): 572−580.
Peng L, Yan Y, Liu W X, et al. Counter-defense mechanisms of phytophagous insects towards plant defense[J]. Acta Entomological Sinica, 2010, 53(5): 572−580.

[11] Si H L, Clark J M. Permethrin carboxylesterase functions as nonspecific sequestration proteins in the hemolymph of Colorado potato beetle[J]. Pesticide Biochemistry & Physiology, 1998, 62(1): 51−63.

[12] Yang M Y, Wang Z S, Macpherson M, et al. A novel *Drosophila* alkaline phosphatase specific to the ellipsoid body of the adult brain and the lower Malpighian (Renal) tubule[J]. Genetics, 2000, 154(1): 285−97.

[13] 袁志林, 潘雪玉, 靳微. 林木共生菌系统及其作用机制: 以杨树为例 [J]. 生态学报, 2019, 39(1): 381−397.
Yuan Z L, Pan X Y, Jin W. Tree-associated symbiotic microbes and underlying mechanisms of ecological interactions: a case study of poplar[J]. Acta Ecological Sinica, 2019, 39(1): 381−397.

[14] 闫永庆, 王文杰, 朱虹, 等. 混合盐碱胁迫对青山杨渗透调节物质及活性氧代谢的影响 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2085−2091.
Yan Y Q, Wang W J, Zhu H, et al. Effects of salt-alkali stress on osmoregulation substance and active oxygen metabolism of Qingshan poplar (*Populus pseudo-cathayana* × *P. deltoides*)[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(9): 2085−2091.

[15] 张丽茹. 舞毒蛾的生物学特性及综合防治技术 [J]. 现代农业科技, 2020(6): 116−117.
Zhang L R. Biological characteristics and comprehensive control techniques of *Lymantria dispar*[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(6): 116−117.

[16] 丁峰, 高宗川. 舞毒蛾生物学特性观察及综合防治技术研究 [J]. 中国林副特产, 2016, 4(5): 36−37.
Ding F, Gao Z C. Study on biological characteristics and integrated control techniques of *Lymantria dispar*[J]. Chinese Forest Products, 2016, 4(5): 36−37.

[17] Phillips J M. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55(1): 158−161.

[18] Jiang D, Zhou Y T, Tan M T, et al. Cd exposure-induced growth retardation involves in energy metabolism disorder of midgut tissues in the gypsy moth larvae[J]. Environmental Pollution, 2020, 266(3): 115−147.

[19] Wang Z Y, Nur F A, Ma J Y, et al. Effects of poplar secondary metabolites on performance and detoxification enzyme activity of *Lymantria dispar*[J]. Comparative Biochemistry and Physiology, 2019, 225: 108−117.

[20] 苑冉, 李欣悦, 吴韶平, 等. CO_2 浓度升高对舞毒蛾生长发育和体内解毒酶及保护酶活性的影响 [J]. 林业科学, 2018, 54(12): 102−109.
Yuan R, Li X Y, Wu S P, et al. Effects of elevated CO_2 concentration on growth and development of *Lymantria dispar* (Lepidoptera: Lymantridae), as well as on activities of detoxifying enzymes and protective enzymes in the body[J]. Scientla Silvae Sinicae, 2018, 54(12): 102−109.

[21] Real-Santillán R O, Del-Val E, Cruz-Ortega R, et al. Increased maize growth and P uptake promoted by arbuscular mycorrhizal fungi coincide with higher foliar herbivory and larval biomass of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda*[J]. Mycorrhiza, 2019, 29(6): 615−622.

[22] Flavia D, Benedikt K, Stefan V, et al. Multitrophic interactions among western corn rootworm, *Glomus intraradices* and microbial communities in the rhizosphere and endorhiza of maize[J]. Frontiers in Microbiology, 2013, 4(1): 357−368.

[23] Malik R J, Ali J G, Bever J D, et al. Mycorrhizal composition influences plant anatomical defense and impacts herbivore growth and survival in a life-stage dependent manner[J]. Pedobiologia, 2017, 66(1): 29−35.

[24] Selvaraj A, Thangavel K, Uthandi S, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus intraradices*) and diazotrophic bacterium (*Rhizobium* BMBS) primed defense in blackgram against herbivorous insect (*Spodoptera litura*) infestation[J]. Microbiological Research, 2020, 231(C): 126−160.

[25] 鲁艺芳, 石蕾, 严善春. 不同光照强度对兴安落叶松几种主要防御蛋白活力的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3621−3627.
Lu Y F, Shi L, Yan S C. Effects of different light intensities on activities of the primary defence proteins in needles of *Larix gmelinlii*[J]. Acta Ecological Sinica, 2012, 32(11): 3621−3627.

[26] 张凯, 周艳涛, 王晢玮, 等. 铜、镉胁迫对舞毒蛾排毒代谢酶的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(2): 61−67.
Zhang K, Zhou Y T, Wang X W, et al. Effects of copper and cadmium stress on the activities of detoxifying metabolic enzymes in *Lymantria dispar*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(2): 61−67.

[27] 姜礅. 重金属胁迫下银中杨抗虫性及食叶害虫舞毒蛾解毒机制研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
Jiang D. Study on the insect resistance of *Populus alba* × *P. berolinensis* and the detoxification mechanism of defoliator, *Lymantria dispar* under heavy metal stress[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019.

[28] 武帅. 丛枝菌根真菌定殖对银中杨生长及抗虫性的影响 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
Wu S. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi colonization on growth and insect resistance of *Populus alba* × *P. berolinensis*[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.

（责任编辑　范　娟
责任编委　张　真）