

山茱萸蛀果蛾幼虫入土结茧习性 及其影响因素研究*

张鸿宇^{1,2**} 张国磊^{1,2} 张雨晴¹ 徐常青¹
刘 赛¹ 乔海莉^{1***} 陆鹏飞^{2***}

(1. 中国医学科学院, 北京协和医学院, 药用植物研究所, 北京 100193;
2. 北京林业大学林学院, 林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083)

摘 要 【目的】研究山茱萸蛀果蛾 *Carposina coreana* 老熟幼虫的入土结茧习性, 探讨不同土壤湿度和环境温度对其入土、结茧的影响, 以期全面了解山茱萸蛀果蛾老熟幼虫的越冬习性和种群预测, 为其有效防控提供指导。【方法】在室内条件下, 设置不同土壤湿度 (0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%) 和环境温度 (5、10、15、20、25、30、35 和 40 °C), 观察并分析山茱萸蛀果蛾老熟幼虫的入土行为、入土时长、入土率、结茧率和结茧深度情况。【结果】山茱萸蛀果蛾老熟幼虫自成熟果实中钻出后, 会立即进入土中结茧室, 并在茧室中以老熟幼虫的虫态越冬。幼虫进入土壤的虫道有扁“U”型、“V”型、“Y”型、倒“Y”型和竖直型 5 种类型。不同土壤含水量和环境温度对山茱萸蛀果蛾老熟幼虫的入土时长、入土率、结茧率和结茧深度的影响均具有显著差异 ($P < 0.05$)。幼虫在土壤湿度为 0% 和 30% 条件下均不入土, 在 10% 条件下的入土时间最短, 在 10%、15% 和 20% 条件下的入土率、结茧率均达 100%。在环境温度为 10-25 °C 条件下, 幼虫的入土时长以 10 °C 条件时最短, 入土率和结茧率均接近于 100%; 当温度超过 30 °C 时, 幼虫入土变得极为迅速, 但入土率和结茧率逐渐降低。幼虫在土壤中的结茧深度均随着土壤湿度和环境温度的升高而变浅, 但均不超过 10 cm 深度土层。【结论】在室内模拟条件下, 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫入土结茧的适宜土壤湿度和环境温度分别为 10%-20% 和 10-25 °C, 过高或过低的土壤湿度和环境温度均会导致幼虫入土率和结茧率降低, 甚至死亡。

关键词 山茱萸蛀果蛾; 老熟幼虫; 入土; 结茧; 土壤湿度; 环境温度

Tunnelling and cocooning behaviour of *Carposina coreana* larvae

ZHANG Hong-Yu^{1,2**} ZHANG Guo-Lei^{1,2} ZHANG Yu-Qing¹
XU Chang-Qing¹ LIU Sai¹ QIAO Hai-Li^{1***} LU Peng-Fei^{2***}

(1. Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Science and Peking Union Medical College, Beijing 100193, China; 2. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract 【Objectives】To investigate how mature *Carposina coreana* larvae enter the soil and construct cocoons, and the effects of soil humidity and temperature on cocoon formation, in order to better understand the overwintering habits of this pest and predict its future population size. 【Methods】Mature *C. coreana* larvae were observed burrowing into soil and forming cocoons under laboratory conditions. Soil humidity and temperature were set at 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% and 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 °C, respectively, and the soil penetration and cocooning rates of the mature larvae were recorded and compared. 【Results】Mature *C. coreana* larvae overwinter in cocoons in soil. Entry tunnels differed in shape

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划 (2022YFC3501502); 中国医学科学院医学与健康科技创新工程项目 (CIFMS 2021-I2M-1-031)

**第一作者 First author, E-mail: hongyuzhang1016@126.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: qhl193314@sina.com; lpengfei224@126.com

收稿日期 Received: 2022-09-19; 接受日期 Accepted: 2022-10-26

and could be categorized as either flat U-type, V-type, Y-type, inverted Y-type or vertical type. Temperature and soil humidity significantly affected the time required by larvae to burrow into soil, the penetration rate, the cocooning rate and cocoon depth. Larvae could not enter the soil at soil moisture levels of 0% or 30% and the penetration rate of larvae was lowest at 10% soil moisture. The highest penetration and cocooning rates (100%) were recorded at soil moistures of 10% and 15%. The fastest penetration, and the highest penetration and cocooning rates, were observed at temperatures in the range of 10-25 °C. At temperatures > 30 °C, larvae entered the soil relatively quickly, but the penetration rate and cocooning rate gradually decreased if the temperature continued to increase. The cocoon depth gradually decreased with increasing soil moisture and temperature, but cocoons were never less than 10 cm below the soil surface. **[Conclusion]** Soil moisture in the range of 10%-20% and temperature in the range of 10-25 °C are suitable for burrowing and cocoon formation of *C. coreana* larvae. Too high, or too low, soil moisture and temperature reduced the soil penetration and cocooning rate larvae and could even cause death.

Key words *Carposina coreana*; the mature larvae; enter the soil; cocoon; the soil moisture; the temperature

山茱萸蛀果蛾 *Carposina coreana* Kim 属鳞翅目 Lepidoptera 蛀果蛾科 Carposinidae, 又名石枣虫、萸肉虫、药枣虫、蜜虫(李建奇和张丹春, 2018), 是山茱萸 *Cornus officinalis* Sieb. et Zucc. 种植产区危害最严重的蛀果害虫。该虫在我国分布普遍并蔓延成灾, 特别是河南、陕西、浙江和山西等山茱萸主产区尤为严重(毕宪章和汪小兵, 2003); 在邻国的韩国和日本也有发生(Nasu, 2012)。山茱萸蛀果蛾主要以幼虫蛀入果内取食果肉, 将果肉蛀食成纵横交错的虫道, 直至留下一层表皮, 蛀空的果实内堆满虫粪, 失去药用价值(辛新, 2016); 发生严重时, 山茱萸被害株率在 90%以上, 受害虫果率 30%-40%、严重的达 90%以上(董建伟等, 2014), 给山茱萸种植企业和农户造成极大的经济损失。

国内外关于山茱萸蛀果蛾的研究较少, 基础薄弱, 对其防治主要依赖于树冠喷施化学农药(黄建等, 2011; Nepgen *et al.*, 2018)。而山茱萸蛀果蛾的幼虫终生在果内隐蔽为害, 为害部位即为收获部位, 树冠喷药难以直接接触虫体, 防控效果不佳。高浓度、大剂量、单一化使用化学农药, 非但没有控制住害虫的发生, 反而导致山茱萸果实品质下降、农药残留超标、害虫抗药性加快等问题(陆宴辉等, 2017)。因此, 急需要寻找山茱萸蛀果蛾的防治适期和安全有效的防治措施。

山茱萸蛀果蛾是全变态昆虫(陈静和花保祯, 2014), 幼虫在果实内发育成熟后, 老熟幼虫会钻出果实落入土中结冬茧越冬, 翌年环境条

件适宜时, 老熟幼虫会咬破冬茧爬至土表结夏茧化蛹, 在土壤中的历期长达 9-10 个月, 是整个发育历期中最长的发育阶段(陈建超, 2015)。此阶段为山茱萸蛀果蛾生活史的薄弱环节, 因此, 通过防治入土的老熟幼虫和蛹可有效控制山茱萸蛀果蛾的种群数量, 减少次年虫口密度和对山茱萸果实的危害。蛹是全变态类昆虫完成生活史的必经阶段, 蛹期的昆虫大多不动不食, 缺乏自我保护能力, 同时蛹体外部形态和内部生理均进行着剧烈变化, 易受外界环境和天敌的影响。因此, 山茱萸蛀果蛾幼虫在化蛹前寻找合适的庇护场所显得尤其重要, 而土壤的理化性质或外界环境因素也影响着其入土结茧行为、蛹的形成和发育。

本文通过室内模拟试验, 研究山茱萸蛀果蛾幼虫入土结茧的生物学习性, 探索不同土壤湿度和环境温度对其入土结茧进度、结茧率的影响, 以期更全面地掌握山茱萸蛀果蛾的生活习性, 为进一步做好该虫的预测预报, 通过调节林间土壤含水量来干扰山茱萸蛀果蛾幼虫入土结茧化蛹的生物学过程, 为达到防治害虫的目的提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

自山西省晋城市阳城县蟒河镇山茱萸种植基地(北纬 35°15'24", 东经 112°24'47")采集被山茱萸蛀果蛾为害的虫果, 带回室内置于直径

30 cm、高 9 cm、孔径 0.6 mm 的网筛中，放于托盘上，待老熟幼虫自然脱离虫果并从网筛的孔洞落入托盘后，移除网筛，收集老熟幼虫为试验虫源。

1.2 供试土壤

采自山西省晋城市阳城县蟒河镇山茱萸种植基地内的表层土（10 cm），土质类型为壤土。试验前，用筛子筛除杂质，并将土块粉碎，过 30 目网筛，再放入 100 °C 高温的电热鼓风干燥箱（TAISITE WGL-230B）内 48 h 烘至恒重。

1.3 土壤含水量设置

试验采用的土壤含水量为土壤绝对含水量，即 100 g 烘干土中含有若干克水分。计算公式为：土壤含水量 = (烘干前土样质量 - 烘干后土样质量) / 烘干后土样质量 × 100%。向装有土样的容器中加入适当的水，分别配置成 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30% 共 7 个梯度的土壤湿度处理。

1.4 山茱萸蛀果蛾幼虫入土结茧习性观察

用透明亚克力板夹层装置（文玉珍，2017），观察山茱萸蛀果蛾幼虫的入土结茧行为。该装置由两块透明的亚克力板（长×宽×厚=158 mm×108 mm×2 mm）和 3 块亚克力条（一块连接长边的亚克力条：长×宽×厚=158 mm×5 mm×2 mm，2 块连接宽边的亚克力条：长×宽×厚=108 mm×5 mm×2 mm）组成，用玻璃胶将 3 块亚克力条与 2 块亚克力板粘在一起，然后用 2 个燕尾夹固定亚克力板并使其能够保持直立。将配制好的土壤（湿度为 10%）装入亚克力板夹层装置中，土壤填充高度为 9 cm。

试验时，将刚脱果的山茱萸蛀果蛾幼虫放入亚克力板夹层装置的土壤上，用封口膜密封装置上端的开口，以防止幼虫逃逸，并用黑布盖在装置上避光。共设置 6 次重复，每次重复放入 10 头幼虫。于暗期在微弱红光下观察和记录山茱萸蛀果蛾幼虫的入土结茧行为及其在土壤中的虫道形成过程，直至茧室修建完成为止。试验条件设置为：温度（10±1）°C，相对湿度 60%±10%，

光周期 10L：14D。

1.5 山茱萸蛀果蛾入土结茧的影响因素

1.5.1 土壤湿度对山茱萸蛀果蛾入土结茧的影响 试验设置 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30% 共 7 个梯度的土壤湿度处理，每个处理各设 3 次重复。将配置好的不同湿度土壤分别装入圆柱形养虫瓶（高度 45 cm，口径 10 cm）中，瓶中土壤深度为 30 cm，瓶外壁沿垂直于瓶底方向每 1 cm 做一个刻度标记。将山茱萸蛀果蛾老熟幼虫放入准备好的养虫瓶内土壤表层，每个土壤湿度处理的每次重复瓶中各放入 15 头老熟幼虫，用封瓶膜密封瓶口并扎孔透气。

放虫后观察山茱萸蛀果蛾老熟幼虫的入土结茧情况，记录入土的幼虫数量、入土时长，统计老熟幼虫的入土率 = (入土数/15 头) × 100%。待山茱萸蛀果蛾老熟幼虫入土后的第 3 天（预实验发现老熟幼虫入土 3 d 即可完成结茧），按照养虫瓶外壁标记的刻度，从瓶口开始用药匙取出每 1 cm 刻度范围内的土壤，记录每 1 cm 深度土层中山茱萸蛀果蛾老熟幼虫的结茧数量，统计结茧率 = (结茧数/15 头) × 100%。

于放虫后称量每个养虫瓶的重量，此后每隔 1 d 称量一次，若养虫瓶重量减轻则说明土壤失水，及时补充水分保持养虫瓶重量不变，进而保障试验期间养虫瓶内土壤湿度恒定。试验条件设置为：温度（10±1）°C，相对湿度 60%±10%，光周期 10L：14D。

1.5.2 环境温度对山茱萸蛀果蛾入土结茧的影响 试验设置 5、10、15、20、25、30、35 和 40 共 8 个梯度的环境温度处理，每个处理各设 3 次重复。将配置好的土壤（湿度为 10%）装入养虫瓶（高度 45 cm，口径 10 cm）中，瓶中土壤深度为 30 cm，瓶外壁沿垂直于瓶底方向每 1 cm 做一个刻度标记。将山茱萸蛀果蛾老熟幼虫放入准备好的养虫瓶内土壤表层，每个温度处理的每次重复瓶中各放入 15 头老熟幼虫，用封瓶膜密封瓶口并扎孔透气。

将放虫后的养虫瓶置于不同温度梯度条件下，观察山茱萸蛀果蛾老熟幼虫的入土结茧情况，记录入土的幼虫数量、入土时长，统计老熟

幼虫的入土率=(入土数/15头)×100%。待山茱萸蛀果蛾老熟幼虫入土后的第3天(预实验发现老熟幼虫入土3d即可全部完成结茧),按照养虫瓶外壁标记的刻度,从瓶口开始用药匙取出每1cm刻度范围内的土壤,记录每1cm深度土层中山茱萸蛀果蛾老熟幼虫的结茧数量,统计结茧率=(结茧数/15头)×100%。

试验期间,保持每个养虫瓶中土壤含水量为10%,光周期为10L:14D。

1.6 数据分析

采用 IBM SPSS 19.0 软件进行数据分析,不同土壤湿度间、环境温度间山茱萸蛀果蛾老熟幼虫入土率、结茧率数据经反正弦转换后,进行方差分析(One-way ANOVA)和多重比较(Duncan's 多重比较法)。

2 结果与分析

2.1 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫入土结茧习性

2.1.1 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫的入土结茧行为 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫入土前非常活跃,在土壤表层四处爬动,并用头部轻触土壤做入土之势(图1:A),待寻找到合适入土场所后,便停止爬行,用头壳和口器在附肢的协助下挖掘土壤,头部钻入土中,开始挖掘孔道(图1:B),并不断扭动身躯直至完全钻入土中(图1:C-G),入土孔道随之被土壤颗粒封闭(图1:H)。山茱萸蛀果蛾老熟幼虫在入土过程中,如果碰到坚硬的障碍物或感受到外界震动时,幼虫则会重新钻出土表,另寻下一个钻入点。

当老熟幼虫身体完全入土后,继续挖掘土壤并不断向土层深处钻入,待挖至合适结茧深度后,便蜷缩身体,并借助身体的扭动和旋转,将周围的土壤推开并挤压成一个扁圆形空腔,使身体能在空腔内自由活动(图1:I)。待空腔创建成功后,幼虫开始用口器和前足推动并压缩土壤颗粒至空腔内壁,然后吐丝并分泌黏液,将土壤颗粒粘在一起,加固空腔内壁(图1:J)。待茧室修建并加固完成后,山茱萸蛀果蛾老熟幼虫

的虫体开始不断蠕动并收缩身体,逐渐变短变粗(图1:K)。与此同时,幼虫继续吐丝和分泌黏液,将自己包裹在丝质茧内(图1:L),并将土壤颗粒粘在一起,包裹在丝质茧的外围,最后用一个较大土壤颗粒或石砾将茧完全封闭,最终形成一个土茧,为山茱萸蛀果蛾的越冬茧(图1:M)。

山茱萸蛀果蛾的越冬茧呈“圆球型”,直径约0.4-0.5cm不等。解剖越冬茧发现,在越冬茧内老熟幼虫的头部与尾部相接蜷缩呈“C”字状(图1:N),而剥开土茧外部较大的土壤颗粒或石砾(图1:M),其开口正对老熟幼虫头部与尾部的相接处。越冬茧内部丝质光滑、细腻且坚韧、不具有疏水性(图1:O)。

2.1.2 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫的入土虫道 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫入土后,并不立刻结茧室,而是不断挖掘孔道,寻找合适的场所结茧(图2:A)。纵观幼虫所形成的整个虫道,呈现多种形状。有形状似扁“U”型(图2:B),“V”型(图2:C),“Y”型(图2:D),倒“Y”型(图2:E),竖直型(图2:F)共5种类型的孔道。

在山茱萸蛀果蛾老熟幼虫入土后的虫道中,“U”型虫道最为常见,其数量占比为58%;“V”型、“Y”型和倒“Y”型虫道较为少见,数量占比均在14%左右;竖直型虫道极为稀少,其数量占比仅为3%(表1)。

2.2 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫入土结茧的影响因素

2.2.1 土壤湿度对山茱萸蛀果蛾老熟幼虫入土结茧的影响 观察发现,山茱萸蛀果蛾老熟幼虫在不同湿度土壤中的入土持续时长、入土率、入土深度和在土中的结茧率均存在差异。

土壤湿度为0%时,幼虫非常活跃,剧烈扭动身躯,并在土表不断爬行,体表逐渐失水,体色由透亮变为黯淡。在接触土表15min后,幼虫行动开始缓慢,虫体严重脱水,体长开始变小。在接触土表60min后,幼虫虫体极度失水,体表颜色变黑,失去生命迹象。此过程中始终未见幼虫入土(表2),其入土率和结茧率均为0(表3)。

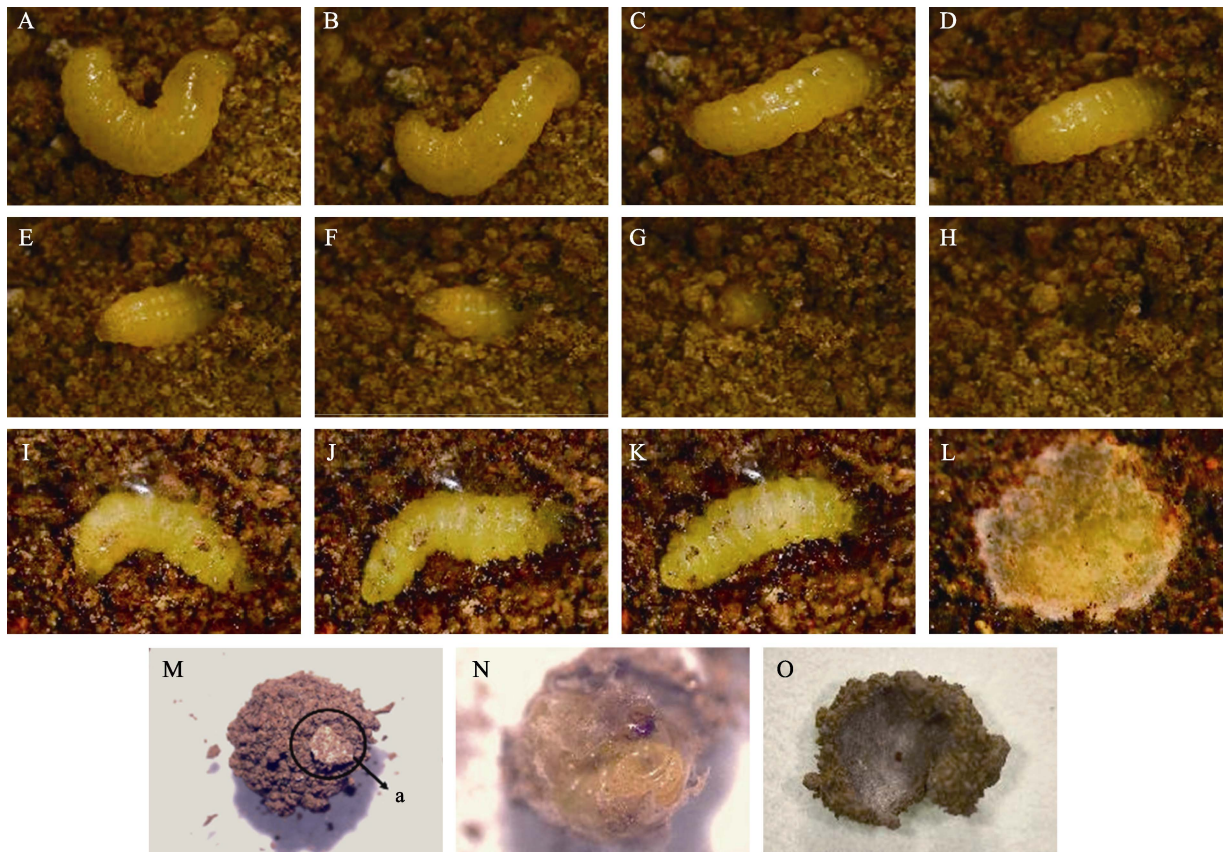


图 1 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫入土结茧过程

Fig. 1 Cocooning process of the mature larvae of *Carposina coreana* burrowed into the soil

A-H. 老熟幼虫挖掘并钻入土壤; I-L. 老熟幼虫在土壤中修建蛹室; M. 越冬茧 (a: 封口处的石砾);
N. 越冬茧内的老熟幼虫; O. 越冬茧的茧壳。

A-H. The mature larvae of *Carposina coreana* burrowed into soil; I-L. The mature larvae of *Carposina coreana* created the pupal chamber; M. Overwintering cocoon of *Carposina coreana* (a: Gravel used to seal cocoons);
N. The mature larvae in overwintering cocoon; O. The shell of overwintering cocoon.

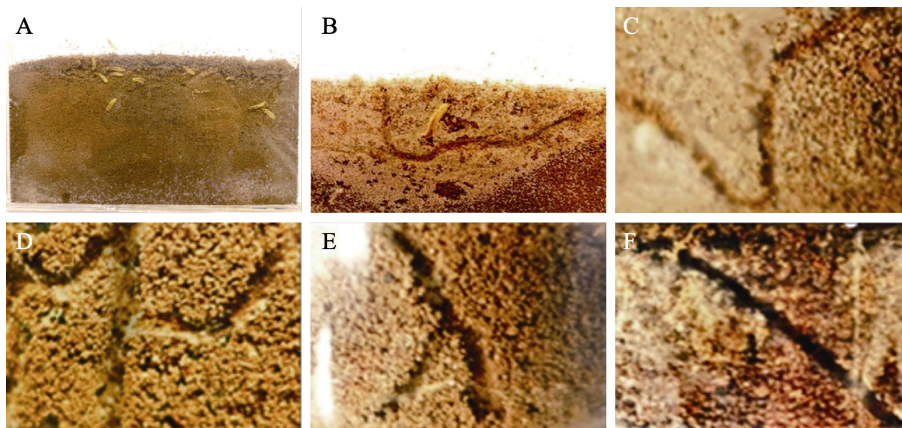


图 2 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫入土虫道

Fig. 2 The tunnel of mature larvae of *Carposina coreana* burrowed into the soil

A. 老熟幼虫入土; B. 扁“U”型虫道; C. “V”型虫道; D. “Y”型虫道; E. 倒“Y”型虫道; F. 竖直型虫道。

A. The mature larvae of *Carposina coreana* burrowed into the soil; B. Flat “U” type tunnel; C. “V” type tunnel;
D. “Y” type tunnel; E. Inverted “Y” type tunnel; F. Vertical type tunnel.

表 1 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫的入土虫道所占比例					
Table 1 The proportion of the tunnel of mature larvae of <i>Carposina coreana</i> burrowed into the soil					
虫道类型 Tunnel type	扁“U”型 Flat “U” type tunnel	“V”型 “V” type tunnel	“Y”型 “Y” type tunnel	倒“Y”型 Inverted “Y” type tunnel	竖直型 Vertical type tunnel
总数 Total	46	11	11	9	2
所占比率(%) Proportion (%)	58	14	14	11	3

土壤湿度为 5%时, 幼虫在土表来回爬行, 其爬行速度较在土壤湿度为 0%时减缓很多, 并用头部触碰土壤颗粒试探入土场所是否合适, 开始缓慢钻入土中。幼虫的平均入土时长为(28.7±4.4) min, 最短入土时长为 6.9 min, 最长入土时长超 240 min (表 2)。幼虫的入土率可达 57.78%±8.01%, 而结茧率略微下降, 为 31.1%±2.2% (表 3), 且多集中在深度为 2-3 cm 的土壤中 (表 4)。对于不入土的幼虫, 其静伏在土表保持存活。

表 2 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫在不同湿度土壤中的入土时长			
Table 2 The duration of mature larvae of <i>Carposina coreana</i> burrowed into the soil with different moisture			
土壤含水量 (%) Soil water content (%)	入土时长 (min) Duration of burrowing into the soil (min)		
	均值±标准误 Mean±SE (min)	极小值 Minimum	极大值 Maximum
0	ND	ND	ND
5	28.7±4.4	6.9	240+
10	1.4±0.8	0.1	2.4
15	18.3±3.3	0.3	23.1
20	28.7±5.1	0.3	29.2
25	60.4±23.9	2.9	240+
30	ND	ND	ND

ND: 无幼虫钻入土中。
ND: No larvae burrowed into the soil.

土壤湿度为 10%、15%和 20%时, 幼虫活跃, 在土表四处爬行, 并有用头部触碰土壤颗粒的入土试探动作, 一旦判断位置合适, 便立即入土。随着土壤湿度的增加, 幼虫的平均入土时长也随之变长, 在土壤湿度为 10%、15%和 20%条件下, 其平均入土时长分别为 (1.4±0.8)、(18.3± 3.3) 和 (28.7±5.1) min。其中, 土壤湿度为 10%时,

幼虫入土最快, 其最短入土时长为 0.1 min, 最长的入土时长为 2.4 min; 土壤湿度为 15%时, 幼虫的最短入土时长为 0.3 min, 最长入土时长为 23.1 min; 而土壤湿度为 20%时, 幼虫的最短和最长入土时长分别为 0.3 min 和 29.2 min (表 2)。幼虫的入土率和结茧率, 在土壤湿度为 10%、15%和 20%时均没有显著性差异 ($P<0.05$), 都接近于 100% (表 3)。但幼虫在土壤中的结茧深度, 则会随着土壤湿度的增高, 逐渐变浅而接近土表。在土壤湿度为 10%时, 幼虫主要集中在 7-8 cm 深度的土层中结茧, 其结茧率可达 51.1%; 当土壤湿度为 15%和 20%时, 幼虫的结茧深度分别集中在 4-5 cm 和 3-4 cm 深度的土层中, 其结茧率分别为 68.9%±2.2%和 77.8%±5.9% (表 4)。

表 3 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫在不同湿度土壤中的入土率和结茧率		
Table 3 Penetration rate and cocooning rate of the mature larvae of <i>Carposina coreana</i> in soil with different moisture		
土壤含水量 (%) Soil water content (%)	入土率 (%) Penetration rate (%)	结茧率 (%) Cocooning rate (%)
0	0.0±0.0 d	0.0±0.0 d
5	57.8±8.0 c	31.1±2.2 c
10	100.0±0.0 a	100.0±0.0 a
15	100.0±0.0 a	100.0±0.0 a
20	100.0±0.0 a	100.0±0.0 a
25	71.1±8.0 b	62.2±4.4 b
30	0.0±0.0 d	0.0±0.0 d

表中数据为平均值±标准误。同列数据后标有不同小写字母表示不同土壤含水量处理间经 Duncan’s 新复极差法测验差异显著 ($P<0.05$)。
Data in the table are mean ±SE, and followed by the different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different soil water content by Duncan's new complex range test ($P<0.05$).

表 4 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫在不同湿度土壤中的结茧深度分布和结茧率
Table 4 Distribution of cocoon depth and cocooning rate of the mature larvae of *Carposina coreana* in soil with different moisture

土壤含水量 (%)		土层深度 (cm) Soil depth (cm)										
Soil water content (%)	土表 Soil surface	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-30
0	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a
5	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c	13.3±3.9 b	22.7±6.7 a	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c
10	0.0±0.0 e	0.0±0.0 e	0.0±0.0 e	0.0±0.0 e	0.0±0.0 e	0.0±0.0 e	6.7±0.0 d	15.6±2.2 c	51.1±2.2 a	22.2±2.2 b	2.2±2.2 de	0.0±0.0 e
15	0.0±0.0 d	0.0±0.0 d	0.0±0.0 d	0.0±0.0 d	20.0±3.9 b	68.9±2.2 a	8.89±2.2 c	2.2±2.2 cd	0.0±0.0 d	0.0±0.0 d	0.0±0.0 d	0.0±0.0 d
20	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c	4.4±4.4 c	77.8±5.9 a	22.2±5.9 b	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c
25	0.0±0.0 b	2.2±2.2 b	17.8±11.8 b	46.7±10.2 a	0.0±0.0 b	0.0±0.0 b	0.0±0.0 b	0.0±0.0 b	0.0±0.0 b	0.0±0.0 b	0.0±0.0 b	0.0±0.0 b
30	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a

表中数据为平均值±标准误。同行数据后标有不同小写字母表示同一土壤湿度条件下不同土层深度之间在 $P<0.05$ 差异显著 (Duncan's 多重比较法)。表 7 同。
Data in the table are mean ±SE, and followed by the different lowercase letters in the same row indicate significant differences at 0.05 level between different soil depths under the same soil moisture conditions (Duncan's multiple comparisons). The same for table 7.

土壤湿度为 25%时,在土壤表层出现肉眼可见的一层水膜。当老熟幼虫接触土表时,由于水膜的影响,幼虫的爬行速度较其在 10%、15%和 20%土壤湿度条件下缓慢许多,平均入土时长也较长,为 (60.4±23.9) min,最短入土时长为 2.9 min,最长入土时长超 240 min (表 2)。大多数幼虫都有入土的试探性动作,但钻入土中的过程较为缓慢,一部分幼虫钻入土中后又随即钻出,其入土率较低,为 71.1%±9.5%。而幼虫在入土后的结茧率也较其在 10%、15%和 20%土壤湿度条件下低,为 62.2%±4.4% (表 3),且多集中在 2-3 cm 深度的土层中 (表 4)。

土壤湿度为 30%时,土壤近似呈“稀泥”状态,黏性较大,大多数幼虫接触土壤后会黏在土壤中,行动受到阻碍,无法入土,其入土率和结茧率均为 0 (表 3)。

2.2.2 环境温度对山茱萸蛀果蛾老熟幼虫入土结茧的影响 观察发现,山茱萸蛀果蛾老熟幼虫在不同环境温度条件下的入土持续时长、入土率、入土深度和在土中的结茧率也存在差异。

环境温度为 5 ℃时,老熟幼虫活动性较差,入土速度较为缓慢,平均入土时长为 (38.3±5.4) min,最短的入土时长为 3.2 min,最长的入土时长超过 240 min (表 5)。在此温度条件下,老熟幼虫全部入土,入土率为 100%±0% (表 6),而结茧率略微降低为 80.0%±7.7% (表 6),且入土深度多集中于 6-7 cm 范围内 (表 7)。

环境温度为 10 和 15 ℃时,老熟幼虫非常活跃,在土表层四处爬动,寻找合适的入土位置,入土时间较也非常迅速,平均入土时长分别为 (2.3±1.0) min 和 (15.7±3.6) min。其中温度为 10 ℃条件下,幼虫的最短入土时长仅为 0.4 min,最长的入土时长为 54.3 min。在温度为 15 ℃条件下,幼虫的最短入土时长为 0.5 min,最长的入土时长则超过 240 min 之久 (表 5)。老熟幼虫的入土率和结茧率在 10 和 15 ℃两个温度条件下均达到 100% (表 6),而入土深度可达 7-8 cm,但大多数集中于 6-7 cm 的土层中 (表 7)。

表 5 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫在不同环境温度条件下的入土时长

Table 5 The duration of mature larvae of *Carpocapsa coreana* burrowed into the soil under different temperatures

环境温度 (℃) Temperature (°C)	入土时长 (min) Duration of burrowing into the soil (min)		
	均值±标准误 Mean±SE	极小值 Minimum	极大值 Maximum
5	38.3±5.4	3.2	240+
10	2.3±1.0	0.4	54.3
15	15.7±3.6	0.5	240+
20	138.8±26.9	12.3	240+
25	225.5±43.6	25.4	240+
30	0.4±0.2	0.2	10.0
35	0.3±0.2	0.1	0.6
40	0.2±0.1	0.2	0.2

仅统计入土的幼虫。
Only larvae entering the soil were counted.

表 6 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫在不同环境温度条件下的入土率和结茧率

Table 6 Penetration rate and cocooning rate of the mature larvae of *Carpocapsa coreana* in different temperature

环境温度 (℃) Temperature (°C)	入土率 (%) Penetration rate (%)	结茧率 (%) Cocooning rate (%)
5	100.0±0.0 a	80.0±7.7 b
10	100.0±0.0 a	100.0±0.0 a
15	100.0±0.0 a	100.0±0.0 a
20	100.0±0.0 a	100.0±0.0 a
25	100.0±0.0 a	97.8±2.2 a
30	77.8±11.8 b	64.4±11.1 c
35	57.8±12.4 c	53.3±10.2 d
40	13.3±7.7 d	0.0±0.0 d

表中数据为平均值±标准误。同列数据后标有不同小写字母表示不同环境温度处理间经 Duncan’s 新复极差法测验差异显著 (*P*<0.05)。
Data in the table are mean±SE, and followed by the different lowercase letters indicate significant differences between different temperature treatments by Duncan's new complex range test (*P*<0.05).

环境温度为 20 和 25 ℃时,老熟幼虫的入土行为非常缓慢,大多数幼虫在钻入土中以

表 7 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫在不同环境温度条件下的结茧深度分布和结茧率

[illegible]

后,又重新爬出至土壤表层,然后再寻找合适位置重新入土。在 20 °C 温度条件下,老熟幼虫的平均入土时长为 (138.8 ± 26.9) min,而在温度为 25 °C 时,老熟幼虫的平均入土时长为 (225.5 ± 43.6) min,相较所有温度条件下,入土时长达最高值(表 5)。虽然老熟幼虫在这两个温度条件下的入土较为缓慢,所用时间较长,但其入土率和结茧率均接近于 100%(表 6)。而老熟幼虫的结茧深度在 20 °C 时主要集中于 5-6 cm 深度土层中,在 25 °C 时略微上移,多集中于 4-5 cm 土层中(表 7)。

环境温度为 30 和 35 °C 时,老熟幼虫感受到高温胁迫,爬动速度十分迅速,大多数幼虫急于钻入土壤中以躲避高温,仅有少部分幼虫隐藏在土壤表层不入土。在 30 和 35 °C 条件下,能入土的幼虫其入土速度急为迅速,平均入土时长分别为 (0.4 ± 0.2) 和 (0.3 ± 0.2) min。最短的入土时长分别为 0.2 和 0.1 min,最长的入土时间分别为 1.0 和 0.6 min(表 5)。老熟幼虫的入土率和结茧率较低温条件时明显降低,在 30 和 35 °C 条件下,其入土率分别为 $77.8\% \pm 11.8\%$ 和 $57.8\% \pm 12.4\%$;结茧率分别为 $64.4\% \pm 11.1\%$ 和 $53.3\% \pm 10.2\%$ (表 6)。而老熟幼虫的结茧深度则较低温条件下明显变浅,多集中于 3-4 cm 土层中(表 7)。

环境温度达 40 °C 时,仅有极少部分老熟幼虫钻入土中,而大多数幼虫停留在土壤表层或者死亡。其中,能入土的幼虫钻入土中的速度非常迅速,其平均入土时长仅为 (0.2 ± 0.1) min,最短入土时长和最长入土时长分别为 0.2 min 和 0.2 min(表 5)。老熟幼虫在此温度条件下达 24 h 后,活动性变得极弱,少数能够入土的幼虫蜷缩于土中未能结成土茧,3 d 后变开始死亡。幼虫的平均入土率和平均结茧率分别为 $13.3\% \pm 7.7\%$ 和 0%(表 6)。

3 结论与讨论

在鳞翅目昆虫的整个生活史中,老熟幼虫的结茧化蛹是极为重要的生命环节(He *et al.*, 2021),其结茧和化蛹的场所多种多样,主要分

为地上(寄主植物及地表)和地下(入土化蛹)2 种。其中,选择地上结茧化蛹的昆虫,其化蛹部位较多,有茎秆、叶片和果实等,以茎秆内和叶片上化蛹居多,如豆野螟 *Maruca testulalis*、二化螟 *Chilo suppressalis*、大蓟蛾 *Clania variegata* 等(郑霞林等,2010);选择地下土壤结茧化蛹的昆虫,进入土壤需要挖掘蛹道,并用分泌丝状物和粘液将土壤颗粒粘在一起做成一定形状的蛹室化蛹,比如棉铃虫 *Helicoverpa armigera*、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*、黄地老虎 *Agrotis segetum* 等(郑霞林等,2010)。对于入土结茧和化蛹的昆虫,其入土结茧后的虫态又可分为 2 种:蛹和老熟幼虫。山茱萸蛀果蛾为鳞翅目蛀果蛾科昆虫,其幼虫老熟后开始进入预蛹期,不再取食,并开始离开幼虫的生活环境,从成熟的果实中钻出来,通过自身重力的作用掉入或吐丝落入土表,进入土中结茧或建造蛹室,并在蛹室中以老熟幼虫的虫态越冬。

入土昆虫在进入土壤过程中会形成多种形状的虫道,以便于幼虫入土和成虫的羽化出土。如棉铃虫在土中会有入土通道和羽化出土通道,均是在其成虫羽化前就已完成,蛹道形状也呈多种形状(陈法军等,2002)。而山茱萸蛀果蛾老熟幼虫的入土虫道与棉铃虫相似,可见 5 种类型的入土虫道,其中,“U”型虫道最为常见,其数量占比为 58%;“V”型、“Y”型和倒“Y”型虫道较为少见,数量占比均在 14% 左右;竖直型虫道极为稀少,其数量占比仅为 3%。但棉铃虫在土中包括 2 个通道,即入土通道和出土通道,在其成虫羽化期,破茧而出的成虫会沿着已经开掘好的羽化出土虫道钻;而山茱萸蛀果蛾老熟幼虫在土壤中只见一个连续通道,所结成的茧为越冬茧,茧内是以老熟幼虫形式存在,待幼虫咬破冬茧后会于土层表面结化蛹茧羽化。而在老熟幼虫咬破越冬茧爬向土表的过程中是否会沿用已经开掘好的虫道进行,还有待进一步探究。

湿度对于昆虫生存具有重要影响,环境湿度影响蛹的成活率、化蛹数量、发育进度等(常晓娜等,2008)。对于入土结茧化蛹的昆虫,在通常情况下,土壤湿度越大,蛹的发育进度减缓,死亡率上升,化蛹的数量越少;而土壤湿度低于

一定阈值也会造成相同的影响(党志浩和陈法军, 2011; 刘向东等, 2016)。因此在极端高湿与极端低湿下均不利于昆虫生存(Zhang *et al.*, 2014)。本研究中, 在土壤湿度为 0% 时, 山茱萸蛀果蛾幼虫的体表失水现象十分明显, 在土壤湿度为 5% 的干燥条件下, 老熟幼虫入土十分困难; 而在高湿度 30% 条件下, 土壤中的空气被水所占据, 土壤黏性、摩擦力增大, 从而使老熟幼虫无法钻入土中。在土壤湿度为 10%-25% 时, 幼虫的入土结茧深度随湿度增加而变浅, 这与文献中报道的湿度与化蛹深度的规律相一致。而从幼虫入土时间长短来看, 随着土壤湿度的增加而入土时间会相应延长, 由于脱离寄主的幼虫已经停止进食, 长期暴露于外界, 势必会对其造成巨大的能量损耗, 导致其自身的活力下降从而影响后期成虫的羽化、求偶、交尾、产卵等生殖行为。研究结果显示, 在土壤湿度为 10%-15% 条件是最有利于山茱萸蛀果蛾老熟幼虫入土结茧的最佳土壤湿度。相关研究已在入土化蛹的物种上有大量探究。Renkema 等(2011)发现, 大约 50% 的越桔实蝇 *Rhagoletis mendax* 个体在土壤含水量较高时, 更偏向于在土壤表面化蛹。与此相似, 有关茶尺蠖 *Ectropis obliqua* 和灰茶尺蠖 *E. grisescens* 个体化蛹行为的实验中观察到, 茶尺蠖和灰茶尺蠖幼虫在干燥(5% 湿度)和湿润(80% 湿度)的土壤中更倾向于在土壤表面化蛹(葛超美等, 2016; 王慧芳, 2018)。土壤含水量影响粘虫的入土化蛹和羽化出土, 过高或过低的土壤相对含水量导致粘虫 *Mythimna separata* 土中蛹大量死亡而不能羽化出土(李立坤等, 2019)。

温度能显著影响昆虫的生长发育与生存繁殖, 温度过低和过高均不利于昆虫的生存(向敏等, 2017)。在一定温度范围内, 昆虫的发育速率与温度的关系为逻辑斯蒂曲线(王如松等, 1982)。诸多学者关于温度对昆虫的影响已作出大量的研究。周志雄等(2019)发现, 过低温度能显著降低柑橘大实蝇 *Bactrocera minax* 幼虫的行动力, 在恒温 4 °C 条件下均不能化蛹成功, 在恒温 8 °C 条件下, 采集时间早的虫果中幼虫的化蛹成功率很低。黄斑长翅卷叶蛾 *Acleris*

fimbriana 在 22、25 和 28 °C 条件时, 成虫的寿命和产卵期均随温度的升高逐渐缩短(刘永华等, 2019)。小菜蛾 *Plutella xylostella* 的繁殖力与温度呈抛物线的相关性, 即温度过高或者过低均会影响小菜蛾的繁殖能力(但建国等, 1995)。桃小食心虫 *Carposina sasakii*, 在高于最适温度处理后, 其寿命缩短, 平均繁殖力下降, 在高于 29 °C 的处理下, 无论胁迫时间为 1 h 还是 3 h, 均会对其成虫的平均寿命产生较大影响, 而在 43 °C 持续胁迫 3 h, 则会引起供试虫的全部死亡(Kim *et al.*, 2014; 张怀江等, 2020)。本研究中, 山茱萸蛀果蛾老熟幼虫在较低温度条件下(5 °C), 结茧率与 10-25 °C 相比有所降低, 而在 40 °C 在巨大温差条件下, 其老熟幼虫会很快死亡, 这与刘永华等(2019)研究的极端温度对于昆虫的影响规律相一致。从入土深度来看, 温度对于山茱萸蛀果蛾老熟幼虫的影响远不如土壤湿度对其影响明显。从入土时长来看, 在 5-25 °C 温度范围之间, 随着温度升高, 老熟幼虫在外界停滞时间越久。而到达 30-35 °C 高温时, 老熟幼虫感受到外界高温胁迫, 此时选择迅速入土结茧来躲避高温对虫体自身的损伤。综合山茱萸蛀果蛾老熟幼虫的入土时长与结茧率, 在土壤湿度一定的情况下, 10-15 °C 是山茱萸蛀果蛾老熟幼虫化越冬茧的最佳温度。

综合山茱萸蛀果蛾老熟幼虫入土结茧的行为习性, 以及在不同土壤湿度与温度条件下的入土时长、入土率和结茧率, 在实际生产中可采用不同的农业防治措施, 如在老熟幼虫入土结茧阶段(秋末冬初)进行土地的翻垦、冬灌, 或春季进行春灌, 提高土壤含水量, 破坏其原有的结茧场所环境, 从而有效地压低越冬虫态, 达到减少来年虫口密度的目的。该研究对于探明山茱萸蛀果蛾生物学特性以及指导山茱萸蛀果蛾绿色防治具有重要意义。

参考文献 (References)

- Bi XZ, Wang XB, 2003. Biological characteristics and control of *Carposina coreana* Kim. *Anhui Forestry*, 29(5): 23. [毕宪章, 汪小兵, 2003. 山茱萸蛀果蛾生物学特性与防治. 安徽林业,

- 29(5): 23.]
- Chang XN, Gao HJ, Chen FJ, Zhai BP, 2008. Effects of environmental moisture and precipitation on insects: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 27(4): 619–625. [常晓娜, 高慧璟, 陈法军, 翟保平, 2008. 环境湿度和降雨对昆虫的影响. 生态学杂志, 27(4): 619–625.]
- Chen FJ, Zhai BP, Zhang XX, 2002. Biological habits of tunnelling and pupation of cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner). *Plant Protection*, 28(1): 18–20. [陈法军, 翟保平, 张孝羲, 2002. 棉铃虫入土化蛹的生物学习性. 植物保护, 28(1): 18–20.]
- Chen J, Hua BZ, 2014. Ultramorphology of sensilla on the larval antennae and mouthparts of *Carposina coreana* Kim (Lepidoptera: Carposinidae). *Acta Entomologica Sinica*, 57(1): 133–140. [陈静, 花保祯, 2014. 山茱萸蛀果蛾幼虫触角和口器感器的超微形态. 昆虫学报, 57(1): 133–140.]
- Chen JC, 2015. Study on biological characteristics and comprehensive control technology of *Carposina coreana* Kim. *Forest By-Product and Speciality in China*, 134(1): 70–72. [陈建超, 2015. 山茱萸蛀果蛾生物学特性及综合防治技术研究. 中国林副特产, 134(1): 70–72.]
- Dan JG, Liang GW, Pang XF, 1995. Study on experimental population of *Plutella xylostella* under different temperature conditions. *Journal of South China Agricultural University*, 16(3): 11–16. [但建国, 梁广文, 庞雄飞, 1995. 不同温度条件下小菜蛾实验种群的研究. 华南农业大学学报, 16(3): 11–16.]
- Dang ZH, Chen FJ, 2011. Responses of insects to rainfall and drought. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(5): 1161–1169. [党志浩, 陈法军, 2011. 昆虫对降雨和干旱的响应与适应. 应用昆虫学报, 48(5): 1161–1169.]
- Dong JW, Liu SL, Ge SX, Wang XG, Fu ZF, Yu ZQ, 2014. Study of dogwood fruit moth occurrence and integrated control technology. *Journal of Henan Forestry Science and Technology*, 34(3): 13–15. [董建伟, 刘淑玲, 葛松霞, 王旭光, 付志方, 于志强, 2014. 山茱萸蛀果蛾的发生及综合防治技术研究. 河南林业科技, 34(3): 13–15.]
- He LM, Zhao SY, Ali A, Ge SS, Wu KM, 2021. Ambient humidity affects development, survival, and reproduction of the invasive fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), in China. *Journal of Economic Entomology*, 114(3): 1145–1158.
- Huang J, Zhang YJ, Zhang XY, Li P, Zhao CS, Wang P, Wu WG, 2011. Effects of different insecticides on control of *Carposina coreana* Kim. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011 (6): 172. [黄建, 张延军, 张向阳, 李平, 赵长胜, 汪沛, 吴卫刚, 2011. 不同药剂防治山茱萸蛀果蛾效果研究. 现代农业科技, 2011 (6): 172.]
- Ge CM, Yin KS, Tang MJ, Xiao Q, 2016. Biological characteristics of *Ectropis grisescens* Warren. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 28(3): 464–468. [葛超美, 殷坤山, 唐美君, 肖强, 2016. 灰茶尺蠖的生物学特性. 浙江农业学报, 28(3): 464–468.]
- Kim DS, Lee JH, Yiem MS, 2001. Temperature-dependent development of *Carposina sasakii* (Lepidoptera: Carposinidae) and its stage emergence models. *Environmental Entomology*, 30(2): 298–305.
- Li LK, Wang XH, Liu JW, Wang YH, Chen FJ, 2019. Effect of soil moisture on the pupation and emergence of the armyworm, *Mythimna separata*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1324–1330. [李立坤, 王晓辉, 刘佳文, 王艳辉, 陈法军, 2019. 土壤湿度对粘虫入土化蛹和羽化出土的影响. 应用昆虫学报, 56(6): 1324–1330.]
- Li JQ, Zhang DC, 2018. Ecological characteristics and occurrence and control of *Carposina coreana* Kim in Danfeng county. *Xiandai Horticulture*, (201815): 71–72. [李建奇, 张丹春, 2018. 丹凤县山茱萸生态学特性及蛀果蛾的发生防治. 现代园艺, 2018(15): 71–72.]
- Liu XD, Wang X, Wang MQ, Yang G, Wu JC, Wang SS, Lu YY, Jiang MX, Zhai BP, 2016. *Insect Ecology and Forecast* (4th edition). Beijing: China Agricultural Publishing House Press. 12–27. [刘向东, 王星, 王满园, 杨广, 吴进才, 汪四水, 陆永跃, 蒋明星, 翟保平, 2016. 昆虫生态及预测预报 (第 4 版). 北京: 中国农业出版社. 12–27.]
- Liu YH, Liu J, Yan XF, He Y, 2019. Effects of temperature on the growth, development and reproduction of *Acleris fimbriana* Thunberg (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Forest and Environment*, 39(4): 444–448. [刘永华, 刘娟, 阎雄飞, 贺英, 2019. 温度对黄斑长翅卷叶蛾生长发育及繁殖的影响. 森林与环境学报, 39(4): 444–448.]
- Lu YH, Zhao ZH, Cai XM, Cui L, Zhang HN, Xiao HJ, Li ZY, Zhang LS, Zeng J, 2017. Progresses on integrated pest management (IPM) of agricultural insect pests in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(3): 349–363. [陆宴辉, 赵紫华, 蔡晓明, 崔丽, 张浩男, 肖海军, 李振宇, 张礼生, 曾娟, 2017. 我国农业害虫综合防治研究进展. 应用昆虫学报, 54(3): 349–363.]
- Nasu Y, 2012. New record of *Carposina coreana* kim caught by synthetic sex pheromone trap for *C. sasakii* Matsumura in Japan (Lepidoptera: Carposinidae). *Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology*, 56(2): 65–67.
- Nepgen ES, Moore SD, Hill MP, 2018. Integrating chemical control with sterile insect releases in an integrated pest management

- programme for *Thaumatotibia leucotreta*. *Journal of Applied Entomology*, 142(4): 421–427.
- Renkema JM, Cutler GC, Lynch DH, MacKenzie K, Walde SJ, 2011. Mulch type and moisture level affect pupation depth of *Rhagoletis mendax* Curran (Diptera: Tephritidae) in the laboratory. *Journal of Pest Science*, 84(3): 281–287.
- Wang HF, 2018. Pupation behaviors, emergence successes and reproduction of *Ectropis grisescens* (Lepidoptera: Geometridae) in response to different substrate types and moisture contents. Master dissertation. Guangzhou: South China Agricultural University. [王慧芳, 2018. 基质类型和湿度对灰茶尺蠖化蛹、羽化和繁殖的影响. 硕士学位论文. 广州: 华南农业大学.]
- Wang RS, Lan ZX, Ding YQ, 1982. A mathematical model study on the relationship between insect development rate and temperature. *Acta Ecologica Sinica*, 2(1): 47–57. [王如松, 兰仲雄, 丁岩钦, 1982. 昆虫发育速率与温度关系的数学模型研究. 生态学报, 2(1): 47–57.]
- Wen YZ, 2017. Study on the pupation and emergence behaviors of *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Crambidae). Master dissertation. Guangzhou: South China Agricultural University. [文玉珍, 2017. 黄野螟化蛹行为及影响因素的研究. 硕士毕业论文. 广州: 华南农业大学.]
- Xiang M, Fan TS, Hu HX, Yu F, Ji R, Wang H, 2017. Effects of short-term exposure to high temperature on the survival and fecundity of *Calliptamus italicus* (Orthoptera: Acrididae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(3): 426–433. [向敏, 樊泰山, 扈鸿霞, 于非, 季荣, 王晗, 2017. 短时高温对意大利蝗存活和生殖的影响. 应用昆虫学报, 54(3): 426–433.]
- Xin X, 2016. Occurrence and control of *Carposina coreana* Kim in Xixia county. *Modern Agriculture*, 476(2): 27–28. [辛欣, 2016. 西峡山茱萸蛀果蛾的发生与防治. 现代农业, 476(2): 27–28.]
- Zhang HJ, Sun LN, Yan WT, Yue Q, Qiu GS, 2020. Effects of short-term high temperature stress on adult survival and reproduction of *Carposina sasakii* (Lepidoptera: Carposinidae). *South China Fruits*, 49(4): 133–139. [张怀江, 孙丽娜, 闫文涛, 岳强, 仇贵生, 2020. 短时高温胁迫对桃小食心虫成虫存活和生殖的影响. 中国南方果树, 49(4): 133–139.]
- Zhang SZ, Cao Z, Wang QL, Zhang F, Liu TX, 2014. Exposing eggs to high temperatures affects the development, survival and reproduction of *Harmonia axyridis*. *Journal of Thermal Biology*, 39(1): 40–44.
- Zheng XL, Wang P, Wang XP, Lei CL, 2010. The pupation site and behavior of Lepidoptera. *Bulletin of Biology*, 45(2): 11–14. [郑霞林, 王攀, 王小平, 雷朝亮, 2010. 鳞翅目昆虫的化蛹场所及行为. 生物学通报, 45(2): 11–14.]
- Zhou ZX, Xia ZZ, Yuan JJ, Wang ZL, Li CR, 2019. Effect of temperature on the energy metabolism and related enzyme activity of the Chinese citrus fruit fly, *Bactrocera minax* (Enderlein), during diapause. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(3): 454–462. [周志雄, 夏振洲, 袁江江, 王在凌, 李传仁, 2019. 温度对柑橘大实蝇滞育蛹能量结构与代谢的影响. 应用昆虫学报, 56(3): 454–462.]