

水分胁迫对水曲柳生理特性及 美国白蛾生长发育的影响

田佳丽¹ 邱亚丽¹ 孙丽丽¹ 王建军² 曹传旺^{1*}

(1. 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;

2. 辽宁省林业科学研究所, 辽宁 沈阳 110032)

摘要: 通过分析水分胁迫对水曲柳 *Fraxinus mandshurica* Rupr. 生理生化的影响, 进而探究美国白蛾 *Hyphantria cunea* Drury 取食不同水分处理的水曲柳后, 对其生长发育、营养利用和虫体含水率的影响, 为美国白蛾适应水分胁迫环境机制提供理论基础。结果表明: 1) 与适宜水分(土壤含水量 60%~70%)处理 2 年生水曲柳 25 d 相比, 水分过多(土壤含水量 90% 以上)处理能够促进水曲柳地径生长, 地径增长量显著增加 0.30 cm; 水分不足(土壤含水量 30%~40%)处理会抑制株高和地径生长, 地径增长量显著降低 0.36 cm, 叶片相对含水量显著降低 17.90%。2) 水分胁迫下水曲柳超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性显著升高, 可溶性糖含量显著降低。氨基酸含量在水分不足处理时显著增加, 为对照组的 1.62 倍; 而在水分过多处理组, 氨基酸含量显著降低。此外, 水分过多和不足胁迫处理均诱导了水曲柳次生代谢物质黄酮的积累。3) 与适宜水分处理相比, 水分过多和水分不足处理水曲柳饲喂的美国白蛾幼虫, 其发育历期分别延长 3.49 和 1.83 d, 同时化蛹率显著降低。水分过多处理组显著降低了幼虫存活率, 仅为水分适宜对照组的 79%; 而水分不足处理下的幼虫存活率差异不显著。水分过多和水分不足处理组, 美国白蛾成虫羽化率与对照组无显著差异。4) 营养利用分析表明, 取食水分过多处理水曲柳的幼虫相对生长率和食物利用率显著降低, 取食水分不足处理水曲柳的幼虫食物利用率和食物转化率显著升高。两种水分胁迫处理显著降低了 5 龄和 6 龄幼虫虫体含水率。这些研究结果丰富了水分胁迫对植物-昆虫相互作用影响的认识, 为探究不同水分条件下美国白蛾对水曲柳的适应机制提供理论基础。

关键词: 水分胁迫; 水曲柳; 美国白蛾; 植物-昆虫相互作用; 适应性

中图分类号: S718.7; S792.99 文献标识码: A 文章编号: 2097-5279(2026)01-0033-12

Effects of water stress on the physiological characteristics of *Fraxinus mandshurica* and the growth, development of *Hyphantria cunea*

Tian Jiali¹ Qiu Yali¹ Sun Lili¹ Wang Jianjun² Cao Chuanwang^{1*}

(1. Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management-Ministry of Education, College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Liaoning Academy of Forestry Sciences, Shenyang 110032, China)

Abstract: This study investigated the effects of water stress on the physiology and biochemistry of *Fraxinus mandshurica*, and further explored the impact of *Hyphantria cunea* Drury feeding on *F. mandshurica* subjected to different water treatments on its growth and development, nutrient utilization, and larval water content. The aim was to provide a theoretical basis for understanding the adaptation mechanism of *H. cunea* to water environments. The results showed: 1) Compared to the suitable water treatment (soil water content 60%~70%) on 2-year-old *F. mandshurica* for 25 days, the excessive water treatment (soil water content above 90%) promoted the ground diameter growth, with a significant increase of 0.30 cm in ground diameter increment. In contrast, water deficiency treatment (soil water content 30%~40%) inhibited both plant height and ground diameter growth, with a significant reduction of 0.36 cm in ground diameter increment and a significant decrease of 17.90% in leaf relative water content. 2) Under water stress, the activities of superoxide dismutase and catalase in *F. mandshurica* significantly increased, while the

收稿日期: 2025-11-07; 修回日期: 2025-12-16。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1400300); 国家自然科学基金项目(32471871)。

* 通信作者: 曹传旺(E-mail: chuanwangcao@nefu.edu.cn), 教授。

引文格式: 田佳丽, 邱亚丽, 孙丽丽, 等. 2026. 水分胁迫对水曲柳生理特性及美国白蛾生长发育的影响[J]. 树木医学, 3(1): 33-44.

Tian J L, Qiu Y L, Sun L L, et al. 2026. Effects of water stress on the physiological characteristics of *Fraxinus mandshurica* and the growth, development of *Hyphantria cunea*[J]. Tree Health, 3(1): 33-44.

soluble sugar content significantly decreased. Additionally, under water deficiency treatment, the amino acid content significantly increased, reaching 1.62 times that of the control. However, the amino acid content significantly decreased under excessive water treatment. Moreover, both excessive water and water deficiency stress treatments induced the accumulation of the secondary metabolite flavonoid in *F. mandshurica*. 3) Compared to the suitable water treatment, feeding *H. cunea* larvae with *F. mandshurica* subjected to excessive water and water deficiency treatments prolonged the larval development period by 3.49 days and 1.83 days, respectively, while significantly reducing the pupation rate and eclosion rate. The excessive water treatment significantly decreased the larval survival rate, which was only 79% of that in the suitable water control group, whereas the larval survival rate under water deficiency treatment showed no significant difference. The adult emergence rate in both excessive water and water deficiency treatment groups showed no significant difference compared to the control group. 4) Nutrient utilization analysis indicated that the relative growth rate and food utilization rate of larvae feeding on *F. mandshurica* under excessive water treatment significantly decreased, whereas the food utilization rate and food conversion rate of larvae feeding on *F. mandshurica* under water deficiency treatment significantly increased. Both water stress treatments significantly reduced the larval water content in the 5th and 6th instar larvae. These findings enhance the understanding of the effects of water stress on plant-insect interactions and provide a theoretical basis for adaptation mechanisms of *H. cunea* to *F. mandshurica* under different water conditions.

Keywords: water stress; *Fraxinus mandshurica*; *Hyphantria cunea*; plant-insect interaction; adaptation

在生物的生长与发育过程中,常面临各种逆境胁迫,包括非生物因子(如水分、高温、高盐、冷冻等)和生物因子(如病原体感染),这些胁迫严重影响生物的生存和繁衍(Suzuki et al., 2014)。水分作为关键的非生物因子,在陆地生物的分布和种群丰度中发挥着重要作用(Brändle et al., 2001)。水分胁迫包括水涝胁迫和干旱胁迫(Rodiyati et al., 2005),水分胁迫影响植物生理代谢和生长发育,同时也影响植食性昆虫的生理代谢和生长发育。水分胁迫干扰昆虫体内生理生化过程,进而影响其行为特征、扩散规律及种群动态等生态现象(Chown et al., 2011);也可通过改变寄主植物的生理状态产生间接生态效应,具体表现为植食性昆虫为适应植物组织的水分-营养变化,适应性调整体内的保水机制与渗透调节系统(谭椰等, 2014)。

当植物受到水涝胁迫时,根系因缺氧而呼吸受阻,能量代谢紊乱,根系活力显著下降,同时体内激素平衡被打破,叶片黄化、脱落(郭依萍等, 2020)。在干旱胁迫的情况下,植物渗透调节失衡,光合系统受损,气孔关闭,光合作用受到影响,体内积累大量活性氧(Reactive oxygen species, ROS),引发膜脂过氧化损伤,还会促使植物次生代谢物重新分配,酚类、萜类等防御物质合成增加,以抵御外界胁迫(秦景, 2011);同时,叶片变小、变厚,角质化程度提高以减少水分散失(胡衍平, 2023)。这些变化不仅制约植物个体的生长发育、繁殖与存活,同时对植食性昆虫的生长发育产生影响。水分胁迫能够改变寄主植物生理指标,进而影响植食性昆虫的繁殖行为

和种群动态。Kansman等(2022)研究发现,随着小麦 *Triticum aestivum* L.水分不足程度的加剧,禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* L.的繁殖力显著下降,平均每日若虫产量减少,种群增长率降低。王晨(2022)报道,干旱胁迫时寄主植物对棉蚜 *Aphis gossypii* Glover 种群发展具有显著影响;与正常水分条件相比,受干旱胁迫的棉花 *Gossypium hirsutum* L.,其棉蚜若虫的发育历期显著延长,成蚜寿命缩短,单雌产蚜量降低。Sun等(2023)研究亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis*(Guenée)的产卵选择性时发现,该物种偏好在水分过多的玉米 *Zea mays* L.植株上产卵,而在干旱胁迫条件下,其产卵量显著减少。Lewis等(2025)对大豆 *Glycine max* (L.) Merr.进行淹水胁迫后发现,大豆蚜 *Aphis glycines* Matsumura 的种群增长速率显著下降。此外,干旱胁迫能够缩短昆虫的发育历期,提高幼虫体重、虫体水分含量和幼虫存活率,种群的内在增长率和周限增长率也处于较高水平;淹水胁迫则对昆虫产生负面影响,不仅延长其发育历期,也会抑制幼虫的生长,导致其日增重下降,同时抑制产卵量和种群增长(Baqui and Kershaw, 1993; 罗定等, 2012; Simpson et al., 2012)。这些研究表明,水分胁迫通过改变寄主植物的物理特性、营养组成和次生代谢物质含量,显著影响植食性昆虫的生长发育、繁殖行为和种群动态,其中干旱胁迫和淹水胁迫分别通过不同机制对昆虫生物学特性产生抑制或促进作用,这种影响在不同昆虫物种中表现出一定的差异性。

美国白蛾 *Hyphantria cunea* Drury 属鳞翅目 Lepidoptera 目夜蛾科 Erebidae, 是国际检疫性有害生物,

具有食性繁杂、传播广泛、繁殖力强、群居危害等特点(赵旭东等, 2022)。气候变暖、寄主资源丰富、扩散能力强及生态位空缺是美国白蛾区域扩散与适应性进化的主要原因, 这些因素共同作用使其在我国的分布范围不断扩大, 危害程度持续加重(Cao et al., 2016)。研究报道美国白蛾在管理相对宽松、环境欠佳的城区公园、绿化带和城乡结合部发生严重, 且降水量与种群密度显著相关(戴伟等, 2024; 刘朋, 2025)。近年来, 相关研究多集中于美国白蛾生物学特性、致灾机制和防控技术等方面(Huberty and Denno, 2004; 杨海燕, 2008; Che-Castaldo et al., 2019), 而关于寄主植物介导的水分胁迫对美国白蛾生理功能的研究则鲜有报道。本文探讨了水分胁迫对水曲柳生理特性及美国白蛾生长发育的影响, 分析不同水分胁迫下水曲柳叶片相对含水量、抗氧化酶活性、营养物质含量及次生代谢物质含量变化, 结合美国白蛾生长情况, 探究其与不同湿度生境的相关性。本研究可丰富水分胁迫下植物-昆虫互作的认识, 为明确美国白蛾对水分环境变化适应性、预测其发生分布及调控水分条件影响生长发育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试寄主植物为我国东北地区广泛分布树种水曲柳 *Fraxinus mandshurica* Rupr.。2024年4月, 自辽宁省开原市美城苗圃购买2年生水曲柳幼苗, 将其盆栽置于辽宁省林业科学研究院苗圃地, 在自然光照条件下培育, 实施常规的养护管理措施, 定期除草。2024年6月选取长势基本一致的幼苗, 用于后续试验。

试验所需的美国白蛾为2龄幼虫, 采自辽宁省阜新市糖槭树 *Acer saccharum* Marshall 上, 同时采集糖槭树中上部、大小相近的叶片, 置于密封袋内, 带回辽宁省森林保护重点实验室。将幼虫置于圆形塑料养虫盒(300 mL, 高4.5 cm, 下直径7.5 cm, 上直径11.8 cm)中, 于温度(25±1)℃、湿度75%、光周期16L: 8D的光照培养箱中饲养。每天更换叶片, 直至幼虫进入3龄。将3龄幼虫接于不同水分处理的水曲柳上饲养, 用尼龙网罩住以防逃逸, 羽化成虫放置于养虫笼中交配。

1.2 试验方法

1.2.1 水曲柳水分胁迫处理

选取长势基本一致的2年生水曲柳幼苗, 将所有试验用苗浇透水, 再自然失水至3个水分梯度: 水分过多(土壤含水量90%以上)、适宜水分(土壤含水

量60%~70%)、水分不足(土壤含水量30%~40%)。试验期间, 每天18:00时使用土壤水分测定仪(上海拓西电子科技有限公司, JK-100K)测量各处理组的土壤含水量, 根据目标含水量进行控水或浇水, 使各处理组盆栽苗含水量维持在设定范围内。

1.2.2 水分胁迫下水曲柳生长指标的测定

胁迫前在不同水分处理组中各取12株长势基本一致的水曲柳2年生幼苗, 分别使用卷尺(上海田岛工具有限公司, HILOCK-25)、游标卡尺(山东烟台绿林工具有限公司, XMA-H03)测量株高和地径并记录。不同水分处理25d后再次测量株高和地径, 计算株高和地径生长量, 公式如下:

$$\text{株高生长量 (cm)} = \text{胁迫 25 d 后株高 (cm)} - \text{胁迫前株高 (cm)} \quad (1)$$

$$\text{地径生长量 (cm)} = \text{胁迫 25 d 后地径 (cm)} - \text{胁迫前地径 (cm)} \quad (2)$$

1.2.3 水分胁迫下水曲柳叶片相对含水量的测定

在不同水分处理组中选取12株长势一致的水曲柳幼苗, 摘取2~4片大小基本一致的真叶, 从叶片基部剪下, 用蒸馏水冲洗叶片表面, 再用滤纸吸干表面浮水, 称其鲜重。将叶片置于蒸馏水中浸泡24h后称其饱和鲜重, 再将叶片放入牛皮纸袋, 置于电热恒温鼓风干燥箱(上海一恒, DHG-9140A)105℃干燥30min, 再调至80℃干燥至恒重, 称量叶片干重。每株重复测定3次, 计算叶片相对含水量, 公式如下:

$$\text{叶片相对含水量 (\%)} = [(\text{鲜重} - \text{干重}) / (\text{饱和鲜重} - \text{干重})] \times 100 \quad (3)$$

1.2.4 水分胁迫下水曲柳抗氧化酶活性的测定

在各水分处理组中, 随机选取长势一致的水曲柳2年生幼苗12株, 分别采集方向、高度和大小基本一致的真叶3~5片。叶片经液氮速冻后迅速带回实验室, 用于生理指标测定, 每个处理重复3次。使用超氧化物歧化酶试剂盒和过氧化氢酶试剂盒(苏州科铭生物技术有限公司)分别测定不同水分处理下水曲柳叶片的超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)和过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性。称取约0.1g叶片, 加入1mL提取液, 冰浴匀浆; 将匀浆在8000×g, 4℃条件下离心10min, 取上清液, 置于冰上待测。后续具体操作按照试剂盒说明书进行。

1.2.5 水分胁迫下水曲柳中营养物质和总黄酮含量的测定

使用可溶性糖含量试剂盒、总黄酮含量试剂盒、氨基酸含量试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)分别测定不同水分处理下水曲柳叶片的可溶性糖含

量、总黄酮含量和氨基酸含量。具体方法按照试剂盒说明书进行。

1.2.6 幼虫发育指标和体重测定

将30头饥饿24 h的3龄第1天幼虫,分别接于不同水分处理的水曲柳幼苗上,每个处理3次生物学重复(即3株独立的幼苗)。饲养期间及时更换水曲柳,保证幼虫的食物充足,每日观察并记录幼虫的龄期变化,直至其化蛹,据此统计3~7龄幼虫的发育历期。观察并统计各水分处理组幼虫死亡数、化蛹数,待蛹羽化后,将各处理组的雌、雄成虫交配,统计幼虫存活率、化蛹率、羽化率、产卵量。用电子分析天平(Ohaus, AR1140)对不同水分处理下各龄期第1天幼虫群体称重,每个处理重复测量3次,并计算平均值。

$$\text{幼虫平均体重 (mg/头)} = \text{各处理组幼虫种群体重 (mg)} / \text{虫体个数 (头)} \quad (4)$$

1.2.7 幼虫不同发育阶段虫体含水率测定

将饥饿24 h的3龄第1天幼虫接种于不同水分处理的水曲柳幼苗上,每个处理接种30头。待幼虫取食至5龄第1天和6龄第1天时,称量其鲜重,然后将幼虫置于玻璃培养皿中,放入电热恒温鼓风干燥箱105℃干燥30 min,再调至80℃干燥至恒重。培养皿取出后放置在底部铺有变色硅胶的干燥器中,待恢复至室温后称取幼虫干重,计算虫体含水率,计算公式如下:

$$\text{含水率 (\%)} = (\text{鲜重} - \text{干重}) / \text{鲜重} \times 100 \quad (5)$$

为满足后续统计分析的要求,将虫体含水率采用最大-最小值归一化方法进行归一化处理,将数据统一映射至[0, 1]区间。该方法的核心原理为通过线性变换消除原始数据的量纲差异,计算公式如下:

$$x'_i = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (6)$$

式中: x'_i 为第*i*个原始数据的归一化结果; x_i 为第*i*个原始数据; x_{\min} 为该组数据中的最小值; x_{\max} 为该组数据中的最大值。

1.2.8 幼虫营养利用水平的测定

将饥饿24 h的美国白蛾3龄第1天幼虫接种于不同处理的水曲柳幼苗上,饲养至6龄第1天时,将刚蜕皮的幼虫放入空养虫盒中饥饿24 h后称量鲜重,然后以不同处理的水曲柳叶片饲喂,每盒1头,每个处理饲喂30头。48 h后取出幼虫、剩余叶片及粪便,放入电热恒温鼓风干燥箱,在105℃条件下干燥30 min,随后在80℃条件下干燥至恒重,分别称其干重。此外,从不同处理组中各取10头饥饿24 h的美

国白蛾6龄第1天幼虫称重,同时选取不同处理的水曲柳叶片称重,按上述方法干燥后测定干重,每个处理重复测定3次。确定试验前幼虫干湿比及叶片的干湿比,推算试验前叶片的干重和试虫干重。参照Waldbauer(1964)方法计算各营养指标:

$$\text{相对生长率 (\%)} = \{ (\text{试验后幼虫干质量} - \text{试验前幼虫干质量}) / [(\text{试验前幼虫干质量} + \text{试验后幼虫干质量}) / 2] \} \times 100 \quad (7)$$

$$\text{相对取食率 (\%)} = \{ (\text{试验前叶片干质量} - \text{试验后饲料干质量}) / [(\text{试验前幼虫干质量} + \text{试验后幼虫干质量}) / 2] \} \times 100 \quad (8)$$

$$\text{食物利用率 (\%)} = [(\text{试验后幼虫干质量} - \text{试验前幼虫干质量}) / (\text{试验前叶片干质量} - \text{试验后饲料干质量})] \times 100 \quad (9)$$

$$\text{食物转化率 (\%)} = [(\text{试验后幼虫干质量} - \text{试验前幼虫干质量}) / (\text{试验前叶片干质量} - \text{试验后饲料干质量} - \text{幼虫粪便干质量})] \times 100 \quad (10)$$

$$\text{近似消化率 (\%)} = [(\text{试验前叶片干质量} - \text{试验后饲料干质量} - \text{幼虫粪便干质量}) / (\text{试验前叶片干质量} - \text{试验后饲料干质量})] \times 100 \quad (11)$$

1.3 统计分析

使用Excel 2016统计数据,运用IBM SPSS Statistics 24.0软件的单因素方差分析(Duncan)和独立样本t检验方法进行显著性差异分析($P < 0.05$),使用GraphPad Prism 8.0.2软件作图。运用IBM SPSS Statistics 24.0软件的Pearson分析水曲柳理化指标与美国白蛾幼虫生长发育指标相关性。

2 结果与分析

2.1 不同水分胁迫对水曲柳生长指标的影响

经水分胁迫后,不同处理下的水曲柳生长指标存在显著性差异(表1)。结果显示,以适宜水分处理为对照组,水分过多处理下的水曲柳株高平均增长量为(1.48±0.16) cm,高于对照组0.34 cm($P > 0.05$);水分不足处理下的株高增长量仅为(0.78±0.07) cm,显著低于对照组0.36 cm($P < 0.05$),说明水分不足显著抑制水曲柳的株高生长。水分过多处理下的地径增长量为(0.40±0.05) cm,显著高于对照组0.30 cm($P < 0.05$);而水分不足处理下的地径增长量为(0.04±0.03) cm,与对照组无显著性差异($P > 0.05$)。结果表明,与适宜水分处理相比,水分过多可以促进水曲柳的株高和地径生长,而水分不足则显著抑制植株生长,但对地径生长的影响较小。

表 1 水分胁迫对水曲柳生长指标的影响

Tab. 1 Effects of water stress on the growth indicators of *F. mandshurica*

水分胁迫 Water stress	株高增长量/cm Plant height increment	地径增长量/cm Ground diameter increment
适宜水分 Suitable water	1.14 ± 0.16 a	0.10 ± 0.03 b
水分过多 Excessive water	1.48 ± 0.16 a	0.40 ± 0.05 a
水分不足 Water deficiency	0.78 ± 0.07 b	0.04 ± 0.03 b

注: 表中数据平均值±标准误差(SE), 同一列不同小写字母表示样本间的显著性差异($P < 0.05$)。

Notes: The data are shown mean ± SE (n = 3). Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$).

2.2 不同水分胁迫对水曲柳叶片相对含水量的影响

不同水分处理下的水曲柳叶片相对含水量如图 1A 所示。以适宜水分处理为对照组, 在水分过多处理下, 水曲柳叶片的相对含水量与对照组相比增加了 2.72% ($P > 0.05$); 而水分不足条件下, 水曲柳叶片的相对含水量与对照组相比显著降低了 17.90% ($P < 0.05$)。结果表明, 水分过多处理能够在一定程度上提高水曲柳叶片的相对含水量, 但差异不显著; 而水分不足处理则显著降低了叶片的相对含水量。

2.3 不同水分胁迫对水曲柳抗氧化酶活性的影响

不同水分处理下的水曲柳抗氧化酶活性如图 1B、C

所示。以适宜水分对照组相比, 水分过多和水分不足处理下水曲柳的 SOD 活性均显著升高 ($P < 0.05$)。其中, 水分过多处理下的 SOD 活性为对照组的 1.44 倍, 水分不足处理下的 SOD 活性为对照组的 2.66 倍。同样, 水分过多和水分不足处理下水曲柳的 CAT 活性也显著高于对照组 ($P < 0.05$)。水分过多处理下的 CAT 活性为对照组的 1.98 倍, 水分不足处理下的 CAT 活性为对照组的 3.62 倍。结果表明, 水分胁迫显著增强了水曲柳的抗氧化酶活性, 且在水分不足处理下的增长幅度显著高于水分过多处理。

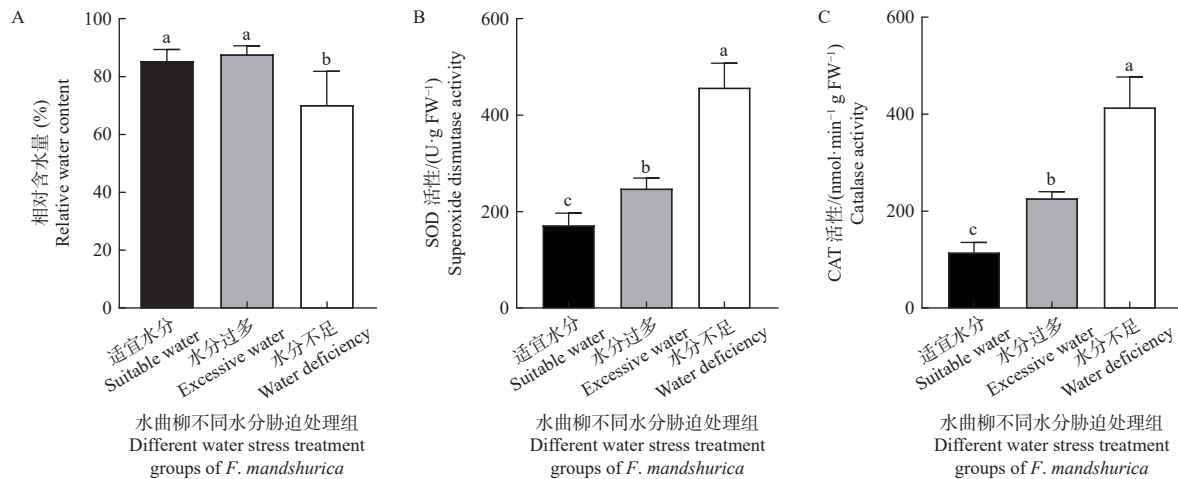


图 1 不同水分胁迫对水曲柳叶片相对含水量和抗氧化酶活性的影响

Fig. 1 Effects of different water stress on the relative water content and antioxidant enzyme activity of *F. mandshurica*

注: A. 水曲柳叶片相对含水量; B. 超氧化物歧化酶活性; C. 过氧化氢酶活性。用 Duncan 方法分析显著差异性, 不同小写字母表示各个处理组间的差异显著性 ($P < 0.05$)。

Notes: A. Relative water content of *F. mandshurica*; B. Superoxide dismutase activity; C. Catalase activity. Duncan method was used to analyze the significant difference, and different lowercase letter indicated the significant difference between the treatment groups ($P < 0.05$).

2.4 不同水分胁迫对水曲柳营养物质含量的影响

以适宜水分对照组相比, 水分过多和水分不足处理下水曲柳的可溶性糖含量均显著下降 ($P < 0.05$)。其中, 水分过多处理组的可溶性糖含量下降显著, 仅为对照组的 69.75%, 水分不足处理组为对照组的 89.48%。水分胁迫显著抑制了水曲柳可溶性糖的积累, 且在水分过多处理下的抑制作用更为显著。此外, 水分过多处理下水曲柳的氨基酸含量显著低于

对照组, 仅为对照组的 42.98% ($P < 0.05$), 水分不足处理下水曲柳氨基酸含量显著高于对照组, 为对照组的 1.62 倍 ($P < 0.05$, 图 2)。以上结果表明, 水曲柳营养物质的含量因水分条件的不同而存在显著性差异。

2.5 不同水分胁迫对水曲柳总黄酮含量的影响

以适宜水分对照组相比, 水分过多和水分不足处理组水曲柳黄酮含量均显著增加 ($P < 0.05$)。其中,

水分过多处理组的黄酮含量为对照组的 1.24 倍; 水分不足处理组的黄酮含量为对照组的 1.35 倍。结果

表明, 水分胁迫可诱导水曲柳黄酮的积累, 且水分不足处理下的诱导更为显著(图 2)。

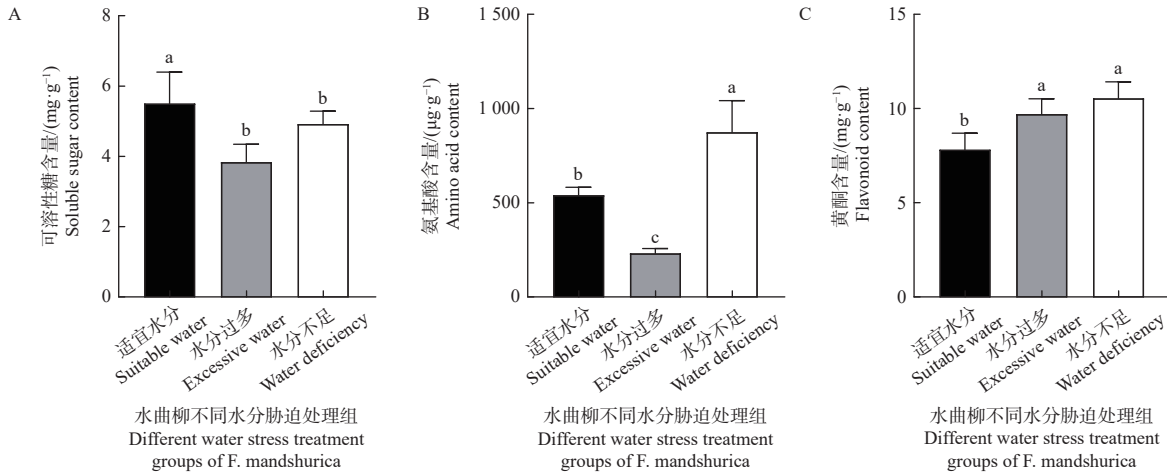


图 2 不同水分胁迫对水曲柳营养物质和黄酮含量的影响

Fig. 2 Effects of different water stress on the nutrient content and flavonoid content of *F. mandshurica*

注: A. 可溶性糖含量; B. 氨基酸含量; C. 黄酮含量。用 Duncan 方法分析显著差异性, 不同小写字母表示各个处理组间的差异显著性 ($P < 0.05$)。

Notes: A. Soluble sugar content; B. Amino acid content; C. Flavonoid content. Duncan method was used to analyze the significant difference, and different lowercase letter indicated the significant difference between the treatment groups ($P < 0.05$).

2.6 水分胁迫对美国白蛾幼虫生长发育影响

美国白蛾 3 龄幼虫取食不同水分胁迫水曲柳后, 对其 3~7 龄幼虫发育历期进行观察统计(图 3)。与适宜水分组相比, 水分过多与水分不足处理组幼虫发育历期均显著延长, 适宜水分组 3~7 龄发育历期为 20.74 d, 水分过多与水分不足处理组发育历期分别延长至 24.23 和 22.57 d。

对取食不同水分处理水曲柳的美国白蛾幼虫存活率、化蛹率(图 4)、羽化率和产卵量(表 2)进行统计观察。以取食适宜水分水曲柳为对照组, 水分过多处理组美国白蛾幼虫存活率显著下降 18.93%, 仅

为对照组的 0.79 倍 ($P < 0.05$); 水分不足处理组美国白蛾幼虫存活率与对照组相比差异不显著 ($P > 0.05$)。水分过多与水分不足处理组与对照组相比幼虫化蛹率显著下降, 分别比对照组下降 7.33% 和 11.33% ($P < 0.05$)。与对照组相比, 水分过多与水分不足处理组幼虫羽化率、产卵量无显著变化 ($P > 0.05$)。以上结果表明, 美国白蛾幼虫取食经水分胁迫后的水曲柳其存活率均下降, 其中取食水分过多处理水曲柳可导致美国白蛾幼虫存活率显著下降。

2.7 水分胁迫对美国白蛾幼虫体重的影响

取食不同水分处理水曲柳对美国白蛾幼虫体重的影响如表 3 所示。以适宜水分组为对照组, 水分过多和水分不足组 3 龄幼虫体重与对照组无显著性差异 ($P > 0.05$); 在 4 龄幼虫阶段, 水分过多组的幼虫体重显著低于对照组 1.68 mg ($P < 0.05$), 而水分不足组幼虫体重与对照组无显著性差异 ($P > 0.05$), 表明水分过多处理可能抑制了 4 龄幼虫的生长; 在 5 龄、6 龄和 7 龄幼虫阶段, 水分过多组和水分不足组的幼虫体重与对照组无显著性差异 ($P > 0.05$)。

2.8 水分胁迫对美国白蛾幼虫含水率的影响

取食不同水分处理水曲柳对美国白蛾 5 龄幼虫和 6 龄幼虫含水率的影响如图 5 所示。取食适宜水分水曲柳 5 龄幼虫虫体含水率归一值最高, 为 0.736 8, 取食水分过多与水分不足水曲柳幼虫虫体含水率归一值显著降低, 分别为 0.478 2 和 0.619 1 ($P < 0.05$); 与

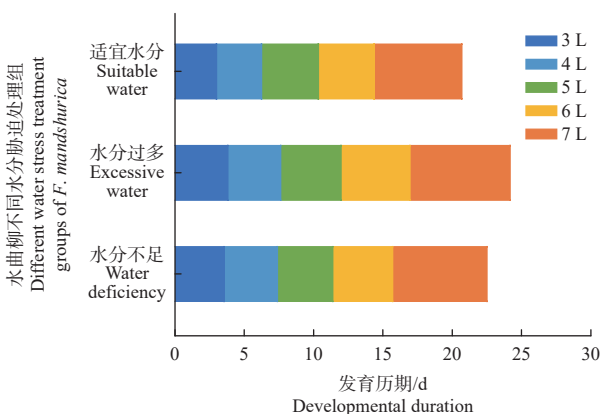


图 3 取食不同水分处理水曲柳对美国白蛾幼虫发育历期的影响

Fig. 3 Effects of feeding different water treatments of *F. mandshurica* on development duration of *H. cunea* larvae

注: 3~7 L 表示 3 龄至 7 龄幼虫。

Notes: 3-7 L indicates 3rd to 7th instar larvae.

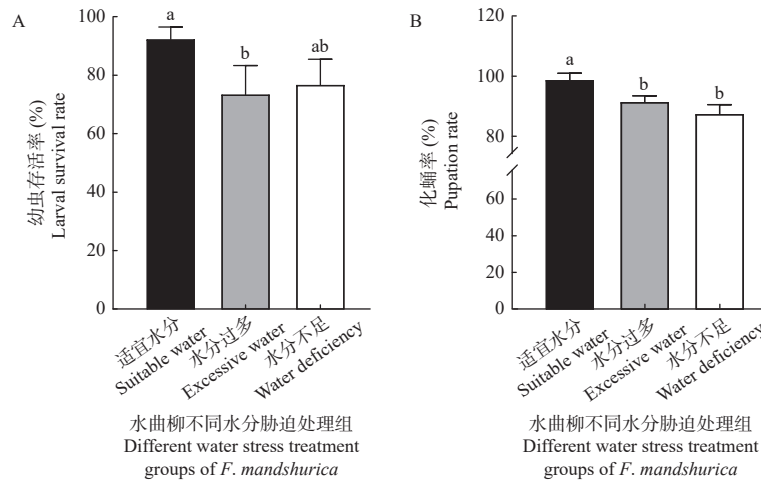


图 4 取食不同水分处理水曲柳对美国白蛾幼虫生长发育的影响

Fig. 4 Effects of feeding different water treatments of *F. mandshurica* on growth and development of *H. cunea* larvae

注: A. 幼虫存活率; B. 幼虫化蛹率。用 Duncan 方法分析显著差异性, 不同小写字母代表各个处理组间的差异显著性 (P < 0.05)。

Notes: A. Larval survival rate; B. Larval pupation rate. Duncan method was used to analyze the significant difference, and different lowercase letter indicated the significant difference between the treatment groups (P < 0.05).

表 2 水分胁迫水曲柳对美国白蛾羽化率和产卵量的影响

Tab. 2 Effects of *F. mandshurica* under water stress on the eclosion rate and egg laying amount of *H. cunea* larvae

水分胁迫 Water stress	羽化率/% Eclosion rate	产卵量/粒 Egg laying amount
适宜水分 Suitable water	98.89 ± 1.11 a	697.70 ± 28.03 a
水分过多 Excessive water	96.73 ± 1.65 a	699.95 ± 28.22 a
水分不足 Water deficiency	94.33 ± 1.01 a	696.95 ± 31.81 a

注: 表中数据为平均值±标准误差 (SE)。同一列不同小写字母表示样本间的显著差异 (P < 0.05)。

Notes: The data are shown mean ± SE (n = 3). Different lowercase letters in the same column indicate significant difference (P < 0.05).

表 3 水分胁迫水曲柳对美国白蛾幼虫体重的影响

Tab. 3 Effects of water stress on the body weight of *H. cunea* larvae feeding on *F. mandshurica*

水分胁迫 Water stress	3龄幼虫 / mg 3 rd instar	4龄幼虫 / mg 4 th instar	5龄幼虫 / mg 5 th instar	6龄幼虫 / mg 6 th instar	7龄幼虫 / mg 7 th instar
适宜水分 Suitable water	1.17 ± 0.08 a	5.95 ± 0.38 a	23.20 ± 0.25 a	73.69 ± 1.92 ab	146.01 ± 1.15 a
水分过多 Excessive water	1.29 ± 0.02 a	4.27 ± 0.19 b	19.75 ± 1.37 a	67.29 ± 0.81 b	152.46 ± 8.14 a
水分不足 Water deficiency	1.22 ± 0.03 a	4.81 ± 0.41 ab	20.15 ± 2.66 a	82.72 ± 5.01 a	157.84 ± 11.21 a

注: 表中数据为平均值±标准误差 (SE)。同一列不同小写字母表示样本间的显著差异 (P < 0.05)。

Notes: The data are shown mean ± SE (n = 3). Different lowercase letters in the same column indicate significant difference (P < 0.05).

5 龄幼虫相似, 6 龄幼虫虫体含水率归一值在适宜水分处理下最高, 为 0.526 6; 与适宜水分处理组相比, 水分过多时虫体含水率归一值显著降低, 为 0.337 6 (P < 0.05), 水分不足时虫体含水率归一值未达到显著性差异 (P > 0.05)。美国白蛾 5 龄、6 龄幼虫在取食不同水分胁迫水曲柳后虫体含水率表现出一致的趋势。

2.9 水分胁迫对美国白蛾幼虫营养利用的影响

取食不同水分胁迫下水曲柳对美国白蛾 6 龄幼虫营养利用效应的影响如表 4 所示。以适宜水分处

理组为对照组, 水分过多处理组的相对生长率 (Relative growth rate, RGR) 显著降低, 为对照组的 48.19% (P < 0.05)。水分过多和水分不足处理组的相对取食率 (Relative efficiency of consumption rate, RCR) 显著下降, 分别为对照组的 84.63% 和 86.34% (P < 0.05)。水分过多处理组的食物利用率 (Efficiency of conversion of ingested food, ECI) 和食物转化率 (Efficiency of conversion of digested food, ECD) 低于对照组 42.09% 和 42.22% (P < 0.05), 表明美国白蛾 6 龄幼虫对水分过多处理水

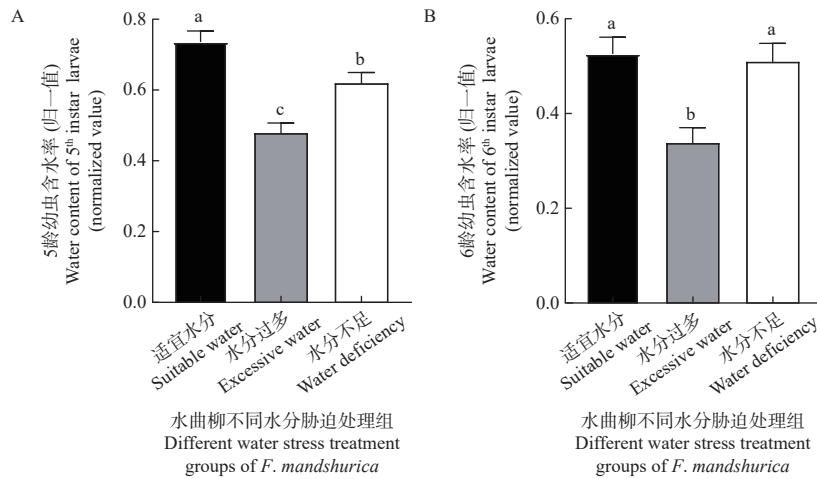


图5 不同水分处理水曲柳对美国白蛾含水率的影响

Fig. 5 Effects of *F. mandshurica* under different water treatments on water content of *H. cunea* larvae

注: A. 5龄第1d幼虫含水率; B. 6龄第1d幼虫含水率。用Duncan方法分析显著差异性, 不同小写字母代表各个处理组间的差异显著性($P < 0.05$)。

Notes: A. 5th instar larva moisture content; B. 6th instar larva moisture content. Duncan method was used to analyze the significant difference, and different lowercase letter indicated the significant difference between the treatment groups ($P < 0.05$).

表4 水分胁迫水曲柳对美国白蛾6龄幼虫营养利用的影响

Tab. 4 Effects of *F. mandshurica* under different water stress on nutrition utilization of 6th instar *H. cunea* larvae

水分胁迫 Water stress	相对生长率/% Relative growth rate	相对取食率/% Relative efficiency of consumption rate	食物利用率/% Efficiency of the conversion of ingested food	食物转化率/% Efficiency of the conversion of digested food	近似消化率/% Approximate digestibility
适宜水分 Suitable water	111.07 ± 1.81 a	1 019.8 ± 13.94 a	10.93 ± 0.19 b	38.82 ± 1.28 b	28.85 ± 0.77 a
水分过多 Excessive water	53.52 ± 1.86 b	863.04 ± 17.4 b	6.33 ± 0.33 c	22.43 ± 1.51 c	29.84 ± 1.29 a
水分不足 Water deficiency	110.57 ± 2.61 a	880.47 ± 20.60 b	12.79 ± 0.42 a	58.56 ± 3.84 a	23.47 ± 1.09 b

注: 表中数据为平均值±标准误差(SE), 同一列不同小写字母表示样本间的显著差异($P < 0.05$)。

Notes: The data are shown mean ± SE (n = 3). Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$).

曲柳中营养物质的转化能力显著降低, 但近似消化率(Approximate digestibility, AD)与适宜水分相比有所升高。水分不足处理组的ECI和ECD较对照组显著提高了17.02%和50.85% ($P < 0.05$), 说明美国白蛾6龄幼虫对水分不足水曲柳中营养物质的转化能力升高, 但AD与对照组相比显著下降18.65% ($P < 0.05$)。

2.10 水分胁迫下水曲柳理化指标与美国白蛾幼虫生长发育指标相关性分析

水分胁迫后, 对水曲柳生理指标(叶片相对含水量、SOD活性、CAT活性、氨基酸、可溶性糖、总黄酮)与美国白蛾幼虫生长发育指标(RGR、RCR、ECI、ECD、AD、幼虫体重、发育历期、幼虫含水量、存活率、化蛹率、羽化率、产卵量)进行相关性分析(表5)。结果表明, 叶片相对含水量与RGR、ECI和ECD呈显著负相关; SOD活性和CAT活性与化蛹率呈显著负相关; 氨基酸与RGR、6龄幼虫体重和6龄幼虫含水

量均呈显著正相关($P < 0.05$); 可溶性糖与RGR、5龄幼虫含水量和6龄幼虫含水量呈显著正相关, 与发育历期呈显著负相关; 总黄酮与ECI呈显著正相关, 但与4龄幼虫体重、羽化率和化蛹率呈显著负相关。

3 讨论

本研究发现, 在水分过多条件下, 水曲柳的株高和地径增长量均显著高于适宜水分处理组; 水分不足条件下水曲柳的株高增长量显著降低, 而地径增长量则未表现出显著性差异。此外, 水分胁迫对水曲柳叶片的相对含水量、抗氧化酶活性、营养物质与次生代谢物含量等均产生影响。水分过多条件下, 叶片相对含水量增加, 但未达到显著水平; 而在水分不足条件下, 叶片相对含水量显著降低。这与植物干旱胁迫的典型响应一致, 即水分不足导致植物细胞失水, 从而影响细胞膨压和生理代谢(Pei et al.,

表 5 水分胁迫下水曲柳理化指标与美国白蛾幼虫生长发育指标的相关性分析

Tab. 5 Correlation analysis between physicochemical indicators of *F. mandshurica* under water stress and growth and development indicators of *H. cunea* larvae

指标 Index	叶片相对含水量 Relative water content of leaves	SOD活性 SOD activity	CAT活性 CAT activity	氨基酸 Amino acid	可溶性糖 Soluble sugar content	总黄酮 Total flavonoid content
RGR	-0.345*	0.050	0.002	0.685*	0.691*	-0.158
RCR	0.192	-0.123	-0.223	0.548	0.661	-0.546
ECI	-0.546**	0.280	0.384	0.281	0.143	0.682*
ECD	-0.530**	0.318	0.366	0.377	0.026	0.503
AD	0.199	-0.237	-0.225	-0.278	0.049	-0.154
4龄幼虫体重 Body weight of 4 th instar larvae	-0.014	-0.320	-0.532	0.113	0.380	-0.767*
5龄幼虫体重 Body weight of 5 th instar larvae	0.108	-0.406	-0.544	-0.101	0.186	-0.438
6龄幼虫体重 Body weight of 6 th instar larvae	-0.530	0.516	0.455	0.684*	0.377	0.391
7龄幼虫体重 Body weight of 7 th instar larvae	-0.464	0.360	0.253	-0.050	-0.378	0.276
发育历期 Developmental duration	0.202	0.262	0.357	-0.444	-0.803**	0.588
5龄幼虫含水量 Water content of 5 th instar larvae	0.012	-0.094	-0.085	0.472	0.721*	-0.391
6龄幼虫含水量 Water content of 6 th instar larvae	-0.252	0.200	0.062	0.747*	0.720*	-0.278
幼虫存活率 Survival rate of larvae	0.318	-0.531	-0.501	0.103	0.475	-0.407
化蛹率 Pupation rate	0.458	-0.731*	-0.777*	-0.244	0.312	-0.915**
羽化率 Emergence rate	0.181	-0.603	-0.697*	-0.358	0.255	-0.721*
产卵量 Egg laying amount	-0.126	0.270	0.255	0.285	0.212	0.509

注: *表示0.05水平相关性显著, **表示0.01水平相关性显著。

Notes: * indicates significant correlation at 0.05 level, ** indicates significant correlation at 0.01 level.

2024)。在水分过多与水分不足条件下水曲柳的抗氧化酶活性显著升高,且在水分不足条件下的增幅更大,这可能与水分胁迫诱导水曲柳活性氧的积累有关。在营养物质含量方面,水分胁迫显著降低了水曲柳的可溶性糖含量,且在水分过多条件下的降幅更大。此外,水分过多条件下氨基酸含量显著下降,这可能是因为水分过多会增强植物代谢活动,加速氨基酸消耗;而水分不足时,可溶性糖含量下降,但氨基酸含量显著升高。这一现象可能与植物在水分不足条件下通过增加氨基酸来调节渗透压,以应对水分胁迫带来的生理压力有关(Hare et al., 1998)。另外,氨基酸的积累可为植物提供氮源,支持其在逆境条件下的生存和生长。研究发现,水分不足胁迫使水曲柳中黄酮含量显著升高。植物通过积累次生代谢物质来增强对逆境的抵抗能力,黄酮作为植物重要的次生代谢物质之一,可通过清除 ROS,调节植物生长发育、抗虫等作用增强植物逆境抵抗力。因此,黄酮类化合物的积累可能影响植食性昆虫的取食行为和生长发育,从而间接调控植物-昆虫互作关系

(Guang et al., 2007; 张书曼, 2022)。

本研究揭示了水分胁迫对水曲柳及其与美国白蛾互作关系的双重影响。一方面,水分胁迫直接改变了水曲柳的形态结构和生理状态;另一方面,通过食物链的传递,水分胁迫间接影响了美国白蛾的营养利用率、存活率、化蛹率等,进而可能对其种群动态产生影响。水分过多与水分不足胁迫均显著延长了美国白蛾幼虫的发育历期,这与戴鹏(2016)在对湿润地区与半干旱地区麦长管蚜 *Sitobion avenae* (Fabricius) 的生活史进行比较时的实验结果一致,即蚜虫在缺水胁迫下发育历期延长。有研究表明,逆境胁迫会改变植物的营养组成及次生代谢物的积累,进而影响植食性昆虫的生长发育(Chaves et al., 2003; 聂佳佳等, 2024)。Showler 和 Moran(2003)通过干旱胁迫棉花探究对甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* (Hübner) 的影响时发现,干旱胁迫使得棉花叶片游离氨基酸、可溶性蛋白和可溶性碳水化合物积累,进而导致甜菜夜蛾取食量与产卵量增加。Gutbrodt 等(2012)发现干旱胁迫甘蓝 *Brassica oleracea* var. *capitata* L. 后其次生代

谢物及氮含量的变化影响斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* (Fabricius) 与大菜粉蝶 *Pieris brassicae* (L.) 的取食偏好。本研究中水分胁迫显著降低了水曲柳的可溶性糖含量, 同时显著增加了水曲柳黄酮含量。可溶性糖作为昆虫生长发育的重要能量来源, 其含量的降低可能也是导致美国白蛾幼虫发育历期延长的原因之一。此外, 黄酮类化合物的积累还会对幼虫的取食和消化产生抑制作用, 从而进一步延缓幼虫的发育 (War et al., 2012)。

经水分胁迫后, 美国白蛾幼虫化蛹率显著下降, 水分过多处理组幼虫存活率显著下降, 而水分不足组幼虫存活率虽有所下降, 但未达到显著水平, 羽化率也表现出类似的趋势, 表明水分胁迫通过影响寄主植物, 间接影响昆虫的生长发育和种群动态。付淑慧等 (2016) 研究发现, 干旱胁迫下的喜旱莲子草 *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb. 显著影响了莲草直胸跳甲 *Agasicles hygrophila* (Schellenberg) 的生长发育, 具体表现为幼虫发育历期延长、体重下降、死亡率升高, 且化蛹率和羽化率均下降。类似地, 取食干旱条件下桑树 *Morus alba* L. 的桑白蚧 *Pseudaulacapsis pentagona* (Targioni-Tozzetti) 发育时间明显延长, 死亡率显著增加 (Hanks and Denno, 1993); 取食干旱胁迫下棉叶的甜菜夜蛾也表现出存活率下降的现象。此外, 王涵 (2021) 发现水分胁迫玉米后, 亚洲玉米螟成虫更倾向于在适宜水分处理的玉米上产卵。基于这些研究结果, 推测美国白蛾在水分胁迫条件下, 其产卵行为也可能更倾向于选择适宜水分处理的水曲柳。杨海燕 (2008) 发现水分胁迫甘蓝后对斜纹夜蛾的相对生长速率、食物利用率、食物转化率和近似消化速率均有显著影响。侯佳丽 (2015) 在对黏虫 *Mythimna separata* (Walker) 的研究中发现, 取食干旱处理的小麦会提高黏虫的近似消化率而降低食物利用率。与以往研究相似, 本研究中水分胁迫水曲柳对美国白蛾幼虫的营养利用效率也产生影响。取食水分过多处理水曲柳的幼虫 RGR 和 ECI 显著降低, 而取食水分不足处理水曲柳的幼虫 ECI 和 ECD 显著升高。结合前期研究结果, 水分过多条件下, 水曲柳的可溶性糖含量显著降低, 可能导致幼虫的能量供应不足, 从而抑制其生长和食物利用效率; 而在水分不足条件下, 水曲柳的氨基酸含量显著升高, 可能为幼虫提供了更多的氮源 (Hare et al., 1998), 从而提高了其食物利用效率。

取食水分过多和水分不足处理水曲柳的 5 龄、6 龄幼虫虫体含水率均降低, 推测这一现象可能与水

分胁迫下水曲柳叶片相对含水量的变化有关。水分过多条件下水曲柳叶片的相对含水量增加, 当幼虫摄入过多水分时会打破其原有的水分平衡, 为了维持体内渗透压的稳定激活渗透调节机制, 通过排泄将多余水分排出体外, 从而降低虫体含水率; 水分不足条件下水曲柳叶片的相对含水量显著降低使得幼虫获取的水分减少, 从而导致虫体含水率降低。由于叶片含水量降低, 幼虫通过取食获取的水分减少, 同时幼虫通过呼吸、排泄等生理过程逐渐流失水分, 导致虫体含水率下降, 限制昆虫生长 (康乐, 1995)。将水曲柳生理指标与幼虫生长发育指标进行相关性分析, 结果表明叶片相对含水量的增加可能为卵的孵化提供适宜的环境条件, 同时也增加了幼虫的代谢负担, 从而影响幼虫的食物利用率、食物转化率和相对生长率, 间接调控其生长发育; 抗氧化酶活性的增强及总黄酮含量的增加抑制了幼虫的化蛹和羽化过程; 氨基酸和可溶性糖含量的增加为美国白蛾幼虫的生长提供了能量并促进其水分积累。

本文初步明确了水分胁迫对水曲柳幼苗生长发育和生理生化的影响, 以及美国白蛾取食不同水分处理的水曲柳对其生长发育和营养利用的影响, 后续可进一步探究水曲柳在不同水分条件下如何调控美国白蛾幼虫水分代谢相关生理过程, 为阐明美国白蛾在不同生境下的生态适应性提供理论基础。

4 结论

本研究揭示了水分胁迫通过改变水曲柳的生理生化特性, 进而显著影响美国白蛾的生长发育与营养利用。与水分适宜的情况相比, 水分过多会促进水曲柳地径生长, 水分不足则抑制株高和地径生长, 并降低叶片相对含水量; 两种水分胁迫处理均诱导超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性升高及黄酮积累, 但可溶性糖含量下降。取食不同水分处理水曲柳的美国白蛾幼虫发育历期延长、化蛹率降低, 水分过多显著降低幼虫存活率; 营养利用方面, 水分过多抑制幼虫生长率和食物利用率, 水分不足则提升食物利用率和转化率, 且两种水分胁迫均降低虫体含水率。研究结果明确了不同水分条件下美国白蛾对水曲柳的适应机制。

参 考 文 献

- 戴鹏. 2016. 不同干旱地区麦长管蚜对缺水胁迫的响应及其遗传基础 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学.
- Dai P. 2016. The response of *Sitobion avenae* (Fabricius) to water-deficit stress

- and its genetic mechanisms[D]. Yangling: Northwest A & F University. (in Chinese)
- 戴伟, 奚月明, 游琳琳, 等. 2024. 南京城区美国白蛾发生规律探析[J]. *江苏林业科技*, 51(2): 14–20, 52.
- Dai W, Xi Y M, You L L, *et al.* 2024. Analysis of the occurrence patterns of *Hyphantria cunea* Drury in urban areas of Nanjing[J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 51(2): 14–20, 52. (in Chinese)
- 付淑慧, 申洁, 原祥鹤, 等. 2016. 水分胁迫寄主植物对莲草直胸跳甲生长发育的影响[J]. *中国农业大学学报*, 21(5): 91–97.
- Fu S H, Shen J, Yuan X H, *et al.* 2016. Effect of host plant under water stress on the growth and development of *Agasicles hygrophila*[J]. *Journal of China Agricultural University*, 21(5): 91–97. (in Chinese)
- 郭依萍, 石晶静, 周美琪, 等. 2020. 白桦 *BpbZIP1* 基因抗旱耐盐分析及 ABRE 元件结合鉴定[J]. *林业科学研究*, 33(5): 68–76.
- Guo Y P, Shi J J, Zhou M Q, *et al.* 2020. Drought and salt tolerance analysis of *BpbZIP1* gene in birch and ABRE element binding identification[J]. *Forest Research*, 33(5): 68–76. (in Chinese)
- 侯佳丽. 2015. 小麦干旱胁迫对黏虫与斑痣悬茧蜂发育互作表现的影响[D]. 南京: 南京农业大学.
- Hou J L. 2015. Developmental interaction performances between *Mythimna separata* and the parasitoid *Meteorus pulchricornis* under wheat drought stress[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University. (in Chinese)
- 胡衍平. 2023. 水分胁迫对山乌柏家系苗生长和生理特性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学.
- Hu Y P. 2023. Effects of water stress on growth and physiological characteristics of *Sapium discolor* genealogy seedlings[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology. (in Chinese)
- 康乐. 1995. 环境胁迫下的昆虫-植物相互关系[J]. *生态学杂志*, 14(5): 51–57.
- Kang L. 1995. Insect-plant correlation under environmental stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 14(5): 51–57. (in Chinese)
- 刘朋. 2025. 气候因素对北京美国白蛾时空分布的影响[J]. *现代园艺*, 48(12): 20–21, 28.
- Liu P. 2025. The impacts of climatic factors on the spatiotemporal distribution of *Hyphantria cunea* in Beijing[J]. *Contemporary Horticulture*, 48(12): 20–21, 28. (in Chinese)
- 罗定, 徐红星, 杨亚军, 等. 2012. 利用 PEG6000 模拟研究干旱胁迫对褐飞虱取食和产卵的影响[J]. *中国水稻科学*, 26(6): 731–736.
- Luo D, Xu H X, Yang Y J, *et al.* 2012. Feeding behavior and oviposition preference of brown planthoppers, *Nilaparvata lugens*, on different rice varieties under drought stress stimulated by polyethylene glycol(PEG6000)[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 26(6): 731–736. (in Chinese)
- 聂佳佳, 张爱莲, 张爽. 2024. 取食不同植物对舞毒蛾幼虫生长发育及生化酶的影响[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 44(5): 200–206.
- Nie J J, Zhang A L, Zhang S. 2024. Effects of feeding on different food plants on the growth, development and biochemical enzymes of *Lymantria dispar*[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 44(5): 200–206. (in Chinese)
- 秦景. 2011. 黄土高寒区主要造林树种抗旱耐盐生理及耗水特性[D]. 北京: 北京林业大学.
- Qin J. 2011. Drought and salinity resistant physiology and water consumption characteristics of main plantation tree species in high-cold region of loess plateau[D]. Beijing: Beijing Forestry University. (in Chinese)
- 谭娜, 徐文彦, 商哈武, 等. 2014. 水分胁迫对植物与植食性昆虫互作的影响[J]. *应用昆虫学报*, 51(4): 871–880.
- Tan Y, Xu W Y, Shang H W, *et al.* 2014. The influence of water stress on the plant-herbivore interactions[J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 871–880. (in Chinese)
- 王晨. 2022. 干旱胁迫对棉花生理代谢及棉蚜种群发生的影响[D]. 扬州: 扬州大学.
- Wang C. 2022. Effects of drought stress on the physiological metabolism of cotton plant and population dynamics of *Aphis gossypii* Glover[D]. Yangzhou: Yangzhou University. (in Chinese)
- 王涵. 2021. 亚洲玉米螟 (*Ostrinia furnacalis*) 的产卵偏好与后代表现关系研究[D]. 长春: 东北师范大学.
- Wang H. 2021. Research on the relationships between oviposition preference and offspring performance of *Ostrinia furnacalis*[D]. Changchun: Northeast Normal University. (in Chinese)
- 杨海燕. 2008. 水分胁迫和营养对斜纹夜蛾的影响及其机制初探[D]. 扬州: 扬州大学.
- Yang H Y. 2008. Studies on the effect of soil water stress and fertilization on *Spodoptera litura* (Fabricius) and its potential mechanism[D]. Yangzhou: Yangzhou University. (in Chinese)
- 赵旭东, 耿意舒, 郝德君, 等. 2022. 美国白蛾防控技术的研究进展及展望[J]. *中国森林病虫*, 41(5): 44–52.
- Zhao X D, Geng Y S, Hao D J, *et al.* 2022. Research progress and prospect of the control technology of *Hyphantria cunea*[J]. *Forest Pest and Disease*, 41(5): 44–52. (in Chinese)
- 张书曼. 2022. 美国白蛾幼虫对八种寄主幼树生长适应性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学.
- Zhang S M. 2022. Growth adaptability of *Hyphantria cunea* larvae to 8 host young trees[D]. Harbin: Northeast Forestry University. (in Chinese)
- Baqui M A, Kershaw W J S. 1993. Effect of plant water stress on honeydew production, weight gain and oviposition of brown planthopper *Nilaparvata lugens* on rice cultivars[J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 67(1): 25–30.
- Brändle M, Amarell U, Auge H, *et al.* 2001. Plant and insect diversity along a pollution gradient: Understanding species richness across trophic levels[J]. *Biodiversity & Conservation*, 10(9): 1497–1511.
- Cao L J, Wei S J, Hoffmann A A, *et al.* 2016. Rapid genetic structuring of populations of the invasive fall webworm in relation to spatial expansion and control campaigns[J]. *Diversity and Distributions*, 22(12): 1276–1287.
- Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. 2003. Understanding plant responses to drought: From genes to the whole plant[J]. *Functional Plant Biology*, 30(3): 239–264.
- Che-Castaldo C, Crisafulli C M, Bishop J G, *et al.* 2019. Disentangling herbivore impacts in primary succession by refocusing the plant stress and vigor hypotheses on phenology[J]. *Ecological Monographs*, 89(4): 1–26.
- Chown S L, Sørensen J G, Terblanche J S. 2011. Water loss in insects: An environmental change perspective[J]. *Journal of Insect Physiology*, 57(8): 1070–1084.

- Guang Y, Xiong G, Gefu W, *et al.* 2007. Advances on induced plant defense genes against insect pests[J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 15(1): 157–166.
- Gutbrodt B, Dorn S, Unsicker S B, *et al.* 2012. Species-specific responses of herbivores to within-plant and environmentally mediated between-plant variability in plant chemistry[J]. *Chemoecology*, 22(2): 101–111.
- Hanks L M, Denno R F. 1993. Natural enemies and plant water relations influence the distribution of an armored scale insect[J]. *Ecology*, 74(4): 1081–1091.
- Hare P D, Cress W A, Van Staden J. 1998. Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress[J]. *Plant, Cell & Environment*, 21(6): 535–553.
- Huberty A F, Denno R F. 2004. Plant water stress and its consequences for herbivorous insects: A new synthesis[J]. *Ecology*, 85(5): 1383–1398.
- Kansman J T, Basu S, Casteel C L, *et al.* 2022. Plant water stress reduces aphid performance: Exploring mechanisms driven by water stress intensity[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10: 846908.
- Lewis M T, Poelstra J W, Michel A P. 2025. Host plant flooding stress in soybeans differentially impacts avirulent and virulent soybean aphid (*Aphis glycines*) biotypes[J]. *Scientific Reports*, 15: 4897.
- Pei S Y, Tao Q, Li W K, *et al.* 2024. Osmosensor-mediated control of Ca²⁺ spiking in pollen germination[J]. *Nature*, 629(8014): 1118–1125.
- Rodiyati A, Arisoelaningsih E, Isagi Y, *et al.* 2005. Responses of *Cyperus brevifolius* (Rottb.) Hassk. and *Cyperus kyllingia* Endl. to varying soil water availability[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 53(3): 259–269.
- Showler A T, Moran P J. 2003. Effects of drought stressed cotton, *Gossypium hirsutum* L., on beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner) oviposition, and larval feeding preferences and growth [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 29(9): 1997–2011.
- Simpson K L S, Jackson G E, Grace J. 2012. The response of aphids to plant water stress—the case of *Myzus persicae* and *Brassica oleracea* var. *capitata*[J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 142(3): 191–202.
- Sun Y, Zhu X W, Sui L, *et al.* 2023. Effects of water stress on plant volatile emission and insect oviposition preference in an agroecosystem[J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 25(3): 458–467.
- Suzuki N, Rivero R M, Shulaev V, *et al.* 2014. Abiotic and biotic stress combinations[J]. *New Phytologist*, 203(1): 32–43.
- Waldbauer G P. 1964. The consumption, digestion and utilization of solanaceous and non-solanaceous plants by larvae of the tobacco hornworm, *Protoparce sexta* (Johan.) (Lepidoptera: Sphingidae)[J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 7(3): 253–269.
- War A R, Paulraj M G, Ahmad T, *et al.* 2012. Mechanisms of plant defense against insect herbivores[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 7(10): 1306–1320.