



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology, Beijing, China

恢复生态学

任海¹ 彭少麟¹ 邬建国²

¹中国科学院华南植物研究所 广州 510650

²Arizona State University West, Phoenix, AZ 85069, USA

摘要 恢复生态学起源于 100 年前的山地、草原、森林和野生生物等自然资源的管理研究，形成于 80 年代。它是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、可持续的社会实践等广泛的范围。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、动态和公益，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理论是唯一源于恢复生态学研究和实践。由于生态系统的复杂性，退化生态系统恢复的方向和恢复时间具有不确定性，其恢复的机理可用临界阈值理论进行解释。此外，本文还介绍了生态系统功益的恢复、生物多样性资源在恢复中的作用、以及恢复生态学及相关学科的关系。

Abstract ¹Ren, H., S. Peng¹, and J. Wu² (¹South China Institute of Botany, Guangzhou, 510650; ²Arizona State University West, Phoenix, AZ85069, USA). Restoration Ecology. The ideas of restoring biotic communities originated 100 years ago from studies of degraded ecosystems and natural resource management practices. Restoration ecology became established as a discipline in the 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 societal practices for sustainability. Restoration ecology focuses on ecosystems that are driven away from their "normal" states by natural or anthropogenic disturbances. The main 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. In this paper we review the major developments in the field of restoration ecology in China and worldwide. We discuss several existing theories and methods that have emerged from several ecology-related disciplines, and present a synthetic view of what restoration ecology is and how it has been practiced.



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology, Beijing, China

一、前言

自 1940 年以来, 由于科学技术的进步, 人类生产、生活和探险的足迹遍及全球, 尤其是全球人口已达 57 亿, 而且每年仍以 9000 多万的速度在递增。在那些有人居住的地方, 人类为了生存, 大部分的自然生态系统被改造为城镇和农田, 原有的生态系统结构及功能退化, 有的甚至已失去了生产力。随着人口的持续增长, 对自然资源的需求也在增加。环境污染、植被破坏、土地退化、水资源短缺、气候变化、生物多样性丧失等增加了对自然生态系统的胁迫。人类面临着合理恢复、保护和开发自然资源的挑战。本世纪 80 年代, 恢复生态学(Restoration Ecology) 应运而生。恢复生态学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, 因而为解决人类生态问题和实现可持续发展提供了机遇(Aber 和 Jordan, 1985; Cairns, 1995; Daily, 1995; 陈灵芝和陈伟烈, 1995; Dobson 等, 1997; 任海和彭少麟, 1998)。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。

二、生态恢复和恢复生态学的定义

恢复生态学是一门关于生态恢复(Ecological restoration)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)认为使一个生态系统回复到较接近其受干扰前的状态即为生态恢复(Cairns, 1995); Jordan(1995)认为使生态系统回复到先前或历史上(自然的或非自然的)的状态即为生态恢复; Cairns(1995)认为生态恢复是使受损生态系统的结构和功能回复到受干扰前状态的过程; Egan(1996)认为生态恢复是重建某区域历史上有的植物和动物群落, 而且保持生态系统和人类的传统文化功能的持续性的过程(Hobbs 和 Norton, 1996)。

上述四种定义强调受损的生态系统要恢复到理想的状态。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, 于是又有了下述定义:

余作岳等(1996)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。Bradshaw(1987)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(Jordan 等, 1987); Diamond(1987)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(1987)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(Jordan 等, 1987)。(国际)恢复生态学会(Society for Ecological Restoration)先后提出三个定义: 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(1994); 生态恢复是维持生态系统健康及更新的过程(1995); 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



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology. Beijing, China

性、生态过程和结构、区域及历史情况、可持续的社会实践等广泛的范围（1995）。第三个定义是该学会的最终定义（Jackson 等，1995）。

与自然条件下发生的次生演替不同，生态恢复强调人类的主动作用。事实上，人类活动对所有生态系统具有不可避免的影响，我们得从生态平衡的观点转向动态的观点看生态恢复。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。与生态恢复相关的概念还有：重建（Rehabilitation，即去除干扰并使生态系统回复原有的利用方式）、改良（Reclamation，即改良立地的条件以便使原有的生物生存，一般指原有景观彻底破坏后的恢复）、改进（Enhancement，即对原有的受损系统进行改进，以提高某方面的结构与功能）、修补（Remedy，即修复部分受损的结构）、更新（Renewal，指生态系统发育及更新）、再植（Revegetation，即恢复生态系统的部分结构和功能，或恢复当地先前土地利用方式）。这些与恢复相关的概念可看作广义的恢复概念（余作岳和彭少麟，1996；任海和彭少麟，1998）。因为人类在生存与发展过程中已完全改变了大量的原生顶极生态系统为工业、农业、商业和生活基地，这些人工形成的生态系统已成为世界生态系统中的成员。

最近，Kloor（2000）通过对北美森林的恢复研究认为，应该淘汰“恢复”这个词，他的理由是恢复生态学中存在的三个问题：一是恢复的目标具有不确定性，即恢复某生态系统历史上哪一个时间阶段的状态，例如美国 Minnesota 历史上被冰雪覆盖，是否应恢复为雪地呢？二是“恢复”这个词有静态的含意，因而恢复不仅要试图重复过去的环境，而且要通过管理以维持过去的状态，但事实上自然界是动态的；三是由于气候变化、关键种缺乏或新种入侵，完全的恢复是不可能的。Davis（2000）进一步指出，根据“恢复”过程中所做的工作，将“恢复”（restoring）换成“生态改进”（ecological enhancement 或 ecological enrichment）会更精确，作为一门学科，恢复生态学应该叫“生态构建”（ecological architecture），并将它作为景观构建（landscape architecture）的一个分支学科。Higgs 等（2000）代表（国际）恢复生态学会对这三点作了逐条反驳，他们认为生态恢复强调了参考条件，而且生态学家已致力于寻找适当的时间和空间参考点；恢复是一个动态的过程，而且恢复包括结构、干扰体系、功能随时间变化；恢复促进了乡土种、群落、生态系统流（能流、物流等）、可持续的文化的繁荣，它应是应用生态学的一个分支。

三、恢复生态学研究简史

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（Jordan 等，1987），例如 Phipps 于 1883 出版了森林再造的专著，其中有些理论至今可用（Keddy, 1999）。早在本世纪 30 年代就有干旱胁迫下农业生态系统恢复的实践。最早开展恢复生态学实验的是 Leopold，他与助手一起于 1935 年在 Wisconsin 大学植物园恢复了一个 24 公顷的草场。随后他发现了火在维持及管理草场中的重要性。他还认



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology. Beijing, China

为生态恢复只是恢复中的第一步，一个生态系统保持整体性、稳定性和生物群体的美丽时就是好的，在1941年他进一步提出土地健康（land health）的概念（Jordan等，1987；Rapport 1998）。Clements(1935)发表了“实验生态学为公共服务”的论文，阐述生态学可用于包括土地恢复在内的广泛领域(Keddy, 1999)。本世纪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，从70年代开始，欧美一些发达国家开始水体恢复研究(Cairns, 1995；陈灵芝和陈伟烈，1995)，在此期间，虽有部分国家开始定位观测和研究，但没有生态恢复的机理研究。Farnworth在1973年提出了热带雨林恢复研究中的9个具体方向。1975年在美国召开了“受损生态系统的恢复”国际研讨会，会议探讨了受损生态系统恢复的一些机理和方法，并号召科学家们注意搜集受损生态系统科学数据和资料，开展技术措施研究，建立国家间的研究计划。1980年Cairns主编了《受损生态系统的恢复过程》一书，8位科学家从不同角度探讨了受损生态系统恢复过程中重要生态学理论和应用问题，同年，Brandshaw和Chdwick出版了《Restoration of land, the ecology and reclamation of derelict and degraded land》；1983年在美国召开了“干扰与生态系统”的国际研讨会，探讨了干扰对生态系统各个层次的影响。1984年在美国威斯康星大学召开了恢复生态学研讨会，强调了恢复生态学中理论与实践的统一性，并提出恢复生态学在保护与开发中起重要的桥梁作用；美国1985年成立了“恢复地球”组织，该组织先后开展了森林、草地、海岸带、矿地、流域、湿地等生态系统的恢复实践并出版了一系列生态恢复实例专著(Beger, 1990)。同年Aber和Jordan提出了恢复生态学的术语，他们还出版了《Restoration Ecology: A synthetic approach to ecological research》的论文集。1985年，国际恢复生态学会成立。1991年在澳大利亚举行了“热带退化林地的恢复国际研讨会”。1993年在香港举行了华南退化坡地恢复与利用国际研讨会，系统探讨了中国华南地区退化坡地的形成及恢复问题(Parham, 1993)；1996年，在瑞士召开了第一届世界恢复生态学大会，大会强调恢复生态学在生态学中的地位，恢复技术与生态学的连结，恢复过程中经济与社会内容的重要性，随后国际恢复生态学会每年召开一次国际研讨会。现在各国均有大量的恢复生态学论文出现，但主要的恢复生态学期刊有《Restoration and Management Notes》、《Restoration Ecology》、《Restoration and Reclamation Review》和《Land degradation & Development》。《Ecology Abstracts》等国际文摘也开辟专栏转载恢复生态学方面的成果。另有一些生态学期刊和环境期刊出版恢复生态学专辑，此外还有大量的因特网网址进行恢复生态学方面的交流。

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(Gaynor, 1990；Cairns, 1992；Mansfield和Towns, 1997)，中国则因人口偏多强调农业综合利用(陈灵芝和陈伟烈, 1995；任海和彭少麟, 1998)。

从70年代至今，国外比较成功的恢复样板有：热带的土地退化现状及恢复技术(CAB970601598, CAB940607234。CAB是指Centre for Agriculture and Biosciences International,



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology. Beijing, China

其后的数字是 顺序号)，昆士兰东北部退化土地的恢复 (CAB960607654)，坦桑尼亚的毁林地恢复 (CAB960607447)，退化的石灰岩矿地的造林 (CAB960600967)，湿热带自然林恢复 (CAB960600935)，东玻利维亚、巴西、东南亚、赞比亚等国的土地恢复 (CAB 数据库中有近百条记录)，干旱和半干旱地退化生态系统的恢复与重建 (至 1999 年，CAB 数据库中有五十余条记录)。这些恢复试验的对象涉及了草原、河流、湖泊、废弃矿地、森林和农田，在这些恢复过程中主要研究内容有干扰和受损生态系统，受损生态系统的恢复与重建，湿热带森林生态系统的稳定性，废弃矿地和垃圾场的恢复，河流和湖泊的水生植物群落的重建等。在此基础上，已有一些恢复生态学的理论成果出现。

我国最早的恢复生态学研究是中国科学院华南植物研究所余作岳等人 1959 年在广东的热带沿海侵蚀台地上开展的退化生态系统的植被恢复技术与机理研究，经过近 40 年的系统研究，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导致动物和微生物多样性，植物多样性是生态系统稳定性的基础”等观点，他们还先后创建了我国恢复生态学的两个基地——小良热带森林生态系统定位研究站和鹤山丘陵综合试验站等。从此以后，先后有多个单位开展了退化生态系统恢复研究，其中包括：南京大学仲崇信自 1963 年起就从英国、丹麦引进大米草在沿海滩涂种植以控制海岸侵蚀，至 1980 年推广达 3 万多公顷。中国科学院兰州沙漠所开展的沙漠治理与植被固沙研究，中国科学院西北水土保持研究所开展的黄土高原水土流失区的治理与综合利用示范研究，中国科学院水生生物研究所的湖泊生态系统恢复研究，中国科学院西北高原生物研究所开展了高原退化草甸的恢复与重建研究，中国科学院成都生物研究所开展的岷江上游植被恢复研究，中国科学院南京土壤所开展的红壤恢复与综合利用试验，广西科学院和中山大学开展的红树林恢复重建试验等。1983 年中国科学院内蒙古草原站开展了不同恢复措施下退化羊草草原恢复演替研究。1990 年东北林业大学开展了黑龙江省森林生态系统恢复与重建研究，同期中国林业科学研究院开展了海南岛热带林地的植被恢复与可持续发展研究。另有中国环境科学院、中山大学、中国矿业大学等单位开展的大量废弃矿地和垃圾场的恢复对策研究。90 年代中期，先后出版了《热带亚热带退化生态系统的植被恢复生态学研究》和《中国退化生态系统研究》等专著，提出了适合中国国情的恢复生态学研究理论和方法体系 (中国生态学会，1995；陈灵芝和陈伟烈，1995；余作岳和彭少麟，1996；任海和彭少麟，1998)。

四、生态系统退化及其恢复机理

4.1. 退化生态系统及其形成原因

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，一般地，退化的生态系统种类组成、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 (Chapman, 1992; Daily, 1995; 陈灵芝和陈伟烈, 1995)。当然，对不同的生态系统类型，其退化的表现是不一样的。例如，湖泊由于富营养化会退化，外来种入侵、在人为干扰



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology. Beijing, China

下本地非优势种取代历史上的优势种等引起生态系统的退化等，往往这种情况下会改变生态系统的生物多样性，但生物生产力不一定下降，有的反而会上升（Berger, 1993）。

据估计，由于人类对土地的开发（主要指生境转换）导致了全球 50 多亿公顷土地的退化，使全球 43% 的陆地植被生态系统的服务功能受到了影响。联合国环境署的调查表明（Daily, 1995）：全球有 20 亿公顷土地退化（占全球有植被分布土地面积的 17%），其中轻度退化的（农业生产力稍微下降，恢复潜力很大）有 7.5 亿公顷，中度退化的（农业生产力下降更多，要通过一定的经济和技术投资才能恢复）有 9.1 亿公顷，严重退化的（没有进行农业生产，要依靠国际援助才能进行改良的）有 3.0 亿公顷，极度退化的（不能进行农业生产和改良）有 0.09 亿公顷；全球荒漠化土地有 36 亿多公顷（占全球干旱地面积的 70%），其中轻微退化的 12.23 亿公顷，中度退化的 12.67 亿公顷，严重退化的有 10 亿多公顷，极度退化的有 0.72 亿公顷，此外，弃耕的旱地每年还以 900-1100 万公顷的速度在递增；全球退化的热带雨林面积有 4.27 亿公顷，而且还在以 0.154 公顷/年的速度递增。联合国环境署还估计，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，而全球每年进行生态恢复而投入的经费达 100-224 亿美元。

张巧珍（1993）推算，除农田外，我国其它的生态系统退化面积约总国土总面积的 1/4。任海等（2000）系统总结有关部委和学者的数据发现，中国农田总面积为 140,000,000 公顷，退化面积为 28,000,000 公顷；草地面积 400,000,000 公顷，退化面积为 132,000,000 公顷；森林总面积 165,200,000 公顷，退化面积 31,200,000 公顷；淡水面积 743,000 公顷，退化面积 245,000 公顷；废矿地 2,000,000 公顷。此外，多位学者提出了某些退化生态系统面积，但有较大差异，这可能是由于测量精度或退化生态系统的定义不同造成的。

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（1995）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%。自然干扰中外来种入侵（包括因人为引种后泛滥成灾的入侵）、火灾及水灾是最重要的因素。Daily（1995）进一步指出，基于以下四个原因人类进行生态恢复是非常必要的和重要的：需要增加作物产量满足人类需求；人类活动已对地球的大气循环和能量流动产生了严重的影响；生物多样性依赖于人类保护和恢复生境；土地退化限制了国民经济的发展。

Brown 和 Lugo（1994）也指出，生态系统的退化过程或程度取决于生态系统的结构或过程受干扰的程度，例如人类对植物获取资源过程的干扰（如：过度灌溉影响植物的水分循环，超量施肥影响植物的物质循环）要比对生产者或消费者的直接干扰（如：砍伐或猎取）产生的负效应要大。一般地，在生态系统组成成分尚未完全破坏前排除干扰，生态系统的退化会停止并开始恢复（例如少量砍伐后森林的恢复），但在



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology, Beijing, China

生态系统的功能过程被破坏后排除干扰，生态系统的退化很难停止，而且有可能会加剧（例如炼山后的林地恢复）。

4.2. 生态恢复的目标

Hobbs 和 Norton (1996) 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）。事实上，进行生态恢复工程的目标不外乎四个：一是恢复诸如废弃矿地这样极度退化的生境，二是提高退化土地上的生产力；三是在被保护的景观内去除干扰以加强保护；四是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（章家恩和徐琪，1999）。

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；第二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；第三个目标是对现有的生态系统进行合理管理，避免退化；第四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 (1997) 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。

4.3. 恢复生态学中的主要生态学理论

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 (van der Valk 1999)。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 (Middleton, 1999; Van der Valk, 1999)。

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



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology, Beijing, China

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(Johnstone, 1986; Forman, 1995; Middleton, 1999; 余作岳和彭少麟, 1996)。

4.4. 生态恢复的方法问题

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(Mitsch 和 Jorgensen, 1989; Parham, 1993; 章家恩和徐琪, 1999)。

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三个步骤取得了成功。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(余作岳和彭少麟, 1996)。

4.5. 生态恢复的程序及恢复机理

在生态恢复实践中确定一些重要程序可以更好地指导生态恢复和生态系统管理。目前认为恢复中的重要程序包括: 确定恢复对象的时空范围; 评价样点并鉴定导致生态系统退化的原因及过程(尤其是关键因子); 找出控制和减缓退化的方法; 根据生态、社会、经济和文化条件决定恢复与重建的生态系统的结构、功能目标; 制定易于测量的成功标准; 发展在大尺度情况下完成有关目标的实践技术并推广; 恢复实践; 与土地规划、管理策略部门交流有关理论和方法; 监测恢复中的关键变量与过程, 并根据出现的新情况作出适当的调整(Missch & Jorgensen, 1989; Kauffman, 1995)。

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(1996)通过近40年的恢复试验发现, 在热带季雨林恢复过程中植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。



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology, Beijing, China

Hobbs 和 Mooney (1993) 指出, 退化生态系统恢复的可能发展方向包括: 退化前状态、持续退化、保持原状、恢复到一定状态后退化、恢复到介于退化与人们可接受状态间的替代的状态、或恢复到理想状态 (图 1)。然而, 也有人指出退化生态系统并不总是沿着一方向恢复, 也可能是在几个方向间进行转换并达到复合稳定状态 (Metastable states)。Hobbs 和 Norton (1996) 提出了一个临界阈值理论 (图 2)。该理论假设生态系统能以 4 种可选择的稳定状态, 状态 1 是未退化的, 状态 2 和 3 是部分退化的, 状态 4 是高度退化的。在不同胁迫或同种胁迫不同强度压力下, 生态系统可从状态 1 退化到 2 或 3; 当去除胁迫时, 生态系统又可从状态 2 和 3 恢复到状态 1。但从状态 2 或状态 3 退化到状态 4 要越过一个临界阈值, 反过来, 要从状态 4 恢复到状态 2 或 3 时非常难, 通常需要大量的投入。例如林地常常由于过度放牧而退化, 若控制放牧则可很快恢复, 但当林地已被野草入侵, 且土壤成分已改变时, 控制放牧已不能使林地恢复, 而需要更多的恢复投入。同样, 在亚热带区域, 当顶极植被常绿阔叶林在干扰下会逐渐退化为落叶阔叶林、针阔叶混交林、针叶林和灌草丛, 这每一个阶段就是一个阈值, 每越过一个, 恢复投入就更大, 尤其是从灌草丛开始恢复时投入就更大 (彭少麟, 1996)。

4.6. 恢复成功的标准

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。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。Cairns (1977) 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)。Bradsaw (1987) 提出可用如下五个标准判断生态恢复: 一是可持续性 (可自然更新), 二是不可入侵性 (象自然群落一样能抵制入侵), 三是生产力 (与自然群落一样高), 四是营养保持力, 五是具生物间相互作用 (植物、动物、微生物) (Jordan, 1987)。Lamd (1994) 认为恢复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)。Davis (1996) 和 Margaret (1997) 等认为, 恢复是指系统的结构和功能回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



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology, Beijing, China

构的发展，确认群落结构与功能间的联结已形成。任海和彭少麟（1998）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）。

Careher 和 Knapp（1995）提出采用记分卡的方法，假设生态系统有五个重要参数（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五个参数，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。Costanza 等（1998）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。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，我们认为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（Whisenant 和 Tongway, 1995; Rapport 等, 1998; Madenjian 等, 1998）。

4.7. 生态恢复的时间

全球的土地、植被、农田、水体、草地的自然形成或演替时间是不一样的，而且这种自然的过程可能是漫长的。而退化的生态系统的恢复时间则相对要短些，其恢复时间与生态系统类型、退化程度、恢复方向、人为促进程度等密切相关。一般退化程度轻的生态系统恢复时间要短些。在湿热地带的恢复要快于干冷地带。不同的生态系统恢复时间也不一样，与生物群落等恢复相比，一般土壤恢复时间最长，农田和草地要比森林恢复得快些。

Daily（1995）通过计算退化生态系统潜在的直接实用价值（Potential direct instrumental value）后认为：火山爆发后的土壤要恢复成具生产力的土地需要 3000-12000 年，在湿热区耕作转换后其恢复要 20 年左右（5-40 年间），弃耕农地的恢复要 40 年，弃牧的草地要 4-8 年，而改良退化的土地需要 5-100 年（根据人类影响的程度而定）。此外，他还提出轻度退化生态系统的恢复要 3-10 年，中度的 10-20 年，严重的 50-100 年，极度的 200 多年。余作岳（1996）、彭少麟（1996）、任海和彭少麟（1998）等通过试验和模拟认为，热带极度退化的生态系统（没有 A 层土壤，面积大，缺乏种源）不能自然恢复，而在一定的人工启动下，40 年可恢复森林生态系统的结构，100 年恢复生物量，140 年恢复土壤肥力及大部分功能。

4.8. 恢复生态系统的功益

生态系统功益（Ecosystem services）是指人类直接或间接从生态系统功能（即生态系统中的生境、生物或系统性质及过程）中获取的利益。恢复退化生态系统的最终目标是恢复并维持生态系统的服务功能，由于生态系统的服务功能多数不具有直接经济价值而被人类忽略。虽然我们还不知道生态系统退化到什么程度会影响其服务功能，也不了解恢复到什么程度生态系统才具有服务功能，但是我们还是提出一



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology. Beijing, China

个生态系统的服务功能框架，希望恢复后的生态系统尽量具有这些服务功能：生态系统的产品（生态系统中生物的全部、部分或产品，它们可为人类提供肉、鱼、果、蜜、谷、家俱、纸、衣等），生物多样性，为人类创造和丰富精神生活和文化生活，自然杀虫，传粉播种，净化空气和水，减缓旱涝灾害，土壤的形成、保护及更新，废物的去毒和分解，种子的传播，营养的循环和运移，保护海岸带，防止紫外线的辐射，以及帮助调节气候等（董全，1999；Constanza等，1997；Daily等，1997）。

4.9. 生物多样性在生态恢复中的作用

生态恢复中的一个关键成分是生物体，因而生物多样性在生态恢复计划、项目实施和评估过程中具有重要的作用。在生态恢复的计划阶段就要考虑恢复乡土种的生物多样性：在遗传层次上考虑那些温度适应型、土壤适应型和抗干扰适应型的品种；在物种层次上，根据退化程度选择阳生性、中生性或阴生性种类并合理搭配，同时考虑物种与生境的复杂关系，预测自然的变化，种群的遗传特性，影响种群存活、繁殖和更新的因素，种的生态生物学特性，足够的生境大小；在生态系统水平层次上，尽可能恢复生态系统的结构和功能（如植物、动物和微生物及其之间的联系），尤其是其时空变化。在恢复项目的管理过程中首先要考虑生物控制（对极度退化的生态系统，主要是抚育和管理，对控制病虫害的要求不高，而对中度退化的生态系统和部分恢复的生态系统则要加强病虫害控制），然后考虑建立共生关系及生态系统演替过程中物种替代问题。在恢复项目评估过程中，可与自然生态系统相对照，从遗传、物种和生态系统水平进行评估，最好是同时考虑景观层次的问题。因为在景观层次上可以兼顾生境损失、破碎化和退化对生态系统等大尺度的问题。在恢复时可考虑这些因素（Owles和Whelan，1994）。

在生态系统恢复中采用乡土种具有更大的优势，这主要体现在乡土种的更适于当地的生境，其再殖和传播潜力更大，也更易于与当地残存的天然群落结合成更大的景观单位，从而实现各类生物的协调发展。当然，外来种（外来种是人类有意或无意引入的、非当地原生的物种）在生态恢复中也具有一定的作用。例如，广东省鹤山市在森林恢复过程中，大量栽种从澳大利亚引种的马占相思、大叶相思等外来种作先锋种，利用它们固氮、耐旱、速生等特点进行植被覆盖，等其3-4年成林后再间种红锥、荷木等乡土种进行林分改造，大大地缩短了恢复时间，并节约了成本（余作岳等，1996）。许多恢复实践表明，外来种可能在一定时间内为当地带来了好的生态和经济效益；但也有许多对当地陆地或水生生态系统产生了巨大的不利影响，这主要是由于外来种与当地的物种缺乏协同进化，若其大量发展，很容易造成当地生态系统的崩溃，很难再恢复或接近到历史状态（Handel等，1994）。尤其值得指出的是，在用外来种恢复退化的海岛时，应该注意引进种的捕食者（或植食性动物）的关系，否则会导致当地捕食者或啃食者的消失（Fritts和Rodola，1998）。理想的恢复应全部引进乡土种，而且应在恢复、管理、评估和监测中注意外来种入侵问题，甚至有时候也应关注从外地再引入原来在当地生存的乡土种对当地群落的潜在影响。总之，外来种入侵会造成很多当地植被取代、消失，从而改变原有生态系统，恢复生态学的目标是要用本地种，排除外来种，不能“引狼入室”（Berger，1993）。



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology, Beijing, China

五、恢复生态学与相关学科的关系

恢复生态学的许多理论、方法来源于生物学、地学、经济学、社会学、数学等自然科学，以及工程学、林学、农学、环境学等应用性科学。作为生态学的重要分支，它与生态学的相同点在于它们都以生态学系统为基本单位，且有许多共同的理论和方法，不同点在于，生态学强调自然性与理论性，而恢复生态学更强调人为干涉及应用性。具体地讲，恢复生态学与生态系统健康、保护生物学、景观生态学、生态系统生态学、环境生态学、胁迫生态学、干扰生态学、生态系统管理学、生态工程学、生态经济学等生态学的分支学科有密切的关系（图3）。所有这些学科研究中都必须涉及格局与过程，进化与适应等问题（任海等，1999）。

当前国际上兴起的生态系统健康学说与恢复生态学的关系尤其紧密。健康生态系统是指生态系统随着时间的进程有活力并且能维持其组织及自主性，在外界胁迫下容易恢复。生态系统健康的标准有活力、恢复力、组织、生态系统服务功能的维持、最佳管理、外部输入减少、对邻近系统的影响及人类健康影响等8个方面，它们分属于生物物理范畴、社会经济范畴、人类健康范畴以及一定的时间、空间范畴。这8个标准中最重要的是前3个方面。以 Costanza 和 Rapport 为代表的生态学家认为人类对生态系统的过度开发利用、物理重建、外来种的引入、自然干扰的改变等导致世界上的生态系统结构发生变化，已不能象过去一样为人类服务，并对人类产生了潜在威胁（Rapport，1998）。生态系统健康主要研究外界胁迫下其反应情况，因而可认为生态系统健康仅是恢复生态学理论基础的一个重要方面，它可用于评价生态系统退化的程度及恢复状态的评估。生态系统健康与恢复生态学针对的对象是不同的。生态系统健康针对自然的和干扰的生态系统，而恢复生态学仅针对干扰后形成的不健康的生态系统。生态系统健康主要强调维持生态系统自身的进程及其为人类服务的功能，而恢复生态学则强调人为促进生态系统恢复，或利用生态工程将生态系统改变为另一类符合人类需求的生态系统。恢复生态学在生态系统开发与保护中起重要指导作用，而生态系统健康主要在保护中起重要作用。

六、恢复生态学的发展趋势

恢复生态学的兴起只是10多年的事，还存在不少问题有待解决，这些问题主要是：（1）生态系统恢复的不可确定性，虽然已提出了许多生态系统恢复的标准，但对于生态系统服务功能的恢复程度尚不知晓；（2）生态系统恢复要求综合考虑生态、经济和社会因素，但对时间、空间上异质性的生态系统而言实在太难，尤其是有持续干扰时，很难恢复到理想状态；（3）由于生态系统的复杂性，生态系统退化程度和干扰因子很难简单概括到一些易测定的具体指标，尤其是如何控制干扰很难具可操作性；（4）生态系统恢



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology. Beijing, China

复与自然演替是一个动态的过程，有时很难区分两者；（5）生态系统恢复的时间到底要持续多长，目前的科学研究还不能准确回答这个问题，有待于开展可重复的和长期的试验和观测；（6）生态系统恢复的机理还不清楚，尤其是重新引进当地消失的物种、外来种在恢复中的角色还难以正确判断；（7）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；（8）恢复生态学的发展需要科学工作者、政府、民众的充分合作，通过互相交流信息、方法和经验，从而可加快恢复全球已退化的生态系统。

致谢 本文在完成过程中得到了余作岳研究员的帮助，缪世利先生仔细审阅了全文并提出宝贵意见，他还提供了一些文献。在此谨致以衷心的感谢。

参考文献

- 陈灵芝，陈伟烈（主编），1995，中国退化生态系统研究。中国科技出版社，北京。
- 董全，1999，生态功益：自然生态过程对人类的贡献。应用生态学报，10（2）：233—240。
- 彭少麟，1996，南亚热带植物群落动态学。科学出版社，北京。
- 任海，彭少麟，1998，中国南亚热带退化生态系统恢复及可持续发展。生命科学—中国科协第三届青年学术研讨会论文集（陈竺主编），中国科技出版社，北京。176—179。
- 任海，彭少麟，1998，退化生态系统的恢复与重建。青年地理，3（3）：7—11。
- 张巧珍，1993，中国农业资源潜力、存在问题与对策，北京出版社，北京。1-12
- 任海，郭建国，彭少麟和赵利忠，1999，生态系统健康的评估，热带地理，19（4）：31-37。
- 余作岳，彭少麟（主编），1996，热带亚热带退化生态系统植被恢复生态学研究。广东科技出版社，广州。
- 章家恩，徐琪，1999，恢复生态学研究的一些基本问题探讨。应用生态学报，10（1）：109—112。
- 中国生态学会编，1995，面向 21 世纪的生态学—中国生态学会第五届全国代表大会论文集。（中国生态学会第五届全国代表大会，珠海，1995），中国生态学会，珠海。
- Aber J. D. & W. III. Jordan, 1985, Restoration ecology: an environmental middle ground. *BioScience*, 35 (7) : 399.
- Berger J. J., 1993, Ecological restoration and nonindigenous plant species: a review. *Restoration Ecology*, 2(2): 74-82.
- Berger J.J. (editor), 1990, Ecological restoration in the San Francisco Bay Area. *Restoring the Earth*, Berkeley.



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology. Beijing, China

- Bradshaw, A.D. 1987. Restoration: An acid test for ecology. Restoration ecology: A synthetic approach to ecological research (W. R. III. Jordon, N. Gilpin and J. Aber editors), Cambridge University Press, Cambridge, 23-29.
- Brown S. & A.E. Lugo, 1994, Rehabilitation of tropical lands: a key to sustaining development. Restoration Ecology, 2 (2) : 97-111.
- Cairns J. Jr. (editor) , 1992, Restoration of aquatic ecosystems. National Academy Press, Washington, DC.
- Cairns J. Jr., 1995, Restoration ecology. Encyclopedia of Environmental Biology, 3: 223-235.
- Cairns J.Jr., (editor) , 1977, Recovery and restoration of damaged ecosystems. University press of Virginia, Charlottesville.
- Caraher D. & W.H. Knapp, 1995, Assessing ecosystem health in the Blue Mountains. Silviculture: from the cradle of forestry to ecosystem management. General technical report SE-88 (U.S. Forest, editor) , Southeast Forest Experiment Station, U.S. Forest Service, Hendersonville, North Carolina. 75.
- Chapman G.P., 1992, Desertified grassland. Academic Press, London.
- Constanza R.R., R. Arge, and R. Groot, 1997, The value of the worlds ecosystem services and natural capital. Nature, 387: 253-259
- Daily G.C.S., P.R. Alexander, and P.R. Ehrlich, 1997, Ecosystem services: Benefits supplied to human societies by natural ecosystems. Issues in Ecology, (3) : 1-6.
- Daily, G.C., 1995, Restoring value to the worlds degraded lands. Science, 269: 350-354.
- Davis J., 1996, Focal species offer a management tool, Science 271:1362-1363.
- Davis K.A., 2000, "Restoration"—a misnomer. Science, 287(5456): 1203.
- Diamond, J. 1987. Reflections on goals and on the relationship between theory and practice. Restoration ecology: A synthetic approach to ecological research (W. R. III. Jordon, N. Gilpin and J. Aber editors), Cambridge University Press, Cambridge, 329-336.
- Dobson A. D., A.D. Bradshaw, and A.J.M. Baker, 1997, Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. Science, 277: 515-522.
- Falk D.A., C.I. Millar, and M. Olwell, 1996, Restoring diversity--Strategies for reintroduction of endangered plants. Island Press, Washington DC.
- Farnworth E.G. & F.B. Golley, 1973, Fragile ecosystem. Springer-Verlag, New York.
- Forman R.T.T., 1995, Land Mosaics. Cambridge University Press, Cambridge.
- Fritts T.H. & G.H. Rodola, 1998, The role of introduced species in the degradation of island ecosystems: A case history of Guam. Ann. Rev. Eco. Syst. 29: 113-140.
- Gaynor V., 1990, Prairie restoration on a corporate site. Restoration and Reclamation Review, 1 (1) : 35-40.
- Handel S.N., G.R. Robinson, and A.J. Beattie, 1994, Biodiversity resources for restoration ecology. Restoration ecology, 2 (4) : 230-241.



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology. Beijing, China

- Harper, J. L. 1987. Self-effacing art: restoration as imitation of nature. *Restoration ecology: A synthetic approach to ecological research* (W. R. III. Jordon, N. Gilpin and J. Aber editors), Cambridge University Press, Cambridge, 35-45.
- Higgs E., W. W. Covington, D. A. Falk, E.B. Allen, and E. Read.,2000, No justification to retire the term “Restoration”. *Science*, 287(5456): 1203.
- Hobbs RJ & Norton DA.,1996, Towards a conceptual framework for restoration ecology. *Restoration Ecology*, 4 (2) : 93-110.
- Hobbs, R. J. and H. A. Mooney, 1993, *Restoration ecology and invasions. Nature conservation 3: reconstruction of fragmented ecosystems, global and regional perspectives* (D. A. Saunders, Hobbs and P. R. Ehrlich, editors) . Surrey Beatty and Sons, Chipping Norton, New South Wales, Australia, 127-133.
- Jackson L.L., D. Lopoukine, and D. Hillyard, 1995, Ecological restoration: a definition and comments. *Restoration Ecology*, 3 (2) : 71-75.
- Johnstone I.M., 1986, Plant invasion windows: a time-based classification of invasion potential. *Biological Review*, 61: 369-394.
- Jordan W. III., M.E. Gilpin, and J.D. Aber, 1987, *Restoration ecology: a synthetic approach to ecological restoration*. Cambridge University, Cambridge.
- Jordan W. R. III., 1995, “Sunflower Forest”: ecological restoration as the basis for a new environmental paradigm. *Beyond preservation: restoring and inventing landscape* (A.D.J. Baldwin, editor). University of Minnesota Press, Minneapolis, 17-34.
- Kauffman R., 1995, Ecological approaches to riparian restoration in northeast Oregon. *Restoration and Management Notes*, 13: 12-15.
- Keddy P., 1999, Wetland restoration: the potential for assembly rules in the service of conservation. *Wetland*, 19(4): 716-732.
- Kloor K., 2000, Restoration ecology: Returning America’s forests to their ‘natural’ roots. *Science*, 287(5453): 573.
- Lam D. ,1994, Reforestation of degraded tropical forest lands in the Asia-Pacific region. *Journal of tropical forest science*, 7 (1) : 1-7.
- Madenjian C.P., S. Schloesser, and K.A. Krieger, 1998, Population models of burrowing mayfly recolonization in western lake erie. *Ecological Applications*, 8: 1206-1212.
- Mansfield B. & D. Towns, 1997, Lessons of the Islands: Restoration in New Zealand. *Restoration and Managemnet Notes*, 15 (2) : 150-154.
- Margaren, F., 1997, Disneyland or native ecosystem: genetics and the restorationist. *Restoration and Management Notes*, 14(2):148-150.
- Middleton B., 1999, *Wetland restoration: Flood pulsing and disturbance dynamics*. John Wiley & Sons, Inc., New York.



第二届现代生态学讲座 中国·北京

The second International Symposium on Modern Ecology. Beijing, China

- Mitsch W.J. & S.E. Jorgensen, 1989, Ecological engineering. John Wiley & Sons, New York.
- Owles M.B. & C.J. Whelan, 1994, Restoration of endangered species: Conceptual issues, planning and implementation. Cambridge University Press, New York.
- Parham W (editor) , 1993, Improving degraded lands: Promising experience form South China. Bishop Museum Press, Honolulu.
- Parker V.T., 1997, The scale of successional models and restoration ecology. *Restoration Ecology*, 5 (4) : 301-306.
- Rapport D. J., R. Costanza, and A.J. McMichael, 1998, Assessing ecosystem health. *Trends in ecology & evolution*, 13: 397-402.
- Rapport D.J. (editor) , 1998, Ecosystem health. Blackwell Science, Inc. ,Oxford.
- Van der Valk, 1999, Succession theory and wetland restoration. Proceedings of INTECOL's V International wetlands conference, Perth, Australia (In Press) .
- Whisenant S.G. & D.J. Tongway, 1995, Repairing mesoscale processes during restoration. Fifth international rangeland congress, Denver, 62-63.

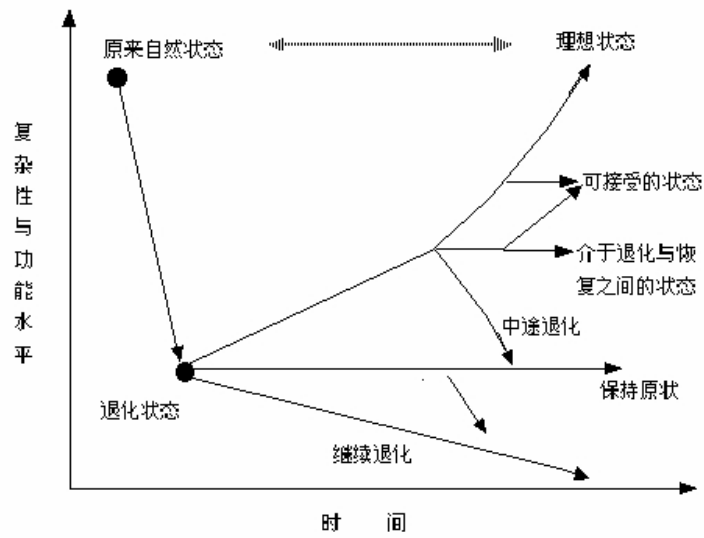


图1 退化生态系统恢复的方向（根据 Hobbs 和 Mooney, 1993 改绘）。

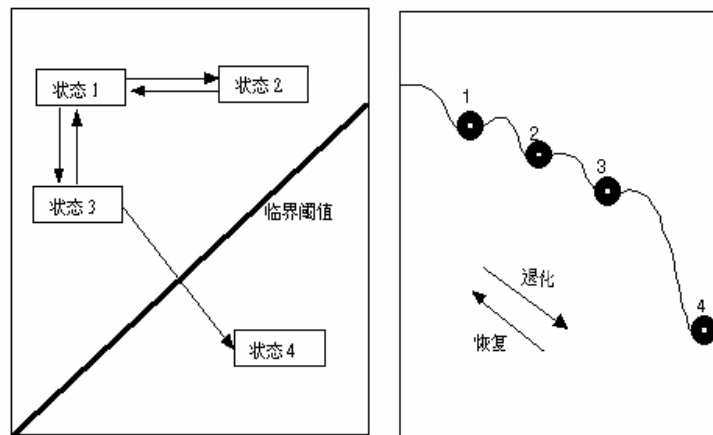


图2 退化生态系统恢复的临界阈值理论（根据 Hobbs 和 Norton, 1996 改绘）。

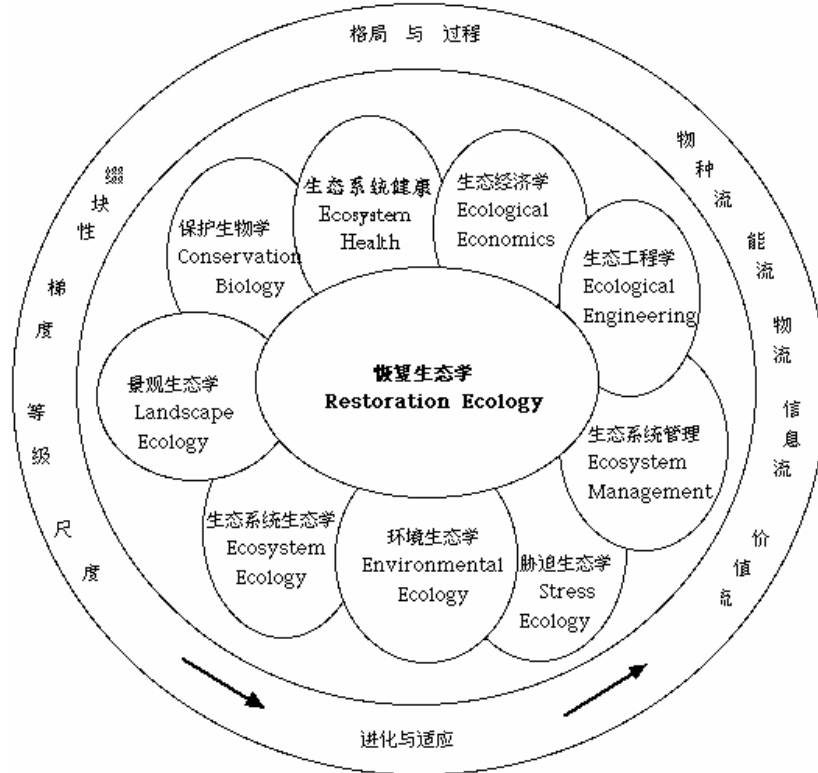


图3 恢复生态学与相关生态学分支的关系。