

恢复生态学导论

任海 彭少麟 编著

科学出版社

2002

内 容 简 介

恢复生态学、生态系统健康和生态系统管理是当前生态学发展的热点方向。本书在参阅大量文献的基础上,结合多年的研究成果,系统阐述了恢复生态学的基本理论和方法及其当前的发展动向,并介绍了生态系统健康和生态系统管理的基本理论及其与恢复生态学的关系。全书内容主要包括:退化生态系统的形成原因与机制;退化生态系统包括森林、草地、农田、湿地、海岛和水体等的恢复原理与方法;生态系统的服务功能;外来种入侵和全球变化对退化生态系统的影响;生态系统健康;生态系统管理等。正文后附有当前国际上介绍恢复生态学的网址和重要的恢复生态学文献,以资查阅。

本书资料新颖、体系完整,可供从事生态学、林学、农学、地学以及自然保护和环境保护等领域工作的教师、学生和研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

恢复生态学导论/任海,彭少麟编著. —北京:科学出版社,
2001.4

ISBN 7-03-009113-2

I. 恢… II. ①任…②彭… III. 恢复-生态学 IV. Q14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 87573 号

(Q-1040.0102)

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 4 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2002 年 11 月第二次印刷 印张:9 1/2

印数:1 501—3 500 字数:213 000

定价:26.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

目 录

第一编 恢复生态学

第一章 绪论	(3)
第一节 生态恢复和恢复生态学的定义	(3)
第二节 恢复生态学研究简史	(4)
第二章 退化生态系统恢复与恢复生态学	(10)
第一节 退化生态系统的定义及其形成原因	(10)
第二节 环境污染对生物多样性的影响	(10)
第三节 全球及中国退化生态系统的面积	(11)
一、全球退化生态系统类型及其面积	(11)
二、中国退化生态系统类型及其面积	(11)
三、中国的脆弱生态系统	(13)
第四节 退化生态系统的恢复	(14)
一、生态恢复的目标	(14)
二、退化生态系统恢复与重建的基本原则	(14)
三、生态恢复的方法问题	(15)
四、退化生态系统恢复与重建的程序	(17)
五、退化生态系统恢复的机理	(17)
六、恢复成功的标准	(19)
七、生态恢复的时间	(20)
八、生物多样性在生态恢复中的作用	(20)
第五节 恢复生态学理论	(21)
一、恢复生态学的研究内容	(21)
二、恢复生态学的理论基础	(22)
三、恢复生态学与相关学科的关系	(22)
四、恢复生态学的发展趋势	(23)
第三章 退化森林生态系统的恢复	(26)
第一节 森林生态系统退化与恢复机理	(26)
第二节 森林生态系统恢复中应注意的问题	(30)
第三节 次生林的恢复方法	(31)
第四节 天然林的保护	(31)
第五节 热带季雨林的恢复实例	(32)
一、森林恢复样地概况	(32)

二、森林恢复的方法与步骤	(32)
三、森林恢复后的群落结构	(32)
四、森林恢复后的功能	(33)
第六节 矿区废弃地的植被恢复	(33)
第七节 喀斯特森林及其恢复	(34)
第四章 退化草地生态系统的恢复	(36)
第一节 草原生态系统退化的原因	(36)
第二节 放牧对草原生态系统的影响	(37)
第三节 草原退化的评估	(37)
第四节 草地的荒漠化	(38)
第五节 草地恢复的方法	(39)
第六节 退化草原生态系统的恢复与管理	(39)
第五章 退化农田生态系统的恢复	(41)
第一节 农田生态系统的退化	(41)
第二节 退化农田恢复的程序及措施	(43)
第三节 评估农业生态系统恢复的参考指标	(43)
第四节 我国农田生态系统退化的问题	(44)
一、耕地面积锐减	(44)
二、土壤肥力下降	(44)
三、土壤次生盐渍化	(44)
四、易涝地面积有所增加	(45)
五、土地沙漠化	(45)
六、水稻土次生潜育化	(45)
七、土地污染	(45)
第五节 防止退化的必由之路——可持续性农业	(46)
第六章 退化海岛生态系统的恢复	(49)
第一节 海岛恢复概论	(49)
第二节 海岛的干扰	(50)
第三节 海岛恢复的限制性因子	(50)
第四节 海岛恢复的利益与过程	(51)
第五节 海岛恢复中的注意事项	(52)
第六节 实例研究——广东南澳岛的植被恢复	(52)
一、南澳岛概况	(52)
二、南澳岛植被恢复过程中的群落结构变化	(53)
三、南澳岛植被恢复过程中的生物量变化	(55)
四、南澳岛植被恢复过程中凋落物现存量变化	(55)
五、南澳岛植被恢复过程中群落土壤的变化	(56)
六、南澳岛植被恢复的生态特征	(57)
第七章 退化水生生态系统的恢复	(59)

第一节	湖泊和水库的退化原因及恢复	(59)
第二节	河流的退化及治理	(60)
第三节	水体生态系统恢复的评估	(62)
第八章	退化湿地生态系统的恢复	(65)
第一节	湿地的功能及其退化原因	(65)
第二节	湿地恢复的概念	(66)
第三节	湿地恢复的理论	(66)
	一、自我设计和设计理论	(66)
	二、演替理论	(67)
	三、入侵理论	(69)
	四、河流理论	(69)
	五、洪水脉冲理论	(69)
	六、边缘效应理论和中度干扰假说	(70)
第四节	湿地恢复的原则和目标	(71)
	一、湿地恢复的基本原则	(71)
	二、湿地恢复的目标	(71)
第五节	湿地恢复的策略	(72)
第六节	湿地恢复的过程与方法	(72)
	一、湿地恢复的过程	(72)
	二、湿地恢复的方法	(73)
第七节	湿地恢复的合理性评价	(74)
	一、生态合理性	(74)
	二、社会合理性	(74)
	三、经济合理性	(75)
第九章	生态系统的服务功能	(76)
第一节	生态系统服务功能定义	(76)
第二节	生态系统服务功能的研究历史	(77)
第三节	生态系统服务功能的内容	(77)
	一、生产生态系统产品	(78)
	二、产生和维持生物多样性	(79)
	三、调节气候	(79)
	四、减缓旱涝灾害	(80)
	五、维持土壤功能	(80)
	六、传粉播种	(80)
	七、有害生物的控制	(81)
	八、净化环境	(81)
	九、景观美学与精神文化功能	(82)
第四节	天然生态系统与人工生态系统的服务功能比较	(82)
第五节	生态系统服务功能价值的评价	(83)

第六节	生态系统服务功能的价值分类	(83)
第七节	生态系统服务功能价值评估方法	(83)
第八节	生态系统服务功能的保护策略与途径	(84)
第十章	植物外来种与退化生态系统	(86)
第一节	乡土种和外来种的概念	(86)
第二节	植物入侵对群落和生态系统特性的影响	(87)
一、	对初级生产力的影响	(87)
二、	对土壤营养物的影响	(87)
三、	对土壤水分的影响	(88)
四、	对干扰体制的影响	(88)
五、	对群落动态的影响	(88)
第三节	影响植物入侵的因子	(89)
一、	影响植物入侵的外因	(89)
二、	影响植物入侵的内因	(91)
第四节	外来种的风险评价	(91)
一、	对有关外来种定居方面的特性的评价	(92)
二、	对有关外来种传播的特性的研究	(92)
三、	对外来种影响的评价	(93)
第五节	对植物外来种的管理	(94)
一、	外来种的管理策略	(95)
二、	阻止植物外来种的新的入侵和扩展	(95)
三、	消除和控制已定居的外来种	(96)
第十一章	全球变化与恢复生态学	(99)
第一节	全球变化的现象	(99)
一、	大气臭氧层的损耗	(99)
二、	大气中的温室气体浓度正在增加	(100)
三、	全球气候变化的趋势	(101)
四、	生物多样性丧失	(101)
五、	土地利用格局与环境质量的改变	(103)
六、	其他	(103)
第二节	全球变化的影响	(103)
一、	全球气候变化对物种分布及灭绝的影响	(103)
二、	全球变化对农业的影响	(104)
第三节	全球变化与恢复生态学	(104)
第十二章	可持续发展与退化生态系统恢复	(105)
第一节	可持续发展的概念	(105)
第二节	中国的可持续发展观	(106)
第三节	可持续发展的思想与恢复生态学	(107)
第四节	可持续发展的理论框架	(108)

第五节 可持续发展研究的发展趋势.....	(109)
-----------------------	-------

第二编 生态系统健康和生态系统管理

第十三章 生态系统健康	(113)
第一节 生态系统健康的定义及研究简史.....	(113)
第二节 生态系统在胁迫下的反应.....	(114)
一、单因子胁迫下的反应.....	(114)
二、多因子胁迫下的反应.....	(115)
三、生态系统对胁迫的反应过程与结果.....	(115)
第三节 生态系统健康的标准.....	(116)
第四节 生态系统健康的评估与预测.....	(117)
一、活力的测量.....	(117)
二、组织的测量.....	(117)
三、恢复力的测量.....	(118)
第五节 生态系统健康的等级理论.....	(118)
第六节 干扰、生态系统稳定性与生态系统健康.....	(119)
第七节 生态系统管理、生态系统可持续发展与生态系统健康.....	(119)
第八节 生态系统健康与恢复生态学等学科的关系.....	(120)
第九节 生态系统健康存在的问题.....	(121)
第十四章 生态系统管理的概念及其要素	(123)
第一节 生态系统管理的定义.....	(123)
第二节 生态系统管理的发展简史.....	(124)
第三节 生态系统管理的数据基础.....	(125)
第四节 生态系统变化的度量.....	(126)
第五节 生态系统管理的要素.....	(126)
附录 1 国际上有关恢复生态学的网址	(129)
附录 2 国际比较重要的恢复生态学参考文献	(133)
后 记	(144)

第一编 恢复生态学

第一章 绪 论

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 9 000 多万人的速度在递增。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。20 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 & Jordan, 1985; Chapman, 1992; Cairns, 1995; Daily, 1995; 马世骏, 1990; 刘良梧和龚子同, 1994; 陈灵芝和陈伟烈, 1995; Dobson, 1997; 任海和彭少麟, 1998)。本书将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,并结合当前国际前沿生态系统健康、生态系统管理和可持续发展等提出恢复生态学的可能发展方向。

第一节 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 & 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才为生态恢复。但是,现实中这种理想状态很难实现,原因在于: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。于是人们又做了下述定义:

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 et al., 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 et al., 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 et al., 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:①重建(rehabilitation),即去除干扰并使生态系统回复原有的利用方式;②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;③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;④修补(remedy),即修复部分受损的结构;⑤更新(renewal),指生态系统发育及更新;⑥再植(reevegetation),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(Falk, 1996;余作岳和彭少麟, 1996;任海和彭少麟, 1998;章象恩, 1998, 1999)。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,例如美国明尼苏达州历史上被冰雪覆盖,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。

第二节 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 20 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 et al., 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 20 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 年在威斯康星大学植物园恢

复了一个 24hm² 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 et al., 1987; Rap-
port 1998)。1935 年,Clements 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)。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,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。同期,日本的宫肋照教授利用植被演替的理论在一些城市开展建设环境保护林的研究,人工促进森林的快速恢复(钦佩等,1998)。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 Chd-
wick 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 Ap-
proach 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 and 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管理为主(Gaynor, 1990; Cairns, 1992; Mansfield & 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 20 世纪 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 Inter-
national 数据库简称,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,他和彭少麟、任海等人提出了“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;森林恢复过程中结构与功能不同步恢复”等观点,余作岳等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开放站等。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。20 世纪 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(中国科协学会部,1990;赵桂久等,1993,1995;中国生态学会,1991,1995;陈灵芝和陈伟烈,1995;余作岳和彭少麟,1996;任海和彭少麟,1998;Ren,2000)。

参 考 文 献

- 陈灵芝和陈伟烈主编.1995.中国退化生态系统研究.北京:中国科技出版社
- 刘良梧和龚子同.1994.全球土壤退化评价.自然资源,(1):10~14
- 马世骏 主编.1990.现代生态学透视.北京:科学出版社
- 彭少麟.1997.恢复生态学与热带雨林的恢复.世界科技研究与发展,19(3):58~61
- 钦佩,安树青和颜京松.1998.生态工程学.南京:南京大学出版社
- 任海和彭少麟.1998.中国南亚热带退化生态系统恢复及可持续发展.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,176~179
- 任海和彭少麟.1998.退化生态系统的恢复与重建.青年地理,3(3):7~11

- 任海, 邬建国和彭少麟和赵利忠. 2000. 生态系统健康的监测与评估. *热带地理*, 20(4): 310~316
- 余作岳和彭少麟 主编. 1997. 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
- 中国生态学会 主编. 1991. 生态学研究进展. 北京: 中国科学技术出版社
- 中国科协学会部 编. 1990. 中国土地退化防止研究. 北京: 中国科学技术出版社
- 章家恩和徐琪. 1998. 生态退化研究的基本内容与框架. *水土保持通报*, 17(3): 46~53
- 章家恩和徐琪. 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
- 赵桂久, 刘燕华和赵名茶等 主编. 1993. 生态环境综合整治和恢复技术研究(第一集). 北京: 北京科学技术出版社
- 赵桂久, 刘燕华和赵名茶等 主编. 1995. 生态环境综合整治和恢复技术研究(第二集). 北京: 北京科学技术出版社
- 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. 珠海
- Aber, J. D. & W. Jordan. 1985. Restoration ecology: An environmental middle ground. *BioScience*, 35(7): 399
- Berger, J. J. ed. 1990. Ecological restoration in the San Francisco Bay Area. *Restoring the Earth*, Berkeley
- Brown, S. & A. E. Lugo. 1994. Rehabilitation of tropical lands: a key to sustaining development. *Restoration Ecology*, 2(2): 97~111
- Berger, J. J. 1993. Ecological restoration and nonIndigenous plant species: a review. *Restoration Ecology*, 2(2): 74~82
- Bradshaw, A. D. 1987. Restoration: An acid test for ecology. In: W. R. III. Jordon, N. Gilpin & J. Aber eds *Restoration Ecology: A Synthetic Approach to Ecological Research*. Cambridge: Cambridge University Press, 23~29
- Barrow, C. J. 1991. *Land Degradation*. London: Cambridge University Press
- Cairns, J. et al. eds. 1988. *Rehabilitation Damaged Ecosystems*. Boca Raton: CRC Press
- Conacher, A. J. et al. 1995. *Rural land degradation in Australia*. Melbourne, New York: Oxford University Press
- Chapman, G. P. 1992. *Desertified Grassland*. London: Academic Press
- Cairns, J. Jr., ed. 1977. *Recovery and Restoration of Damaged Ecosystems*. Charlottesville: University press of Virginia
- Cairns, J. Jr. ed. 1992. *Restoration of Aquatic Ecosystems*. Washington, DC: National Academy Press
- Cairns, J. Jr. 1995. Restoration ecology. *Encyclopedia of Environmental Biology*, 3: 223~235
- Caraher, D. & W. H. Knapp. 1995. Assessing ecosystem health in the Blue Mountains. In: U. S. Forest ed. *Silviculture: from the Cradle of Forestry to Ecosystem Management*. General technical report SE-88, Southeast Forest Experiment Station, U. S. Forest Service, Hendersonville, North Carolina. 75
- Constanza, R. R., R. Arge & R. Groot. 1997. The value of the worlds ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253~259
- Daily, G. C. S., P. R. Alexander & 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. In: W. R. III. Jordon, N. Gilpin and J. Aber eds. *Restoration Ecology: A Synthetic Approach to Ecological Research*. Cambridge Cambridge: University Press, 329~336
- Dobson, A. D., A. D. Bradshaw & A. J. M. Baker. 1997. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. *Science*, 277: 515~522
- Farnworth E. G. & F. B. Colley .1973. *Fragile Ecosystem*. New York: Springer-Verlag
- Falk, D. A., C. I. Millar & M. Olwell. 1996. *Restoring Diversity —— Strategies for Reintroduction of Endangered Plants*. Washington DC: Island Press
- Freedman, B. 1989. *Environmental Ecology: the impact of pollution and other stresses on ecosystem structure and function*. London: Academic Press
- 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. Ecol. Syst.*, 29: 113~140
- Forman, R. T. T. 1995. *Land Mosaics*. Cambridge: Cambridge University Press

- Gaynor, V. 1990. Prairie restoration on a corporate site. *Restoration and Reclamation Review*, 1(1): 35~40
- Handel, S.N., G.R. Robinson & A.J. Beattie. 1994. Biodiversity resources for restoration ecology. *Restoration ecology*, 2(4): 230~241
- Higgs, E., W. W. Covington, D. A. Falk, E.B. Allen & E. Read. 2000. No justification to retire the term "Restoration" *Science*, 287(5456): 1203
- Hobbs, R.J. & Norton D. A. 1996. Towards a conceptual framework for restoration ecology. *Restoration Ecology*, 4(2): 93~110
- Harper, J. L. 1987. Self-effacing Art: Restoration as Imitation of Nature. *Restoration Ecology: A Synthetic Approach to Ecological Research* In: W. R. III. Jordan, N. Gilpin and J. Aber eds. Cambridge: Cambridge University Press, 35~45
- Hobbs, R. J. & H. A. Mooney. 1993. Restoration ecology and invasions. In: D. A. Saunders, Hobbs & P. R. Ehrlich. eds. *Nature Conservation 3; Reconstruction of Fragmented Ecosystems, Global and Regional Perspectives* Surrey Beatty and Sons, Chipping Norton, New South Wales, Australia, 127~133
- Johnstone I. M. 1986. Plant invasion windows; a time-based classification of invasion potential. *Biological Review*, 61: 369~394
- Jackson, L.L., D. Lopoukine & D. Hillyard. 1995. Ecological restoration; a definition and comments. *Restoration Ecology*, 3(2): 71~75
- Jordan, W. III., M.E. Gilpin & J.D. Aber. 1987. *Restoration Ecology: A Synthetic Approach to Ecological Restoration*. Cambridge: Cambridge University. 1~342
- Jordan, W. R. III. 1995. "Sunflower Forest": ecological restoration as the basis for a new environmental paradigm. In: A. D.J. Baldwin, ed. *Beyond Preservation: Restoring and Inventing Landscape*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 17~34
- Kloor, K. 2000. Restoration ecology: Returning America's forests to their 'natural' roots. *Science*, 287(5453): 573
- Keddy, P. 1999. Wetland restoration: the potential for assembly rules in the service of conservation. *Wetland*, 19(4): 716~732
- Kauffman, R. 1995. Ecological approaches to riparian restoration in northeast Oregon. *Restoration and Management Notes*, 13: 12~15
- Lamd, 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 & K.A. Krieger. 1998. Population models of burrowing mayfly recolonization in western lake Erie. *Ecological Applications*, 8: 1206~1212
- Margaren, F. 1997. Disneyland or native ecosystem: genetics and the restorationist. *Restoration and Management Notes*, 14(2): 148~150
- Mansfield, B. & D. Towns. 1997. Lessons of the Islands: Restoration in New Zealand. *Restoration and Management Notes*, 15(2): 150~154
- Mitsch, W.J. & S.E. Jorgensen. *Ecological Engineering*. New York; John Wiley & Sons
- Middleton, B. 1999. *Wetland Restoration: Flood Pulsing and Disturbance Dynamics*. New York; John Wiley & Sons, Inc
- Owles, M.B. & C.J. Whelan. 1994. *Restoration of Endangered Species: Conceptual Issues, Planning and Implementation*. New York; Cambridge University Press
- Parham, W. ed. 1993. *Improving Degraded Lands: Promising Experience From South China*. Honolulu; Bishop Museum Press
- Parker, V.T. 1997. The scale of successional models and restoration ecology. *Restoration Ecology*, 5(4): 301~306
- Rapport, D.J. ed. 1998. *Ecosystem health*. Oxford; Blackwell Science, Inc
- Rapport, D. J., R. Costanza & A.J. McMichael. 1998. Assessing ecosystem health. *Trends in ecology & evolution*, 13: 397~402
- Sehal, J. et al. 1994. *Soil Degradation in India: Status and Impact*. New Delhi; Oxford & IBH Pub. Co.

Van der Valk. 1999. Succession theory and wetland restoration. Proceedings of INTECOL's V International wetlands conference, Perth, Australia

Whisenant, S.G. & D.J. Tongway. 1995. Repairing mesoscale processes during restoration. Fifth international rangeland congress, Denver, 62~63

第二章 退化生态系统恢复与恢复生态学

退化生态系统实际上是生态系统演替的一个类型。退化生态系统形成既可能是自然的,也可能是人为的,本书主要限于由人类干扰形成的退化生态系统。人类由于各种限制或认识不足而使生态系统受害或受损,在恢复时所付出的努力要比利用或破坏时要大得多。而且从目前的研究和实践结果看,复制型的生态系统恢复似乎是不可能的。

第一节 退化生态系统的定义及其形成原因

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)。

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)。

第二节 环境污染对生物多样性的影响

随着人类的发展,环境污染也加剧。环境污染会影响生态系统各个层次的结构、功能

和动态,进而导致生态系统退化(曲格平,1984)。本节将重点分析环境污染对生物多样性的影响。

环境污染对生物多样性的影响目前有两个基本观点:一是由于生物对突然发生的污染在适应上可能存在很大的局限性,故生物多样性会丧失;二是污染会改变生物原有的进化和适应模式,生物多样性可能会向着污染主导的条件下发展,从而偏离其自然或常规轨道。环境污染会导致生物多样性在遗传、种群和生态系统三个层次上降低。

在遗传层次上的影响。虽然污染会导致生物的抵抗和适应,但最终会导致遗传多样性减少。这是因为在污染条件下,种群的敏感性个体消失,这些个体具有特质性的遗传变异因此而消失,进而导致整个种群的遗传多样性水平降低;污染引起种群的规模减小,由于随机的遗传漂变的增加,可能降低种群的遗传多样性水平;污染引起种群数量减小,以至于达到了种群的遗传学阈值,即使种群最后恢复到原来的种群大小时,遗传变异的来源也大大降低。

在种群水平上的影响。物种是以种群的形式存在的,最近研究表明,当种群以复合种群的形式存在时,由于某处的污染会导致该亚种群消失,而且由于生境的污染,该地方明显不再适合另一亚种群入侵和定居。此外,由于各物种种群对污染的抵抗力不同,有些种群会消失,而有些种群会存活,但最终的结果是当地物种丰富度会减少。

在生态系统层次上的影响。污染会影响生态系统的结构、功能和动态。严重的污染可能具有趋同性,即将不同的生态系统类型最终变成基本没有生物的死亡区。一般的污染会改变生态系统的结构,导致功能的改变。值得指出的是,重金属或有机物污染在生态系统中经食物链作用,会有放大作用,最终对人类造成影响。

第三节 全球及中国退化生态系统的面积

一、全球退化生态系统类型及其面积

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 $50 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 以上土地的退化,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 $20 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 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 $7.5 \times 10^8 \text{ hm}^2$,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 $9.1 \times 10^8 \text{ hm}^2$,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 $3.0 \times 10^8 \text{ hm}^2$,极度退化的(不能进行农业生产和改良)有 $0.09 \times 10^8 \text{ hm}^2$;全球荒漠化土地有 $36 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 以上(占全球干旱地面积的 70%),其中轻微退化的 $12.23 \times 10^8 \text{ hm}^2$,中度退化的 $12.67 \times 10^8 \text{ hm}^2$,严重退化的有 $10 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 以上,极度退化的有 $0.72 \times 10^8 \text{ hm}^2$,此外,弃耕的旱地每年还以 $0.09 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 的速度在递增;全球退化的热带雨林面积有 $4.27 \times 10^8 \text{ hm}^2$,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 亿美元,而全球每年进行生态恢复而投入的经费达 100 亿~224 亿美元。

二、中国退化生态系统类型及其面积

中国地处中纬度地区,南北跨纬度 49° ,东西跨经度 62° ,地形多样,气候复杂,形成多

种多样的农业自然资源,表现为东农西牧,南水北旱,山地平川农林互补,江河湖海散布环集。中国有 960 万平方公里土地,据 1995 年统计,农田占 14.6%,果园占 0.5%,草地占 41.6%,林地占 17.2%,工业交通和城镇用地占 2.6%。水体占 3.5%,荒漠和雪地占 27.2%。

中国各类资源人均值都低于世界平均水平,人均土地面积为世界的 1/3,森林资源为 1/6,草地资源为 1/3,特别是耕地资源只有世界人均的 1/3。中国后备宜农荒地毛面积仅 5 亿亩,其中分布在草原地区约 2.1 亿亩,宜种植人工饲草料用;分布在南方山丘的约 7000 万亩,主要作为果树与经济林木用地;可用种植粮、棉、油的农作物用地约 2 亿多亩;另有 17 亿亩荒山荒地。目前我国主要靠扩大耕地面积,依靠自然恢复地力,调节人地关系。表 2.1 和表 2.2 显示了我国历史上人口增长和人均资源情况。

表 2.1 中国历代人口及人均耕地面积

年份	人口/人	人均耕地面积 / (hm ² /人)
BC210	20 000 000	1.67
756	52 910 000	1.40
1736	330 000 000	0.25
1863	404 946 000	0.12
1949	540 000 000	0.20
1959	620 000 000	0.18
1980	987 050 000	0.11
1990	1 100 000 000	0.09
1998	1 200 000	0.07

表 2.2 中国六大区域的人均资源占有量(程鸿,1990)

项目	平均	东北区	华北	西北	中部	华南	长江区
土地面积/hm ²	0.92	0.85	0.67	5.73	0.28	0.45	0.69
耕地/hm ²	0.14	0.22	0.18	0.25	0.11	0.09	0.13
草地面积/hm ²	0.25	0.06	0.24	2.09	0.03	0.05	0.13
林地面积/hm ²	0.11	0.27	0.07	0.19	0.07	0.12	0.11
水面/m ²	2603	1680	614	7783	1983	4085	3729
人口密度/(人/km ²)	109	118	149	17	332	225	147

由于人口增长过快,加上大跃进等政策错误,我国形成了大量的退化生态系统(石玉林,1992;赵桂久等;1993,1995;周三立,1996)。我国水土流失面积约为 180 万平方公里,占国土面积的 18.8%,其中黄土高原地区约 80%地方水土流失。北方沙漠、戈壁、沙漠化

土地面积为 149 万平方公里, 占国土面积的 15.5%, 1987 年已沙漠化土地 20.12 万平方公里, 潜在沙漠化土地 13.28 万平方公里。目前有 5 900 万亩农田和 7 400 万亩草场受到沙漠化威胁。草原退缩面积 13 亿亩。每年以 2 000 万亩(1 亩=1/15 公顷)增加。每年使用农药防治面积 23 亿亩次, 劣质化肥污染农田 2500 万亩(刘良梧和龚子同, 1994; 中国科协学会部, 1990)。

张巧珍(1993)推算, 除农田外, 我国其他的生态系统退化面积约占国土总面积的 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 $140 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 退化面积为 $28 \times 10^6 \text{ hm}^2$; 草地面积 $400 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 退化面积为 $13.2 \times 10^6 \text{ hm}^2$; 森林总面积 $165.2 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 退化面积 $31.2 \times 10^6 \text{ hm}^2$; 淡水面积 $0.743 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 退化面积 $0.245 \times 10^6 \text{ hm}^2$; 废弃矿地 $2 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (表 2.3)。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。

表 2.3 1995 年中国主要生态系统及其退化生态系统面积(hm^2)

生态系统类型	总面积($\times 10^6$)	退化面积($\times 10^6$)	比例/%
农田	140	28	20
草地	400	132	33
林地	165.2	31.2	25
荒漠	0.130	—	—
淡水水面	0.743	0.245	32
废弃矿地	2	—	—

据陈灵芝和陈伟烈(1995), 国家统计局(1995), 余作岳等(1996), Ren(2000)

三、中国的脆弱生态系统

脆弱生态系统极易沦为退化生态系统。脆弱生态系统就是抵抗外界干扰能力低、自身的稳定性差的生态系统。脆弱生态系统有三种理解: 其一是指生态系统的正常功能被打乱, 系统发生了不可逆变化, 从而失去恢复能力的生态系统; 其二是指当生态系统发生了变化, 以至于影响当前或近期人类的生存和自然资源利用的生态系统; 其三是指当生态系统退化超过了在现有社会经济和技术水平下能长期维持目前人类利用和发展水平的状况。从定义上看, 脆弱生态系统与退化生态系统相似, 主要的区别是脆弱生态系统还包括了那些容易退化而尚未退化的生态系统。

脆弱生态系统形成的原因包括自然和人为因素。自然因素包括地质脆弱因子、地貌脆弱因子、生物群体结构、气候脆弱因子和大风等, 人为因素包括过度垦殖土地、过度放牧、过度樵采、过度采药、长期不合理的灌溉、矿山开发、工农业污染等。

我国自然生态条件较差, 脆弱生态系统分布范围广、面积大。据赵跃龙(1999)统计, 我国脆弱生态系统总面积达 194 万平方公里, 超过国土总面积的 1/5。它们主要是北方半干旱—半湿润区(如黄土高原, 其土壤沙性重、风蚀沙化严重、水土流失严重、土壤盐渍化、自然灾害频繁)、西北干旱脆弱区(如新疆等, 其干旱缺水、风沙化严重、土壤盐碱化、山地植被稀少、草原严重退化)、华北平原区(如河北, 其冬春干旱、盐碱内涝严重、风沙和自然灾害频繁)、南方丘陵区(如湖南等, 其水土流失较严重)、西南石灰岩山地(如贵州, 其土

层薄、肥力低、保水性能差)、西南山地和青藏高原区(如西藏等,其缺水、气候差)。

第四节 退化生态系统的恢复

恢复生态学的研究对象是退化生态系统,退化生态系统的恢复涉及到许多方面,有恢复的目标、原则、方法、过程、机理等等。生态恢复的最本质问题是恢复生态系统的必要功能并使之具系统自我维持能力。

一、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: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(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;其他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。

总之,根据不同的社会、经济、文化与生活需要,人们往往会对不同的退化生态系统制定不同水平的恢复目标。但是无论对什么类型的退化生态系统,应该存在一些基本的恢复目标或要求,主要包括:①实现生态系统的地表基底稳定性,因为地表基底(地质地貌)是生态系统发育与存在的载体,基底不稳定(如滑坡),就不可能保证生态系统的持续演替与发展;②恢复植被和土壤,保证一定的植被覆盖率和土壤肥力;③增加种类组成和生物多样性;④实现生物群落的恢复,提高生态系统的生产力和自我维持能力;⑤减少或控制环境污染;⑥增加视觉和美学享受。

二、退化生态系统恢复与重建的基本原则

退化生态系统的恢复与重建要求在遵循自然规律的基础上,通过人类的作用,根据技术上适当,经济上可行,社会能够接受的原则,使受害或退化生态系统重新获得健康并有益于人类生存与生活的生态系统重构或再生过程。生态恢复与重建的原则一般包括自然法则、社会经济原则、美学原则 3 个方面(图 2.1)。自然法则是生态恢复与重建的基本原则,也就是说,只有遵循自然规律的恢复重建才是真正意义上的恢复与重建,否则只能是背道而驰,事倍功半。社会经济条件条件是生态恢复重建的后盾和支柱,在一定尺度上制约着恢复重建的可能性、水平与深度。美学原则是指退化生态系统的恢复重建应给

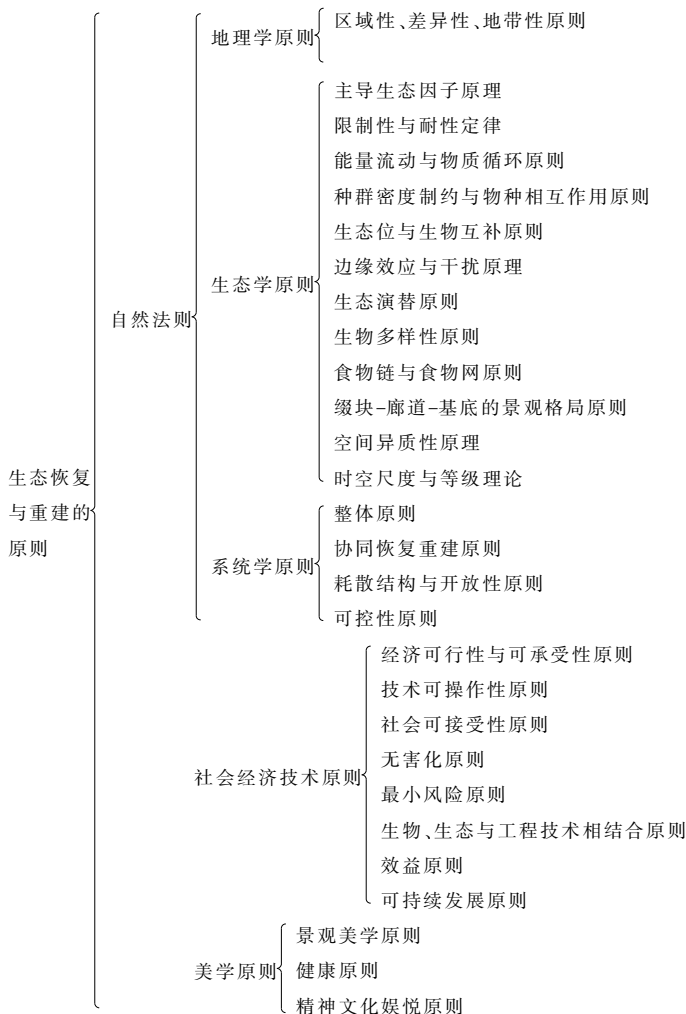


图 2.1 退化生态系统恢复与重建的基本定律、原理和原则

三、生态恢复的方法问题

恢复与重建技术是恢复生态学的重点研究领域,但目前是一个较为薄弱的环节。由于不同退化生态系统存在着地域差异性,加上外部干扰类型和强度的不同,结果导致生态系统所表现出的退化类型、阶段、过程及其响应机理也各不相同。因此,在不同类型退化生态系统的恢复过程中,其恢复目标、侧重点及其选用的配套关键技术往往会有所不同。尽管如此,对于一般退化生态系统而言,大致需要或涉及以下几类基本的恢复技术体系:①非生物或环境要素(包括土壤、水体、大气)的恢复技术;②生物因素(包括物种、种群和群落)的恢复技术;③生态系统(包括结构与功能)的总体规划、设计与组装技术。这里,将退化生态系统的一些常用或基本的技术加以总结(表 2.4),以供参考。

表 2.4 退化生态系统的恢复与重建技术体系

恢复类型	恢复对象	技术体系	技术类型
非生物环境因素	土壤	土壤肥力恢复技术	少耕、免耕技术;绿肥与有机肥施用技术;生物培肥技术(如EM技术);化学改良技术;聚土改土技术;土壤结构熟化技术
		水土流失控制与保持技术	坡面水土保持林、草技术;生物篱笆技术;土石工程技术(小水库、谷坊、鱼鳞坑等);等高耕作技术;复合农林牧技术
		土壤污染与恢复控制与恢复技术	土壤生物自净技术;施加抑制剂技术;增施有机肥技术;移土客土技术;深翻埋藏技术;废弃物的资源化利用技术
	大气	大气污染控制与恢复技术	新兴能源替代技术;生物吸附技术;烟尘控制技术
		球变化控制技术	可再生能源技术;温室气候的固定转换技术(如利用细菌、藻类);无公害产品开发与生产技术;土地优化利用与覆盖技术
	水体	水体污染控制技术	物理处理技术(如加过滤、沉淀剂);化学处理技术;生物处理技术;氧化塘技术;水体富营养化控制技术
节水技术		地膜覆盖技术;集水技术;节水灌溉(渗灌、滴灌)	
生物因素	物种	物种选育与繁殖技术	基因工程技术;种子库技术;野生生物种的驯化技术
		物种引入与恢复技术	先锋种引入技术;土壤种子库引入技术;乡土种种苗库重建技术;天敌引入技术;林草植被再生技术
	种群	物种保护技术	就地保护技术;迁地保护技术;自然保护区分类管理技术
		种群动态调控技术	种群规模、年龄结构、密度、性比例等调控技术
		种群行为控制技术	种群竞争、他感、捕食、寄生、共生、迁移等行为控制技术
	群落	群落结构优化配置与组建技术	林灌草搭配技术;群落组建技术;生态位优化配置技术;林分改造技术;择伐技术;透光抚育技术
群落演替控制与恢复技术		原生与次生快速演替技术;封山育林技术;水生与旱生演替技术;内生与外生演替技术	
生态系统	结构功能	生态评价与规划技术	土地资源评价与规划;环境评价与规划技术;景观生态评价与规划技术;4S辅助技术(RS、GIS、GPS、ES)
		生态系统组装与集成技术	生态工程设计技术;景观设计技术;生态系统构建与集成技术
景观	结构功能	生态系统间链接技术	生物保护区网络;城市农村规划技术;流域治理技术

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 & 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 and 美学效益的统一(余作岳和彭少麟, 1996)。

四、退化生态系统恢复与重建的程序

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(Mitsch & Jorgensen, 1989; Kauffman, 1995)。

上述程序可列成如下操作过程:接受恢复项目→明确被恢复对象、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)→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。

五、退化生态系统恢复的机理

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、分解者系统和微生物。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。

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 2.2)。然而,也有人指出退化生态系统并不总是沿着一个方向恢复,也可能是在几个方向间进行转换并达到复合稳定状态(metastablestates)。Hobbs Norton (1996) 提出了一个临界阈值理论(图 2.3)。该理论假设生态系统有 4 种

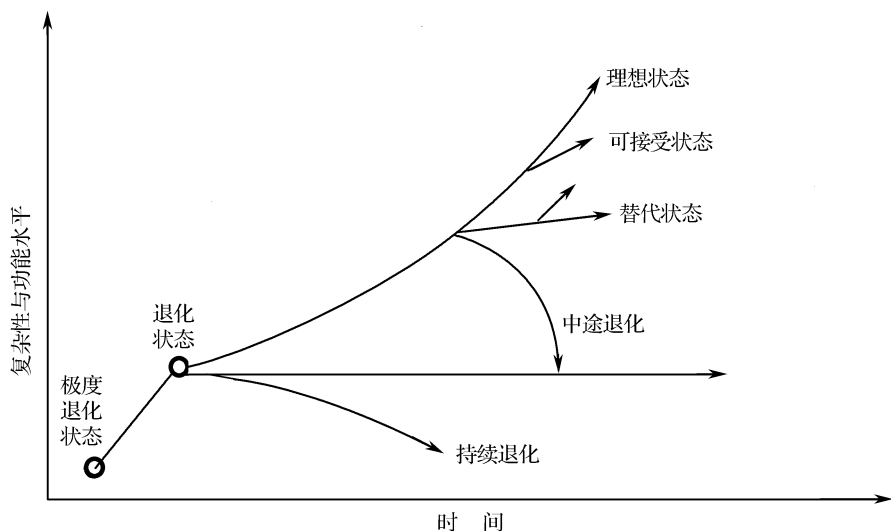


图 2.2 退化生态系统恢复的方向 (改绘自 Hobbs & Mooney,1993)

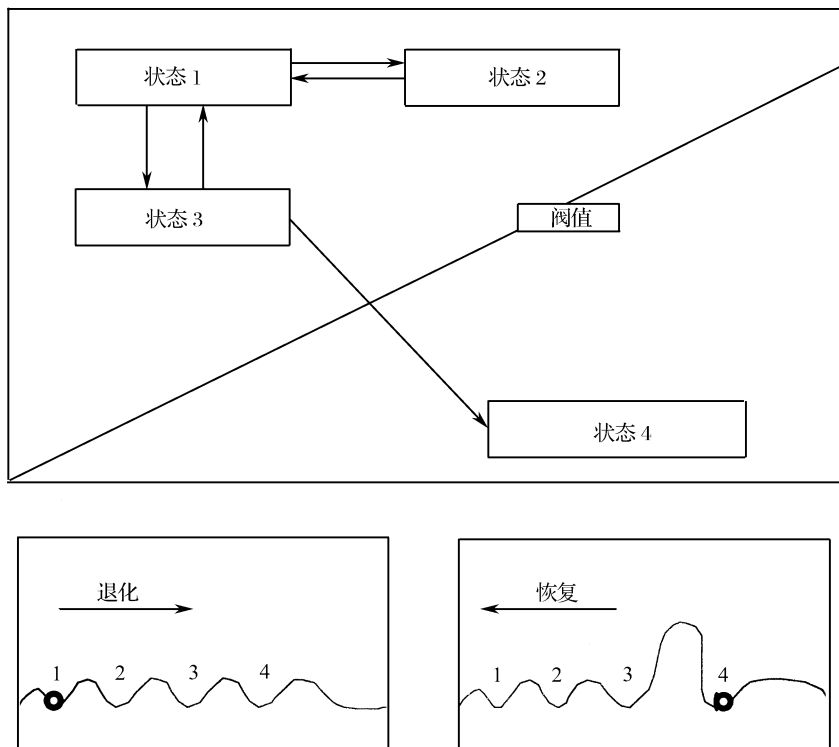


图 2.3 退化生态系统恢复的临界阈值理论 (改绘自 Hobbs & Norton,1996)

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。例如草地常常由于过度放牧而退化,若控制放牧则可很快恢复,但当草地已被野草入侵,且土壤成分已改变时,控制放牧已不能使草地恢复,而需要更多的恢复投入。同样,在亚热带区域,顶级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)。

六、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。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(像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,恢复与否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评价恢复度。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,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 & Tongway, 1995; Rapport et al., 1998; Madenjian et al., 1998)。

如果可能,恢复退化生态系统的终极目标是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。恢复退化的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的生态系统才具有服务功能,但是我们还是提出一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、家具、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 et al., 1997; Daily et al., 1997)。

七、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一般是漫长的。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。一般来说,退化程度轻的生态系统恢复时间要短些;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 3 000~12 000 年,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。

八、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 & 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,其繁殖和传播潜力更大,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, 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 & 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)。

第五节 恢复生态学理论

恢复生态学的诞生时间还不长,它的学科理论和研究内容还不系统,整个理论框架还有待完善。但通过恢复生态学家的努力,目前已从生态学、地学、经济学和社会学等学科中吸收了一些理论,作为生态恢复理论与实践的指导。

一、恢复生态学的研究内容

如前所述,恢复生态学是一门关于生态恢复的学科,它具有理论性和实践性。就目前的理解,恢复生态学的基础理论研究包括:①生态系统结构(包括生物空间组成结构、不同地理单元与要素的空间组成结构及营养结构等)、功能(包括生物功能;地理单元与要素的组成结构对生态系统的影响与作用;能流、物流与信息流的循环过程与平衡机制等)以及生态系统内在的生态学过程与相互作用机制;②生态系统的稳定性、多样性、抗逆性、生产力、恢复力与可持续性研究;③先锋与顶级生态系统发生、发展机理与演替规律研究;④不同干扰条件下生态系统的受损过程及其响应机制研究;⑤生态系统退化的景观诊断及其

评价指标体系研究;⑥生态系统退化过程的动态监测、模拟、预警及预测研究;⑦生态系统健康研究。应用技术研究包括:①退化生态系统的恢复与重建的关键技术体系研究;②生态系统结构与功能的优化配置与重构及其调控技术研究;③物种与生物多样性的恢复与维持技术;④生态工程设计与实施技术;⑤环境规划与景观生态规划技术;⑥典型退化生态系统恢复的优化模式试验示范与推广研究(马世骏,1990;章家恩和徐琪,1999)。

二、恢复生态学的理论基础

目前,自我设计与人为设计理论(Self-design versus design theory)是惟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)。

三、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。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,2000)。

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,已不能像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。

四、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。

参 考 文 献

- 程鸿.1990.中国资源手册.北京:科学出版社
- 陈灵芝和陈伟烈主编.1995.中国退化生态系统研究.北京:中国科学技术出版社
- 国家统计局.1997.中国统计年鉴.北京:中国统计出版社
- 刘良梧和龚子同.1994.全球土壤退化评价.自然资源,(1):10~14
- 马世骏 主编.1990.现代生态学透视.北京:科学出版社
- 彭少麟.1997.恢复生态学与热带雨林的恢复.世界科技研究与发展,19(3): 58~61
- 曲格平.1984.中国环境问题及对策.北京:中国环境科学出版社
- 任海和彭少麟.1998.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:中国科学技术出版社,176~179
- 任海和彭少麟.1998.退化生态系统的恢复与重建.青年地理,3(3):7~11
- 任海,郭建国,彭少麟和赵利忠.2000.生态系统健康的监测与评估.热带地理,20(4):310~316
- 石玉林 主编.1992.开源与节约——中国自然资源与人力资源的潜力与对策.北京:科学出版社
- 余作岳和彭少麟 主编.1997.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
- 中国生态学会 主编.1991.生态学研究进展.北京:中国科学技术出版社
- 中国科协学会部 编.1990.中国土地退化防止研究.北京:中国科学技术出版社
- 中华人民共和国林业部.1996.中国林业资源报告.北京:中国林业出版社

- 章家恩和徐琪. 1999. 恢复生态学的一些基本问题探讨. *应用生态学报*, 10(1): 109~112
- 周立三主编. 1996. 生存与发展——中国长期发展问题研究. 北京: 科学出版社
- 赵跃龙. 1999. 中国脆弱生态环境类型分布及其综合整治. 北京: 中国环境科学出版社
- 赵桂久, 刘燕华, 赵名茶等 主编. 1993. 生态环境综合整治和恢复技术研究(第一集). 北京: 北京科学技术出版社
- 赵桂久, 刘燕华, 赵名茶等 主编. 1995. 生态环境综合整治和恢复技术研究(第二集). 北京: 北京科学技术出版社
- Berger J. J. 1993. Ecological restoration and nonIndigenous plant species: a review. *Restoration Ecology*, 2(2): 74~82
- Barrow, C. J. 1991. *Land Degradation*. London: Cambridge University Press
- Cairns, J. et al. eds. 1988. *Rehabilitation Damaged Ecosystems*. Boca Raton: CRC Press
- Chapman, G. P. 1992. *Desertified Grassland*. London: Academic Press
- Cairns, J. Jr. ed. 1992. *Restoration of Aquatic Ecosystems*. Washington, DC: National Academy Press
- Cairns, J. Jr. 1995. *Restoration Ecology*. *Encyclopedia of Environmental Biology*, 3, 223~235
- Cairns, J. Jr. ed. 1977. *Recovery and Restoration of Damaged Ecosystems*. Charlottesville: University Press of Virginia
- Constanza, R. R. & R. Arge & R. Groot. 1997. The Value of The Worlds Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*, 387, 253~259
- Daily, G. C. S. & P. R. Alexander & 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
- Dobson, A. D., A. D. Bradshaw & A. J. M. Baker. 1997. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. *Science*, 277, 515~522
- Freedman, B. 1989. *Environmental Ecology: the Impact of Pollution and Other Stresses on Ecosystem Structure and Function*. London: Academic Press
- 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. Ecol. Syst.* 29, 113~140
- Forman, R. T. T. 1995. *Land Mosaics*. Cambridge: Cambridge University Press
- Gaynor, V. 1990. Prairie restoration on a corporate site. *Restoration and Reclamation Review*, 1(1): 35~40
- Hobbs, R. J. & D. A. Norton 1996. Towards a conceptual framework for restoration ecology. *Restoration Ecology*, 4(2): 93~110
- Harper, J. L. 1987. Self-effacing art: restoration as imitation of nature. In: W. R. III. Jordon, N. Gilpin and J. Aber eds. *Restoration Ecology: A Synthetic Approach to Ecological Research* Cambridge: Cambridge University Press, 35~45
- Jackson, L. L., D. Lopoukine & D. Hillyard. 1995. Ecological restoration: a definition and comments. *Restoration Ecology*, 3(2): 71~75
- Jordan, W. III., M. E. Gilpin & J. D. Aber. 1987. *Restoration Ecology: A Synthetic Approach to Ecological Restoration*. Cambridge: Cambridge University Press
- Kloor, K. 2000. Restoration ecology: Returning America's forests to their 'natural' roots. *Science*, 287(5453): 573
- Keddy, P. 1999. Wetland restoration: the potential for assembly rules in the service of conservation. *Wetland*, 19(4): 716~732
- Margaren, F. 1997. Disneyland or native ecosystem: genetics and the restorationist. *Restoration and Management Notes*, 14(2): 148~150
- Mansfield, B. & D. Towns. 1997. Lessons of the Islands: Restoration in New Zealand. *Restoration and Management Notes*, 15(2): 150~154
- Mitsch, W. J. & S. E. Jorgensen. 1989. *Ecological Engineering*. New York: John Wiley & Sons
- Middleton, B. 1999. *Wetland restoration: Flood Pulsing and Disturbance Dynamics*. New York: John Wiley & Sons, Inc
- Owles, M. B. & C. J. Whelan. 1994. *Restoration of Endangered Species: Conceptual Issues, Planning and Implementation*. New York: Cambridge University Press. 15~21
- Parham, W. ed. 1993. *Improving Degraded Lands: Promising Experience Form South China*. Honolulu: Bishop Museum