



极小种群野生植物坡垒的研究现状和展望

李艳朋, 许涵, 陈洁, 雷婕, 罗文

引用本文:

李艳朋,许涵,陈洁,雷婕,罗文. 极小种群野生植物坡垒的研究现状和展望[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(5): 685–694.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4801>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广州市珍稀濒危植物资源状况及保护策略

Conservation on the Rare and Endangered Plants in Guangzhou

热带亚热带植物学报. 2020, 28(3): 227–235 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4145>

广州市植物多样性现状调查与分析

Investigation and Analysis of Plant Diversity in Guangzhou

热带亚热带植物学报. 2021, 29(3): 229–243 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4241>

云南木兰科48种野生植物资源的遗传多样性研究

Studies on Genetic Diversity of 48 Wild Species of Magnoliaceae in Yunnan

热带亚热带植物学报. 2020, 28(3): 277–284 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4161>

极小种群野生植物海南风吹楠的遗传多样性研究

Genetic Diversity of *Horsfieldia hainanensis*: An Endangered Species with Extremely Small Populations

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 547–555 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4364>

植物营养体胎生研究进展

Research Progress of Vegetative Vivipary in Plants

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 209–216 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4124>

向下翻页，浏览PDF全文

极小种群野生植物坡垒的研究现状和展望

李艳朋¹, 许涵^{1*}, 陈洁¹, 雷婕¹, 罗文^{2*}

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 海南尖峰岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 广州 510520; 2. 海南热带雨林国家公园管理局尖峰岭分局, 海南 乐东 572542)

摘要: 极小种群野生植物因其分布范围狭窄且个体数量稀少, 加之解濒技术不完善等随时面临灭绝风险, 亟需进行拯救性保护。由于各极小种群野生植物自身生物学特性和致濒机理存在差异, 针对特定物种开展基础性研究有助于为其保护和种群复壮提供科学依据。坡垒(*Hopea hainanensis*)曾是海南热带雨林的關鍵树种和表征种, 但在人类活动和更新困难等因素的影响下, 该极小种群野生植物的种群数量急剧减少。尽管已开展了较多研究工作, 但资源现状不明、机理性研究缺乏、未来研究重点不清和科研未能有效指导保育实践等问题仍十分突出, 长期性、深入性和系统性研究亟待加强。该文在全面检索相关文献的基础上, 从生物学特性、自然分布区域、野生种群数量、适应性、就地和迁地保护、人工繁育技术和潜在濒危机制等方面系统回顾了坡垒的研究进展, 讨论了极小种群野生植物保育工作中存在的问题和未来的研究重点, 并基于目前的研究现状提出具体建议, 以期为坡垒的保护和拯救提供参考。

关键词: 极小种群野生植物; 坡垒; 种群现状; 濒危机制; 保护管理

doi: 10.11926/jtsb.4801

Research Status and Perspectives of *Hopea hainanensis*, a Wild Plant with Extremely Small Populations

LI Yanpeng¹, XU Han^{1*}, CHEN Jie¹, LEI Jie¹, LUO Wen^{2*}

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Jianfengling National Key Field Research Station for Tropical Forest Ecosystem, Hainan Island, Guangzhou 510520, China; 2. Jianfengling Department of Hainan Tropical Rainforest National Park Administration, Ledong 572542, Hainan, China)

Abstract: Because of the narrow distribution range, few individuals, and imperfect endangered relief technology, the wild plants with extremely small populations (WPESP) are facing the risk of extinction at any time, and need to be saved. Due to the differences in biological characteristics and endangered mechanisms of wild plants with very small populations, basic research on specific species is helpful to provide scientific basis for their conservation and population rejuvenation. *Hopea hainanensis* used to be the key tree species and characteristic species in the tropical rain forest of Hainan, but under the influence of human activities and regeneration difficulties, the population of *H. hainanensis* has decreased sharply. Although more research work has been carried out, problems such as unclear resource status, lack of mechanism research, unclear future research priorities, and failure of scientific research to effectively guide conservation practice are still prominent, and long-term, in-depth and systematic research needs to be strengthened. Based on a comprehensive search of relevant literature, the research progress of *H. hainanensis* was reviewed from the aspects of biological

收稿日期: 2023-04-24 接受日期: 2023-08-30

基金项目: 国家科技基础资源调查项目(2019FY101607); 2019年中央财政林业改革发展基金(YCJSHN2020-011(A)); 海南省自然科学基金项目(421RC1108)资助

This work was supported by the Project of National Science and Technology Basic Resources Survey (Grant No. 2019FY101607), the Project of Central Finance Forestry Reform and Development in 2019 (Grant No. YCJSHN2020-011(A)), and the Project for Natural Science in Hainan (Grant No. 421RC1108).

作者简介: 李艳朋(1990年生), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为森林生态学。E-mail: lyp20130718@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ywfj@163.com; 1103031220@qq.com

characteristics, natural distribution area, wild population size, adaptability, *in situ* and *ex situ* conservation, artificial breeding techniques and potential endangered mechanisms, and discussed the existing problems and future research priorities in the conservation of wild plants with very small populations. Based on the current research status, specific suggestions are put forward to provide reference for the protection and rescue of slope barrier.

Key words: Wild plant with extremely small populations; *Hopea hainanensis*; Population status; Endangered mechanism; Protection and management

极小种群野生植物是指野外呈现为狭域或间断分布,并且在长期受到自身原因限制或外界因素干扰的影响下,种群持续退化或数量减少,致使种群规模已低于最小可存活种群而随时面临灭绝风险的植物种类^[1-2]。随着“极小种群野生植物”概念的有效传播和接受程度的不断提高,各省区以及国家层面上都针对各自管理区域内面临高度灭绝风险的野生植物制定并实施了相应的拯救保护计划^[3-4]。在省级层面上,云南省于 2005 年率先提出并倡议保护极小种群野生植物^[4],至今已在全省范围内实施了 100 多种极小种群野生植物拯救保护项目,突破了 36 种植物的人工繁育技术,并成功实现了 61 种植物的迁地保护和 16 种植物的回归定植工作。在国家层面上,我国于 2011 年启动了极小种群拯救工程,并将 120 种植物列入极小种群野生植物名录,其中涉及 36 种国家一级重点保护植物,26 种国家二级重点保护植物和 58 种省级重点保护植物^[4-5]。此外,“十三五”国家重点研发计划项目“典型极小种群野生植物保护与恢复技术研究”历时 5 年,形成了从基础理论、共性技术到试验示范全链条式的极小种群野生植物保护工程科技支撑体系^[6],改变了全国近 12%极小种群野生植物随时濒临灭绝的宿命,为我国极小种群野生植物的保护和健康发展起到了示范和带动作用。

海南共有 24 种被列入极小种群野生植物名录^[7],是我国拥有极小种群野生植物数量较高的地区之一^[8-9]。作为海南热带雨林关键树种和表征种的坡垒(*Hopea hainanensis*),为龙脑香科(Dipterocarpaceae)坡垒属常绿乔木^[10-11]。因其木材具有密度高、耐水浸和少病害等特点,被列为海南五大特类珍贵用材树种之一^[12]。然而在过度开采和盗伐等因素的影响下,坡垒在海南的森林中已由优势种锐减为偶见种^[13]。除被列入极小种群野生植物名录外,坡垒还被《中国植物红皮书》定为濒危物种^[14],被《世界自然保护联盟受威胁物种红色名录》(The IUCN

Red List of Threatened Species™)(以下简称《IUCN 红色名录》)评为濒危(EN)等级,也被海南热带雨林国家公园确定为优先保护物种。根据国家林业和草原局以及农业农村部 2021 年发布的《国家重点保护野生植物名录》,坡垒也属于国家一级重点保护野生植物,亟需采取措施予以优先保护和拯救。

极小种群野生植物的保护拯救工作不仅具有科学性强和技术性高等特点,同时也是一项周期性长的系统研究和保护工程^[4]。以坡垒为例,尽管已从种子贮藏^[15-16]、遗传多样性^[17-18]、种群结构^[19-20]、空间分布格局^[21-22]、嫁接和扦插育苗技术^[23-24]以及致濒机理^[25-26]和迁地保护^[27-28]等方面开展了研究工作,但资源现状不明、机理性研究缺乏、未来研究重点不清以及科研未能有效指导实践等问题仍十分突出,长期性、深入性和系统性研究亟待加强^[29-30]。本文在全面检索相关文献的基础上,从生物学特性、自然分布区域、野生种群数量、适应性、就地和迁地保护、人工繁育技术和潜在濒危机制等方面系统回顾了坡垒的研究进展,进而讨论了坡垒保育工作中存在的问题和未来的研究重点,以为极小种群野生植物坡垒的保护和拯救提供参考。

1 坡垒的生物学特性

1.1 坡垒的遗传多样性

遗传多样性是解释物种濒危机制和评价物种存活潜力的重要依据,其数值大小可以有效表征物种对环境变化的适应能力^[30]。较低的遗传多样性水平通常意味着物种的环境适应能力较差,进而增加灭绝风险^[31]。有研究表明,特有物种、濒危物种和狭域分布物种通常具有较低的遗传多样性^[32-33]。对海南 10 个自然保护区坡垒种群遗传多样性的研究表明,其期望杂合度为 0.409^[17],与同属濒危物种狭叶坡垒(*H. chinensis*)和香坡垒(*H. odorata*)均无显著

差异^[34]。但与分布于马来西亚等地的非濒危物种 *H. dryobalanoides* 相比, 坡垒的期望杂合度和等位基因数均表现为较低水平^[17,35]。

据报道, 坡垒的种群数量在过去 300 年已减少约 70%, 由此推断种群瓶颈可能是其遗传多样性丧失的主要原因之一^[17,36]。急剧下降的坡垒种群数量不仅会增强遗传漂变效应, 也会加剧近亲繁殖的概率^[37]。当前海南不同坡垒种群的近交系数为 0.138~0.408, 高于许多龙脑香科植物的近交系数^[17]。陈玉凯等^[18]分析了具有高度保守性的叶绿体基因组序列^[38], 认为坡垒叶绿体中缺失 *ycf1* 基因, 该现象可能与坡垒的空间分布特征和系统发育等存在密切关联。

1.2 坡垒的繁殖生物学特征

坡垒的花为两性花^[39], 属于雌雄同株植物。果期在 11 月—12 月^[40], 果实为坚果, 并于翌年的 3 月—5 月成熟^[26]。其萼片中会有 2 片扩大成长度约 7 cm 的种翅, 该结构不仅具有一定的物理性保护和光合作用能力^[41-42], 同时也有助于坡垒种子的远距离传播^[39,42]。龙脑香科果实的传播距离不仅取决于果实质量、母树高度和风速^[25], 林冠开阔度也是传播距离的重要影响因素之一。有研究表明, 坡垒母树 60 m 范围内的果实数量可达总数的 60%~70%^[26]。由此可见, 即便具有种翅结构, 但由于果实稍重, 其自然传播距离仍较为有限。

大部分龙脑香科植物都具有顽拗性种子, 坡垒亦不例外^[43-44]。由于顽拗性种子不耐失水, 并且贮藏过程忌干燥和低温^[45]。总体而言, 种子含水量、贮藏温度和贮藏容器中的空气含氧量是影响坡垒种子活力的关键因子^[15-16,46]。由于坡垒种子产量存在大小年现象^[26,44], 因此最适的贮藏条件也稍有差别。对于结实大年较为饱满的种子, 安全贮藏含水量为 36%~38%; 对于结实小年颗粒较小的种子, 安全贮藏含水量为 33%~35%^[46]。坡垒种子的适宜贮藏温度为 15 °C~20 °C, 贮藏容器中的空气含氧量以 10%~15%为宜^[16,46]。

2 坡垒的自然分布区域

本底资源不清严重制约我国极小种群野生植物的保护工作^[47-48]。对极小种群野生植物开展核查和补充调查, 有助于全面掌握其地理分布特征和种群现状, 进而为科学制定保护拯救措施提供依据^[4]。

坡垒的自然分布仅限于越南北部和中国海南^[36]。按照行政区划统计我国海南省的坡垒分布地点如下: (1) 2 个地级市, 即三亚市和儋州市^[39,49]; (2) 3 个县级市, 即五指山市、东方市和万宁市^[39,50,51]; (3) 1 个县, 即屯昌县^[39]; (4) 6 个自治县, 即白沙黎族自治县、昌江黎族自治县、乐东黎族自治县、陵水黎族自治县、保亭黎族苗族自治县和琼中黎族苗族自治县^[39,51]。如果按照种群统计, 则主要见于 34 个分布地点^[36,40]。如果按照林区进行统计, 野生坡垒则主要分布于霸王岭和尖峰岭林区^[52]。

3 坡垒的野生种群数量

对于坡垒的野生种群数量, 目前尚缺乏较为准确的调查和统计数据。1997—2001 年第一次全国重点保护野生植物资源调查结果显示, 坡垒分布面积为 8 820 hm², 共 89 300 株, 蓄积量约 29 800 m³^[53]。而基于杨小波等^[40]的坡垒分布图, Ly 等^[36]认为坡垒在海南的分布面积约为 6.0×10⁵ hm²。薛荟等^[52]认为海南省有野生坡垒 9 761 株, 但未明确龄级或径级等信息。邓莎等^[51]认为包括幼苗在内, 海南省共有约 2.0×10⁵ 株坡垒, 但未明确野生植株和人工育苗的比例。然而即使将人工育苗考虑其中, 薛荟等^[52]认为截至 2019 年, 坡垒在海南省的分布数量也仅有 43 281 株。由于上述工作在调查强度、数据来源和统计方法等方面存在差别, 致使研究结果差异巨大。

为了使坡垒野生种群现存数量具有更高的科学性和合理性, 本研究通过全面检索公开发表的文献和对坡垒重要分布区海南尖峰岭的补充调查, 重新对该数据进行了整合。数据处理过程中, 由于相同研究区域内坡垒种群数量在不同报道中存在差异, 本次汇总选取最大数值进行统计。包括幼苗在内, 海南野生坡垒至少有 4 990 株^[7,17,54-55], 其中包括 234 株成年母树, 这与杨小波等^[40]认为野生坡垒现存成年母树数量仅百余株的论断契合。鉴于以往研究大多关注于海南霸王岭的野生坡垒种群, 在海南省科学技术厅“海南尖峰岭原生坡垒种群分布及伴生群落特征和保护对策研究”项目的支持下, 科研人员于 2022 年 5 月—6 月对尖峰岭地区包括幼苗在内的野生坡垒种群进行了较为全面的调查。结果表明, 尖峰岭地区共记录有 1 797 株个体, 其中成年母树数量为 50 株, 约占该区植株总数的 2.78%,

这一比例与霸王岭 3.07% 的统计结果较为接近^[7]。

作为全球动物、植物和真菌物种保护现状最全面的名录,《IUCN 红色名录》主要基于种群大小、分布范围、个体数量、衰退速率和生存力分析等方面信息对受威胁等级进行量化^[56]。只要特定物种符合上述标准中的任何 1 条,便可将其列入相应的受威胁等级^[57-58]。需要指出的是,尽管坡垒的自然分布仅限于越南北部和中国海南,但当前《IUCN 红色名录》中坡垒的濒危(EN)等级则主要基于越南的数据计算而来^[36]。鉴于我国境内坡垒的资源现状数据日趋完善,有必要对该信息予以充分考虑,进而全面评估该物种的受威胁等级。

4 坡垒的适应性

由于对外界生物和非生物因素的抵抗力较低,幼苗期被认为是植物生长最为脆弱且个体数量变化最为剧烈的生活史阶段^[59-60]。尽管坡垒母树周围存在一定的幼苗个体,但幼苗向幼树转变过程中却存在严重的增补限制^[10,22],然而对于何种因素主导了这一过程目前仍缺乏直接证据。基于“光照可能是影响坡垒幼苗生存的关键因子”这一假设,张丽^[7]对盆栽坡垒在 4 种透光率下的生长进行了为期 6 个月的观测,结果表明较高的光照强度不仅显著促进了坡垒幼苗高度、地径和生物量的增长,其中 100% 光照强度下幼苗的死亡率为 0,而 6.44% 光照强度下的死亡率高达 22%。这表明光照强度在坡垒幼苗生长发育过程中的重要作用,但许多生长于光照条件较好的林缘处的幼苗仍难以成功转化为幼树,这意味着有必要逐步将更多的关键因子纳入分析。

随着植株的生长发育,坡垒的环境适应能力明显增强。2012 年,中国林业科学研究院热带林业研究所在海南尖峰岭热带山地雨林原始林典型分布区中建成了 1 个面积为 60 hm² 的原始林动态监测样地,并对样地内所有胸径(DBH)≥1.0 cm 植株的种名、树高和生存状态等信息进行了记录^[61]。首次调查结果表明,样地内共有坡垒 38 株,平均 DBH 为(12.64±11.02) cm。2018 年样地复查结果表明,2 次调查期间坡垒的死亡率为 0,平均 DBH 为(12.85±11.85) cm,并且植株数量保持不变。此外,该样地中仅有 3% 的坡垒幼苗能够成功转化为幼树^[12]。由此可知:(1) 坡垒的生长速率较为缓慢,2 次调查期间平均 DBH 并未发生显著变化;(2) 即便在光照强

度相对较弱的原始林,DBH≥1.0 cm 的坡垒个体仍具有较高的成活率;(3) 坡垒从幼苗到幼树的转变过程存在严重的增补限制。此外,就成年母树的自然分布特征而言,坡垒可跨越 200~1 000 m 的海拔梯度生存^[13,62]。除自然分布区以外,迁地保护的坡垒在云南、广东和广西等地也都有良好的生长表现^[27-28,63]。综上,除幼苗阶段外,坡垒在其他生长发育阶段具有较强的环境适应能力。

5 坡垒的就地和迁地保护

就地保护和迁地保护是植物多样性保护的 2 种方式^[64]。随着 1992 年 6 月《生物多样性公约》的签署,全球已有 150 多个国家建立了以就地保护为主、迁地保护为辅的生物多样性保护模式^[65-66]。自 1956 年我国第一个自然保护区鼎湖山自然保护区建立以来,目前已形成了包括国家公园、自然保护区、风景名胜区、森林公园、湿地公园、地质公园和沙漠公园等 10 余类 12 000 多处,总面积覆盖陆域国土面积 18% 以及管辖海域面积 4.1% 的自然保护地体系^[67-68],使全国 90% 的植被类型和 75% 的极小种群野生植物得以就地保护^[69]。

5.1 就地保护

自 1956 年 10 月尖峰岭保护区(2002 年晋升为国家级自然保护区)成立以来,海南省陆续建立了包括鹦哥岭国家级自然保护区、霸王岭国家级自然保护区、吊罗山国家级自然保护区和海南五指山国家级自然保护区等森林生态系统类型的国家级自然保护区^[70],极大地促进了各保护区内坡垒的就地保护。2021 年 10 月,随着包含黎母山、霸王岭、鹦哥岭、五指山、吊罗山、尖峰岭和毛瑞 7 个分局在内的海南热带雨林国家公园的设立^[71],曾经分布于各保护区之外和保护区路边野生坡垒^[40]的保护工作得以加强。为了更好地推动海南热带雨林国家公园的生物多样性保护工作,在 2022 热带雨林保护国际研讨会第二场主题论坛上,《海南热带雨林国家公园优先保护物种名录》正式向社会公开发布,除脊椎动物(90 种)和大型真菌(63 种)外,还包含了以国家重点保护植物和海南特有植物等为代表的 103 种植物,坡垒位列其中。此外,2022 年《国家林业和草原局关于规范国家重点保护野生植物采集管理的通知》(林护规[2022]2 号)也对国家一级保护野生植物和国家二级保护野生植物的采集管理提出

了明确要求。今后对诸如坡垒等国家重点保护野生植物的采集(含采伐、采挖、移植), 必须根据相关要求提出申请和审批, 最终凭核发的《国家重点保护野生植物采集证》开展工作。

5.2 迁地保护

迁地保护是指在物种自然栖息地之外对其细胞、组织、营养繁殖体、花粉、种子或整个植株的活体样本进行保存的一种方式^[72-73], 其主要保存机构为种质资源库和植物园^[62,74]。在种质资源库保存方面, 目前仅中国西南野生生物种质资源库(Germplasm Bank of Wild Species of Southwest China)保存有 2014 年 4 月采集于海南省昌江黎族自治县的 2 份 DNA 材料。相比同科同属狭叶坡垒的 1 份种子和 324 份 DNA 材料, 坡垒的种质资源库保存亟待加强。在植物园保存方面, 海南枫木林场、海南尖峰岭热带树木园、云南省林业科学院热带林业研究所、西双版纳勐仑热带植物园、中国科学院华南植物园、广东树木公园、广西大青山树木园和广西南宁树木园等^[10,27-28,61,68]都对坡垒进行了引种栽培。以海南枫木林场为例, 该林场于 1961—1965 年引种坡垒 68 株, 经过 50 多年的培育, 种群规模已达 1 258 株^[10]。

尽管坡垒的引种栽培已初具规模, 但其迁地保护工作仍任重道远。总体而言, 坡垒的迁地保护主要存在如下问题: (1) 引种栽培规划对遗传多样性重视不足。例如西双版纳勐仑热带植物园于 1964 年仅从华南植物园引种 3 株坡垒, 最终存活 2 株^[61]。尽管在后续 30 年的时间里成功繁衍 3 代共 284 株, 但遗传多样性难以得到有效恢复。(2) 引种栽培过程缺乏有效保护管理规范。对于迁地保护的坡垒个体, 有必要从物候、生理、表型、抗逆性、病虫害和资源可持续开发利用等角度制定监测并逐渐完善研究计划^[75-76]。(3) 尽管迁地保护已具有一定的时间跨度和地理跨度, 但仍缺乏对保护成效的全面评价。

6 人工繁育技术

6.1 种子育苗

坡垒的人工繁育技术主要涉及有性繁殖和无性繁殖 2 个方面, 具体包括种子育苗、扦插和嫁接, 但目前尚未开展组织培养技术研究^[51]。坡垒的种子育苗技术已较为成熟, 现将种子育苗技术简要归纳如下: (1) 由于坡垒种子具有顽拗性而不耐失水, 在其果实成熟阶段应留意观察, 做到随采随播^[27,45];

(2) 将种子去翅后可播种于用干净河沙制作的苗床, 播种密度宜控制在 $600\sim 700$ grain/m², 并注意保持苗床湿润^[23,77]; (3) 适宜温度下通常 5 d 左右发芽, 11 d 左右出苗结束^[23,26]; (4) 刚出土的幼苗应避免强光直射, 可适当遮阴^[23]; (5) 及时将幼苗移入营养杯, 使用常规方法管理的 1 a 生幼苗高度可达 50 cm 左右, 此时便可出圃进行造林^[23]。2015—2019 年间, 海南全省共繁育坡垒 36 800 株, 其中五指山市的育苗数量约占育苗总数的 49%^[52]。目前在海南尖峰岭天池周围也可见 100 余株人工栽植的坡垒, 平均 DBH 约 2.0 cm。

6.2 扦插和嫁接

坡垒的扦插育苗技术目前仅见 1 篇报道^[24], 该文证实了坡垒的扦插育苗具备一定的可行性, 但缺乏对苗木后期生长发育过程的持续观测。在适宜的温室条件下, 黄桂华等^[23]以 1~2 a 生的地径为 0.5~1.5 cm 的坡垒种子苗为砧木, 以天然林中的优质母树向阳的直立枝为接穗, 嫁接 30 d 左右可见接穗上有新芽萌发。其中坡垒在原产地海南的最佳嫁接时间为 3 月—4 月, 尽管其他时段也可以进行嫁接, 但接口愈合以及接穗萌芽的时间均较晚, 并且成活率也会有所下降^[23]。

7 坡垒的潜在濒危机制

极小种群物种的濒危机制可以简单归纳为内部因素和外部因素 2 个方面。内部因素通常表现为较低的遗传多样性和繁殖能力、较弱的竞争能力以及近交衰退等^[32]。外部因素主要包括人类的过度利用、生境破坏、气候变化和病虫害等^[30,78]。姚志等^[32]归纳了中国 28 种极小种群物种的濒危原因, 其中繁殖力低是最为主要的内部因素, 物种占比为 75.0%; 生境破坏是最为主要的外部因素, 物种占比高达 89.3%。尽管极小种群物种的致濒原因存在一定的共性问题, 但鉴于不同物种自身生物学特性存在差异, 仍需要针对特定物种开展研究, 进而为就地保护和种群复壮提供科学依据^[4,22]。

目前的研究认为, 种子寿命较短、苗期生长缓慢和竞争能力偏弱等是坡垒濒危的内部因素^[22-23,60], 人为干扰和病虫害等是坡垒濒危的外部因素^[25,52]。在过去 300 年的时间里, 农业用地扩大和乱砍滥伐等人类干扰致使海南坡垒野生种群数量下降了 50%~70%^[36]。特别是自 20 世纪 50 年代以来, 随着橡胶

树(*Hevea brasiliensis*)等热带作物的种植和城市的扩张,海南约 80%~95%的原始森林遭到破坏^[79-80]。因此,人为干扰已经成为导致坡垒濒危最为主要的外部因素^[25]。

8 极小种群野生植物保育工作的研究重点和保护建议

随着研究手段的飞速发展和研究水平的不断深入,极小种群野生植物的保育工作仍需从如下 4 个方面予以加强^[30]: (1) 在保育理念方面,应高度重视长期系统性研究的重要性。要深刻认识到极小种群野生植物的保育工作是一项科学性强、技术性和专业性高、周期性长的系统工程,“抢救性保护”与“系统性研究”并重原则应贯穿于保育实践全过程^[4]。(2) 在研究形式方面,应尽量避免过多的重复研究,可通过多学科如种群生态学、保护生物学、生物遗传学和生殖生物学等的相互交叉和渗透融合,以促进基础理论转化为应用实践^[2-6]。(3) 在研究内容方面,要注重对保育成效的评价。衡量极小种群野生植物的保育成效不仅在于植株数量的增加,还需关注遗传多样性能否存续和恢复的问题,以便最大限度地保存物种适应环境变化的能力^[81]。(4) 对于迁地保护,种群衰退问题也要予以特别关注。中国林业科学研究院热带林业研究所于上世纪 70 年代分别在海南和广州栽种了一批海南红豆(*Ormosia pinnata*),并都能够正常开花结实。然而 50 多年后,相比海南植株的生长状态,广州的海南红豆已出现明显的衰退。因此,对于个体数量稀少且分布范围狭窄的极小种群野生植物的迁地保护,应将种群是否衰退纳入未来保育成效的评估。

除上述极小种群野生植物保育工作面临的共性问题外,考虑到坡垒致濒原因的特殊性,尤其要注重从机理上突破自然生境中其幼苗向幼树转化过程中增补限制问题的瓶颈^[12]。基于现有研究基础,除前文已阐述的光照强度外,结合植物功能性状以及土壤养分有效性可能有助于该问题的解答。Xu 等^[82]报道热带森林中的常见种和稀有种在生境利用方面存在明显的分离现象,即稀有种较常见种更偏好生长于高土壤有效磷的生境。对于坡垒而言,其生长发育过程是否也直接受到与磷元素相关的生态过程的调控仍有待验证。基于海南尖峰岭热带山地雨林原始林 60 hm²样地的初步研究结果表明,坡

垒叶片的全氮和全磷含量分别为 10.58 和 0.69 g/kg,均与该样地内 290 种木本植物的平均值 14.73 和 0.59 g/kg 存在显著差异。叶片较低的氮和较高的磷使得其具有更低水平的氮磷比(15.33),在所有 290 种木本植物中排名第 6 位,远低于氮磷比平均值(25.77)。此外,通过盆栽实验对坡垒幼苗根系生长方向的研究表明,该物种的根系在水平方向的生长较弱,而主要表现为垂直方向的生长。该现象可能有助于解释坡垒幼苗阶段地上部分生长缓慢的问题,但根系垂直生长归根结底是养分驱动还是对海南台风频繁干扰的适应等仍有待证明。

总体而言,极小种群野生植物坡垒的保育工作尽管已取得一定的成绩,但长期性、深入性和系统性研究亟待加强。综合目前坡垒的研究现状,提出具体保护建议如下:(1) 积极推动数据共享,加快整合相关单位或研究团队现有的坡垒就地保护和迁地保护数据,以便全面掌握该物种的资源现状;(2) 加强对现有坡垒种群生境及其个体的保护,注重科学研究成果在保育过程中的应用;(3) 加快科技攻关,早日从机理上破解自然状态下坡垒幼苗向幼树转化过程中的瓶颈;(4) 积极开展人工繁育,促进就地人工种群的恢复。需要强调的是,极小种群野生植物的拯救保护工作已从传统的种群生态学或群体遗传学发展为一项多学科交叉的综合性研究^[32],特别是在未来大尺度、长期化、智能化和统一化的生态监测框架下,不断借助新方法和新手段,逐步突破现有研究瓶颈也将成为生物多样性保育工作的重点^[48]。

参考文献

- [1] REN H, ZHANG Q M, LU H F, et al. Wild plant species with extremely small populations require conservation and reintroduction in China [J]. *AMBIO*, 2012, 41(8): 913-917. doi: 10.1007/s13280-012-0284-3.
- [2] ZANG R G. Research progress in wild plant with extremely small populations in China [J]. *Biodiv Sci*, 2020, 28(3): 22505. [臧润国. 中国极小种群野生植物保护研究进展 [J]. 生物多样性, 2020, 28(3): 22505. doi: 10.17520/biods.2020119.]
- [3] YANG W Z, XIANG Z Y, ZHANG S S, et al. Plant species with extremely small populations (PSESP) and their significance in China's national plant conservation strategy [J]. *Biodiv Sci*, 2015, 23(3): 419-425. [杨文忠, 向振勇, 张珊珊, 等. 极小种群野生植物的概念及其对我国野生植物保护的影响 [J]. 生物多样性, 2015, 23(3): 419-425. doi: 10.17520/biods.2014183.]

- [4] SUN W B, LIN D T, ZHANG P. Conservation research of plant species with extremely small populations (PSESP): Progress and future direction [J]. *Guihaia*, 2021, 41(10): 1605–1617. [孙卫邦, 刘德团, 张品. 极小种群野生植物保护研究进展与未来工作的思考 [J]. *广西植物*, 2021, 41(10): 1605–1617. doi: 10.11931/guihaia.gxzw202105050.]
- [5] WANG S T, LI L L, XU Y Z, et al. Population structure and dynamic characteristics of extremely small populations of *Changiostyrax dolichocarpa* C. J. Qi [J]. *Plant Sci J*, 2022, 40(5): 627–636. [王世彤, 李玲丽, 徐耀粘, 等. 极小种群野生植物长果安息香种群结构与动态特征 [J]. *植物科学学报*, 2022, 40(5): 627–636. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2022.50627.]
- [6] ZANG R G, DONG M, LI J Q, et al. Conservation and restoration for typical critically endangered wild plants with extremely small population [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36(22): 7130–7135. [臧润国, 董鸣, 李俊清, 等. 典型极小种群野生植物保护与恢复技术研究 [J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7130–7135. doi: 10.5846/stxb201610082011.]
- [7] ZHANG L. The study on population characteristics and effects of different light intensity on seedling growth of *Hopea hainanensis* in Hainan Island [D]. Haikou: Hainan University, 2019. [张丽. 海南坡垒种群特征及不同光强对其幼苗生长的影响研究 [D]. 海口: 海南大学, 2019.]
- [8] ZHANG Z J, GUO Y P, HE J S, et al. Conservation status of wild plant species with extremely small populations in China [J]. *Biodiv Sci*, 2018, 26(6): 572–577. [张则瑾, 郭焱培, 贺金生, 等. 中国极小种群野生植物的保护现状评估 [J]. *生物多样性*, 2018, 26(6): 572–577. doi: 10.17520/biods.2017271.]
- [9] SHI X Y, FU D, HU Y J, et al. Mechanism of endangerment of *Ostrya rehderiana* with extremely small populations [J]. *Sci Silv Sin*, 2020, 56(7): 142–150. [施小瑜, 付迪, 胡玉洁, 等. 极小种群植物天目铁木的濒危机制 [J]. *林业科学*, 2020, 56(7): 142–150. doi: 10.11707/j.1001-7488.20200715.]
- [10] ZHANG L, YANG X B, NONG S Q, et al. Comparative study on population development characteristics of *Hopea hainanensis* base in two different protection modes [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, 39(10): 3740–3748. [张丽, 杨小波, 农寿千, 等. 两种不同保护模式下坡垒种群发育特征 [J]. *生态学报*, 2019, 39(10): 3740–3748. doi: 10.5846/stxb201811012359.]
- [11] LI Y D, CHEN B F, ZHOU G Y, et al. Research and Conservation of Tropical Forest and the Biodiversity: A Special Reference to Hainan Island, China [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002: 145–174. [李意德, 陈步峰, 周光益, 等. 中国海南岛热带森林及其生物多样性保护研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2002: 145–174.]
- [12] LUO W, XU H, LI Y P, et al. Population structure and quantitative dynamics of a wild plant with extremely small populations *Hopea hainanensis* [J]. *For Res*, 2023, 36(2): 169–177. [罗文, 许涵, 李艳朋, 等. 极小种群野生植物坡垒的种群结构与数量动态研究 [J]. *林业科学研究*, 2023, 36(2): 169–177. doi: 10.12403/j.1001-1498.20220510.]
- [13] WU E H, NONG S Q, YANG X B, et al. *Hopea hainanensis*, a representative tree species in Hainan Tropical Rainforest [J]. *For Hum*, 2021(10): 42–45. [吴二焕, 农寿千, 杨小波, 等. 海南坡垒 海南热带雨林代表树种 [J]. *森林与人类*, 2021(10): 42–45.]
- [14] FU L G. China Plant Red Data Book (Vol.1) [M]. Beijing: Science Press, 1991: 1–736. [傅立国. 《中国植物红皮书》——稀有濒危植物, 第1卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1991: 1–736.]
- [15] CHEN Q D, SONG X Z, YANG J, et al. Effects of different temperature storage on seed vigor of *Hopea hainanensis* [J]. *Trop For Sci Technol*, 1982(1): 47–50. [陈青度, 宋学之, 杨军, 等. 不同温度贮藏对坡垒(*Hopea hainanensis*)种子活力的影响 [J]. *热带林业科技*, 1982(1): 47–50.]
- [16] WEN B, LAN Q Y, HE H Y. Effects of illumination, temperature and soil moisture content on seed germination of *Hopea hainanensis* [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2002, 10(3): 258–262. [文彬, 兰芹英, 何惠英. 光、温度和土壤水分对坡垒种子萌发的影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2002, 10(3): 258–262. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2002.03.012.]
- [17] WANG C, MA X, REN M X, et al. Genetic diversity and population structure in the endangered tree *Hopea hainanensis* (Dipterocarpaceae) on Hainan Island, China [J]. *PLoS One*, 2020, 15(11): e0241452. doi: 10.1371/journal.pone.0241452.
- [18] CHEN Y K, YANG Y, JIN Y H, et al. Genomic characteristics and phylogenetic analysis of chloroplast of the endangered plant *Hopea hainanensis* [J]. *Genom Appl Biol*, 2021, 40(1): 365–374. [陈玉凯, 杨勇, 金映虹, 等. 濒危植物坡垒的叶绿体基因组特征及系统发育分析 [J]. *基因组学与应用生物学*, 2021, 40(1): 365–374. doi: 10.13417/j.gab.040.000365.]
- [19] PEI X J, ZHOU X F, LIU N, et al. Relationship between distribution of *Hopea hainanensis* seedlings and its seed tree [J]. *J Agric Univ Hebei*, 2015, 38(3): 46–51. [裴学军, 周晓芳, 刘娜, 等. 野生极小种群植物坡垒幼苗分布与母树的关系 [J]. *河北农业大学学报*, 2015, 38(3): 46–51. doi: 10.13320/j.cnki.jauh.2015.0058.]
- [20] FU M Q, FANG Y S, GUI H Y, et al. Study on the population structure and companion community characteristics of *Hopea hainanensis* in Limu Mountain, Hainan Province [J]. *Trop For*, 2019, 47(3): 9–13. [符明期, 方燕山, 桂慧颖, 等. 海南黎母山坡垒种群结构及伴生群落特征研究 [J]. *热带林业*, 2019, 47(3): 9–13. doi: 10.3969/j.issn.1672-0938.2019.03.002.]
- [21] CHEN Y, FANG Y S, FANG F Z, et al. Study on the distribution pattern of *Hopea* in Bawangling, Hainan Island [J]. *Trop For*, 2016, 44(3): 40–42. [陈彧, 方燕山, 方发之, 等. 海南霸王岭坡垒分布格局初步研究 [J]. *热带林业*, 2016, 44(3): 40–42. doi: 10.3969/j.issn.1672-0938.2016.03.013.]
- [22] LU X H, ZANG R G, DING Y, et al. Habitat characteristics and its

- effects on seedling abundance of *Hopea hainanensis*, a wild plant with extremely small populations [J]. *Biodiv Sci*, 2020, 28(3): 289–295. [路兴慧, 臧润国, 丁易, 等. 极小种群野生植物坡垒的生境特征及其对幼苗多度的影响 [J]. 生物多样性, 2020, 28(3): 289–295. doi: 10.17520/biods.2019143.]
- [23] HUANG G H, LIANG K N, LIN M P, et al. Seedling technology of *Hopea hainanensis* and *Alseodaphne hainanensis* [J]. *Pract For Technol*, 2011(10): 23–24. doi: 10.13456/j.cnki.lykt.2011.10.025. [黄桂华, 梁坤南, 林明平, 等. 珍贵树种坡垒和油丹及其育苗技术 [J]. 林业实用技术, 2011(10): 23–24. doi: 10.13456/j.cnki.lykt.2011.10.025.]
- [24] LI J, DUAN Z L. Experiment of cutting and seedling cultivation of *Hopea hainanensis* [J]. *J Hebei For Sci Technol*, 2012(6): 21. [李璟, 段宗亮. 海南坡垒扦插育苗试验 [J]. 河北林业科技, 2012(6): 21. doi: 10.16449/j.cnki.issn1002-3356.2012.06.043.]
- [25] DUAN Z J, PENG W C, HUANG G N. A survey of research on the endangered causes of *Dipterocarpaceae* plants [J]. *Trop For*, 2020, 48(4): 4–8. [段左俊, 彭文成, 黄国宁. 龙脑香科植物致濒原因研究概况 [J]. 热带林业, 2020, 48(4): 4–8. doi: 10.3969/j.issn.1672-0938.2020.04.001.]
- [26] FANG F Z, CHEN S L, GUI H Y. Habitat investigation and endangered reason analysis of *Hopea hainanensis* [J]. *Trop For*, 2020, 48(4): 9–12. [方发之, 陈素灵, 桂慧颖. 坡垒生境调查及濒危原因分析 [J]. 热带林业, 2020, 48(4): 9–12. doi: 10.3969/j.issn.1672-0938.2020.04.002.]
- [27] YANG D J, QIU Q. Preliminary study on introduction of *Hopea hainanensis* [J]. *Jiangxi For Sci Technol*, 2007(2): 27–29. [杨德军, 邱琼. 海南坡垒引种初报 [J]. 江西林业科技, 2007(2): 27–29. doi: 10.16259/j.cnki.36-1342/s.2007.02.010.]
- [28] WEN X Y, HUANG F F, GAN X H, et al. Introduction performance of *Hopea hainanensis* and *Vatica mangachapoi* in Guangdong Tree Park [J]. *For Environ Sci*, 2017, 33(4): 52–56. [温小莹, 黄芳芳, 甘先华, 等. 坡垒、青皮在广东树木公园的引种表现 [J]. 林业与环境科学, 2017, 33(4): 52–56. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2017.04.011.]
- [29] MA Y P, SUN W B. Rescuing conservation of plant species with extremely small populations (PSESP): Opportunities and challenges [J]. *Biodiv Sci*, 2015, 23(3): 430–432. [马永鹏, 孙卫邦. 极小种群野生植物抢救性保护面临的机遇与挑战 [J]. 生物多样性, 2015, 23(3): 430–432. doi: 10.17520/biods.2015016.]
- [30] XU Y, ZANG R G. Theoretical and practical research on conservation of wild plants with extremely small populations in China [J]. *Biodiv Sci*, 2022, 30(10): 22505. [许玥, 臧润国. 中国极小种群野生植物保护理论与实践研究进展 [J]. 生物多样性, 2022, 30(10): 22505. doi: 10.17520/biods.2022505.]
- [31] VANDEWOESTIJNE S, SHTICKZELLE N, BAGUETTE M. Positive correlation between genetic diversity and fitness in a large, well-connected metapopulation [J]. *BMC Biol*, 2008, 6(1): 46. doi: 10.1186/1741-7007-6-46.
- [32] YAO Z, GUO J, JIN C Z, et al. Endangered mechanisms for the first-class protected wild plants with extremely small populations in China [J]. *Biodiv Sci*, 2021, 29(3): 394–408. [姚志, 郭军, 金晨钟, 等. 中国纳入一级保护的极小种群野生植物濒危机制 [J]. 生物多样性, 2021, 29(3): 394–408. doi: 10.17520/biods.2020316.]
- [33] CAI Y, DUAN J Y, ZHU S Q, et al. Genetic diversity of *Hopea reticulata* tardieu based on SSR markers [J]. *J Trop Biol*, 2022, 13(2): 127–135. [蔡颖, 段继煜, 朱思奇, 等. 基于 SSR 标记的无翼坡垒遗传多样性研究 [J]. 热带生物学报, 2022, 13(2): 127–135. doi: 10.15886/j.cnki.rds wxb.2022.02.004.]
- [34] NGUYEN P T T, TRIEST L. The genetic structure of three threatened *Hopea* species (Dipterocarpaceae) in the protected areas of Vietnam [J]. *Int J Appl Nat Sci*, 2019, 8(3): 191–204.
- [35] TAKEUCHI Y, ICHIKAWA S, KONUMA A, et al. Comparison of the fine-scale genetic structure of three dipterocarp species [J]. *Heredity*, 2004, 92(4): 323–328. doi: 10.1038/sj.hdy.6800411.
- [36] LY V, NANTHAVONG K, POOMA R, et al. *Hopea hainanensis* [P]. The IUCN Red List of Threatened Species. 2018: e. T32357A2816074.
- [37] HEDRICK P W, KALINOWSKI S T. Inbreeding depression in conservation biology [J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 2000, 31(1): 139–162. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.31.1.139.
- [38] NOCK C J, WATERS D L E, EDWARDS M A, et al. Chloroplast genome sequences from total DNA for plant identification [J]. *Plant Biotechnol J*, 2011, 9(3): 328–333. doi: 10.1111/j.1467-7652.2010.00558.x.
- [39] Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences. Rare and Endangered Plants in China [M]. Shanghai: Shanghai Education Publishing House, 1989: 116–117. [中国科学院植物研究所. 中国珍稀濒危植物 [M]. 上海: 上海教育出版社, 1989: 116–117.]
- [40] YANG X B, CHEN Y K, LI D H, et al. Endangered Plants of Hainan, China [M]. Beijing: Science Press, 2016: 132–134. [杨小波, 陈玉凯, 李东海, 等. 海南珍稀保护植物图鉴与分布特征研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 132–134.]
- [41] KENZO T, ICHIE T, NINOMIYA I, et al. Photosynthetic activity in seed wings of *Dipterocarpaceae* in a masting year: Does wing photosynthesis contribute to reproduction? [J]. *Photosynthetica*, 2003, 41(4): 551–557. doi: 10.1023/B:PHOT.0000027519.26832.f3.
- [42] LU X, LAN Q Y, YANG M Z. Research advancement of *Dipterocarpaceae* seeds characteristics [J]. *Seed*, 2010, 29(5): 46–50. [路信, 兰芹英, 杨明攀. 龙脑香科植物种子特性的研究进展 [J]. 种子, 2010, 29(5): 46–50. doi: 10.16590/j.cnki.1001-4705.2010.05.043.]
- [43] TOMPSETT P B. A review of the literature on storage of dipterocarp seeds [J]. *Seed Sci Technol*, 1992, 20(2): 251–267.
- [44] LAN Q Y, JIANG X C, SONG S Q, et al. Changes in germinability and desiccation-sensitivity of recalcitrant *Hopea hainanensis* Merr. et Chun seeds during development [J]. *Seed Sci Technol*, 2007, 35(1): 21–31.

- doi: 10.15258/sst.2007.35.1.03.
- [45] YANG H P, XIAN Y, HAN B, et al. Research progress on recalcitrant seeds of forest trees [J]. *J Shandong For Sci Technol*, 2021, 51(5): 88–94. [杨海平, 咸洋, 韩彪, 等. 林木顽拗性种子研究进展 [J]. *山东林业科技*, 2021, 51(5): 88–94. doi: 10.3969/j.issn.1002-2724.2021.05.017.]
- [46] SONG X Z, CHEN Q D, WANG D F, et al. A study on the principal storage conditions of *Hopea hainanensis* seeds [J]. *Sci Silv Sin*, 1984, 20(3): 225–236. [宋学之, 陈青度, 王东馥, 等. 坡垒种子主要储藏条件的研究 [J]. *林业科学*, 1984, 20(3): 225–236.]
- [47] SUN W B, HAN C Y. Researches and conservation for plant species with extremely small populations (PSESP) [J]. *Biodiv Sci*, 2015, 23(3): 426–429. [孙卫邦, 韩春艳. 论极小种群野生植物的研究及科学保护 [J]. *生物多样性*, 2015, 23(3): 426–429. doi: 10.17520/biods.2015.026.]
- [48] LIU D T, CHANG Y H, MA Y P. Unclear resource background seriously restricts biodiversity conservation of *Rhododendron* in China [J]. *Plant Sci J*, 2020, 38(4): 517–524. [刘德团, 常宇航, 马永鹏. 本底资源不清严重制约我国杜鹃花属植物的生物多样性保护 [J]. *植物科学学报*, 2020, 38(4): 517–524. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2020.40517.]
- [49] LI D. Study on distribution pattern and population characteristics of wild Dipterocarpaceae plants in Hainan Province [D]. Haikou: Hainan University, 2016. [李丹. 海南省野生龙脑香科植物分布格局及种群特征研究 [D]. 海口: 海南大学, 2016.]
- [50] FAN Q, LIAO W B, SU W B, et al. Rare, endangered and protected plants in Wuzhishan Nature Reserve [J]. *Trop For*, 2003, 31(2): 25–29. [凡强, 廖文波, 苏文拔, 等. 五指山自然保护区的保护植物和珍稀濒危植物 [J]. *热带林业*, 2003, 31(2): 25–29. doi: 10.3969/j.issn.1672-0938.2003.02.011.]
- [51] DENG S, WU Y N, WU K L, et al. Breeding characteristics and artificial propagation of 14 species of wild plant with extremely small populations (WPESP) in China [J]. *Biodiv Sci*, 2020, 28(3): 385–400. [邓莎, 吴艳妮, 吴坤林, 等. 14种中国典型极小种群野生植物繁育特性和人工繁殖研究进展 [J]. *生物多样性*, 2020, 28(3): 385–400. doi: 10.17520/biods.2020045.]
- [52] XUE H, PAN L Y, ZHONG S J. Investigation and analysis of *Hopea Hainanensis* resources [J]. *Flowers*, 2019(24): 232–234. [薛荟, 潘林义, 钟仕进. 海南坡垒种质资源调查及分析 [J]. *花卉*, 2019(24): 232–234. doi: 10.3969/j.issn.1005-7897.2019.24.155.]
- [53] State Forestry Administration of China. Resources Investigation of Key Protected Wild Plant in China [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2009: 35–41. [国家林业局. 中国重点保护野生植物资源调查 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2009: 35–41.]
- [54] WEI J X, HUANG C T, LI G Y, et al. Prediction of potential suitable habitat distribution of wild *Hopea hainanensis* in Hainan Island based on MaxEnt model [J]. *Hort Seed*, 2020, 40(8): 5–7. [韦建杏, 黄川腾, 黎国运, 等. 基于 MaxEnt 模型的海南岛野生植物坡垒潜在适宜生境分布预测 [J]. *园艺与种苗*, 2020, 40(8): 5–7. doi: 10.16530/j.cnki.cn21-1574/s.2020.08.003.]
- [55] XIE Z H. Study on the community structure of *Hopea hainanensis* in Limu Mountain Nature Reserve of Hainan Province [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2019. [谢振华. 海南黎母山自然保护区坡垒(*Hopea hainanensis*)群落结构研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.]
- [56] LI Y Y, LIU C N, WANG R, et al. Applications of molecular markers in conserving endangered species [J]. *Biodiv Sci*, 2020, 28(3): 367–375. [李媛媛, 刘超男, 王嵘, 等. 分子标记在濒危物种保护中的应用 [J]. *生物多样性*, 2020, 28(3): 367–375. doi: 10.17520/biods.2019414.]
- [57] IUCN. IUCN Red List Categories and Criteria, Version 3.1 [M]. 2nd ed. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK, 2012.
- [58] XIE Y. Progress and application of IUCN red list of threatened species [J]. *Biodiv Sci*, 2022, 30(10): 22445. [解焱. IUCN 受威胁物种红色名录进展及应用 [J]. *生物多样性*, 2022, 30(10): 22445. doi: 10.17520/biods.2022445.]
- [59] WRIGHT S J, MULLER-LANDAU H C, CALDERÓN O, et al. Annual and spatial variation in seedfall and seedling recruitment in a neotropical forest [J]. *Ecology*, 2005, 86(4): 848–860. doi: 10.1890/03-0750.
- [60] CAI J Q, LIU D P, ZHANG S Y, et al. Composition and interannual dynamics of tree seedlings in a secondary forest in montane region of eastern Liaoning Province, China [J]. *Biodiv Sci*, 2018, 26(11): 1147–1157. [蔡军奇, 刘大鹏, 张淑媛, 等. 辽东山区次生林乔木幼苗组成及其年际动态 [J]. *生物多样性*, 2018, 26(11): 1147–1157. doi: 10.17520/biods.2018135.]
- [61] LI Y P, XU H, LI Y D, et al. Scale-dependent spatial patterns of species diversity in the tropical montane rain forest in Jianfengling, Hainan Island, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2016, 40(9): 861–870. [李艳朋, 许涵, 李意德, 等. 海南尖峰岭热带山地雨林物种多样性空间分布格局的尺度效应 [J]. *植物生态学报*, 2016, 40(9): 861–870. doi: 10.17521/cjpe.2015.0400.]
- [62] CHEN H X, HUANG C T, HE F, et al. Review on research progress of *Hopea hainanensis* [J]. *Trop For*, 2015, 43(4): 4–6. [陈侯鑫, 黄川腾, 何芬, 等. 坡垒研究进展综述 [J]. *热带林业*, 2015, 43(4): 4–6. doi: 10.3969/j.issn.1672-0938.2015.04.001.]
- [63] XIAO L Y, PU Z H, ZHANG L. *Ex situ* conservation of rare and endangered species: *Hopea hainanensis* [J]. *J Plant Resour Environ*, 1994, 3(4): 49–54. [肖来云, 普正和, 张玲. 稀有濒危植物坡垒的迁地保护 [J]. *植物资源与环境*, 1994, 3(4): 49–54.]
- [64] REN H, WEN X Y, LIAO J P, et al. The view on functional changes of botanical gardens and the establishment of China's national botanical garden system [J]. *Biodiv Sci*, 2022, 30(4): 22113. [任海, 文香英, 廖

- 景平, 等. 试论植物园功能变迁与中国国家植物园体系建设 [J]. 生物多样性, 2022, 30(4): 22113. doi: 10.17520/biods.2022113.]
- [65] MA J Z, RONG K, CHENG K. Research and practice on biodiversity in situ conservation in China: Progress and prospect [J]. Biodiv Sci, 2012, 20(5): 551–558. [马建章, 戎可, 程鲲. 中国生物多样性就地保护的研究与实践 [J]. 生物多样性, 2012, 20(5): 551–558. doi: 10.3724/SP.J.1003.2012.08118.]
- [66] WANG W, LI J S. *In-situ* conservation of biodiversity in China: Advances and prospects [J]. Biodiv Sci, 2021, 29(2): 133–149. [王伟, 李俊生. 中国生物多样性就地保护成效与展望 [J]. 生物多样性, 2021, 29(2): 133–149. doi: 10.17520/biods.2020070.]
- [67] OUYANG Z Y, DU A, XU W H. Research on China's protected area system classification [J]. Acta Ecol Sin, 2020, 40(20): 7207–7215. [欧阳志云, 杜傲, 徐卫华. 中国自然保护地体系分类研究 [J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7207–7215. doi: 10.5846/stxb202005051103.]
- [68] XU M, TIAN D S, WANG Y H, et al. Construction and application of the indicator system for ecosystem monitoring network in the protected areas on a national scale [J]. Chin J Plant Ecol, 2022, 46(10): 1219–1233. [徐梦, 田大栓, 王易恒, 等. 国家尺度自然保护地生态系统联网监测指标体系构建与应用研究 [J]. 植物生态学报, 2022, 46(10): 1219–1233. doi: 10.17521/cjpe.2022.0259.]
- [69] REN H. *In situ* and *ex situ* conservation of plants in China [J]. China Environ, 2021(9): 35. [任海. 中国的植物就地保护和迁地保护 [J]. 中华环境, 2021(9): 35.]
- [70] MO J H, LI Y D, XU H, et al. Study on the distribution, ecology and protection of some rare and endangered plants in Jianfengling National Nature Reserve, Hainan [J]. Trop For, 2007, 35(4): 22–24. [莫锦华, 李意德, 许涵, 等. 海南尖峰岭国家级自然保护区部分珍稀濒危植物的分布、生态与保护研究 [J]. 热带林业, 2007, 35(4): 22–24. doi: 10.3969/j.issn.1672-0938.2007.04.008.]
- [71] XU H, LI Y P, LI Y D, et al. Study history and discussion on classification of the tropical forest vegetation types in China [J]. Guihaia, 2021, 41(10): 1595–1604. [许涵, 李艳朋, 李意德, 等. 中国热带森林植被类型研究历史和划分探讨 [J]. 广西植物, 2021, 41(10): 1595–1604. doi: 10.11931/guihaia.gxzw202107001.]
- [72] OLDFIELD S, NEWTON A C. Integrated Conservation of Tree Species by Botanic Gardens: A Reference Manual [M]. Richmond: Botanica Gardens Conservation International, 2012: 1–58.
- [73] WEN X Y, CHEN H F. Botanical gardens and *ex situ* conservation of the wild plant species [J]. Biodiv Sci, 2022, 30(1): 22017. [文香英, 陈红锋. 植物园与野生植物迁地保护 [J]. 生物多样性, 2022, 30(1): 22017. doi: 10.17520/biods.2022017.]
- [74] PANAHI P, JAMZAD Z, JALILI A, et al. The role of the National Botanical Garden of Iran in *ex situ* conservation of *Buxus hyrcana* Pojark.; An endangered species [J]. Urban For Urban Greening, 2021, 57: 126951. doi: 10.1016/j.ufug.2020.126951.
- [75] CHEN J. Some thoughts about China's national botanical garden system construction [J]. Biodiv Sci, 2022, 30(1): 22016. [陈进. 关于我国国家植物园体系建设的一点思考 [J]. 生物多样性, 2022, 30(1): 22016. doi: 10.17520/biods.2022016.]
- [76] HUANG H W, LIAO J P. On China's national botanical gardens: Building a comprehensive system of *ex situ* conservation of national botanical gardens with task oriented disciplines [J]. Biodiv Sci, 2022, 30(6): 22220. [黄宏文, 廖景平. 论我国国家植物园体系建设: 以任务带学科构建国家植物园迁地保护综合体系 [J]. 生物多样性, 2022, 30(6): 22220. doi: 10.17520/biods.2022220.]
- [77] LI G Y, CHEN F F, YANG Z L. Studies on seedling cultural techniques of *Hopea hainanensis* [J]. Trop For, 2015, 43(4): 7–8. [黎国运, 陈云飞, 杨枝林. 坡垒种子育苗技术研究 [J]. 热带林业, 2015, 43(4): 7–8. doi: 10.3969/j.issn.1672-0938.2015.04.002.]
- [78] CHEN Y K, YANG X B, YANG Q, et al. Factors affecting the distribution pattern of wild plants with extremely small populations in Hainan Island, China [J]. PLoS One, 2014, 9(5): e97751. doi: 10.1371/journal.pone.0097751.
- [79] ZHOU J, WEI F W, LI M, et al. Hainan black-crested gibbon is headed for extinction [J]. Int J Primatol, 2005, 26(2): 453–465. doi: 10.1007/s10764-005-2933-x.
- [80] LIN S L, JIANG Y Z, HE J K, et al. Changes in the spatial and temporal pattern of natural forest cover on Hainan Island from the 1950s to the 2010s: Implications for natural forest conservation and management [J]. Peer J, 2017, 5: e3320. doi: 10.7717/peerj.3320.
- [81] XU H. Ecosystem Monitoring and Research in Tropical and Subtropical Forests [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2022: 46–47. [许涵. 热带亚热带森林生态系统监测与研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2022: 46–47.]
- [82] XU H, DETTO M, FANG S Q, et al. Habitat hotspots of common and rare tropical species along climatic and edaphic gradients [J]. J Ecol, 2015, 103(5): 1325–1333. doi: 10.1111/1365-2745.12442.