

防护林土壤微环境差异对沙枣泌胶特性影响下的光肩星天牛防控效果研究*

袁丽莹^{1**} 李呈澄¹ 任利利¹ 齐若涵¹ 郝柯宇¹
田 伊² 裴佳禾^{1***} 宗世祥^{1***}

(1. 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; 2. 北京市石景山区园林绿化局, 北京 100049)

摘 要 【目的】光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* 严重危害河西走廊杨树防护林, 沙枣 *Elaeagnus angustifolia* 能吸引光肩星天牛刻槽产卵并分泌树脂包裹致死, 但诱杀效果受生境差异影响。本研究旨在调查干旱区客土改良生境与原生盐渍化生境的微环境差异与沙枣树势的关系, 分析不同土壤环境对沙枣泌胶防御特性和诱杀光肩星天牛效果的影响, 以期优化沙枣管护、推广应用沙枣生态自控光肩星天牛灾害提供支撑。【方法】以甘肃省嘉峪关市黑山湖公路防护林(客土改良生境)和酒泉市六分村农田防护林(原生盐渍化土壤生境)为对象, 调查光肩星天牛危害程度(有虫株率、刻槽、排粪孔、羽化孔等)与树种配置; 系统测定两地土壤理化性质(容重、孔隙度、含水量、pH、有机质、养分等)与林间微气候(温、湿度), 分析沙枣生理特性(枝叶含水量、叶片形态、养分、抗氧化酶活性)及其对人工刻槽与光肩星天牛刻槽的泌胶防御响应(泌胶率和泌胶量)。【结果】(1)客土改良生境中, 沙枣占比 22.9%, 高效诱集 66.0%天牛刻槽, 有效保护新疆杨 *Populus alba* var. *pyramidalis*; 盐渍化生境中, 沙枣占比 51.1%, 诱集 16.1%的天牛刻槽。(2)客土改良生境沙枣对光肩星天牛刻槽的泌胶反应更强, 天牛刻槽泌胶率、泌胶量均显著高于人工刻槽 ($P < 0.05$); 盐渍化生境沙枣人工刻槽泌胶率显著高于客土改良生境 ($P < 0.01$), 但其对天牛刻槽的泌胶量则低于客土改良生境。(3)两地沙枣对刻槽内光肩星天牛卵或幼虫的杀灭率均为 100%。(4)客土改良生境土壤含水量高、盐分低, 林间温湿度稳定; 原生盐渍化生境土壤高盐、低水, 温湿度波动剧烈。(5)客土改良生境沙枣树干、叶片含水量均较高; 盐渍化生境沙枣叶片磷、钾含量显著低于客土改良生境 ($P < 0.01$), 但叶片氮磷比、叶面积较大, 过氧化物酶活性显著高于客土改良生境 ($P < 0.05$)。沙枣树势受水盐-养分耦合胁迫影响, 可能驱动其生理特性、防御资源分配及信息化学物质释放变化, 最终影响诱杀效能与光肩星天牛危害格局。【结论】沙枣是光肩星天牛有效诱杀树种, 其杀灭功能在盐渍与改良生境下均稳定。树势可能调控其诱杀效能与特异性防御反应。在客土改良生境, 维持沙枣树势并采用低比例(约 20%-30%)沙枣+新疆杨混交模式, 可实现“有虫不成灾”。在盐渍化生境, 需优先改善土壤水盐条件并缓解磷限制以恢复沙枣树势、提升诱杀效能, 同时降低高感虫树种比例或替换为抗性树种。本研究为基于生境差异优化防护林配置与管护、提升干旱区虫害自控能力提供了理论依据。

关键词 沙枣; 光肩星天牛; 泌胶特性; 环境差异; 树势; 防护林

*资助项目 Supported project: 国家重点研发计划 (2022YFD1401000)

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

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

收稿日期 Received: 2025-10-23; 接受日期 Accepted: 2026-02-05

Effects of microenvironmental differences in shelterbelts on the gum excretion characteristics of *Elaeagnus angustifolia* and the consequent ability of this tree species to act as a biological control for *Anoplophora glabripennis*

YUAN Li-Ying^{1**} LI Cheng-Cheng¹ REN Li-Li¹ QI Ruo-Han¹ HAO Ke-Yu¹
TIAN Yi² PEI Jia-He^{1***} ZONG Shi-Xiang^{1***}

(1. Beijing Key Laboratory for Forest Pest Control, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Shijingshan District, Beijing Municipal and Parks Bureau, Beijing 100049, China)

Abstract [Aim] *Anoplophora glabripennis* is a highly destructive pest of poplar shelterbelts in the Hexi Corridor. To investigate how microenvironment affects gum secretion in *Elaeagnus angustifolia*, and consequently the ability of this tree species to control *Anoplophora glabripennis*. [Methods] Research was conducted in the Heishanhu highway shelterbelt (improved soil habitat) in Jiayuguan City and the Liufencun farmland shelterbelt (native salinized soil habitat) in Jiuquan City, Gansu Province. Physicochemical properties of the soil (bulk density, porosity, water content, pH, organic matter, nutrients) and microclimatic conditions (temperature and humidity) were systematically measured. The severity of damage caused by *A. glabripennis* (infestation rate, oviposition scars, frass holes, emergence holes) and tree species composition were surveyed. Physiological traits of *E. angustifolia* (branch and leaf water content, leaf morphology, nutrient content, antioxidant enzyme activity) and its gum excretion (secretion rate and amount) in response to artificial wounds and *A. glabripennis* oviposition scars were analyzed. [Results] (1) Although only 22.9% of trees in the improved soil habitat were *E. angustifolia*, these had 66.0% of all *A. glabripennis* oviposition scars, effectively protecting *Populus alba* var. *pyramidalis*. However, in the salinized habitat, although 51.1% of trees were *E. angustifolia* these had only 16.1% of *A. glabripennis* oviposition scars. (2) *E. angustifolia* in the improved soil habitat had stronger gum secretion responses to *A. glabripennis* oviposition scars, with significantly higher gum secretion rates and amounts compared to artificial wounds ($P < 0.05$). In the salinized habitat, gum secretion rates for artificial wounds were higher than those in the improved soil habitat ($P < 0.01$). However, the gum secreted amount for oviposition scars was lower than that in the improved soil habitat. (3) The mortality rate of *A. glabripennis* eggs or larvae within oviposition scars reached 100% in both habitats. The vigor of *E. angustifolia* was influenced by the combined stress of water-salt and nutrient conditions, which potentially drove changes in physiological traits, defense resource allocation, and info-chemical release, ultimately affecting the ability of trees to control *A. glabripennis*. (4) The improved soil habitat had higher soil water content, lower salinity, and more stable microclimatic temperature and humidity, while the salinized habitat had highly saline soil, lower water content, and greater fluctuations in temperature and humidity. (5) *E. angustifolia* in the improved soil habitat had higher water content in both trunks and leaves. In the salinized habitat, leaf phosphorus and potassium contents were significantly lower ($P < 0.01$), but the leaf nitrogen-to-phosphorus ratio and leaf area were larger, and peroxidase activity was significantly higher ($P < 0.05$). [Conclusion] *E. angustifolia* is an effective trap-tree for *A. glabripennis*, achieving a 100% mortality rate of this pest in both salinized and improved habitats. Tree vigor appears to be a key factor regulating its attractiveness to *A. glabripennis* and its specific defensive responses. In improved soil habitats, maintaining tree vigor and adopting a mixed planting pattern with a low proportion (approximately 20%-30%) of *E. angustifolia* and *P. alba* var. *pyramidalis* can achieve the goal of "pest presence without disaster". In salinized habitats, priority should be given to improving soil water-salt conditions and alleviating phosphorus limitation to restore the vigor of *E. angustifolia* and thereby improve its attractiveness to *A. glabripennis*, while also reducing the proportion of highly susceptible tree species or replacing them with resistant varieties. This study provides a theoretical basis for optimizing shelterbelt configuration and management based on microhabitat differences thereby enhancing the ecological self-regulation of pest outbreaks in arid regions.

Key words *Elaeagnus angustifolia*; *Anoplophora glabripennis*; gum excretion characteristics; environmental differences; tree vigor; shelterbelt

光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* 作为全球重大林木蛀干害虫,通过幼虫蛀食韧皮部及木质部,严重破坏杨属 *Populus*、柳属 *Salix*、榆属 *Ulmus* 等阔叶树种(郝柯宇等, 2025; 李呈澄等, 2025b)。在西北干旱地区,以二白杨 *Populus × xiaohei* var. *gansuensis*、箭杆杨 *Populus nigra* var. *thevestina* 等为主的防护林因高度感虫性,常出现大面积枯梢、断带甚至死亡(杨宗基等, 2024),直接削弱了其防风固沙功能,威胁区域生态安全。当前主要依赖化学防治防控光肩星天牛,存在成本高、时效短及环境污染等局限(遇文婧和赵红盈, 2016; Yan *et al.*, 2022),亟需探索可持续防控技术。沙枣 *Elaeagnus angustifolia* 是西北地区抗逆性强、生态适应性广的乡土树种(管文轲和徐娜, 2012)。沙枣上光肩星天牛刻槽产卵处分泌树胶包裹虫卵致死的特性(自然杀灭率 > 99%)为生态防控光肩星天牛灾害提供了新路径(杨宗基等, 2024; 李呈澄等, 2025a)。前期研究表明,沙枣不仅对光肩星天牛成虫取食、刻槽产卵具有引诱性,还能控制其幼虫不能存活,兼具“诱集”与“杀灭”功能(田润民等, 2003; Li *et al.*, 2024; 李呈澄等, 2025a),可以作为光肩星天牛诱杀树种(DB15/T, 2018)。然而,沙枣这一诱杀效能的有效发挥可能受到生境的影响。环境因子如何调控沙枣泌胶特性及其对光肩星天牛种群的抑制功能,目前尚不明确。

我国河西走廊地区,干旱少雨、蒸发量远大于降水量、土壤母质含盐(吕福海, 1960),此外,不合理灌溉等人为活动导致次生盐渍化(袁广祥等, 2021),从而使不同防护林立地条件存在差异。研究区域内,农田防护林栽植初期依赖农田灌溉及渠网供水,但灌溉水携盐向地表迁移,以及近年来灌溉渠道防渗改造减少了侧渗,使农田防护林带可能遭受盐渍化与干旱双重胁迫(薛寿联, 2023)。随着河西经济发展,道路防护林建设相应扩大(廖空太等, 2006)。在荒漠戈壁立地条件恶劣区域,为保障造林成活,公路防护林带多采用客土改良技术(王晶和刘义, 2013; 范伟, 2015; 关雅楠, 2022),以改善土壤结构、降低盐碱化程度。

沙枣的树势强弱与其泌胶防御响应密切相关,而树势深受土壤水分、盐分、气温等环境因子调控,生境差异可能通过影响沙枣树势,进而调控其诱杀光肩星天牛的能力。研究发现,良好的土壤水分和适宜气温有助于提升沙枣生理活性,不易受昆虫侵袭,泌胶率降低但泌胶量增大(阿迪力·吾彼尔等, 2005; 李银芳等, 2006)。低温胁迫会抑制沙枣生理活性,导致流胶率增高而流胶量减少(李银芳等, 2012)。当遭受干旱胁迫时,沙枣木质部及叶片含水率、叶片大小、光合效能等生理特性下降,树势衰退,其泌胶能力降低,对光肩星天牛的刻槽吸引力也随之减弱(胡力文等, 2024; 郝柯宇等, 2025)。

土壤理化性质如容重、总孔隙度、含水量、盐分、pH 值、有机质及养分含量直接影响根系的水分、养分吸收,进而影响植物的生理代谢。干旱会抑制植物叶片长度、宽度、面积、氮含量、磷含量等功能性状(McDonald *et al.*, 2003; 张曦, 2016)。盐胁迫则可能导致叶面积下降、光合作用受抑(张晓晓, 2018; 卢鹏浩等, 2024),并启动超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)和过氧化物酶(Peroxidase, POD)等抗氧化酶以应对氧化胁迫(耿红凯等, 2021)。

林分配置通过调控光肩星天牛的危害分布,影响沙枣“诱集-杀灭”功能的平衡。例如,杨宗基等(2024)发现,当沙枣占比 15.1%与新疆杨 *Populus alba* var. *pyramidalis*、二白杨行间混交时,可吸引 57.2%的天牛种群,新疆杨受害率小于 0.1%;而在沙枣占比 11.9%与新疆杨、箭杆杨株间混交模式下,沙枣上天牛聚集比例高达 86.1%,新疆杨则完全免受危害。研究发现,沙枣上光肩星天牛刻槽处树胶分泌量高于人工刻槽(齐若涵等, 2025)。

本研究以河西走廊的公路防护林与农田防护林为对象,通过对比客土改良(公路林)与原生盐渍化(农田林)两类生境,测定两生境土壤理化性质(容重、总孔隙度、含水量、pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾),连续监测林间温湿度动态与光肩星天牛危害程度(刻槽、排粪孔、羽化孔),分析林

分结构差异,解析沙枣生理特性(枝叶含水量、叶片形态、养分含量、抗氧化酶活性)与泌胶防御响应(人工及光肩星天牛刻槽泌胶率与泌胶量),阐明土壤水盐-养分耦合胁迫如何通过调控沙枣树势,影响其对光肩星天牛的诱杀效能、特异性泌胶防御能力及光肩星天牛卵杀灭功能稳定性。提出基于生境差异的防护林土壤改良、树种配比与树势调控优化建议,为提升干旱区防护林虫害自控能力提供了理论支撑。

1 材料与方法

1.1 样地概况

在甘肃省河西走廊中部地区,选取已有光肩星天牛典型危害,包括目标树种沙枣和新疆杨的2种典型土壤生境的防护林为研究对象。研究区

属温带大陆性气候特征(李洁和刘春芳,2025),夏季酷热,冬季严寒,昼夜温差大,年降水量117 mm左右属于干旱地区。两样地直线距离约33 km,基本信息见表1。

黑山湖公路防护林(简称“黑山湖”),客土改良生境,位于嘉峪关市,毗邻连霍高速公路养路站。地处戈壁荒漠,沙砾广布,多大风,植被稀疏。林地土壤经客土改良,土层厚度50-80 cm,下部多卵石、岩屑。主要树种包括沙枣、新疆杨、线叶柳 *Salix wilhelmsiana* 和旱柳 *Salix matsudana*。

六分村农田防护林(简称“六分村”),原生盐渍化土壤生境,位于酒泉市肃州区银达镇六分村,与三支农渠相近。地处清水河灌区的绿洲,地下水位高于1.5 m(符崇梅等,2017),植被覆盖率较高。降水量少且分配不均,集中于夏季。主要树种为沙枣、新疆杨与二白杨。

表 1 黑山湖公路防护林与六分村农田防护林基本情况
Table 1 Basic characteristics of Heishanhu highway shelterbelt and Liufencun farmland shelterbelt

项目 Item	黑山湖公路防护林 Heishanhu highway shelterbelt	六分村农田防护林 Liufencun farmland shelterbelt
地点 Location	嘉峪关市 Jiayuguan City	酒泉市肃州区银达镇六分村 Liufencun Village, Yinda Town, Suzhou District, Jiuquan City
经纬度 Longitude and latitude	39°47'9.32"N, 98°08'54.98"E	39°52'0.33"N, 98°35'20.00"E
生境 Habitat type	戈壁荒漠 Gobi desert	绿洲灌区 Oasis irrigated area
林带走向 Orientation	东西走向 East-west	东西走向 East-west
树种配置 Species composition	抗性树种: 新疆杨 Resistant species: <i>P. alba</i> var. <i>pyramidalis</i> 诱杀树种: 沙枣 Trap tree: <i>E. angustifolia</i> 感虫树种: 线叶柳 Susceptible species: <i>S. wilhelmsiana</i>	抗性树种: 新疆杨 Resistant species: <i>P. alba</i> var. <i>pyramidalis</i> 诱杀树种: 沙枣 Trap tree: <i>E. angustifolia</i> 感虫树种: 二白杨 Susceptible species: <i>P. xiaohei</i> var. <i>gansuensis</i>
灌溉水源与管理 Irrigation source and management	养路站定期人工灌溉 Scheduled manual irrigation by maintenance station	周边农田大水漫灌 Flood irrigation from surrounding farmland
土壤类型与主要问题 Soil type and main constraints	客土改良棕漠土 Improved brown desert soil (ameliorated with transported soil) 肥力较差 Low fertility	原生砂壤土 Native sandy loam soil 盐渍化 Salinization
海拔 (m) Elevation (m)	1 724	1 420
年平均气温 (°C) Mean annual temperature (°C)	6.9	7.3

续表 1 (Table 1 continued)

项目 Item	黑山湖公路防护林 Heishanhu highway shelterbelt	六分村农田防护林 Liufencun farmland shelterbelt
年均降水量 (mm) Mean annual precipitation (mm)	85	84
年均蒸发量 (mm) Mean annual evaporation (mm)	2 149	2 149
年日照时数 (h) Annual sunshine duration (h)	3 000.2	3 091.4

表中数据来源于刘晓文, 2019; 郑岚等, 2021; 肖凯, 2022; 曹丽娟, 2023; 吕王亦庄和赵文智, 2023; 魏瑾瑜等, 2023。
Data in the table are from Liu, 2019; Zheng *et al.*, 2021; Xiao, 2022; Cao, 2023; Lv and Zhao, 2023; Wei *et al.*, 2023.

1.2 林间调查

于 2024 年 4 月中旬, 光肩星天牛成虫羽化期前进行往年发生情况调查。在 2 种防护林带内均选取有代表性地段设置 3 个 5 m×20 m 的固定样方, 每个样方间隔 10 m 以上。对样方内所有树种进行每木检尺, 记录树种组成、树高、胸径等基础生长情况, 以及调查光肩星天牛成虫刻槽、幼虫排粪孔和成虫羽化孔数。由于沙枣树的光肩星天牛刻槽处会流出树胶并凝结成胶块, 刻槽数通过胶块数进行记录 (杨宗基等, 2024)。

2024 年 8 月底, 逐一记录固定样方内全部样树的刻槽、羽化孔、排粪孔数, 通过与往年发生情况相减, 调查光肩星天牛的当年危害情况。

1.3 沙枣泌胶特性观察

2024 年 7 月 16 日, 在 2 样地分别随机选择 4 株生长相似的沙枣树为标准木, 以研究沙枣泌胶特性。在样树高度为 0.5-1.5 m 范围内的枝条上标识现有光肩星天牛刻槽 (Oviposition scar, OS), 随后开展 24 h (08:00 至次日 08:00) 的新 OS 监测与标识。同时在新 OS 周围 10 cm 内, 使用消毒后的刻刀和镊子, 横向破坏约 1 cm 范围内的树皮-韧皮部-形成层、深达木质部, 插入形成层旋转刮出圆型破损, 模拟光肩星天牛雌虫产卵行为, 制作人工刻槽 (Mechanical scar, MS) (Li *et al.*, 2024), 每株样树 3 个重复。18 d 后普遍泌胶时 (阿迪力·吾彼尔等, 2005), 分别

记录样树的新 OS、MS 泌胶孔数、泌胶率 (泌胶率=泌胶孔数/总孔数×100%), 并收集溢出树皮的胶块用电子天平 (Sartorius SQP, 精度 0.001 g) 称重测定泌胶量。使用灭菌刻刀采集每个新 OS、MS 的树皮至木质部、每株标准木树干胸高 1.3 m 处健康的树皮至边材组织 ($n=3$)。每个新 OS 采集时检查是否存在光肩星天牛虫卵, 若存在则移除。将样品装入试管立即置于干冰中, 冷链运输回北京林业大学实验室。

收集的部分健康树皮至边材组织用于树干含水量测定, 于 105 °C 杀青后 65 °C 下烘干至恒重。

1.4 沙枣生理特性测定

剪取每株标准木不被遮挡、在树冠上部 1/3 处的完好成熟、无病虫害的 20 片带叶柄叶片, 一部分放入袋中于 4 °C 下储存用于形态及理化性质测定, 一部分用试管分装于液氮中速冻, 用于酶活性测定。

叶面积、叶长、叶宽等形态性状利用数码相机 (Nikon D810) 拍摄的叶片图片和 image J 1.53k 软件进行测量。叶含水量采用烘干法以及参考 Baffoin 等 (2021) 的方法进行测定计算。

叶全氮、全磷、全钾分别采用凯氏定氮法、分光光度法、火焰原子吸收分光光度法 (NY/T 2017-2011) 测定。叶 SOD、POD 与过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 活性, 使用酶活性试剂盒 (泉州乐达启博生物科技有限公司) 参照对应说明书的具体操作步骤进行测定。

1.5 环境温湿度、土壤性质测定

在 2 种林分内的背风面, 采用路格 L91-1 温湿度记录仪 (杭州路格科技有限公司) 在离地 2.0 m 高度测量林带内的空气温度与湿度, 设置每 10 min 测一次, 测定时间为 2024 年 7 月 17 日 8:00-8 月 3 日 8:00, 获得刻槽泌胶期间的林分微气候特征。同期在每个样地样方附近, 以梅花型采样法确定 5 个采样点, 采集 40-50 cm 土层的土壤。使用环刀 (100 cm³) 在每样点采样, 并在环刀底部放置一张滤纸, 以备土壤容重和孔隙度的测定。用具刻度的管形土钻取 5 个样点的土壤, 去除枯叶、石砾及根系后, 一部分土壤装入铝盒, 测量土壤含水量; 另一部分的 5 个样点土壤混合均匀, 密封保存于黑色自封袋中, 用以测定 pH、全盐、有机质、氮、磷、钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量。每个样点均重复 3 次。土样储存于有冰袋的泡沫箱中, 运回室内分析。

采用烘干法测定土壤含水量 (Soil water content, SWC)。采用环刀法测定土壤容重 (Bulk density, BD) 及总孔隙度 (Total porosity, TPO)。参考《土壤调查实验室分析方法》(张甘霖和龚子同, 2012), 测定各化学性状指标, 包括土壤 pH 值、土壤全盐量 (Total soluble salts, TSS)、土壤有机质 (Organic matter, SOM)、土壤全氮 (Total nitrogen, TN)、土壤全磷 (Total phosphorus, TP)、土壤全钾 (Total potassium, TK)、土壤碱解氮 (Alkaline-hydrolyzable nitrogen, AN-H)、土壤有效磷 (Available phosphorus, AP) 和土壤速效钾 (Rapidly available potassium, AK)。土壤含水量、容重、孔隙度及 pH 实验在北京林业大学林木钻蛀性害虫实验室完成, 土壤全盐量和有机质实验委托武汉优析检测科技有限公司测定, 全氮、全磷和全钾实验委托安徽京麦来检测科技有限公司测定, 碱解氮、有效磷和速效钾实验委托安徽水清明检测科技有限公司测定。

1.6 数据分析

使用 Excel 2019 处理数据, 并参照杨宗基等

(2024) 的方法计算两林分中不同树种的光肩星天牛虫口指数、光肩星天牛种群分布比例及沙枣对光肩星天牛杀灭率。计算公式为:

$$\text{天牛虫口指数(个/株)} = \frac{\text{光肩星天牛刻槽数} + \text{排粪孔数} + \text{羽化孔数}}{\text{株数}};$$

天牛种群分布比例=

$$\frac{\text{某一树种株均光肩星天牛虫口指数}}{\sum \text{不同树种株均光肩星天牛虫口指数}} \times 100\%,$$

沙枣上天牛世代完成率=

$$\frac{\text{沙枣上光肩星天牛羽化孔数}}{\text{沙枣上光肩星天牛刻槽数} + \text{排粪孔数} + \text{羽化孔数}} \times 100\%,$$

沙枣对天牛杀灭率 = 1 - 沙枣上天牛世代完成率。

采用统计软件 SPSS 22.0 运用 Shapiro-Wilk 正态检验、独立样本 *t* 检验、Mann-Whitney *U* 检验进行方差及显著性分析, 比较两种防护林样地的差异。对于符合正态分布且方差齐性的数据 (通过 Shapiro-Wilk 检验和 Levene 检验验证), 采用独立样本 *t* 检验; 对于方差不齐的数据采用 Welch's *t* 检验; 对于非正态分布数据采用 Mann-Whitney *U* 检验。显著性阈值设为 *P* = 0.05。百分比变化计算基于原始均值或中位数。可视化采用 Origin 2019 和 GraphPad Prism 10.1.2 绘图。

2 结果与分析

2.1 样地基本情况

两种土壤生境的防护林在林带结构上有所不同: 客土改良生境 (黑山湖) 为 3 行株间混交林, 而盐渍化生境 (六分村) 为多行林带, 但二者均采用株间混交配置。两样地的林带结构、密度、间距及主要树种的基础生长情况见表 2。两生境下的沙枣树生长状况相似, 树高、胸径和地径均无显著差异 (*P* > 0.05)。两种生境下的新疆杨生长也无显著差异 (*P* > 0.05)。在客土改良生境中, 防护林内树种中线叶柳的树高、胸径和地径均为最小。在盐渍化土壤生境中, 二白杨的平均胸径 [(16.01±4.90) cm] 和地径 [(18.28±4.71) cm] 均为该样地内最大。同时, 标准木生长情况

表 2 不同土壤生境下的防护林林分组成

Table 2 Stand composition of shelterbelts under different soil habitats

生境类型 Habitat type	林带结构 Shelterbelt structure	林分密度 (株·m ⁻²) Stand density per m ²	行间距(m) Row spacing (m)	株间距(m) Tree spacing (m)	树种 Tree species	调查株数 Number of sampled trees	平均树高 (m) Mean height (m)	平均胸径 (cm) Average diameter at breast height (cm)	平均地径(cm) Mean basal diameter (cm)
客土改良生境 (黑山湖) Improved soil habitat (Heishanhu)	三行 Three rows	0.39	1.0	0.8	沙枣	27	5.04±1.71	9.50±4.44	12.60±4.95
					<i>E. angustifolia</i>				
					旱柳	19	7.01±1.27	14.57±4.70	17.67±5.89
					<i>S. matsudana</i>				
					新疆杨	30	10.18±1.56	13.87±5.18	15.85±6.11
原生盐渍化生境 (六分村) Native salinized habitat (Liufencun)	多行 Multiple rows	0.30	2.5	1.4	<i>P. alba</i> var. <i>pyramidalis</i>	42	3.60 (3.30, 3.85)	4.38±1.23	6.76±1.51
					线叶柳				
					<i>S. wilhelmiana</i>				
					沙枣	46	7.15 (6.90, 7.83)	9.06±3.75	11.84±4.88
					<i>E. angustifolia</i>				
					新疆杨	8	9.44±4.06	13.24±9.43	16.15±10.97
					<i>P. alba</i> var. <i>pyramidalis</i>				
					二白杨	36	9.10 (8.33, 10.63)	16.01±4.90	18.28±4.71
					<i>P. xiaohai</i> var. <i>gansuensis</i>				

表中数据符合正态分布表示为平均值±标准差; 数据不符合正态分布表示为中位数 (第一四分位数, 第三四分位数)。表 4 同。
Data conforming to a normal distribution are expressed as mean±SE, otherwise, data are expressed as median (first quartile, third quartile). The same for Table 4.

分析显示 (表 3), 两生境中沙枣标准木的生长状况差异亦不显著 ($P > 0.05$)。

在刻槽处理后的泌胶期间, 两类土壤生境的林间温湿度都有明显波动, 两者日平均温度间无显著差异 ($P > 0.05$), 而盐渍化生境 (六分村) 日夜温差和湿度变化幅度更大, 且日平均相对湿度达 $48.76\% \pm 9.14\%$, 显著高于客土改良生境 ($P < 0.05$) (图 1: A, B)。此外, 盐渍化生境

在下午 14:00-16:00 时段常出现 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的高温, 而客土改良生境的日最高温度通常在 $32\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。两样地温度高时湿度偏低。

2.2 不同土壤生境下光肩星天牛危害情况

两种生境均为沙枣、新疆杨和感虫树种的配植模式 (表 3)。调查过程中, 两防护林样地中均未发现沙枣上有光肩星天牛羽化孔, 即沙枣上

表 3 不同土壤生境下选择的标准木参数
Table 3 Parameters of selected standard trees under different soil habitats

生境类型 Habitat type	树种 Tree specie	株数 Number of trees	平均树高 (m) Mean height (m)	平均胸径 (cm) Average diameter at breast height (cm)	平均地径 (cm) Mean basal diameter (cm)
客土改良生境 (黑山湖) Improved soil habitat (Heishanhu)	沙枣 <i>E. angustifolia</i>	4	4.34 ± 0.89	10.08 ± 2.06	12.80 ± 3.45
原生盐渍化生境 (六分村) Native salinized habitat (Liufencun)	沙枣 <i>E. angustifolia</i>	4	5.54 ± 0.60	12.23 ± 2.20	15.98 ± 1.47

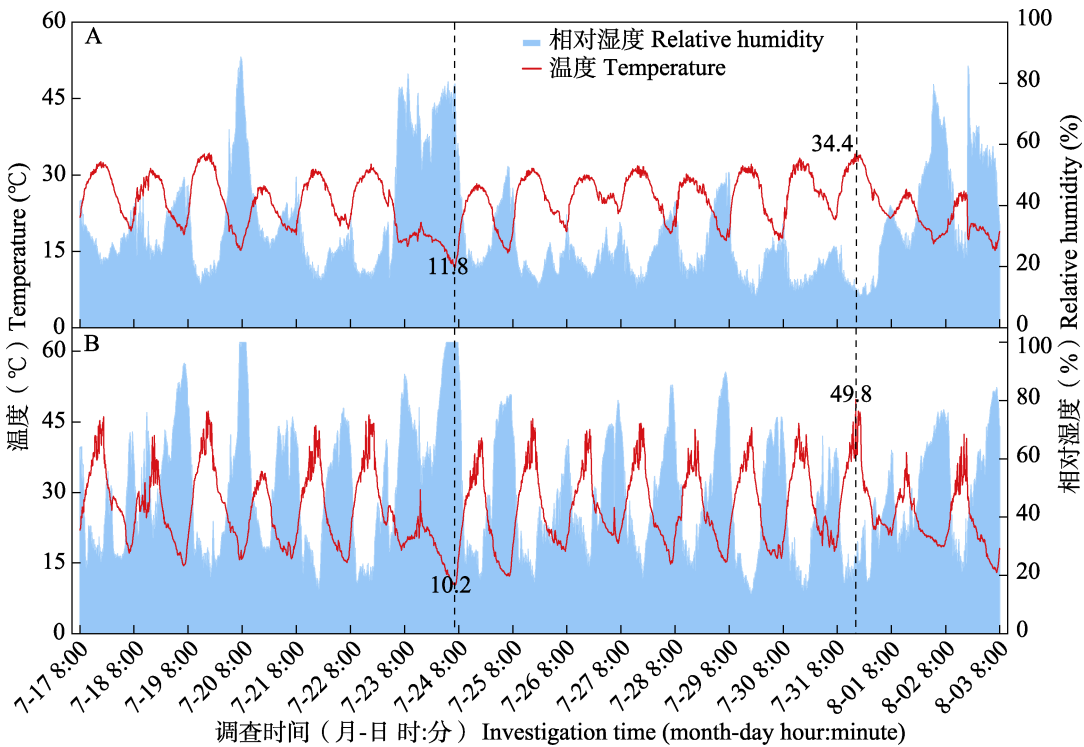


图 1 刻槽泌胶试验期间不同土壤生境下防护林间的温、湿度
Fig. 1 Temperature and humidity in shelterbelts under different soil habitats during the scarification and gumming experiment

A. 客土改良生境 (黑山湖); B. 原生盐渍化生境 (六分村)。
A. Improved soil habitat (Heishanhu); B. Native salinized habitat (Liufencun).

天牛世代完成率在两生境中的值均为 0, 这表明沙枣阻断了天牛的世代延续, 且在沙枣上光肩星天牛种群的分布比例明显高于同生境的新疆杨。客土改良生境(黑山湖)中, 沙枣上种群分布比例为 66.0%, 远高于新疆杨的 8.8%; 在盐渍化生境(六分村)中, 沙枣分布比例为 16.1%, 也高于新疆杨的 2.1%。另与感虫树种线叶柳相比, 沙枣表现出较强诱集光肩星天牛的能力。客土改良生境中, 沙枣上株均刻槽数显著高于线叶柳($P < 0.01$)。

客土改良生境中, 沙枣以 22.9% 的配置比例表现出强诱集和杀灭能力, 其吸引了 66.0% 的光肩星天牛种群, 株均刻槽达 29.0 个, 但株均排粪孔、羽化孔均为 0 (杀灭率 100%), 有效保护了新疆杨(有虫株率仅 13.3%), 几乎无受害, 且旱柳和感虫树种线叶柳的虫口指数均较低。相反, 在盐渍化生境中, 沙枣配置比例较高, 为 51.1%, 诱集效果却明显减弱, 其上光肩星天牛种群占比仅 16.1%, 株均虫口指数 23.2 个, 而易感虫的二白杨成为主要危害树种, 吸引了 81.8% 的光肩星天牛种群, 受害严重, 有虫株率达到 100%, 株均羽化孔 8.5 个。同时, 盐渍化生境中新疆杨受害程度有所上升, 有虫株率 50.0%。新疆杨在两生境中均表现出较强抗性。这表明, 盐渍化生境可能削弱了沙枣作为诱杀树的功能, 导致天牛危害向感虫树种转移, 加剧了整体危害。

2.3 不同土壤生境下沙枣泌胶特性与防控效果对比

沙枣的泌胶特性对光肩星天牛虫卵具有杀灭作用, 其泌胶能力在两生境下及刻槽处理间存在差异(图 2: A, B)。由于光肩星天牛的刻槽行为属自然发生, 调查期间, 客土改良生境与原生盐渍化生境分别新增光肩星天牛刻槽 22 和 16 个。

盐渍化生境的沙枣整体泌胶率更高, 对人工刻槽的泌胶率显著高于客土改良生境($P < 0.01$)。此外, 对光肩星天牛刻槽的防御性泌胶反应存在生境差异, 客土改良生境中光肩星天牛刻槽的泌胶率显著高于人工刻槽($P < 0.05$), 而在盐渍化生境中, 两种刻槽处理间差异不显著($P > 0.05$)。

泌胶量方面, 盐渍化生境沙枣的人工刻槽株均泌胶量同样显著高于客土改良生境($P < 0.01$)。但对于光肩星天牛刻槽, 客土改良生境的株均泌胶量[(0.19±0.19) g]更高, 且其光肩星天牛刻槽的泌胶量显著高于自身的人工刻槽($P < 0.05$); 盐渍化生境沙枣则差异不显著($P > 0.05$)。

2.4 土壤的理化及养分特征

两种土壤生境下 40-50 cm 深土壤中, 多项理化及养分指标存在显著差异(图 3: A-I)。客土改良生境(黑山湖)的土壤水盐协调, 其含水量(17.52%±1.08%)显著更高($P < 0.05$), 保水能力更强且更稳定; 水溶性总盐含量(2.18 ± 0.23) g·kg⁻¹ 在较低水平, 总孔隙度则较大, 但差异不显著($P > 0.05$), 土壤通气透水性表现出潜在优势。与之相反, 原生盐渍化生境(六分村)则呈现盐旱胁迫特征, 土壤含水较低, 而盐渍化程度较高, 水溶性总盐含量[(17.13±2.54) g·kg⁻¹], 约为客土改良生境的 7.9 倍。在土壤养分方面, 盐渍化生境表现出复杂的特征, 土壤有机质含量[(13.38±0.45) g·kg⁻¹]显著高于客土改良生境[(8.20±0.12) g·kg⁻¹], 但其全氮、全磷、全钾含量却显著低于客土改良生境($P < 0.05$), 分别为(0.24±0.03)、(0.46±0.03)与(13.49±0.37) g·kg⁻¹。然而, 该生境的速效养分, 碱解氮、有效磷、速效钾含量则均显著高于客土改良生境($P < 0.05$), 分别为(65.35±2.91)、(13.27±0.34)和(264.59±28.25) mg·kg⁻¹。此外, 两生境间土壤容重相近, 均约 1.46 g·cm⁻³, 且 pH 值无显著差异($P > 0.05$), 分别为 8.67±0.03 和 8.75±0.06。

2.5 不同土壤微环境下沙枣生理特性差异

两种防护林的生境差异造成了沙枣的叶片形态特征、水分储存策略及抗氧化酶系统等生理反应具有一定差异。客土改良生境(黑山湖)中沙枣的树干平均含水量为 77.58%±0.11%, 叶片平均含水量为 77.38%±0.02%, 均高于原生盐渍化生境(六分村)(图 4: A)。沙枣叶片叶宽、叶长和叶面积等形态表现出明显差异(图 4: B-E)。

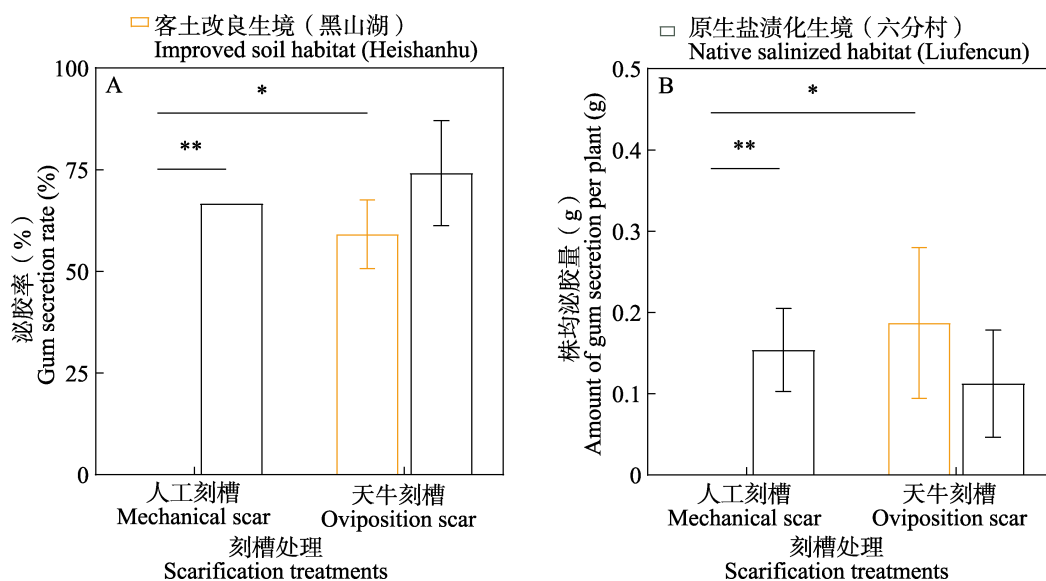


图 2 不同土壤生境下沙枣对不同刻槽处理的泌胶能力

Fig. 2 Gum secretion capacity of *Elaeagnus angustifolia* under different scarification treatments across soil habitats

A. 不同土壤生境下沙枣对不同刻槽处理的泌胶率比较; B. 不同土壤生境下沙枣对不同刻槽处理的泌胶量比较。客土改良生境沙枣的人工刻槽泌胶率和平均泌胶量数据均为 0。*和**分别表示两种土壤生境间差异显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$)。根据数据分布特征, 分别采用独立

样本 t 检验、Welch's t 检验或 Mann-Whitney U 检验进行组间比较。下图同。

A. Comparison of gum secretion rate between different scarification treatments of *E. angustifolia* in the two soil habitats; B. Comparison of mean amount of gum secretion different scarification treatments of *E. angustifolia* in the two soil habitats. Mechanical scar on *E. angustifolia* in the improved soil habitat did not produce any gum, with both gum secretion rate and mean gum secretion amount measured as zero. Asterisks indicate significant difference between the two soil habitats: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$. The specific statistical test (independent samples t -test, Welch's t -test, or Mann-Whitney U -test) was selected based on data distribution characteristics. The same below.

盐渍化生境中沙枣叶片相较于客土改良生境, 其叶长、叶宽和叶面积较大, 分别为 (4.82 ± 1.21) cm、 (2.16 ± 0.36) cm 及 (7.89 ± 2.75) cm², 叶长宽比则较低, 叶片更大更宽。

盐渍化生境中沙枣的 POD 活性显著高于客土改良生境 ($P < 0.01$), SOD 和 CAT 活性也较高但差异不显著 ($P > 0.05$) (图 4: F-H)。客土改良生境中沙枣的 SOD 活性为 (131.05 ± 26.76) U·g⁻¹, 盐渍化生境则达 (163.54 ± 39.33) U·g⁻¹。盐渍化生境中沙枣叶片养分失衡 (图 4: I-K), 其叶磷含量为 (0.03 ± 0.02) g·kg⁻¹, 显著低于客土改良生境的 $[(0.43 \pm 0.13)$ g·kg⁻¹] ($P < 0.01$); 叶钾含量为 (0.02 ± 0.01) g·kg⁻¹ 低于客土改良生境的 (0.14 ± 0.13) g·kg⁻¹ ($P < 0.1$)。两种生境间叶氮含量无显著差异 ($P > 0.05$)。此外, 盐渍化生境中沙枣叶氮磷比为 28.77 ± 21.06 , 高于客土改良生境 ($P < 0.1$)。这表明, 盐渍化

生境中的沙枣通过形态和酶活进行适应, 但可能遭受水分胁迫、氧化应激及磷限制等多重压力。

3 讨论

光肩星天牛的危害和沙枣的防御性泌胶特性受到生境差异影响。盐渍化生境整体受光肩星天牛危害更为严重, 有虫株率、株均虫口指数、刻槽、排粪孔及羽化孔数量均远超水盐协调生境。盐渍化生境中高感虫的二白杨吸引 81.8% 的光肩星天牛种群, 受害极其严重; 沙枣虽占比 51.1%, 但诱集效果相对较差, 其上种群分布比例仅 16.1%。相比之下, 在水盐协调生境中, 沙枣虽仅占林木组成的 22.9%, 却高效诱集了 66.0% 的光肩星天牛种群, 且排粪孔与羽化孔均为 0 (自然杀灭率 100%), 有效保护了抗性较强的新疆杨, 可实现“有虫不成灾”的生态自控效果。

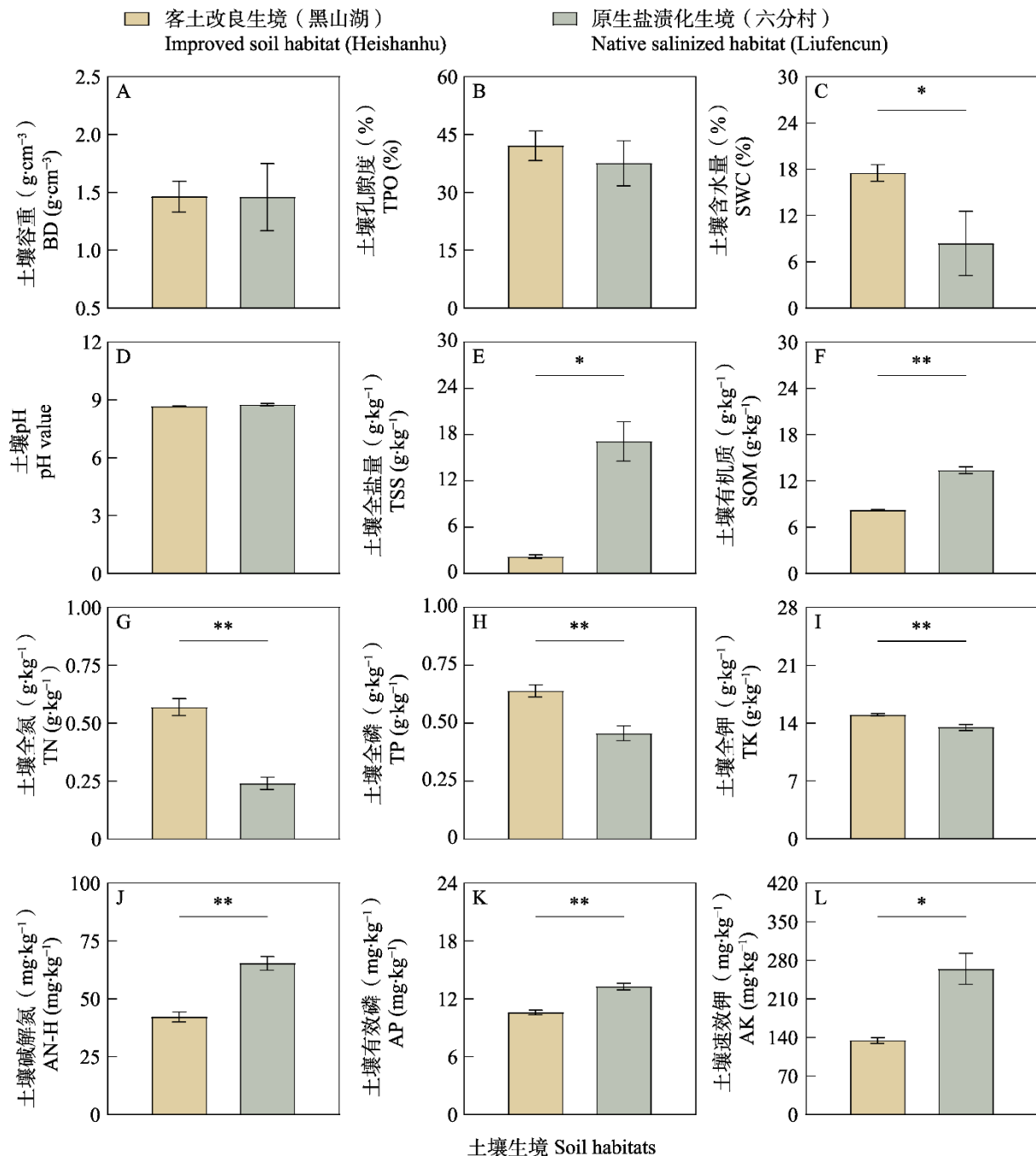


图3 不同土壤生境下防护林下土壤理化性质比较

Fig. 3 Comparison of soil physicochemical properties under shelterbelts of different soil habitats

A. 两种生境下土壤容重比较; B. 两种生境下土壤孔隙度比较; C. 两种生境下土壤含水量比较;
 D. 两种生境下土壤 pH 比较; E. 两种生境下土壤全盐量比较; F. 两种生境下土壤有机质含量比较;
 G-I. 两种生境下土壤全氮、全磷、全钾含量比较; J-L. 两种生境下土壤铵态氮、硝态氮和速效钾含量比较。
 A. Comparison of soil bulk density (BD) in the two habitats; B. Comparison of soil total porosity (TPO) in the two habitats; C. Comparison of soil water content (SWC) in the two habitats; D. Comparison of soil pH in the two habitats; E. Comparison of soil total soluble salts (TSS) in the two habitats; F. Comparison of soil organic matter (SOM) content in the two habitats; G-I. Comparison of soil total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and total potassium (TK) contents in the two habitats; J-L. Comparison of soil alkaline-hydrolyzable nitrogen (AN-H), available phosphorus (AP), and rapidly available potassium (AK) contents in the two habitats.

表 4 不同土壤生境下防护林带光肩星天牛危害情况
Table 4 Damage caused by *Anoplophora glabripennis* in shelterbelts under different soil habitats

生境类型 Habitat type	树种 Tree species	配置比例 (%) Composition proportion (%)	有虫株率 (%) Infestation rate (%)	株均刻槽 Average oviposition scars per plant	株均排粪孔 Average frass holes per plant	株均羽化孔 Average emergence holes per plant	株均虫口指数 Average insect density	种群分布比例 (%) Population distribution (%)
客土改良生境 (黑山湖) Improved soil habitat (Heishanhu)	沙枣 <i>E. angustifolia</i>	22.9	81.5	29.0 (12.0, 72.5)	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)	50.4	66.0
	旱柳 <i>S. matsudana</i>	16.1	47.4	0.0 (0.0, 4.0)	0.0 (0.0, 1.0)	0.0 (0.0, 0.0)	7.0	9.1
	新疆杨 <i>P. alba</i> var. <i>pyramidalis</i>	25.4	13.3	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)	6.7	8.8
	线叶柳 <i>S. wilhelmsiana</i>	35.6	59.5	3.0 (0.0, 13.0)	0.0 (0.0, 2.3)	0.0 (0.0, 2.0)	12.3	16.1
	沙枣 <i>E. angustifolia</i>	51.1	87.0	16.5 (2.8, 28.5)	0.0 (0.0, 0.0)	0.0 (0.0, 0.0)	23.2	16.1
	新疆杨 <i>P. alba</i> var. <i>pyramidalis</i>	8.9	50.0	1.5 (0.0, 4.5)	0.0 (0.0, 0.8)	0.0 (0.0, 0.0)	3	2.1
原生盐渍化生境 (六分村) Native salinized habitat (Liufencun)	二白杨 <i>P. xiaohai</i> var. <i>gansuensis</i>	40.0	100.0	61.1±35.8	33.0 (21.3, 54.3)	8.5 (4.3, 17.8)	117.8	81.8

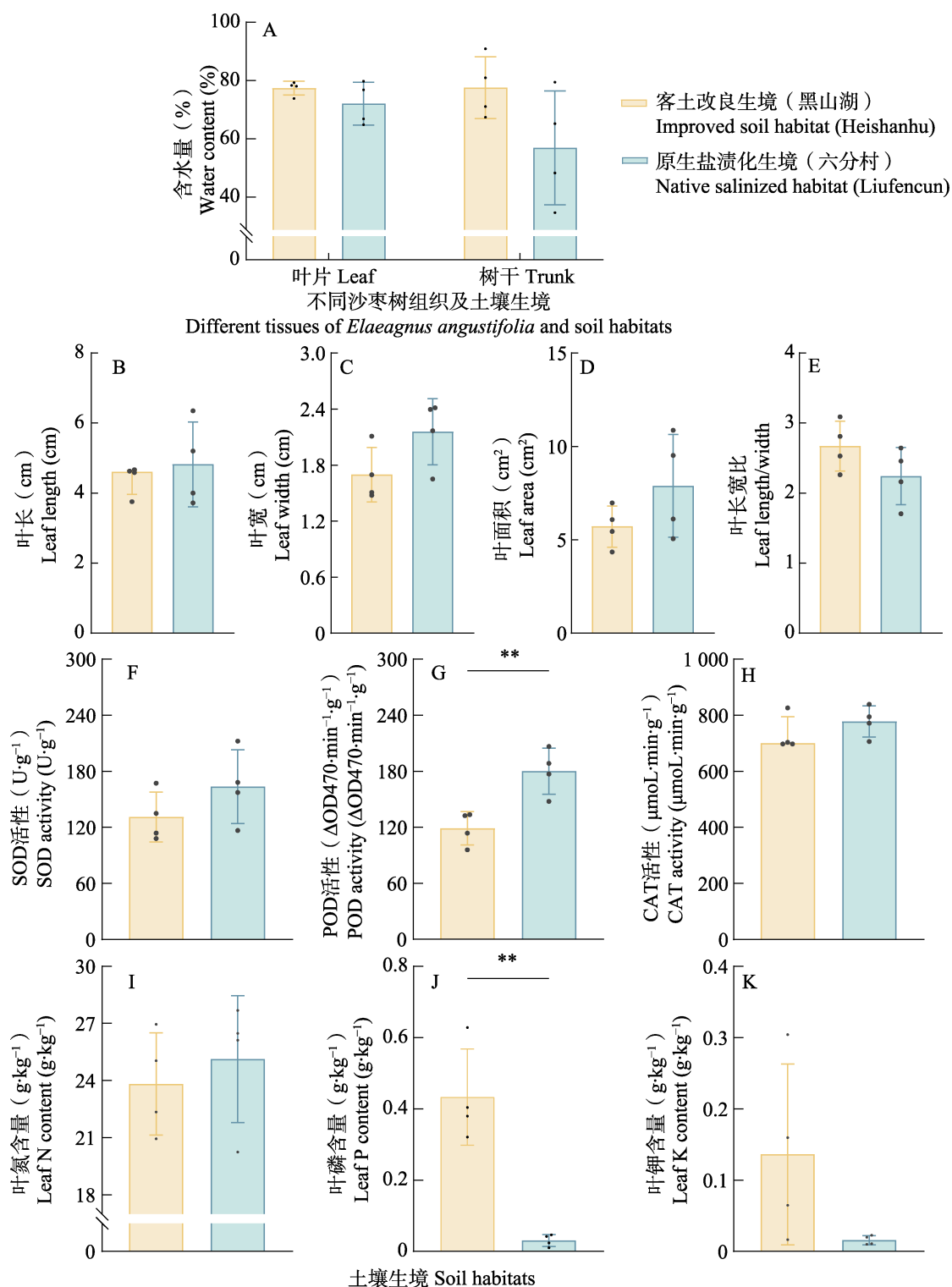


图4 不同土壤生境下沙枣树的生理特性差异

Fig. 4 Differences in physiological characteristics of *Elaeagnus angustifolia* under different soil habitats

A. 两种生境下沙枣树干和叶片含水量; B-E. 两种生境下沙枣叶片的形态性状特征;

F-H. 两种生境下沙枣叶片抗氧化酶活性; I-K. 两种生境下沙枣叶片养分含量。

A. Water content in stems and leaves of *E. angustifolia* from the two habitats; B-E. Morphological trait characteristics of *E. angustifolia* leaves from the two habitats; F-H. Antioxidant enzyme activities in leaves of *E. angustifolia* from the two habitats; I-K. Nutrient contents in leaves of *E. angustifolia* from the two habitats.

3.1 不同土壤生境下的土壤-微气候差异

土壤理化性质及气候条件是防护林生境中重要的环境因子。本研究发现,研究区在土壤条件和微气候特征上差异明显,存在两种土壤-微气候组合:水盐协调的稳定生境与盐旱胁迫的波动生境。前者得益于客土改良与合理灌溉,形成保水良好、盐分较低、通气性较好的土壤环境;后者则受原生盐渍化和粗放灌溉影响,呈现高盐、低湿的胁迫特征。尽管盐渍化生境的土壤有机质因毗邻农田由于有机输入而较高,但盐分胁迫可能抑制了微生物活动(朱引龙等, 2023),导致全量养分含量偏低,仅速效养分因可能的农田化肥输入而有所提升(王梦媛等, 2025)。

微气候方面,盐渍化生境表现更为剧烈的昼夜温度波动与湿度变化,午间常出现极端高温。这可能与其林分较稀疏、冠层郁闭度低,土壤持水能力差等因素有关(Eldegard *et al.*, 2019; 王月月和任图生, 2024)。相比之下,水盐协调生境因林分密度较高、土壤持水较强,形成了更为稳定的温湿度环境。两地之间这种水盐结构与微气候稳定性的显著差异,可能是驱动沙枣形成差异化生理适应策略的重要环境背景。

3.2 环境差异对沙枣生理特性的影响

生境差异显著影响了沙枣的生理适应策略。在水盐协调生境中,沙枣树干与叶片含水量较高,反映出良好的水分状况。而在盐渍化生境中,沙枣虽面临高盐、低湿与干热胁迫,但其枝叶含水量仍能维持在接近前者的水平,可能依赖于沙枣的双重调控机制:一是拒盐策略,通过减少 K^+ 流失、合成脯氨酸等渗透调节物质应对盐胁迫(成铁龙等, 2015);二是在清晨高湿时段(相对湿度 90%-100%)通过叶面吸收水分,类似机制在梭梭 *Haloxylon ammodendron* (龚雪伟, 2018) 与多枝柽柳 *Tamarix ramosissima* (Yan *et al.*, 2015) 等耐旱植物中均有报道。

形态与生理上,沙枣表现出可塑性响应。盐渍化生境下的沙枣叶面积整体上较大。通常意义上,叶面积的增大有利于增强光照吸收能力。一

定程度上水分和盐分胁迫可能增加了沙枣对光照强度的需求(王利军, 2010),进而通过增加叶面积来提高光合能力;而水盐协调生境下的沙枣叶片更狭长、叶长宽比更高,维持叶片边界层阻力在较低水平(韩冬青等, 2024),更符合在稳定环境中减少辐射吸收和蒸腾耗水的保守适应策略(Vicente-Serrano *et al.*, 2013; Bei *et al.*, 2023)。同时,盐渍化生境沙枣的 POD 活性极显著高于水盐协调生境, SOD 和 CAT 活性也相对较高,推测是对高盐诱导活性氧积累的防御反应,也可能与促进木质素合成参与细胞壁增厚等物理防御有关(孙阳, 2021)。这与已有研究中度盐胁迫可提升沙枣叶 SOD、POD 与 CAT 活性的结论相符(艾力江·麦麦提等, 2008)。

3.3 盐旱-磷限制耦合胁迫对沙枣防御策略分配的影响机制

盐渍化胁迫导致了沙枣的养分失衡与树势衰退。尽管土壤速效磷、钾含量不低,但沙枣叶片磷、钾含量显著低于水盐协调生境,叶片氮磷比高达 28.77,远超指示磷限制的阈值(氮磷比>16)。这说明盐分可能通过离子拮抗(如 Na^+ 抑制 K^+ 、磷吸收, Ca^{2+}/Mg^{2+} 导致磷固定)、渗透胁迫抑制养分迁移及根系功能等途径(马正龙和白生文, 2007; 刘正祥等, 2017),阻碍沙枣对矿质养分的有效利用。因此,磷限制是盐渍化生境中沙枣生长的主要制约因子,导致其树势偏弱。盐渍化生境的盐旱-磷限制导致沙枣树势衰退,降低了其吸引光肩星天牛的信息化学物质释放强度(南俊科, 2024),从而削弱了其诱集效能,并间接影响了光肩星天牛的寄主选择与种群发育(Keena, 2006)。

在泌胶防御策略上,相较于客土改良生境,盐渍化生境的沙枣对人工刻槽的泌胶率高、泌胶量大,在非生物胁迫下泌胶能力较强,这可能源于盐旱胁迫下沙枣生长受限,资源向泌胶封堵伤口的基础防御(Constitutive defences)倾斜(Coley *et al.*, 1985)。而水盐协调生境的沙枣则表现出更强的特异性诱导泌胶反应,其对光肩星天牛刻槽的泌胶反应显著强于自身的人工刻槽,且泌胶

量高于盐渍化生境。这与 Moreira 等 (2025) 在海岸松 *Pinus pinaster* 中的发现一致, 土壤磷匮乏等资源限制条件会强化基础防御与诱导防御之间的负权衡, 表明相对适宜的环境可能更有利于植物维持并调动针对生物侵害的特异性防御资源。因此, 客土改良生境良好的水盐条件和沙枣树势, 是发挥高效诱杀功能的基础。

沙枣对光肩星天牛侵害的防御响应显著强于机械损伤, 尤其是在盐渍化生境中, 凸显了其对于目标害虫的特异性诱杀能力; 同时, 这一诱杀功能具有环境适应性——在客土改良生境中, 沙枣树势强健、诱杀效能高, 保护新疆杨实现“有虫不成灾”; 而在盐渍化生境中, 尽管树势衰退削弱了诱集效能, 其杀灭功能仍保持稳定。利用沙枣的自身防御机制, 能减少化学农药依赖, 符合生态林保护需求, 在生态防控中具备很高的应用潜力。

4 结论

客土改良生境具有水盐协调、微气候环境更稳定的特征; 而原生盐渍化生境呈现高盐、低湿特征、养分失衡 (磷有效性强但植物利用受阻) 及林内温湿度波动剧烈的特征。盐渍化生境导致沙枣树干含水量较低, 叶片磷、钾含量显著低于客土改良生境, 面临渗透胁迫与磷限制, 并可能通过叶面吸水、拒盐策略及较高的 POD 等抗氧化酶活性协同应对, 但其树势整体衰退; 客土改良生境中的沙枣则维持较好的水分与养分平衡, 树势较好。生境条件通过影响沙枣树势, 间接调控了光肩星天牛的危害格局。树势较好的沙枣, 其资源可优先用于针对光肩星天牛刻槽的特异性诱导防御 (泌胶反应强), 从而表现出高效诱集光肩星天牛种群, 能有效保护主栽树种; 树势衰退的沙枣, 其防御资源向基础防御倾斜, 保有杀灭能力, 但诱集效能下降, 天牛危害转移至高感虫二白杨。为优化防控效果, 树势维持是发挥沙枣生态防控潜力的重要条件。对于盐渍化生境, 需优先改善土壤水盐条件, 通过排盐、增施磷肥缓解磷限制等措施改善立地; 对于客土改良生境, 则应保持定期灌溉与合理修枝。同时, 在

营林实践中, 应避免栽植高感虫树种, 以阻断虫源聚集, 从而充分发挥沙枣作为诱杀树种, 长期生态自控光肩星天牛灾害的潜力。

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): 105–109. [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): 105–109.]
- Ailijan-Mamat, Qiman-Yunus, Gong Q, 2008. Effects of NaCl stress on lipid peroxidation and activity of antioxidant enzymes in *Elaeagnus oxycarpa*. *Journal of Fruit Science*, 25(4): 531–536. [艾力江·麦麦提, 齐曼·尤努斯, 公勤, 2008. NaCl 胁迫对尖果沙枣实生苗膜脂过氧化与抗氧化酶系的影响. 果树学报, 25(4): 531–536.]
- Baffoin R, Charrier G, Bouchardon AE, Bonhomme M, Améglio T, Lacointe A, 2021. Seasonal changes in carbohydrates and water content predict dynamics of frost hardiness in various temperate tree species. *Tree Physiology*, 41(9): 1583–1600.
- Bei ZL, Zhang X, Tian XJ, 2023. The mechanism by which umbrella-shaped ratchet trichomes on the *Elaeagnus angustifolia* leaf surface collect water and reflect light. *Biology*, 12(7): 1024.
- Cao LJ, 2023. Analysis on the change characteristics of sunshine hours and its impact on agricultural production in Jiuquan City. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 13(2): 124–126. [曹丽娟, 2023. 酒泉市日照时数变化特征及对农业生产的影响分析. 农业灾害研究, 13(2): 124–126.]
- Coley PD, Bryant JP, Chapin FS, 1985. Resource availability and plant antiherbivore defense. *Science*, 230(4728): 895–899.
- Cheng TL, Li HY, Wu HW, Liu ZX, Wu X, Yang S, Zhang HX, Yang XY, 2015. Comparison on osmotica accumulation of different salt-tolerant plants under salt stress. *Forest Research*, 28(6): 826–832. [成铁龙, 李焕勇, 武海雯, 刘正祥, 武香, 杨升, 张华新, 杨秀艳, 2015. 盐胁迫下 4 种耐盐植物渗透调节物质积累的比较. 林业科学研究, 28(6): 826–832.]
- DB15/T 1359, 2018. Technical regulation for controlling *Anoplophora glabripennis* (Motsch.). [DB15/T 1359, 2018. 光肩星天牛综合防治技术规程.]
- Eldegard K, Scholten J, Stokland JN, Granhus A, Lie M, 2019. The influence of stand density on bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) cover depends on stand age, solar irradiation, and tree species composition. *Forest Ecology and Management*, 432: 582–590.
- Fan W, 2015. Advantages and disadvantages of soil replacement

- afforestation in extremely arid desert Gobi area. *South China Agriculture*, 9(36): 218–219. [范伟, 2015. 极旱荒漠戈壁地区客土造林的利与弊. 南方农业, 9(36): 218–219.]
- Fu CM, Li J, Han JF, Wang J, Wei YC, 2017. Effects of different tillage methods on soil salinity and crop yield in typical oasis area of Jiuquan City. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(24): 164–166, 175. [符崇梅, 李娟, 韩建峰, 王婧, 魏野畴, 2017. 酒泉市典型绿洲区不同耕作方式对土壤盐分和作物产量的影响. 现代农业科技, 2017(24): 164–166, 175.]
- Geng HK, Bi CZ, Wei LX, Song ZQ, Li QW, 2021. Effects of mixed salt stress on the growth and physiological and biochemical characteristics of *Elaeagnus angustifolia* seedlings from different provenances. *Journal of Beijing Forestry University*, 43(10): 9–17. [耿红凯, 毕春竹, 韦淋馨, 宋振琪, 李庆卫, 2021. 不同种源地沙枣幼苗对混合盐胁迫的生长及生理响应研究. 北京林业大学学报, 43(10): 9–17.]
- Gong XW, 2018. A probe into the mechanisms of canopy dew uptake by photosynthetic organs of desert trees: Based on molecular, cellular and physiological perspectives. Master dissertation. Urumqi: Xinjiang University. [龚雪伟, 2018. 荒漠木本植物光合器官吸收冠层凝结水机理探究——基于分子、细胞和生理视角. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆大学.]
- 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.]
- Guan YN, 2022. Construction effect and development countermeasures of Jiayuguan City three-north shelterbelt project. *Protection Forest Science and Technology*, 2022(3): 58–59, 66. [关雅楠, 2022. 嘉峪关市三北防护林工程建设成效与发展对策. 防护林科技, 2022(3): 58–59, 66.]
- Han DQ, Zhang LY, Liu YH, 2024. The differences in leaf functional traits of *Metasequoia glyptostroboides* in flooded and non-flooded habitats of roots. *Journal of Plant Resources and Environment*, 33(3): 69–79. [韩冬青, 张露月, 刘艳红, 2024. 根部淹水和非淹水生境水杉叶片功能性状的差异. 植物资源与环境学报, 33(3): 69–79.]
- Hao KY, Zhou Q, Li CC, Qi RH, Tian Y, Pei JH, Ren LL, Luo YQ, 2025. Effects of irrigation on the ability of *Elaeagnus angustifolia* to secrete gum, trap and kill *Anoplophora glabripennis* in arid areas. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 62(1): 53–64. [郝柯宇, 周权, 李呈澄, 齐若涵, 田伊, 裴佳禾, 任利利, 骆有庆, 2025. 灌溉量对于旱区沙枣树泌胶及诱杀光肩星天牛能力的影响. 应用昆虫学报, 62(1): 53–64.]
- 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.]
- Keena MA, 2006. Effects of temperature on *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) adult survival, reproduction, and egg hatch. *Environmental Entomology*, 35(4): 912–921.
- Li CC, Pei JH, Wang LX, Tian Y, Ren LL, Luo YQ, 2024. Interactions at the oviposition scar: Molecular and metabolic insights into *Elaeagnus angustifolia*'s resistance response to *Anoplophora glabripennis*. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(17): 9504.
- Li CC, Pei JH, Yu JM, Zhang XD, Wang YJ, Ren LL, Luo YQ, 2025a. Preliminary study of the defensive responses of *Elaeagnus angustifolia* to *Anoplophora glabripennis* oviposition scars. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 62(1): 93–102. [李呈澄, 裴佳禾, 于加明, 张旭东, 王咏嘉, 任利利, 骆有庆, 2025b. 光肩星天牛产卵刻槽诱导沙枣防御响应的初步研究. 应用昆虫学报, 62(1): 93–102.]
- Li CC, Ren LL, Wang LX, Pei JH, Zong SX, Luo YQ, 2025b. Research foundations and prospects for ecological self-control of Asian longhorned beetle disasters. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 62(1): 31–41. [李呈澄, 任利利, 王立祥, 裴佳禾, 宗世祥, 骆有庆, 2025a. 生态自控光肩星天牛灾害的研究基础与展望. 应用昆虫学报, 62(1): 31–41.]
- Li J, Liu CF, 2025. Spatial and temporal variations in ecosystem health and coping strategy in the Hexi Corridor under climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 36(2): 537–546. [李洁, 刘春芳, 2025. 气候变化下河西走廊生态系统健康时空变化及应对策略. 应用生态学报, 36(2): 537–546.]
- Li YF, Gafur·Adil, Ali·Omarjan, Dong X, Su WP, Aihaiti·Yakypu, Abi·Tursun, Tan XJ, 2006. Effect on gum exudation of *Elaeagnus angustifolia* under different soil water and air temperature conditions. *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, 2006. 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, Pan BR, Gulnur·Sabirhazi, Adil·Gafur, Liu L, 2012. Gummosis productivity and geographical differentiation between *Elaeagnus angustifolia* and *E. moorarifitii*. *China Forestry Science and Technology Development*, 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.

- 两种沙枣树的流量及地理差异. 林业科技开发, 26(5): 28–30.]
- Liao KT, Man DQ, Zhang JC, Yan ZZ, Li DL, 2006. Contemporary situation of oasis shelterbelts and developing tendency in Hexi Corridor. *Journal of Northwest Forestry University*, 21(5): 17–21. [廖空太, 满多清, 张锦春, 严子柱, 李德禄, 2006. 河西绿洲防护林发展现状及发展趋势探讨. 西北林学院学报, 21(5): 17–21.]
- Liu XW, 2019. Study on the optimization of rural residential environment in Suzhou district of Jiuquan City based on the triple theory. Master dissertation. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University. [刘晓文, 2019. 基于三元论的酒泉市肃州区乡村人居环境优化研究. 硕士学位论文. 兰州: 兰州交通大学.]
- Liu ZX, Wei Q, Zhang HX, 2017. Effects of salt stress on mineral element contents in different parts of *Elaeagnus angustifolia* seedlings. *Chinese Journal of Ecology*, 36(12): 3501–3509. [刘正祥, 魏琦, 张华新, 2017. 盐胁迫对沙枣幼苗不同部位矿质元素含量的影响. 生态学杂志, 36(12): 3501–3509.]
- Lu PH, Luo QH, Wang D, Zhang P, Wang BQ, 2024. Effects of salt stress on chlorophyll fluorescence properties of different varieties of *Elaeagnus moocroftii*. *Molecular Plant Breeding*, 2024: 1–16. [卢鹏浩, 罗青红, 王丹, 张萍, 王宝庆, 2024. 盐胁迫对不同品种大果沙枣叶绿素荧光特性的影响. 分子植物育种, 2024: 1–16.]
- Lv FH, 1960. The relationship between soil salinity and plant growth in the Hexi region. *Chinese Journal of Soil Science*, 1960(2): 31–34. [吕福海, 1960. 河西地区土壤含盐量与植物生长的关系. 土壤通报, 1960(2): 31–34.]
- Lv WYZ, Zhao WZ, 2023. The structure and pattern of farmland shelterbelts in Jiuquan Oasis of Hexi Corridor. *Journal of Desert Research*, 43(6): 237–245. [吕王亦庄, 赵文智, 2023. 河西走廊酒泉绿洲农田防护林格局与结构. 中国沙漠, 43(6): 237–245.]
- Ma ZL, Bai SW, 2007. The effect of soil salinity on ions distribution and osmotic adjustment of *Elaeagnus angustifolia* L.. *Journal of Gansu Sciences*, 19(3): 83–85. [马正龙, 白生文, 2007. 盐度对沙枣离子分布和渗透调节影响的研究. 甘肃科学学报, 19(3): 83–85.]
- McDonald PG, Fonseca CR, Overton JM, Westoby M, 2003. Leaf-size divergence along rainfall and soil-nutrient gradients: Is the method of size reduction common among clades? *Functional Ecology*, 17(1): 50–57.
- Moreira X, Abdala-Roberts L, Zas R, Sampedro L, 2025. Soil phosphorus mediates trade-offs between constitutive and induced defences in young pine trees. *Planta*, 262(4): 91.
- Nan JK, 2024. Occurrence rule and host selection of *Monochamus alternatus* in the Qinling-Daba Mountains. Doctor dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [南俊科, 2024. 秦巴林区松褐天牛的发生规律与寄主选择研究. 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]
- Qi RH, Ren LL, Hao KY, Pei JH, Luo YQ, 2025. The effects of Asian longhorned beetle (*Anoplophora glabripennis*) oviposition scar and artificially simulated oviposition scar on gum metabolism in Russian olive (*Elaeagnus angustifolia*). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 62(1): 80–92. [齐若涵, 任利利, 郝柯宇, 裴佳禾, 骆有庆, 2025. 光肩星天牛刻槽和人工模拟刻槽对沙枣泌胶代谢物的影响. 应用昆虫学报, 62(1): 80–92.]
- Sun Y, 2021. A preliminary study on the physiological and ecological stress resistance of *Populus talassica* × *P. euphratica*. Master dissertation. Alaer: Tarim University. [孙阳, 2021. 密胡杨抗逆生理生态初步研究. 硕士学位论文. 阿拉尔: 塔里木大学.]
- 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.]
- Vicente-Serrano SM, Gouveia C, Camarero JJ, Begueria S, Trigo R, López-Moreno JJ, Azorín-Molina C, Pasho E, Lorenzo-Lacruz J, Revuelto J, Morán-Tejeda E, Sanchez-Lorenzo A, 2013. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(1): 52–57.
- Wang J, Liu Y, 2013. Afforestation experiments on difficult site in northern wind-drift area of Hexi Corridor. *Protection Forest Science and Technology*, 2013(2): 44–46. [王晶, 刘义, 2013. 河西走廊北部风沙区困难立地造林试验. 防护林科技, 2013(2): 44–46.]
- Wang LJ, 2010. Water and salt stress response on the growth of different *Elaeagnus angustifolia* provenances. Master dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [王利军, 2010. 不同种源沙枣对水分和盐分胁迫生长的响应. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学.]
- Wang MY, Zhang JN, Li H, Li PP, Han YL, Wu MY, 2025. Response of crop yield to fertility of yellow-cinnamon soil under long-term different fertilization treatments. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 40(1): 157–165. [王梦媛, 张佳宁, 李慧, 李培培, 韩燕来, 吴名宇, 2025. 长期不同施肥处理下黄褐土作物产量对土壤肥力的响应. 华北农学报, 40(1): 157–165.]

- Wang YY, Ren TS, 2024. Temporal and spatial variation of thermal properties in row scale and their responses to soil water content and temperature in maize field. *Soils*, 56(2): 415–424. [王月月, 任图生, 2024. 玉米农田行尺度土壤热特性变异特征及其对土壤含水量和温度的响应. *土壤*, 56(2): 415–424.]
- Wei JY, Du D, Liu F, Yang HF, Wang KH, Li KY, 2023. Current situation and strategies for the high-quality development of protected fruit industry in Jiayuguan. *Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences*, 2(12): 1097–1101. [魏瑾瑜, 杜典, 刘芬, 杨怀峰, 王开虎, 李宽莹, 2023. 嘉峪关市设施果树产业现状及高质量发展对策. *寒旱农业科学*, 2(12): 1097–1101.]
- Xiao K, 2022. The pollution characteristics, source analysis and health risk assessment of PM_{2.5}, PM₁₀ and their inorganic elements in Jiayuguan City. Master dissertation. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University. [肖凯, 2022. 嘉峪关市大气颗粒物PM_{2.5}, PM₁₀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.]
- Xue SL, 2023. Investigation on the current situation and management countermeasures of farmland shelterbelt in Hexi Corridor region of Gansu Province. *Protection Forest Science and Technology*, 2023(5): 82–84. [薛寿联, 2023. 甘肃河西走廊地区农田防护林现状调查及管护对策. *防护林科技*, 2023(5): 82–84.]
- Yan S, Zhang G, Liu J, Su Z, Wei J, 2022. *Anoplophora glabripennis*: Host choice, oviposition and performance of new hatched larvae on ‘resistant’ poplar species. *Journal of Applied Entomology*, 146(1/2): 98–105.
- Yan X, Zhou M, Dong X, Zou S, Ma XF, 2015. Molecular mechanisms of foliar water uptake in a desert tree. *Annals of Botany Plants*, 7(4): 129.
- Yang ZJ, Wang LX, Luo YQ, Ren LL, Wang XQ, Wang XB, Chen YL, 2024. 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): 44–53. [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): 44–53.]
- Yu WJ, Zhao HY, 2016. Research progress of prevention and control technology of *Anoplophora glabripennis*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 32(10): 114–119. [遇文婧, 赵红盈, 2016. 光肩星天牛防控技术研究进展. *中国农学通报*, 32(10): 114–119.]
- Yuan GX, Chen DW, Zhu JS, Zhang LQ, Zeng QL, Wang XD, 2021. Risk assessment of soil salinization induced by water resources development and utilization in Hexi Corridor. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(10): 162–167, 174. [袁广祥, 陈德文, 朱井生, 张路青, 曾庆利, 王小东, 2021. 河西走廊水资源开发利用诱发土壤盐渍化的风险评价. *中国农村水利水电*, 2021(10): 162–167, 174.]
- Zhang GL, Gong ZT, 2012. *Soil Survey Laboratory Methods*. Beijing: Science Press. 25–116. [张甘霖, 龚子同, 2012. 土壤调查实验室分析方法. 北京: 科学出版社. 25–116.]
- Zhang X, 2016. Mechanisms underlying leaf traits in alfalfa responding to drought stress. Master dissertation. Lanzhou: Lanzhou University. [张曦, 2016. 紫花苜蓿响应干旱胁迫的叶性状机制研究. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学.]
- Zhang XX, 2018. The comparison of salt tolerance among three strains of *Ulmus pumila*. Master dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [张晓晓, 2018. 3个白榆品系耐盐特性比较研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Zheng L, Zhang ZB, Da XJ, Ma YX, 2021. Dynamic evaluation and influencing factors of land ecological security in Jiayuguan City. *Arid Land Geography*, 44(1): 289–298. [郑岚, 张志斌, 笪晓军, 马亚兄, 2021. 嘉峪关市土地生态安全动态评价及影响因素分析. *干旱区地理*, 44(1): 289–298.]
- Zhu YL, Cai LQ, Li HL, 2023. Effects of salinization on nitrogen components of *Elaeagnus angustifolia* forests. *Territory and Natural Resources Study*, 2023(2): 75–79. [朱引龙, 蔡立群, 李海亮, 2023. 盐渍化对沙枣林氮组分的影响. *国土与自然资源研究*, 2023(2): 75–79.]