

# 环境因子对黄檗和川黄檗生长发育及小檗碱积累影响的研究进展

韦茜茜, 王富华, 高继海<sup>①</sup>

(成都中医药大学药学院 中药种质资源创新与高效利用四川省重点实验室, 四川 成都 611137)

**摘要:** 黄檗(*Phellodendron amurense* Rupr.)和川黄檗(*P. chinense* C. K. Schneid.)是中国重要的药用植物,其生长发育与核心药效成分小檗碱的积累受环境因子的显著调控。本研究系统综述了气候-地理、光照、水分、土壤及生物等多维度环境因子对黄檗和川黄檗生长发育进程及小檗碱含量的影响。明确气候-地理因子(海拔、经纬度、降水、温度)和土壤特性(氮素形态、有机质含量)是介导黄檗和川黄檗生长发育的关键调控因子,光强与生物共生网络协同其他次要因子共同作用于小檗碱的积累。揭示干扰黄檗和川黄檗发育进程及小檗碱生物合成的各环境因子之间存在既独立运作又交互协作的关系,且适生环境与小檗碱合成的最优条件存在空间分异。提出优化生态适宜区的仿野生栽培策略,包括菌根化育苗、氮磷钾配比施肥及“环剥再生”技术等,强调近自然林种植模式对提升林分生产力与药用成分积累的协同效应,为黄檗属(*Phellodendron* Rupr.)濒危资源的生态保护与可持续利用提供理论依据,同时为地道药材品质形成的环境调控机制研究提供多维解析框架。

**关键词:** 黄檗; 川黄檗; 环境因子; 小檗碱; 次生代谢; 药用植物资源

中图分类号: Q948.1; Q946.88; R282.71 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2026)02-0094-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2026.02.10

**Research progress on effects of environmental factors on growth and development and berberine accumulation in *Phellodendron amurense* and *P. chinense*** WEI Xixi, WANG Fuhua, GAO Jihai<sup>①</sup> (Chinese Medicine Germplasm Resources Innovation and Effective Uses Key Laboratory of Sichuan Province, School of Pharmacy, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611137, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2026, 35(2): 94-103

**Abstract:** *Phellodendron amurense* Rupr. and *P. chinense* C. K. Schneid. are important medicinal plants in China, and their growth and development, as well as the accumulation of the core medicinal component berberine, are significantly regulated by environmental factors. This study systematically reviews the effects of multidimensional environmental factors, including climatic-geography, light, water, soil, biology, etc. on the growth and development processes and berberine contents of *P. amurense* and *P. chinense*. It is clarified that climatic-geographic factors (altitude, longitude and latitude, precipitation, and temperature) and soil characteristics (nitrogen forms and organic matter content) are key regulatory factors mediating the growth and development of *P. amurense* and *P. chinense*, while light intensity and biological symbiotic network, in coordination with other secondary factors, jointly affect the accumulation of berberine. It is revealed that there are both independent functioning and interactive cooperation relationships among the various environmental factors interfering with the developmental processes and berberine biosynthesis in *P. amurense* and *P. chinense*, and the optimal conditions for habitat suitability and berberine synthesis exhibit spatial differentiation. A wild-simulated cultivation strategy for optimizing

收稿日期: 2025-04-12

基金项目: 四川省中医药管理局项目(2023zd017)

作者简介: 韦茜茜(2001—),女,侗族,广西柳州人,硕士研究生,主要从事中药资源与鉴定研究方面的工作。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: gaojihai@cdutcm.edu.cn

引用格式: 韦茜茜, 王富华, 高继海. 环境因子对黄檗和川黄檗生长发育及小檗碱积累影响的研究进展[J]. 植物资源与环境学报, 2026, 35(2): 94-103.

ecologically suitable areas is proposed, including mycorrhizal seedling cultivation, balanced fertilization ratio of nitrogen, phosphorus and potassium, "ring-barking regeneration" techniques and so on. The synergistic effects of near-natural forest planting modes on improving stand productivity and medicinal component accumulation are emphasized, which provides a theoretical basis for the ecological conservation and sustainable utilization of endangered *Phellodendron* Rupr. resources, while offers a multidimensional analytical framework for studying the environmental regulatory mechanisms underlying the quality formation of authentic medicinal materials.

**Key words:** *Phellodendron amurense* Rupr.; *Phellodendron chinense* C. K. Schneid.; environmental factor; berberine; secondary metabolism; medicinal plant resource

黄檗 (*Phellodendron amurense* Rupr.) 和川黄檗 (*P. chinense* C. K. Schneid.) 均为芸香科 (Rutaceae) 黄檗属 (*Phellodendron* Rupr.) 植物。该属植物的干燥树皮是《中华人民共和国药典 (2020 年版)》收录的重要中药材<sup>[1]</sup>。黄檗种群间呈现显著遗传分化及谱系地理结构特征<sup>[2]</sup>, 其分布于温带季风气候区, 在中国主要集中于北纬 39°~52° 的东北及华北地区, 适生区位于海拔 500~700 m 的天然混交林中<sup>[3]</sup>。川黄檗则主要分布于亚热带季风气候区, 其野生种群集中在中国西南地区海拔 900~1 800 m 处, 而川渝地区野生川黄檗资源现已濒临灭绝, 当前主要人工集中栽培在海拔 350~1 900 m 处<sup>[4-5]</sup>。小檗碱为黄檗属植物的核心药效成分, 具有抗肿瘤、调节肠道菌群、改善胰岛素抵抗等药理活性, 临床上用于治疗糖尿病、动脉粥样硬化、中枢神经系统疾病等, 具有广阔的市场发展前景<sup>[6-10]</sup>。然而, 黄檗和川黄檗的天然群落中幼龄个体资源稀缺, 并伴随着过度开采和栖息地片段化加剧, 致使种群自然更新能力逐渐减弱并呈现系统性衰退态势<sup>[11-12]</sup>。在《国家重点保护野生植物名录》中, 黄檗和川黄檗被列为国家二级重点保护野生植物<sup>[13]</sup>, 且黄檗还在《中国生物多样性红色名录—高等植物卷 (2020)》中被评估为易危 (VU)<sup>[14]</sup>。

环境因子可通过调控植物光合作用、养分吸收及次生代谢通路等直接或间接影响药用植物的形态与化学成分积累<sup>[15]</sup>。尽管许多研究初步探讨了不同环境因子对黄檗属植物生长及次生代谢产物积累的影响, 但缺少系统性整合分析, 且针对川黄檗适生环境的研究更为欠缺。本研究基于黄檗和川黄檗当前研究进展, 系统解析环境中与黄檗和川黄檗“形态-药效”关联的调控因子, 阐明主要因子 (气候-地理、土壤、光照、水分) 及辅助因子 (生物) 对黄檗属植物生长发育和小檗碱合成的影响。此外, 参考前人研究的适生条件, 提出基于生态区优化的资源保护策略, 以

期为建立黄檗属植物精准栽培体系及可持续利用范式提供理论依据。

## 1 环境因子对黄檗和川黄檗生长发育的影响

植物的生长发育过程受到多种环境因子的调控, 如光照、温度、湿度、土壤养分等。环境的动态变化可在不同空间尺度上显著影响植物的生长和发育, 植物常通过调节自身特性适应环境变化, 展现出更适应生存环境的形态, 实现对生长发育过程的优化及内稳态的维持<sup>[16-17]</sup>。因此, 了解黄檗和川黄檗适宜生长的环境条件, 可以为资源恢复和保护工作提供参考。

### 1.1 气候-地理因子的影响

影响黄檗和川黄檗生长发育的气候-地理因子主要包括季节、海拔、经纬度、坡向、坡位、坡度等, 这些因子通过调控温度、光照、水分等间接影响植物的生长发育, 在气候条件和地理梯度上决定植物的适生地与全球分布格局。

研究发现, 海拔是影响黄檗属植物生长的关键因子之一。随着海拔的增加, 黄檗、川黄檗的生长与夏季平均最低温的关联性显著降低, 夏季降水量对黄檗和川黄檗的影响明显减弱<sup>[18]</sup>。黄檗和川黄檗的生长发育不仅与海拔相关, 同时与坡位、坡向、坡度显著相关<sup>[19]</sup>。根据最大熵模型 (MaxEnt) 和随机森林模型的预测结果, 黄檗适宜分布在中坡或山谷, 西南、南或无坡向坡, 阴斜坡中层、阳陡坡薄层的暗棕色土壤地区<sup>[20]</sup>。另外, 黄檗虽喜阳, 但在光照条件不足时, 若水分和温度等条件良好, 也能很好地生长发育, 且黄檗幼苗在轻度遮光的条件下生长更快<sup>[21]</sup>。然而, 关于川黄檗适生地的地形特征 (坡度、坡位、坡向等) 尚缺乏系统研究, 因此, 明确其立地选择规范是未来的一个重要研究方向。

## 1.2 土壤因子的影响

黄槿和川黄槿对土壤的适应性较强,常生长在土层深厚、湿润、疏松透气、排水良好的沙质土壤或含腐殖质丰富的中性或微酸性土壤中,强酸性或碱性土壤会抑制其生长<sup>[22-23]</sup>。当前有关土壤因子对黄槿属植物生长发育影响的研究主要集中在氮源、营养元素配比、土壤类型和基质配比方面。

**1.2.1 氮源的影响** 土壤大分子有机氮的解聚是植物生产力的关键驱动力,氮元素是影响植物幼苗生长发育的一个重要限制性因子<sup>[24-26]</sup>。对北京地区黄槿分布与环境因子关系的研究结果显示:北京山区低碱解氮含量、高有机质含量的土壤适合野生黄槿生长<sup>[27]</sup>。并且,氮源对黄槿和川黄槿生长的影响存在剂量效应<sup>[28]</sup>。110、220、440 kg·hm<sup>-2</sup>氮素处理组的黄槿幼苗株高和基径明显高于对照组(0 kg·hm<sup>-2</sup>)和55 kg·hm<sup>-2</sup>氮素处理组,而440 kg·hm<sup>-2</sup>氮素处理组的黄槿幼苗株高和基径较110 kg·hm<sup>-2</sup>氮素处理组有所下降<sup>[29]</sup>。Gu等<sup>[30]</sup>发现,10 g·m<sup>-2</sup>氮素处理组川黄槿幼苗的生长情况优于0、5、15 g·m<sup>-2</sup>氮素处理组。崔太淑等<sup>[31]</sup>研究发现,株龄1 a的黄槿苗木在20 g·m<sup>-2</sup>施氮量下各生长指标均最大,而株龄1 a以下的苗木施氮量应控制在10 g·m<sup>-2</sup>左右。可见,氮素对黄槿和川黄槿幼苗生长发育的影响并非是施用量越高越好。适宜的氮素能够增加黄槿和川黄槿幼苗根际土壤的养分含量,改变氮代谢关键酶活性,调控土壤微生物群落丰度和代谢功能,进而影响植株的生长发育及其对环境的适应性<sup>[30]</sup>。

氮素形态配比也是影响黄槿和川黄槿生长的重要因素。李霞等<sup>[32]</sup>研究表明:硝态氮比例高的营养供给更利于黄槿幼苗生长,在铵态氮与硝态氮浓度比为1:3时,黄槿幼苗株高最高且显著高于单施铵态氮或硝态氮。

**1.2.2 营养元素配比的影响** 合理的氮、磷、钾配比施肥可改善黄槿和川黄槿的生长状况。雷俊杰等<sup>[33]</sup>对湖北、重庆、湖南的川黄槿幼苗进行不同氮、磷、钾配比施肥,植株的苗高、地径、叶片叶绿素含量等指标均较不施肥组显著提高,且不同地区适宜的营养元素配比存在差异。张俊等<sup>[34]</sup>通过黄槿幼树氮、磷、钾不同配比施肥实验发现,黄槿幼树的树高、地径、侧枝伸长生长对氮、磷、钾的响应不同,适宜的施肥量也明显不同。合理的氮、磷、钾配比施肥可以改善黄槿和川黄槿幼苗的生理代谢水平,加速植株生长发育进程,

通过设置特定配比,可有针对性地调节黄槿和川黄槿各组织或器官的生长。

**1.2.3 土壤类型和基质配比的影响** 土壤类型对黄槿和川黄槿的生长具有重要影响。生长在河谷两侧冲积土上的黄槿长势明显较生长在沼泽地、黏土和瘠薄土地上的黄槿更好<sup>[22]</sup>;Yang等<sup>[35]</sup>对比了川黄槿在红土、黄土、酸性紫土和碱性紫土4种土壤类型中的生长情况,发现川黄槿在酸性紫土中的苗高、基径等生长指标高于其他土壤,表现出更好的生长特性。不同的土壤基质配比也会直接影响黄槿幼苗生长速度和质量。采用田园土与泥炭土体积比1:3的混合基质种植黄槿,育苗效果最好,是黄槿容器育苗的理想基质<sup>[36-37]</sup>。

## 1.3 光照因子的影响

光照是生态因子的重要组成部分,主要包括光强和光质2个方面<sup>[38]</sup>。黄槿和川黄槿均为阳生植物,在生长发育过程中受光照尤其是光强的影响较大。然而,黄槿虽喜光,但其幼苗阶段在强光下会表现出明显的生存适应性障碍,适当遮光处理可有效加快其生命进程<sup>[39]</sup>;研究表明:黄槿幼苗在75%全光照光强下生长状况最好,其次是全光照<sup>[40]</sup>。此外,黄槿雌株和雄株对光照的需求也不同,如雄株叶宽在85%遮光处理下最大,雌株叶宽则在65%遮光处理下最大<sup>[41]</sup>。孙悦燕等<sup>[42]</sup>将不同光强(全光照、轻度遮光和重度遮光,光照强度分别为1 854.2、396.8和162.2 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)和不同氮添加量(无添加、轻度添加和重度添加,尿素总量分别为0.00、28.21和56.42 g·m<sup>-2</sup>)分别组合,分析各处理对株龄3 a黄槿幼苗生长的影响,结果显示:重度遮光时施氮会抑制黄槿幼苗叶片叶绿素合成,降低幼苗光能利用率,不利于植株生长。可见,光强协同氮素共同介导黄槿的生长发育进程。

光质通过波长变化调控植物的光合作用、形态发育和抗逆能力<sup>[43]</sup>。处于不同生长阶段的黄槿和川黄槿对光质具有不同的生理需求。李霞等<sup>[44]</sup>采用红、黄、蓝、绿滤光膜遮光处理苗龄1 a的黄槿,发现4种滤光膜对黄槿幼苗的根干质量和茎生长都有不同程度的抑制作用,表明幼苗期的黄槿并不适合采用滤光膜进行人工干预培养,且黄、红滤光膜的抑制作用较弱,蓝、绿滤光膜的抑制作用较强。王慧梅等<sup>[45]</sup>发现蓝滤光膜对黄槿无菌苗茎段不定芽的再生有显著促进作用,其次为无滤光膜和黄滤光膜,红、绿滤光膜不

利于不定芽的生长和分化。值得注意的是,黄檗雌株和雄株对光质的响应也不同:相较于雌株,雄株在异质光环境中表现出更强的生理适应性及生存优势<sup>[41]</sup>。在种植黄檗和川黄檗时使用滤光膜不但改变了光质,而且阻碍了光线直射,降低了光照强度,从而影响植株的光合作用过程,进而影响植株的生长发育。

另外,UV-B辐射会通过降低黄檗幼苗的光合色素含量和PS II反应中心传递电子能力,致使光合作用强度降低,从而抑制黄檗幼苗的生长,且其作用具有剂量效应<sup>[46]</sup>。当前国内学术界除了研究UV-B辐射胁迫对黄檗的影响外,其他针对光谱成分(如可见光强度、红/蓝光配比等)对黄檗属植物(尤其是川黄檗)生长代谢的研究尚未完善,值得深入研究,为开发精准光调控栽培技术提供关键理论依据。

#### 1.4 水分因子的影响

对于黄檗属植物而言,水分条件是其生态适应性的一个重要影响因子。谢川等<sup>[47]</sup>通过最大熵模型量化分析表明:年均降水量对川黄檗潜在分布区预测的方差贡献率(62.0%)明显高于温度相关参数,即水分对川黄檗生长的影响大于温度。及利等<sup>[48]</sup>的控水实验表明:在腐殖土、壤土和砂壤土中,黄檗幼苗的苗高、地径和冠面积等生长指标均随田间持水量的下降而显著降低,并且腐殖土中各生长指标总体上最高。此外,幼苗根冠比在腐殖土中随水分降低持续上升,而在壤土和砂壤土中则呈先增加后降低的趋势。这可能与腐殖土较高的持水能力和丰富的有机质含量有关,说明土壤水分与有机质共同影响着黄檗幼苗的生理发育进程。

干旱胁迫作为水资源变化情况的一种,通过“水分-光合-氧化损伤”连锁效应限制植物生长,是全球范围内影响植物生产力和物种分布的关键因子<sup>[49]</sup>。中度和重度干旱会促进川黄檗体内活性氧的生成,降低叶绿素含量,但提高了乙烯生物合成和信号转导途径中关键基因的表达水平,从而提高了幼苗叶片对干旱胁迫的适应性和抗性<sup>[50-51]</sup>。

#### 1.5 生物因子的影响

生物因子的生态互作是生态系统动态的核心驱动力,生态互作通过复杂的反馈机制维持生态平衡<sup>[52]</sup>。影响黄檗和川黄檗生长发育的主要生物因子为微生物共生网络和种间互作。

##### 1.5.1 微生物共生网络的影响 丛枝菌根真菌

(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是自然界中普遍存在的一种根系共生菌,能够侵染绝大多数的陆生植物根系形成菌根,对植物的生长、水分和矿质营养吸收及抗非生物胁迫有显著影响,可作为生物肥料利用,促进植物吸收营养元素,提高苗木移栽成活率<sup>[53]</sup>。黄檗根中常见的AMF主要有根内球囊霉(*Glomus intraradices*)、摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)、美丽盾孢囊霉(*Scutellospora calospora*)、变形球囊霉(*Glomus versiforme*)、透光球囊霉(*Glomus diaphanum*)<sup>[53]</sup>。接种AMF后的川黄檗幼苗生长速率明显优于不接菌幼苗,摩西球囊霉和透光球囊霉的促生效果更为突出<sup>[54]</sup>。与不接菌相比,黄檗幼苗在接种AMF后植株生长及叶片氮含量均增加,且以摩西球囊霉的促进效果最为显著<sup>[55-56]</sup>。范继红等<sup>[57]</sup>研究发现,接种摩西球囊霉和透光球囊霉的黄檗苗高、地径、主根长、根系活力增加较为突出,且接种透光球囊霉的幼苗光合速率最大。由此认为,黄檗和川黄檗与AMF之间可以形成良好的共生关系,相互协同生长,且在实际应用中以透光球囊霉和摩西球囊霉的促生效果较佳。

土壤环境、AMF和植物间会形成动态互作机制。如王雪等<sup>[58]</sup>利用PCR-DGGE等技术分析发现,土壤肥力越高,AMF的侵染率反而越低;在酸碱度适中的条件下,土壤中的有机质、磷、氮的积累量少,反而更有利于AMF侵染。如城市人工林生态系统中AMF的丰度、侵染率、优势度等指标均明显高于邻近天然次生林和天然原始林<sup>[58]</sup>。赵匠等<sup>[59]</sup>研究发现,盐胁迫会显著降低AMF对黄檗根系的侵染率,同时,AMF可通过调节渗透调节物质合成及抗氧化酶系统活性,显著增强细胞膜的离子选择性吸收能力,从而提高黄檗幼苗的耐盐性。总体而言,土壤环境会影响AMF的活力,AMF又可以改变黄檗属植物对环境的适应能力。

1.5.2 种间互作的影响 种间互作是不同物种之间通过互利、竞争、捕食或寄生等方式产生的相互作用,该作用影响物种间的资源分配、种群动态及群落结构<sup>[60]</sup>。种间互作通常会推动表型多样化,而物种表型反过来又会影响种间互作<sup>[60]</sup>。种间互作可调整植物生存状态,黄檗和川黄檗更适合与竞争力较弱的植物共存。在添加同一氮源条件下,将黄檗与水曲柳(*Fraxinus mandshurica* Rupr.)间作,黄檗生长受到竞争性抑制,究其原因:水曲柳与黄檗有共同的氮需求,

竞争力强的水曲柳加快获取氮源,导致黄檗可利用资源减少,生长进程减缓<sup>[61]</sup>。当黄檗与胡桃楸(*Juglans mandshurica* Maxim.)、紫椴(*Tilia amurensis* Rupr.)等强竞争力植物共存时,这些植物会与黄檗竞争性吸收土壤中的肥力与水分,致使黄檗的生存压力增大、生长发育受到阻碍,种间生存压力明显大于种内生存压力<sup>[62]</sup>。周建容等<sup>[63]</sup>则选用竞争力小的浅根系作物刺黑竹(*Chimonobambusa purpurea* J. R. Xue et T. P. Yi, 俗称牛尾竹)与深根系作物川黄檗间作,二者根系在土壤垂直空间上分层吸收营养,降低了种间的竞争强度,减少了种间互作的生长抑制作用,并且提升了单位面积内土壤的养分利用率。当经人工促进形成的半天然林面临黄檗和川黄檗生产力下降问题时,可对距离二者较近且具有较强竞争力的高大乔木类植株进行适当的修枝或砍伐,以减轻黄檗和川黄檗与其他林木的种间竞争压力,从而促进目标树种的更新和生长。

## 2 环境因子对黄檗和川黄檗小檗碱含量的影响

生物碱类成分复杂,易受地理环境、种植方式等影响,活性十分不稳定<sup>[64-65]</sup>。小檗碱为苜基异喹啉类生物碱,川黄檗中的小檗碱含量(1.37%~5.80%)显著高于黄檗(0.60%~1.64%)<sup>[66]</sup>,根据生长-分化平衡假说(growth-differentiation balance, GDB),环境资源限制(如干旱、低温)可诱导次生代谢产物合成,以平衡生长与防御的资源分配<sup>[67]</sup>。可见,小檗碱的生物合成受环境因子调控。

### 2.1 气候-地理因子的影响

气候-地理因子与黄檗属植物的药效成分积累密切相关。降水和温度是影响植物生长及生物碱积累和活性的关键因子。降水方面,较高的年均降水量有利于黄檗中小檗碱的积累<sup>[68]</sup>,而黄檗产地降水量明显低于川黄檗产地,这可能与黄檗的小檗碱含量显著低于川黄檗密切相关<sup>[69-70]</sup>。温度方面,小檗碱含量与1月均温呈显著正相关,与1月平均降水量、5年平均极低温度呈极显著正相关<sup>[71]</sup>;小檗碱含量还会随着温度的季节变化而变化:当夏季温度偏高时,植株光合作用旺盛,整体小檗碱积累量高于春季,但在夏季至秋季过渡期可能出现“先升后降”趋势<sup>[72]</sup>。另有研究强调了季节动态与其他地理因子

(如海拔、纬度)的交互作用在调控黄檗和川黄檗小檗碱含量中的重要性<sup>[73]</sup>。

在不同经纬度地区,黄檗和川黄檗的小檗碱含量存在较大差异。研究表明:中纬度范围(北纬39°~48°),纬度与黄檗的小檗碱含量呈负相关,北京地区的川黄檗小檗碱含量低于四川地区<sup>[74-75]</sup>。Zhang等<sup>[68]</sup>研究表明黄檗根皮、树干皮、多年生枝皮和多年生枝条的小檗碱含量从北纬41°开始随着纬度增加而降低,并在北纬47°~48°降到最低值,而后逐渐小幅回升。可见,若想获取高含量小檗碱的黄檗植株,应在中低纬度地区进行种植。在东经123°~130°内,黄檗根皮、多年生枝皮和一年生枝条的小檗碱含量同样随着经度的增加而降低。总体来说,低经纬度地区的黄檗小檗碱含量明显高于高经纬度地区,经纬度可通过光照-温度协同作用调控黄檗小檗碱的“合成-分解”过程平衡,黄檗和川黄檗各器官小檗碱的积累会因所处空间的变化而呈现异质性响应。

### 2.2 土壤因子的影响

2.2.1 氮源的影响 土壤中的营养元素对小檗碱的生物合成尤为重要<sup>[76]</sup>,氮素是影响小檗碱生物合成的关键因子之一<sup>[77]</sup>。适宜浓度外源氮的添加可显著提高川黄檗幼苗茎皮四氢小檗碱氧化酶编码基因[*Pc(S)-THBO*]的表达水平,促进小檗碱的合成与积累<sup>[78]</sup>。丁丽洁等<sup>[79]</sup>确定了4 mmol·L<sup>-1</sup>为黄檗幼苗根、茎小檗碱富集的最适氮素浓度。此外,混合氮源可促进药用植物生长及品质形成<sup>[80]</sup>,如黄连(*Coptis chinensis* Franch.)根茎小檗碱含量在混合氮源处理下较单一氮源处理高<sup>[81]</sup>。具有硝态氮优势的环境虽抑制川黄檗生物量的积累,但可促进小檗碱合成<sup>[82]</sup>。然而,值得注意的是,土壤全氮、有效氮含量与黄檗茎皮的小檗碱含量呈负相关,但与根皮的小檗碱含量呈正相关<sup>[83]</sup>。由此可见,黄檗不同组织的小檗碱含量对氮源的响应不同,且氮肥虽然有利于黄檗幼苗的生长,但却不完全有利于小檗碱的生物合成。因此,建议在黄檗和川黄檗的实际种植培育中,采用动态氮素管理策略,如苗龄1 a以下的植株施用10 g·m<sup>-2</sup>氮肥,苗龄1 a以上的植株追施20 g·m<sup>-2</sup>氮肥,或使用铵态氮与硝态氮浓度比为25:75的混合氮源;在植株的次生代谢活跃期,调整为硝态氮主导模式,以优化活性成分积累<sup>[30-32]</sup>。

2.2.2 营养元素配比的影响 不同营养元素的补给对黄檗和川黄檗幼苗次生代谢产物积累有显著调控

作用。喷施叶面肥后,黄檗的生物碱含量较对照(喷施清水)显著提高,其中氮磷肥混配(含 $10\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 尿素、 $6\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 磷酸二氢钾)处理明显诱导小檗碱生物合成,促生效果最优<sup>[84]</sup>。然而,目前关于黄檗和川黄檗在不同营养元素配比时小檗碱含量变化的系统性研究较为有限,亟待深入探讨。对同样以小檗碱为主要有效成分的云南黄连(*Coptis teeta* Wall.)的研究发现,其根系小檗碱含量与根际土壤全氮、全磷、全钾和速效钾含量呈正相关<sup>[85]</sup>。基于此,李庆锋<sup>[86]</sup>提出“三段式施肥”法:以有机专用肥为底肥,结合药渣菌肥;播种后1~3 a的春秋两季施氨基酸复合肥,配合苗势加施生物磷肥或微量元素混合剂;播种后4~5 a增施草木灰、复合肥,最终使小檗碱含量提升至1.42%。该施肥方案的对象虽为黄连,但其基于植物营养阶段调控的理念,为黄檗和川黄檗的肥料配比优化提供了可借鉴的思路,未来可在黄檗和川黄檗种植中参考该策略进行实验,系统评估小檗碱含量的变化。由此可见,不同营养元素配比可影响生物合成过程,实际种植中可通过靶向调控肥料的营养元素配比达到种植目标,实现药用植物的定向栽培。

### 2.3 光照因子的影响

光强可通过驱动光合作用构成生态系统能量输入的基础,还可直接影响植物的形态建成与基因表达,进而调控次生代谢产物的积累<sup>[87]</sup>。梯度遮光实验揭示黄檗中小檗碱含量与光照强度呈显著正相关,茎外皮和根部的小檗碱在全光照条件下积累量最高,然而,相对光强为75%时,小檗碱的单株产量最高<sup>[21]</sup>。表明使用不同光强处理能有效调控次生代谢产物的合成能力,但需结合植株的生物量积累,其中75%的相对光强最适宜黄檗中小檗碱的积累。

特定波长的光通过影响生物合成途径调控小檗碱的积累水平。不同辐射强度的UV-B处理黄檗幼苗后,茎中小檗碱含量高于自然光,且低辐射强度( $3.26\text{ }\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )下的茎中小檗碱含量高于高辐射强度( $9.78\text{ }\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ );而根和叶中小檗碱含量虽随时间延长有所升高,但始终低于自然光照<sup>[88]</sup>。温泉等<sup>[89]</sup>发现黄连根中小檗碱含量随UV-B辐射时间延长波动变化,且5.00和10.00 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ UV-B辐射均在35 d最高,而20.00 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ UV-B辐射则在21 d最高,但仍低于5.00 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ UV-B。可见,UV-B辐射对小檗碱的影响存在“时间-强度”交互效应。李霞等<sup>[44]</sup>用红、蓝、绿、黄4种滤光膜遮光处

理黄檗幼苗,发现所有滤光膜处理的小檗碱单株产量均低于不遮膜处理,但红滤光膜处理的小檗碱单株产量显著高于其他滤光膜处理,表现出最低的抑制效应。然而这种抑制效应也可能是光强降低造成的,后续可设计不同波长光配比实验。

植物通过光受体信号传导感知光强、光质与光周期,其形态建成与基因表达会作出相应调整,进而影响次生代谢产物积累<sup>[90-92]</sup>。然而,当前针对光质如何调控川黄檗小檗碱含量的研究仍较匮乏,尚难以明确黄檗和川黄檗在同一光质条件下是否会呈现一致的小檗碱积累效应。

### 2.4 水分因子的影响

适宜的土壤水分有利于药用植物的生长发育,而轻度干旱胁迫则有利于植物药效成分的形成和积累<sup>[93]</sup>。总体上,轻度干旱有利于小檗碱的合成与积累,水涝处理会导致小檗碱含量显著降低<sup>[94]</sup>,可见黄檗的适宜生长环境并非次生代谢产物积累的最优条件。另外,干旱胁迫对植物生理代谢的影响可能表现为一种阈值效应。相关研究表明:黄檗属植物生物碱积累与干旱胁迫时间非线性相关,黄檗体内的小檗碱含量首先随着胁迫时间的延长而升高,在达到最大值后,含量开始下降<sup>[95]</sup>。

### 2.5 生物因子的影响

根际微生物对黄檗和川黄檗中小檗碱的合成积累具有重要调控作用。黄檗中小檗碱含量与丛赤壳科(Nectriaceae)和小克银汉霉科(Cunninghamellaceae)真菌的相对丰度呈极显著正相关<sup>[96]</sup>。此外,丛枝菌根真菌(AMF)是影响黄檗属植物生物合成的关键生物调节因子。在黄檗的根皮和茎皮上接种摩西球囊霉,其小檗碱的富集效应突出,尤其是根皮中小檗碱含量比不接菌增加了133.6%,且比接菌后的茎皮高63.8%,同时掌叶防己碱和药根碱等其他生物碱成分含量也明显升高<sup>[55]</sup>,证明菌根共生体系对黄檗的次生代谢产物具有正向调控作用。摩西球囊霉和透光球囊霉对川黄檗小檗碱积累也有显著的促进作用。AMF对川黄檗各组织部位也呈现特异性调控作用:接种摩西球囊霉的根皮中小檗碱含量最高,为未接菌的1.82倍;接种透光球囊霉的茎皮中小檗碱含量最高,为未接菌的3.98倍<sup>[54]</sup>。以上研究不仅证实AMF对生物碱代谢存在器官特异性调控模式,更揭示菌种与代谢产物间存在一定的对应关系,为使用生物因子定向调控药用植物活性成分提供了理论依据。

### 3 黄檗和川黄檗的资源保护策略

植物的生态资源保护需要多方位的协同作用。政治制度层面,轮伐限制制度可以强化黄檗属植物在生境中自我优化及修复,同时推动遗传资源保护政策实施,建立适宜黄檗及川黄檗生长的跨地理种群的种质资源库。建议优先保护高质量的黄檗和川黄檗的遗传资源,并且重点监测幼苗的生长情况,助力种群更新,限制人工栽培的规模规避基因趋同风险。在采集黄檗和川黄檗成树茎皮时,规定统一采用“环剥再生”技术,以减少对植株的伤害<sup>[97]</sup>。为提升对黄檗属种群的监测预警能力,可采用遥感技术与最大熵模型构建动态监测网络,实时追踪适生区变迁规律,建立种群衰退风险预警响应机制。

在黄檗和川黄檗种植技术体系构建中,应遵循生态适应性原则。基地种植区宜优先考虑海拔处于1 000 m且水土资源丰富的中位斜坡区域,采用中性至微酸性土壤土质,推荐酸性紫土或以泥炭土为主的田园土和泥炭土混合基质。光照管理方面,基地需进行阶段性调控,幼苗期搭建遮光设施,待植株进入成年期转为全光照模式,通过模拟自然群落结构推行近天然林种植。微生物技术应用方面,倡导菌根化育苗,在黄檗和川黄檗根际土壤中接种丛枝菌根真菌(如摩西球囊霉、透光球囊霉),重点针对盐碱、干旱区域提升植株养分吸收效率与抗逆能力,该措施还能显著促进小檗碱积累。肥料管理方面,推荐氮磷钾混合配比施肥,在黄檗和川黄檗生长前期施用铵态氮与硝态氮浓度比为25:75的混合氮肥促进生物量积累,后期改用单一硝态氮加快植株体内的次生代谢。在间作栽培上,建议采用牛尾竹等浅根系低竞争性树种,规避深根系、强竞争树种(如胡桃楸、紫椴),并定期砍伐高竞争力林木维持林群稳定。在黄檗和川黄檗栽培中后期,建议维持土壤持水量在60%~70%之间,必要时可实施短期(20 d内)轻度干旱胁迫(土壤水势-80~-60 kPa,60%持水量),加快植株生长速率并定向提升小檗碱合成效率<sup>[48,94]</sup>。

### 4 展 望

尽管关于多维环境因子对黄檗和川黄檗生长发育及小檗碱积累影响的相关研究较多,但当前研究仍

存在许多值得深入挖掘的地方。如针对川黄檗相关研究相对薄弱,尤其缺乏坡度、坡向、坡位、光质对其生长代谢的深入研究;光质、光强对雌、雄植株代谢差异的机制不明;氮素信号转导与小檗碱合成酶基因的分子互作亟待阐明;土壤类型对小檗碱含量的定量研究不足等。未来研究需深入解析环境因子互作的分子机制,聚焦如何通过精准协调环境因子实现黄檗属植物“生长发育高峰期”与“小檗碱合成高峰期”的“双峰期”优化,为濒危药用植物资源的生态保护与高品质定向栽培提供更坚实的理论和技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(2020年版):一部[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020:153,318.
- [2] 李绍臣,李凤明,张立民,等. 吉林省天然黄檗种群遗传多样性ISSR分析[J]. 生态学报,2016,36(13):4006-4012.
- [3] 杨洪升,王悦,历秋玉,等. 珍稀濒危植物黄檗研究现状[J]. 中国科技信息,2017(5):71-72.
- [4] 谭荣,张静,谭尔,等. 川渝地区黄柏两种基源品种的野生资源调查[J]. 亚太传统医药,2016,12(13):33-35.
- [5] 唐宗英,乔璐,阮桢媛,等. 资源树种川黄檗的研究进展[J]. 中国农学通报,2016,32(2):82-86.
- [6] OTHMAN B, BEIGH S, ALBANGHALI M, et al. Comprehensive pharmacokinetic profiling and molecular docking analysis of natural bioactive compounds targeting oncogenic biomarkers in breast cancer[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 5426.
- [7] DING J P, YAN Z, PENG L, et al. Inhibitory effects of berberine on fungal growth, biofilm formation, virulence, and drug resistance as an antifungal drug and adjuvant with prospects for future applications[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2025, 41: 5.
- [8] CHENG Z Q, KANG C L, CHE S T, et al. Berberine: a promising treatment for neurodegenerative diseases[J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 13: 845591.
- [9] HOU Q, HE W J, WU Y S, et al. Berberine: a traditional natural product with novel biological activities[J]. Alternative Therapies, 2020, 26(S2): 20-27.
- [10] ASKARI V R, KHOSRAVI K, RAHIMI V B, et al. A mechanistic review on how berberine use combats diabetes and related complications: molecular, cellular, and metabolic effects[J]. Pharmaceuticals, 2023, 17: 7.
- [11] 张志鹏,张阳,张昭,等. 我国黄檗野生种群生存现状及化学表征研究[J]. 植物科学学报,2016,34(3):381-390.
- [12] 陈湘淋. 外源氮对川黄柏根际微生物群落结构和药用成分积累的影响[D]. 长沙:中南林业科技大学,2022:7.
- [13] 农业农村部,国家林业和草原局. 国家重点保护野生植物名录[EB/OL]. (2021-09-09)[2025-03-25]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/09/5636409/files/12887ada7c174>

- d199e7ecd8996d07340.pdf.
- [14] 生态环境部,中国科学院. 中国生物多样性红色名录: 高等植物卷(2020) [EB/OL]. (2023-05-22) [2025-03-25]. <http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xzgfxwj/202301/W020130917614244055331.pdf>.
- [15] RABEH K, HNINI M, OUBOHSSAINE M. A comprehensive review of transcription factor-mediated regulation of secondary metabolites in plants under environmental stress [J]. *Stress Biology*, 2025, 5: 15.
- [16] YUNG W S, CHAN T F, KONG F J, et al. The plant genome special section: epigenome and epitranscriptome in plant-environment interactions [J]. *The Plant Genome*, 2023, 16 (4): e20404.
- [17] VANTAROVÁ K H, BARTHA S, BIURRUN I, et al. Plant communities in changing environment [J]. *Biologia*, 2024, 79: 1075-1079.
- [18] ZHU L J, WANG X C, PEDERSON N, et al. Spatial variability in growth-climate relationships of amur cork tree (*Phellodendron amurense*) and their connections with PDO in Northeast China [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123: 1625-1636.
- [19] 张 斌, 张金屯, 苏日古嘎, 等. 协方差分析与典范对应分析在植物群落排序中的应用比较 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33 (5): 842-851.
- [20] 宗迪迪, 董灵波, 刘兆刚. 基于最大熵和随机森林模型的3种珍贵硬阔叶树种潜在分布预测 [J]. *广西林业科学*, 2024, 53 (1): 1-9.
- [21] 李 霞, 王 洋, 阎秀峰. 光强对黄檗幼苗三种生物碱含量的影响 [J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 1655-1660.
- [22] 吴潇颖. 西北农林科技大学南校区植物群落调查 [J]. *南方农业*, 2023, 17(12): 46-49, 53.
- [23] 栾兆平, 郭滨德, 吴金卓. 长白山地区黄檗阔叶混交林主要乔木种群生态位特征 [J]. *森林工程*, 2023, 39(4): 78-85, 92.
- [24] JU Y W, JIA Y Y, CHENG B S, et al. *NRT1.1B* mediates rice plant growth and soil microbial diversity under different nitrogen conditions [J]. *AMB Express*, 2024, 14: 39.
- [25] PENG Y R, WANG T, WANEK W, et al. Large-scale patterns and drivers of soil organic nitrogen depolymerization [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2025, 204: 109766.
- [26] WANG M, SHI S, LIN F, et al. Effects of soil water and nitrogen on growth and photosynthetic response of manchurian ash (*Fraxinus mandshurica*) seedlings in northeastern China [J]. *PLoS ONE*, 2012, 7(2): e30754.
- [27] 黄治昊, 周 鑫, 张孝然, 等. 北京地区黄檗分布与环境因子的关系 [J]. *植物科学学报*, 2017, 35(1): 56-63.
- [28] 李 霞, 阎秀峰, 刘剑锋. 氮素浓度对黄檗幼苗生长及氮代谢相关酶类的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(6): 40-42.
- [29] 丁丽洁, 李 霞, 刘 强. 施氮量对黄檗幼苗生长的影响 [J]. *人参研究*, 2012(4): 40-42.
- [30] GU Y Z, CHEN X L, SHEN Y, et al. The response of nutrient cycle, microbial community abundance and metabolic function to nitrogen fertilizer in rhizosphere soil of *Phellodendron chinense* Schneid seedlings [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1302775.
- [31] 崔太淑, 赵哲南, 孙立辉, 等. 氮肥对黄檗一年生苗木生长的影响 [J]. *吉林林业科技*, 2012, 41(3): 9-11, 18.
- [32] 李 霞, 阎秀峰, 刘剑锋. 氮素形态对黄檗幼苗生长及氮代谢相关酶类的影响 [J]. *植物学通报*, 2006, 23(3): 255-261.
- [33] 雷俊杰, 王利宝, 李宇昊, 等. 配比施肥对不同川黄柏种源幼苗生长及生理特性的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2024, 44(8): 62-72.
- [34] 张 俊, 程广有, 刘 岩. 黄檗生长性状氮磷钾响应模型 [J]. *北华大学学报(自然科学版)*, 2021, 22(2): 182-186.
- [35] YANG Y, HU Y Y, QIAN W Z, et al. Early growth characterization and antioxidant responses of *Phellodendron chinense* seedling in response to four soil types at three growth stages [J]. *Forests*, 2023, 14: 1746.
- [36] 董菊兰, 胡劭鸿, 张 晶, 等. 田园土与泥炭土不同配比基质对黄檗容器播种苗生长和质量的影响 [J]. *温带林业研究*, 2018, 1(2): 34-43, 62.
- [37] 赵 杰, 赵秋玲, 沙 红, 等. 基质理化性质对黄檗幼苗生物量及生理指标的影响 [J]. *温带林业研究*, 2024, 7(1): 1-8.
- [38] 马文琪, 王红阳, 张文晋, 等. 生态因子对人参外形和皂苷类成分的影响 [J]. *中国中药杂志*, 2021, 46(8): 1920-1926.
- [39] 程广有, 唐琬琦, 田志斌, 等. 黄檗家系幼龄期生长对光照强度的响应 [J]. *北华大学学报(自然科学版)*, 2021, 22(4): 437-442.
- [40] 李 霞. 环境因子对黄檗幼苗生长及主要药用成分含量的影响 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006: 71.
- [41] 张 玲, 张东来. 遮荫条件下黄檗生长和生理响应的性别差异研究 [J]. *植物研究*, 2020, 40(5): 735-742.
- [42] 孙悦燕, 郭跃东. 遮阴和施氮对黄檗幼苗叶片光合特性和碳氮计量特征的影响 [J]. *西北植物学报*, 2022, 42(10): 1739-1748.
- [43] 邓 倩, 练华山, 王 芳, 等. 红蓝光光强对温室苦瓜幼苗生长的影响 [J]. *中国农业气象*, 2025, 46(9): 1277-1286.
- [44] 李 霞, 阎秀峰. 滤光膜对黄檗 (*Phellodendron amurense*) 幼苗三种生物碱含量的影响 [J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1292-1299.
- [45] 王慧梅, 陈亚杰, 于海娣, 等. 滤光膜对黄檗离体再生能力及其生理生化指标影响 [J]. *植物研究*, 2012, 32(1): 28-31, 53.
- [46] 张玉红, 陈路瑶, 刘 彤, 等. 增补UV-B辐射对药用植物黄檗幼苗生长及光合生理影响 [J]. *中国农学通报*, 2018, 34(4): 76-82.
- [47] 谢 川, 余俊里, 孙志鹏. 川黄檗 (*Phellodendron chinense*) 适宜区及随气候变化的分布格局模拟 [J]. *东北林业大学学报*, 2023, 51(10): 54-61.
- [48] 及 利, 李绍臣, 王 君, 等. 不同土壤基质下水分胁迫对黄

- 槲幼苗形态和物质分配的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(8): 26-32.
- [49] REHAMAN A, KHAN S, RAWAT B, et al. Mechanistic insights into plant drought tolerance: a multi-level perspective[J]. Journal of Crop Health, 2025, 77: 53.
- [50] ZHANG X J, SUN W K, CHEN X Y, et al. Integrated physiological and transcriptomic analysis reveals mechanism of leaf in *Phellodendron chinense* Schneid. seedlings response to drought stress[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 198: 116679.
- [51] 宋艳艳, 陈文强, 梁仕俊, 等. 外源 GA<sub>3</sub>对水分胁迫下川黄柏抗性的影响[J]. 经济林研究, 2023, 41(1): 207-216.
- [52] 邓增卓玛, 马文明, 周青平, 等. 基于文献计量分析的国内外根际土壤微生物研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2022(6): 236-246.
- [53] 蔡柏岩, 葛菁萍, 接伟光, 等. 黄檗根围丛枝菌根真菌菌群组成[J]. 菌物学报, 2009, 28(4): 512-520.
- [54] 周加海, 范继红. AM真菌对川黄柏幼苗生长及小檗碱含量的影响[J]. 北方园艺, 2007(12): 25-27.
- [55] 周志强, 胡燕妮, 彭英丽, 等. 3种丛枝菌根真菌对不同种源黄檗幼苗的影响[J]. 植物研究, 2015, 35(1): 92-100.
- [56] 方杰, 范继红. 丛枝菌根对黄檗氮素及含氮物质含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(23): 11672-11674.
- [57] 范继红, 邹原东, 高琼. 丛枝菌根对黄檗生长及NPK吸收的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40(5): 815-818.
- [58] 王雪, 接伟光, 蔡柏岩. 不同生境黄檗AM真菌菌群结构分析[J]. 林业科学, 2012, 48(9): 99-107.
- [59] 赵匠, 徐佳晶, 李霞. 丛枝菌根真菌对黄檗耐盐能力的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(11): 74-77.
- [60] DRURY J P, GREYER G F, GARLAND T, Jr., et al. An assessment of phylogenetic tools for analyzing the interplay between interspecific interactions and phenotypic evolution[J]. Systematic Biology, 2018, 67(3): 413-427.
- [61] YI X M, ZHANG Y, WANG X W, et al. Effects of nitrogen on the growth and competition between seedlings of two temperate forest tree species[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2015, 30(4): 276-282.
- [62] 王泳腾, 黄治昊, 王俊, 等. 濒危植物黄檗的生存压力研究[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(1): 49-57.
- [63] 周建容, 马毅, 袁翠红. 阿坝州土门片区牛尾竹、川黄柏林药间作技术与效益探析[J]. 南方农业, 2022, 16(22): 64-66.
- [64] 马小迪, 王婧欢, 聂宏, 等. 药食同源植物中的生物碱抗肿瘤的研究进展[J]. 湖南中医药大学学报, 2025, 45(3): 569-576.
- [65] CIORÎȚĂ A, ERHAN S E, SORAN M L, et al. Pharmacological potential of three berberine-containing plant extracts obtained from *Berberis vulgaris* L., *Mahonia aquifolium* (Pursh) Nutt., and *Phellodendron amurense* Rupr. [J]. Biomedicines, 2024, 12: 1339.
- [66] 李定芬, 陈新华, 戴剑锋, 等. 不同方法对黄柏中盐酸小檗碱的提取比较[J]. 微量元素与健康研究, 2010, 27(1): 52-54.
- [67] QADERI M M, MARTEL A B, STRUGNELL C A. Environmental factors regulate plant secondary metabolites [J]. Plants, 2023, 12: 447.
- [68] ZHANG Y H, XU L J, QIU J J, et al. Provenance variations in berberine content of *Phellodendron amurense*, a rare and endangered medicinal plant grown in Northeast China [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2014, 29(8): 725-733.
- [69] 周嘉惠, 祝天添, 胡婧婕, 等. 基于“环境-成分-药性”关系解析西南区中药材分布特点[J]. 中医药导报, 2019, 25(4): 47-51.
- [70] 朱志明, 赖潇潇, 苏慕霞. 不同产地黄柏及关黄柏有效成分的含量测定[J]. 临床医学工程, 2011, 18(1): 106-108.
- [71] 赵匠, 李霞, 于慧晶, 等. 气候因子对黄檗主要生物碱质量分数的影响[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(6): 14-18.
- [72] GONG Q Y, AOKI D, MATSUSHITA Y, et al. Microscopic distribution of alkaloids in freeze-fixed stems of *Phellodendron amurense*[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1203768.
- [73] 徐丽娇, 邱婧琪, 孙铭隆, 等. 季节和地理差异对天然黄檗小檗碱和药根碱含量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6355-6365.
- [74] 陈瑶. 关黄柏药材化学特性与环境因子的相关性研究[D]. 北京: 中国医学科学院北京协和医学院, 2017: 93.
- [75] 徐硕, 段学伟, 张昭, 等. 北京药用植物园引种黄皮树的质量评价[J]. 中国农学通报, 2020, 36(10): 79-86.
- [76] 陈瑶, 张志鹏, 张昭, 等. 土壤因子对关黄柏10种化学成分含量的影响[J]. 植物科学学报, 2019, 37(6): 797-807.
- [77] 雷雨, 令狐克念, 王浩东, 等. 黄连主要活性成分含量及影响因素研究进展[J]. 贵州农业科学, 2024, 52(10): 107-115.
- [78] 田秋, 焦晶, 张学静, 等. 氮促进川黄檗幼苗生长和小檗碱积累的生理生化机理[J/OL]. 分子植物育种. (2023-04-12)[2025-10-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230412.1115.004.html>.
- [79] 丁丽洁, 李霞, 刘强. 氮素浓度对黄檗幼苗主要次生代谢产物的影响[J]. 人参研究, 2013, 25(4): 39-41.
- [80] 张迪迪, 张亚玉. 氮形态对药用植物生长及品质影响的研究进展[J]. 中药材, 2016, 39(3): 696-698.
- [81] 张丽萍, 陈震, 马小军, 等. 氮源对黄连植株生长、根茎小檗碱含量的影响[J]. 中草药, 1995, 26(7): 387-388.
- [82] 张森哲, 闫海霞, 杨永志. 尿素对川黄檗幼苗生长和小檗碱含量的影响[J/OL]. 分子植物育种. (2022-11-10)[2025-10-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20221109.0909.004.html>.
- [83] WANG W N, WANG Y, HOCH G, et al. Linkage of root morphology to anatomy with increasing nitrogen availability in six temperate tree species[J]. Plant and Soil, 2018, 425: 189-200.
- [84] 李威. 叶面肥对黄檗幼苗生长及主要生物碱含量的影响[J]. 林业勘查设计, 2019(1): 84-85.
- [85] LIU T H, ZHANG X M, TIAN S Z, et al. Bioinformatics analysis of endophytic bacteria related to berberine in the Chinese medicinal plant *Coptis teeta* Wall.[J]. 3 Biotech, 2020, 10: 96.

- [86] 李庆锋. 重庆林下黄连高效栽培技术[J]. 西北园艺, 2025 (9): 50-52.
- [87] SOLTANI S, AROUIEE H, SALEHI R, et al. Morphological, phytochemical, and photosynthetic performance of grafted tomato seedlings in response to different LED light qualities under protected cultivation[J]. Horticulturae, 2023, 9: 471.
- [88] 张玉红, 程楷珊, 高欣, 等. 黄檗幼苗抗氧化物质及生物碱含量对 UV-B 辐射增强响应[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(1): 27-36.
- [89] 温泉, 张楠, 曹瑞霞, 等. 增强 UV-B 对黄连代谢及小檗碱含量的影响[J]. 中国中药杂志, 2011, 36(22): 3063-3069.
- [90] XU Y Y, YANG M, CHENG F, et al. Effects of LED photoperiods and light qualities on in vitro growth and chlorophyll fluorescence of *Cunninghamia lanceolata* [J]. BMC Plant Biology, 2020, 20: 269.
- [91] 任跃英, 牛晨, 王京京, 等. 不同光质对人参愈伤组织生长及皂苷含量的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(4): 1318-1322.
- [92] JIA Y, LIU J, XU M Y, et al. Light and potassium improve the quality of *Dendrobium officinale* through optimizing transcriptomic and metabolomic alteration[J]. Molecules, 2022, 27: 4866.
- [93] 张丽丽, 田丹青, 万晓, 等. 不同土壤含水量对重瓣松果菊生长、生理特性和菊苣酸含量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2025, 51(1): 164-176.
- [94] 李霞, 王洋, 阎秀峰. 水分胁迫对黄檗幼苗三种生物碱含量的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 58-64.
- [95] 覃炳醒, 姚丽萍, 周志强, 等. 干旱胁迫对黄檗幼苗生理及叶片中小檗碱含量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(3): 26-30.
- [96] ZHANG W R, GAO R R, TIAN L X, et al. Integrated microbiome and metabolomics analysis reveal the relationship between plant-specialized metabolites and microbial community in *Phellodendron amurense*[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1363063.
- [97] 王少杰, 严铭海, 黄清麟, 等. 环剥研究综述[J]. 世界林业研究, 2023, 36(6): 38-44.

(责任编辑: 吴芯夷)

## 公益宣传：国际森林日

国际森林日(International Day of Forests)源于 20 世纪中叶国际社会对全球森林资源退化的普遍关注。1971 年,在欧洲农业联盟于西班牙特内里弗岛召开的大会上,西班牙提出设立“World Forest Day”的倡议并获得一致通过;同年 11 月,联合国粮食及农业组织(FAO)正式确认该纪念日。1972 年 3 月 21 日,首个“World Forest Day”纪念活动得以举办。

2012 年 12 月 21 日,联合国大会通过第 A/RES/67/200 号决议,正式宣布将“World Forest Day”更名为“International Day of Forests”,仍于每年 3 月 21 日在全球范围内举办系统性纪念活动。该决议旨在提高各国政府及民间组织对所有类型森林的管理和养护意识,实现森林的可持续发展。

当前,全球森林面积仍以年均数百万公顷的速度减少,这一趋势直接影响碳循环、生物多样性维持及区域气候调节功能。保护森林需社会公众的共同参与,具体行动包括:优先选择具有森林可持续经营认证[如森林管理委员会(FSC)认证]的木制品,减少纸张浪费并倡导双面打印,拒绝消费非法来源的野生林产品,以及关注和支持森林保护公益项目。

2026 年国际森林日的主题为“森林与经济”,旨在彰显森林在推动经济繁荣方面的重要作用。森林不仅是重要的生态屏障,更是蕴藏着巨大经济价值的“绿色宝库”。守护森林,就是守护经济发展的根基。