

生态系统恢复中的适地适树问题

任海*, 陆宏芳

(中国科学院华南植物园, 广州 510650)

摘要: 退化生态系统恢复主要包括退化生境的治理和生物群落的修复, 这类似于林业中的适地适树原则。在造林和退化生态系统恢复与实践中, 如果未充分考虑适地适树, 往往导致造林存活率低、功能低下, 生态系统恢复速度慢。要做到适地适树, 必须考虑到适树是一个系统恢复中的树种选择问题, 除了考虑乡土种等宏观原则外, 还要考虑树种的遗传多样性、树种所在演替阶段、植物功能群和植物功能性状等多个不同尺度的问题。而适地则要同时考虑用途和退化等级问题, 其中, 一是根据造林用途分为造林荒地、商品林地、需要改造的人工林林地、园林用地等; 二是按照生态系统退化程度分为极度退化、中度退化、轻度退化土地。气候变化下适地适树的关键要点亦会有所不同, 气候变化前的生态恢复强调的是恢复生态系统历史上的状态, 而气候变化下的生态恢复则需要一定程度的改造, 即适应性生境的营造和更耐受气候变化物种选育的双向奔赴。基于适地适树理念构建的植被可以在一定程度上缓解气候变化的影响, 保护和恢复生物多样性, 修复退化的生态系统, 并提供多种生态系统服务, 最终为建立人与自然和谐共生的可持续发展提供支撑。

关键词: 退化生态系统; 造林; 工具种; 生境修复; 气候变化

doi: 10.11926/jtsb.4967

CSTR:32235.14.jtsb.4967

The Right Tree in the Right Place in Ecosystem Restoration

REN Hai*, LU Hongfang

(South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: The restoration of degraded ecosystems mainly includes the rehabilitation of degraded habitats and the restoration of biological communities, which aligns with the forestry principle of ‘the right tree in the right place’. However, in afforestation and restoration of degraded ecosystems, inadequate consideration of this principle often results in low survival rates, low functionality, and sluggish pace of recovery. To ensure that the right tree is planted in the right place, a comprehensive approach to tree species selection is imperative. Beyond the fundamental guideline of utilizing native species, it is essential to account for the genetic diversity of tree species, the succession stage of tree species, plant functional groups, and plant functional traits at multiple scales. For suitable land, both the land use and land degradation level should be considered simultaneously. Based on the afforestation objectives, the land can be categorized into barren land for afforestation, commercial forest plantations or garden lands for transformation. Additionally, considering the level of ecosystem degradation, the land can be classified into extremely degraded, moderately degraded, and mildly degraded land. Under climate change, the criteria for the right tree in the right place may shift. If ecological restoration before climate change emphasizes restoring the historical state of ecosystems, the ecological restoration under climate change will undergo a certain degree of adaption. This adaptation includes the creation of adaptive habitats and the assistance of species migration or breeding that are more tolerance to climate change. Both of these strategies are crucial for

收稿日期: 2024-09-05

接受日期: 2024-10-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021-400)资助

This work was supported by the National Key Research and Development Project (Grant No. 2021-400).

作者简介: 任海(1970年生), 男, 研究员, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: renhai@scbg.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author

effective restoration. Properly established vegetation through thoughtful tree planting can mitigate the impacts of climate change, conserve biodiversity, rehabilitate degraded ecosystems, and provide multiple ecosystem services. Ultimately, this approach supports the broader goal of sustainable development, and fostering a harmonious coexistence between humanity and nature.

Key words: Degraded ecosystems; Afforestation; Tool species; Habitat restoration; Climate change

当今世界面临着三大生态问题,即以气候变化、经济振荡和社会矛盾冲突为标志的生态安全问题,以环境污染、资源耗竭和过度消费为特征的区域生态系统服务减弱问题,以及以生物多样性丧失和生态系统退化为诱因的生态系统不可持续性问题^[1]。为此,联合国发起了生物多样性公约、气候变化公约、可持续发展 2030 目标、生态恢复十年计划等国际公约和计划。我国也提出了生态文明建设新理念,希望通过山水林田湖草沙综合治理、美丽中国建设等行动构建人与自然和谐共生的新生态安全格局,确保我国生态系统多样性、稳定性和可持续性。

人工造林是生态系统恢复的重要方式。目前我国人工林面积占全球人工林的 25%左右,是世界上人工林面积最大的国家^[2]。国际生态恢复学会的《国际生态修复指南(International Primer on Ecological Restoration, 2004)》和《生态恢复的原则(Principles of ecological restoration, 2019)》、国际自然保护联盟提出的适应性管理和再野化^[3],以及世界银行提出的《基于自然的解决方案》和 IUCN 提出的《基于自然的解决方案的框架》等为我国生态系统恢复工作提供了指南^[4]。

恢复退化的生态系统,主要涉及退化生境的治理和生物群落的修复^[5]。在生态系统恢复中,要考虑的因素很多,如气候、土壤、生物组成和功能、养分循环、水分、生产力、固碳、分解、生物互作、生态系统服务等等。在生物组成和功能因素中,选择适当的物种,即生态恢复工具种(一般指植物),非常重要^[6-7]。

适地适树在造林上是一个基本的生态原则,是指造林树种的生态学特性和造林地的立地条件相适应,以充分发挥生产潜力,达到该立地在当时技术经济条件下可能达到的高产水平^[8]。实现适地适树有选树适地、选地适树、改地适树、改树适地等 4 种途径。适地适树成功与否通常用成活率和保存率(至少>80%)、林分的数量和质量、生长的稳定性和抗逆性、成本和效益等进行衡量与评价^[9-10]。

由于没有充分考虑适地适树原则,目前的造林或生态恢复实践中往往存在如下问题:部分地方造林成活率低,存在造林不见林的现象^[11-12]。一些人工林生长不良,呈现小老头树现象,功能低下^[13]。有些人工林低产、低质、低效^[14],且健康水平低下,有害生物入侵风险高、病虫害防治难的问题^[15]。甚至在一些适合种草的干旱半干旱地区种树,破坏了生态用水平衡,导致人工植被与区域水土资源矛盾突出^[16]。部分地区不合理地大面积引种造林甚至引发了土地退化、水土保持情况恶化、土地贫瘠化的问题^[17]。此外,普遍存在缺乏对准备、造林、抚育管理和收获利用阶段全生命周期的统筹考虑与规划^[10,18]。

退化生态系统恢复中的退化生境治理和生物群落修复与林业中的适地适树原则相类似。在生态系统恢复中工具种的选择要考虑如下科学问题:如何考虑适树问题?如何考虑适地问题?如何综合考虑适树与适地两者?本文拟从适树和适地两个方面介绍当前国内外共识,并提出全球变化背景下生态系统恢复过程中适树和适地相结合的问题,以期为生态系统恢复提供参考。

1 适树的问题

植物种类的选择应该坚持立地条件与其生物学特性和生态学特性相适应,与地带性特点相适应,与降水条件和土壤水分条件相适应,与植物群落的演替特征相适应。

1.1 适树是一个系统恢复中的树种选择问题

1956 年最高国务会议通过的《1956 年到 1967 年全国农业发展纲要(草案)》中提出了农业增产的八项措施:修水利,增加肥料,改良旧式农具和推广新式农具,推广优良品种,扩大复种面积,多种高产作物,实行精耕细作和改进耕作方法,以及改良土壤。1958 年毛泽东主席把农业增产的八项基本措施概括为土、肥、水、种、密、保、管、工八字宪法^[19]。这些农业措施同样适用于林业领域。

国际上, Di Sacco 等^[20]提出了优化固碳、生物多样性恢复和生计效益的森林恢复十大黄金原则, 具体如下: (1) 首先保护现有森林; (2) 所有涉及的利益攸关方共同努力; (3) 最大限度地恢复生物多样性以实现多个目标; (4) 选择合适的区域进行森林修复; (5) 尽可能利用自然更新; (6) 选择物种以最大限度地提高生物多样性; (7) 使用具有适当遗传变异性和种源弹性的植物物种; (8) 提前规划基础设施和种质供应; (9) 采用适应性管理方法边做边学; (10) 确保项目的经济可持续性。

从这 2 个国内外案例可见, 生态恢复中的适树问题, 是一个系统的物种选择问题。同时, 也应该看到物种选择在不同时代有不同的要求, 早期更多地关注植树造林绿化国土; 而现在则要考虑应对气候变化和生物多样性危机, 还要产出多样化的生态产品以服务民生^[21], 如发挥森林的水库、钱库、粮库、碳库和物种库的“五库”综合功能^[17]。此外, 还要考虑社区在地区传统文化传承中的作用, 以及社区可以从成功的植树造林中获得的惠益^[22-23]。在植树造林中综合考虑这些因素是实现生态系统多种功能协同恢复, 并使生态系统更具韧性的基本要求。

1.2 适树需要考虑的方面

生态恢复过程中工具种的选择一直随着植物学和育种学的发展而发展。在植物学领域经历了通过形态、生理生态、功能性状指标选种的过程, 而在育种学领域则经历了驯化、育种、改造物种的过程。从适树的角度, 除了考虑上述方面外, 还要考虑树种的遗传多样性、树种所在演替阶段、植物功能群和植物功能性状等多个不同尺度的问题。

CitiesWithNature^[24]提出了种树的 10 个要不要原则: (1) 要种植高产树木; (2) 不要种植入侵物种, 但要仔细考虑外来物种; (3) 要考虑树木的根系; (4) 不要在错误的土壤中种树; (5) 要在树种的自然分布区内种植; (6) 不要在干燥的气候区种植耗水的树木; (7) 不要忽视新种植的树木; (8) 不要在危险地区种树; (9) 要种植满足社会需求的树木; (10) 要种植能促进当地生物多样性恢复的树木。落实到具体区域时, 这些原则的优先顺序会有所调整。例如, 在干旱区进行生态修复, 要优先选择本土植物、耐干旱植物和具有生态经济价值的植物, 并综合考虑植物的生长速度、繁殖方式等因素^[25]。在热带珊瑚岛进行绿化, 则要针对其恶劣环境优先选择具有深根、耐盐碱、光合与水分利用效率高且

同步、以及固氮类的豆科植物等特征的物种^[26]。涉及社区的植被恢复项目应优先考虑对当地社区有用的物种, 同时考虑物种的受威胁状态和对当地胁迫因素的抵抗力; 选择最有用、最受威胁和最能抵抗当地胁迫因素的物种^[27]。在道路边坡植被构建中应优先选用抗污染能力强的深根系树种, 同时考虑景观效果和抵制有害生物入侵的能力, 选择群落稳定性强、维护成本低的物种组合^[28]。

在联合国生态系统恢复十年(2021—2030)开始之际, 恢复退化的生态系统比以往任何时候都更加成为全球的首选事项。植树造林在各国雄心勃勃的生态恢复承诺中均占有重要的地位, 但需要仔细规划, 选择适合当前和未来恢复现场条件并符合恢复目标的物种和种子来源。Fremout 等^[29]研发了恢复生物多样性的在线工具(D4R), 用于筛选适合气候适应型热带森林景观恢复的树种和种子来源。这个工具整合了(1) 当前和未来气候条件下的物种栖息地适宜性图; (2) 分析功能特征数据、当地生态知识和其他物种特征, 以评估物种与恢复地点条件和恢复目标的匹配程度; (3) 考虑功能性状多样性或系统发育多样性, 优化物种组合和丰度, 促进物种之间的互补性, 确保生态系统的多功能性和稳定性; (4) 绘制种子区地图, 以指导适合当前和预测未来环境条件的种植材料的采购。该多样性恢复工具已在南美及非洲获得应用, 并使非专家用户也能够结合物种特征、环境数据和气候变化模型, 选择最符合所需恢复地点条件和恢复目标的树种和种子来源。此外, Bateman 等^[30]在检验种植原则的基础上, 应用基于地点的自然资本框架进行可持续、高效和公平的决策以确定林地中合适树木种植的位置。

虽然人们很早就认识到了在生态恢复中使用本地树种的重要性, 但很少注意本地树种内部和之间的遗传变异对于生态恢复的影响。Thomas 等^[31]考虑了物种选择和森林繁殖材料的来源, 以确保生态恢复的树木种群具有广泛的遗传基础, 其物种收集和繁殖种质包括: (1) 在计划种植时间之前及早规划所需物种的繁殖材料的来源; (2) 根据当前和未来的立地条件、适应性特征的预测或已知变异模式以及种子来源的可用性, 将物种和种源与恢复地进行匹配; (3) 考虑恢复项目中的景观规划, 通过促进自然选择、生态连通性和物种关联来提高复原力。

Lu 等^[32]研究表明, 进行生态恢复工具物种选

择时, 需要针对不同演替阶段的生境, 细分先锋种和中后期演替物种以用于造林。一般而言, 先锋物种表现良好, 精心选择的中后期演替物种也可以有效地融入混合物种植中, 从而增强恢复森林的生物多样性和复原力。当然, 选择本地物种进行生态恢复比选择纯林树种要复杂得多, 也更具挑战性。在退耕还林和造林过程中应该遵循生物气候带原则, 演替前期植物种与演替后期植物搭配, 浅根系植物与深根系植物合理配置。

植物功能群是对环境反应相似、对生态系统过程影响相似的物种组合, 可以作为选择最佳恢复物种的有用工具。考虑功能群可以更快速地对物种进行分类, 特别是在高度多样化的森林中。先锋物种可以作为护理物种, 迅速建立保护性树冠, 遮蔽竞争杂草, 并促进后期演替阶段物种的定居和成长^[33]。

利用植物功能性状进行适生物种的筛选是当前的热点研究领域。Wang 等^[34]在选择热带珊瑚岛植被恢复工具种时发现, 很难在减少性状数量的同时保持正确的筛选结果, 尤其是对于树种; 需要同时考虑多种性状类型, 才能更准确地筛选出所需的工具物种^[35-36]。喻阳华等^[37]报道叶片生理生态特性、解剖结构和根系构型、生态学特征等功能性状对于植物生态适应性非常重要。此外, 关键树种与立地条件、生态因子的适应性, 以及物种种间关系的和谐性对于生态恢复的成败至关重要。因此, 在生态恢复工具种选择时要综合考虑(1) 划分树种适应性功能群, (2) 光、温、肥与水的耦合作用关系, (3) 根系构型调控等。

2 适地的问题

退化生态系统恢复过程中, 适地主要考虑的是生境的修复。从造林角度看, 主要是通过整地、施肥、灌溉、土壤改良, 甚至是改变小气候(如遮荫)等措施来改变造林地环境, 使其适合原来不适应的树种生长。在实际操作中, 可以根据用途和退化等级分两类处理: 一是根据造林用途分为造林荒地、商品林地、需要改造的人工林林地、园林用地。另一类是按照生态系统退化的等级分为极度退化、中等退化、轻度退化用地。

2.1 基于林地用途的适地问题

(1) 荒地造林。荒地造林主要是建立先锋群落,

必须遵循地带性规律, 即在一定的气候土壤区内, 宜林则林、宜草则草、宜湿则湿、宜荒则荒(荒漠、石漠及寒漠)。在实际操作中, 水分因子是我国大部分地区造林的限制因子。根据胡焕庸线, 我国国土面积西北半边属于干旱半干旱地区, 东南半边是湿润半湿润地区。非湿润地区要特别重视水分制约, 以水定绿, 因地制宜。即以水定封育、人工、飞播等绿化方式; 以水定带状、块状、大面积连片绿化格局; 以水定乔、灌、草; 以水定树种、草种; 以水定初植密度及密度管理。虽然水分是一个在一定区域内的突出问题, 光、热、水、养的不同组合, 气候、地貌、土壤的不同分布, 形成了复杂多样的生态环境, 科学绿化必须因地制宜^[10,38]。例如, 在西南喀斯特地区, 白云岩基质早期灌草多, 而石灰岩基质因有缝隙而乔木多, 这就是水、土共同作用的结果^[39]。在荒地造林时, 直接播种的树种萌发和幼苗的建立与生长率通常很低; 直接播种恢复依赖于大量存活的种子, 进行适当的种子包衣再直接播种更易于植被建立, 且经济成本可控^[40]。

(2) 商品林生产。商品林是以生产木材、竹材、薪材、干鲜果品和其它工业原料等为主要经营目的的有林地、疏林地、灌木林地和其它林地, 包括用材林、经济林和能源林(薪炭林)。商品林构建中需要着重考虑的是树种和品种。据第九次全国森林资源清查, 我国现有商品林面积 $9.5 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。在全国 120 多种主要树种中, 杉木、马尾松、杨树、落叶松、栎类、桦木、云南松、柏木、湿地松等 10 种树种占用材林的 53.6%; 油茶、茶叶、柑橘、核桃、苹果、板栗、橡胶、桃、梨、枣等 10 种树种占经济林的 66.8%^[41]。由于商品林的商品属性, 进行适地处理, 在控制环境影响和经济成本的前提下, 尽可能地提高其产量和质量是关键。

(3) 林分改造。第九次全国森林资源清查数据显示, 目前我国共有 $1.23 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 生态公益林, 其中人工林占 21.43%。这些人工林以中幼林为主; 种类和结构单一, 林下缺乏中间灌木层和地表植被; 大量使用外来种; 缺乏天然林生态系统健康所要求的物种组成、空间结构、年龄结构等方面的异质性; 较少使用珍稀濒危植物。针对森林多功能效益要求, 在这些林地的管理中要考虑物种多样性的提升, 特别是珍稀濒危物种的再引入。同时, 在实际操作中要尽可能地利用基于自然的解决方案进行生境的改造, 降低生态经济成本的同时保障新增林

地与周围自然景观的协调度。

(4) 城市园林绿化。目前城市绿地中普遍存在物种单一、生物多样性低、乡土种少、群落结构简单、绿地质量较差的现象,并进而导致城市绿地生态系统稳定性差、管护成本高的问题。这些问题严重影响了城市绿地生态效益的发挥,亟需加强城市绿地建设并提高绿地的生物多样性。城市园林绿化中,要考虑少数骨干树种与多样性平衡,在以乡土种为主的前提下,适当引种外来树种,但要考虑气候相似性、土壤相似性、遗传多样性三原则。在建设园林绿地时,园林用地要清除污染,特别是重金属污染地^[42],清理建筑垃圾,改良土壤。

2.2 基于退化生态系统等级的适地问题

从退化生态系统恢复角度,要针对不同的退化等级,从需要修复的物理环境条件、需要调节或解除的胁迫因素、需要去除的生物干扰类型等 3 个方面进行生境修复。许多需要恢复的生态系统因为物理环境条件的破坏,都存在功能障碍(比如土壤紧实度的改变、土壤侵蚀、地表水利用的转变和潮汐涨落的阻碍),修复后的物理环境条件要能维持生态系统生物区系物种种群的正常发育和繁殖。胁迫因素是指在维持生态系统完整性的环境因子中,那些通过阻碍竞争种的定居而重现的因子(例如,火、洪水或长期土壤积水而引起的缺氧、周期性干旱、结冰温度、定期收获、刀耕火种)。在生态修复过程中,为了减少或根除不需要的物种(如外来入侵种),引进有价值的物种(如菌根真菌、固氮细菌、土壤动物),需要进行生物群操作。适应性强的动物一般会主动进入所恢复的生境中。例如,通过为鸟类提供栖木,为小动物散布遮盖用的粗糙碎石,在溪流中为大型非脊椎动物准备许多不同的基质作为生境改良手段,可以吸引更多动物到所恢复的生境中来。在生态系统恢复的早期阶段,物种选择主要通过生存来影响恢复成功^[25]。然而,在长期尺度上,物种选择不仅会通过物种特征,还会通过生物多样性效应影响恢复的成败^[43]。

3 全球变化下的适地适树问题

当前,全球变化已成为不争的事实。气候变化下适地适树的要点也会有所不同。如果说气候变化前的生态恢复强调的是恢复生态系统历史上的状态的话,那么气候变化下的生态恢复则需要一定程

度的环境和生物改造,包括适应性生境的营造和帮助物种迁移或选育更耐受气候变化的物种,而且这两方面要结合起来,即在生态恢复中适地和适树要结合起来。制定具体实施时,要综合考虑应对突发性的生态系统受损(如台风、干旱、冰雪等突发环境胁迫损害)、特定生物类群(地区特有物种、濒危极小种群等)的保护和恢复、恢复用生物种质库(各级就地和迁地保护与物种开发培育基地)的建设等。

以造林为例,全球变化下需要考虑选用什么树种造林和何时造林的问题,这些问题的重要性不亚于可能适合造林的林地面积极。Xu 等^[3]指出,使用不适应树种的造林项目存活率较低,并可能造成土壤水分枯竭,进而威胁到森林碳储量的稳定性。因此,在造林项目中需要选择适当的森林树种。此外,造林树种的选择需要进一步考虑不同树种固碳能力的差异。在全球变化背景下,“用什么造林?”与“什么时候造林?”以及“在哪里造林?”需要同步考虑。

目前,地球上大约有 3×10^{12} 棵树,这个数量只是 12 000 年前人类文明开始时的一半。联合国有关机构提出了种植 1×10^{12} 棵树的计划,并已付诸实施。在这个过程中,在适当的地方种植适当的树种特别重要。适地与适树二者是一个错综复杂的矛盾统一体,需要同时考虑。可以预期,大数据和人工智能时代背景下,全球和区域尺度生物多样性和生态系统质量精准监测、模拟和数据共享与获取技术,生物多样性保护与生态系统服务供需矛盾重点区域的精准识别技术,以及物种适应性区域演变模拟等技术的快速发展将为全球变化背景下植被恢复决策和适地适树原则的实施提供更为有力的支撑保障^[44-46]。通过适地适树建立的植被与区域环境条件更为契合,健康水平和自组织发展潜力更强,构建和管护的全生命周期成本更低,将可以在一定程度上缓解气候变化的影响,保护和恢复生物多样性,恢复退化的生态系统并提供多重生态系统服务,最终为建立人与自然和谐共生的可持续发展提供支撑。

参考文献

- [1] WANG R S. Eco-cybernetics and road map of integration towards ecological civilization with a discussion on misunderstandings [J]. Bull Chin Acad Sci, 2013, 28(2): 173–181. [王如松. 生态文明建设的控制论机理、认识误区与融贯路径 [J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(2):

- 173–181.]
- [2] XU H, YUE C, ZHANG Y, et al. Forestation at the right time with the right species can generate persistent carbon benefits in China [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2023, 120(41): e2304988120. doi: 10.1073/pnas.2304988120.
- [3] LI F, CHENG C N, YANG R. A review of ecosystem restoration: Progress and prospects of domestic and abroad [J]. *Biodiv Sci*, 2022, 30(10): 22519. [李锋, 成超男, 杨锐. 生态系统修复国内外研究进展与展望 [J]. *生物多样性*, 2022, 30(10): 22519. doi: 10.17520/biods.2022519.]
- [4] YANG R, CAO Y. Rewilding: New ideas for ecological protection and restoration projects of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, 39(23): 8763–8770. [杨锐, 曹越. “再野化”: 山水林田湖草生态保护修复的新思路 [J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8763–8770. doi: 10.5846/stxb201907301612.]
- [5] REN H. Succession theory and vegetation restoration [J]. *Guihaia*, 2023, 43(8): 1516–1523. [任海. 演替理论与植被恢复 [J]. *广西植物*, 2023, 43(8): 1516–1523. doi: 10.11931/guihaia.gxzw202303006.]
- [6] REN H, PENG S L, LU H F. The restoration of degraded ecosystems and restoration ecology [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, 24(8): 1756–1764. [任海, 彭少麟, 陆宏芳. 退化生态系统恢复与恢复生态学 [J]. *生态学报*, 2004, 24(8): 1756–1764. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2004.08.025.]
- [7] REN H, WANG J, LU H F. Theories and research advances of restoration ecology [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(15): 4117–4124. [任海, 王俊, 陆宏芳. 恢复生态学的理论与研究进展 [J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4117–4124. doi: 10.5846/stxb201305301238.]
- [8] SUN S X. Silviculture [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1992. [孙时轩. 造林学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.]
- [9] YANG P, CHEN H Y, XUE L. The advances in studies on matching tree species with site [J]. *Shanxi For Sci Technol*, 2003(S1): 1–4. [杨鹏, 陈红跃, 薛立. 适地适树研究进展 [J]. *山西林业科技*, 2003(S1): 1–4.]
- [10] SHEN G F. Connotation analysis of scientific greening [J]. *Land Green*, 2022(5): 24–29. [沈国舫. 科学绿化的内涵辨析 [J]. *国土绿化*, 2022(5): 24–29.]
- [11] GU Y K. To adhere to the basic principles in ecology of matching species with the site [J]. *Guangdong Landsc Archit*, 2008, 30(3): 79–80. [古炎坤. 必须坚持“适地适树”这一生态学的基本原则 [J]. *广东园林*, 2008, 30(3): 79–80. doi: 10.3969/j.issn.1671-2641.2008.03.026.]
- [12] YANG Y L. Causes and safeguard measures for low survival rate of afforestation [J]. *Green Environ Prot Build Mat*, 2016(12): 217. [杨艳丽. 造林成活率低的成因及保障措施 [J]. *绿色环保建材*, 2016(12): 217. doi: 10.16767/j.cnki.10-1213/tu.2016.12.191.]
- [13] CROUZEILLES R, CURRAN M, FERREIRA M S, et al. A global meta-analysis on the ecological drivers of forest restoration success [J]. *Nat Commun*, 2016, 7: 11666. doi: 10.1038/ncomms11666.
- [14] YU F K, HUANG X H, WANG K Q, et al. An overview of ecological degradation and restoration of *Eucalyptus* plantation [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2009, 17(2): 393–398. [于福科, 黄新会, 王克勤, 等. 桉树人工林生态退化与恢复研究进展 [J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(2): 393–398. doi: 10.3724/SP.J.1011.2009.00393.]
- [15] LI X Y, TENG Y F. Ecological problems and sustainable development in the central region of the Hexi Corridor: Take Zhangye City as the case [J]. *Gansu Sci Technol*, 2007, 23(1): 7–9. [李小燕, 滕玉凤. 河西走廊中部生态问题与可持续发展——以张掖市为例 [J]. *甘肃科技*, 2007, 23(1): 7–9.]
- [16] HAN T T, LU H F, LÜ Y H, et al. Assessing the effects of vegetation cover changes on resource utilization and conservation from a systematic analysis aspect [J]. *J Clean Prod*, 2021, 293: 126102. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126102.
- [17] YU G R, LIU S R, et al. Assessment Report on the Quality and Management Status of Forest Ecosystems in China [M]. Beijing: Science Press, 2023: 537. [于贵瑞, 刘世荣, 等. 中国森林生态系统质量与管理现状评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2023: 537.]
- [18] HUANG W S, LIN J. Several issues on forestry ecological construction in Fujian [J]. *J Fujian Agric For Univ (Philos Soc Sci)*, 2014, 17(1): 64–67. [黄旺生, 林洁. 福建林业生态建设若干问题的思考 [J]. *福建农林大学学报(哲学社会科学版)*, 2014, 17(1): 64–67. doi: 10.13322/j.cnki.fjsk.2014.01.004.]
- [19] CHEN S L, HE S Q. New China Knowledge Handbook [M]. Wuhan: Hubei Renmin Press, 1999: 142. [陈少岚, 何士青. 新中国知识手册 [M]. 武汉: 湖北人民出版社, 1999: 142.]
- [20] DI SACCO A, HARDWICK K A, BLAKESLEY D, et al. Ten golden rules for reforestation to optimize carbon sequestration, biodiversity recovery and livelihood benefits [J]. *Glob Chang Biol*, 2021, 27(7): 1328–1348. doi: 10.1111/gcb.15498.
- [21] HOU P, GAO J X, CHEN Y, et al. Development process and characteristics of China's ecological protection policy [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, 41(4): 1656–1667. [侯鹏, 高吉喜, 陈妍, 等. 中国生态保护政策发展历程及其演进特征 [J]. *生态学报*, 2021, 41(4): 1656–1667. doi: 10.5846/stxb202002260345.]
- [22] HAQ S M, PIERONI A, BUSSMANN R W, et al. Integrating traditional ecological knowledge into habitat restoration: Implications for meeting forest restoration challenges [J]. *J Ethnobiol Ethnomed*, 2023, 19(1): 33. doi: 10.1186/s13002-023-00606-3.
- [23] YUAN E S, ZHOU Q W, LUO Y Z. Contribution of socioeconomic factors to vegetation restoration in karst areas of southwest China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2024, 44(14): 6265–6275. [袁二双, 周秋文, 罗应忠. 社会经济因素对中国西南喀斯特区植被恢复的贡献 [J]. *生态学报*, 2024, 44(14): 6265–6275. doi: 10.20103/j.stxb.202310302353]

- [24] CitiesWithNature. Growing a healthy planet: Ten tips for planting the right trees in the right places [EB/OL]. <https://citieswithnature.org/growing-a-healthy-planet-ten-tips-for-planting-the-right-trees-in-the-right-places/>.
- [25] REN H, LIU Q, LI L H, et al. Restoration Ecology [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2019. [任海, 刘庆, 李凌浩, 等. 恢复生态学导论 [M]. 第 3 版. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [26] REN H. Vegetation Landscape in Tropical Islands and Coasts [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2020. [任海. 热带海岛及海岸带植被景观 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2020.]
- [27] FREMOUT T, GUTIÉRREZ-MIRANDA C E, BRIERS S, et al. The value of local ecological knowledge to guide tree species selection in tropical dry forest restoration [J]. Restor Ecol, 2021, 29(4): e13347. doi: 10.1111/rec.13347.
- [28] LIU C X, HAN L B. Review of researches in vegetation restoration of freeway slopes [J]. Acta Ecol Sin, 2007, 27(5): 2090–2098. [刘春霞, 韩烈保. 高速公路边坡植被恢复研究进展 [J]. 生态学报, 2007, 27(5): 2090–2098. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2007.05.050.]
- [29] FREMOUT T, THOMAS E, TAEDOUHG H, et al. Diversity for Restoration (D4R): Guiding the selection of tree species and seed sources for climate-resilient restoration of tropical forest landscapes [J]. J Appl Ecol, 2022, 59(3): 664–679. doi: 10.1111/1365-2664.14079.
- [30] BATEMAN I J, ANDERSON K, ARGLES A, et al. A review of planting principles to identify the right place for the right tree for ‘net zero plus’ woodlands: Applying a place-based natural capital framework for sustainable, efficient and equitable (SEE) decisions [J]. People Nat, 2023, 5(2): 271–301. doi: 10.1002/pan3.10331.
- [31] THOMAS E, JALONEN R, LOO J, et al. Genetic considerations in ecosystem restoration using native tree species [J]. For Ecol Manage, 2014, 333: 66–75. doi: 10.1016/j.foreco.2014.07.015.
- [32] LU Y, RANJITKAR S, HARRISON R D, et al. Selection of native tree species for subtropical forest restoration in southwest China [J]. PLoS ONE, 2017, 12(1): e0170418. doi: 10.1371/journal.pone.0170418.
- [33] YANG L, LIU N, REN H, et al. Facilitation by two exotic *Acacia*: *Acacia auriculiformis* and *Acacia mangium* as nurse plants in south China [J]. For Ecol Manage, 2009, 257(8): 1786–1793. doi: 10.1016/j.foreco.2009.01.033.
- [34] WANG C, LIU H, ZHU L W, et al. Which traits are necessary to quickly select suitable plant species for ecological restoration? [J]. Ecol Solut Evid, 2021, 2(4): e12102. doi: 10.1002/2688-8319.12102.
- [35] REN H, LI P, ZHONG H C, et al. The restoration of degraded island ecosystem [J]. Ecol Sci, 2001, 20(1/2): 60–64. [任海, 李萍, 周厚诚, 等. 海岛退化生态系统的恢复 [J]. 生态科学, 2001, 20(1/2): 60–64. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2001.01.012]
- [36] REN H, JIAN S G, ZHANG Q M, et al. Plants and vegetation on South China Sea Islands [J]. Ecol Environ Sci, 2017, 26(10): 1639–1648. [任海, 简曙光, 张倩媚, 等. 中国南海诸岛的植物和植被现状 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1639–1648. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.10.001.]
- [37] YU Y H, YU Y, YANG S M, et al. Research progress in characteristics of plant ecological adaptability and selection of keynote species [J]. World For Res, 2016, 29(6): 38–42. [喻阳华, 余杨, 杨苏茂, 等. 植物生态适应性特征及关键种选择研究进展 [J]. 世界林业研究, 2016, 29(6): 38–42. doi: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2016.06.005.]
- [38] ZHANG L, SUN P S, HUETTMANN F, et al. Where should China practice forestry in a warming world? [J]. Glob Change Biol, 2022, 28(7): 2461–2475. doi: 10.1111/gcb.16065.
- [39] REN H. A review on the studies of desertification process and restoration mechanism of karst rocky ecosystem [J]. Trop Geogr, 2005, 25(3): 195–200. [任海. 喀斯特山地生态系统石漠化过程及其恢复研究综述 [J]. 热带地理, 2005, 25(3): 195–200. doi: 10.3969/j.issn.1001-5221.2005.03.001.]
- [40] DE SOUZA D C, ENGEL V L. Advances, challenges, and directions for ecological restoration by direct seeding of trees: Lessons from Brazil [J]. Biol Conserv, 2023, 284: 110172. doi: 10.1016/j.biocon.2023.110172.
- [41] CUI H O, LIU M. Analysis on the results of the 9th national forest inventory [J]. J West China For Sci, 2020, 49(5): 90–95. [崔海鸥, 刘珉. 我国第九次森林资源清查中的资源动态研究 [J]. 西部林业科学, 2020, 49(5): 90–95. doi: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2020.05.014.]
- [42] HUANG Y, GUO Q R, REN H, et al. Investigation of heavy metal pollution in vegetables in the Pearl River delta: A case study of Zhongshan and Dongguan [J]. Ecol Environ, 2005, 14(4): 559–561. [黄勇, 郭庆荣, 任海, 等. 珠江三角洲典型地区蔬菜重金属污染现状研究——以中山市和东莞市为例 [J]. 生态环境, 2005, 14(4): 559–561. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2005.04.022.]
- [43] GUERRERO-RAMÍREZ N R. Functional forest restoration [J]. Nat Ecol Evol, 2021, 5(12): 1572–1573. doi: 10.1038/s41559-021-01575-0.
- [44] GONZALEZ A, VIHERRAARA P, BALVANERA P et al. A global biodiversity observing system to unite monitoring and guide action [J]. Nat Ecol Evol, 2023, 7(12): 1947–1952. doi: 10.1038/s41559-023-02171-0.
- [45] ZUANNY D C, VILELA B, MOONLIGHT P W, et al. expowo: An R package for mining global plant diversity and distribution data [J/OL]. Appl Plant Sci, 2024, e11609. [2024-07-30]. doi: 10.1002/aps3.11609.
- [46] DING Q, WANG L, FU M C, et al. An integrated system for rapid assessment of ecological quality based on remote sensing data [J]. Environ Sci Poll Res, 2020, 27(26): 32779–32795. doi: 10.1007/s11356-020-09424-6.