

退化森林生态系统恢复评价研究综述

马姜明^{1,2,3}, 刘世荣^{1,*}, 史作民¹, 刘兴良⁴, 缪宁¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. 广西师范大学珍稀濒危动植物生态与环境保护省部级共建教育部重点实验室, 桂林 541004;

3. 广西环境工程与保护评价重点实验室, 桂林 541004; 4. 四川省林业科学研究院, 成都 610081)

摘要: 森林退化是一个世界性的问题, 对退化的森林进行恢复评价是合理地进行森林生态系统管理的基础。介绍了森林退化的概念, 综述了退化森林生态系统恢复评价的一般程序, 主要包括恢复目标的确定、参照系的选择、评价指标体系的构建及定量评价等几个方面。目前, 大多数退化森林恢复评价主要包括物种多样性、植被结构和生态学过程 3 个方面。其中, 物种多样性包括物种丰富度和多度等; 植被结构包括植被盖度、乔木密度、高度、胸高断面面积、生物量和凋落物结构等; 生态学过程包括养分库、土壤有机质以及生物间的相互关系等。不同的研究者或管理者由于对恢复其生态系统服务功能的需求存在差异, 评价退化生态系统恢复的角度也不一样。恢复评价可以从特殊种群到整个生态系统的不同层次进行。在深刻理解森林退化定义的基础上, 建立现实的目标和正确地选择参照系是恢复评价的前提。

关键词: 森林退化; 恢复目标; 参照系统; 生态系统特征; 评价方法

A review on restoration evaluation studies of degraded forest ecosystem

MA Jiangming^{1,2,3}, LIU Shirong^{1,*}, SHI Zuomin¹, LIU Xingliang⁴, MIAO Ning¹

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of State Forestry Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091 China

2 Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection (Guangxi Normal University), Ministry of Education, Guilin 541004, China

3 The Guangxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Protection and Assessment, Guilin 541004, China

4 Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China

Abstract: Forest degradation is a problem taking place throughout the world. Restoration evaluation of degraded forests is a base for rational management of forest ecosystems. In this paper, the concept of forest degradation was introduced and the common procedures of restoration evaluation on degraded forest ecosystem were summarized, which included the goal-setting of restoration, the choice of reference ecosystem, establishment of evaluation indicator system and quantitative approaches of restoration evaluation. At present, most of restoration evaluation on degraded forest ecosystems covered three aspects, i. e. species diversity, vegetation structure and ecological processes. Species diversity focused on species richness and abundance, etc. Vegetation structure emphasized on vegetation coverage, tree density, tree height, basal area of trees, biomass and components of litter, etc. The ecological process centered on nutrient pools, soil organic matter and the biological interactions, etc. Due to different interests and demands for forest ecosystem services among researchers and managers, evaluation objective and its indicator system can be different at scales from special population to whole ecosystem. Based on deep understanding of forest degradation concept, defining the practical goal and choosing the appropriate reference system are the premises of restoration evaluation.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAD03A0402; 2006BAD03A100302; 2006BAD03A1004); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2002CB111504); 广西师范大学博士启动基金资助项目; 广西环境工程与保护评价重点实验室资助项目; 广西教育厅科研资助项目(200911MS50)

收稿日期: 2009-10-10; 修订日期: 2009-10-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liusr@caf.ac.cn

Key Words: forest degradation; restoration goals; reference ecosystem; ecosystem property; evaluation approach

森林是陆地生态系统的主体,具有复杂的结构和功能,不仅为人类提供了大量的木质林产品和非木质林产品,并具有历史、文化、美学、休闲等方面的价值,在保障农牧业生产条件、维持生物多样性、保护生态环境、减免自然灾害和调节全球碳平衡和生物地球化学循环等方面起着重要的和不可替代的作用^[1]。近几十年来,随着人口急剧增长、社会经济发展和森林资源的高强度开发利用等全球性问题,直接或间接导致了森林的退化。森林等自然资源的退化是当前世界范围内所面临的一个主要的环境问题^[2-3]。然而在森林退化的同时,大规模的森林恢复计划也在进行^[4]。恢复与重建退化森林的目的就是要提高景观水平森林生物多样性和生境多样性,增加木质林和非木质林产品的经济价值,改善森林生态系统的功能,如碳吸存、水平衡、防火及缓解气候变化等,恢复土壤肥力和物理特性防止土壤侵蚀^[5]。因此,对退化的森林生态系统恢复过程中的结构和功能进行综合评价可以及时把握森林生态系统恢复的现状和程度,正确评估退化森林恢复过程中生态系统结构及功能的动态变化,找出影响森林恢复的关键因素,为调控恢复进程和预测恢复轨迹的发展等生态系统可持续管理实践提供理论基础。

1 森林退化

不同的研究者或研究组织由于对森林管理的目的不同,对于森林退化概念的理解存在差异^[6]。如:Serna对森林退化定义为森林生产力降低或质量的下降,或确保发挥作用和功能的林地的受损^[7]。联合国粮农组织对森林退化的定义为由于人类活动(如过牧、过度采伐和重复火干扰)或病虫害、病原菌以及其它自然干扰(如风、雪害等)导致森林面积减少,或者变成疏林等现象^[8]。朱教君等^[8]对森林退化的定义进行了归纳,认为国际组织对森林退化定义的基本内涵是一致的,即指林木产品和生态服务功能的逆向改变。总体来看,森林退化是森林在人为或自然干扰下形成偏离干扰前(或参照系统)的状态,与干扰前(或参照系统)相比,在结构上表现为种类组成和结构发生改变;在功能上表现为生物生产力降低、土壤和微环境恶化、森林的活力、组织力和恢复力下降,生物间相互关系改变以及生态学过程发生紊乱等等。国际热带木材组织区分了森林退化的3种类型^[9]:(1)退化的原始林:由过度的或破坏性的木材利用所导致;(2)次生林:大面积砍伐后林地上的天然更新林分;(3)退化的林地:退化很严重以致森林不能更新,目前主要有草本和灌木组成。森林退化是一个世界性的问题,并且面积有扩大的趋势。到2000年,约60%的热带林属于退化生态系统,其中包括次生林、退化原始林以及退化林地^[10]。由于发展农业和刀耕火种,热带森林面积正在以 $1.35 \times 10^7 \text{ hm}^2/\text{a}$ 的速度在减少,而且每年有 $5.1 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的热带林变成次生林^[5]。在非洲,用于发展农业而采伐森林的面积占总面积的70%,亚洲占50%,拉丁美洲占35%^[5]。退化的森林部分或全部丧失了森林结构、生产力、生物多样性以及曾经所能提供的生态系统服务功能,对木材生产和全球环境问题产生重要的影响。深刻理解森林退化的定义是判别森林退化状态和建立森林恢复评价指标体系和标准的前提。

2 退化森林生态系统恢复评价的一般程序

退化森林生态系统的本质是森林生态系统的结构被破坏后失去固有的平衡^[11],导致森林生态系统功能的退化。退化森林生态恢复的中心内容是恢复与地带性森林植被(结构和功能)相似的生态系统,或重建人工生态系统,让其逐渐向地带性森林生态系统发展^[12]。恢复退化的森林生态系统就是要恢复生态系统的功能特征,最终目标就是要保护恢复后的自我持续性状态,这就要求建立一系列的生态系统可持续发展的指标体系^[13-14],然后对恢复前后的变化进行长期监测和对比,并对恢复效果进行合理有效的评价。恢复评价是恢复生态学中所要研究的重要内容,是检验人工恢复实践和自然恢复状态的技术手段。评价应该有明确的切合实际的恢复目标,正确地选择参照系,清晰和量化的评价指标和标准^[15]。

2.1 恢复目标的确定

恢复评价首先需要定义恢复的目标^[16]。恢复的目标描述为帮助退化的、受损的、破坏的生态系统恢复的过程^[17]。在早期,恢复的目标仅仅是在退化地段建立能自我维持的植被覆盖^[18]。许多科研人员试图建立与

目标群落相同的功能^[19-20]。恢复的目标包括恢复退化生态系统的结构、功能、动态和服务功能,其长期目标是通过恢复与保护相结合,实现生态系统的可持续发展^[21]。恢复目标应既清晰又有较现实的可操作性,这对于评价恢复很关键^[22-24]。当然,恢复目标依赖于所考虑的地区或生态系统目前状况的优先评价^[24]。恢复生态学工作者通常基于实现不同的生态需求来选择恢复的目标,比如恢复生态系统健康和恢复当地的环境^[17]。恢复的目标应以退化的地段为出发点,以参照系的状态为归宿点。喻理飞等^[25]通过对贵州退化喀斯特森林的研究,认为当前喀斯特地区生态恢复目标是恢复森林植被,遏制生态环境恶化和提高农业生态环境质量。

2.2 参照系的选择

为了阐述森林恢复的生态目标和评价这一目标实际达到的程度,参照系的选择很重要^[26],恢复生态学家通常运用参照系信息来定义恢复的目标,从而确定恢复地段的恢复潜力,评价恢复的状态^[27]。Brinson 等^[28]总结出参照系主要用来明确恢复的目标,为恢复地段的设计提供模板,建立加速恢复监测的框架。参照系的状态可以代表所损生态系统干扰前的状态或没有受干扰的当前状态^[29]。通常有许多不同的方法来定义参照系状态。参照系信息也可能由生境的历史信息组成^[30],或由参照系目前的数据组成^[27, 31]。比如,天然林分的残余或天然恢复的地区经常作为参考点^[32-33]。为了评价森林采伐后自然恢复的状况,马姜明^[34]以川西亚高山未被砍伐而保留下来的暗针叶老龄林为参照系统,并从中提取物种组成及多样性、群落结构和关键生态功能指标的信息,通过实测不同林龄次生林恢复演替阶段群落的各指标特征值与老龄林进行比较,得出不同林龄次生林的恢复现状。

2.3 恢复评价的概念性框架及方法

在对恢复对象进行深刻的生态理解基础上,确定参照系,并从中提取能表征恢复生态系统特征的指标。如恢复生态学家运用 Odum^[35]所描述的生态系统演替特征作为参照,进行评价恢复是否成功;Ewel^[36]列出了 5 个标准:自我可持续性、抵制外来物种入侵、初级生产力、养分保持力、完整的生物相互作用来判断生态系统恢复重建的成功;Aronson 等^[22]建议干旱和半干旱林地退化生态系统恢复的 9 个重要生态系统特征,后来扩展到 16 个重要的景观特征,分为 3 组:景观结构生物组成、景观上生态系统之间的功能作用、景观破碎化和退化的程度、类型和原因^[37];Lamd^[38]提出森林恢复与否的指标体系应包括造林产量指标、生态指标和社会经济指标,这 3 个一级指标又各自包含一系列二级指标;Careder 和 Knapp 提出采用记分卡的方法评价恢复度,这种方法是根据生态系统的各个重要参数的波动幅度,比较退化生态系统恢复过程中相应的各个参数,看每个参数是否已达到正常的波动范围或与该范围还有多大的差距^[21];Hobbs 等^[39]列出了退化生态系统需要恢复的 6 个生态系统特征:(1)组成和物种相对丰富度;(2)植被和土壤组成的垂直分布;(3)生态系统组成的水平分布;(4)组成的异质性;(5)生态系统功能,比如能量转换和物质循环;(6)演替动态和弹性。这些普遍的定性参数可作为发展具体地段定量恢复成功的概念框架^[15, 40]。恢复是指系统的结构与功能恢复到接近其受干扰前的结构与功能。结构恢复指标是乡土种的丰富度,功能恢复指标包括初级生产力和次级生产力、食物网结构、在物种组成与生态系统过程中存在反馈,即恢复所期望的物种丰富度,管理群落结构的发展,确认群落结构与功能间的连接已形成^[21]。彭少麟等^[40]根据热带人工林恢复定位研究,提出森林恢复的评价标准包括结构(物种的数量及密度、生物量)、功能(植物、动物和微生物间形成食物网、生产力和土壤肥力)和动态(可自然更新和演替);Madhur 等^[41]提出了一个研究生态恢复和重建发展的理论框架,用复杂系统概念和模型来评价恢复,目的是阐明一些复杂系统理论的概念和为恢复生态学家提供一个开阔的途径;Martin 等^[42]提出从以下 4 个生态系统特征进行恢复评价:(1)乡土物种的比例;(2)生态系统过程(比如净初级生产力和氮循环);(3)所有空间尺度的植物多样性;(4)所有空间尺度的动物和微生物多样性,并主要集中在前 3 个标准,因为在动物再引入之前初级生产力和植物的生境组成通常已经恢复。基于群落组成、结构和功能,喻理飞等^[43]提出了群落恢复潜力度、恢复度和恢复速度 3 个评价指标和计算方法,对退化喀斯特森林自然恢复的过程进行综合评价。

最近,国际恢复生态学会提出了 9 个生态系统特征作为评价恢复成功所考虑的生态系统特征^[29]。建议

恢复的生态系统应具有以下特征:(1) 与参照系相比,具有相似的多样性和群落结构;(2) 乡土物种的存在度;(3) 为长期稳定性需要的功能群存在度;(4) 具有持续繁殖种群能力的自然环境;(5) 正常的功能;(6) 景观的完整性;(7) 潜在干扰的消除;(8) 对自然干扰具有弹性;(9) 自我维持性。实际上,目前还没有有关报道完全对国际恢复生态学会提出的所有生态系统特征进行全面评价。大多数的恢复评价研究主要从以下3个生态系统特征来进行^[44]:(1) 物种多样性(比如,物种丰富度和多度)^[45-49];(2) 植被结构(比如,植被盖度、乔木密度、高度、胸高断面面积、生物量和凋落物结构)^[50-54];(3) 生态学过程(比如,养分库、土壤有机质以及生物间的相互关系)^[55]。这3个特征对生态系统的持续性很关键^[44],通常作为植被恢复和重建的主要目标^[56-59]。

评价生态系统的恢复是否成功,通常需要建立指标来进行定量地评价^[60]。比如,Pielou^[61]提出一个统计程序来评价恢复植被的物种多样性和组成;Shear等^[62]发展了复杂性指数,以树种的密度、基面积、高度和组成为基础,来评价肯塔基州恢复的低洼地阔叶林;乡土种的丰富度指数,是一个源于Shannon-Weiner's指数的物种丰富度指数,可能作为一个标准来评价本地植被恢复^[63]。Cristina等^[64]运用土壤水文结构和群落空间结构指数定量评价了哥斯达黎加被弃牧场的湿热带森林恢复。

2.4 退化森林生态恢复评价与森林生态系统健康

与生态恢复密切相关的一个概念是生态系统健康。它包含了对复杂生态系统功能状态与维持能力以及被人类活动损害程度进行的评价,通过建立兼顾社会经济价值和生态保护的双赢策略来管理和开发生命支持系统,这样既可保持生态系统的健康,又可使其免于遭受更严重的损伤^[65-66]。生态系统健康是衡量生态系统功能特征的隐喻标准,是评价生态系统状态的一种方式^[67]。受损生态系统的恢复重建虽然是一种动态过程,但在某一研究时刻的表现实际上也是生态系统的一种特定状态。从生态系统健康的角度评价恢复状况是一条非常重要的途径^[68]。陈高等^[69]运用综合构成指数,以原始阔叶红松林为健康基准,定量评价了长白山阔叶红松林生态系统区主要林分类型受损生态系统的健康状况及恢复趋势。在进行退化森林生态系统恢复状态的评价时可借鉴类似生态系统健康的指标(比如对照参考群落提高物种和结构的相似性)或降低退化的指标(比如侵蚀,盐度或土壤压紧,非乡土物种覆盖)^[24],建立恢复评价方法进行定量评价。

3 结语

综上所述,由于森林退化定义的模糊性,如森林效益的潜在供给能力、不合理的经营管理均需要人为的主观判断,从而导致退化森林恢复评价时选取指标存在不确定性。不同的研究者或管理者由于对恢复其生态系统服务功能需求的差异,评价退化生态系统恢复的角度也不一样。退化森林生态系统的恢复评价应建立在对恢复对象进行深刻的生态理解基础上。恢复评价可以从特殊种群到整个生态系统的不同层次进行。大多数研究只是提出恢复评价的概念性框架,许多研究还停留在定性分析阶段,因而实际可操作性较差。许多评价研究仅局限于某个方面,缺乏从生态系统的角度进行定量的综合评价。鉴于此,对森林退化的评价首先要确定恢复目标,宜以参照系统为前提,既要体现出能容易判别森林退化的结构特征并能对其进行定量化研究,又能方便地测出表征森林退化的功能指标,指标的选取从参照系统中提取。评价森林退化的基础是:在景观水平上需要提高生物和生境多样性,提高森林生态功能比如蓄水,水平衡,碳汇,防火以及缓解气候和恢复土壤肥力,土壤物理特征,防止侵蚀。森林退化指标选取的原则应能反映森林退化而导致其固有的活力、组织力和恢复力下降。评价森林退化的方法应体现准确性、综合性、简洁性和适用性的特点。

综合恢复评价研究的现状,建议今后生态恢复评价研究应重视以下几个方面:(1) 正确选取参照系;(2) 基于对恢复生态系统服务功能的深刻理解,建立一系列恢复评价的指标体系和标准,选择合适的数学方法并进行综合定量评价,以便对恢复前后的变化进行长期监测、对比和判断;(3) 理顺评价恢复生态系统功能的分类方法,以便能够进行诊断、干预及因果关系的比较研究;(4) 设计评价标准来辨别是否偏离生态系统关键参数变化的正常范围。一方面,为了确保诊断生态系统崩溃过程出现的准确性,另一方面,为了确保诊断生态系统从胁迫下开始恢复的准确性;(5) 由于生态系统复杂性和恢复的不确定性,应该根据具体恢复地段建立多

目标恢复体系,建立不同组织层次(种群、群落、生态系统以及区域)的恢复标准,强调适应性恢复;(6) 运用遥感、地理信息系统来监测恢复,运用模型模拟和预测恢复的轨迹。

References:

- [1] Tang S Z, Liu S R. Conservation and sustainability of natural forests in China. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2000, 2 (1): 42-46.
- [2] Houghton R A. The worldwide extent of land-use change. *BioScience*, 1994, 44: 305-313.
- [3] Dobson A P, Bradshaw A D, Baker A J M. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. *Science*, 1997, 277: 515-522.
- [4] Li W H. Degradation and restoration of forest ecosystems in China. *Forest Ecology and Management*, 2004, 201: 33-41.
- [5] Kobayashi S. Landscape rehabilitation of degraded tropical forest ecosystems: Case study of the CIFOR/ Japan project in Indonesia and Peru. *Forest Ecology and Management*, 2004, 201: 13-22.
- [6] Zhang X Q, Hou Z H. Definitions of forest degradation, forest management, devegetation and revegetation in relations to carbon accounting. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(4): 140-144.
- [7] Hitimana J, Kiyapi J L, Njunge J T. Forest structure characteristics in disturbed and undisturbed sites of Mt. Elgon Moist Lower Montane Forest, western Kenya. *Forest Ecology and Management*, 2004, 194: 269-291.
- [8] Zhu J J, Li F Q. Forest degradation / decline: Research and practice. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1601-1609.
- [9] Lamb D, Gilmour D. Rehabilitation and Restoration of Degraded Forests. Gland, Switzerland: IUCN- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 2003, 7.
- [10] Zang R G, Ding Y. Ecological restoration of tropical forest vegetation. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (12): 6292 - 6304.
- [11] Bao W K, Chen Q H. Discussion on several problems of restoring and rehabilitating degraded mountain ecosystem. *Journal of Mountain Research*, 1999, 17(1): 22-27.
- [12] Zhao P, Peng S L, Zhang J W. Restoration ecology — An effective way to restore biodiversity of degraded ecosystems. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(1): 53-58.
- [13] Hu D. An indicating framework for ecosystem sustainability. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(2): 213-217.
- [14] Cui B S. A study on changes of ecological characters and sustainability of wetland ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(2): 43-49.
- [15] Choi Y D. Theories for ecological restoration in changing environment: Toward futuristic' restoration. *Ecological Research*, 2004, 19: 75-81.
- [16] Rosenthal G. Selecting target species to evaluate the success of wet grassland restoration. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 98: 227-246.
- [17] Davis M A, Slobodkin L B. The science and values of restoration ecology. *Restoration Ecology*, 2004, 12: 1-3.
- [18] Bradshaw A D, Chadwick M J. The Restoration of Land: The ecology and reclamation of derelict and degraded land. Los Angeles: University of California Press, 1980, 317.
- [19] Pywell R F, Webb N R, Putwain P D. A comparison of techniques for restoring heathland on abandoned farmland. *Journal of Applied Ecology*, 1995, 32: 400-411.
- [20] Pywell R F, Bullock J M, Hopkins A, Walker K J, Sparks T H, Burke M J W, Peels S. Restoration of species-rich grassland on arable land: assessing the limiting processes using a multi-site experiment. *Journal of Applied Ecology*, 2002, 39: 294-309.
- [21] Ren H, Peng S L, Lu H F. The restoration of degraded ecosystems and restoration ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1756-1764.
- [22] Aronson J C, Floc'h L E, Ovalle C, Pontanier R. Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semi-arid lands. II. Case studies in southern Tunisia, central Chile and northern Cameroon. *Restoration Ecology*, 1993, 3: 168-187.
- [23] Jackson L L, Lopoukhine N, Hillyard D. Ecological restoration: a definition and comments. *Restoration Ecology*, 1995, 3: 71-75.
- [24] Hobbs R J. Ecological management and restoration: assessment, setting goals and measuring success. *Ecological Management and Restoration*, 2003, 4: S2-S3.
- [25] Yu L F, Zhu S Q, Zhu X K, Xie S X. A study on evaluation of restoration and remedy technology of degraded Karst forest. *Guizhou Science*, 2002, 20(1): 7-13.
- [26] Honnay O, Bossuyt B, Verheyen K, Butaye J, Jacquemyn H, Hermy M. Ecological perspectives for the restoration of plant communities in European temperate forests. *Biodiversity and Conservation*, 2002, 11: 213-242.
- [27] White P S, Walker L J. Approximating nature's variation: selecting and using reference information in restoration ecology. *Restoration Ecology*, 1997, 5: 338-349.
- [28] Brinson M M, Rheinhardt R. The role of reference wetlands in functional assessment and mitigation. *Ecological Applications*, 1996, 6: 69-76.

- [29] SER (Society for Ecological Restoration International Science and Policy Working Group). The SER International Primer on Ecological Restoration, 2004. <http://www.ser.org>.
- [30] Nordlind E, stlund A L. Retrospective comparative analysis as a tool for ecological restoration: a case study in a Swedish boreal forest. *Forestry*, 2003, 76(2): 243-251.
- [31] Bakker J P, Grootjans A P, Hermy M, Poschlod P. How to define targets for ecological restoration? *Applied Vegetation Science*, 2000, 3: 1-6.
- [32] Bishel-Machung L, Brooks R P, Yates S S, Hoover K L. Soil properties of reference wetlands and wetland creation projects in Pennsylvania. *Wetlands*, 1996, 16: 532-541.
- [33] Brown S C. Vegetation similarity and avifaunal food value of restored and natural marshes in northern New York. *Restoration Ecology*, 1999, 7: 56-68.
- [34] Ma J M. Evaluation of Degraded Subalpine Dark Brown Coniferous Forests Based on Ecology in Western Sichuan, China and Implications for Restoration. Doctoral Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2007, 1-111.
- [35] Odum E P. The strategy of ecosystem development. *Science*, 1969, 164: 262-270.
- [36] Ewel J J. Restoration is the ultimate test of ecological theory//Jordan W R, Gilpin M E, Aber J D eds. *Restoration Ecology, A Synthetic Approach to Ecological Research*, Cambridge: Cambridge Press, 1987: 31-33.
- [37] Aronson J C, Le Floch E. Vital landscape attributes: missing tools for restoration ecology. *Restoration Ecology*, 1996, 4: 377-387.
- [38] Lamd D. Reforestation of degraded tropical forest lands in the Asia-Pacific region. *Journal of Tropical Forest Science*, 1994, 7(1): 1-7.
- [39] Hobbs R J, Norton D A. Towards a conceptual framework for restoration ecology. *Restoration Ecology*, 1996, 4(2): 93-110.
- [40] Peng S L. The restoration of degraded ecosystems and restoration ecology. *China Basic Science*, 2001, 3: 18-24.
- [41] Madhur A, Rachelle E D. Quantification of restoration success using complex systems concepts and models. *Restoration Ecology*, 2004, 12(1): 117-123.
- [42] Martin L M, Moloney K A, Wilsey B J. An assessment of grassland restoration success using species diversity components. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42: 327-336.
- [43] Yu L F, Zhu S Q, Ye J Z, Wei L M, Chen Z R. A study on evaluation of natural restoration for degraded karst forest. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(6): 12-19.
- [44] Ruiz-Jaen M C, Aide T M. Restoration success: how is it being measured?. *Restoration Ecology*, 2005, 13: 569-577.
- [45] van Aarde R J, Ferreira S M, Kritzing J J, van Dyk P J, Vogt M, Wassenaar T D. An evaluation of habitat rehabilitation on coastal dune forest in northern KwaZulu-Natal, South Africa. *Restoration Ecology*, 1996, 4: 334-345.
- [46] Reay S D, Norton D A. Assessing the success of restoration plantings in a temperate New Zealand forest. *Restoration Ecology*, 1999, 7: 298-308.
- [47] McCoy E D, Mushinsky H R. Measuring the success of wildlife community restoration. *Ecological Applications*, 2002, 12: 1861-1871.
- [48] Nichols O G, Nichols F M. Long-term trends in faunal recolonization after bauxite mining in the jarrah forest of southwestern Australia. *Restoration Ecology*, 2003, 11: 261-272.
- [49] Weiermans J, van Aarde R J. Roads as ecological edges for rehabilitating coastal dune assemblages in northern KwaZulu-Natal, South Africa. *Restoration Ecology*, 2003, 11: 43-49.
- [50] Parrota J A, Knowles O H. Restoration of tropical moist forests on bauxite-mined lands in Brazilian Amazon. *Restoration Ecology*, 1999, 7: 103-116.
- [51] Clewell A F. Restoration of riverine forest at Hall Branch on phosphate-mined land, Florida. *Restoration Ecology*, 1999, 7: 1-14.
- [52] Salinas M J, Guirado J. Riparian plant restoration in summer-dry riverbeds of southeastern Spain. *Restoration Ecology*, 2002, 10: 695-702.
- [53] Kruse B S, Groninger J W. Vegetative characteristics of recently reforested bottomlands in the lower Cache River watershed, Illinois, U. S. A. *Restoration Ecology*, 2003, 11: 273-280.
- [54] Wilkins S, Keith D A, Adam P. Measuring success: evaluating the restoration of a grassy eucalypt woodland on the Cumberland Plain, Sydney, Australia. *Restoration Ecology*, 2003, 11: 489-503.
- [55] Rhoades C C, Eckert G E, Coleman D C. Effect of pastures trees on soil nitrogen and organic matter: implications for tropical montane forest restoration. *Restoration Ecology*, 1998, 6: 262-270.
- [56] Palmer M A, Ambrose R F, Poff N L. Ecological theory and community restoration ecology. *Restoration Ecology*, 1997, 5: 291-300.
- [57] Moore M M, Covington W W, Fule P Z. Reference conditions and ecological restoration: a southwestern ponderosa pine perspective. *Ecological Applications*, 1999, 9: 1266-1277.
- [58] Smith R S, Shiel R S, Millward D, Corkhill P. The interactive effects of management on the productivity and plant community structure of an upland meadow: an 8-year field trial. *Journal of Applied Ecology*, 2000, 37: 1029-1043.
- [59] Martin L M, Moloney K A, Wilsey B J. An assessment of grassland restoration success using species diversity components. *Journal of Applied*

- Ecology, 2005, 42: 327-336.
- [60] Palmer M A, Bernhardt E S, Allan J D, Lake P S, Alexander G, Brooks S, Carr J, Clayton S, Dahm C N, Follstad J S, Galat D L, Loss S G, Goodwin P, Hart D D, Hassett B, Jenkinson R, Kondolf G M, Lave R, Meyer J L, O'donnell T K, Pagano L, Sudduth E. Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42: 208-217.
- [61] Pielou E C. Assessing the diversity and composition of restored vegetation. *Canadian Journal of Botany*, 1986, 64: 1344-1348.
- [62] Shear T H, Lent T J, Fraver S. Comparison of restored and mature bottomland hardwood forests of southwestern Kentucky. *Restoration Ecology*, 1996, 4: 111-123.
- [63] Bowles M, Jones M, McBride J, Bell T, Dunn C. Structural composition and species richness indices for upland forests of the Chicago Region. *Erigenia*, 2000, 18: 30-57.
- [64] Cristina P M, Drew A P. A model to assess restoration of abandoned pasture in Costa Rica based on soil hydrologic features and forest structure. *Restoration Ecology*, 2004, 12(4): 516-524.
- [65] Rapport D J, Whitford W G. How ecosystem respond to stress. *Bioscience*, 1999, 49(3): 193-203.
- [66] Rapport D J, Bohm G, Buckingham D, Cairns J, Costanza R, Karr J R, de Kruijf H A M, Levins R, McMichael A J, Nielsen N O, Whitford W G. Ecosystem health: the concept, the ISEH, and the important tasks ahead. *Ecosystem Health*, 1999, 5: 82-90.
- [67] Kong H M, Zhao J Z, Ji L Z, Lu Z H, Deng H B, Ma K M, Zhang P. Assessment method of ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4): 486-490.
- [68] Gao Y H, Wang H Q, Liu Q J. Advances in assessment of ecological restoration. *Jiangxi Science*, 2003, 21(3): 168-174.
- [69] Chen G, Deng H B, Dai L M, Wu G. Health assessment on forest ecosystem by using integrated compose index (ICI). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1725-1733.

参考文献:

- [1] 唐守正, 刘世荣. 我国天然林保护与可持续经营. *中国农业科技导报*, 2000, 2(1): 42-46.
- [6] 张小全, 侯振宏. 森林退化、森林管理、植被破坏和恢复的定义与碳计量问题. *林业科学*, 2003, 39(4): 140-144.
- [8] 朱教君, 李凤芹. 森林退化/衰退的研究与实践. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1601-1609.
- [10] 臧润国, 丁易. 热带森林植被生态恢复研究进展. *生态学报*, 2008, 28(12): 6292-6304.
- [11] 包维楷, 陈庆恒. 退化山地生态系统恢复和重建问题的探讨. *山地学报*, 1999, 17(1): 22-27.
- [12] 赵平, 彭少麟, 张经纬. 恢复生态学——退化生态系统生物多样性恢复的有效途径. *生态学杂志*, 2000, 19(1): 53-58.
- [13] 胡聃. 生态系统可持续性的一个测度框架. *应用生态学报*, 1997, 8(2): 213-217.
- [14] 崔保山. 湿地生态系统特征变化及其可持续性问题. *生态学杂志*, 1999, 18(2): 43-49.
- [21] 任海, 彭少麟, 陆宏芳. 退化生态系统恢复与恢复生态学. *生态学报*, 2004, 24(8): 1756-1764.
- [25] 喻理飞, 朱守谦, 祝小科, 谢双喜. 退化喀斯特森林恢复评价和修复技术. *贵州科学*, 2002, 20(1): 7-13.
- [34] 马姜明. 川西亚高山退化暗针叶林恢复评价的生态学基础及其对策. 博士学位论文. 北京: 中国林业科学研究院, 2007, 1-111.
- [40] 彭少麟. 退化生态系统恢复与恢复生态学. *中国基础科学*, 2001, 3: 18-24.
- [43] 喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 魏鲁明, 陈正仁. 退化喀斯特森林自然恢复评价研究. *林业科学*, 2000, 36(6): 12-19.
- [67] 孔红梅, 赵景柱, 姬兰柱, 陆兆华, 邓红兵, 马克明, 张萍. 生态系统健康评价方法初探. *应用生态学报*, 2002, 13(4): 486-490.
- [68] 高彦华, 汪宏清, 刘琪璟. 生态恢复评价研究进展. *江西科学*, 2003, 21(3): 168-174.
- [69] 陈高, 邓红兵, 代力民, 吴钢. 综合构成指数在森林生态系统健康评估中的应用. *生态学报*, 2005, 25(7): 1725-1733.