

灌溉量对干旱区沙枣树泌胶及诱杀 光肩星天牛能力的影响*

郝柯宇** 周 权 李呈澄 齐若涵 田 伊
裴佳禾 任利利*** 骆有庆***

(北京林业大学林木有害生物防治北京市重点实验室, 北京 100083)

摘 要 【目的】沙枣 *Elaeagnus angustifolia* 是一种中国西北地区的常见树种, 能够引诱光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* 成虫补充营养和刻槽产卵, 并通过在刻槽内泌胶抑制光肩星天牛卵孵化。本研究旨在探究不同灌溉策略下沙枣树势变化对诱杀光肩星天牛能力的影响, 从而确定科学的灌溉制度, 为推广合理配植沙枣以诱杀光肩星天牛提供理论基础。【方法】在试验地设置 6 种灌溉梯度, 测定不同灌溉条件下 (分别为 25、50、100、150、200 和 400 L/株) 沙枣的 10 项生理指标, 并统计沙枣上光肩星天牛当年刻槽数量、沙枣泌胶量和泌胶率, 分析各生理指标和泌胶量的关系。【结果】(1) 随着灌溉量的减少, 沙枣的 7 项生理指标 (叶面积指数、叶片大小、叶片鲜重、叶片含水率、叶绿素含量、木质部和树胶含水率) 呈现出下降的趋势, 2 项指标 (单位反应中心吸收的光能 ABS/RC 与单位反应中心捕获的光能 TR_0/RC) 上升, 1 项指标 ($PS II$ 最大光化学量子产量 F_v/F_m 值) 先升高后降低; (2) 随灌溉量减少, 沙枣树势减弱, 光肩星天牛当年刻槽数量先增加后减少, 200 L/株时达到最多, 沙枣的泌胶能力也呈现出下降趋势; (3) 叶面积指数和泌胶量的拟合优度最高, R^2 值达到 0.923 2。【结论】沙枣树势影响诱杀光肩星天牛的能力, 树势良好时诱杀的效果更好; 叶面积指数为判断沙枣泌胶能力的最佳指标; 在每 40 d 进行一次灌溉的条件下, 为了确保沙枣树能够维持其生理活性, 有效地吸引并泌胶杀灭光肩星天牛, 同时考虑到水资源的节约, 每株沙枣树的灌溉量控制在 150–200 L 是最优选择。

关键词 沙枣; 光肩星天牛; 树势; 灌溉控制; 诱杀能力

Effects of irrigation on the ability of *Elaeagnus angustifolia* to secrete gum, trap and kill *Anoplophora glabripennis* in arid areas

HAO Ke-Yu** ZHOU Quan LI Cheng-Cheng QI Ruo-Han TIAN Yi
PEI Jia-He REN Li-Li*** LUO You-Qing***

(Beijing Key Laboratory for Forest Pest Control, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract 【Aim】*Elaeagnus angustifolia* is a common tree species in northwest China that is attractive to adult female of *Anoplophora glabripennis* as an oviposition site, but which prevents the hatching of the eggs of this pest by producing copious amounts of gum. To investigate the effects of different irrigation conditions on the vigor of *E. angustifolia* trees, and how this, in turn, affects their ability to lure and kill *A. glabripennis*. 【Methods】Six different treatment areas with an irrigation gradient ranging from 25 to 400 L per plant, were established. Ten physiological indicators of tree vigor were measured and the number of fresh oviposition scars on individual trees in each treatment, and the amount, and rate, of gum secretion under different irrigation conditions, were measured and compared. The relationship between the physiological indicators and the

*资助项目 Supported projects: 国家林业和草原局揭榜挂帅项目 (202401-10); 国家重点研发计划 (2022YFD1401000); 国家自然科学基金 (32371886)

**第一作者 First author, E-mail: KeyuHao111@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: lily_ren@bjfu.edu.cn; youqingluo@126.com

收稿日期 Received: 2024-11-12; 接受日期 Accepted: 2025-01-03

amount of gum secreted was analyzed. **[Results]** (1) Seven physiological indicators (leaf area index, leaf size, leaf fresh weight, leaf moisture content, SPAD, xylem and gum moisture content) decreased with reduced irrigation. Two indicators (fluorescence parameters ABS/RC and TR_0/RC) increased, and one indicator (Fv/Fm) first increased, then decreased. (2) Trees were weakened by reduced irrigation. The number of fresh oviposition scars first increased, then decreased, reaching a maximum at an irrigation level of 200 L/plant. Gum secretion also declined at lower irrigation levels. (3) Leaf area index and the amount of gum secreted had the highest goodness of fit (R^2 value = 0.923 2). **[Conclusion]** The vigor of *E. angustifolia* affected both its attractiveness to *A. glabripennis* as an oviposition site, and its ability to secrete gum to kill the eggs and larvae of this pest. More vigorous trees were better able to produce gum to resist oviposition by *A. glabripennis*. Leaf area was the best indicator of gum secretion ability. We recommend an irrigation regime of 150-200 L per tree every 40 days to ensure that *E. angustifolia* can both attract adult *A. glabripennis*, and secrete sufficient gum to kill the eggs and larvae of this pest.

Key words *Elaeagnus angustifolia*; *Anoplophora glabripennis*; tree vigor; irrigation control; dead-end trap ability

光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* 是我国重要的林业蛀干害虫, 隶属于鞘翅目 Coleoptera, 天牛科 Cerambycidae, 沟胫天牛亚科 Lamiinae, 原产东北亚 (骆有庆, 2005), 20 世纪末和 21 世纪初, 光肩星天牛先后传入我国西北、东北和西南地区, 以种植感虫树种二白杨 *Populus × xiaohei* var. *gansuensis*、箭杆杨 *Populus nigra* var. *thevestina* 等为主的甘肃河西走廊、新疆等为重灾区 (黄铭昊等, 2023; 骆有庆和王立祥, 2024)。沙枣 *Elaeagnus angustifolia* 是我国西北地区本土种, 被广泛用作城市绿化、植树造林与经济树种, 具生命力强、抗旱、抗风沙、耐盐碱等特点 (管文轲和徐娜, 2012)。前期研究表明沙枣对光肩星天牛有一定的引诱性 (邵鹏鹏等, 2003; 田润民等, 2023), 李丰等 (1999) 提出诱杀树种的概念, 内蒙古自治区地方标准《光肩星天牛综合防治技术规程 DB15/T 1359—2018》指出, 沙枣可作为光肩星天牛的诱杀树。根据本课题组近年来的调查和研究发现, 沙枣对光肩星天牛有很强的诱引能力, 吸引光肩星天牛成虫来补充营养、刻槽和产卵, 同时能在刻槽部位分泌树胶, 包裹天牛卵和个别能孵化的幼虫, 使其死亡 (骆有庆和王立祥, 2024)。

研究表明, 沙枣树势与其对光肩星天牛的诱杀能力密切相关, 树势衰弱的沙枣诱杀天牛的能力会显著下降 (杨宗基等, 2024)。沙枣杀灭光肩星天牛卵主要是依靠分泌树胶, 这一功能的发挥与自身生理活性有关, 受到生理环境的制约 (阿迪力·吾彼尔等, 2005)。灌溉改善了林地

的水分条件, 减少了沙枣树的出胶率, 增加了单株出胶量 (李银芳等, 2006a)。生长在暖温带南疆的沙枣, 流胶率低于寒冷的中温带北疆 (李银芳等, 2012)。李银芳等 (2006b) 研究表明, 沙枣泌胶受水分影响, 在湿润林带的沙枣出胶率低, 但出胶量高, 干旱林带则出胶率高而出胶量低。

我国西北地区降雨量少, 蒸发量大, 水资源缺乏, 水分条件对植树造林起着制约作用 (陈昌毓, 1991), 灌溉在保证当地造林成活及发挥其生态功能中显得尤为重要和关键。合理的灌溉制度能够保证防护林的生长, 但大水漫灌不可取, 在保证沙枣正常生长并分泌树胶杀灭光肩星天牛的同时, 尽可能地节约浇灌用水, 因此灌水量的确定十分重要。

干旱胁迫会引起植物水分亏缺, 破坏植物的正常生长, 加快组织、器官和个体的衰老与死亡 (Chaves *et al.*, 2002; Bréda *et al.*, 2006)。植物对干旱胁迫的反应与适应性的研究有两个方面: 一是植物形态的反应和适应性, 主要包括树木高、叶片数、叶面积及生物量等受到抑制 (申亚梅等, 2006; 龙海燕和邓伦秀, 2019)。二是植物生理生化对干旱胁迫的反应和适应性, 主要包括水势减少、气孔开度减小、光合和蒸腾作用受到抑制等 (Lawlor and Tezara, 2009; 王仲礼等, 2015)。研究表明, 叶片是植物在干旱胁迫下形态变化敏感的器官之一 (麻雪艳和周广胜, 2018), 如胁迫后发生叶面积减小、叶水势降低等 (陈图强等, 2023; 武子豪, 2023; 刘彤等, 2024)。叶面积指数表征植被叶片的疏密程度,

反映植被的光合作用、呼吸作用、蒸腾作用等方面的能力(刘洋等, 2013)。叶绿素含量(Soil and plant analyzer development, SPAD 值)与植物光和能力密切相关, 在胁迫下其含量会下降(周敏姑等, 2020; 赵英等, 2023)。叶绿素荧光技术作为在逆境条件下探测植物叶片光和能力的有效指针, 对于干旱胁迫有着一系列的反映, 可用于评价植物光合作用受抑制的程度: PS II 最大光化学量子产量 (F_v/F_m) 下降、单位反应中心捕获的光能 (TR_o/RC)、单位反应中心吸收的光能 (ABS/RC) 等上升 (Mehta *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2020; 郭葳等, 2024; 王明川等, 2025)。组织含水率(如叶片、枝条、根系等)也是植物受外界水分胁迫后直接表征体内水分状况的指标(姚觉等, 2007; 唐承财等, 2008; 孙琪等, 2016), 随灌溉程度的变化, 植物组织含水率也会发生改变(姜准等, 2017)。

综上, 本研究通过在西北地区, 利用当地极端干旱的环境条件, 通过人为设置梯度控制沙枣林带灌溉量, 测定各灌溉量下树势指标并对比分析沙枣树势变化、受光肩星天牛为害情况和泌胶能力的差异, 筛选出最适合判断沙枣泌胶能力的指标, 从而进一步分析沙枣树势和诱杀光肩星天牛能力的关系, 并确定科学的灌水量, 在保证沙枣正常生长并分泌树胶杀灭光肩星天牛的同时, 尽可能的节约浇灌用水。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及灌溉设置

研究区位于甘肃省嘉峪关市戈壁滩区域 ($39.74852403^{\circ}\text{N}$, $98.22124456^{\circ}\text{E}$), 属于典型的温带大陆性荒漠气候, 日照长而强烈, 降水少, 蒸发快, 多大风, 温差大。年平均降水量 85 mm 左右, 年平均蒸发量在 2 149 mm 左右, 蒸发量约是降水量的 25 倍(肖凯等, 2021)。试验地位于甘肃省嘉峪关市长城第一墩风景区外线柳-沙枣-二白杨混交防护林地, 地基为戈壁沙漠, 于 2014 年采用换土法种植, 林分为条带状片林, 每片有 5 行沙枣, 行间距为 2 m, 每行沙枣的种

植间隔为 2 m, 沙枣平均胸径 (10.0 ± 0.9) cm, 平均树高 (5.2 ± 0.6) m。

1.2 灌溉系统介绍

该试验地有由水泵站、地下分水井以及浇灌道组成的灌溉系统, 水泵站由电动抽水泵和流量计组成。同时, 为了避免浇灌水压的不足, 每隔一定距离设置了地下分水井, 通过水阀进行浇灌区域的控制。浇灌道包括地下主管道和多条地上分水管, 每行树对应一条地上分水管。并且, 有护林员等相关工作人员管理该防护林带的灌溉问题, 管护条件良好规范。

1.3 灌溉量设置及虫源情况

灌溉控制量及各灌溉区虫源情况如表 1 所示, 从生长季末、沙枣无叶片生长的 4 月开始进行灌溉控制, 直到 8 月结束灌溉, 每 40 d 灌溉一次, 共进行 4 次控制性灌溉。具体灌溉时间为 2023 年 4 月 24 日-4 月 28 日、5 月 27 日-5 月 31 日、7 月 6 日-7 月 12 日和 8 月 16 日-8 月 21 日。

沙枣灌溉控制的 4-8 月的降水量如表 2 所示。降水量、月平均气温数据来源于中国气象数据网 (<https://data.cma.cn>), 降水量为 20-20 时月降水量 (mm)。

1.4 沙枣叶片生理指标采集

生理指标的采集时间为 2023 年 9 月下旬。为避免边际效应, 在每个灌溉控制段的中间位置选取样树, 每个灌溉处理选取 5 棵沙枣树, 共选择 30 棵沙枣样树。在每棵样树的四周按照上中下的顺序选取叶片, 用高枝剪在每棵沙枣样树上剪取 12 个叶片, 共计 360 个叶片进行生理指标的测定:

叶面积指数: 于树下距离树干 0.5 m 处, 使用 LAISmart 软件 (安卓版 v1.9) (洪楚翘和屈永华, 2023), 测量样树单木的四个方位的叶面积指数并取平均值。

叶绿素含量测定: 叶片剪下后立即用 SPAD 仪 (SPAD-502, Konica Minolta Inc., 日本) (李岚涛等, 2014) 进行叶绿素含量采集, 每个叶片测量 3 次取平均值作为实际叶绿素含量。

表 1 6 块样地灌溉控制量及虫源情况
Table 1 Irrigation control volume and sources of pests in six sample plots

样地编号 Sample plot no.	沙枣种植面积 (m ²) Area planted with <i>E. angustifolia</i> (m ²)	沙枣数量 Number of <i>E. angustifolia</i>	株均浇灌量 (L) Average irrigation volume per plant (L)	总灌溉量 (m ³) Total irrigation volume (m ³)	二白杨株均排粪孔 数 Average frass holes per plant of <i>P.</i> <i>× xiaohei</i> var. <i>gansuensis</i>	二白杨株均羽化孔 数 Average emergence holes per plant of <i>P. × xiaohei</i> var. <i>gansuensis</i>
南 1 South 1	1 700	425	400	170.00	8.5±7.6	0.2±0.5
南 2 South 2	1 000	250	200	50.00	22.2±14.1	2.0±2.3
北 1 North 1	1 600	400	150	60.00	12.8±8.1	0.5±1.1
北 2 North 2	1 800	450	100	45.00	21.2±13.9	3.0±6.1
北 3 North 3	1 800	450	50	22.50	8.2±5.3	2.3±2.9
北 4 North 4	1 800	450	25	11.25	6.0±7.0	0.3±0.8

表 2 2023 年 4-8 月嘉峪关市降水量与气温变化
Table 2 Changes in precipitation and temperature in Jiayuguan City, April-August, 2023

月份 Month	降水量 (mm) Precipitation (mm)	平均气温 (°C) Average temperature (°C)	平均最高气温 (°C) Average maximum temperature (°C)	平均最低气温 (°C) Average minimum temperature (°C)
4 月 April	4.5	9.3	17.2	3.0
5 月 May	1.9	16.4	23.0	9.6
6 月 June	0.2	23.1	30.0	15.6
7 月 July	11.2	24.7	31.7	16.9
8 月 August	1.3	23.1	30.3	16.1

叶片含水率：用电子天平（Sartorius SQP，精度 0.001 g）测得每个叶片的鲜重与干重，并计算叶片含水率。新鲜叶片称取鲜重后放入 50 °C 烘箱内烘干，待烘干至恒重后称取叶片的干重。

叶绿素荧光指数：将叶片进行暗处理后使用 Flourpen FP110 手持式叶绿素荧光仪（Komakech *et al.*, 2020）测量每个叶片的 *Fv/Fm*、*ABS/RC* 和 *TRo/RC* 荧光指数。

叶片大小：使用数码相机（Nikon D810）拍摄叶片照片，在照片中放入一根标准钢尺作为参照物，并使用 ImageJ 1.53k 软件（林权虹等，2022）进行叶片大小计算。

1.5 沙枣木质部和树胶含水率测量

木质部和树胶的采集时间为 2023 年 9 月下旬。在每个灌溉区内随机选取 3 株高度、胸径等相似的沙枣树，用凿子、刻刀等在每棵树主干上

各采集 3 块木质部和树胶。

含水率测定：分别用电子天平秤（Sartorius SQP，精度 0.001 g）称量木块及胶块鲜重，在（103±2）°C 的温度下烘至恒重，测定干重。

含水率 = $\frac{\text{样品鲜重} - \text{样品干重}}{\text{样品鲜重}} \times 100\%$ 。

1.6 光肩星天牛当年刻槽数统计

于 2023 年 7 月，在 6 块灌溉区内各设置 10 m × 10 m 的样方，统计样方中光肩星天牛危害高峰前每株沙枣树上的往年刻槽数量，待 9 月危害高峰期过后再次进行林间调查，统计样方内当年刻槽数量。

1.7 沙枣泌胶率和泌胶量测量

在每个灌溉区内随机选择 10 株高度、胸径等相似的沙枣树，根据野外观察现象，选择在光肩星天牛通常刻槽的 6-8 年生大枝或主干部位，使用已消毒的 10 mm 冲子制造引胶孔，每株沙

枣重复 3 次。

泌胶率观察: 待灌溉期结束且沙枣泌胶稳定后观察记录每个孔是否泌胶, 计算泌胶率。

$$\text{泌胶率} = \frac{\text{实际泌胶孔数}}{\text{总泌胶孔数}} \times 100\%。$$

泌胶量测定: 用镊子和刻刀将每个泌胶孔内的树胶全部挖出, 分别用电子天平称 (Sartorius SQP, 精度 0.001 g) 称重, 记录泌胶量。

1.8 数据处理

采用 Excel 2021、GraphPad Prism 10.0.2 和 Origin Pro 2023 软件对数据进行单因素方差分析和线性拟合, 采用 Tukey 检验进行显著性的多重比较 ($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 灌溉条件对沙枣树势生理指标的影响

6 种灌溉处理下的沙枣树叶片的各项生理指

标如表 3 所示, 叶片大小比较如图 1 所示。随着灌溉量减少, 叶面积指数、叶片大小、叶片鲜重、叶片含水率和叶绿素含量 (SPAD) 总体呈现出下降的趋势, 荧光参数 ABS/RC 与 TR_0/RC 总体呈现出上升的趋势, 叶片的 Fv/Fm 值先升高后降低。

400 L/株灌溉量下的沙枣叶面积指数为 $(3.56 \pm 0.31) \text{ m}^2/\text{m}^2$, 显著高于其他灌溉量 ($P < 0.05$), 25 L/株时的叶面积指数最低, 仅为 $(1.64 \pm 0.32) \text{ m}^2/\text{m}^2$; 400、200 和 150 L/株的叶片大小均大于 10 cm^2 且无显著性差异 ($P > 0.05$), 其他灌溉水平下均小于 8 cm^2 , 25 L/株的灌溉量下的平均叶片最小, 仅为 $(4.48 \pm 1.55) \text{ cm}^2$ 。200 L/株时的叶片鲜重均值最高, 为 $(0.25 \pm 0.07) \text{ g}$, 与 400 和 150 L/株下的值无显著性差异 ($P > 0.05$); 鲜重最低的灌溉量为 25 L/株, 仅 $(0.09 \pm 0.04) \text{ g}$ 。400 L/株灌溉的叶片含水率为最高值 $71.13\% \pm 5.11\%$, 与 200 L/株无显著性差异 ($P > 0.05$), 50 L/株时的叶片含水率为最低

表 3 不同灌溉条件下沙枣叶片的生理指标

Table 3 Physiological indexes of leaf slices of *Elaeagnus angustifolia* under different irrigation conditions

参数 Parameters	株灌溉量 (L) Irrigation volume per plant (L)					
	400	200	150	100	50	25
叶面积指数 (m^2/m^2) Leaf area index (m^2/m^2)	3.56 ± 0.31 a	2.56 ± 0.52 b	1.93 ± 0.30 c	1.93 ± 0.35 c	1.72 ± 0.24 d	1.64 ± 0.32 d
叶片大小 (cm^2) Leaf size (cm^2)	11.18 ± 4.76 a	11.06 ± 2.87 a	10.65 ± 2.95 a	7.16 ± 2.99 b	6.69 ± 2.32 b	4.48 ± 1.55 c
叶片鲜重 (g) Fresh weight of leaf (g)	0.24 ± 0.10 a	0.25 ± 0.07 a	0.22 ± 0.09 a	0.15 ± 0.07 b	0.13 ± 0.05 c	0.09 ± 0.04 d
叶片含水率 (%) Leaf moisture content (%)	71.13 ± 5.11 a	69.19 ± 5.98 a	61.75 ± 5.10 b	61.59 ± 10.44 b	53.11 ± 9.78 c	56.55 ± 12.23 c
叶绿素含量 SPAD 值 The chlorophyll content SPAD	66.85 ± 8.08 a	66.07 ± 9.54 a	61.79 ± 9.11 b	55.99 ± 8.43 c	52.83 ± 8.19 d	46.13 ± 10.50 e
PS II 最大光化学量子产量 Fv/Fm Maximum photochemical efficiency of PS II Fv/Fm	0.78 ± 0.06 b	0.80 ± 0.03 a	0.77 ± 0.12 b	0.72 ± 0.06 c	0.68 ± 0.10 d	0.49 ± 0.19 e
单位反应中心吸收的光能 ABS/RC Light energy absorbed per unit reaction center ABS/RC	2.08 ± 0.34 c	1.90 ± 0.24 d	2.14 ± 0.05 c	2.39 ± 0.54 b	2.56 ± 0.58 b	4.02 ± 2.26 a
单位反应中心捕获的光能 TR_0/RC Light energy captured per unit reaction center TR_0/RC	1.60 ± 0.20 c	1.52 ± 0.18 d	1.59 ± 0.25 c	1.68 ± 0.24 b	1.70 ± 0.17 b	1.74 ± 0.21 a

表中数据为平均值 $\pm$ 标准误, 同一行数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, Tukey 检验)。

The data in the table are mean $\pm$ SE, and followed by different lowercase letters in the same row indicate significant difference ($P < 0.05$, Tukey test).

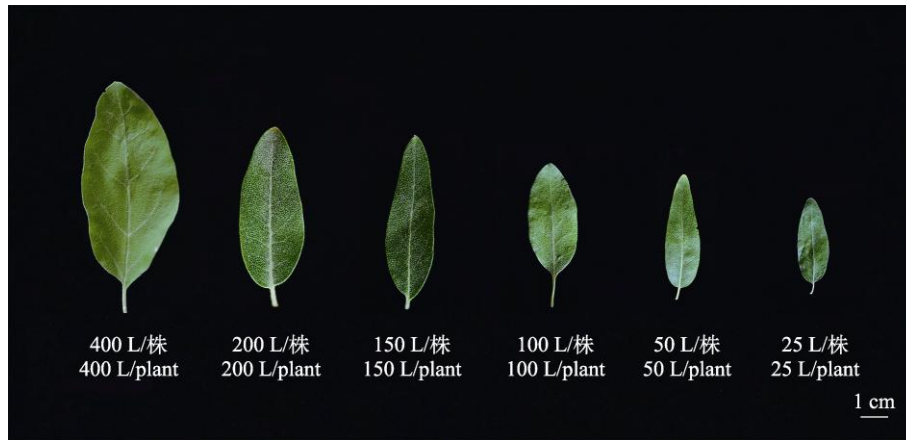


图 1 不同灌溉条件下沙枣叶片图示

Fig. 1 Leaf blades of *Elaeagnus angustifolia* under different irrigation conditions

值 $53.11\% \pm 9.78\%$, 且与 25 L/株无显著性差异 ($P > 0.05$)。400 L/株灌溉条件下的 SPAD 为最高值 66.85 ± 8.08 , 与 200 L/株无显著性差异 ($P > 0.05$)。25 L/株下的 SPAD 为最低值 46.13 ± 10.50 , 且显著低于其他灌溉量的值 ($P < 0.05$)。沙枣树叶片的 F_v/F_m 值在 200 L/株时为最高 0.80 ± 0.03 , 显著高于其他灌溉量 ($P < 0.05$)。25 L/株时为最低值 0.49 ± 0.19 , 显著低于其他灌溉量的值 ($P < 0.05$)。叶片荧光参数 ABS/RC 与 TR_0/RC 都在 200 L/株时最低, 分别为 1.90 ± 0.24 和 1.52 ± 0.18 , 且都显著低于其他灌溉量 ($P < 0.05$)。在 25 L/株时都为最高值, 分别达到 4.02 ± 2.26 和 1.74 ± 0.21 , 且显著高于其他灌

溉量 ($P < 0.05$)。

木质部含水率随灌溉量减少总体呈下降趋势, 在灌溉量为 50 L/株时达到最低, 平均仅为 $35.96\% \pm 3.98\%$, 显著低于 400 L/株 ($P < 0.05$)。平均值为 $50.93\% \pm 4.10\%$ (图 2: A), 其余灌溉量下的沙枣木质部含水率均无显著性差异 ($P > 0.05$)。随灌溉量的减少, 沙枣胶的含水率表现出一定的下降趋势 (图 2: B), 在 400 L/株的灌溉量下, 沙枣胶的平均含水率为 $13.10\% \pm 10.58\%$, 在 25 L/株的灌溉量下, 平均含水率为 $6.01\% \pm 1.75\%$, 尽管数值上有所变化, 但在统计分析中并未显示出显著性差异 ($P > 0.05$), 因此不能断定灌溉量对沙枣胶含水率有显著影响。

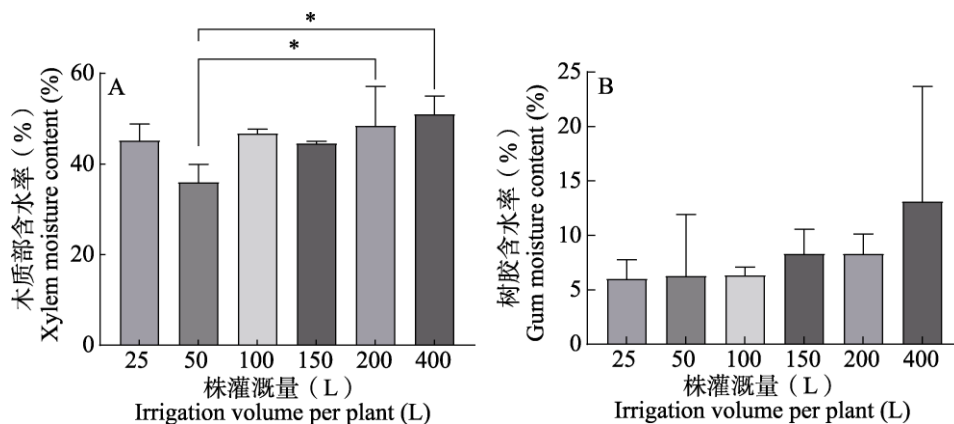


图 2 不同灌溉条件下沙枣木质部和树胶含水率变化

Fig. 2 Change in moisture content of xylem and gum of *Elaeagnus angustifolia* under different irrigation conditions

A. 木质部含水率变化; B. 树胶含水率变化。*表示差异显著 ($P < 0.05$, Tukey 检验)。图 5 同。

A. Change in xylem moisture content; B. Change in gum moisture content. * indicates significant difference at 0.05 levels by Tukey test. The same for Fig. 5.

2.2 不同灌溉条件下光肩星天牛当年刻槽数量的差异

由图 3 (A) 可见, 光肩星天牛当年新增刻槽总数随灌溉量的降低, 总体呈先增加后减少的趋势, 灌溉量 200 L/株时最多为 37 个, 灌溉量 25 L/株时无当年刻槽。图 3 (B) 为光肩星天牛

在每株沙枣上的平均当年刻槽数量与灌溉量之间的对应关系, 沙枣株均当年刻槽数量随灌溉量增加先增多后减少, 灌溉量达到 200 L/株时平均刻槽最多。根据散点分布情况, 多项式拟合后的曲线方程为 $y = -1.165\ 04 + 0.032\ 74x - 0.000\ 063\ 212\ 8x^2$, $R^2 = 0.779\ 89$ 。

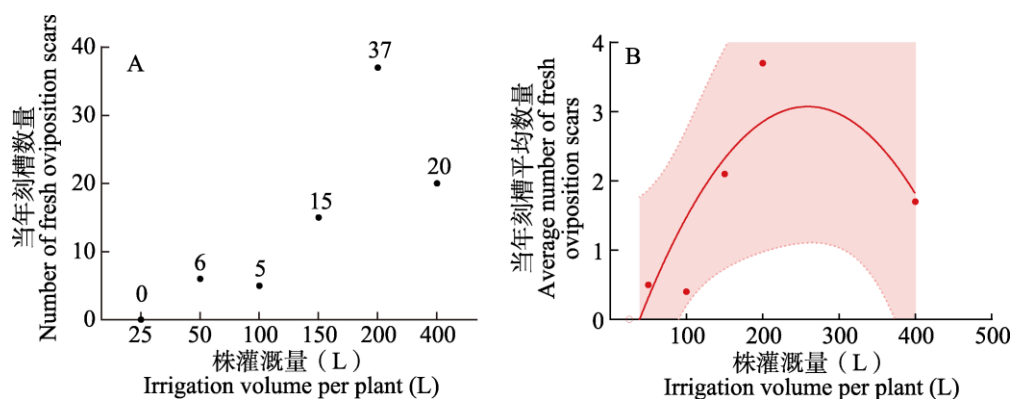


图 3 不同灌溉条件下光肩星天牛在沙枣上的当年刻槽数量变化

Fig. 3 Change in number of fresh oviposition scars caused by *Anoplophora glabripennis* on *Elaeagnus angustifolia* under different irrigation conditions

A. 不同灌溉条件下光肩星天牛在沙枣上的当年刻槽总数变化; B. 光肩星天牛当年刻槽平均数量与灌溉量之间的多项式曲线拟合。

A. Change in total number of fresh oviposition scars caused by *A. glabripennis* on *E. angustifolia* under different irrigation conditions; B. Polynomial curve fitting between the average number of fresh oviposition scars caused by *A. glabripennis* and irrigation.

2.3 不同灌溉条件下沙枣人工引胶孔泌胶量和泌胶率的差异

在沙枣树上人工打孔制造引胶孔后的泌胶情况如图 4 (A, B) 所示, 灌溉量 400 L/株时沙

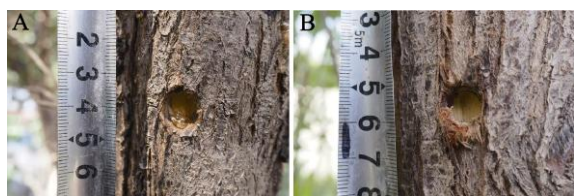


图 4 沙枣引胶孔泌胶情况对比

Fig. 4 Comparison of gum secretion in leading holes of *Elaeagnus angustifolia*

A. 泌胶的引胶孔; B. 未泌胶的引胶孔。

A. Leading holes that have secreted gum;

B. Leading holes without gum secretion.

枣泌胶量最高 (图 5: A), 单孔泌胶量最高达 0.78 g, 沙枣平均株泌胶量为 (0.73 ± 0.42) g ($n = 10$), 10 株沙枣共泌 7.29 g, 泌胶量显著高于其余灌溉量 ($P < 0.05$)。灌溉量 50 L/株的沙枣泌胶量最低, 每株平均泌胶 (0.12 ± 0.23) g ($n = 10$), 10 株总泌胶 1.22 g。随灌溉量减少, 沙枣泌胶率总体呈下降趋势, 灌溉量 400 L/株时, 泌胶率达最高值 96.67%, 50 L/株时泌胶率为最低值 43.33% (图 5: B)。

2.4 沙枣各生理指标与泌胶量的关系

分析沙枣 10 个生理指标与泌胶量之间的对应关系, 除叶片荧光参数 ABS/RC 、 TR_0/RC 和泌胶量呈负相关关系外, 另外 8 项指标与泌胶量均呈正相关关系。根据散点分布情况, 用线性回归方程对其进行拟合 (表 4), 其中 X 为灌溉量,

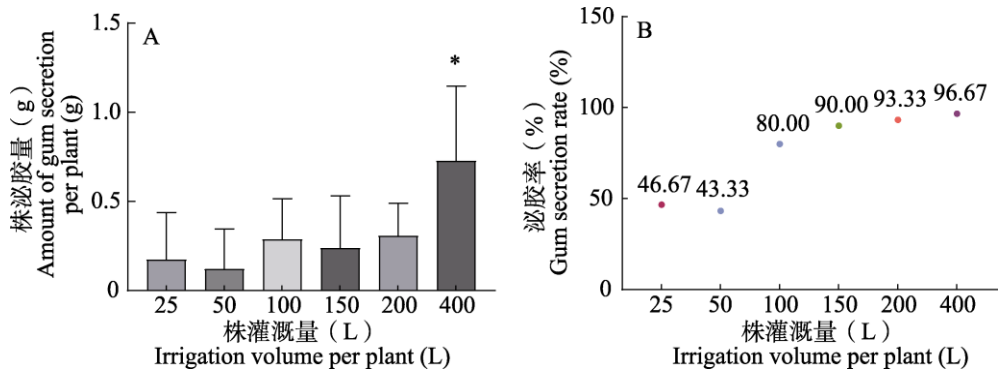


图 5 不同灌溉条件下沙枣泌胶量和泌胶率变化

Fig. 5 Change in the amount and rate of gum secretion of *Elaeagnus angustifolia* under different irrigation conditions

A. 不同灌溉条件下沙枣株均泌胶量变化; B. 不同灌溉条件下沙枣泌胶率变化。n=30。
A. Change in the average amount of gum secretion of *E. angustifolia* under different irrigation conditions;
B. Change in gum secretion rate of *E. angustifolia* under different irrigation conditions. n=30.

表 4 沙枣的 10 项生理指标与泌胶量之间的线性回归方程

Table 4 Linear regression equations between 10 physiological indicators of *Elaeagnus angustifolia* and amount of gum secretion

生理指标 Physiological indices	回归方程 Regression equations	R ²
叶面积指数 (m ² /m ²) Leaf area index (m ² /m ²)	Y ₀ =3.238X+1.218	0.923 2
叶片大小 (cm ²) Leaf size (cm ²)	Y ₁ =8.006X+6.051	0.380 1
叶片鲜重 (g) Fresh weight of leaf (g)	Y ₂ =0.196 4X+0.118 2	0.391 0
叶片含水率 (%) Leaf moisture content (%)	Y ₃ =26.61X+53.96	0.682 4
叶绿素含量 SPAD 值 The chlorophyll content SPAD	Y ₄ =25.73X+50.29	0.472 5
PS II 最大光化学量子产量 Fv/Fm Maximum photochemical efficiency of PS II Fv/Fm	Y ₅ =0.254 7X+0.626 6	0.225 4
单位反应中心吸收的光能 ABS/RC Light energy absorbed per unit reaction center ABS/RC	Y ₆ = - 1.544X+2.994	0.186 3
单位反应中心捕获的光能 TRo/RC Light energy captured per unit reaction center TRo/RC	Y ₇ = - 0.150 1X+1.683	0.158 0
木质部含水率 (%) Xylem moisture content (%)	Y ₈ =0.177 0X+0.397 9	0.559 1
树胶含水率 (%) Gum moisture content (%)	Y ₉ =0.116 9X+0.044 29	0.893 6

Y_n 为沙枣生理指标, 由表 4 可知, 叶片含水率和泌胶量拟合曲线的斜率最高; 从 R² 大小来看, 叶面积指数拟合优度为最高, 达到 0.923 2, 说明可以作为沙枣泌胶量的重要判断依据。

3 讨论

对于不同灌溉量下的沙枣生理指标而言, 灌溉量为 150-400 L/株下的沙枣要明显优于 25-100 L/株, 说明在 150-400 L/株的灌溉量下沙枣能够保持相对正常生长。将 150、200 与 400 L/株灌溉量下的沙枣分别比较, 三者的叶面积指数差异显著, 分别为 (3.56±0.306)、(2.561±0.522)

和 (1.931±0.297) m²/m²; 从叶片大小而言, 150-400 L/株的灌溉下无显著差异, 均大于 10 cm²; 从鲜重与含水率进行比较, 150-400 L/株下的沙枣单叶片鲜重均大于 0.2 g, 三者无明显差异, 但 200-400 L/株的叶片含水率要优于 150 L/株; 从叶绿素含量进行比较, 200-400 L/株的 SPAD 值均大于 66, 两者无显著差异, 150 L/株时显著低于前两者, 为 61.785±9.112; 在正常的生长状态下, 叶片的荧光参数 Fv/Fm 在 0.75-0.85 之间, 变化幅度极小, 并且不受物种和生长条件的影响, 胁迫条件下该参数明显下降 (孔蓓蓓, 2009), 表 3 显示 150-400 L/株灌溉量下的沙枣

树叶片的 Fv/Fm 的值处于 0.75-0.85 之间 (最大值为 0.80 ± 0.03 , 最小值为 0.77 ± 0.12) ; 三者木质部含水率和树胶含水率也无显著差异。并且, 灌溉量为 150-400 L/株的沙枣当年刻槽数量多于 25-100 L/株, 且三者间无显著性差异, 可以说明树势良好的情况下沙枣引诱光肩星天牛的能力也较好。从泌胶量与沙枣各生理因子的拟合情况来看, 叶面积指数的拟合优度达到 0.923 2, 高于其他参数, 一定程度可以说明叶面积指数是沙枣树的生长活性和泌胶能力的最佳判断指标。同时, 叶面积指数相对于其他参数获取更加方便, 可直接在野外采集。

对于不同灌溉量下的沙枣树的泌胶能力, 随着灌溉量的下降, 沙枣的泌胶量和泌胶率呈现出下降的趋势, 这进一步说明了沙枣树势和泌胶能力紧密相关。研究表明, 沙枣树的出胶量与自身的生理活性有关, 泌胶能力受到水分条件、气温和树龄等的影响, 良好的水分条件和适宜的气温可以提高沙枣的生理活性, 从而增加泌胶量 (阿迪力·吾彼尔等, 2005; 李银芳和阿迪力·吾彼尔, 2006) ; 同时, 树龄适中的成熟沙枣林生理活性旺盛, 具有更高的泌胶能力 (李银芳和阿迪力·吾彼尔, 2006) 。本次研究对象是树龄 10 年以上的沙枣, 灌溉量 100-400 L/株下的沙枣树泌胶量比 25-50 L/株时更多, 从而可能更好的包裹和杀灭光肩星天牛卵。灌溉量 150-400 L/株下的泌胶率均大于 90%, 远远高于 25-100 L/株。对于我国西北地区的光肩星天牛的实际防治应用而言, 在保证沙枣树正常生长分泌树胶、正常诱杀光肩星天牛的前提下应因地制宜尽可能节约用水, 400 L/株下的沙枣的泌胶量和泌胶率尽管最高, 但灌水量确是 150-200 L/株灌溉量的数倍, 泌胶率却仅高 4%-7%, 因此, 150-200 L/株的灌溉量为最适宜。

本研究结果表明, 不同灌溉条件下的沙枣树势会影响引诱光肩星天牛的能力, 但同时沙枣释放的挥发物也是影响引诱效果的重要因素。马晓乾等 (2022) 对光肩星天牛寄主植物挥发物进行了相关研究, 表明光肩星天牛雌成虫对 5 种槭树

中邻苯二甲酸二辛酯、己二酸二异丁酯和桉烯等 21 种挥发物存在明显的 EAD 反应; Nehme 等 (2009) 通过 Y 型嗅觉仪证明, 3-萜烯能够引起光肩星天牛雌虫的嗅觉反应, 且朱宁等 (2017) 对青皮垂柳野外试验进一步验证了 3-萜烯对光肩星天牛有吸引作用; 王改进 (2024) 表明光肩星天牛对腐皮镰刀菌侵染后沙枣挥发物中 3-己醇的触角电位反应最强烈, 其次为丙烯酸丁酯和乙酸丁酯。不同灌溉量下沙枣大枝和小枝的挥发物含量差异也是目前正在研究的问题, 有待进行进一步综合分析。

本文并无直接测定土壤含水量, 因为各灌溉区沙枣的树龄一致且土层均约 1 m 高, 所以推测各灌溉区沙枣根系分布所在土层大致保持一致, 可以考虑忽略土壤湿度的尺度性差异; 其次, 相关研究表明, 灌溉增加土壤含水量, 且随灌溉量增加土壤含水量也会升高, 在一定土层范围内土壤含水量的变化趋势与灌溉量一致 (胡力文等, 2024) , 可以考虑用灌溉量替代土壤含水量; 并且, 前人通过设计灌溉梯度来分析和植物指标的相关性, 土壤含水量并无直接测定, 同样的方法可以广泛用于灌溉控制实验 (齐容镰, 2021; 马旭等, 2023; 朱心宇等, 2023) 。综上, 对于野外实验而言, 可以考虑通过梯度设置灌溉量来研究与沙枣树体不同部分含水率的相关性, 但直接测定土壤含水量确实会更严谨, 在日后的相关研究中会将土壤含水量列为重要的测量指标。

按照本研究的灌溉条件, 处理之间的差异可能被淡化了, 但也可能增强。无论灌溉量是 400 L/株还是 50 L/株, 在每次灌溉初始土壤都表现为不缺水状态, 在灌溉结束后, 随着水逐渐被树体吸收和蒸发, 各灌溉区土壤先后逐渐表现为缺水状态, 从而达到干旱控制的条件。同时, 树木在灌溉期间不缺水的情况下逐渐吸收水分, 当灌溉结束后树势的变化对于旱环境有一个反应过程, 如果在灌溉结束后不久就进行采样, 可能缩短了树体对于旱的响应时间, 导致处理间的差异减弱。

4 结论

灌溉条件会显著影响沙枣树势, 从而影响沙枣诱杀光肩星天牛的能力。沙枣树势良好时, 对光肩星天牛的诱杀效果更好; 叶面积指数可作为判断沙枣泌胶能力的最佳指标; 在每 40 d 进行一次灌溉的条件下, 为了确保沙枣树能够维持其生理活性, 有效地吸引并泌胶杀灭光肩星天牛, 同时考虑到水资源的节约, 每株沙枣树的灌溉量控制在 150-200 L 是最优选择。

参考文献 (References)

- Adil · Gafur, Li YF, Omarjan · Ali, Dong X, Su WP, Mamat · Amat, Tursun · Abi, 2005. Environmental factors affecting gum exudation of *Elaeagnus angustifolia*. *Arid Land Geography*, 28(4): 521–525. [阿迪力 · 吾彼尔, 李银芳, 吾满江 · 艾力, 董昕, 苏为平, 买买提 · 艾买提, 吐尔逊 · 艾比, 2005. 沙枣树的出胶与环境影响因素研究. 干旱区地理, 28(4): 521–525.]
- Bréda N, Huc R, Granier A, Dreyer E, 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: A review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63(6): 625–644.
- Chaves MM, Pereira JS, Maroco J, Rodrigues ML, Ricardo CP, Osório ML, Carvalho I, Faria T, Pinheiro C, 2002. How plants cope with water stress in the field. Photosynthesis and growth. *Annals of Botany*, 89(7): 907–916.
- Chen CY, 1991. Actual water resource and its influence on adaptive faculty of tree in the Hexi Corridor, Gansu Province. *Acta Geographica Sinica*, 46(1): 35–46. [陈昌毓, 1991. 甘肃河西走廊实际水资源及其对林木适生程度的影响. 地理学报, 46(1): 35–46.]
- Chen TQ, Xu GQ, Chen JZ, Liu SS, Li JY, Hu HF, 2023. Effects of different water supply amounts on physiology, growth, and fruit quality of walnut trees. *Chinese Journal of Ecology*, 42(11): 2578–2587. [陈图强, 徐贵青, 陈家祯, 刘深思, 李金瑶, 虎海防, 2023. 不同灌水量对核桃树生理、生长和果实品质的影响. 生态学杂志, 42(11): 2578–2587.]
- Guan WK, Xu N, 2012. Research situation and resources utilization of *Elaeagnus angustifolia*. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 18(19): 119–120, 213. [管文轲, 徐娜, 2012. 沙枣资源利用研究与开发现状述评. 安徽农学通报, 18(19): 119–120, 213.]
- Guo W, Wang N, Zhang KY, Song PP, Ma ZQ, 2024. Effects of Cu₂O nanoparticles on the kinetic characteristics of rapid chlorophyll fluorescence induction and related genes in wheat seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 35(3): 721–730. [郭威, 王楠, 张凯悦, 宋沛沛, 马占强, 2024. Cu₂O 纳米颗粒对小麦幼苗快速叶绿素荧光诱导动力学特征及相关基因的影响. 应用生态学报, 35(3): 721–730.]
- Hong CQ, Qu YH, 2023. Comparison of Smartphone APP and digital hemispherical photography for estimating leaf area index. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 59(1): 125–135. [洪楚翘, 屈永华, 2023. 智能手机 App 与数字半球摄影测量叶面积指数对比研究. 北京师范大学学报(自然科学版), 59(1): 125–135.]
- Hu LW, Ji XL, Han C, Zhang X, Yang T, Cao MJ, Mao D, Shang ZY, Gao YM, 2024. The influence of different irrigation amounts on soil moisture, growth and development, yield, and quality of *Astragalus mongholicus*. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 52(5): 44–51. [胡力文, 纪晓玲, 韩翠, 张雄, 杨腾, 曹敏杰, 毛端, 商志盈, 高亚梅, 2024. 不同灌溉量对蒙古黄芪土壤水分、生长发育及产量品质的影响. 山西农业科学, 52(5): 44–51.]
- Huang MH, Shang SQ, Cui SP, Wang GJ, Luo YQ, Deng B, Wang LX, 2023. Relationship between bark physical characteristics of different host trees and damage of *Anoplophora glabripennis*. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 32(6): 952–959. [黄铭昊, 尚素琴, 崔树鹏, 王改进, 骆有庆, 邓彬, 王立祥, 2023. 不同树种树皮物理特征与光肩星天牛危害的关系. 西北农业学报, 32(6): 952–959.]
- Jiang Z, Zou X, Zhang ZY, Tang CP, Li TJ, Li GQ, 2017. The clonal growth of *Hippophae rhamnoides* in response to tissue water content. *Journal of Southwest Forestry University*, 37(2): 35–40. [姜淮, 邹旭, 张增悦, 唐翠平, 李甜江, 李根前, 2017. 中国沙棘克隆生长对组织含水率的响应. 西南林业大学学报, 37(2): 35–40.]
- Komakech R, Kim YG, Kim WJ, Omujal F, Yang S, Moon BC, Okello D, Rahmat E, Kyeyune GN, Matsabisa MG, Kang Y, 2020. A micropropagation protocol for the endangered medicinal tree *Prunus africana* (Hook f.) kalkman: Genetic fidelity and physiological parameter assessment. *Frontiers in Plant Science*, 11: 548003.
- Kong BB, 2009. Growth comparison of 26 plants in arid areas and studies on physiological and biochemical characteristics of drought resistance of seedlings of five families in *Elaeagnus angustifolia* L.. Master dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [孔蓓蓓, 2009. 干旱环境 26 个树种的生长对比与沙枣 5 个家系苗期的抗旱性生理生化研究. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学.]
- Lawlor DW, Tezara W, 2009. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: A critical evaluation of mechanisms and integration of processes. *Annals of Botany*, 103(4): 561–579.
- Li F, Liu RG, Bao S, Wu T, 1999. Selection of trap trees for controlling *Anoplophora glabripennis* and *A. nobilis*. *Journal of Beijing Forestry University*, 21(4): 85–89. [李丰, 刘荣光, 宝山,

- 吴彤, 1999. 选择诱杀树种防治光肩星天牛、黄斑星天牛的研究. 北京林业大学学报, 21(4): 85–89.]
- Li LT, Liu B, Lu JW, Ren T, Li XK, Cong RH, Wu LS, Lin D, 2014. Spatial distribution of SPAD value and determination of the suitable leaf for N diagnosis in winter rapeseed. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 36(1): 76–83. [李岚涛, 刘波, 鲁剑巍, 任涛, 李小坤, 丛日环, 吴礼树, 林迪, 2014. 冬油菜叶片 SPAD 的时空分布和氮素诊断的叶位选择. 中国油料作物学报, 36(1): 76–83.]
- Li YF, Adil ·Gafur, Omarjan ·Ali, Dong X, Su WP, Yakypu ·Aihaiti, Tursun ·Abi, Tan XJ, 2006a. The effect of irrigation on extruder surging of *Elaeagnus angustifolia*. *Protection Forest Science and Technology*, 2006(3): 5–7. [李银芳, 阿迪力 ·吾彼尔, 吾满江 ·艾力, 董昕, 苏为平, 亚库甫 ·艾海提, 吐尔逊 ·艾比, 谭小菊, 2006a. 灌溉对沙枣树出胶的作用. 防护林科技, 2006(3): 5–7.]
- Li YF, Gafur ·Adil, Ali ·Omarjan, Dong X, Su WP, Aihaiti ·Yakypu, Abi ·Tursun, Tan XJ, 2006b. *Journal of Desert Research*, 26(1): 155–158. [李银芳, 吾彼尔 ·阿迪力, 艾力 ·吾满江, 董昕, 苏为平, 艾海提 ·亚库甫, 艾比 ·吐尔逊, 谭小菊, 2006b. 不同土壤水分条件和气温对沙枣树出胶的影响. 中国沙漠, 26(1): 155–158.]
- Li YF, Adil ·Gafur, 2006. Study on the relations between the quantity of gum output and the ages of *Elaeagnus angustifolia*. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis NeiMongol*, 37(1): 81–84. [李银芳, 阿迪力 ·吾彼尔, 2006. 沙枣树的出胶与树龄的关系. 内蒙古大学学报(自然科学版), 37(1): 81–84.]
- Li YF, Pan BR, Gulnur ·Sabirhazi, Adil ·Gafur, Liu L, 2012. Gummosis productivity and geographical differentiation between *Elaeagnus angustifolia* and *E. moorariiftii*. *China Forestry Science and Technology*, 26(5): 28–30. [李银芳, 潘伯荣, 古丽努尔 ·沙比尔哈孜, 阿迪力 ·吾彼尔, 刘力, 2012. 两种沙枣树的流胶量及地理差异. 林业科技开发, 26(5): 28–30.]
- Lin QH, Chen L, Zheng YX, Ma SH, Tian D, 2022. Plant specific leaf area: Comparison of ImageJ software method and disc method. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 43(1): 48–55. [林权虹, 陈陇, 郑禹轩, 马素辉, 田地, 2022. 植物比叶面积量化: ImageJ 软件法与打孔称重法的比较. 首都师范大学学报(自然科学版), 43(1): 48–55.]
- Liu T, Tang YY, Yang HY, Li L, Shi S, 2024. Response of functional traits of *Ammopiptanthus mongolicus* to soil moisture. *Journal of Minzu University of China (Natural Sciences Edition)*, 33(1): 28–35. [刘彤, 唐逸芸, 杨宏玉, 李蕾, 石莎, 2024. 蒙古沙冬青功能性状对土壤水分的响应. 中央民族大学学报(自然科学版), 33(1): 28–35.]
- Liu Y, Liu RG, Chen JM, Cheng X, Zheng G, 2013. Current status and perspectives of leaf area index retrieval from optical remote sensing data. *Journal of Geo-Information Science*, 15(5): 734–743. [刘洋, 刘荣高, 陈镜明, 程晓, 郑光, 2013. 叶面积指数遥感反演研究进展与展望. 地球信息科学学报, 15(5): 734–743.]
- Long HY, Deng LX, 2019. Response and adaptation of plant morphology to drought stress. *Hubei Agricultural Sciences*, 58(8): 5–7. [龙海燕, 邓伦秀, 2019. 植物形态对干旱胁迫的反应与适应性研究. 湖北农业科学, 58(8): 5–7.]
- Luo YQ, 2005. Theory and techniques of ecological regulation of poplar longhorned beetle disaster in shelter-forest. Doctor dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [骆有庆, 2005. 防护林杨树天牛灾害的生态调控理论与技术研究. 博士学位论文. 北京: 北京林业大学.]
- Luo YQ, Wang LX, 2024. Outstanding academic reports on forestry in China: 2023/Ecological self-control strategies and technologies for *Anoplophora glabripennis* disasters in invasion areas. Chinese Society of Forestry. Beijing: 68–77. [骆有庆, 王立祥, 2024. 中国林业优秀学术报告: 2023/入侵区光肩星天牛灾害的生态自控策略与技术. 中国林学会. 北京: 68–77.]
- Ma X, Han W, Wu SL, Lü T, 2023. Effects of different irrigation rates on diurnal changes of photosynthetic characteristics of young *Populus euphratica* and its relationship with environmental factors. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 51(13): 102–108. [马旭, 韩炜, 武胜利, 吕婷, 2023. 不同灌水量对幼龄胡杨光合特性日变化的影响及其与环境因子的关系. 安徽农业科学, 51(13): 102–108.]
- Ma XQ, Sun Y, Gao Y, Shang EY, 2022. EAG and olfactory behavioral responses of *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) to forty kinds volatiles from five species of *Acer saccharum*. *Forestry Science & Technology*, 47(3): 1–6. [马晓乾, 孙妍, 高宇, 尚尔雨, 2022. 光肩星天牛对 5 种槭树的 40 种挥发物 EAG 及嗅觉行为反应. 林业科技, 47(3): 1–6.]
- Ma XY, Zhou GS, 2018. Effects of drought on the trade-off growth of leaf traits of summer maize in the seedling stage. *Acta Ecologica Sinica*, 38(5): 1758–1769. [麻雪艳, 周广胜, 2018. 干旱对夏玉米苗期叶片权衡生长的影响. 生态学报, 38(5): 1758–1769.]
- Mehta P, Jajoo A, Mathur S, Bharti S, 2010. Chlorophyll a fluorescence study revealing effects of high salt stress on Photosystem II in wheat leaves. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(1): 16–20.
- Nehme ME, Keena MA, Zhang A, Baker TC, Hoover K, 2009. Attraction of *Anoplophora glabripennis* to male-produced pheromone and plant volatiles. *Environmental Entomology*, 38(6): 1745–1755.
- Qi RL, 2021. Study on drought resistance of *Populus euphratica* no.2 under different irrigation gradients. Master dissertation. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University. [齐容镡, 2021. 不同灌溉梯度下小胡杨 2 号抗旱性研究. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古农业大学.]
- Shao PP, Yang BJ, Su Z, Sun ZX, Wang Z, Liu YT, Wei JR, 2023. Preference of *Anoplophora glabripennis* to *Populus alba* var. *pyramidalis* and *Elaeagnus angustifolia*. *Forest Research*, 36(4): 734–743.

- 122–128. [邵鹏鹏, 杨兵军, 苏智, 孙佐翔, 王卓, 刘宇婷, 魏建荣, 2023. 光肩星天牛对沙枣和新疆杨的偏好性. 林业科学研究, 36(4): 122–128.]
- Shen YM, Tong ZK, Cai JG, Wu JS, Zhang SY, 2006. Progress in the study of drought-resistant mechanisms in plants. *Anhui Agricultural Science*, 34(20): 5214–5215. [申亚梅, 童再康, 蔡建国, 吴家森, 张素雅, 2006. 植物抗旱机制的研究进展. 安徽农业科学, 34(20): 5214–5215.]
- Sun Q, Cai NH, Chen S, Wang DW, Duan AA, Xu YL, 2016. Drought stress on physiological characteristics of *Pinus yunnanensis* seedlings. *Journal of Southwest Forestry University*, 36(3): 18–22. [孙琪, 蔡年辉, 陈诗, 王大玮, 段安安, 许玉兰, 2016. 干旱胁迫对云南松苗木生理特征的影响. 西南林业大学学报, 36(3): 18–22.]
- Tang CC, Zhong QL, Wang J, 2008. Research progress on physiological response of drought resistance of tree species. *World Forestry Research*, 21(1): 20–26. [唐承财, 钟全林, 王健, 2008. 林木抗旱生理研究进展. 世界林业研究, 21(1): 20–26.]
- Tian RM, Yu JB, Zhao WD, 2003. On the function of *Elaeagnus angustifolia* L. to induce and control *Anoplophora glabripennis* (Motsch.). *Inner Mongolia Forestry Science & Technology*, 29(4): 23–25. [田润民, 于静波, 赵卫东, 2003. 沙枣树对光肩星天牛种群诱控功能的初步研究. 内蒙古林业科技, 29(4): 23–25.]
- Wang GJ, 2024. EAG response of *Anoplophora glabripennis* to volatile of *Fusarium oxysporum* and its infected *Elaeagnus angustifolia*. Master dissertation. Lanzhou: Gansu Agricultural University. [王改进, 2024. 光肩星天牛对腐皮镰刀菌及其侵染沙枣挥发物的触角电位反应. 硕士学位论文. 兰州: 甘肃农业大学.]
- Wang MC, Tang ZD, Xie AQ, Jian LJ, Lin H, Wang YZ, Chen C, 2025. The growth promotive effects of mixed endophytic fungi on *Cunninghamia lanceolata* seedlings under low-phosphorus stress. *Journal of Northeast Forestry University*, 53(1): 1–9. [王明川, 汤智德, 谢安强, 简灵静, 林晗, 王英姿, 陈灿, 2025. 低磷胁迫时混合内生真菌对杉木幼苗的促生作用. 东北林业大学学报, 53(1): 1–9.]
- Wang ZL, Zhao X, Liu LD, Bai XF, Zhu JJ, 2015. An analysis of the adaptability of *Populus euphratica* and *Elaeagnus angustifolia* to changes in environmental factors. *Journal of Desert Research*, 35(1): 160–166. [王仲礼, 赵雪, 刘林德, 柏新富, 朱建军, 2015. 胡杨(*Populus euphratica*)和沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)对荒漠环境的适应性比较. 中国沙漠, 35(1): 160–166.]
- Wu ZH, 2023. Effects of different degrees of drought on growth and protein expression of soybean leaves at seedling stage. Master dissertation. Haerbin: Northeast Forestry University. [武子豪, 2023. 不同程度干旱对苗期大豆叶片生长和蛋白表达的影响. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北农业大学.]
- Xiao K, 2021. The pollution characteristics, source analysis and health risk assessment of $PM_{2.5}$, PM_{10} and their inorganic elements in Jiayuguan City. Master dissertation. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University. [肖凯, 2021. 嘉峪关市大气颗粒物 $PM_{2.5}$, PM_{10} 及其无机元素污染特征, 来源解析及健康风险评估. 硕士学位论文. 兰州: 兰州交通大学.]
- Yang ZJ, Wang LX, Luo YQ, Ren LL, Wang XQ, Wang XB, Chen YL, 2024. Study on planting model of dead-end trap tree *Elaeagnus angustifolia* and resistant host tree *Populus alba* var. *pyramidalis* for ecological self-regulation of the *Anoplophora glabripennis* disaster. *Forest Pest and Disease*, 43(6): 1–13. [杨宗基, 王立祥, 骆有庆, 任利利, 王小强, 王小兵, 陈宇琳, 2024. 生态自控光肩星天牛灾害的诱杀树沙枣与抗性树种新疆杨配植模式研究. 中国森林病虫, 43(6): 1–13.]
- Yao J, Yu XY, Qiu S, Li D, 2007. Progress in research of drought resistance mechanism in plants. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 22(S1): 51–56. [姚觉, 于晓英, 邱收, 李达, 2007. 植物抗旱机理研究进展. 华北农学报, 22(S1): 51–56.]
- Zhang HH, Xu ZS, Guo KW, Huo YZ, He GQ, Sun HW, Guan YP, Xu N, Yang W, Sun GY, 2020. Toxic effects of heavy metal Cd and Zn on chlorophyll, carotenoid metabolism and photosynthetic function in tobacco leaves revealed by physiological and proteomics analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 202: 110856.
- Zhao Y, Wu M, Ye XX, Ren Q, Deng P, Zhu YL, 2023. Growth and chlorophyll fluorescence kinetics parameters of *Alchornea trewioides* under drought and re-watering in Karst areas. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 43(9): 1537–1546. [赵英, 吴敏, 叶晓霞, 任琪, 邓平, 朱宇林, 2023. 干旱与复水对喀斯特地区红背山麻杆生长及叶绿素荧光动力学参数的影响. 西北植物学报, 43(9): 1537–1546.]
- Zhou MG, Shao GM, Zhang LY, Yao XM, Han WT, 2020. Inversion of SPAD value of winter wheat by multispectral remote sensing of unmanned aerial vehicles. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36(20): 125–133. [周敏姑, 邵国敏, 张立元, 姚小敏, 韩文霆, 2020. 无人机多光谱遥感反演冬小麦 SPAD 值. 农业工程学报, 36(20): 125–133.]
- Zhu N, Zhang DY, Shen HX, Hu Q, Fan JT, 2017. Oviposition preferences of *Anoplophora glabripennis* on three host plants and composition analysis of host plant volatiles. *Journal of Zhejiang A & F University*, 34(6): 1059–1064. [朱宁, 张冬勇, 沈红霞, 胡琴, 樊建庭, 2017. 光肩星天牛产卵偏好性及寄主植物挥发物成分分析. 浙江农林大学学报, 34(6): 1059–1064.]
- Zhu XY, Wang H, Sun K, Wang HC, Zhang JY, Pei ZY, Chen HW, Yang JJ, 2023. Effects of different irrigation rates on photosynthetic characteristics of *Salix psammophila*. *Water Saving Irrigation*, 2023(12): 27–33. [朱心宇, 王涵, 孙凯, 王海超, 张钧尧, 裴志永, 陈宏伟, 杨建军, 2023. 不同灌溉量对沙柳光合特性的影响. 节水灌溉, 2023(12): 27–33.]