

西藏砂生槐研究进展

幸福梅 万艳玲 张晨龙 郭新路 付光耀 欧阳秋雪

(西藏农牧大学 林草学院, 西藏林芝 860000)

摘要 砂生槐 (*Sophora moorcroftiana*) 是青藏高原特有豆科矮灌木, 其抗旱、耐瘠薄及防风固沙特性使其成为雅鲁藏布江流域生态恢复的关键物种, 同时富含苦参碱、氧化苦参碱等喹诺里西啶类生物碱, 具有抗肿瘤、抗寄生虫等药用开发潜力。本文以“环境适应-基因调控-次生代谢-资源利用”为主线, 系统综述了砂生槐的生物生态学特性、次生代谢物合成与功能、高效培育技术、遗传多样性与基因组资源, 以及干旱胁迫响应机制。重点梳理了以下问题: (1) 生物碱类化合物的化学多样性及其与干旱适应的潜在偶联关系; (2) 种群遗传结构沿海拔梯度的分化规律与基因流模式; (3) 种子硬实破除、离体繁殖及抗逆栽培技术的优化路径; (4) DREB 转录因子家族及蔗糖代谢基因扩张在抗旱中的分子基础。当前研究仍存在生物碱生物合成途径关键酶不明、抗旱与品质性状协同改良机制不清、规模化繁育技术体系不成熟等瓶颈。未来需整合多组学技术解析“胁迫—防御”偶联机制, 构建分子设计育种体系, 并建立生态—药用耦合的高值化利用模式, 为高原干旱河谷植被修复与藏药资源开发提供理论与技术支撑。

关键词 砂生槐; 喹诺里西啶生物碱; 干旱适应; 群体遗传; 分子育种

中图分类号: S792.26

文献标志码: A

文章编号: 2096-4781 (2026) 04-0438-11

DOI: 10.19707/j.cnki.jpa.2026.04.002

Review of Research Progress of *Sophora moorcroftiana* in Xizang

XIN Fumei, WAN Yanling, ZHANG Chenlong, GUO Xinlu, FU Guangyao, OUYANG Qiuxue

(Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China)

Abstract: *Sophora moorcroftiana* is a unique legume dwarf shrub on the Qinghai-Xizang Plateau. Its drought resistance, barren resistance, and windbreak and sand fixation characteristics make it a key species for ecological restoration in the Yarlung Zangbo River Basin. It is also rich in quinolizidine alkaloids such as matrine and oxymatrine, and has medicinal development potential such as anti-tumor and anti-parasite. Based on the main line of 'environmental adaptation-gene regulation-secondary metabolism-resource utilization', this paper systematically reviewed the bioecological characteristics, secondary metabolite synthesis and function, efficient cultivation technology, genetic diversity and genomic resources, and drought stress response mechanism of *Sophora moorcroftiana*. The focus is on: (1) the chemical diversity of alkaloids and their potential coupling relationship with drought adaptation; (2) the differentiation law and gene flow pattern of population genetic structure along the altitude gradient; (3) optimized path of hard seed breaking, in vitro propagation and stress-resistant cultivation techniques; (4) the molecular basis of the DREB transcription factor family and sucrose metabolism gene expansion in drought resistance. At present, there are still some bottlenecks in the research, such as unclear key enzymes in the alkaloid biosynthesis pathway,

收稿日期: 2026-07-07

作者简介: 幸福梅 (1981-), 女, 汉族, 甘肃武威人, 博士, 教授。研究方向: 主要从事植被恢复与林木种苗及资源利用等方面的研究。

基金项目: 西藏自治区科技计划项目 (XZ202502ZY0047); 西藏农牧学院林学博士点一期 (533325001); 林芝市林业局林木良种培育。

unclear mechanisms of synergistic improvement of drought resistance and quality traits, and immature large-scale breeding technology systems. In future, it is necessary to integrate multi-omics technology to analyze the 'stress-defense' coupling mechanism, construct a molecular design breeding system, and establish a high-value utilization model of ecological-medicinal coupling, so as to provide theoretical and technical support for vegetation restoration and Tibetan medicine resource development in plateau arid valleys.

Key words: *Sophora moorcroftiana*; Quinolizidine alkaloids; Drought adaptation; Population genetics; Molecular breeding

砂生槐 (*Sophora moorcroftiana*) 系西藏青藏高原特有豆科苦参属多年生矮灌木, 由于其蓝紫色花序, 被誉为“高原薰衣草”, 具有抗旱、耐瘠薄、防风固沙、保持水土等生态适应性^[1], 多分布于西藏米林、林芝、波密、山南及日喀则等地。砂生槐种子粗蛋白含量约为30%, 粗脂肪含量约为8%, 热值约为4 811.42 kcal/kg^[1]。同时, 砂生槐子中含有苦参碱、氧化苦参碱、槐果碱和槐定碱等生物碱, 在癌症类、代谢类、神经系统类疾病等方面具有药用开发价值^[2]。本文通过对砂生槐的生物生态学特性、次生代谢物、高效培育技术、遗传结构及抗旱特性等方面的研究进展进行综述, 提出砂生槐未来的开发利用方向, 以期为砂生槐生理生化及生物医药方向研究提供参考。

1 生物生态学特性与种群适应策略

1.1 生物学特性与物候节律

砂生槐多为矮灌木, 分枝多且密集, 小枝顶端呈刺状, 叶呈矩圆形、倒卵状, 两面密被柔毛。总状花序顶生, 花冠常为蓝紫色^[1]。植物花器官各部分在演变过程的差异, 会使得花的形态结构存在多样性。杨时海等^[3]发现砂生槐的一个新变型——白花砂生槐, 其花萼呈白色, 花瓣除旗瓣下部为黄白色外, 翼瓣和龙骨瓣均为白色, 且在居群中其本身花色未见有过渡的中间类型, 表明该变型可能由单基因或少数主效基因控制, 具有独立的遗传基础。

在生长节律方面, 砂生槐可划分为8个主要物候生长阶段及41个次生生长阶段, 8个主要物候生长阶段分别为芽发育、叶片发育、茎段发育、花序出芽、开花、果实发育、果实和种子成熟、衰老和休眠^[4]。明确的物候划分为栽培管理提供了时间节点, 也为研究气候变暖背景下高原植物物候敏感性奠定了基础。

1.2 生态适应性与种群空间格局

砂生槐是青藏高原西藏地区的特有植物物种, 主要集中分布在西藏“一江两河”流域范围内, 拥有耐旱、耐土壤贫瘠、抗风沙侵蚀的良好生态适应特性^[5,6]。赵文智等^[5]的研究表明, 风沙扰动会降低砂生槐种群的有性繁殖能力, 而适度风沙干扰能够促进植株完成根蘖更新, 繁殖策略的适应性调整是该物种耐受风沙胁迫的核心机制。

砂生槐地上多呈现灌丛生长形态, 单一灌丛植株聚集生长后可形成群落斑块结构。其种实性状受海拔、纬度与地理隔离影响, 表现出丰富变异和明显地理分化^[7]。柳文杰等^[8]研究发现雅鲁藏布江中游干旱河谷的微酸性干土适宜砂生槐存活生长, 该区域土壤全氮存量少、速效氮供给水平偏低, 氮营养短缺是阻碍砂生槐种群范围扩增的关键养分约束条件。且在雅鲁藏布江中游河谷阶地的天然砂生槐种群种子库平均密度为6.8~25.2粒/m², 其种子库密度在不同分布区域存在显著差异, 且样方内部的空间变异特征更

为突出^[9]。



注：A：白花砂生槐居群混生于砂生槐群落中；B：白花砂生槐花部特写；C：砂生槐花部特写。

图1 砂生槐紫花与白花变型花部形态对比

Fig.1 Comparison of floral morphology between purple-flowered and white-flowered morphs of *Sophora moorcroftiana*

种群空间分布具有显著的尺度依赖性：小尺度上呈聚集分布，中等尺度趋于随机，大尺度再次表现为聚集^[10,11]。在流动、半固定风沙土地段，植株呈均匀分布状态，种群密度较高、群落结构稳定，退化现象弱；而砾质风沙坡面的砂生槐以聚集形式生长，种群密度偏低、群落稳定性不足，土地与植株退化问题更为突出^[12]。此外，砂生槐种群分布随海拔升高而减少，随坡度增加呈“减少—增加—再减少”的趋势，在坡度20°-25°的西南坡、海拔3 593~3 643 m范围内分布最为集中^[13]。在拉萨地区亚高山灌丛中，砂生槐与其他灌丛物种存在特定的生态关系^[14]，在“一江两河”流域沙化土地生态恢复过程中，群落结构随恢复进程发生规律性演替^[15]。

1.3 生物量分配与生态恢复配置

干旱环境下，砂生槐将更多生物量分配至根系以吸收水分和养分，地上部分则相对减少，这一分配策略增强了其防风固沙能力^[16]。崔玲玲等^[17]发现，不同生境条件下砂生槐地上器官与各级根系的生物量分配比例存在显著差异，说明生境对砂生槐生物量的分配格局具有一定的影响。

基于其空间分布特征，生态恢复中宜采用集群配置的种植模式，以发挥群体协同抗风沙优势，提升定植存活率^[10]。在青藏高原地区，可采用沿江边栽植高山松防护带，以砂生槐、藏沙蒿等为主要固沙植物来固定流沙^[18]。唐永发等^[19]证实，杨树与砂生槐组合形成的乔灌复合配置模式，对沙地土壤持水性能的提升效果最为显著，建议构建“乔木+灌木+草本”复合生态体系以推进沙地修复。种源试验表明，拉萨种源在整体生长量、枝干与根系年积累生长量及生物量积累上表现较优，而朗县种源根系更为发达，其抗旱、防风、固沙等生态防护功能显著优于其他种源植株^[20]。

2 次生代谢物合成、调控与功能

2.1 生物碱类化合物的化学多样性

砂生槐的主要活性成分为喹诺里西啶类生物碱，关于其成分测定、提取工艺及生物活性的系统研究

已有详细总结^[21]。目前已从种子中鉴定出氧化苦参碱、苦参碱、槐果碱、氧化槐果碱、槐定碱和金雀花碱等主要生物碱6种（见表1），高效液相色谱法测定显示，砂生槐种子中氧化苦参碱含量为46.18~64.08 mg/g，苦参碱为1.14~9.82 mg/g，槐果碱为0.08~1.16 mg/g^[22]，其中氧化苦参碱为主要药效成分，具有抗肝炎病毒、抗肝纤维化、抗肿瘤、升高白细胞及免疫调节等药理活性^[23]。除生物碱外，砂生槐种子还含有黄酮类化合物、甾体类化合物、酯类化合物、脂肪酸和脂肪酸酯等多种次生代谢产物^[24]。

生物碱积累存在明显的器官差异性与时空动态：花、茎、叶均含有苦参碱与氧化苦参碱两种活性生物碱，且该类生物碱的积累含量存在显著的地域差异性与采收时间差异性。以提取氧化苦参碱为目的，种子最佳采收期为7月，叶片则应在6月至7月^[25]。

表1 砂生槐中主要生物碱类别与含量特征

Tab.1 Categories and content characteristics of main alkaloids in *Sophora moorcroftiana*

主要生物碱	化学式	种子中相对含量	主要药理活性
氧化苦参碱	$C_{15}H_{24}N_2O_2$	最高(46.18~64.08 mg/g)	抗肝炎病毒、抗肝纤维化、抗肿瘤、免疫调节
苦参碱	$C_{15}H_{24}N_2O$	较高(1.14~9.82 mg/g)	抗炎、抗病毒、抑菌
槐果碱	$C_{15}H_{22}N_2O$	低(0.08~1.16 mg/g)	抗肿瘤、抗心律失常
氧化槐果碱	$C_{15}H_{22}N_2O_2$	微量	神经保护(推测,待验证)
槐定碱	$C_{15}H_{24}N_2O$	微量	抗肿瘤
金雀花碱	$C_{11}H_{14}N_2O$	微量	强心、抗胆碱酯酶

在提取与分离技术方面，Ma等^[26]以苦参碱与氧化苦参碱为双模板，制备可特异性识别3类苦参型生物碱的分子印迹聚合物，构建分子印迹固相萃取耦合液质联用体系，实现了砂生槐中苦参碱、氧化苦参碱与槐果碱的同步提取、分离与测定，该方法选择性强、准确度高，适用于砂生槐生物碱的高效分析。胡春晖等^[27]通过Box-Behnken响应面法优化砂生槐种子中总生物碱的提取工艺，该方法拟合度良好，误差较小，简便可靠，同时发现H103大孔树脂对砂生槐种子总生物碱吸附能力突出、富集效率优异，可用于藏药砂生槐总生物碱的纯化工艺改进。

2.2 生物碱合成途径与调控机制

喹诺里西啶类生物碱在豆科植物中的合成途径已有较明确的模式：以赖氨酸为前体，经赖氨酸脱羧酶（LDC）、铜胺氧化酶（CAO）等催化生成哌啶类中间体，再经氧化、偶联及环化反应形成苦参碱、氧化苦参碱等终产物。然而，砂生槐中该途径的关键酶基因尚未被克隆与功能验证，其生物碱合成的转录调控网络仍属空白。

现有间接证据表明，砂生槐生物碱积累受环境与发育信号共同调控：（1）不同分布区域及采收时间的生物碱含量差异显著^[25]，暗示非生物胁迫（如干旱、强辐射）可能通过激活特定转录因子（如WRKY、MYB）上调生物碱合成酶基因表达；（2）干旱胁迫下，植物常通过重分配碳骨架至次生代谢途径以增强抗氧化防御，砂生槐根系中蔗糖代谢基因的扩张^[28]可能为生物碱合成提供了额外的碳源与还原力。因此，推测DREB等抗旱转录因子可能通过调控蔗糖代谢及次生代谢途径的交叉节点，间接影响生物碱积累，但该假说需通过代谢组—转录组联合分析加以验证。

2.3 生物碱的生态功能与适应意义

生物碱在砂生槐中的积累不仅是药用资源基础，更可能参与生态适应。首先，砂生槐种子遭受刺槐

种子小蜂等害虫蛀食率高达50%^[29]，而生物碱的广谱生物活性可能构成化学防御屏障，降低种子被取食风险。其次，氧化苦参碱等具有较强的抗氧化活性^[30]，可清除干旱胁迫下积累的活性氧（ROS），减轻膜脂过氧化损伤，从而与酶促抗氧化系统（SOD、POD等）协同维持细胞稳态。从砂生槐中分离出来的异黄酮类化合物（里氏异黄酮A和B、苏木异黄酮A）具有抗氧化作用，同时还发现砂生槐不仅具有抗氧化的异黄酮，还具有抗氧化的芪类化合物^[30]。此外，生物碱的化感潜力尚待验证，其可能通过影响根际微生物群落（如促进促生菌定殖）间接增强宿主耐旱性^[31]。

2.4 药理活性与开发潜力

现有药理研究主要集中于体外与动物实验，证据层级有待提升。抗肿瘤方面，砂生槐种子乙醇提取物在体外环境下表现出抗肿瘤活性，对人体肝癌细胞HepG2具有抗增殖作用^[32]；网络药理学预测其可作用于MDM2、ERBB2、AR、mTOR等疾病核心靶点，具备多通路调控潜力^[33]；砂生槐种子水提取物可显著抑制S180荷瘤小鼠体内肿瘤增殖，调节机体免疫水平并延长存活时间，其所含多糖可能通过上调Treg、减少IL-17分泌等途径发挥免疫调控功能^[34,35]。抗寄生虫方面，砂生种子水溶性生物碱E2a联合卡介苗（BCG）可提升小鼠继发性棘球蚴病的治疗效果，体外可直接杀灭原头蚴^[36,37]；砂生种子总生物碱生物黏附片与阿苯达唑联合用药均具有提高脾脏指数和抑囊率的效果，同时有降低包虫囊重、抑制囊肿增生、恢复肝功能的效果，可有效治疗继发性小鼠泡球蚴病^[38]，与阿苯达唑联合治疗的效果明显优于单药^[39]。抑菌抗炎方面，马兴铭等^[40]率先从砂生槐种子中分离提取出亲脂性总生物碱，研究证实砂生槐种子生物碱能够有效抑制G⁺金黄色葡萄球菌、G⁻大肠埃希菌的生长与繁殖，其中对G⁺金黄色葡萄球菌的抑制效果更为突出，且抑菌浓度与抑菌效应呈现正相关关系。砂生槐地上部位的乙醇提取物对耐药型金黄色葡萄球菌同样具有明显抑制活性，其最小抑菌浓度可达8 μg/mL；对该提取物进一步分离纯化后可得到5种黄酮单体，且单体的抑菌活性显著弱于粗提物^[41]。药代动力学方面，甘雪辉等^[42]比较发现砂生种子生物碱水剂体外迅速扩散，体内利用效率优于片剂，但水溶性组分的抗虫分子机制仍不清楚。LUO等^[43]以秀丽隐杆线虫（*C. elegans*）为寄生虫模型，从砂生种子中分离得到可溶性生物碱（E2），再采用柱层析法分离出低极性组分（E2-a）和高极性组分（E2-b），发现E2-a诱导秀丽隐杆线虫的存活率低于E2-b和E2，提示脂溶性生物碱可能具有更强的抗寄生虫活性。

综合分析，砂生槐种子中的次生代谢产物具备抑菌活性，其中生物碱类成分为发挥抑菌作用的主要物质。砂生槐生物碱及水提物具有抗包虫、抗肿瘤、抑菌抗炎、调节免疫等多重药用功效。砂生槐种子的汤剂一直被用作治疗寄生虫病的传统藏药。但各生物碱成分间有无协同作用，以及部分生物碱含量偏低的问题仍有待进一步研究，需筛选有效抑菌成分并探究生物碱含量提升的技术途径。

3 高效培育技术体系与优化

3.1 种子休眠机制与萌发调控

砂生槐种子硬实率超过90%，坚硬种皮是抑制萌发的首要障碍^[44]。目前针对砂生槐硬实休眠的破除手段主要分为物理处理、化学处理以及多种方式结合的复合处理，不同处理手段效果差异显著（见表2）。

化学处理中浓硫酸浸种可以有效打破种皮休眠，促进种子萌发，但强腐蚀特性带来较高操作风险，浸种时长容错区间狭窄，处理不当易损伤种胚，降低种子活力^[45]。物理方式包括机械打磨与人工破皮，

单纯机械打磨破除效果理想，但人工操作模式劳动强度大，规模化推广受到制约；人工破皮处理的促萌效果不受种子贮藏年限影响，搭配沙土基质培养能够进一步提升发芽率，更贴近大田育苗场景^[46-48]。针对组织培养的无菌材料制备，砂纸打磨联合次氯酸钠消毒可实现较高无菌萌发率，但整套处理流程成本较高^[47]。外源赤霉素调控能够提升种子发芽势与萌发率，但单独使用效果有限，通常需要与破皮手段联合施用^[49]。

表2 不同处理方法对砂生槐种子萌发的影响比较

Tab.2 Comparison of effects of different treatments on seed germination of *Sophora moorcroftiana*

处理方法	具体操作	萌发效果	评价
浓硫酸浸种	浸泡 30 min	可有效促进萌发	腐蚀性强,易灼伤种胚 ^[45]
机械打磨+浸泡	砂纸打磨后温水浸泡	破除效果较理想	操作简单,劳动强度大,规模化受限 ^[46]
砂纸打磨+消毒	3% NaClO 消毒 15 min	无菌苗萌发率达 87.50%	适用于组培外植体制备,成本较高 ^[47]
人工破皮	划破种皮	显著提高发芽率	与贮藏年限无关联,适合少量处理 ^[48]
复合基质+破皮	沙土培养+人工破皮	发芽率提高	接近大田条件,技术可规模化 ^[48]
激素处理	50 mg/L GA ₃	发芽势与萌发率提升较明显	需配合破皮处理,单独使用效果有限 ^[49]

除种皮破除手段外，沙埋深度、环境温度共同影响砂生槐种子萌发与幼苗存活^[50]。砂生槐具有一定耐盐碱能力，在单一盐胁迫 0.08 mol/L 条件下适应性较好；在碱胁迫、复合盐碱胁迫环境中，种子更适宜在较低胁迫浓度下萌发^[51]。综合已有试验结论，机械破皮结合低浓度赤霉素处理是实验室条件下稳定性较强的催芽方案。总体来看，现有砂生槐种子催芽技术大多停留在小范围试验阶段，尚未形成适配大田规模化育苗、低成本可推广的成套技术体系。综合现有证据，机械破皮配合低浓度激素处理是目前实验室条件下较可靠的萌发促进方案。然而，所有方法均停留在小试阶段，缺乏适配大田规模化育苗的低成本成套工艺。

3.2 离体繁殖体系优化

砂生槐离体繁殖体系已基本建立。在砂生槐体外繁殖系统中，评估了不同基本培养基以及不同植物生长调节剂对芽增殖的影响，发现添加 1.0 mg/L 6-BA 和 0.2 mg/L NAA 的 WPM 培养基是带芽茎段诱导多芽的最佳选择；0.5 mg/L IBA 和 0.02 mg/L NAA 的 1/2MS 培养基是诱导多根的最佳选择；砂生槐生根幼苗驯化后成功适应了环境，转移到土壤后的存活率为 75%^[49]。董家辉^[52]以砂生槐下胚轴作为外植体筛选得出 MS+2.0 mg/L 6-BA+0.2 mg/L NAA 是不定芽初代诱导最佳培养基，不定芽诱导率为 68%。未来需解决外植体褐化、增殖系数低及生根一致性差等问题，建立从良种到商品苗的标准化组培快繁流程。

3.3 苗木培育与抗逆栽培

砂生槐植株生长符合“S”形曲线规律，整个周期可划分为出苗、生长前期、快速生长及生长后期 4 个阶段。在栽培基质方面，以腐殖土为基质的砂生槐幼苗的地上部分生长最好，沙土：园土：腐殖土=1：1：1（MS1）的混合基质优于纯腐殖土栽培模式，该复合基质取材便捷、投入成本更少，培育出的幼苗综合长势更为优良，因此实际规模化育苗工作中可优先选用 MS1 作为砂生槐容器栽培专用基质^[53]。水肥管理上，氮肥施用试验表明，指数施肥方式能够显著改变砂生槐根系构型，增加根系总数与分枝数量；低氮处理可促进根系生物量积累、提升根总长、根系体积与组织密度^[54]。适度切根（如切除 1/5 根长）可提高移栽成活率及根系活力；柳文杰等^[55]的研究发现，切除五分之一的根对砂生槐幼苗生长和生理促进

效果最佳,不同程度的根系修剪处理会对幼苗造成差异化的生理损伤,但整体而言,切根干预可有效增强砂生槐幼苗的环境耐受能力,显著提升苗木移栽后的存活概率。施用保水剂在适宜范围内可促进苗高、地径及生物量积累,也可提高砂生槐叶绿素含量以及根系活力,而当施用量过大时将会阻碍其正常生长^[56]。邢震等^[57]研究发现,在25℃、土壤持水量在70%条件下,砂生槐的出土萌发率在20 d后能达到53.3%。

在干旱适应调控方面,400倍稀释的抗蒸腾剂处理可提升叶片叶绿素含量并抑制脯氨酸过度积累,从而增强抗旱性^[58]。育苗初期,所施用的有机肥必须完成充分腐熟处理,可预先将辛硫磷、毒死蜱等杀虫药剂混入肥料内,能够有效降低根蛆虫害发生概率,也可采用药物拌种的防控手段实现同类虫害治理^[59]。

3.4 种实害虫发生规律与绿色防控

刺槐种子小蜂是砂生槐种实主要害虫,其生活史隐蔽性极强,仅成虫活动于种子外部,卵、幼虫、蛹全程在种子内蛀食发育,自然条件下种子受害率可超过50%,这也导致其天然萌发率处于极低水平,仅维持在10%左右^[29,60]。不同海拔的地表节肢动物类群对种实危害程度存在差异,一定海拔范围内,低海拔灌丛地表节肢动物对砂生槐果荚、种子的危害程度更高^[61]。臧建成等^[29]研究表明约69%的种子受昆虫的危害失去成苗的能力,较高的昆虫寄生率显著抑制种子萌发与实生幼苗形成,直接影响西藏区域内砂生槐种群繁衍与生态修复工作的推进。

当前防治以化学药剂为主,针对大面积、高郁闭度的砂生槐采种林分,可在成虫羽化初盛期与盛期,选用80%敌敌畏乳油1 500倍稀释液或20%灭扫利乳油4 000~5 000倍稀释液开展常规喷雾防治。结合物候期观测发现化学防治措施应在种子成熟期实施,即前一年8月下旬至9月上旬。此外,需在次年6月下旬的次生阶段70~73种子发育初期^[4]进行熏蒸处理^[60]。但长期依赖化学农药与生态恢复目标存在冲突,仍急需建立基于植物检疫、林地平茬、性信息素诱捕及生物防治的绿色植保体系,明确种子小蜂的寄主专化性、天敌资源及种群动态模型,是制定精准防控策略的前提。

4 遗传多样性与基因组资源

4.1 群体遗传结果与基因流模式

砂生槐遗传多样性呈现明显的地理格局。基于GBS高通量测序的群体基因组研究表明,砂生槐种群一般从上游向下游扩展,并在上下游的种群中表现出高水平的遗传分化,中心种群与上下游种群之间存在着高水平的基因交换,风引起的种子传播是形成这种基因交换模式的重要因素^[62]。但上下游种群间仍表现出显著的遗传分化,这可能是由河谷地形隔离及海拔梯度导致的传粉不同步性共同造成^[63,64]。海拔不同的砂生槐亚居群开花物候期不同,会造成传粉不同步而引起遗传隔离^[64]。

Liu等^[63]发现低海拔种群遗传多样性较低,可能是由于人类破坏和栖息地破碎化的影响,也可能是由于两栖物种形成过程中对高海拔地区的适应,或者是由于来自西部高海拔地区的源种群沿河流域的定向基因流。赵阿曼等^[65]较早利用分子标记证实高海拔区域种群具有更高的遗传多样性,因此需制定针对性的保护与管控策略,实现砂生槐种质资源的就地保护保存。杨兰等^[66]综合遗传多样性、形态特征多样性并辅以生物碱含量与抗旱等级划分的权衡方法,证明所构建的砂生槐核心种质是可行和可靠的,为种质资源的标准化保存提供了依据。

4.2 基因组资源与抗旱基因家族

砂生槐质体基因组大小为148 930 bp, 系统进化树显示, 砂生槐的质体与苦豆子的质体亲缘关系最近, 该研究为光合作用的分子机制、可持续保护以及砂生槐的遗传改良提供了参考^[67]。Xin等^[28]报道了砂生槐高质量全基因组, 发现蔗糖代谢相关基因家族显著扩张, 推测该扩张事件可能为其根系伸长发育及强抗旱特性提供了分子基础。又根据基因本体注释, 在中/高海拔植物中发现的扩展基因家族, 显著富集了与“代谢过程”相关的基因。

在抗旱转录因子方面, 已从砂生槐中克隆获得4个DREB基因 (*SmDREB1-SmDREB4*), 其在干旱、盐、冷及热胁迫下的表达模式存在分化: *SmDREB1* 受干旱、冷、热诱导; *SmDREB2* 与 *SmDREB4* 受盐、冷、热诱导; *SmDREB3* 受干旱与热诱导。脯氨酸在干旱、盐胁迫、冷胁迫和热胁迫下均有积累。这4种基因对4种非生物胁迫的反应不同, 因此, 这4个基因可能参与对这4种非生物胁迫的耐受, 是未来基因工程的候选基因^[68]。Li等^[69]将 *SmDREB1* 导入拟南芥, 转基因株系在干旱胁迫下表现出更高的抗氧化酶活性、脯氨酸含量及光利用效率, 证实该基因可作为高原植物抗旱遗传改良的候选基因。然而, 这些基因是否直接调控生物碱合成途径, 目前尚无实验证据。

4.3 种质资源保护策略

基于遗传结构分析, 砂生槐种质保护应采取原地保护与异地保存相结合的策略: 在遗传多样性丰富的高海拔中心分布区 (如拉萨、山南) 建立原生境保护点; 针对不同种源 (如拉萨种源、朗县种源) 的性状分化^[20], 建立种质资源圃, 开展异地保存与评价。核心种质的构建应避免单一性状依赖, 需整合分子标记、形态指标及化学指纹进行多维评价^[66]。郝豆豆等^[70]比较了多种DNA提取方法, 证实改良CTAB法便于操作, 提取的砂生槐DNA质量好, RAPD-PCR扩增条带清晰, 适用于其叶片DNA提取, 为大规模基因分型提供了技术参考。王孝先等^[31]筛选获得了SR26-3和SR21-1, 具有良好的耐干旱能力, 可以初步作为缓解砂生槐在干旱胁迫下生长的优良菌株, 为后期砂生槐根际促生菌的筛选提供了科学合理的理论依据。

5 干旱胁迫响应的分子与生理机制

砂生槐全基因组分析揭示了其适应干旱河谷的遗传基础。除蔗糖代谢基因扩张外, 中等/高海拔植物中扩展的基因家族显著富集于“代谢过程”相关通路^[28]。这表明砂生槐可能通过增加代谢相关基因的拷贝数, 增强了对碳氮资源的调配能力, 以应对环境胁迫。

Huie等^[71]利用Illumina测序技术对干旱胁迫下的砂生槐进行了大规模的转录组测序, 结果表明不同干旱胁迫下的基因表达谱存在显著差异, 分别鉴定出4687、5648和5735个差异表达基因, 并通过KEGG通路分析表明鉴定的基因富集在“代谢通路”和“植物激素信号转导通路”。实时荧光定量PCR检测到的25个与干旱相关的基因表达模式与RNA-seq的转录丰度变化一致, 主要通过调节激素信号、减少氧化损伤、调节渗透压和调节次生代谢来实现。

在形态层面, 叶片厚度、上表皮厚度与表层角质层厚度是判定植物抗旱能力的核心形态指标, 不同种源间这些性状存在显著分化, 对于分布区域广泛的树种而言, 不同种群长期适应差异化的生境环境, 会致使物种内部不同群体的抗旱能力产生显著的分化特征^[72]。在生理层面, 干旱胁迫下植株通过叶片气

孔关闭、根系伸长生长、根冠比例提升、渗透调节功能强化、保护酶活性升高等一系列生理变化,协同完成干旱胁迫应答过程。幸福梅等指出,在干旱胁迫下水分利用效率(WUE)较高的个体耐旱性更优,可作为抗旱种质筛选的生理指标^[73]。

张艳福等^[73]还发现,适宜程度的干旱胁迫对砂生槐种子萌发及幼苗生长具有一定促进作用,表现为“低促高抑”的典型胁迫剂量效应,这与其在干旱河谷的自然分布特征相符。施用抗蒸腾剂是提高植物干旱耐受能力的有效调控手段,其中,采用400倍稀释的抗蒸腾剂溶液进行处理,可有效提升砂生槐叶片叶绿素积累含量,同时抑制脯氨酸含量的大幅升高,最终显著增强砂生槐植株的整体抗旱水平^[58]。

6 展望

综合以上对近年来砂生槐的研究文献进行归纳与分析可知,目前学者对砂生槐的研究集中于高效培育、抗旱特性和防风固沙等方面,在这些领域也取得了丰富的研究成果,从提高种子萌发率、苗木管理、病虫害防治、植被种群特征等角度研究了砂生槐的高效培育技术与生物多样性,为砂生槐种群繁育发展提供了丰富的理论知识与实践经验。在砂生槐遗传结构的研究方面,对其DNA进行了提取和鉴定,发现可能参与非生物胁迫耐受性的基因,为砂生槐的可持续保护以及遗传改良提供了一定的参考。但现有研究仍存在不少短板,各类种子破硬实处理方法仅停留在实验室小试阶段,适配大田规模化育苗、低成本可落地的成套加工工艺依旧稀缺。针对刺槐种子小蜂的防治长期依赖化学药剂,环保型绿色防控技术还未形成完整体系。资源开发与种质改良层面进展滞后,生物碱定向提纯工艺、抗逆良种选育、利用基因编辑培育抗旱新品系等相关研究积累不足,现有试验成果很难直接投入生产应用。

砂生槐兼具生态价值与资源利用潜力,是青藏高原不可或缺的防风固沙乡土树种,同时能够作为工业原料,赋能医药、清洁能源相关产业,是区域重要的特色战略资源树种。后续研究可以通过种质资源收集、新种质创制、新品种选育、机械化生产技术以及采后目标收获物产品无损检测等方面,构建资源培育体系,提高供给水平,提升砂生槐的资源综合利用率和高值化水平。当前,砂生槐生物碱药用潜力、抗旱关键基因已经受到广泛关注,借助转录组测序、次生代谢通路解析等技术,能够进一步推进砂生槐药用资源开发,厘清植株抗旱适应机制,最终支撑青藏高原西部生态修复工作,推动区域生态保护与特色经济协同发展。

参考文献:

- [1] 李玉祥. 西藏砂生槐的生物学特性及综合利用[J]. 自然资源, 1993(5):75-79.
- [2] 牛建荣,张继瑜,周绪正,等. 西藏砂生槐主要成分苦参碱类药理学研究进展[J]. 中兽医医药杂志, 2017,36(5):84-87.
- [3] 杨时海,次仁旺堆,杨作云,等. 砂生槐的一新变型:白花砂生槐[J]. 西北植物学报, 2021,41(2):336-337.
- [4] Yanling Wan, Fumei Xin, Bianba, JB. et al. Establishing the phenological development stages of *Sophora moorcroftiana* using the BBCH scale[J]. *Scientific Reports*, 2025,15(1),44091.
- [5] 赵文智,刘志民. 西藏特有灌木砂生槐繁殖生长对海拔和沙埋的响应[J]. 生态学报, 2002,22(1):134-138.
- [6] 赵文智. 砂生槐沙生适应性初步研究[J]. 植物生态学报, 1998(4):92-97.
- [7] 张晨龙,万艳玲,郭新路,等. 不同种源砂生槐种实表型多样性分析[J]. 种子, 2025,44(11):114-121.
- [8] 柳文杰,杨红,李紫帅,等. 雅江中游干旱河谷砂生槐植株—细根—土壤化学计量特征[J]. 西南农业学报, 2022,35(3):608-616.
- [9] 刘志民,赵文智,李志刚. 西藏雅鲁藏布江中游河谷砂生槐种群种子库特征[J]. 生态学报, 2002,22(5):717-720.

- [10] 李海东,沈渭寿,方颖等.雅鲁藏布江中游河岸带几种主要沙生植物种群点格局分析[J].植物生态学报,2011,35(8):834-843.
- [11] 李海东,沈渭寿,余光辉等.西藏砂生槐种群结构与点格局分析[J].中国沙漠,2011,31(6):1443-1448.
- [12] 罗怀斌.西藏砂生槐种群分布格局分析[J].中南林业调查规划,2012,31(1):54-56.
- [13] Chengrui Liao, Haidong Li, Guoping Lv, et al. Stability and micro-topography effects of *Sophora moorcroftiana* community for fixation of sandy land under natural restoration, southern Tibetan Plateau[J].*Land Degradation & Development*, 2021,32(5): 2037-2049.
- [14] 黄健,央珍.简论拉萨地区亚高山灌丛的生态关系[J].西藏科技,1999(1):57.
- [15] 许新勇.西藏“一江两河”流域沙化土地生态恢复过程中群落结构特征研究[D].拉萨:西藏大学,2009.
- [16] 崔光帅,张林,沈维等.西藏雅鲁藏布江流域中段砂生槐灌丛生物量分配及碳密度[J].植物生态学报,2017,41(1):53-61.
- [17] 崔玲玲,土艳丽,拉多.不同株高不同生境下砂生槐的生物量分配格局[J].西藏科技,2015(7):67-71.
- [18] 赵文智,李森,刘玉璋等.西藏雅鲁藏布江中游下段沙地植被研究[J].中国沙漠,1994(1):68-74.
- [19] 唐永发,熊东红,张宝军等.雅江河谷中段典型防沙治沙生态工程对沙地持水性能的改良效应[J].山地学报,2021,39(04):461-472.
- [20] 杜坤,王军辉,贾子瑞等.不同种源砂生槐种子及幼苗生长变异研究[J].西北林学院学报,2012,27(4):144-148.
- [21] 赵年寿,纪鹏,魏彦明等.砂生槐生物碱成分测定,提取工艺及生物活性研究进展[J].天然产物研究与开发,2020,32(9):1614-1620.
- [22] 胡春晖,张发斌,丁李,等.高效液相色谱法测定藏药砂生槐子中4种生物碱含量[J].药物分析杂志,2015,35(3):430-434.
- [23] 李正蓉.苦参素的药理与临床研究进展[J].华西药学杂志,2003,18(6):435-437.
- [24] 袁瑞瑛,崔超英,徐福春.藏药砂生槐化学成分分析.西藏大学学报(自然科学版),2016,31(02):73-77.
- [25] 王聚乐,崔超英,徐福春等.西藏不同区域砂生槐在不同采收时间的花,茎,叶及种子中苦参碱,氧化苦参碱含量比较[J].西藏大学学报(自然科学版),2012,27(01):28-31.
- [26] Ma X, Lin H, Zhang J, et al. Extraction and identification of matrine-type alkaloids from *Sophora moorcroftiana* using double-templated molecularly imprinted polymers with HPLC-MS/MS[J].*Journal of Separation Science*,2018,41(16):1691-1703.
- [27] 胡春晖,张发斌.Box-Behnken响应面法优化砂生槐子中总生物碱的提取工艺[J].中成药,2016,38(09):2063-2066.
- [28] Xin Y, Danni Y, Yongming L, et al. *Sophora moorcroftiana* genome analysis suggests association between sucrose metabolism and drought adaptation.[J].*Plant Physiology*,2022,191(2):844-848.
- [29] 臧建成,幸福梅.砂生槐种实害虫对砂生槐种子与萌发的影响[J].西北农业学报,2012,(2):198-201.
- [30] Toda S, Shirataki Y. Inhibitory effects of stilbenes in *Sophora moorcroftiana* BENTH ex BAKER on copper ion-induced protein oxidative modification of mouse brain homogenate in vitro.[J].*Phytotherapy Research Ptr*, 2005, 19(1): 72.
- [31] 王孝先.砂生槐根际促生菌的筛选及干旱胁迫下对其种子萌发和幼苗生长的促生效应研究[D].拉萨:西藏大学,2020.
- [32] Gang S, Wenke Y, Wenbo M, et al. Anti-proliferation effects of ethanolic extracts from *Sophora moorcroftiana* seeds on human hepatocarcinoma HepG2 cell line.[J]. *Natural Product Research*,2018, 32(12):1472-1475.
- [33] 赵年寿,纪鹏,魏彦明等.基于网络药理学探讨野生砂生槐生物活性机制[J].中国野生植物资源,2021,40(03):38-46.
- [34] 贺学强,郭君.砂生槐种子水提物对S180荷瘤小鼠体内抗肿瘤作用[J].中国中医药信息杂志,2009,16(S1):20-21.
- [35] 雒艳萍,贾天玉,管彬等.砂生槐多糖提取物对免疫抑制模型小鼠Treg和Th17的影响[J].天然产物研究与开发,2016,28(10):1545-1548.
- [36] 马兴铭,王竞秋,张国超等.藏药砂生槐种子生物碱E2a联合BCG治疗小鼠棘球蚴病的实验研究[C]//中国免疫学会.第十三届全国免疫学学术大会摘要汇编,2018:363.
- [37] 马兴铭,李红玉,尹少甫等.砂生槐子生物碱杀灭原头蚴及抗炎作用[J].中国寄生虫病防治杂志,2004(04):31-33.
- [38] 高攀,潘汝翀,张发斌等.砂生槐子总生物碱生物粘附片与阿苯达唑联合用药治疗继发性小鼠泡球蚴病的疗效[J].中国高原医学与生物学杂志,2021,42(1):47-52.
- [39] 包根书,史大中,马兴铭.砂生槐生物碱抗小鼠细粒棘球蚴作用的初步观察[J].中国寄生虫学与寄生虫病杂志,2005(6):471-472.
- [40] 马兴铭,李红玉,尹少甫等.藏药砂生槐子生物碱抗炎抑菌活性的研究[J].中医药学报,2004(5):23-25+1.
- [41] Shuang-Ying W, Zhong-Lin S, Tao L, et al. Flavonoids from *Sophora moorcroftiana* and their synergistic antibacterial effects on MRSA.[J]. *Phytotherapy Research:PTR*,2014, 28(7): 1071-1076.
- [42] 甘雪辉,胡春晖,都涛等.砂生槐子总生物碱水剂和生物黏附片的pH转换两步溶出实验及药动学研究[J].药物评价研究,

2022, 45(4): 702-709.

- [43] Yanping L, Yuan Z, Huimin Z, et al. Anti-parasitic effects of water-soluble alkaloid fractions from ethanolic extracts of *Sophora moorcroftiana* seeds in *Caenorhabditis elegans*. [J]. *Chinese journal of Natural Medicines*, 2018, 16(9): 665-673.
- [44] 幸福梅, 杨小林, 赵垦田. 不同种源砂生槐种子萌发特性的比较研究[J]. 种子, 2015, 34(7): 1-5.
- [45] 索朗德吉, 赵垦田, 杨小林. 不同处理方法对西藏砂生槐种子发芽的影响[J]. 绿色科技, 2012(1): 69-71.
- [46] 马志杰. 不同处理方式下砂生槐种子萌发及生长规律研究[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2021, 33(6): 34-37.
- [47] 万艳玲, 次仁卓嘎, 张晨龙, 等. 砂生槐实生无菌苗获得方法研究[J]. 高原农业, 2026, 10(2): 172-177+250.
- [48] 宋国英, 边巴卓玛, 高雪等. 不同存储年限砂生槐种子萌发特性[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(03): 113-116.
- [49] 王梦妍, 曾加芹, 刘成凤. 盐碱胁迫对砂生槐种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(S1): 244-246+260.
- [50] YR, Yao, WJ, et al. Improvement of seed germination and in vitro propagation of a multipurpose plateau shrub species *Sophora Moorcroftiana* [J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2016, 48(4): 1439-1445.
- [51] 王文娟, 贺达汉, 唐小琴等. 不同温度和沙埋深度对砂生槐种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国沙漠, 2011, 31(06): 1437-1442.
- [52] 董家辉. 砂生槐的再生繁殖技术及其根瘤内生细菌的促生效应研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2025.
- [53] 柳文杰, 李紫帅, 幸福梅. 不同基质对砂生槐幼苗生长及根系形态的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(08): 1668-1674.
- [54] 李紫帅, 柳文杰, 张阆真, 等. 不同施氮方式及施氮量对砂生槐生长及生根的影响[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(1): 22-26.
- [55] 柳文杰, 刘顺汉, 幸福梅等. 砂生槐幼苗生长及生理变化对切根强度的响应[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2021, 47(02): 243-250.
- [56] 李紫帅, 张喜年, 柳文杰等. 保水剂对砂生槐幼苗生长及生理的影响[J]. 北方园艺, 2023, (5): 53-60.
- [57] 邢震, 张启翔, 刘灏等. 不同温度和湿度条件对砂生槐种子萌发率的影响[C]//中国园艺学会, 庆祝中国园艺学会创建 80 周年暨第 11 次全国会员代表大会论文摘要集. «园艺学报»编辑部(Editorial Office of Acta Horticulturae Sinica), 2009: 205.
- [58] 张胜, 赵垦田, 王景升等. 自然干旱胁迫下喷施抗蒸腾剂对砂生槐生理特性的影响[J]. 山东林业科技, 2010, 40 (03): 65-67.
- [59] 王文娟, 纳伟, 薛永伟. 砂生槐育苗初期灰地种蝇幼虫发生特点及药剂防治[J]. 中国植保导刊, 2017, 37(02): 58-60.
- [60] 臧建成, 幸福梅, 王忠红. 刺槐小蜂对砂生槐种子的危害及防治研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(32): 14179-14180.
- [61] 陈韵秋, 孙涛, 臧建成等. 砂生槐灌丛不同海拔地表节肢动物多样性与砂生槐种子危害的关系[J]. 西南农业学报, 2021, 34(07): 1540-1547.
- [62] Liu Y, Yi F, Yang G, et al. Geographic population genetic structure and diversity of *Sophora moorcroftiana* based on genotyping-by-sequencing (GBS). [J]. *PeerJ*, 2020, 8(9): e9609.
- [63] Liu Z M, Zhao A M, Kang X Y, et al. Genetic Diversity, Population Structure, and Conservation of *Sophora moorcroftiana* (Fabaceae), a Shrub Endemic to the Tibetan Plateau. [J]. *Plant Biology*, 2006, 8(1): 81-92.
- [64] 郭其强, 罗大庆, 方江平等. 西藏砂生槐的研究现状及其利用与保护对策[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(01): 98-101+156.
- [65] 赵阿曼, 刘志民, 康向阳, 等. 西藏特有植物砂生槐天然居群遗传多样性研究[J]. 生物多样性, 2003, 11(2): 91-99.
- [66] 杨兰, 李慧娥, 郭其强. 青藏高原特有种砂生槐的核心种质构建[J]. 植物生理学报, 2022, 58(06): 1133-1144.
- [67] Li H, Yang L, Li Q, et al. Completed plastome sequence of *Sophora moorcroftiana* an endemic shrub to the Qinghai-Tibet Plateau, China. [J]. *Mitochondrial DNA Part B*, 2019, 4(2): 4182-4183.
- [68] Li Z F Y W. Cloning of four DREB genes from Tibetan *Sophora moorcroftiana* and analysis of their expression during abiotic stress. [J]. *Journal of Forestry Research*, 2016, 27 (03): 675-683.
- [69] Li H, Zhang Y, Guo Q, et al. Molecular characterisation of a DREB gene from *Sophora moorcroftiana*, an endemic species of plateau. [J]. *Protoplasma*, 2017, 254(4): 1-7.
- [70] 郝豆豆, 石梦菲, 雷鸣等. 几种砂生槐叶片 DNA 提取方法的比较[J]. 科技展望, 2016, 26(01): 81-83.
- [71] Huie L, Weijie Y, Yaru F, et al. De Novo Assembly and Discovery of Genes That Are Involved in Drought Tolerance in Tibetan *Sophora moorcroftiana*. [J]. *Plos One*, 2015, 10(1): e111054.
- [72] 刘彬, 麻文俊, 王军辉等. 基于叶片解剖结构的砂生槐群体抗旱性评价[J]. 植物研究, 2017, 37(03): 325-333.
- [73] 张艳福, 姚卫杰, 郭其强等. 干旱胁迫对砂生槐种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43 (10): 45-56.
- [74] 幸福梅, 贾黎明, 杨小林, 等. 干旱胁迫对拉萨半干旱河谷主要灌木树种耗水及光合的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2016, 42(5): 617-625.