

[编者按] 2019年是新中国70华诞,也是中国科学院华南植物研究所(园)成立90周年。为了反映中国科学院华南植物园的科研进展和成果,我们围绕中国科学院华南植物园的重点学科领域广泛征集稿件,精选了14篇集中出版,内容涵盖了植物系统发育学、植物生理学、植物分子生物学、植物生态学和植物化学等学科方向,这些稿件在反映中国科学院华南植物园科研工作进展的同时,也对相关学科的发展具有参考价值。

植被生态系统恢复及其在华南的研究进展

任海^{1*}, 陆宏芳¹, 李意德², 温远光³

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国林科院热带林业研究所, 广州 510520; 3. 广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 南宁 530004)

摘要: 介绍了恢复生态学常用的理论, 并指出恢复生态学研究大多涉及植被生态系统恢复。植被恢复的目标就是要恢复植被的合理结构、功能和动态过程, 从而为人类提供生态系统服务。植被恢复可以把区域的地带性植被生态系统作为参考生态系统, 但目前的植被恢复工作绝大部分只是恢复了植被生态系统的部分组成、结构和功能。植被生态系统恢复研究主要从退化的原因与过程、恢复的过程与机理, 以及从生境恢复、种群恢复、群落恢复、生态系统和景观恢复等不同尺度上的恢复开展。在介绍华南地区的植被生态系统现存问题的基础上, 对华南地区开展的植被生态系统恢复, 尤其是华南植物研究所(园)开展的植被生态系统恢复研究进行了介绍。最后, 提出了华南地区植被生态系统恢复的方向及发展趋势。

关键词: 生态恢复; 植被恢复; 广东; 广西; 海南; 港澳

doi: 10.11926/jtsb.4049

Vegetation Restoration and Its Research Advancement in Southern China

REN Hai¹, LU Hong-fang¹, LI Yi-de², WEN Yuan-guang³

(1. *South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China*; 2. *Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China*; 3. *Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Forestry College, Guangxi University, Nanning 530004, China*)

Abstract: This review introduced the general theories on restoration ecology, especially on vegetation restoration theories. The target of vegetation restoration is to reconstruct the reasonable structure, function and dynamic processes of vegetation ecosystems, for improving/optimizing ecosystem services. The climax in the region can be taken as the reference ecosystem for vegetation restoration, but only part of the composition, structure, and function were restored in practice. Most of the vegetation restoration studies were focused on the causes and processes of degradation, and processes and mechanisms of restoration/reconstruction, companied with restoration practices on habitation, population, community, ecosystem and landscape scales. Based on a statement of problems in current vegetation ecosystems in southern China, a systemic review was given out about the vegetation restoration in southern China, especially the vegetation restoration researches carried out by South China Botanical Institute (Garden). Finally, the trends of vegetation restoration researches and practices in southern China were pointed out.

Key words: Ecological restoration; Vegetation restoration/reconstruction; Guangdong; Guangxi; Hainan; Hong Kong and Macao

收稿日期: 2019-02-20 接受日期: 2019-04-22

基金项目: 中国科学院战略先导 A 项目(XDA13020000)资助

The work was supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA13020000).

作者简介: 任海(1970~), 男, 研究员, 主要从事植被恢复生态学和植物保育生物学研究。

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: renhai@scbg.ac.cn

1 植被生态系统恢复研究进展

由于自然和人为干扰,世界各地形成了大量退化生态系统,这些退化生态系统的存在已严重影响人类的可持续发展,急需开展生态恢复。生态恢复是指帮助那些退化、受损或毁坏的生态系统恢复的过程^[1]。恢复生态学是研究生态恢复的生态学原理和过程的科学,自 1987 年诞生以来发展迅速^[2-6]。早期恢复生态学强调以人类福祉为中心,以将受损的生态系统恢复到原始的理想状态为核心目标;近年来则逐渐转为强调以生态系统为中心,且不再以恢复到原始的、理想状态为目的^[7]。

生态恢复实践或恢复生态学研究常用的生态学理论或内容包括:生态因子作用(包括主导因子、耐性定律、最小量定律等)、竞争、生态位、演替、定居限制、护理效应、互利共生、啃食/捕食限制、干扰、岛屿生物地理学、生态系统功能、生态型、遗传多样性等。从上述理论内容看,定居限制、竞争和演替理论是恢复生态学的基础^[8-9]。近年来,生态型和区域遗传多样性、健康生态系统、植被连续变化准则、异质种群动态、尺度概念、适应性网络模型、正反馈在生态恢复中的作用、启动自然恢复的途径等也在生态恢复领域受到重视^[6-7,10-12]。当然,恢复生态学在其自身发展过程中也产生一些理论,如状态过渡模型及阈值、集合规则、参考生态系统、人为设计和自我设计、适应性恢复等^[7,13]。此外,随着恢复生态学实践的发展,在生境、种群、群落、生态系统、景观等不同尺度均取得了一些进展^[11]。近年来,生物多样性保护与利用、可持续发展、全球变化、人类干扰、生态经济和社会因素也被纳入到生态恢复的考虑范畴,成为恢复生态学理论与实践工作的新热点。

自恢复生态学诞生以来,植被生态系统恢复就占据了研究的主体。Kollmann 等^[14]基于 2004-2013 年间的 224 篇论文分析,发现大多数恢复生态学研究以森林为研究对象,其次是草原和淡水生态系统,湿地或海洋生境最少。在这些研究中,只有 14% 的研究分析了生态系统功能,44% 考虑了生物组成和功能,42% 专门研究生物组分,且主要是维管束植物,其次是无脊椎动物或脊椎动物,最少的是微生物。生态系统功能主要集中在养分循环研究(26%)上,对于生产力(18%)、水分关系(16%)和地貌过程(14%)的研究相对较少,碳沉积(10%)、分解(6%)和

营养相互作用的研究(6%)很少。

植被恢复研究主要有 4 类^[15],即恢复(rehabilitation, 恢复理想的种类组成、结构和过程)、重建(reconstruction, 恢复乡土植物群落并有利用的目的,如农业)、开垦(reclamation, 在严重退化土地上的植被种植,如废弃矿地上)和替代(replacement, 为应对全球变化等用新的种类或基因型替代原乡土种或基因型)。植被恢复最关键的是以恢复功能为中心,同时注意气候变化、遗传因素、景观尺度及社会经济问题的影响^[16]。

植被恢复目标或成功标准的内核是恢复植被的合理结构、功能和动态过程,进而为人类提供生态系统服务,可以把原始生态系统作为参考生态系统。由于全球变化及历史变迁,植被生态系统不可能再恢复到历史上的“全原始”状态,恢复必须放在各种自然和人为影响的不同等级尺度过程下考虑,至少要考虑大气和气候、地理、地貌、水文(地表和地下水)、土壤(土层发育、淋溶、酸化、有机质积累)、植被(演替)、动物等自然过程;同时考虑这些过程可能受到的人类干扰,进而设计出对应的恢复方式及对策^[17]。目前已有很多关于植被恢复的目标及成功标准的探讨,除了关注结构、功能和动态过程的恢复外,还有可持续性(可自然更新)、不可入侵性、有一定的生产力和营养保持力、具有生物间的相互作用平衡、有一定的生态系统服务功能等^[18]。国际恢复生态学会^[1]提出了 9 个特征作为判定生态恢复是否成功的标准:(1) 生态系统恢复后的特征应该与参照系统类似,而且有适当的群落结构;(2) 生态系统恢复后有尽可能多的乡土种,在恢复后的植被生态系统中,允许外来驯化种,非入侵性杂草和作物的协同进化种存在;(3) 生态系统恢复后,维持系统持续演化或稳定所必须的所有功能群都出现了,如果它们没出现,在自然条件下也应该有重新定居的可能性;(4) 生态系统恢复后的环境应该能够保证那些对维持生态系统稳定或沿正确方向演化起关键作用的物种的繁殖;(5) 生态系统恢复后在其所处演化阶段的生态功能正常,没有功能失常的征兆;(6) 生态系统恢复后能较好地融入区域大景观或生态系统组群中,并通过生物和非生物流与其它系统相互作用;(7) 周围景观中对恢复生态系统的健康和完整性构成威胁的潜在因素得到消除或已经减轻到最低程度;(8) 恢复的生态系统能对正常的、周期性的环境压力保持良好的

弹性, 从而维持生态系统的完整性; (9) 具有与参照生态系统相当的系统自我维持能力; 即在现有条件下, 恢复的生态系统应当具有自我维持无限长时间的潜能。

植被恢复可能离不开回到历史状态的目标, 但由于全球变化及条件限制等问题, 不是所有植被恢复都要恢复到原生的植被类型, 恢复必要的结构、生态系统功能、生态系统服务, 并能够自我维持即可。Moreno-Mateos 等^[19]对全球 621 个湿地恢复案例的分析表明, 即使有一定年限的恢复, 相对于参考生态系统, 也只有 23%~26%的生物结构(主要由植物集合驱动)和生物地球化学功能(主要由土壤碳库驱动)得以恢复。Moreno-Mateos 等^[20]分析了全球 3 035 个生态恢复案例后认为, 与参考生态系统相比, 恢复的生态系统的物种丰度减少 46%~51%, 物种多样性下降 27%~33%, 碳循环速率减少 32%~42%, 氮循环速率减少 31%~41%, 这个结果与生物群落有关, 但与退化因素无关。恢复的生态系统比未受干扰的生态系统的物种丰度、多样性更少, 碳氮循环速率更低。Crouzeilles 等^[21]分析了全球 133 个热带森林恢复案例后认为, 与自然更新相比, 积极的生态恢复(控制一些生物和非生物因子)可以将生物多样性(植物、鸟类和无脊椎动物)从 34%提升到 56%, 而植被结构(盖度、密度、凋落物、生物量和高度)可从 19%提升到 56%。此外, 生态系统恢复还可以增强传粉网络的抵抗力和功能。

植被恢复的过程包括规划、设计、实施、善后 4 个阶段; 具体如下: 接受植被恢复项目→明确植被恢复对象、确定系统边界(生态系统层次与级别、时空尺度与规模、结构与功能)→生态系统退化的诊断(退化原因、退化类型、退化过程、退化阶段、退化强度)→退化生态系统的健康评估(历史上原生类型与现状评估, 找出限制因子)→结合恢复目标和原则进行决策(是恢复、重建或改建, 可行性分析, 生态经济风险评估, 优化方案)→生态恢复与重建的实地试验、示范与推广→生态恢复与重建过程中的调整与改进→生态恢复与重建的后续监测、预测与评价以及可能的适应性管理^[18]。

当前, 植被生态系统恢复的机理研究已从静态研究、单一状态研究、基于结构的方法和集中于某一类型生态系统研究转向动态研究、多状态研究、基于过程的方法和多维向的综合恢复评价标准研究。关于植被生态系统恢复主要从两个角度开展机

理研究: 一个角度是从退化的原因与过程、恢复的过程与机理; 另一角度是在生境恢复、种群恢复、群落恢复、生态系统和景观恢复(含全球变化和社会经济因素)等不同尺度上的恢复^[7,11]。

从退化到恢复过程的角度看, 目前对植被及其生态系统退化的原因, 尤其是干扰的作用机理已基本研究清楚, 对不同气候区、不同植被类型、不同退化程度的植被生态系统恢复的步骤也已基本明确^[22]。这些研究主要来源于林业实践, 多集中在植被退化的基本特征及其生态后果、植被恢复目标及其生态学原理、干扰体系对退化植被系统的影响、植被恢复途径与技术(背景调查、策略制订、规划设计、物种选择、群落配置、监测与优化), 以及植被恢复对环境的影响和效益等。例如, 理解演替过程中的时间序列、植物多样性和组成、群落结构、土壤理化性状、植物物候、传粉、动植物相互作用是进行森林恢复的关键^[23]。日本的 Miyawaki 根据演替理论, 采用地方乡土树种的种子进行营养杯育苗, 配以适当的土壤改良, 在较短的时间内成功建立了当地气候的顶极群落^[24]。美国夏威夷由于人为干扰及退化, 自然植被有半数被转换成了非乡土植物, 在恢复中种植了大量乡土种及珍稀濒危种, 控制入侵种, 借鉴林业产业中的植物生产、杂草控制和林地准备等以减少成本, 并且注意人工恢复的群落与自然群落间的有效连接以促进扩散作用^[25]。总体上看, 植被恢复对土壤水分、土壤密度、土壤有机质、土壤氮含量的提升等 4 个方面均有正面影响。

在不同尺度上的恢复机理研究均有大量报道, 其中在群落和生态系统尺度的进展尤其显著。当前的森林恢复研究日益强调恢复过程中生物多样性与生态系统功能的耦合发展; 系统多功能的和稳定的恢复就要求多物种, 而且这些种类可以集聚不同的功能, 也需要同时考虑功能多样性、遗传多样性和地上地下的联系^[26]。已有试验证明, 砍伐后的森林或有残存林的地方因为有乡土种源可以恢复成森林, 但对于清光植物的林地即使恢复, 物种多样性也较低且一些功能群会丧失。植被恢复时, 种植演替后期阶段物种可以优化群落结构和增加物种多样性; 种植大果和耐阴种可在林冠层下形成新的多样性树岛; 种植先锋种和固氮树种可以加速林冠遮荫层的形成, 并促进演替后期种的定居和更新; 在森林完全消失且土壤和植被完全改变的地方只能通过造林形成森林; 在林下种植演替后期阶段的

耐阴种可增加种类组成和优化群落结构^[27]。生态过程影响植被更新,水、土、气、生等生态因子均会影响树种定居、生长和种子扩散^[28]。热带干旱森林中的植物多具有小、干和靠风媒传播的种子。在小尺度上,风传播种子的种类比脊椎动物传播种子的种类更易于在退化土地上定居,其中一个重要的原因是靠风媒传播的小种子含水量相对较低,不易干燥失水,而这正是限制其他物种在退化光裸地定居的一个主要因素。土壤中的种子在雨季早期更易萌发,并有足够的时间生长。然而,降雨变化和频繁干旱则会导致种子和幼苗的死亡;在干季收集种子并在土壤足够潮湿时种植,可以增加幼苗建立,缩短建立时间并降低被采食的机率。在干旱时,阴蔽的地方有利于种子的萌发和幼苗的建立,但开阔地则更易于幼苗的生长;因此,对幼苗期的恢复林地进行植物修剪可以促进植物的生长和存活^[29]。模拟长期未受干扰的天然林或原始林结构,将人工林异龄化混交,可以最大化地利用自然过程加速森林的自组织发展^[30]。

2 华南植被生态系统恢复研究进展

华南地区从行政区划上包括广东、广西、海南、香港和澳门,面积约 $4.529 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。广义自然地理上的华南地区还包括福建和台湾。华南地区的北界是南亚热带与中亚热带的分界线,大部分处于 25°N 以南的中低纬度地区。华南地区受季风气候影响,高温多雨,最冷月平均气温 $\geq 10^\circ \text{C}$, 极端最低气温 $\geq -4^\circ \text{C}$ 。年降水量为 $1\,400 \sim 2\,000 \text{ mm}$ 。华南地区的地带性植被主要有热带雨林、季雨林和南亚热带季风常绿阔叶林等,他们受人为干扰,形成的退化植被有热带灌丛、亚热带草坡和残存的次生林。此外华南地区还有红树林、人工林和经济作物等植被类型。华南地区丘陵面积较多,地带性土壤主要是砖红壤和赤红壤^[31]。

华南地区人口密度大,也是我国东部沿海经济高速发展区域,自然植被生态系统长期受到人为干扰。广东、广西和海南三省的原始森林面积从建国初期的约 $3.53 \times 10^5 \text{ km}^2$ 降至 1996 年的约 $7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[32];区域内森林、农田等生态系统总退化面积约占 78.8%^[3,33]。经不懈的努力恢复,目前三省区森林覆盖度均已超过 51%,森林面积已恢复至 $2.336 \times 10^5 \text{ km}^2$,其中人工林面积达 $1.329 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[34]。当前

华南地区的森林植被主要存在如下问题:(1) 人工林占比过大,超过森林总面积的 58%;(2) 人工林种类单一,且以针叶林为主,超过森林面积的 53%;(3) 大量使用外来种,广东、广西和海南三省是桉树人工林的集中分布区,占全国桉树人工林总面积的 79%^[35];(4) 林分空间、年龄和密度结构不尽合理,多为同龄林且结构发育还不够成熟、稳定,部分人工林老化;(5) 林分质量较低,经济与生态功能弱,忽视生态系统健康要求的异质性;(6) 由人工林转向近自然植物群落(生态公益林)的过程中忽略了种间的交互作用和生态功能;(7) 林分天然更新较差,近年来随着弃耕地的增多,从这些退化坡地自然演替/恢复形成森林的过程还比较慢。华南地区的植被生态系统恢复主要围绕上述问题开展,与区域的社会经济发展,尤其是林业的发展息息相关。例如,1958 年国家启动的“植被改造自然”活动,1985 年广东开展的“五年消灭荒山、十年绿化广东”,以及随后开展的“新一轮绿化广东大行动”,十八大以后兴起的生态文明建设、美丽中国建设等都促进了植被生态恢复工作。

中国科学院华南植物研究所作为华南地区主要的植被生态恢复研究机构,开展了大量相关研究。于 1955 年设立了生态地植物学研究室,开展华南地区面上植被调查,并于 1976 出版了《广东植被》^[36](含现海南省),这是中国最早的区域植被专著;该工作为《中国植被图》^[37](2011 年获国家自然科学二等奖)的编撰提供了重要支撑。在此之后,还承担了《广东海岛植被和林业》^[38]、《广东山区植被》^[39]的调查与编撰工作。1978 年建立了鼎湖山森林生态系统定位研究站,该站长期定位研究南亚热带季风常绿阔叶林的结构、功能和动态,及其对全球变化的响应;“华南热带亚热带森林生态系统恢复/演替碳、氮、水演变机理”获得 2006 年广东省科学技术一等奖、2008 年国家自然科学二等奖;“热带亚热带生物与非生物固碳过程及其对环境变化的响应”获 2018 年度广东省自然科学一等奖。这些对自然植被的研究,为区域植被生态系统的恢复提供了理论基础。

在恢复生态学领域,华南植物研究所于 1959 年建立了小良热带人工森林生态系统定位研究站,开展热带季雨林的生态恢复,这是目前已知中国最早开展的恢复生态学研究;1984 年建立了鹤山丘陵综合试验站;2009 年建立了中国科学院退化生态系统

植被恢复与管理重点实验室。华南植物研究所(2003年更名为华南植物园)获得了一批生态恢复的成果奖,如:“广东热带沿海侵蚀地的植被恢复途径及其效应”获1986年中国科学院科技进步一等奖、1989年国家科技进步二等奖,该项成果提出了“在一定的人工启动下,热带极度退化的森林可恢复;退化生态系统的恢复可分三步走;恢复过程中植物多样性直接影响动物和微生物的多样性,植物多样性是生态系统稳定性的基础”等观点^[40]。此后,“热带亚热带植被恢复生态学研究”获1999年中国科学院科技进步一等奖,“森林动态学理论及其应用”获1999年广东省自然科学一等奖,“梅州沙田柚优质高产技术研究”2002年获广东省科技进步一等奖,“华南珍稀濒危植物的野外回归研究与应用”获2012年广东省科学技术一等奖,“乡土植物在生态园林中应用的关键技术研究及产业化”获2013年广东省科学技术一等奖,“南亚热带典型林分提质增效关键技术与应用”获2015年广东省科学技术一等奖,“中国南海岛屿植物多样性研究及产业化”获2016年广东省科学技术一等奖。

华南植物研究所(园)60多年的生态学学科发展与华南乃至中国生态学学科发展是同步的,经历了由面上向定位、由定性向定量、由中观向微宏观、由野外调查向野外控制实验的发展历程。在这一发展进程中,华南植物园为中国乃至世界的植被生态系统恢复研究做出了应有的贡献^[41]。

在广东省范围内,中山大学、华南理工大学、华南农业大学、广东省土壤与生态环境研究所、广东省微生物研究所、华南植物研究所(园)还开展了大量废弃矿地、重金属污染土壤和水体的生物(含植物和微生物)修复工作。广东省土壤与生态环境研究所、广州地理所、华南植物研究所(园)等开展了区域丘陵坡地利用植物与工程措施治理水土流失的工作^[42-44]。广东省林业科学院、中国林业科学院热带林业研究所开展了区域森林生态系统和防护林快速构建及典型人工林改造提质工作。中山大学的彭少麟等报道广东森林在1979-1998年均固碳118.05 Mt,相当于广东年排放量的约一半^[45]。中国林业科学院热带林业研究所^[46-47]和华南植物园^[48-50]还开展了红树林恢复工作,其中“红树林主要树种造林与经营技术研究”获2001年国家科技进步二等奖,“红树林快速恢复与重建技术研究”获2014年广东省科学技术一等奖。华南植物园还开展了华南海岸

带^[51-52]和珊瑚岛礁植被恢复与建设工作^[53-54]。

广西在20世纪50年代结合自然资源综合考察,开展了区域性的植被调查^[55];60年代初开始对植被进行有计划的系统调查研究;80年代以来,根据海岸带植被调查、自然保护区建设和环境影响评价工作的需要,对广西海岸带植被、数十个自然保护区进行了全面的科学考察,对重大工程项目建设区域的植被也进行了广泛的调查,积累了丰富的第一手资料,出版了大量的植被和植物群落学研究论著^[56]。代表性的著作如《广西大瑶山自然资源考察》^[57]、《广西森林》^[55]、《广西热带和亚热带山地的植物多样性及群落特征》^[58]、《生物多样性关键地区——广西元宝山科学考察研究》、《生物多样性关键地区——广西九万山自然保护区科学考察集》^[59-60]、《广西植被志要》(上下册)^[61]等。“广西海岸带和海涂资源综合调查”获1988年广西壮族自治区科技进步一等奖。这些自然植被的研究成果成为区域植被生态系统恢复的理论基础和重要参照系。

近100年来,广西植被发生了巨大的变化,天然植被大幅减少,人工植被迅速增加,原生性植被锐减,次生植被类型猛增,造成一些地区水土流失严重,石漠化加剧,已严重影响区域生态安全、资源安全和可持续发展^[56]。在广西区域内,广西大学林学院、广西植物研究所、中国林业科学研究院热带林业实验中心、中国地质调查局岩溶地质研究所等单位还开展了大量的岩溶地区石漠化植被生态系统修复和人工林近自然化改造工作。针对松、杉、桉人工纯林地力退化问题和石漠化植被恢复技术难题,创新性地研发了基于林下种植珍贵树种的松、杉人工林高效改造技术体系^[62-63],以及引入固氮珍贵树种提升桉树人工林地力与生物多样性和石漠化植被恢复重建技术^[63-65]。广西马山石漠化植被生态系统恢复实践表明,应用自肥功能强、水分利用效率高的豆科固氮植物功能群驱动石漠化植被生态系统的恢复可获得更为快速、高效的恢复效果,也创造了石漠化区域造林10个月郁闭,18个月成林的奇迹^[66-67]。广西还基于石漠化植被修复环境和资源特点,开展多目标、多价值、多用途、多产品和多服务的多样化植被修复模式设计研究,并深入开展了可持续经营技术研发示范工作,以及广西沿海地区的红树林滩涂长期生态修复实践工作^[68]。这些成果为我国南方大面积低质低效人工林改造、石漠化治理、红树林修复和森林质量精准提

升开拓了新的技术路径。

海南岛地处亚洲热带北缘的季风气候区,其森林植被的生态特征既富于热带性,又有别于赤道带植被,而具有热带季风植被的特点^[36]。受持续人为开发活动的影响,海南岛现存的约 $2.10 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 森林植被中,人工林植被约 $1.45 \times 10^6 \text{ hm}^2$,天然雨林季雨林植被约 $6.5 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[69],其中原生性较强的天然森林植被只有不足 $2.0 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[70]。海南原始植被主要被转化为橡胶林、桉树林、相思林和果树林(芒果、荔枝、龙眼、槟榔、香蕉等),另一部分则经过商业性或农耕性的采伐和开垦后演化为低质次生林或灌草植被。海南热带植被恢复的研究,可分为以下几个方面:

一是对采伐迹地和“刀耕火种”撂荒地植被的天然恢复研究,这类恢复过程纯粹是天然的,没有人工干预。早在上世纪 60 年代至 70 年代前期,海南热带原始林经大规模的商业性采伐(以皆伐方式为主),或当地居民(特别是黎族居民)的“刀耕火种”模式,导致天然植被恢复的质量不高、生物多样性低、生态功能不强。中国林业科学院热带林业研究所曾对这类天然恢复植被进行了一系列的监测研究,创新性地提出了“砍三留七”的森林采育择伐的经验模式,并评估了相应的生态和经济效果^[71-75],其系列研究成果获 1998 年林业部科技进步一等奖和 1999 年国家科技进步二等奖。近年来,又从物种多样性和土壤功能微生物的变化等方面对这类天然恢复的森林植被进行了恢复成效的评估^[76-78]。对“刀耕火种”和采伐迹地造林失败的撂荒地天然恢复效果也进行了研究^[74,78];同时,为配合森林质量精准提升,加快质量低下的热带次生植被的顺行演替进程,制定了中华人民共和国林业行业标准《热带次生林抚育技术规程》(LY/T 2455-2015)^[79]。在生态系统关键物种栖息地破碎化生境恢复研究中,主要开展了海南长臂猿栖息地植被恢复模式的研究,提出了以构建生态廊道的形式将海南长臂猿破碎化的生境有效地连接起来的技术方案,研究了猿食植物的种类和群落学特征,并开展了栖息地中的思茅松和南亚松纯林下猿食植物的套种改造研究^[80-81]。

二是退耕还林地的植被恢复研究。郝清玉等^[82]全面调查了海南退耕还林植被恢复几种常用的模式,发现不同区域所采用的植被恢复种类虽然不同,但均是以经济树种和速生树种为主,如橡胶、

槟榔、桉树和木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)等;由于没有考虑生态效益,并未按照“近自然林”的目标进行植被恢复设计,整体植被恢复效果不佳,林下灌草层植被物种多样性低,乡土树种幼苗定居能力不足。

三是沿海防护林的植被恢复研究。海南是台风高发区,沿海防护林植被建设非常重要,但随着海岸带的不断开发,沿海防护林的防护效果并不理想。方发之等^[83]研究了沿海沙地木麻黄与其他树种的不同配置模式效果,结果表明木麻黄与椰子、相思和琼崖海棠等树种混植时,保护效果最佳;3.5 a 生植被的蓄积量达 $12.22 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$,群落总生物量达 42.12 t hm^{-2} ,风降率为 78.1%,固沙率高达 98.9%;群落物种多样性指数为 2.14,森林景观综合评分值为 83.1,均优于其他配植模式。在木麻黄纯林的更新改造中,遴选出了马占相思(*Acacia mangium*)、琼崖海棠(*Calophyllum inophyllum*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、麻楝(*Chukrasia tabularis*)、鹊肾树(*Streblus asper*)、苦楝(*Melia azedarach*)、大叶榄仁(*Terminalia catappa*)等阔叶树种进行混植,改造后的混交林土壤肥力比纯林提高了 96%^[84]。

四是江河流域的植被恢复与保护。海南岛中高周低的特殊地形,使得河流呈放射状从中部山区流向四周沿海地区;而沿海丘陵台地的植被,由于人口增长和农业开发,已不能发挥植被的水源涵养和防护功能。为此,海南省从 2011 年开始,启动了南渡江、昌化江、万泉河、陵水河和宁远河等 5 大河流的流域植被恢复保护计划,开展了相应的研究,如:有针对性地万泉河流域提出了造林更新、封山育林、抚育间伐、幼林抚育、补植改造、退果还林 6 种植被恢复的经营模式^[85];在南渡江流域提炼出了 2 种人工雨林群落配置模式、8 种季雨林群落配置模式和 3 种稀疏灌草地植物群落配置模式^[86];在宁远河流域,则提出了 2 种人工雨林群落配置模式和 4 种季雨林群落配置模式等^[87]。这些模式已被应用于 5 大流域的植被恢复改造中,但其应用效果还有待进一步研究和评估。

在香港,香港大学和浸会大学开展了一些植被恢复和环境治理的研究。香港现有土地的 14% 是林地,其中 2/3 是天然次生林,1/3 是人工林。香港的森林由于人类长期干扰损失殆尽,其森林恢复始于 1880 年,但早期的人工林多毁于二战的 1942-1945 年间。现存的次生林多是 1945 年后在退化的土地上

通过自然演替或造林后恢复而成, 政府在这些次生林地上建立了一些郊野公园, 实现了可持续的保护和利用。研究表明, 在没有山火及其他干扰的情况下, 香港退化土地经 30~40 年可自然恢复成次生林; 造林可以加速森林的形成; 人工林下会有乡土种定居但生态功能差; 火是次生林和人工林自然恢复的限制因子^[88-92]。

澳门人多地少, 在社会经济发展过程中, 吹填了一些海域, 新建了一些湿地和人工植被。澳门的自然植被由于人类干扰基本消失, 全部是人工栽种恢复。为了解决种了死, 死了种的现象, 中山大学采用土坑法极大地提高了种植存活率^[93]; 对木麻黄等人工林进行乡土种的大树移植改造, 取得了较好的生态效益^[94-96]。

3 展望

下一步, 华南地区的退化生态系统植被恢复研究要着眼于区域的退化草坡、低效人工林、各种脆弱生态系统和受城市化影响而退化的植被生态问题; 以区域顶极植被为参考生态系统, 通过多学科交叉开展植被生态系统退化过程机理、恢复技术集成、生态系统管理与可持续利用研究; 同时要前瞻考虑全球变化的影响, 为华南地区的社会、经济和生态的可持续发展服务。

恢复生态学当前发展主要有两个障碍: 一是目前恢复生态学还是一个验证性的科学, 主要是处理少变量因子和这些因子的部分层次的简单实验, 缺乏复杂的、多变量、复杂数量分析方法的实验; 另一个是短视性的学术研究导致的少量的合成和弱的概念理论, 这需要更好地认识和明确生态学原理^[97-98]。

展望未来, 植被生态系统恢复研究有望在下列方面取得进展: 恢复过程中的非生物与生物障碍、生态恢复中不可逆转的阈值、物种间相互作用及其在区域间的转移、植被恢复的关键过程(授粉、扩散、火灾、养分循环等)的时空动态研究。当前的生态恢复过程主要强调养分及物种的还原, 需要加强水文学过程、养分循环和能量获取与转化过程的研究, 以及种子扩散与树岛效应对缺乏种源生境恢复的作用过程; 基于乡土植被及养分管理的恢复设计; 更加关注“神秘”的生物群(真菌、根瘤菌、土壤原生动等)在恢复中的作用, 注重生物连接性的生物多

样性产出、地上与地下作用及反馈; 相对于以往过分注重具体生境而忽略景观, 需要考虑以生态过程调控为主, 诱导生态系统正反馈机制的自发恢复, 考虑生境景观间的相互作用; 恢复过程中适生植物的生理生态特性与功能性状, 非目标物种包括杂草的管理与化感作用研究; 考虑树种的遗传多样性, 系统考虑遗传-物种-生态系统(景观)多样性, 特别是热带森林生境异质性与多样性的关系; 以生态系统尺度为基础, 强调景观尺度及交错带的生态恢复、景观中的廊道和连接性问题在生态恢复中的作用; 加强森林生态系统的稳定性和抗干扰能力研究、植被退化机制动因分析与建模, 研发物种分布模型并应用于森林恢复活动中的种类选择及种类变化预测模拟; 强化不同生境条件下(如过火森林、城市森林、退化人工林)植被快速恢复与重建的集成技术研发。此外, 植被生态系统恢复还与当前比较热门的政治问题, 如碳排放与碳交易、生物多样性丧失、自然资本与生态补偿、生态系统服务功能支付等紧密相连; 未来需要理论结合实践, 综合考虑自然科学和人文科学中的社会、经济、文化、政治等因素, 开展多学科交叉研究与应用, 最终实现可持续发展。

参考文献

- [1] SER. The SER International Primer on Ecological Restoration [M]. Tucson: Society for Ecological Restoration International, 2004.
- [2] REN H, PENG S L. Restoration Ecology Introduction [M]. Beijing: Science Press, 2001: 3-9.
任海, 彭少麟. 恢复生态学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 3-9.
- [3] REN H, SHEN W J, LU H F, et al. Degraded ecosystems in China: Status, causes, and restoration efforts [J]. *Landsc Ecol Eng*, 2007, 3(1): 1-13. doi: 10.1007/s11355-006-0018-4.
- [4] PENG S L. Restoration Ecology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2017: 1-9.
彭少麟. 恢复生态学 [M]. 北京: 气象出版社, 2007: 1-9.
- [5] van ANDEL J, ARONSON J. Restoration Ecology, the New Frontier [M]. 2nd ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2012: 1-26.
- [6] PALMER M A, ZEDLER J B, FALK D A, et al. Foundations of Restoration Ecology [M]. 2nd ed. Washington DC: Island Press, 2016: 1-19.
- [7] REN H, LIU Q, LI L H, et al. Restoration Ecology Introduction [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2019: 1-21.
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: 1-21.

- [8] HOBBS R J, NORTON D A. Towards a conceptual framework for restoration ecology [J]. *Restor Ecol*, 1996, 4(2): 93–110. doi: 10.1111/j.1526-100X.1996.tb00112.x.
- [9] YOUNG T P, PETERSEN D A, CLARY J J. The ecology of restoration: historical links, emerging issues and unexplored realms [J]. *Ecol Lett*, 2005, 8(6): 662–673. doi: 10.1111/j.1461-0248.2005.00764.x.
- [10] REN H. Plantations: Biodiversity, Carbon Sequestration, and Restoration [M]. New York: Nova Science Publishers, 2013: 1–19.
- [11] REN H, WANG J, LU H F. Theories and research advances of restoration ecology [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(15): 4117–4124. doi: 10.5846/stxb201305301238.
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.
- [12] NATUHARA Y. Green infrastructure: Innovative use of indigenous ecosystems and knowledge [J]. *Landsc Ecol Eng*, 2018, 14(2): 187–192. doi: 10.1007/s11355-018-0357-y.
- [13] WU X Y, LIU F, WHISENANT S G. Advances in restoration ecology a North American perspective [C]// WU J G. *Lectures in Modern Ecology (III): Advances and Key Topics*. Beijing: Higher Education Press, 2007: 285–306.
武昕原, 刘峰, WHISENANT S G. 恢复生态学进展——北美视角 [C]// 郭建国. *现代生态学讲座(III): 学科进展与热点论题*. 北京: 高等教育出版社, 2007: 285–306.
- [14] KOLLMANN J, MEYER S T, BATEMAN R, et al. Integrating ecosystem functions into restoration ecology: Recent advances and future directions [J]. *Restor Ecol*, 2016, 24(6): 722–730. doi: 10.1111/rec.12422.
- [15] STANTURF J A, PALIK B J, DUMROESE R K. Contemporary forest restoration: A review emphasizing function [J]. *For Ecol Manag*, 2014, 331: 292–323. doi: 10.1016/j.foreco.2014.07.029.
- [16] NUNEZ-MIR G C, IANNONE III B V, CURTIS K, et al. Evaluating the evolution of forest restoration research in a changing world: A “big literature” review [J]. *New For*, 2015, 46(5/6): 669–682. doi: 10.1007/s11056-015-9503-7.
- [17] van der MAAREL E, FRANKLIN J. *Vegetation Ecology* [M]. 2nd ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2013: 1–23.
- [18] REN H, LIU Q, LI L H. *Restoration Ecology Introduction* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2008: 1–10.
任海, 刘庆, 李凌浩. *恢复生态学导论* [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2008: 1–10.
- [19] MORENO-MATEOS D, POWER M E, COMÍN F A, et al. Structural and functional loss in restored wetland ecosystems [J]. *PLoS Biol*, 2012, 10(1): e1001247. doi: 10.1371/journal.pbio.1001247.
- [20] MORENO-MATEOS D, BARBIER E B, JONES P C, et al. Anthropogenic ecosystem disturbance and the recovery debt [J]. *Nat Commun*, 2017, 8: 14163. doi: 10.1038/ncomms14163.
- [21] CROUZEILLES R, FERREIRA M S, CHAZDON R L, et al. Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests [J]. *Sci Adv*, 2017, 3(11): e1701345. doi: 10.1126/sciadv.1701345.
- [22] WANG B S, PENG S L. *Vegetation Ecology* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1997: 308–328.
王伯荪, 彭少麟. *植被生态学: 群落与生态系统* [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997: 308–328.
- [23] QUESADA M, SANCHEZ-AZOFEIFA G, ALVAREZ-AÑORVE M, et al. Succession and management of tropical dry forests in the Americas: Review and new perspectives [J]. *For Ecol Manag*, 2009, 258(6): 1014–1024. doi: 10.1016/j.foreco.2009.06.023.
- [24] SONG Y C. *Vegetation Ecology* [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2001: 589–608.
宋永昌. *植被生态学* [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001: 589–608.
- [25] FRIDAY J B, CORDELL S, GIARDINA C P, et al. Future directions for forest restoration in Hawai‘i [J]. *New For*, 2015, 46(5/6): 733–746. doi: 10.1007/s11056-015-9507-3.
- [26] AERTS R, HONNAY O. Forest restoration, biodiversity and ecosystem functioning [J]. *BMC Ecol*, 2011, 11: 29. doi: 10.1186/1472-6785-11-29.
- [27] GRISCOM H P, ASHTON M S. Restoration of dry tropical forests in Central America: A review of pattern and process [J]. *For Ecol Manag*, 2011, 261(10): 1564–1579. doi: 10.1016/j.foreco.2010.08.027.
- [28] LAMB D, GILMOUR D. *Rehabilitation and Restoration of Degraded Forests* [M]. Gland, Switzerland: International Union for Conservation of Nature, 2003: 110.
- [29] VIEIRA D L M, SCARIOT A. Principles of natural regeneration of tropical dry forests for restoration [J]. *Restor Ecol*, 2006, 14(1): 11–20. doi: 10.1111/j.1526-100x.2006.00100.x.
- [30] KINT V, GEUDENS G, MOHREN G M J, et al. Silvicultural interpretation of natural vegetation dynamics in ageing Scots pine stands for their conversion into mixed broadleaved stands [J]. *For Ecol Manag*, 2006, 223(1/2/3): 363–370. doi: 10.1016/j.foreco.2005.11.018.
- [31] Encyclopedia China Editor Group. *Encyclopedia of China* [M]. Beijing: Encyclopedia China Publishing House, 1992.
中国大百科全书编辑部. *中国大百科全书* [M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1992.
- [32] PENG S L, ZHOU T. The advances on the field of vegetation: Forest

- ecology in Guangdong in the past 30 years [J]. *Ecol Sci*, 2011, 30(S1): 57–62. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2011.Z1.001.
- 彭少麟, 周婷. 广东省植被: 林业生态三十年 [J]. *生态科学*, 2011, 30(S1): 57–62. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2011.Z1.001.
- [33] REN H, LU H F, WANG J, et al. Forest restoration in China: Advances, obstacles, and perspectives [J]. *Tree For Sci Biotechnol*, 2012, 6(1): 7–16.
- [34] XU J D. The 8th forest resources inventory results and analysis in China [J]. *For Econ*, 2014, 37(3): 6–8. doi: 10.13843/j.cnki.lyjj.2014.03.002.
- 徐济德. 我国第八次森林资源清查结果及分析 [J]. *林业经济*, 2014, 37(3): 6–8. doi: 10.13843/j.cnki.lyjj.2014.03.002.
- [35] CHEN X L, JU Q, LIN K L. Development status, issues and countermeasures of China's plantation [J]. *World For Res*, 2014, 27(6): 54–59. doi: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2014.06.008.
- 陈幸良, 巨茜, 林昆仑. 中国人工林发展现状、问题与对策 [J]. *世界林业研究*, 2014, 27(6): 54–59. doi: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2014.06.008.
- [36] Botany Institute of Guangdong. Guangdong Vegetation [M]. Beijing: Science Press, 1976: 1–341.
- 广东省植物研究所. 广东植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1976: 1–341.
- [37] HOU X Y. Vegetation Atlas of China [M]. Beijing: Science Press, 2001: 1–260.
- 侯学煜. 1:1000000 中国植被图集 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1–260.
- [38] CHEN S P, DENG Y, CHEN B H, et al. Guangdong Islands Vegetation and Forestry [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1994: 1–175.
- 陈树培, 邓义, 陈炳辉, 等. 广东海岛植被和林业 [M]. 广州: 广东科技出版社, 1994: 1–175.
- [39] Guangdong Academy of Sciences Hillside Comprehensive Scientific Expedition Team. Guangdong Hillside Vegetation [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1991: 1–149.
- 广东省科学院丘陵山区综合科学考察队. 广东山区植被 [M]. 广州: 广东科技出版社, 1991: 1–149.
- [40] YU Z Y, PENG S L. Restoration Research of Degraded Tropical and Subtropical Vegetation [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1996: 1–266.
- 余作岳, 彭少麟. 热带亚热带退化生态系统植被恢复生态学研究 [M]. 广州: 广东科技出版社, 1996: 1–266.
- [41] PENG S L. The development of ecology in South China Institute of Botany [J]. *Ecol Sci*, 2011, 30(S1): 87–92. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2011.Z1.006.
- 彭少麟. 华南生态秀河山 [J]. *生态科学*, 2011, 30(S1): 87–92. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2011.Z1.006.
- [42] ZHANG J W, YAO Q Y, LI H S. South China Slopland Research [M]. Beijing: Science Press, 1994: 1–308.
- 张经纬, 姚清尹, 李焕珊. 华南坡地研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1–308.
- [43] LI D Q, YAO S X. Water and Soil Conservation and Sustainable Development Theory and Practice [M]. Guangzhou: Guangdong Map Publishing House, 1998: 1–161.
- 李定强, 姚少雄. 水土保持与可持续发展理论与实践 [M]. 广州: 广东省地图出版社, 1998: 1–161.
- [44] XIA H P, LIU S Z, AO H X. Superior Plants on Water and Soil Conservation and Agroforestry [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2000: 1–147.
- 夏汉平, 刘世忠, 敖惠修. 优良水土保持植物与坡地复合农林业 [M]. 北京: 气象出版社, 2000: 1–147.
- [45] PENG S L, HOU Y P, CHEN B M. Vegetation restoration and its effects on carbon balance in Guangdong Province, China [J]. *Restor Ecol*, 2009, 17(4): 487–494. doi: 10.1111/j.1526-100X.2008.00399.x.
- [46] WANG W Q, WANG M. China Mangrove [M]. Beijing: Science Press, 2007: 1–186.
- 王文卿, 王瑁. 中国红树林 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1–186.
- [47] LIAO B W, LI M, CHEN Y J, et al. Techniques on Restoration and Reconstruction of Mangrove Ecosystem in China [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1–428.
- 廖宝文, 李玫, 陈玉军, 等. 中国红树林恢复与重建技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1–428.
- [48] REN H, LU H F, SHEN W J, et al. *Sonneratia apetala* Buch. Ham in the mangrove ecosystems of China: An invasive species or restoration species? [J]. *Ecol Eng*, 2009, 35(8): 1243–1248. doi: 10.1016/j.ecoleng.2009.05.008.
- [49] REN H, WU X M, NING T Z, et al. Wetland changes and mangrove restoration planning in Shenzhen Bay, southern China [J]. *Landsc Ecol Eng*, 2011, 7(2): 241–250. doi: 10.1007/s11355-010-0126-z.
- [50] REN H, CHEN H, LI L J, et al. Spatial and temporal patterns of carbon storage from 1992 to 2002 in forest ecosystems in Guangdong, southern China [J]. *Plant Soil*, 2013, 363(1/2): 123–138. doi: 10.1007/s11104-012-1302-8.
- [51] REN H, LI P, PENG S L, et al. Ecosystem Restoration and Ecosystem Management in Islands and Coastal Zones [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1–172.
- 任海, 李萍, 彭少麟, 等. 海岛与海岸带生态系统恢复与生态系统管理 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1–172.
- [52] WANG R J, REN H. Indigenous Plants of South China Coastal Zone and Their Utilization for Ecological Restoration [M]. Guangzhou:

- Guangdong Science and Technology Press, 2017: 1–320.
- 王瑞江, 任海. 华南海岸带乡土植物及其生态恢复利用 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2017: 1–320.
- [53] JIAN S G, REN H. Atlas on Tool Species for Vegetation Restoration on Tropical Coral Islands [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2017: 1–119.
- 简曙光, 任海. 热带珊瑚岛礁植被恢复工具种图谱 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2017: 1–119.
- [54] 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. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.10.001.
- 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.
- [55] LI Z J. Guangxi Forest [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2001: 1–612.
- 李治基. 广西森林 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 1–612.
- [56] WEN Y G, LI Z J, LI X X, et al. Types of vegetation and its classified system in Guangxi [J]. *Guangxi Sci*, 2014, 21(5): 484–513. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20141024.009.
- 温远光, 李治基, 李信贤, 等. 广西植被类型及其分类系统 [J]. *广西科学*, 2014, 21(5): 484–513. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20141024.009.
- [57] Guangxi Dayao Mountain Natural Resources Comprehensive Scientific Expedition Team. Guangxi Dayao Mountain Natural Resources Expedition [M]. Shanghai: Xuelin Press, 1998: 1–508.
- 广西大瑶山自然资源综合考察队. 广西大瑶山自然资源考察 [M]. 上海: 学林出版社, 1988: 1–508.
- [58] WEN Y G, HE T P, TAN W F. Plant Diversity and Community Structure in Tropical and Subtropical Hillside in Guangxi [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 1–438.
- 温远光, 和太平, 谭伟福. 广西热带和亚热带山地的植物多样性及群落特征 [M]. 北京: 气象出版社, 2004: 1–438.
- [59] NING S J, LI F, HE C X. Biodiversity Key Area: Guangxi Yuanbao Mountain Science Expedition and Research [M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 2009: 1–414.
- 宁世江, 李锋, 何成新. 生物多样性关键地区——广西元宝山科学考察研究 [M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2009: 1–414.
- [60] NING S J, SU Y, TAN X F. Integrated Investigation Report on Jiuwanshan National Nature Reserve, Guangxi [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1–567.
- 宁世江, 苏勇, 谭学锋. 生物多样性关键地区——广西九万山自然保护区科学考察集 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1–567.
- [61] WANG X F, GUO K, WEN Y G. Guangxi Vegetation Summary, Volumes 1, 2 [M]. Beijing: High Education Press, 2014: 1–2084.
- 王献涛, 郭柯, 温远光. 广西植被志要(上下册) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2014: 1–2084.
- [62] LIU S R, MA J M, MIAO N. Achievements in natural forest protection, ecological restoration, and sustainable management in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, 35(1): 212–218. doi: 10.5846/stxb201411132245.
- 刘世荣, 马姜明, 缪宁. 中国天然林保护、生态恢复与可持续经营的理论与技术 [J]. *生态学报*, 2015, 35(1): 212–218. doi: 10.5846/stxb201411132245.
- [63] LIU S R, CAI D X, WEN Y G. Technical Regulation on Masson Pine Plantation Carbon Sequestration Enhancement and Emission Reduction in Southern Subtropical Region [M]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1–12.
- 刘世荣, 蔡道雄, 温远光, 等. 南亚热带马尾松人工林碳增汇减排经营技术规程 [M]. 北京: 中国标准化出版社, 2016: 1–12.
- [64] LUO Y H, SUN D J, LIN J Y, et al. Effect of close-to-nature management on the natural regeneration and species diversity in a masson pine plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(19): 6154–6162. doi: 10.5846/stxb201306101601.
- 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 等. 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33(19): 6154–6162. doi: 10.5846/stxb201306101601.
- [65] WEN Y G, ZHANG J, YAN L, et al. Restoring ecosystem carbon sequestration through legume species afforestation: A case study for karst desertification restoration [J]. *Guangxi Sci*, 2015, 22(6): 573–577. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20160106.014.
- 温远光, 张健, 严理, 等. 豆科植物对石漠化土地生物碳固持能力的影响 [J]. *广西科学*, 2015, 22(6): 573–577. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20160106.014.
- [66] ZHOU X G, LI J Y, ZHU H G, et al. Afforestation preserving rate and young plantation growth of different combating rock desertification models [J]. *Guangxi Sci*, 2017, 24(2): 175–181. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20170125.002.
- 周晓果, 李隽宜, 朱宏光, 等. 不同石漠化治理模式的造林保存率及幼林生长分析 [J]. *广西科学*, 2017, 24(2): 175–181. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20170125.002.
- [67] WEN Y G, XIA C B, ZHOU X G, et al. Species composition and diversity in communities of different combating rock desertification models [J]. *Guangxi Sci*, 2017, 24(2): 168–174, 181. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20170125.002.
- 温远光, 夏承博, 周晓果, 等. 不同石漠化治理模式下群落的植物组成及多样性 [J]. *广西科学*, 2017, 24(2): 168–174, 181. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20170125.002.

- [68] FAN H Q, MO Z C. The history, achievements and lessons learnt for mangrove restoration in Guangxi, China [J]. *Guangxi Sci*, 2018, 25(4): 363–371,387. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20180918.001.
范航清, 莫竹承. 广西红树林恢复历史、成效及经验教训 [J]. *广西科学*, 2018, 25(4): 363–371,387. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20180918.001.
- [69] LI Y D, YANG Z Y, CHEN D X, et al. Evaluation of the Ecosystem Services Provided by the Ecological Protection Forest in Hainan [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2016: 1–214.
李意德, 杨众养, 陈德祥, 等. 海南生态公益林生态服务功能价值评估研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2016: 1–214.
- [70] 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: 1–208.
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: 1–208.
- [71] ZENG Q B, ZHOU W L. Comparative study on the water and heat regime of the tropical mountain rain forest and its cutting-blank in mountain Jian-Feng-Ling, Hainan Island [J]. *Acta Phytoecol Geobot Sin*, 1982, 6(1): 62–73.
曾庆波, 周文龙. 海南岛尖峰岭热带山地雨林及其采伐迹地水热状况的比较研究 [J]. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1982, 6(1): 62–73.
- [72] HUANG Q, LI Y D. Primary analyses of regeneration communities on the cutting blanks of tropical mountain rain forest on the Jianfengling Ridge, Hainan Island [J]. *Acta Phytoecol Geobot Sin*, 1988, 12(1): 12–22.
黄全, 李意德. 海南岛尖峰岭热带山地雨林采伐迹地更新群落的初步分析 [J]. *植物生态学与地植物学学报*, 1988, 12(1): 12–22.
- [73] HUANG S N, WANG B S, LI Y D. Edge effects in two secondary tropical montane rainforests at Jianfengling, Hainan Island of China [J]. *For Res*, 2004, 17(6): 693–699. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2004.06.002.
黄世能, 王伯荪, 李意德. 海南岛尖峰岭次生热带山地雨林的边缘效应 [J]. *林业科学研究*, 2004, 17(6): 693–699. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2004.06.002.
- [74] LU J P, ZENG Q B. Ecological consequences of shifting cultivation and tropical forest cutting in Jianfengling, Hainan Island [J]. *J Beijing For Univ*, 1987, 9(4): 348–354. doi: 10.13332/j.1000–1522.1987.04.003.
卢俊培, 曾庆波. 海南岛尖峰岭游耕农业及热带林采伐的生态后果 [J]. *北京林业大学学报*, 1987, 9(4): 348–354. doi: 10.13332/j.1000–1522.1987.04.003.
- [75] JIANG Y X, LU J P. Tropical Forest Ecosystem at Jianfengling in Hainan Island, China [M]. Beijing: Science Press, 1991.
蒋有绪, 卢俊培. 中国海南岛尖峰岭热带林生态系统 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [76] XU H, LIU S R, LI Y D, et al. Assessing non-parametric and area-based methods for estimating regional species richness [J]. *J Veg Sci*, 2012, 23(6): 1006–1012. doi: 10.1111/j.1654-1103.2012.01423.x/full.
- [77] CHEN J, XU H, HE D, et al. Historical logging alters soil fungal community composition and network in a tropical rainforest [J]. *For Ecol Manag*, 2019, 433: 228–239. doi: 10.1016/j.foreco.2018.11.005.
- [78] YANG Z Y, XUE Y, LU Y C, et al. The natural regeneration effect evaluation on abandoned land, Hainan [J]. *Ecol Sci*, 2014, 33(3): 439–444,451. doi: 10.3969/j.issn.1008–8873.2014.03.007.
杨众养, 薛杨, 陆元昌, 等. 海南撂荒地天然更新效果研究 [J]. *生态科学*, 2014, 33(3): 439–444,451. doi: 10.3969/j.issn.1008–8873.2014.03.007.
- [79] State Forestry Administration of the People's Republic of China. LY/T 2455–2015 Technical Regulations on Tending of Tropical Secondary Forests [S]. Forestry Regulation in China. Beijing: Standards Press of China, 2015.
国家林业局. LY/T 2455–2015 热带次生林抚育技术规程 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [80] CHEN S H, YANG S B. Primary research on vegetation restoration at the habitat of *Hylobates hainanus* in Bawangling Mountain [J]. *Trop For*, 2006, 34(4): 10–12,7. doi: 10.3969/j.issn.1672–0938.2006.04.004.
陈升华, 杨世彬. 霸王岭长臂猿栖息地植被恢复的初步研究 [J]. *热带林业*, 2006, 34(4): 10–12,7. doi: 10.3969/j.issn.1672–0938.2006.04.004.
- [81] CHEN S H, YANG S B, XU H, et al. Study on species composition and diversity of tropical forest in distributed area of *Hylobates hainanus* habitat in Hainan Island [J]. *Guangxi For Sci*, 2009, 38(4): 207–212. doi: 10.19692/j.cnki.gfs.2009.04.003.
陈升华, 杨世彬, 许涵, 等. 海南长臂猿栖息地森林群落组成结构与多样性分析 [J]. *广西林业科学*, 2009, 38(4): 207–212. doi: 10.19692/j.cnki.gfs.2009.04.003.
- [82] HAO Q Y, LIU Q, ZHONG Q X, et al. 5 years' vegetation restoration for key areas of conversion of cropland to forest in Hainan Province [J]. *Protec For Sci Technol*, 2009(5): 5–8,53. doi: 10.13601/j.issn.1005–5215.2009.05.031.
郝清玉, 刘强, 钟琼芯, 等. 海南省重点退耕还林区5年植被恢复调查与分析 [J]. *防护林科技*, 2009(5): 5–8,53. doi: 10.13601/j.issn.1005–5215.2009.05.031.
- [83] FANG F Z, CHEN Y. Ecological restoration mode of coastal protection forest in Hainan [C]// Proceeding of the 9th Forest Conservation and Management Workshop. Taipei, China: Taiwan Forest Entertainment and Conservation Union, 2018.
方发之, 陈彧. 海南沿海防护林生态恢复模式研究 [C]// 第九届海

- 峡两岸森林保育经营学术论坛论文专刊. 台北, 中国: 台湾森林休闲保育协会, 2018.
- [84] HUANG W M. Casuarina Coastal forest renovation of the effectiveness of investigation and analysis [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2014: 1–50.
黄文明. 木麻黄海防林改造更新造林成效调查分析 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014: 1–50.
- [85] SHE J Y, HU H X, LI J, et al. Research on the management model of flora and vegetation recovery of Wanquan River Basin in Hainan Province [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2012, 28(7): 64–69. doi: 10.3969/j.issn.1000-6850.2012.07.012.
余济云, 胡焕香, 李俊, 等. 海南省万泉河流域植物区系及植被恢复经营模式研究 [J]. *中国农学通报*, 2012, 28(7): 64–69. doi: 10.3969/j.issn.1000-6850.2012.07.012.
- [86] ZHU J J. Vegetation investigate and the research on typical plant community construction in Nanduijiang Basin [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2012: 1–120.
朱江江. 南渡江流域植被调查与典型植物群落构建研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012: 1–120.
- [87] LIU H Y. Vegetation investigate and the research on typical plant community construction in Ningyuan River Basin [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2013: 1–102.
刘晖宇. 宁远河流域植被特征及三亚市人工植物群落构建 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013: 1–102.
- [88] ZHUANG X Y, GORLETT R T. Forest and forest succession in Hong Kong, China [J]. *J Trop Ecol*, 1997, 13(6): 857–866. doi: 10.1017/S0266467400011032.
- [89] ZHUANG X Y. Rehabilitation and development of forest on degraded hills of Hong Kong [J]. *For Ecol Manag*, 1997, 99(1/2): 197–201. doi: 10.1016/S0378-1127(97)00205-3.
- [90] HAU C H. The establishment and survival of native trees on degraded hillsides in Hong Kong [D]. Hong Kong, China: The University of Hong Kong, 1999: 1–192.
- [91] LAU S P, FUNG C H. Reforestation in the countryside of Hong Kong [M]// WONG H M, WONG J W C, BAKER A J M, et al. *Remediation and Management of Degraded Lands*. Boca Raton, London, New York, Washington: Lewis Publishers, 1999: 195–200.
- [92] BRADSHAW A D, WONG M H. The Restoration and Management of Derelict Land [M]. London: World Scientific, 2002: 1–310.
- [93] PENG S L, YU Y N, HOU Y P, et al. Holes: A novel method for promoting vegetation restoration (Macao) [J]. *Ecol Restor*, 2009, 27(1): 12–14. doi: 10.3368/er.27.1.12.
- [94] PENG S L, LU H F, LIANG G F. Vegetation restoration in the two sub-islands of Macao and its benefits [J]. *Ecol Environ*, 2004, 13(3): 301–305. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2004.03.001.
彭少麟, 陆宏芳, 梁冠峰. 澳门离岛植被生态恢复与重建及其效益 [J]. *生态环境*, 2004, 13(3): 301–305. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2004.03.001.
- [95] YU L S. Ecological effects of different population on vegetation restoration of sub-island in Macao [D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2006: 1–61.
俞龙生. 澳门离岛植被恢复不同种群的生态效应 [D]. 广州: 中山大学, 2006: 1–61.
- [96] PENG S L, HOU Y P, YU L S, et al. Effects and mechanism of the holes digging method in the process of vegetation restoration in Macao [J]. *Ecol Environ*, 2006, 15(1): 1–5. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2006.01.001.
彭少麟, 侯玉平, 俞龙生, 等. 澳门植被恢复过程土坑法的效应机制探讨 [J]. *生态环境*, 2006, 15(1): 1–5. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2006.01.001.
- [97] WEIHER E. On the status of restoration science: Obstacles and opportunities [J]. *Restor Ecol*, 2007, 15(2): 340–343. doi: 10.1111/j.1526-100X.2007.00221.x.
- [98] SUDING K N. Toward an era of restoration in ecology: Successes, failures, and opportunities ahead [J]. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2011, 42: 465–487. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-102710-145115.