抗生素处理肠道菌对黏虫生长发育及繁殖的影响



张 熙[1] 樊自成[1] 顾慧敏[1] 蒋苏皖[1] 程云霞[2] 张 蕾[2]
江幸福[2*] 孔海龙[1*]

（1. 扬州大学植物保护学院，江苏 扬州 225009；2. 中国农业科学院植物保护研究所，
植物病虫害综合治理全国重点实验室，北京 100193）

摘要：为制订靶向黏虫 *Mythimna seperata* 肠道菌的防治策略，通过饲喂含0.125、0.25、0.5、1.0和2.0 g/L抗生素的人工饲料来清除黏虫肠道菌，测定取食含不同浓度抗生素的人工饲料对黏虫生长发育和繁殖的影响。结果显示：不同浓度抗生素对黏虫幼虫发育历期、存活率、化蛹率、蛹重、羽化率、产卵前期、产卵量和成虫寿命均有显著影响。随着抗生素浓度的增加，幼虫和蛹的发育历期逐渐延长，幼虫存活率、化蛹率、蛹重和羽化率逐渐降低，产卵前期逐渐延长，成虫寿命逐渐缩短，产卵量逐渐减少。表明抗生素清除肠道菌不利于黏虫的生长发育和繁殖。

关键词：抗生素；肠道菌；黏虫；生长发育；繁殖

Effects of antibiotic-mediated gut microbiota depletion on the growth, development, and reproduction of oriental armyworm *Mythimna separata*

Zhang Xi[1] Fan Zicheng[1] Gu Huimin[1] Jiang Suwan[1] Cheng Yunxia[2] Zhang Lei[2]
Jiang Xingfu[2*] Kong Hailong[1*]

（1. College of Plant Protection, Yangzhou Univerisity, Yangzhou 225009, Jiangsu 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）

Abstract: To develop control strategies targeting the gut microbiota of oriental armyworm *Mythimna separata*, larvae were fed artificial diets supplemented with antibiotics at concentrations of 0.125, 0.25, 0.5, 1.0 and 2.0 g/L to eliminate their bacteria. The effects of different antibiotic concentrations on the growth, development and reproduction of *M. separata* were subsequently evaluated. The results revealed that treatment significantly affected larval developmental duration, larval survival rate, pupation rate, pupal weight, adult emergence rate, pre-oviposition period, fecundity and adult lifespan. As the antibiotic concentration increased, larval and pupal developmental durations were progressively prolonged, whereas larval survival rate, pupation rate, pupal weight and adult emergence rate gradually decreased. In addition, the pre-oviposition period was extended, adult lifespan shortened, and fecundity declined. These results indicate that antibiotic-mediated depletion of gut bacteria adversely affects the growth, development and reproduction of *M. separata*.

Key words: antibiotics; gut microbiota; *Mythimna separata*; growth and development; reproduction

黏虫 *Mythimna separata* 是全球重大迁飞性害 虫，广泛分布于东亚和澳洲，具有极强跨区域扩散致

基金项目：国家自然科学基金项目(32472540，32172397)

* 通信作者（Authors for correspondence），E-mail：xfjiang@ippcaas.cn，khl2504@126.com

收稿日期：2026-02-24

灾能力（Tong et al.，2022）。该虫幼虫可直接取食为害，其中低龄幼虫啃食叶肉形成白斑孔洞；3龄后幼虫可短时间内啃净玉米、小麦、水稻等作物全部叶片，严重时咬断麦穗、稻穗，田间虫口密度较大时，幼虫会成群跨田迁移扩散（刘杰等，2020；江幸福等，2022）。该虫成虫具有极强的远距离迁飞能力，羽化后依靠花蜜完成营养补充、交配产卵，单雌产卵量最高可达2 000粒；大量迁飞成虫跨区域降落产卵是诱发大范围虫害暴发的主要原因（江幸福等，2014a，b；Cang et al.，2023）。该害虫造成的作物产量损失严重，重发田块作物减产超过50%，极端暴发年份局部地块近乎绝收。近些年受全球气候变暖、全国玉米种植面积扩大、秸秆还田耕作模式普及等多因素叠加影响，黏虫区域性集中暴发频次持续上升，危害范围与损失程度逐年加重（孙嵬和高月波，2025）。当前农业生产中仍高度依赖广谱化学药剂开展应急防治，高频化学施药会持续杀伤瓢虫、寄生蜂等天敌昆虫，破坏农田昆虫群落平衡，同时易引起害虫产生抗药性，形成“频繁施药–抗性提升–虫害反弹”的恶性循环，亟需开发环境友好、靶向精准的绿色防控新技术（张娜等，2022）。

昆虫肠道中存在大量肠道细菌，包括泛生菌属*Pantoea*、葡萄球菌属*Staphylococcus*、变形杆菌属*Proteus*、芽胞杆菌属*Bacillus*、假单胞杆菌属*Pseudomonas*、肠球菌属*Enterococcus*及克雷伯氏菌属*Klebsiella*等（何彩，2012）。这些肠道菌群通过营养代谢、免疫防御、激素调控与抗氧化应激多通路协同调控昆虫生长发育与繁殖（Lv et al.，2024）。首先，肠道菌群在宿主营养代谢过程中发挥着重要作用。意大利蜜蜂*Apis mellifera*、家蚕*Bombyx mori*与东亚飞蝗*Locusta migratoria manilensis*肠道共生菌可分泌多种消化酶分解吸收大分子物质，菌群缺失会直接抑制宿主营养吸收效率，阻碍细胞增殖与组织分化，最终造成幼虫和蛹发育滞缓（Wang YK et al.，2024；Haider et al.，2025）；菌群失衡会大幅削弱幼虫营养吸收效率，造成能量储备不足，导致蛹重下降，甚至部分个体不能正常化蛹（Yang et al.，2026）。其次，肠道菌群直接影响幼虫的免疫防御能力。斜纹夜蛾*Spodoptera littoralis*、红棕象甲*Rhynchophorus ferrugineus*等幼虫肠道菌通过协同免疫机制抵御外源致病菌，一是可诱导抗菌肽基因表达，从而构建黏膜免疫屏障；二是通过营养位点竞争、分泌抑菌代谢物抑制外源致病菌定殖入侵（Li et al.，2023）。再次，肠道菌群参与昆虫体内激素的调控。Chu et al.（2025）研究发现草地贪夜蛾*Spodoptera frugiperda*肠道共生菌通过代谢产物调控保幼激素III与蜕皮激素信号通路，促进卵黄蛋白表达与卵巢卵黄沉积，缩短产卵前期，提升产卵总量，其体内魁北克肠球菌*Enterococcus quebecensis*、霍氏肠杆菌*Enterobacter hormaechei*、密歇根克雷伯氏菌*Klebsiella michiganensis*三类核心功能菌缺失后，激素稳态失衡，卵巢发育受阻，产卵前期延长，产卵量大幅下降。最后，肠道菌群可清除昆虫代谢产生的活性氧，缓解氧化应激损伤，延缓机体衰老。因此，抗生素处理肠道菌会显著影响昆虫的生长发育。例如，抗生素处理果蝇后，肠道优势共生菌*Acetobacter pomorum*被清除，宿主胰岛素信号通路活性下调，营养代谢稳态失衡，致使幼虫生长周期延长（Shin et al.，2011）；抗生素处理后金斑蝶*Danaus chrysippus*和细纹波蛱蝶*Ariadne merione*幼虫内肠道菌群数量大量减少，但幼虫的死亡率和发育周期无显著变化（Phalnikar et al.，2019）；抗生素处理蟑螂肠道后，其肠道免疫防御能力显著下降，肠道中条件致病菌极易穿透肠壁，侵入肠组织，诱发肠道损伤，导致若虫死亡（Turner et al.，2024）。抗生素处理后昆虫肠道菌群失衡，体内活性氧持续累积，细胞与组织氧化损伤加剧，生理机能快速衰退，成虫寿命随之明显缩短（Wang HF et al.，2024）；喂食含抗生素饲料清除马铃薯块茎蛾*Phthorimaea operculella*幼虫肠道肠球菌后，幼虫碳水化合物代谢能力受阻，幼虫存活率大幅下降，发育历期明显延长（Zhang et al.，2025）。关于抗生素处理对黏虫生长发育和繁殖的影响尚不清楚。

为明确肠道菌对黏虫生长发育及繁殖的影响，将不同浓度抗生素添加到人工饲料中，用其饲喂黏虫幼虫并测定幼虫和蛹的发育历期、存活率、化蛹率、蛹重、羽化率、产卵前期、产卵量和寿命等参数，从而阐明抗生素处理对黏虫生长发育与繁殖的影响，以期为制订靶向黏虫肠道菌的防控策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试虫源：黏虫为室内繁殖饲养种群，卵由中国农业科学院植物保护研究所迁飞害虫组提供。将黏虫卵置于温度（23±1）℃、相对湿度（70±5）%的人工气候培养箱中孵化，取孵化后幼虫置于直径9.5 cm、高5.5 cm的圆形塑料盒中，用自制的人工饲料饲养，每天更换饲料。化蛹后取雌雄配对并转移至直径

6 cm、高 18 cm的圆柱形透明塑料罐中，每罐1对。羽化后成虫用10%蔗糖溶液饲喂，并在塑料罐内固定聚丙烯塑料绳便于试虫产卵，取2龄幼虫供试。

LB(Luria-Bertani)固体培养基:胰蛋白胨10.0 g/L、酵母提取物5.0 g/L、NaCl 10 g/L、琼脂2%，pH 7.0。

人工饲料：玉米粉120 g、黄豆粉34 g、酵母68 g、干酪素7.5 g、蔗糖28 g、山梨酸1.5 g、对羟苯甲酸1.5 g、胆固醇1 g、抗坏血酸5 g、复合维生素9.8 g、琼脂25 g、水1 000 g。

试剂和仪器：本研究所用试剂均为国产分析纯。PYX-300Q-B型人工气候培养箱，广东韶关科力科学仪器厂；6孔细胞培养板；长沙博瑞远生物科技有限公司；SZ680连续变倍体视显微镜，重庆奥特光学仪器有限责任公司。

1.2 方法

1.2.1 抗生素对黏虫肠道菌清除效果的测定

取庆大霉素、链霉素和青霉素按质量比1∶1∶1混合，各取0.125、0.25、0.5、1.0和2.0 g，放入1 000 g饲料中，搅拌均匀后即获得含0.125、0.25、0.5、1.0和2.0 g/L复合抗生素的人工饲料。取含0.125、0.25、0.5、1.0和2.0 g/L复合抗生素的人工饲料切成边长为1 cm的方形切块，置于直径9.5 cm、高5.5 cm的圆形塑料盒中，再取大小一致、健康的黏虫2龄幼虫置于盒中，每盒10头，以饲喂未添加抗生素人工饲料的试虫为对照，待幼虫发育至5龄，饥饿处理24 h后，用75%乙醇擦拭虫体体表，无菌水漂洗两次。用解剖刀剖开试虫，取出肠道组织(含内容物)，用磷酸盐缓冲溶液(phosphate buffer saline，PBS)漂洗两次，将组织转移至装有100 μL无菌水的1.5 mL无菌离心管中，使用无菌研磨棒充分研磨，制得肠道匀浆液。用无菌水将肠道匀浆液分别稀释1 000倍，取100 μL匀浆液涂布于LB固体平板上，置于37 ℃恒温培养箱中培养24 h后观察菌落生长情况并拍照。

1.2.2 抗生素对黏虫生长发育和繁殖影响的测定

随机挑选大小一致的黏虫2龄幼虫，用柔软毛笔将其转移至6孔细胞培养板中，每孔1头。从转移当日开始，每天定时投喂含0.125、0.25、0.5、1.0和2.0 g/L复合抗生素的人工饲料，每孔2 g。每个处理3个重复，每个重复30头试虫。每日早08: 00和晚20: 00各观察1次，记录幼虫存活数量、存活时间和化蛹等情况，计算幼虫历期、存活率和化蛹率。化蛹后，使用精度为0.01 mg的电子分析天平称量蛹重，并持续观察和记录蛹的发育历期。待蛹羽化后，计算羽化率。成虫羽化后，将同期羽化后24 h的雌、雄成虫按1∶1配对，并转移至直径6 cm、高18 cm的圆柱形透明塑料罐中，每罐1对。每个罐内放入蘸有10%蔗糖溶液的脱脂棉球供成虫取食，并固定一根聚丙烯塑料绳供其产卵。每日定时更换新鲜蔗糖溶液，并检查成虫存活情况，记录每头成虫的死亡时间，即成虫寿命。同时，观察塑料绳，记录从成虫羽化到首次发现卵粒的时间，即产卵前期。自开始产卵起，每日更换塑料绳，并于体视显微镜下统计卵数量，直至雌成虫死亡，从而得到单雌产卵量。整个试验均在温度(23±1) ℃、相对湿度(70±5)%、光周期16 L∶8 D的人工气候箱内进行。

1.3 数据分析

采用SPSS 23.0软件对试验数据进行单因素方差分析，应用Duncan氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 抗生素对黏虫肠道菌的清除效果

随着复合抗生素浓度的增加，黏虫5龄幼虫肠道菌的数量明显减少(图1)。

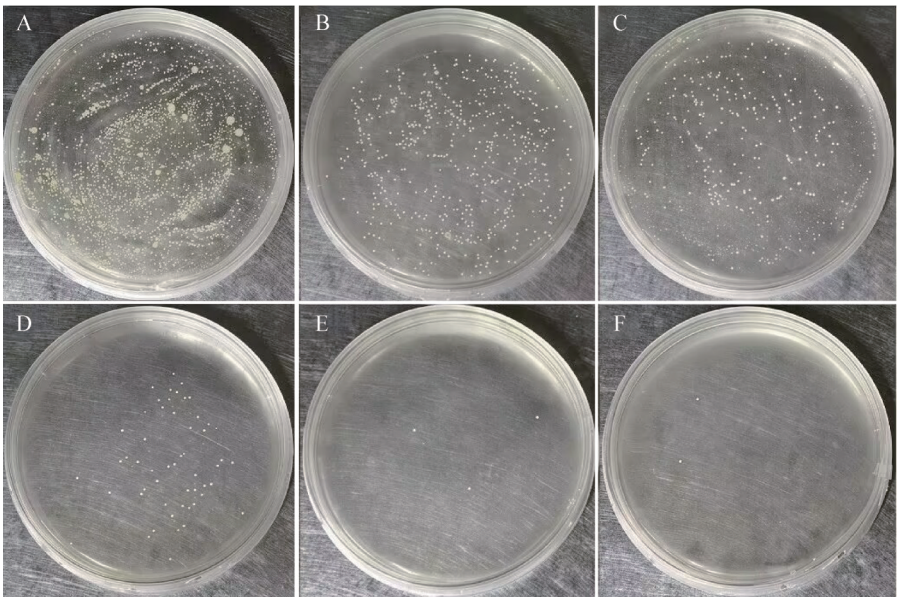
2.2 抗生素对黏虫幼虫发育历期和存活率的影响

抗生素对黏虫幼虫的发育历期和存活率有显著影响。当抗生素浓度为0.25 g/L时，黏虫幼虫的发育历期为25.60 d，显著长于对照(P<0.05)；当抗生素浓度为0.5 g/L时，幼虫的发育历期为27.92 d，显著长于0.125 g/L和0.25 g/L浓度处理及对照(P<0.05)；当抗生素浓度大于1.0 g/L后，幼虫的发育历期继续延长，但与0.5 g/L浓度处理无显著差异(表1)，表明随着抗生素浓度增加，黏虫幼虫的历期逐渐延长。当抗生素浓度为0.25、0.5和1.0 g/L时，黏虫幼虫的存活率分别为50.00%、43.33%和40.00%，均显著低于0.125g/L浓度处理和对照(P<0.05)；当抗生素浓度为2.0 g/L时，幼虫的存活率最低，为26.67%，显著低于其他大部分处理(P<0.05，表1)，表明随着抗生素浓度增加，黏虫幼虫存活率逐渐下降。

2.3 抗生素对黏虫蛹发育和蛹重的影响

抗生素对黏虫蛹的发育历期影响显著。当抗生素浓度为0.25 g/L时，黏虫蛹的发育历期为12.92 d，显著长于对照(P<0.05)；当抗生素浓度为0.5 g/L时，蛹的发育历期为14.80 d，显著长于0.125 g/L和0.25 g/L浓度处理及对照(P<0.05)；当抗生素浓度高于1.0 g/L后，蛹的发育历期继续延长，但与0.5 g/L浓度处理无显著差异(表1)，表明随着抗生素浓度

增加，蛹的发育历期逐渐延长。



A：对照；B~F：抗生素浓度分别为0.125、0.25、0.5、1.0和2.0 g/L。A: CK; B−F: antibiotic concentrations of 0.125, 0.25, 0.5, 1.0 and 2.0 g/L, respectively.

图1 不同浓度抗生素对黏虫幼虫肠道菌的清除效果

Fig. 1 Effects of different antibiotic concentrations on gut microbiota depletion in *Mythimna separata* larvae

表1 不同浓度抗生素对黏虫生长发育和繁殖的影响

Table 1 Effects of different antibiotic concentrations on the growth, development and reproduction of *Mythimna separata*

抗生素浓度 Antibiotic concentration/(g/L)	发育历期 Developmental period/d		幼虫存活率 Larval survival rate/%	化蛹率 Pupation rate/%	蛹重 Pupa weight/mg
	幼虫 Larva	蛹 Pupa			
CK	23.63±0.74 c	11.86±0.30 c	83.33±3.33 a	73.33±3.33 a	290.16±7.03 a
0.125	25.17±0.56 bc	12.45±0.39 bc	80.00±5.77 a	66.67±6.67 a	288.67±6.61 a
0.25	25.60±0.97 b	12.92±0.31 b	50.00±5.77 b	46.67±6.67 b	273.20±10.26 ab
0.5	27.92±0.59 a	14.80±0.36 a	43.33±3.33 b	36.67±3.33 bc	269.15±8.66 abc
1.0	28.50±0.65 a	14.89±0.20 a	40.00±5.77 bc	36.67±8.82 bc	257.92±16.27 bc
2.0	29.38±0.56 a	15.50±0.65 a	26.67±3.33 c	23.33±3.33 c	238.13±13.69 c

抗生素浓度 Antibiotic concentration/(g/L)	羽化率 Adult emergence rate/%	成虫寿命 Adult longevity/d	产卵前期 Pre-oviposition period/d	产卵量 Fecundity
CK	84.27±3.23 a	9.95±0.22 a	6.57±0.18 b	298.50±8.90 a
0.125	83.20±4.20 a	9.75±0.23 ab	7.05±0.17 ab	278.29±5.68 ab
0.25	79.43±2.41 a	9.50±0.31 ab	7.08±0.26 ab	281.40±14.49 ab
0.5	76.67±1.67 a	9.10±0.23 bc	7.20±0.25 ab	271.75±13.46 b
1.0	73.90±3.88 a	8.44±0.41 c	7.22±0.32 ab	257.67±13.69 b
2.0	50.00±9.64 b	8.00±0.41 c	7.50±0.29 a	173.50±12.50 c

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示不同抗生素浓度处理之间经Duncan氏新复极差法检验差异显著（$P<0.05$）。Data are mean±SD. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among antibiotic concentration treatments according to Duncan's new multiple range test ($P<0.05$).

抗生素对化蛹率影响显著。当抗生素浓度为0.125 g/L时，黏虫化蛹率为66.67%，与对照差异不显著；当抗生素浓度为0.25 g/L时，黏虫化蛹率为46.67%，显著低于对照（$P<0.05$）；当抗生素浓度为0.5 g/L和1.0 g/L时，黏虫化蛹率均为36.67%，显著低于0.125 g/L浓度处理和对照（$P<0.05$），但与0.25 g/L

浓度处理差异不显著；当抗生素浓度为2.0 g/L时，黏虫化蛹率最低，为23.33%，显著低于0.125 g/L和0.25 g/L浓度处理及对照（P<0.05，表1），且蛹出现畸形。

抗生素对蛹重影响显著。当抗生素浓度为1.0 g/L时，黏虫蛹重为257.92 mg，显著低于0.125 g/L浓度处理和对照（P<0.05）；当抗生素浓度为2.0 g/L时，蛹重最低，仅为238.13 mg，显著低于0.125 g/L和0.25 g/L浓度处理及对照（P<0.05，表1），表明随着抗生素浓度增加，蛹重逐渐降低。

2.4 抗生素对黏虫羽化率和产卵前期的影响

抗生素对黏虫成虫羽化率和产卵前期有较大影响。当抗生素浓度为0.125、0.25、0.5和1.0 g/L时，黏虫成虫羽化率分别为83.20%、79.43%、76.67%和73.90%，与对照差异不显著；当抗生素浓度为2.0 g/L时，成虫羽化率最低，仅为50.00%，显著低于其他处理（P<0.05），且成虫出现不能正常羽化的现象（表1），表明随着抗生素浓度增加，黏虫成虫羽化率逐渐下降。当抗生素浓度为0.125、0.25、0.5和1.0 g/L时，黏虫产卵前期分别为7.05、7.08、7.20和7.22 d，与对照差异不显著；当抗生素浓度为2.0 g/L时，黏虫产卵前期最长，为7.50 d，且显著长于对照（P<0.05，表1），表明随着抗生素浓度增加，黏虫产卵前期逐渐延长。

2.5 抗生素对黏虫寿命和产卵量的影响

抗生素处理对黏虫成虫寿命和产卵量有显著影响。当抗生素浓度为0.125 g/L和0.25 g/L时，黏虫成虫寿命分别为9.75 d和9.50 d，与对照差异不显著；当抗生素浓度为0.5 g/L时，成虫寿命为9.10 d，显著低于对照（P<0.05）；当抗生素浓度高于1.0 g/L时，成虫寿命继续缩短，与0.5 g/L浓度处理差异不显著，但均显著低于0.125 g/L和0.25 g/L浓度处理及对照（P<0.05，表1），表明随着抗生素浓度增加，黏虫成虫寿命逐渐延长。当抗生素浓度为0.125 g/L和0.25 g/L时，黏虫单雌产卵量分别为278.29粒和281.40粒，与对照差异不显著；当抗生素浓度为0.5 g/L和1.0 g/L时，单雌产卵量继续下降，分别为271.75粒和257.67粒，显著低于对照（P<0.05）；当抗生素浓度为2.0 g/L时，单雌产卵量最低，仅为173.50粒，显著低于其他处理（P<0.05，表1），表明随着抗生素浓度增加，单雌产卵量逐渐下降。

3 讨论

饲喂添加抗生素的人工饲料是清除昆虫肠道菌群的主要方法。例如，随着环丙沙星添加浓度（0.125~128 μg/mL）的升高，梨小食心虫*Grapholita molesta*幼虫肠道菌群数量持续下降，肠道菌相对丰度大幅削减，群落多样性指数同步降低（Zhang et al.，2022）；随着人工饲料中土霉素添加浓度（0、40和80 mg/kg）增加，橘小实蝇*Bactrocera dorsalis*幼虫肠道总菌量持续下降，有益乳酸菌丰度大幅削减（Yang et al.，2026）。本研究将庆大霉素、链霉素和青霉素等比例混合后分别按照0.125、0.25、0.5、1.0、2.0 g/L梯度添加到黏虫人工饲料中，结果显示随着抗生素浓度逐渐升高，黏虫幼虫肠道菌群数量逐级显著减少，与已有研究结果一致。

抗生素处理肠道菌可抑制昆虫生长发育，降低存活率与蛹重。例如，沈金红等（2018）用1 mg/mL左氧氟沙星、1 mg/mL环丙沙星、2 mg/mL甲硝唑混合药液处理的萝卜*Raphanus sativus*苗饲喂小菜蛾*Plutella xylostella*后，其幼虫生长发育明显延缓；Zhang et al.（2022）研究发现持续饲喂复合抗生素后梨小食心虫幼虫的发育历期显著延长。Chu et al.（2013）试验结果表明0、50和400 mg/L复合抗生素（红霉素、庆大霉素、卡那霉素和四环素混合物）处理后西方玉米根虫*Diabrotica virgifera*的存活率大幅下降；Gowthami et al.（2019）用头孢克肟处理的甘蓝*Brassica oleracea*叶片饲喂小菜蛾后，其幼虫存活率明显降低；沈金红等（2018）研究结果显示抗生素处理可延长小菜蛾幼虫的发育历期，显著降低蛹重和化蛹率；张琪文等（2019）也发现复合抗生素（氨苄青霉素、硫酸链霉素、利福平）处理后橘小实蝇不育雄虫的蛹重显著低于对照。本研究发现随着抗生素浓度增加，黏虫幼虫和蛹的发育历期逐渐延长，幼虫存活率、化蛹率与蛹重均逐渐下降，与已有研究结果一致。

本研究结果显示抗生素处理会显著影响黏虫成虫的繁殖与寿命，且随着抗生素浓度升高，成虫羽化率逐渐下降，产卵前期逐渐延长，单雌产卵量逐渐减少，成虫寿命逐渐缩短。在其他植食性昆虫中也有类似的报道。例如，Fu et al.（2021）研究表明抗生素处理橘小实蝇后，其肠道内共生菌总量显著降低，产卵前期显著延长；沈金红等（2018）发现经抗生素处理小菜蛾肠道后，其产卵量下降，寿命明显缩短；Prado & Almeida（2009）通过卵块消毒阻断绿蝽*Nezara viridula*肠道共生菌传递后，其成虫产卵量显著降低。此外，本研究还发现低浓度抗生素（≤1.0 g/L）对黏虫成虫羽化率无显著影响，而当抗生素浓度较

高时（2.0 g/L），黏虫羽化率则显著下降；但沈金红等（2018）研究发现抗生素对小菜蛾成虫羽化率无明显影响，推测抗生素处理对成虫羽化率的影响与昆虫种类有关。

综上所述，抗生素清除肠道菌对黏虫幼虫发育分期、存活率、化蛹率、蛹重、成虫寿命、羽化率及成虫产卵量等产生负面效应，证实肠道菌群是调控黏虫生长发育与种群繁殖的关键因子，这为开发靶向肠道菌的黏虫绿色防控策略提供了理论支撑。后续研究可分离纯化黏虫不同肠道优势菌群种，构建无菌黏虫品系，研究不同肠道菌在黏虫营养吸收、免疫、抗逆、生殖发育中的重要功能，为深入探索基于靶向肠道菌的黏虫绿色防控技术提供新方法。此外，本研究仅在实验室人工饲养条件下开展试验，田间寄主植物、环境温度、天敌胁迫等环境因子也会改变黏虫肠道菌群组成，因此需要在田间进一步验证。

参 考 文 献（References）

Cang XZ, Zhao SY, Yang XQ, Yuan HB, Liu J, Liu DZ, Yang XM, Wu KM, 2023. Migration monitoring and route analysis of the oriental armyworm *Mythimna separata* (Walker) in Northeast China[J]. Agronomy, 13(1): 172

Chu B, Ge SS, He W, Sun XT, Ma JJ, Yang XM, Lv CY, Xu PJ, Zhao XC, Wu KM, 2025. Gut symbiotic bacteria enhance reproduction in *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) by regulating juvenile hormone III and 20-hydroxyecdysone pathways[J]. Microbiome, 13(1): 132

Chu CC, Spencer JL, Curzi MJ, Zavala JA, Seufferheld MJ, 2013. Gut bacteria facilitate adaptation to crop rotation in the western corn rootworm[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 110(29): 11917–11922

Fu JJ, Zeng LY, Zheng LY, Bai ZZ, Li ZH, Liu LJ, 2021. Comparative transcriptomic analyses of antibiotic-treated and normally reared *Bactrocera dorsalis* reveals a possible gut self-immunity mechanism[J]. Frontiers in Cell and Developmental Biology, 9: 647604

Gowthami R, Muthukrishnan N, Natarajan N, Raveendran M, Nakkeeran S, Balachandar D, 2019. Screening of antibiotics to alter the *Plutella xylostella* L. (Plutellidae: Lepidoptera) gut microbial diversity[J]. International Journal of Farm Sciences, 9(1): 131–136

Haider K, Abbas D, Galian J, Ghafar MA, Kabir K, Ijaz M, Hussain M, Khan KA, Ghramh HA, Raza A, 2025. The multifaceted roles of gut microbiota in insect physiology, metabolism, and environmental adaptation: implications for pest management strategies[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 41(3): 75

He C, 2012. Molecular identification of the intestinal bacterial community of *Mythimna separata* (Walker) larvae[D]. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [何彩, 2012. 粘虫幼虫肠道细菌群的分子鉴定[D]. 杨凌: 西北农林科技大学]

Jiang XF, Zhang L, Cheng YX, Luo LZ, 2014a. Current status and trends in research on the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker) in China[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 51(4): 881–889 [(in Chinese) [江幸福, 张蕾, 程云霞, 罗礼智, 2014a. 我国粘虫研究现状及发展趋势[J]. 应用昆虫学报, 51(4): 881–889]

Jiang XF, Zhang L, Cheng YX, Luo LZ, 2014b. Novel features, occurrence trends and economic impact of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker) in China[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 51(6): 1444–1449 (in Chinese) [江幸福, 张蕾, 程云霞, 罗礼智, 2014b. 我国粘虫发生危害新特点及趋势分析[J]. 应用昆虫学报, 51(6): 1444–1449]

Jiang XF, Zhang L, Luo LZ, 2022. Academician Li Guangbo's contribution to the research on the overwintering, migration regularity and behavior mechanism of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker): to commemorate the 100th anniversary of the birth of Academician Li Guangbo[J]. Plant Protection, 48(3): 3–8 (in Chinese) [江幸福, 张蕾, 罗礼智, 2022. 李光博院士在中国黏虫越冬迁飞规律与行为机制研究中的贡献: 纪念李光博院士诞辰100周年[J]. 植物保护, 48(3): 3–8]

Li YZ, Chang LY, Xu K, Zhang SH, Gao FJ, Fan YS, 2023. Research progresses on the function and detection methods of insect gut microbes[J]. Microorganisms, 11(5): 1208

Liu J, Yang JJ, Zhang Z, Wang CR, Song ZY, Jiang YY, 2020. Analysis on occurrence characteristics of *Mythimna separata* (Walker) in 2018[J]. Plant Protection, 46(1): 229–233 (in Chinese) [刘杰, 杨俊杰, 张智, 王春荣, 宋振宇, 姜玉英, 2020. 2018年我国黏虫发生特点分析[J]. 植物保护, 46(1): 229–233]

Lv C, Huang YZ, Luan JB, 2024. Insect-microbe symbiosis-based strategies offer a new avenue for the management of insect pests and their transmitted pathogens[J]. Crop Health, 2(1): 18

Phalnikar K, Kunte K, Agashe D, 2019. Disrupting butterfly caterpillar microbiomes does not impact their survival and development[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 286(1917): 20192438

Prado SS, Almeida RPP, 2009. Role of symbiotic gut bacteria in the development of *Acrosternum hilare* and *Murgantia histrionica*[J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 132(1): 21–29

Shen JH, Wang Q, Xia XF, You MS, 2018. Effect of antibiotics and gut bacteria on fitness of diamondback moth *Plutella xylostella* (L.)[J]. Acta Microbiologica Sinica, 58(6): 1025–1035 (in Chinese) [沈金红, 王倩, 夏晓峰, 尤民生, 2018. 抗生素和肠道细菌对小菜蛾适合度的影响[J]. 微生物学报, 58(6): 1025–1035]

Shin SC, Kim SH, You H, Kim B, Kim AC, Lee KA, Yoon JH, Ryu JH, Lee WJ, 2011. *Drosophila microbiome* modulates host developmental and metabolic homeostasis *via* insulin signaling[J]. Science, 334(6056): 670–674

Sun W, Gao YB, 2025. Population origin, damage characteristics, and migration pathways of the oriental armyworm *Mythimna separata* in Northeast China[J]. Journal of Plant Protection, 52(3): 527–538 (in Chinese) [孙嵬, 高月波, 2025. 东北地区黏虫种群来源、为害特征及去向[J]. 植物保护学报, 52(3): 527–538]

Tong DD, Zhang L, Wu NN, Xie DJ, Fang GQ, Coates BS, Sappington TW, Liu YQ, Cheng YX, Xia JX, et al., 2022. The oriental armyworm genome yields insights into the long-distance migration of noctuid moths[J]. Cell Reports, 41(12): e111843

Turner M, Van Hulzen L, Guse K, Agany D, Pietri JE, 2024. The gut microbiota confers resistance against *Salmonella typhimurium* in cockroaches by modulating innate immunity[J]. iScience, 27(12): 111293

Wang HF, Chen WF, Lei L, Zhang W, Liu ZG, Wang Y, Xu BH, 2024. Queen bee gut microbiota extends honeybee lifespan by inhibiting insulin signaling[J]. Applied and Environmental Microbiology, 90(4): e0179923

Wang YK, Wang L, Li D, Chen ZF, Luo Y, Zhou J, Luo B, Yan R, Liu H, Wang LJ, 2024. Advancements in the impact of insect gut microbiota on host feeding behaviors[J]. Genes, 15(10): 1320

Yang YX, Gao F, Jia XY, Jin DC, Haddi K, Li ZH, Zhao ZH, 2026. Gut-microbiota reshaping by environmental oxytetracycline residues threatens life-history traits in a polyphagous fruit fly[J]. Journal of Hazardous Materials, 514: 142788

Zhang MD, Yan JJ, Zavala JA, Palli SR, Smagghe G, Gao YL, 2025. Gut bacteria in potato tuberworm (*Phthorimaea operculella*) populations are dominated by *Enterococcus* spp. and these play a significant role in carbohydrate metabolism and host growth[J]. Journal of Pest Science, 98(3): 1583–1598

Zhang N, Zhao M, Wang GH, 2022. Research progress on microbial symbionts against pest and disease[J]. Journal of Plant Protection, 49(1): 220–230 (in Chinese) [张娜, 赵曼, 王关红, 2022. 昆虫共生微生物在病虫害防治的研究进展[J]. 植物保护学报, 49(1): 220–230]

Zhang QW, Hua RH, Wang C, Lin J, Song XS, Zhang HH, Ji QE, Chen S, Yang JQ, 2019. Impacts of cultivable gut microbes on biological characteristics of sterile males of *Bactrocera dorsalis* (Hendel)[J]. Chinese Journal of Biological Control, 35(1): 24–30 (in Chinese) [张琪文, 花若晗, 王聪, 林嘉, 宋学森, 张贺贺, 季清娥, 陈湜, 杨建全, 2019. 肠道可培养共生菌对橘小实蝇不育雄虫生物学特征的影响[J]. 中国生物防治学报, 35(1): 24–30]

Zhang X, Wang X, Guo ZK, Liu XY, Wang P, Yuan XQ, Li YP, 2022. Antibiotic treatment reduced the gut microbiota diversity, prolonged the larval development period and lessened adult fecundity of *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) [J]. Insects, 13(9): 838

（责任编辑：张俊芳）