

退化生态系统恢复与恢复生态学

任 海, 彭少麟, 陆宏芳

(中国科学院华南植物研究所, 广州 510650)

摘要:恢复生态学起源于 100a 前的山地、草原、森林和野生生物等自然资源的管理研究, 形成于 20 世纪 80 年代。它是研究生态整合性的恢复和管理过程的科学。恢复生态学的研究对象是在自然或人为干扰下形成的偏离自然状态的退化生态系统。生态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。恢复生态学的理论与方法较多, 它们均源于生态学等相关学科, 但自我设计和人为设计是唯一源于恢复生态学研究和实践的理论。由于生态系统的复杂性, 退化生态系统恢复的方向和时间具有不确定性, 其恢复的机理可用临界阈值理论和状态跃迁模型进行解释。中国森林恢复中存在的问题包括: 大量营造种类和结构单一的人工林忽视了生物多样性在生态恢复中的作用; 大量使用外来种; 忽视了生态系统健康所要求的异质性; 忽略了物种间的生态交互作用; 造林时对珍稀濒危种需要缺乏考虑; 城镇绿化忽略了植被的生态功能等问题。此外, 还介绍了生态恢复的方法、成功恢复的标准, 并提出了恢复生态学的发展趋势; 恢复生态学尚未形成理论和方法体系, 要成熟还有很长的路要走; 恢复生态学正在强调自然恢复与社会、人文的耦合; 对森林恢复研究要集中在恢复中的障碍和如何克服这些障碍两个方面; 鉴于生态系统复杂性和动态性, 应停止期待发现能预测恢复产出的简单定律, 相反, 应该根据恢复地点及目标多样性而强调适应性恢复。

关键词:退化生态系统; 恢复生态学; 生物多样性

The restoration of degraded ecosystems and restoration ecology

REN Hai, PENG Shao-Lin, LU Hong-Fang (South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1756~1764.

Abstract: The ideas of restoring biotic communities originated 100 years ago from studies of degraded ecosystems and natural resource management practices. Restoration ecology has been established as a discipline since 1980s and is broadly defined as the study of restoring and managing ecological integrity. Ecological integrity includes biodiversity, ecological pattern and process, regional and historical context, and social practices for sustainability. Restoration ecology focuses on ecosystems that are driven away from their "normal" states by natural or anthropogenic disturbances. The objective of ecological restoration is to reconstruct the structure, function, dynamics and services, and its long-term goal is to achieve ecological sustainability through restoration and protection measures. Because of the complexity of ecological processes, the direction and time required for restoration of a particular ecosystem is hardly deterministic. The general process of ecological restoration, however, may be explained by the critical threshold theory, and state and transition model from successional perspective. Several problems have been pointed out in this article on forest restoration in China: a great deal of the established artificial forests with mono-species result in lacking of biodiversity and stableness; non-native species have been widely imported and planted; features required by healthy ecosystem such as heterogeneity are ignored; the mutual biotic interaction among different species are ignored; rare and endangered species of climax are seldom been considered in forestation; ecological function of vegetation is

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30200035);中国科学院资助项目(STZ-01-36);广东省自然科学基金资助项目(003031, 021627)

收稿日期:2003-05-14; **修订日期:**2004-03-10

作者简介:任海(1970~), 男, 湖北黄石人, 博士, 研究员, 主要从事生态系统管理, 生态系统生态学和恢复生态学研究。E-mail: renhai@scib.ac.cn

致谢:感谢美国 Arizona State University 的邬建国教授和 Rough Brothers 的 Mike Ward 及张义明博士所提供的帮助。

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 30200035), Chinese Academy of Sciences grant (No. STZ-01-36), and research grants from Guangdong Natural Science Foundation (No. 003031, 021627).

Received date: 2003-05-14; **Accepted date:** 2004-03-10

Biography: REN Hai, Professor, mainly engaged in ecosystem and restoration ecology. E-mail: renhai@scib.ac.cn

neglected in town virescence and landscape. In addition, the method of restoration ecology and the criteria of successful restoration as well as the future developments in the field of restoration ecology have been introduced in this review. Theories and methodologies of restoration ecology are still at their early stage and takes time to develop. Restoration ecology is focusing on the integration of natural restoration and social humanities. Restoration ecology not only defines the obstacle of restoration but also overcomes that obstacle. Due to the complexity and dynamics of ecosystem, it is wise to emphasize on adaptability restoration according to various locations and objectives instead of trying to establish some simple expected principals.

Key words: degraded ecosystems; restoration ecology; biodiversity

文章编号:1000-0933(2004)08-1756-09 中图分类号:Q891;Q948 文献标识码:A

恢复生态学研究起源于 100 年前的山地、草原、森林和野生生物等自然资源管理研究,其中本世纪初的水土保持、森林砍伐后再植的理论与方法在恢复生态学中沿用至今。最早开展恢复生态学试验的是 Leopold,他与助手一起于 1935 年在 Wisconsin 大学植物园恢复了一个 24hm² 的草场。20 世纪 50~60 年代,欧洲、北美和中国都注意到了各自的环境问题,开展了一些工程与生物措施相结合的矿山、水体和水土流失等环境恢复和治理工程,并取得了一些成效。当前在恢复生态学理论和实践方面走在前列的是欧洲和北美,在实践中走在前列还有新西兰、澳洲和中国。其中欧洲偏重矿地恢复,北美偏重水体和林地恢复,而新西兰和澳洲以草原为主^[1~3],中国则因人口偏多强调农业综合利用^[4,5]。近 40a 的生态恢复实践和研究对象涉及了森林、农田、草原、荒漠、河流、湖泊和废弃矿地等,并在退化生态系统类型、退化原因、程度、机理、诊断,退化生态系统恢复重建的机理、模式和技术上做了大量研究。随着人口的持续增长,开发自然资源过程导致了环境污染、植被破坏、土地退化、水资源短缺、气候变化、生物多样性丧失等生态退化问题。据估计,全球约有 5×10⁹hm² 的土地退化,约有 43% 的陆地植被生态系统的服务功能受到影响,1978~1991 年间全球土地荒漠化造成的损失达 3000~6000 亿美元,现在每年高达 423 亿美元,而全球每年进行生态恢复而投入的经费达 100~224 亿美元^[8]。中国的退化生态系统面积约占国土总面积的 1/4^[31]。可见,人类面临着合理恢复、保护和开发自然资源的挑战。恢复生态学(Restoration Ecology)产生于 20 世纪 80 年代,从理论与实践两方面研究生态系统退化、恢复、开发和保护机理,为解决人类生态问题和实现可持续发展提供了机遇^[6~11]。本文对近年来国际上恢复生态学在理论和方法上的进展进行综述,并提出恢复生态学的可能发展方向。

1 退化生态系统与恢复生态学的定义

退化生态系统是指生态系统在自然或人为干扰下形成的偏离自然状态的系统。与自然系统相比,退化生态系统的种类组成、群落或系统结构改变,生物多样性减少,生物生产力降低,土壤和微环境恶化,生物间相互关系改变^[4]。退化生态系统形成的直接原因是人类活动,部分来自自然灾害,有时两者叠加发生作用。生态系统退化的过程由干扰的强度、持续时间、和规模所决定。Daily 对造成生态系统退化的人类活动进行了排序:过度开发(含直接破坏和环境污染等)占 35%,毁林占 30%,农业活动占 28%,过度收获薪材占 7%,生物工业占 1%^[8]。自然干扰中外来种入侵、火灾及水灾是最重要的因素。

恢复生态学是一门关于退化生态系统恢复的学科,由于恢复生态学具理论性和实践性,从不同的角度看会有不同的理解,因此关于恢复生态学的定义有很多,其中具代表性的如下:美国自然资源委员会(The US Natural Resource Council)、Jordan、Cairns 和 Egan 等先后提出的定义强调恢复是使受损的生态系统恢复到干扰前的理想状态^[7,13,14]。但由于缺乏对生态系统历史的了解,恢复时间太长、生态系统中关键种的消失、费用太高等现实条件的限制,这种理想状态不可能达到。余作岳和彭少麟提出恢复生态学是研究生态系统退化的原因、退化生态系统恢复与重建的技术与方法、生态学过程与机理的科学^[15]。Bradshaw 认为生态恢复是有关理论的一种“酸性试验”(acid test 或译为严密验证),它研究生态系统自身的性质、受损机理及修复过程^[16];Diamond 认为生态恢复就是再造一个自然群落、或再造一个自我维持、并保持后代具持续性的群落。Harper 认为生态恢复是关于组装并试验群落和生态系统如何工作的过程^[16]。(国际)恢复生态学会(Society for Ecological Restoration)先后提出 3 个定义:生态恢复是修复被人类损害的原生生态系统的多样性及动态的过程;生态恢复是维持生态系统健康及更新的过程;生态恢复是帮助研究生态整合性的恢复和管理过程的科学,生态整合性包括生物多样性、生态过程和结构、区域及历史情况、可持续发展的社会实践等广泛的范围。第 3 个定义是该学会的最终定义^[17]。

与生态恢复相关的概念还有:重建(Rehabilitation)、改良(Reclamation)、改进(Enhancement)、修补(Remedy)、更新(Renewal)、再植(Revegetation)。这些与恢复相关的概念可看作广义的恢复概念^[5,15]。最近,Kloor、Davis 和 Higgs 等就恢复生态学是否应该“淘汰”在 Science 上进行了争论^[18~20],他们的争论与对恢复的概念理解不同有关。生态恢复包括人类的需求观、生态学方法的应用、恢复目标和评估成功的标准、以及生态恢复的各种限制(如恢复的价值取向、社会评价、生态环境等)等基本成分。考虑到**甲方数据**生态系统可选择性,从大时空尺度上恢复的生态系统可自我维持,恢复后的生态系统与周边生境具协调性,生态恢复就不可能一步到位。如果说恢复(restoration)是指完全恢复到干扰前的状态,主要是再建立一个完全由本地种组成的生

态系统。在大多数情况下,这是一个消极过程,它依赖于自然演替过程和移去干扰。积极的恢复要求人类成功地引入生物并建立生态系统功能。不管是积极还是消极恢复,其目标是促进保护,而且在短期内不能实现。随着人口增长,土地破碎化、生物入侵、环境污染等导致完全恢复不太可能。对自然保护而言,能够保护原有的植物和动物区系就很好了。在恢复比较困难或不可能的情况下,社会对土地和资源的要求又强烈,需要一或多种植被转换,因而重建是必要的,重建就是通过基于对干扰前生态系统结构和功能了解,目标从保护转而利用,通过建立一个简化的生态系统而修复生态系统。这种生态系统管理得好,就可以恢复得更复杂。从理论上讲,重建得越过几个恢复的临界阈值。对极度退化的生态系统就必须改良,这意味着对生态系统长期的管理和投资,不再追求生态系统自我更新,而是完全人工制造并维持。Bradshaw 曾作了一个退化、恢复、重建与改良示意图说明其关系,后来 Lugo 又加以修改^[16](图 1)。

2 生态恢复的目标与模式

广义的恢复目标是通过修复生态系统功能并补充生物组分使受损的生态系统回到一个更自然条件下(NRC),理想的恢复应同时满足区域和地方的目标。Hobbs 和 Norton 认为恢复退化生态系统的目标包括:建立合理的内容组成(种类丰富度及多度)、结构(植被和土壤的垂直结构)、格局(生态系统成分的水平安排)、异质性(各组分由多个变量组成)、功能(诸如水、能量、物质流动等基本生态过程的表现)^[4]。事实上,进行生态恢复工程的目标不外乎 4 个:①恢复诸如废弃矿地这样极度退化的生境,②提高退化土地上的生产力;③在被保护的景观内去除干扰以加强保护;④对现有生态系统进行合理利用和保护,维持其服务功能。如果按短期与长期目标分还可将上述目标分得更细^[21]。

由于生态系统复杂性和动态性,虽然恢复生态学强调对受损生态系统进行恢复,但恢复生态学的首要目标仍是保护自然的生态系统,因为保护在生态系统恢复中具有重要的参考作用;第 2 个目标是恢复现有的退化生态系统,尤其是与人类关系密切的生态系统;第 3 个目标是对现有的生态系统进行合理管理,避免退化;第 4 个目标是保持区域文化的可持续发展;其它的目标包括实现景观层次的整合性,保持生物多样性及保持良好的生态环境。Parker 认为,恢复的长期目标应是生态系统自身可持续性的恢复,但由于这个目标的时间尺度太大,加上生态系统是开放的,可能会导致恢复后的系统状态与原状态不同^[22]。

恢复模式是一个包括了预期的物理、化学和生物特征的生态恢复框架。虽然这个模式是有地点特征,但这些特征也应符合区域恢复的需要。发展一个恢复模式将可加强在地方和区域尺度的生物多样性和功能,并要了解这两个尺度上的限制和机遇。恢复模式需要当前的信息(海拔、水文、植被、土壤、地形、时空异质性、人类干扰等)和历史信息(相关的杂志、书籍、论文、标本记录、图片、气象记录、航空图片、土地利用规划、土壤等)才可^[23]。

3 恢复生态学的主要理论

恢复生态学的理论主要是演替理论,但又远不止演替理论,其核心原理是整体性原理、协调与平衡原理、自生原理和循环再生原理等。目前,自我设计与人为设计理论(Self-Design versus Design Theory)是唯一从恢复生态学中产生的理论^[24]。自我设计理论认为,只要有足够的时间,随着时间的进程,退化生态系统将根据环境条件合理地组织自己并会最终改变其组分。而人为设计理论认为,通过工程方法和植物重建可直接恢复退化生态系统,但恢复的类型可能是多样的。这一理论把物种的生活史作为植被恢复的重要因子,并认为通过调整物种生活史的方法就可加快植被的恢复。这两种理论不同点在于:自我设计理论把恢复放在生态系统层次考虑,未考虑到缺乏种子库的情况,其恢复的只能是环境决定的群落;而人为设计理论把恢复放在个体或种群层次上考虑,恢复的可能是多种结果^[24,25]。

恢复生态学应用了许多学科的理论,但最主要的还是生态学理论。这些理论主要有:限制性因子原理(寻找生态系统恢复的关键因子)、热力学定律(确定生态系统能量流动特征)、种群密度制约及分布格局原理(确定物种的空间配置)、生态适应性理论(尽量采用乡土种进行生态恢复)、生态位原理(合理安排生态系统中物种及其位置)、演替理论(缩短恢复时间,极端退化的生态系统恢复时,演替理论不适用,但具指导作用)、植物入侵理论、生物多样性原理(引进物种时强调生物多样性,生物多样性可能导致恢复的生态系统稳定)、缀块-廊道-基底理论(从景观层次考虑生境破碎化和整体土地利用方式)等等^[15,25~27]。恢复生态学的理论基础^{两部分数据}方面,即:土壤层次、种群生物学、群落生态学、生态系统生态学 and 景观生态学基础。

土壤层次 土壤恢复的原则及过程、土壤营养恢复过程及协助措施、土壤恢复的工程措施及辅助手段、土壤污染(重金属、

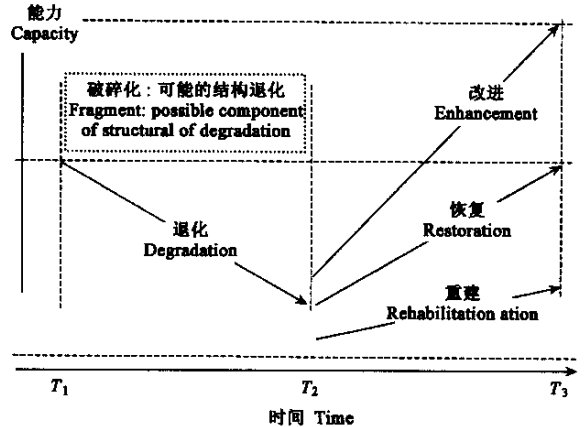


图 1 退化和恢复^[16]

Fig. 1 Degradation and restoration^[16]

有机物等)的积累及清除过程和措施、土壤微生物、动物与菌根的生态恢复。

种群生物学基础包括 起源种群的个体数量和基因变异对种群定居、发育、生长和进化潜力的影响;种群成功恢复中适应性和生活史特征的作用;景观元素的空间格局对多种群动态和种群过程的影响;在一个经常快速、持续时间范围内,基因漂移、基因流和选择对种群持续生存的影响;种间作用对种群动态、动态和群落发育的影响。

群落生态学基础包括 恢复的终点是结构与功能的和谐恢复;恢复的群落中可容纳多少特征与原群落不同;生物多样性理论与恢复;生境异质性与生态系统功能恢复的过程;演替和干扰理论与恢复过程;胁迫性条件下植物成簇性易于恢复;如果群落的演替可预测,则通过人为干预可加快恢复速率。

生态系统生态学基础包括 主要是功能方面的物质循环和能量流动原理;输入的压力效果;食物网的构建;系统组分间的反馈;营养传输的效率;初级生产力和分解速率;非生物环境的形成;自然干扰体系必须恢复。

景观生态学基础包括 空间异质性理论;从景观角度选择合适的位点及恢复目标;斑块恢复的空间框架理论;信息系统与模型的建立;恢复现象在小尺度上不能解释时可在大尺度上进行,如短时间内看到病虫害爆发,而长时间则是导致了多样性。

4 生态恢复的方法

不同类型(如森林、草地、农田、湿地、湖泊、河流、海洋)、不同程度的退化生态系统,其恢复方法亦不同。从生态系统的组成成分角度看,主要包括非生物和生物系统的恢复。无机环境的恢复技术包括水体恢复技术(如控制污染、去除富营养化、换水、积水、排涝和灌溉技术)、土壤恢复技术(如耕作制度和方式的改变、施肥、土壤改良、表土稳定、控制水土侵蚀、换土及分解污染物等)、空气恢复技术(如烟尘吸附、生物和化学吸附等)。生物系统的恢复技术包括植被(物种的引入、品种改良、植物快速繁殖、植物的搭配、植物的种植、林分改造等)、消费者(捕食者的引进、病虫害的控制)和分解者(微生物的引种及控制)的重建技术和生态规划技术(RS、GIS、GPS)的应用^[21,28,29]。在生态恢复实践中,同一项目可能会应用上述多种技术。例如,余作岳等在极度退化的土地上恢复热带季雨林过程中,采用生物与工程措施相结合的方法,通过重建先锋群落、配置多层次多物种乡土树的阔叶林和重建复合农林业生态系统等 3 个步骤取得了成功。总之,生态恢复中最重要的还是综合考虑实际情况,充分利用各种技术,通过研究与实践,尽快地恢复生态系统的结构,进而恢复其功能,实现生态、经济、社会和美学效益的统一^[15]。

在海岛和海岸带区域天然植被是最好的植被类型,但要恢复却不容易。最好的办法是自然恢复,其优点是可以缩短实现森林覆盖所需的时间,保护珍稀物种和增加森林的稳定性,投资小、效益高。另一种办法是生态恢复,即通过人工的方法,参照自然规律,创造良好的环境,恢复天然的生态系统,主要是重新创造、引导或加速自然演化过程。生态恢复方法又包括物种框架法和最大生物多样性方法。所谓物种框架法是指在距离天然林不远的地方,建立一个或一群物种,作为恢复生态系统的基本框架,这些物种通常是植物群落中的演替早期阶段物种或演替中期阶段物种。而最大生物多样性方法是指尽可能地按照该生态系统退化前的物种组成及多样性水平种植进行恢复,需要大量种植演替成熟阶段的物种,忽略先锋物种。无论哪种方法,在这些过程中要对恢复地点进行准备,注意种子采集和种苗培育,种植和抚育,加强利用自然力,控制杂草,加强利用乡土种进行生态恢复的教育和研究^[30,31]。

恢复生态学一直强调将自然科学与社会科学结合,但如何结合的研究工作不多。生态恢复涉及到人类努力恢复生态系统到受干扰前的状态,但科学家表明很难知道生态系统象什么、功能如何。恢复的政策制定者则需要知道穿越科学与企业间的事实与价值。在调查公众、环境主义者、政策制定者和科学家的环境价值、信仰、态度和理念时可用多种调查方法,它们可归为两类基本的社会范式:技术主义的世界观和生态中心主义的世界观。它们衍生出两种调查方法:态度调查和问题调查。为此,Woolley 等发明了生态系统恢复与管理的调查方法——Q 方法,作为传统调查方法的重要补充,来确定可能影响恢复规划过程的价值范围。Q 方法不着眼于在有关人群中开展有足够大的具代表性的样本调查,而是使用一套多样的主题,让受调查者初步反映出他们对相关问题的代表性意见,而是有多少人持有某种观点。其目标是模拟而不是代表相关人员的信仰和价值的主观结构^[23]。Q 方法主要用来量化各种恢复目标的观点,并将这些多样化的观点纳入恢复规划中。

5 恢复的概念模型

以往,恢复生态学中占主导的思想是通过排除干扰、加速生物组分的变化和启动演替过程使退化的生态系统恢复到某种理想的状态。在这一过程中,首先是建立生产者系统(主要指植被),由生产者固定能量,并通过能量驱动水分循环,水分带动营养物质循环。在生产者系统建立的同时或稍后再建立消费者、分解者系统和微生境。余作岳等通过近 40a 的恢复试验发现,在热带季雨林恢复过程中生物多样性导致了动物和微生物的多样性,而多样性可能导致群落的稳定性^[15,11,32]。

已有一些恢复过程中生态系统特征随时间变化的表现曲线。最常引用的模型是 Bradshaw 提出的退化生态系统恢复过程中结构与功能变化曲线^[31]。如果去掉干扰,恢复依赖于自然演替,恢复就遵循 Allen 所提出的经典的恢复的状态和跃迁模型(图 2)^[33]。这类恢复必须基于种类减少不多、生态系统功能(如土壤肥力、能量和水分循环、抵御外来入侵种)受损不大才行。如果生态系统受损越过了受生物或非生物因子控制的不可逆的阈值,生态系统恢复将遵循 Whisenant 所提出的更复杂的恢复的状态

和跃迁模型(图 3)^[34],该图显示退化是分步完成的,而且要经过被生物或非生物控制的跃迁阈值。Hobbs & Norton 和 Allen 在此基础上提出了更普遍性状态和跃迁模型(图 4)^[5,35]。假设生态系统存在多种状态,生态系统在退化过程中涉及到退化努力。

恢复是通过地点造型、改进土壤、种植植被等促进次生演替,其目标是促进演替,但结果有时是改变了演替方向。在那些与遗弃地或自然干扰不同的地方进行恢复时,可能不遵循模仿的次生演替途径。其主要原因是退化的程度不同。Zedler(1999)在研究了大量恢复实例的基础上提出了生态恢复谱(Ecological restoration spectrum)理论^[36]。包括可预测性、退化程度和努力 3 部分。可预测性指生态系统随时间的发育,即它将沿什么方向发展并达到参考系统的接近程度,如外来种和乡土种覆盖率的比率可作为一个指标,它比较容易预测外来种的覆盖率会随时间而逐渐减少,但难预测何时它与自然生态系统中的比率一样低,哪个种会成为最有问题的种、外来种控制恢复样地后果如何等。退化程度指样地和区域两个尺度上的受损情况和程度。努力涉及到对地形、水文、土壤、植被和动物等的更改。严重退化情形下,恢复努力越少,预测其目标越不可能达到,恢复努力越大,目标越易达到。但复杂情形下可能出现以不同的速率及不同的方向恢复。在轻度退化情况下,即使只做一点恢复努力,也易于恢复,做更大的努力则极可能达到目标。根据这些原则可能指导恢复实践并预测恢复结果。

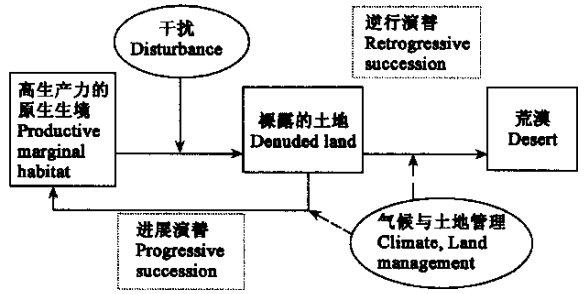


图 2 基于演替观的简单状态和跃迁模型^[33]

Fig. 2 Simple state and transition model from successional perspective^[33]

哪个种会成为最有问题的种、外来种控制恢复样地后果如何等。退化程度指样地和区域两个尺度上的受损情况和程度。努力涉及到对地形、水文、土壤、植被和动物等的更改。严重退化情形下,恢复努力越少,预测其目标越不可能达到,恢复努力越大,目标越易达到。但复杂情形下可能出现以不同的速率及不同的方向恢复。在轻度退化情况下,即使只做一点恢复努力,也易于恢复,做更大的努力则极可能达到目标。根据这些原则可能指导恢复实践并预测恢复结果。

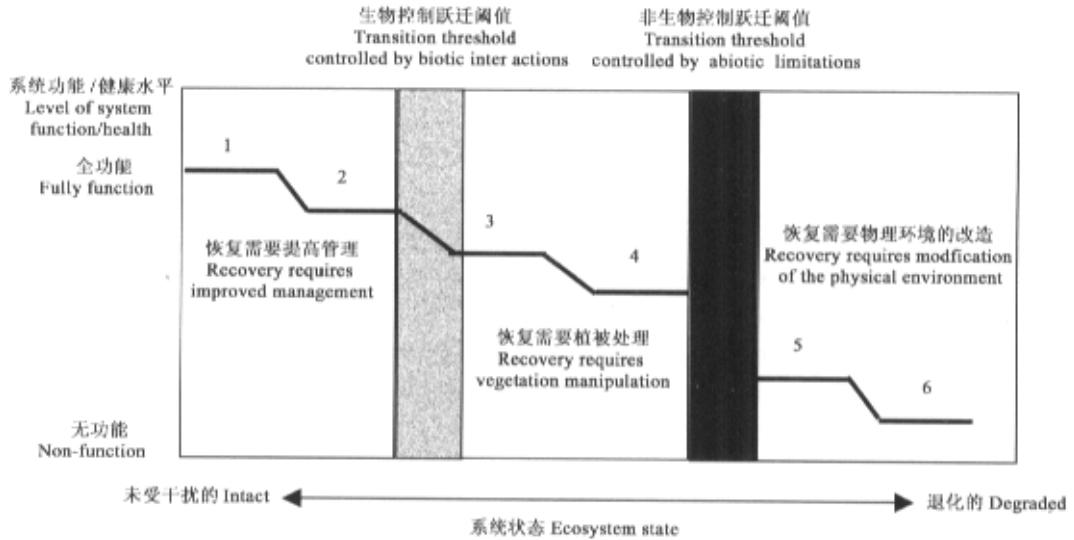


图 3 更复杂的状态和跃迁模型^[34]

Fig. 3 A more complicated state and transition model^[34]

6 恢复成功的标准

近来的文章提出要评价恢复的标准^[37~41],的确,恢复生态学家、资源管理者、政策制订者和公众希望知道恢复成功的标准何在,但由于生态系统的复杂性及动态性却使这一问题复杂化了。通常将恢复后的生态系统与未受干扰的生态系统进行比较,其内容包括关键种的多度及表现、重要生态过程的再建立、诸如水文过程等非生物特征的恢复。

国际恢复生态学会建议比较恢复系统与参照系统的生物多样性、群落结构、生态系统功能、干扰体系、以及非生物的生态服务功能^[5]。还有人提出使用生态系统 23 个重要的特征来帮助量化整个生态系统随时间在结构、组成及功能复杂性方面的变化^[42]。Cairns 认为恢复至少包括被公众社会感觉到的,并被确认恢复到可用程度,恢复到初始的结构和功能条件(尽管组成这个结构的元素可能与初始状态明显不同)^[43]。Bradsaw 提出可用如下 5 个标准判断生态恢复:①可持续性(可自然更新),②不可入侵性(象自然群落一样能抵制入侵),③生产力(与自然群落一样高),④营养保持力,五是具生物间相互作用(植物、动物、微生物)^[46]。Lambers 的指标体系应包括造林产量指标(幼苗成活率,幼苗的高度、基径和蓄材生长,种植密度,病虫害受控情况)、生态指标(期望出现物种的出现情况,适当的植物和动物多样性,自然更新能否发生,有适量的固氮树种,目标种出现否,适

当的植物覆盖率,土壤表面稳定性,土壤有机质含量高,地面水和地下水保持)和社会经济指标(当地人口稳定,商品价格稳定,食物和能源供应充足,农林业平衡,从恢复中得到经济效益与支出平衡,对肥料和除草剂的需求)^[44]。Davis 和 Margaret 等认为,恢复是指系统的结构和功能恢复到接近其受干扰以前的结构与功能,结构恢复指标是乡土种的丰富度,而功能恢复的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联结已形成^[4]。任海和彭少麟根据热带人工林恢复定位研究提出,森林恢复的标准包括结构(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)^[11]。Aronson 等提出了 25 个重要的生态系统特征和重要的景观特征。这些生态系统特征主要是结构、组成和功能,而景观特征则包括景观结构与生物组成、景观内生态系统间的功能作用、景观破碎化和退化的程度类型和原因^[45,46]。一般不必 25 个特征。这些特征必须是花费小且可量化,对由于干扰等引起小的小变化后敏感,能快速测定,在一个国家或区域范围内易于传递。

Careher 和 Knapp 提出采用记分卡的方法,假设生态系统有 5 个重要参数(例如种类、空间层次、生产力、传粉或播种者、种子产量及种子库的时空动态),每个一参数有一定波动幅度,比较退化生态系统恢复过程中相应的 5 个参数,看每个参数是否已达到正常波动范围或与该范围还有多大的差距^[47]。Costanza 等在评价生态系统健康状况时提出了一些指标(如活力、组织、恢复力等),这些指标也可用于生态系统恢复评估^[42]。在生态系统恢复过程中,还可应用景观生态学中的预测模型为成功恢复提供参考。除了考虑上述因素外,判断成功恢复还要在一定的尺度下,用动态的观点,分阶段检验^[48~50]。

7 中国森林恢复中存在的问题

退化生态系统恢复最主要是植被恢复。我国目前已在退化生态系统类型、退化原因、程度、机理、诊断,退化生态系统恢复重建的机理、模式和技术上做了大量研究。从生态系统层次上有森林、草地、农田、水体、湿地等方面研究和实践,也有如干旱、半干旱、荒漠化及水土流区等的地带性退化生态系统及恢复的工程、技术、机理研究。特别是土地退化及恢复研究包括了土地沙漠化及整治、水土流失治理、盐渍化土地改良、采矿废弃地复垦等。生态系统与生物群落恢复研究则有所有生态系统^[36]。虽然各类生态系统恢复研究与实践取得了较大的成绩,但也存在一些问题。特别是作为森林恢复的重要方式之一,造林忽视了生物多样性在生态恢复中的作用^[30,31],主要生态学问题有:

大量营造种类和结构单一的人工林 过去大量植造的人工林是纯针叶林,其群落种类单一,年龄和高矮比较接近,十分密集,林下缺乏中间灌木层和地表植被。它导致了林内地表植被覆盖很差,保持水的能力很弱;树林中的生物多样性水平极低;森林中的营养循环过程被阻断,土壤营养日益匮乏;抗虫等生态稳定性差。因此,今后应强调森林覆盖率不是唯一评价恢复的指标,生态完整性和生态过程恢复是非常重要的。

大量使用外来种:地带性植被是多年植物与气候等生境相互作用而形成的,破坏后重建的生态系统大量使用外来种,这些种类或多或少存在问题,对原有系统造成影响。当前南方一些林业管理部门认为非马尾松等造林树种的乡土阔叶树种为杂木,喜欢种植桉树、杨树等外来树种。

忽视了生态系统健康所要求的异质性 天然的生态系统包括物种组成、空间结构、年龄结构和资源利用等方面的异质性,这些异质性为多样性的动物和植物等生存提供了多种机会和条件。人工林出于管理或经济目标,均以同质性出现。不是一个健康的生态系统所具备的。因此,在将来营造生态公益林时应强调异质性。

忽略了物种间的生态交互作用 生态系统的生物与环境间、生物与生物间形成了复杂的关系网,尤其是生物间的相互作用更是复杂。在恢复森林时,必须考虑到野生生物间的相互关系,采取适当的方法促进建立这种良好的关系,这种恢复才是长久之

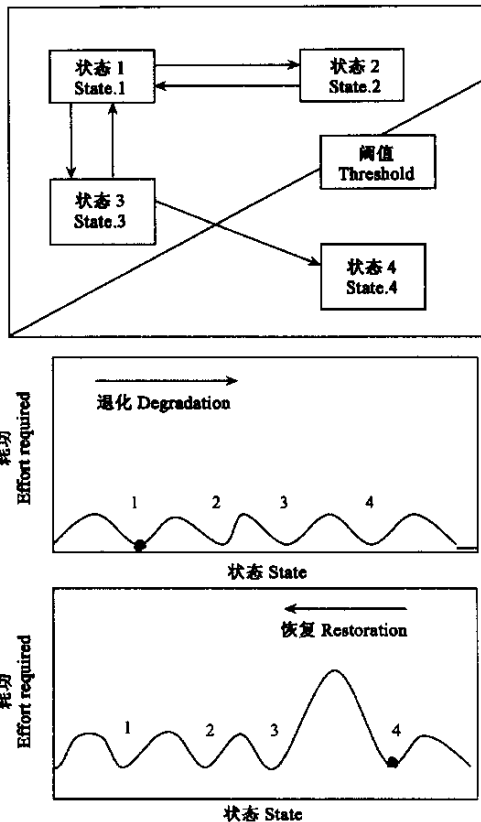


图 4 最普遍性状态和跃迁模型^[5,35]
Fig. 4 The most general state and transition model^[5,35]

恢复。

忽略了农业区和生活区的植被恢复 我国典型的农业生产方式是大面积的农田,农业害虫靠杀虫剂,土壤消耗靠化肥,并未考虑在农业区和生活区的植被恢复。

此外,造林中还存在对珍稀濒危种需要缺乏考虑,城镇绿化忽略了植被的生态功能等问题。

8 恢复生态学的一些发展趋势

自从 Aldo Leopold 1934 年开始恢复 University of Wisconsin 的 Madison 植物园的草场以来,已有 170 多种乡土草种,但他们仍不能预测在一定的恢复措施下取得什么产出,而且恢复的草场达不到残遗草场的多样性,主要的问题包括非禾本科的草种被具入侵性的乡土草种挤出,昆虫多样性低(主要是普通类群),乡土哺乳动物消失(特殊类群),草原鸟类不利用恢复的草场。这说明恢复生态学要成熟还有很长的路要走。

虽然 Bradshaw 提出退化生态系统恢复过程中功能恢复与结构恢复成线性关系^[51],但这并没有考虑到退化程度和恢复的努力。生态学还没有到达是可以对特定地点特点方法下有特定产出的预测阶段。生态系统恢复与自然演替是一个动态的过程,有时很难区分两者。恢复生态学要强调自然恢复与社会、人文的耦合,好的生态哲学观将有助于科学工作者、政府和民众的充分合作^[57]。恢复生态学研究无论是在地域上还在理论上都要跨越边界。恢复生态学研究以生态系统尺度为基点,在景观尺度上表达。退化生态系统恢复与重建技术尚不成熟,目前恢复生态学中所用的方法均来自相关学科,尚需形成独具特色的方法体系。

到目前为止,国内外对森林恢复研究主要集中在恢复中的障碍(如缺乏种源、种子扩散不力、土壤和小气候条件恶劣不宜于植物定居等)和如何克服这些障碍两个方面,另有一些恢复过程中生态系统结构、功能和动态的研究^[52]。还存在研究时间太短、空间尺度太小、恢复过程不清、结构与功能恢复机理不清、恢复模型缺乏实验支持等问题。纵观生态系统恢复研究,过去主要关注过程,比较少关注规划、行动和评价阶段。最近恢复生态学在如下 3 个方面比较活跃:①关于恢复的临界阈值问题,②恢复过程中优势种群的扩散过程和空间格局的动态变化,③利用景观生态学理论和方法探讨恢复机理问题^[53,54]。

生态系统是相当难完全恢复的,因为它有太多的组分,而且组间间存在非常复杂的相互作用,需要更好地了解生物与非生物因子间、种间的因果关系。如果能全面理解恢复地点的条件和控制变量,就能预测恢复的效果。而且如果没有限制,恢复实践者就能做很好的恢复工作。由于理解是不全面的,恢复的努力被不充分的知识和地点的变化而限制,恢复工作往往不是很理想。恢复生态学家开始用恢复试验来验证来自自然或人类干扰的生态系统中各种理论,然而绝大多数情况下,实践者不得不用更广泛的生态学测试非常不同的情况。虽然有几个生态学理论与恢复相关,但个体的恢复还不得不依靠随时间而有次序的发展。Ehrenfeld 近来建议恢复生态学家应停止期待发现能预测恢复产出的简单规律或牛顿定律,相反,应该知道因为恢复地点本身及恢复目标导致的挑战的多样性^[55]。

适应性恢复是与适应性管理相应的一个概念。适应性管理是指科学家提供信息、建议、推荐给管理者选择并实施,随后科学家又跟踪研究实施后的情况并提出新一轮建议,如此反复,管理者利用研究发现,研究者利用管理实施回答因果关系问题。只要可能,恢复项目就应将试验(集中在怎样实现恢复目标等重要问题上的试验)整合进规划与设计,可能适应性恢复不能确保期待的产出,但它将为同类生态系统的恢复提供可更正的测定方法或导致更好的恢复实践。

References:

- [1] Cairns J J. *Restoration of aquatic ecosystems*. Washington, D C: National Academy Press, 1992. 32~38.
- [2] Gaynor V. Prairie restoration on a corporate site. *Restoration and Reclamation Review*, 1990, **1**(1):35~40.
- [3] Mansfield B & Towns D. Lessons of the Islands: Restoration in New Zealand. *Restoration and Management Notes*, 1997, **15**(2):150~154.
- [4] Ren H, Peng S L. Restoration and rebuilding of degraded ecosystem. *Youth Geography*, 1998, **3**(3):7~11.
- [5] Hobbs R J & Norton D A. Towards a conceptual framework for restoration ecology. *Restoration Ecology*, 1996, **4**(2):93~110.
- [6] Aber J D. & Jordan W III. Restoration ecology: an environmental middle ground. *BioScience*, 1985, **35**(7):399.
- [7] Cairns J Jr. Restoration ecology. *Encyclopedia of Environmental Biology*, 1995, **3**:223~235.
- [8] Daily G C. Restoring value to the worlds degraded lands. *Science*, 1995, **269**:350~354.
- [9] Chen L Z, Chen W L. *Study of Chinese Degraded Ecosystem*. Beijing: Sciences Press, 1995. 5~87.
- [10] Dobson A D, Bradshaw A D, Baker A J M. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. *Science*, 1997, **277**:515~522.
- [11] Ren H, Peng S L. Restoration and sustainable development of degraded ecosystem in low subtropical China. In: Chen Z ed. *Symposium of life science and youth academic conference of Chinese Science Society*. Beijing: Chinese Science and Technology Pres, 1998. 176~179.
- [12] Chapman G P. *Desertified grassland*. London: Academic Press, 1992. 8~12.

- [13] Jordan WR III. "Sunflower Forest": ecological restoration as the basis for a new environmental paradigm. In: Baldwin ADJ, ed. *Beyond Preservation: Restoring and Inventing Landscape*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1995. 17~34.
- [14] Peng S L. *Study and application of restoration ecology in tropical and subtropical China*. Beijing: Science Press, 2003. 1~25.
- [15] Yu Z Y, Peng S L. *Ecological study of Vegetation restoration of degraded ecosystem in tropical and subtropical area*. Guangzhou: Guangdong Science Press, 1996. 12~33.
- [16] Lugo AE. The future of the forest ecosystem rehabilitation in the tropics. *Environment*, 1988, **30**(7): 17~25.
- [17] Jackson L L, Lopoukine D, Hillyard D. Ecological restoration: a definition and comments. *Restoration Ecology*, 1995, **3**(2): 71~75.
- [18] Kloor K. Restoration ecology: Returning America's forests to their 'natural' roots. *Science*, 2000, **287**(5453): 573.
- [19] Davis K A. "Restoration"—a misnomer. *Science*, 2000, **287**(5456): 1203.
- [20] Higgs E, Covington W W, Falk D A. No justification to retire the term "Restoration". *Science*, 2000, **287**(5456): 1203.
- [21] Zhang J E, Xu P. Major issues in restoration ecology research. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(1): 109~112.
- [22] Parker V T. The scale of successional models and restoration ecology. *Restoration Ecology*, 1997, **5**(4): 301~306.
- [23] Woolley JT, McGinnis MV, Herms WS. Survey methodologies for the study of ecosystem restoration and management: the importance of Q-methodology. In: Scow KM ed. *Integrated assessment of ecosystem health*. London: Lewis Publishers. 2000. 167~187
- [24] Van der Valk. *Succession theory and wetland restoration*. Proceedings of INTECOL's V International wetlands conference, Perth, Australia, 1999. 162.
- [25] Middleton B. *Wetland restoration: Flood pulsing and disturbance dynamics*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1999. 1~311.
- [26] Johnstone I M. Plant invasion windows: a time~based classification of invasion potential. *Biological Review*, 1986, **61**: 369~394.
- [27] Forman R T T. *Land Mosaics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 1~498.
- [28] Parham W. *Improving degraded lands: Promising experience form South China*. Honolulu: Bishop Museum Press, 1993. 11~23.
- [29] Mitsch W J & Jorgensen S E. *Ecological engineering*. New York: John Wiley & Sons, 1989. 26~126.
- [30] Xie Y. *Restore Chinese Natural Vegetation*. Beijing: Chinese Forestry Press, 2002. 58.
- [31] Ren H, Peng S L. *Restoration Ecology Introduction*. Beijing: Science Press, 2001.
- [32] Peng S L. *Dynamic of forest community in low subtropical area*. Beijing: Science Press, 1996.
- [33] Allen MF. Mycorrhiza and rehabilitation of disturbed arid soil: processes and practices. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1989, **3**: 229~241
- [34] Whisenant S. *Repairing damaged wildlands*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [35] Allen EB. Restoration and biodiversity. In: Levin S ed. *Encyclopedia of Biodiversity*. Academic Press, San Diego, 2000.
- [36] Zedler JB. Tracking wetland restoration: do mitigation sites follow desired trajectories? *Restoration Ecology*, 1999, **7**: 69~73.
- [37] Kelly J R & Harwell M A. Indicators of ecosystem recovery. *Environmental Management*, 1990, **14**: 527~545.
- [38] Brown S & Lugo A E. Rehabilitation of tropical lands: a key to sustaining development. *Restoration Ecology*, 1994, **2**(2): 97~111.
- [39] Dahm CN, Cummins KW, Valett HM. 1995. An ecosystem view of the restoration of the Kissmmee River. *Restoration Ecology*, **3**: 225~238.
- [40] Jackson LL, Lopoukhine, Hillyard D. Ecological restoration: a definition and comments. *Restoration Ecology*, 1995, **3**: 71~75.
- [41] Kondolf GM. Five elements for effective evaluation of stream restoration. *Restoration Ecology*, 1995, **3**: 133~136.
- [42] Ren H, Wu J G, Peng S L, et al. Measure and evaluation of ecosystem health. *Tropic Geography*, 2000, **21**: 171~175.
- [43] Cairns J Jr. *Recovery and restoration of damaged ecosystems*. Charlottesville: University Press of Virginia, 1977. 17~27.
- [44] Lamd D. Reforestation of degraded tropical forest lands in the Asia-Pacific region. *Journal of tropical forest science*, 1994, **7**(1): 1~7.
- [45] Aronson J & Le Flo'ch E. Vital landscape attributes: missing tools for restoration ecology. *Restoration ecology*, 1996, **4**(4): 377~387.
- [46] Aronson J, Li J, E Le Flo'ch. Combining biodiversity conservation, management and ecological restoration: a new challenge for the arid and semiarid regions of China. In: Jin JM ed. *Symposium of international Conference of Biodiversity Protection and the use of advanced technology*. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 2001. 279~301.
- [47] Caraher D & Knapp W H. Assessing ecosystem health in the Blue Mountains. Silviculture: from the cradle of forestry to ecosystem management. General technical report SE-88 (U. S. Forest), Southeast Forest Experiment Station, U. S. Forest Service, Hendersonville, North Carolina, 1995. 75.
- [48] Whisenant S G & Tongway D J. *Repairing mesoscale processes during restoration*. Fifth international rangeland congress. Denver, 1995. 62~63.
- [49] Rappold, D, Bonanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health. *Trends in ecology & evolution*, 1998, **13**: 397~402.
- [50] Madenjian C P, Schloesser S, Krieger K A. Population models of burrowing mayfly recolonization in western lake erie. *Ecological*

Applications, 1998, **8**:1206~1212.

- [51] Wong M H & Bradshaw A D. *The restoration and management of derelict land*. New Jersey: World Scientific, 2002. 305
- [52] Holl K D & Kappelle M. Tropical forest recovery and restoration. *TREE*, 1999, **14**(10):378~379.
- [53] Ren H, Wu J G, Peng S L. Degraded ecosystem and restoration ecology. In: Wu J G & Han X G ed. *Modern ecology lecture II*. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2002. 68~72.
- [54] Edwards P. *Restoration Ecology*. Blackwell science, 2002. 12.
- [55] Ehrenfeld J. Defining the limits of restoration: the need for realistic goals. *Restoration Ecology*, 2000, **8**:2~9.
- [56] Ren H & Peng S L. The Practice of Ecological Restoration in China. *Ecological Restoration*, 2003, **21**(2): 122~125.
- [57] Hobbs R. Restoration ecology: the challenge of social values and expectations. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, **2**(1):43~48.

参考文献:

- [4] 任海, 彭少麟. 退化生态系统的恢复与重建. *青年地理*, 1998, **3**(3):7~11.
- [9] 陈灵芝, 陈伟烈. 中国退化生态系统研究. 北京: 中国科技出版社, 1995. 5~87.
- [11] 任海, 彭少麟. 中国南亚热带退化生态系统恢复及可持续发展. 见: 陈竺主编. 生命科学. 中国科协第三届青年学术研讨会论文集, 北京: 中国科技出版社, 1998. 176~179.
- [14] 彭少麟. 热带亚热带恢复生态学研究与实践. 北京: 科学出版社, 2003. 1~25.
- [15] 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. 广州: 广东科技出版社, 1996. 12~33.
- [21] 章家恩, 徐琪. 恢复生态学研究的一些基本问题探讨. *应用生态学报*, 1999, **10**(1):109~112.
- [30] 解焱. 恢复中国的天然植被. 北京: 中国林业出版社, 2002. 58
- [31] 任海, 彭少麟. 恢复生态学导论. 北京: 科学出版社, 2001.
- [32] 彭少麟. 南亚热带植物群落动态学. 北京: 科学出版社, 1996. 128.
- [42] 任海, 邬建国, 彭少麟, 等. 生态系统健康的监测与评估. *热带地理*, 2000, **21**:171~175.
- [46] Aronson J, Li J, E Le Flo'ch. 生物多样性保护、管理及生态恢复: 中国干旱与半干旱地区面临的挑战. 见: 金鉴明主编. 生物多样性保护与利用高新科学技术国际研讨会论文集, 北京: 北京科技出版社, 2001. 279~301.
- [53] 任海, 邬建国, 彭少麟. 退化生态系统与恢复生态学. 见: 邬建国和韩兴国主编. 现代生态学讲座 II. 北京: 中国科技出版社, 2002. 68~72.