

景观生态学与退化生态系统恢复

李明辉^{1,2}, 彭少麟^{1*}, 申卫军¹, 林永标¹

(1. 中国科学院华南植物研究所, 广州 510650; 2. 华南农业大学热带亚热带生态研究所, 广州 510642)

摘要:退化生态系统的恢复是一项艰巨任务,它需要考虑到所要恢复的退化生态系统的结构、多样性和其动态的整体性和长期性。现在对于退化生态系统恢复研究已经要使生态学家们关注受损生态系统的理论和实际问题。退化生态系统恢复所面临的挑战是理解和利用生态演替理论来完成并加速恢复进程。恢复的主要目标是建立一个自维持的,由不同的群落或生态系统组成的能够满足不同需要如生物保护和粮食生产需要的景观。景观生态学关注于大的空间尺度的生态学问题。景观生态学研究方法可以为退化生态系统恢复实践提供指导。在解决退化生态系统的恢复问题时,景观生态学的方法在理论和实践上是有效的。景观生态学中的核心概念和其一般原理斑块形状、生态系统间相互作用、镶嵌系列等都同退化生态系统的恢复有着密切的关系。如恢复地点的选择和适当的恢复要素的空间配置。在评价退化生态系统的恢复是否取得成功,利用景观生态学也具有重要的意义。景观生态学理论如景观格局与景观异质性理论,干扰理论和尺度理论都能够指导退化生态系统的恢复实践。同样地,退化生态系统的恢复可以为景观生态学的研究提供非常恰当的实验场。寓景观生态学思想于退化生态系统恢复过程是一种新的有效途径。

关键词:景观生态学; 退化生态系统; 恢复

Landscape ecology and restoration of degraded ecosystems

LI Ming-Hui^{1,2}, PENG Shao-Lin^{2*}, SHEN Wei-Jun¹, LIN Yong-Biao¹ (1. *South China Institute of Botany, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510650, China*; 2. *Institute of Tropic and Subtropic Ecology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1622~1628.

Abstract: The ecological restoration of degraded ecosystem is a difficult undertaking which requires a global and long-term view of the structure, diversity, functioning and dynamics of the ecosystem in question. The study of degraded ecosystem has alerted ecologists to some of the problems associated with both the practical and the theoretical issues of rehabilitating damaged ecosystems. The challenge of degraded system restoration is to understand and exploit the principles of ecological succession at all stages, by complementing and accelerating the processes of colonization and regeneration. The main aim is to construct self-sustaining, appropriate ecosystems, connected in the landscape, that meet conservation,

基金项目:广东省团队研究资助项目(003031);中国科学院创新小组资助项目;中国科学院特支费资助项目(STZ-01-36);国家自然科学基金资助项目(30100021);广东省自然科学基金资助项目(010551);中国科学院鹤山站基金资助项目(2001193906)

收稿日期:2003-03-25; **修订日期:**2003-05-18

作者简介:李明辉(1973~),女,博士生,主要从事景观生态学研究。E-mail: liminghuilmh@eyou.com

* **通讯作者** Author for correspondence, E-mail: slpeng@scib.ac.cn

Foundation item: Group Project of Guangdong Province (No. 003031), Knowledge Innovation Project of CAS, Special Support of Project of CAS (No. STZ-01-36), National Natural Science Foundation of China (No. 30100021), Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 010551), Heshan Foundation of CAS (No. 20011939061)

Received date: 2003-03-25; **Accepted date:** 2003-05-18

Biography: LI Ming-Hui, Ph. D. candidate, main research field: landscape ecology.

landscape and crop production goals. A landscape-level approach may be useful in addressing restoration topics that are of both theoretical and practical concern. Landscape ecology focuses on questions typically related to broad spatial scales. Landscape approach embraces spatial heterogeneity, consisting of a number of ecosystems and landscape structures of different types, as a central theme. Landscape ecology theories such as landscape heterogeneity and patterns theory, distribution and scale theory can guide the practice of restoration. Landscape studies may aid restoration efforts in a variety of ways, including provision of better guidance for selecting reference sites and establishing project goals and suggestions for appropriate spatial configurations of restored elements to facilitate recruitment of flora/fauna. Likewise, restoration efforts may assist landscape-level studies, given that restored habitats, possessing various patch arrangements or being established among landscapes of varying diversity and conditions of human alteration, can provide extraordinary opportunities for experimentation over a large spatial scale. Restoration studies can facilitate the rate of information gathering for expected changes in natural landscapes for which introduction of landscape elements may be relatively slow. Moreover, data collected from restoration studies can assist in validation of dynamic models of current interest in landscape ecology. We submit that restoration and landscape ecology have an unexplored mutualistic relationship that could enhance research and application of both disciplines.

Key words: landscape ecology; degraded ecosystem; restoration

文章编号:1000-0933(2003)08-1622-07 中图分类号:Q948.15 文献标识码:A

近几十年来,人口急剧增长、社会经济发展和资源的高强度开发等都是全球性的问题,直接或间接导致了生态系统的退化,恢复生态学在全球退化生态系统大面积增加的背景下应运而生,在 20 世纪 80 年代迅速兴起,成为现代生态学的热点之一^[1]。

Naveh 综述了景观水平的生态学过程和退化生态系统恢复之间的关系,并提出在退化生态系统的恢复过程中要考虑到从小尺度(退化岛屿)到大尺度的景观^[2]。并提出证实了在解决退化生态系统的恢复问题时,景观生态学的方法在理论和实践上是有效的。景观生态学中的核心概念为景观系统的整体性和景观要素异质性^[3,4];景观研究的尺度性(多尺度特征);景观结构的镶嵌性等和其一般原理如斑块形状、斑块大小、生态系统间相互作用、镶嵌序列等^[3~6]都同退化生态系统的恢复有着密切的关系。

1 退化生态系统恢复的意义

由于生态环境建设与资源开发二者长期不合理导致生态系统退化和环境灾害问题频频发生,从而形成了众多的退化生态系统。退化生态系统的结构和空间格局往往具有明显的不合理性,具体可表现为结构类型单一、空间异质性差、空间连接度低、破碎化程度高等方面,它可以影响景观的结构、功能和动态^[3~6]。通过对退化景观的恢复,可以取得显著的生态、经济和社会效益。我国是世界上生态系统退化类型、山地生态系统退化最严重的国家之一,也是较早开始生态重建实践和研究的国家之一。从 20 世纪 50 年代开始,我国就开始了退化环境的长期定位观测试验和综合整治工作。20 世纪 50 年代末,华南地区退化坡地上开展了荒山绿化、植被恢复,20 世纪 70 年代,“三北”地区的防护林工程建设,80 年代长江中上游地区(包括岷江上游)防护林工程建设、水土流失工程治理等一系列的生态恢复工程^[7]。在 80 年代末,农牧交错区、风蚀水蚀交错区、干旱荒漠区、丘陵山地、干热河谷和湿地等也进行了退化或脆弱生态环境及其恢复重建方面进行了大量的工作,90 年代开始的沿海防护建设研究,提出了许多切实可行的生态恢复与重建技术与模式^[7,8]。

2 景观生态学理论在生态恢复领域的应用

2.1 传统生态恢复实践所面临的问题

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^[7]。许多案例表明^[9],这些方法在生态恢复的早期阶段确实成效显著,但随

着恢复过程的发展延续,许多新问题的出现超出了人们的预料,甚至导致生态恢复过程的前功尽弃。其中除了存在现在的科学技术和方法对于恢复退化生态系统的多样性和其功能是不够的之外一个很重要的原因是没有考虑到景观格局的配置和时间尺度和空间尺度而没有收到良好的效果,没有在景观水平利用生态系统的整和性来保存和保护生态系统,进行退化生态系统的恢复。

2.2 退化生态系统恢复过程中的景观生态学理论应用

景观生态学是研究一个相当大的区域内,由许多不同生态系统所组成的整体(即景观)的空间结构、相互作用、协调功能及动态变化的一门生态学新分支^[5,10]。景观生态学的理论与方法与传统生态学有着本质的区别,它注重人类活动对景观格局与过程的影响。退化和破坏了的生态系统和景观的保护与重建也是景观生态学的研究重点之一。

景观生态学理论可以指导退化生态系统恢复实践,如为重建所要恢复的各种要素,使其具有合适的空间构型,从而达到退化生态系统恢复的目的;通过景观空间格局配置构型来指导退化生态系统恢复,使得恢复工作获得成功^[11]。

2.2.1 景观格局与景观异质性理论 景观异质性是景观的重要属性之一^[5],Webster 字典将异质性定义为“由不相关或不相似的组分构成的”系统。异质性在生物系统的各个层次上都存在。景观格局一般指景观的空间分布,是指大小与形状不一的景观斑块在景观空间上的排列,是景观异质性的具体体现,又是各种生态过程在不同尺度上作用的结果^[5]。恢复景观是由不同演替阶段、不同类型的斑块构成的镶嵌体,这种镶嵌体结构由处于稳定和不稳定状态的斑块、廊道和基质构成。斑块、廊道和基质是景观生态学用来解释景观结构的基本模式^[5],运用景观生态学这一基本模式,可以探讨退化生态系统的构成,可以定性、定量地描述这些基本景观元素的形状、大小、数目和空间关系,以及这些空间属性对景观中的运动和生态流的影响。景观生态学研究表明,斑块边缘由于边缘效应的存在而改变了各种环境因素,如光入射、空气和水的流动,从而影响了景观中的物质流动^[12]。同时,不同的空间特征也决定了某些生态学过程的发生和进行。斑块的形状和大小与边界特征(宽度、通透性、边缘效应等)对采取何种恢复措施和投入有很大关系,如紧密型形状有利于保蓄能量、养分和生物;松散型形状(长宽比很大或边界弯延曲折)易于促进斑块内部与周围环境的相互作用,特别是能量、物质和生物方面的交换。如斑块内部边缘比较高,则养分交换和繁殖体的更新更容易。不同斑块的组合能够影响景观中物质和养分的流动、生物种的存在、分布和运动,其中又以斑块的分布规律影响大^[13,14],并且这种运动在多尺度上存在^[15],这种迁移无论是从传播速率还是传播距离都同均质景观的不同^[16]。总体而言,景观异质性或时空镶嵌性有利于物种的生存和延续及生态系统的稳定,如一些物种在幼体和成体不同生活史阶段需要两种完全不同栖息环境,还有不少物种随着季节变换或进行成不同生命活动时(觅食、繁殖等)也需要不同类型栖息环境。所以通过一定人为措施,如营造一定砍伐格局、控制性火烧等,有意识地增加和维持景观异质性有时是必要的。

利用景观生态学的方法,能够根据周围环境的背景来建立恢复的目标,并为恢复地点的选择提供参考^[15,17,18]。这是因为景观中有某些点对控制水平生态过程有关键性的作用,抓住这些景观战略点(Strategic points)^[19],将给退化生态系统恢复带来先手、空间联系及高效的优势。在退化生态系统的某些关键地段进行恢复措施有重要意义。在异相景观中,有一些对退化生态系统恢复起关键作用的点,如一个盆地的进出水口,廊道的断裂处^[5,19],一个具有“跳板(Stepping Stone)”作用的残遗斑块,河道网络上的汇合口及河谷与山脊之交接处^[20],在这些关键点上采取恢复措施可以达到事半功倍的效果。位于景观中央的森林斑块比位于其它地段的森林斑块成为鸟类的栖息地^[21]。有研究表明对孤立区域的恢复不如对连接区域恢复所起的作用大^[22,23]。McChesney 在废矿地恢复过程中比较了在恢复地和自然景观中幼苗发生后明确指出了在大尺度基质下选取恢复地点的重要性^[16]。Robinson Handel 讨论了城市中垃圾填埋场的植被恢复,而这种恢复是依赖于周围植被残余斑块的介入成功地恢复的^[38]。Hardt 和 Forman 的观察显示,在露天矿的生态恢复过程中,林缘的凹边部位比其它地段更易被林木所优先占据。

对于退化生态系统恢复是否取得成功,迫切需要从景观生态学角度来评价,对于恢复生态学家们要从景观远景来评价是否恢复了退化生态系统受破坏以前的生态功能^[17]。由于所需要恢复的退化生态系统具

有不同的特性,其描述参数都是不同的。描述斑块恢复是否取得成功的参数很多,但本底不同,其参数是不同的。如对于郊区环境下的斑块恢复的描述参数必然与城市的斑块恢复有所不同。在评价恢复工作是否取得成功时一个很重要的问题是:人为恢复的景观是否代表了未破坏前的景观。

对于大尺度不同的空间动态和不同恢复类型都可利用景观指数如斑块形状、大小和镶嵌等来表示。如果可以将物质流动和动植物种群的发生与不同的景观属性联系起来,那么对景观属性的测定可以使恢复实施者们预见到所要构建的生态系统的反应并且可以提供新的、潜在的更具活力的成功恢复方案。如我国西部地区的各民族人民在长期的生产实践中已创造出很多成功的生态系统恢复模式,黄土高原小流域综合治理的农、草、林立体镶嵌模式,风沙半干旱区的林、草、田体系,牧区基本草场的围栏建设与定居点“小生物圈”恢复模式等,它们共同特点是采取增加景观异质性的办法创造新的景观格局,注意在原有的生态平衡中引进新的负反馈环,改单一经营为多种经营综合发展^[25]。

2.2.2 干扰理论 干扰出现在从个体到景观的所有层次上^[18]。干扰是景观的一种重要的生态过程,它是景观异质性的主要来源之一,能够改变景观格局,同时又受制于景观格局。不同尺度、性质和来源的干扰是景观结构与功能变化的根据。在退化生态系统恢复过程中如果不考虑到干扰的影响就会导致初始恢复计划的失败,浪费大量的人力、物力和财力,却没有达到目的而得到令人失望的结果^[26]。从恢复生态学角度,其目标是寻求重建受干扰景观的模式,所以在恢复和重建受害生态系统的过程中必须重视各种干扰对景观的影响。退化生态系统恢复的投入同其受干扰的程度有关,如草地由于人类过度放牧干扰而退化,如果控制放牧则很快可以恢复,但当草地被野草入侵,且土壤成分已改变时,控制放牧就不能使草地恢复而需要投入的就更多。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,每越过一个阶段恢复的投入就越大,尤其是从灌草丛开始恢复时投入就更大^[27],控制人类活动的方式与强度,补偿和恢复景观生态功能都会影响退化生态系统的恢复。如对土地利用方式的改变,对耕垦、采伐、放牧强度的调节,都将有效地影响到生态系统功能的发挥或恢复。对于退化生态系统恢复过程中可以适当地采取一些干扰措施以加速恢复^[28,29],他们发现对盐沼地增加水淹可以提高动植物利用边缘带,从而加快恢复速率。因此可以通过一定的人为干扰使退化生态系统正向演替来推动退化生态系统的恢复。

2.2.3 尺度 由于景观是处于生态系统之上,大地理区域之下的中间尺度,许多土地利用和自然保护问题只有在景观尺度下才能有效地解决,全球变化的影响及反应在景观尺度上也变得非常重要,因而不同时间和空间的景观生态过程研究十分重要。退化生态系统的恢复可以分尺度研究。在生态系统尺度上揭示生态系统退化发生机理及其防治途径,研究退化生态系统生态过程与环境因子的关系,以及生态过渡带的作用与调控等。区域尺度上研究退化区生态景观格局时空演变与气候变化和人类活动的关系,建立退化区稳定、高效、可持续发展模式等。景观尺度上研究退化生态系统间的相互作用及其耦合机理,揭示其生态安全机制以及退化生态系统演化的动力学机制和稳定性机理等。对于退化生态系统的恢复研究在尺度上可以从土壤内部矿物质的组成扩展到景观水平。并且多种不同尺度上的生态学过程形成景观上的生态学现象。如矿质养分可以在一个景观中流入和流出,或者被风、水及动物从景观的一个生态系统到另一个生态系统的重新分配^[31]。

尺度一致性即在时间和空间上必须同社会、行政和管理中相关的过程保持尺度一致性。随着世界经济的发展,欧洲农业、环境和自然保护问题的国际管理格局的形成,尺度将越来越大,这些不可避免地需要采用相关科学的研究方法。但是到目前为止,大多数科学研究结果均来源于小尺度(小区,小区域)研究,这些小尺度研究结果在某种程度上反映了一定大尺度问题研究,但是其准确程度有多大还不清楚,所以需要研究选择相关尺度的必要性及如何使用可靠的方式把一种尺度的成果推广应用到另一种尺度,但据 O'Neill 等的等级理论^[32],属于某一尺度的系统过程和性质即受约于该尺度。每一尺度都有其约束体系和临界值。外推所获得的结论将很难理解。但 King 认为,不同等级上的生态系统之间存在信息交流,这种信息交流就构成了等级间的联系,而这种联系使尺度上推和下推成为可能。所以利用景观生态学中的模型来完成尺度推绎问题,这其中必须特别重视景观、社会问题和决策过程中的尺度协调。在海岸区盐沼的恢复中

显示了景观原理的尺度的重要性,很多研究都表明评价恢复工作是否取得成功都需要从大尺度来考虑,并且这是很多工作的主要目标^[33]。Broome 得出恢复地周围环境很重要的原因是由于附近沙丘能够通过保留水而改变盐度^[20]。Sacco 等讨论了随着恢复盐沼地的增加,底栖动物种群亦有所增加^[34]。Haven 等亦有报道对不同的恢复盐沼地和受破坏之前的自然盐沼地的动物种群研究后得出研究区动物的分布与小溪流的存在和不同植物的分布密度有关,也与恢复区的大小和形状有关(未调查土壤本底的不同)^[28]。

3 退化生态系统恢复对景观生态学的意义

正如景观生态学方法可以被恢复生态研究所利用和发展一样,退化生态系统的恢复研究对景观生态学的发展也同样有帮助。

现代生态学所面临的两个基本且重要的理论是大尺度生态系统理论和人与自然关系的理论。在现代生态学的发展中,生态学家们越来越注意运用数学语言(数理统计、地统计学、分形几何)和科学技术的应用^[3,6]。大尺度生态学随着应用数学、理论物理学、计算机科学和工程技术领域在生态学领域的应用而繁荣,对大尺度生态学理论的检验,进行人工设计的科学实验是关键性的主要途径^[37]。正是恢复生态学可以为这些理论的校验、更新和发展创造一个独特的机会。恢复生态学为生态学理论的验证提供了一个非常恰当的实验场。恢复生态学作为大尺度实验生态学,它具有充分的自然生态系统背景。由于生态恢复是在生态系统受到破坏的基础上进行的,所以它对导致生态系统破坏的主要和次要因素较为清楚。对在这些因素作用下生态系统退化的全过程较为了解。对人工设计恢复措施有预定的科学依据,对生态系统恢复中的环境、生物参数可以进行经济而且有效的监测和控制。由于它采取人工设计的恢复措施,从而使被破坏生态系统的恢复和重建过程比起天然过程大大加快,同时也使恢复目标有着多种选择的可能性。因此恢复生态学可以在较短时间和恰当的空间尺度上方便地认识自然生态系统变化的内在机制,建立定量说明此机制的生物-环境参数系统和逻辑结构,从而更经济有效地发挥其在建立大尺度生态学理论中的实验室作用。除了实际应用外,恢复生态学的实践是为解决种群、群落和生态系统过程中的理论问题提供机会^[2,35,36]。

Kessler 等指出现在需要越来越多景观尺度的方法来解决一些问题而不是从小样地实验结果来推测大尺度的景观的生态反应^[29]。从研究发展来说需要一些创新的方法来评价大尺度生态过程的变化^[33]。从时间上来说退化生态系统恢复研究可以加速比较慢的自然过程。在恢复过程中,通常植物和动物区系的变化可以在几年中辨明^[24]。而研究景观的变化和景观生态学实验通常都是长期的。于是恢复研究可以使景观变化信息的收集更加方便。恢复研究还可以提供数据以验证景观模型的有效性。如预测干扰扩散模型和抵制病虫害发生模型,如果恢复实践者和景观生态学家们能够设计出解决了尺度问题的斑块镶嵌,那么都可以在恢复研究中验证。

4 结语

无论是景观生态学还是恢复生态学都是相对年轻的学科,很多理论还处于形成期,但可以认为它们之间具有相互联系并且在今后的研究工作中可以进一步来研究。景观生态学和退化生态系统恢复之间存在着相互联系。景观生态学的发展为恢复生态学研究提供了新的理论基础,而恢复生态学为检验景观生态理论和方法提供了场所,而且为其发展不断提出新的目标。

利用恢复实践来验证景观生态理论是相对比较直接和简单的。恢复地可以作为评价很多景观生态学现象的测试系统,恢复区域可以作为景观生态研究的缩微。在景观生态学朝着更数量化和更具有预测力方向的发展过程中,能够通过一些恢复项目和工程来检验和发展其理论。尤其是一些与生态系统功能和生态系统破碎化问题相关的理论。而且能够从景观生态学的概念、理论和技术应用来更好地为退化生态系统恢复服务。

在恢复实践中要考虑景观特征如斑块结构、连通性和景观渗透性,充分了解干扰的程度和性质及退化生态系统恢复所需的条件,了解关键的景观过程及其发生时的影响范围和程度。恢复生态学家们只有通过景观格局的**两方数据**解现状,发现潜在规律,提出最佳景观格局的配置方案,使景观发挥最佳功能,通过对原有景观要素的优化组合或引入新的成分,而且由于景观健康和整合性对于全球生态系统存在具有非

常重要的作用就必须将生态目标和社会目标联系起来广泛考虑退化生态系统恢复,应该控制人类活动的方式与强度,补偿和恢复景观生态功能。如对土地利用方式的改变,对耕垦、采伐、放牧强度的调节,都将有效地影响到生态系统功能的发挥或恢复。尽管缺乏连续观测技术来验证,但研究者们都认识到景观生态的方法对于退化生态系统恢复具有潜在和不容质疑的作用。并且描述环境与景观结构要素的空间关系问题已经引起了很多恢复生态学工作者的关注。

总之,寓景观生态学思想于退化生态系统恢复过程是新的有效途径。

References:

- [1] Jordan William, Gilpin M E & Aber J D. *Restoration Ecology: A Synthetic Approach to Ecological Restoration*. Cambridge: Cambridge University, 1987.
- [2] Naveh Z. From biodiversity to ecodiversity: a landscape-ecology approach to conservation and restoration. *Restoration Ecology*, 1994, **2**: 180~189.
- [3] Fu B J, Cheng L D, Ma K M, et al. *The Theory and Application of Landscape Ecology*. Beijing Science Press, 2001.
- [4] Xiao D N. The theory base and characteristics of landscape ecology. In: Xiao D N ed. *The theory Methodology and Application of Landscape Ecology*. Beijing: Forestry Press of China, 1991.
- [5] Forman R T T, Godron M. *Landscape Ecology*. New York: John Willey and Sons, 1986.
- [6] Wu J G. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [7] Ren H, Peng S L. *Introduction for Restoration Ecology*. Beijing: Science Press, 2001.
- [8] Yu Z Y, Peng S L. *Ecological Studies on Vegetation Rehabilitation of Tropical and Subtropical Degraded Ecosystems*. Guangzhou: Guang dong Science & Technology Press, 1996.
- [9] Ashworth S M. Comparison between restored and reference sedge meadow wetlands in south-central Wisconsin. *Wetlands*, 1997, **17**: 518~527.
- [10] Turner M G. Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1989, **20**: 171~197.
- [11] Corona P. Study outline on ecological methods in afforestation. In: R. G. H. Bunce, L. Ryszkowski, M. G. Paoletti, editors. *Landscape ecology and agroecosystems*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 1993. 169~176.
- [12] Holland M, Risser R G, & Naiman R J. *Ecotones: the role of landscape boundaries in the management and restoration of changing environments*. Chapman and Hall, New York, 1991.
- [13] Gustafson E J, Gardner R H. The effect of landscape heterogeneity on the probability of patch colonization. *Ecology*, 1996, **77**: 94~107.
- [14] Kitzberger-T, Vrblen-T T. Fire-induced changes in northern Patagonian landscapes. *Landscape Ecol.*, 1999, **14** (1): 1~15.
- [15] With K A & Crist T O. Critical thresholds in species responses to landscape structure. *Ecology*, 1995, **76**: 2446~2460.
- [16] McChesney C J, Koch J M and Bell D T. Jarrah forest restoration in western Australia: canopy and topographic effects. *Restoration Ecology*, 1995, **3**: 105~110.
- [17] Brinson M M, Rheinhardt R. The role of reference wetlands in functional assessment and mitigation. *Ecological Applications*, 1996, **6**: 69~76.
- [18] Burke A. Determining Landscape Function and Ecosystem Dynamics: Contribution to Ecological Restoration in the Southern Namib Desert. *Ambio*, 2001, **30**: 30~36.
- [19] Yu K J. Landscape Ecological Security Patterns. *Biological Conservation*, 1999, **19**(1): 8~15.
- [20] Broome S W, Seneca E D, Woodhouse W W Jr. Tidal salt marsh restoration. *Aquatic Botany*, 1988, **32**: 1~22.
- [21] Bunce R G H, Jongman R H G. An introduction to landscape ecology. In: R. G. H. Bunce, L. Ryszkowski, M. G. Paoletti, editors. *Landscape ecology and agroecosystems*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 1993.
- [22] Burrough P A. *Principles of geographic information systems for land resource assessment*. Clarendon Press,

Oxford, United Kingdom,1986.

[23] Cairns J Jr. Is restoration ecology practical? *Restoration Ecology*,1993, **1**:3~7.

[24] Fonseca M S, Meyer D L, Hall M O. Development of planted seagrass beds in Tampa Bay, Florida, USA. II. Faunal components. *Marine Ecology Progress Series*,1996, **132**:141~156.

[25] Zhang J E, Xu Q. Basic Content And Structure of Ecological Degradation Bulletin of Soil and Water Conservation.

[26] Peng S L. *Dynamics of Forest Communities in the South Subtropical Region*. Beijing: Science Press, 1996.

[27] Zedler J B. Replacing endangered species habitat: the acid test of wetland ecology. In: P. Fiedler and P. Kareiva, editors. *Conservation Biology*. Chapman & Hall, New York, NY,1998. 364~380.

[28] Haven K J, Varnell L M, Bradshaw J G. An assessment of ecological conditions in a constructed tidal marsh and two natural reference tidal marshes in coastal Virginia. *Ecological Engineering*, 1995,**4**:117~141.

[29] Kessler W H, Salwasser C W, Cartwright J R, *et al*. New perspectives for sustainable natural resource management. *Ecological Applications*,1992, **2**:221~225.

[30] Zhao W Z, Cheng G D. Mycorrhizas And Its Application In Desertification Land Restoration *Chinese Journal of Applied Ecology*,2001, **12**(6): 947~950.

[31] Langis R, Zalejko M and Zedler J. Nitrogen assessments in a constructed and a natural salt marsh of San Diego Bay, California. *Ecological Applications*,1991, **1**:40~51.

[32] O'Neill R V, *et al*. A hierarchical neutral model for landscape analysis. *Landscape Ecology*,1992,**7**(1):55~62.

[33] Rastetter E B, King A W, Cosby B J, *et al*. Aggregating fine-scale ecological knowledge to model coarser-scale attributes of ecosystems. *Ecological Applications*,1992, **2**:55~70.

[34] Sacco J N, Seneca E D, Wentworth T R. Infaunal community development of artificially established salt marshes in North Carolina. *Estuaries*,1994, **17**:489~500.

[35] Zhang J E, Xu Q. Basic Major Issues in Restoration Ecology Researches. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(1):109~112.

[36] Turner M G, Gardner R H. *Quantitative methods in Landscape Ecology*. Springer-Verlag,1991.

[37] Xiao D N, Bu R C, Li X Z. Spatial Ecology And Landscape Heterogeneity. *Acta Ecologica Sinica*, 1997,**17**(5): 453~461.

[38] Robinson G R, & Handel S N. Forest restoration on a closed landfill: rapid addition of new species by bird dispersal. *Conservation Biology*, 1991,**7**:271~278.

参考文献:

[3] 傅伯杰,陈利顶,马克明,等. 景观生态学原理及应用. 北京:科学出版社,2001.

[6] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京:高等教育出版社,2000.

[7] 任海,彭少麟. 恢复生态学导论. 北京:科学出版社,2001.

[8] 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.

[19] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. 生态学报,1999,**19**(1):8~15.

[25] 章家恩,徐琪. 生态退化研究的基本内容与框架. 水土保持通报,1997,**17**(6):46~53.

[26] 彭少麟. 南亚热带森林群落动态学. 北京:科学出版社,1996.

[30] 赵文智,程国栋. 菌根及其在荒漠化土地恢复中的应用. 应用生态学报,2002,**12**(6):947~950.

[35] 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.

[37] 肖笃宁,布仁仓,李秀珍. 生态空间理论与景观异质性. 生态学报,1999,**17**(5):453~461.