

湖滨湿地生态系统稳定性评价

王玲玲, 曾光明, 黄国和, 苏小康, 徐 敏

(湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082)

摘要: 根据生态系统稳定性的产生原因, 将稳定性划分为系统整体稳定性和系统结构稳定性。从系统的稳定性出发, 以生态系统的整体稳定性和结构稳定性两个方面为对象, 对湖滨湿地生态恢复所产生的生态效益进行了研究。针对系统整体稳定性, 给出了生物多样性指数、自然保护区比重和自然灾害等级 3 个评价指标, 并介绍了相应的指标量化方法。与此同时结合能值理论, 准确地分析了湖滨湿地生态系统的结构稳定性, 为评价湖滨湿地生态恢复的生态效益评价提供了客观的标尺。

关键词: 湖滨湿地; 生态恢复; 生态效益; 系统稳定性

文章编号: 1000-0933(2005)12-3406-05 中图分类号: X171.4 文献标识码: A

Analysis of ecological benefit of ecological restoration of aquatic-terrestrial everglade from stability of ecological system

WANG Ling-Ling, ZENG Guang-Ming, HUANG Guo-He, SU Xiao-Kang, XU Min (College of Environmental Science & Engineering, Hunan University, Changsha, 410082, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3406~ 3410

Abstract According to the physical basis of the stability, the stability of ecosystem is divided into the integrity stability and the stability of system structure. The integrity stability describes the ability of a system to resist the environmental disturb, while the stability of system structure shows the ability of the system to counteract the interior disturb. From the view point of stability of ecosystem, the ecological benefit of ecological restoration for the aquatic-terrestrial wetland is investigated. For the first time, biodiversity index, proportion of area for nature reserves, and the rate of disasters are given as assessment indexes, meanwhile, the method to quantify these indexes is given in this paper. The stability of system structure for the aquatic-terrestrial wetland ecosystem is evaluated by energy theory in a relatively exact method. Thus, it can be used as a useful method to assess the ecological benefit for the ecological restoration of aquatic-terrestrial wetland.

Key words: aquatic-terrestrial wetland; ecological restoration; ecological benefit; system stability

湿地与森林、海洋并列为全球三大生态类型, 它是水陆相互作用形成的独特生态系统^[1], 具有季节或常年积水、生长或栖息喜湿动植物等基本特征, 是自然界最富生物多样性的生态景观和人类最重要的生存环境之一^[2]。湖滨湿地在涵养水源、蓄洪防旱、促淤造地、维持生物多样性^[3]和生态平衡以及生态旅游、缓解污染^[4]等方面均有十分重要的作用, 是湖泊天然的保护屏障, 是健康的湖泊生态系统重要的组成部分。我国是一个多湖泊国家, 早期对湖泊脆弱性认识的不足, 促使人们大面积的围湖造田、破坏植被等, 不仅使得湖内生态平衡遭到破坏, 水质不断下降, 同时使其周边生态系统也受到了极大的破坏。鉴于湖滨湿地生态系统所遭破坏的严重性, 从生态系统可持续发展的角度出发, 在对其进行保护的同时, 应对已受损害的湖滨湿地生态系统给予足够的重视^[5], 加强湖滨湿地生态系统的恢复与重建。

随着各种国际公约和国内保护条例的颁布^[6], 湖滨湿地越来越受到人们重视, 各种有效措施得到了有力推广, 进一步保护

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50225926, 5042592); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20020532017); 2000 年教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目; 国家 863 高技术资助项目(2001AA 644020, 2003AA 644010)

收稿日期: 2005-01-20; 修订日期: 2005-10-28

作者简介: 王玲玲(1979~), 女, 河南项城人, 博士生, 主要从事生态系统的复杂性研究。E-mail: W - lings@163.com

Foundation item: National Nature Foundation for Distinguished Young Scholars (No. 50225926, 5042592); the Doctoral Foundation of Ministry of Education of China (No. 20020532017); Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Teacher in High Education Institution of MOE China (TRAPOYT); National 863 High-Tech Research Program of China (No. 2004AA 649370)

Received date: 2005-01-20; **Accepted date:** 2005-10-28

Biography: WANG Ling-Ling, Ph. D. candidate, mainly engaged in complexity of ecosystem. E-mail: W - lings@163.com

了湖滨湿地及其周边的生态环境。然而,在国内外众多的研究成果中,却很少有涉及湖滨湿地生态恢复效益评估方面的科学研究,使之成为整个生态环境保护工作中的薄弱环节。从发展的角度看,湖滨湿地生态系统恢复效益由社会效益、经济效益和生态效益组成,其中生态效益是湖滨生态系统恢复效益的重要组成部分,而生态系统的稳定性正是衡量生态效益的一个客观尺度^[7]。本文从生态平衡的角度出发,由生态系统的稳定性着手,探讨湖滨湿地生态系统恢复的生态效益,同时给出了湖滨湿地生态系统的稳定性评价体系。

1 生态系统的稳定性

系统稳定性的概念来自于系统控制论,由于内涵和外延的不同,稳定性的概念可谓是仁者见仁、智者见智,具体的包括恒定性、持久性、惯性、弹性、恢复性、局部稳定性、全局稳定性等等^[8]。针对生态系统稳定性的产生机制,国内外众多专家提出了不同的观点。以模型研究为起点的复杂性理论派,认为生态系统的稳定性与其自身的物种多样性有着或多或少的联系^[9,10,11];同时,一些学者以自动控制系统可靠性为基础提出了冗余理论,经过大量的研究得出结论——自然界大到一个生态系统,小到植物的某个器官的稳定性都与相应水平的冗余密切相关^[12]。

国内外对生态系统稳定性的理解可以归纳为两个方面:一方面生态系统因受外界干扰而产生的持久性和抵抗性;另一方面生态系统受到内部扰动后,回归到原始状态的能力,即恢复性。根据两种稳定性产生机理的不同,具体的评价方法也不尽相同,为了得到科学的评价结果,建议将两种稳定性分开讨论。作为第1类稳定性(因受外界干扰而产生),姑且将之称为系统整体稳定性;相应的,由于内部扰动产生的第2类稳定性可以被定义为系统结构稳定性。两种稳定性是系统稳定的两个方面,二者之间此消彼长。因此在具体的生态恢复的生态效益评价时,要根据需要确定二者的评价指标和相应的权重。

2 湖滨湿地生态恢复

2.1 湿地恢复与重建的必要性及其对湖滨生态系统的影响

湿地是地球上水陆互相作用形成的独特的生态系统。人类社会在长期的改造世界的过程中,和湿地之间的相互作用越来越紧密,湿地已经逐渐成为区域经济发展的重要动力源之一。过去人们对湖滨湿地的开发和利用多集中在排水和围垦上,通过沼泽排水发展农业、畜牧业,围湖造田、造地以期发展农业与建筑业,深挖库塘灌水来发展养殖业^[14]等。这些缺乏环境意识的人为活动给湿地周边环境造成恶劣的影响,它不仅使湖内的水质及水生生态系统受到了严重污染和损害,而且对整个湖滨生态系统造成了极大的破坏。

生态恢复(Restoration)和生态重建(Reconstruction)是根据生态学原理,通过一定的生物、生态以及工程的手段和方法,人为的改变和切断生态系统的主导因子或过程,调整、配置和优化系统内部及其与外界的物质、能量和信息的流动过程及其时空秩序,使生态系统的结构、功能和生态学潜力尽快成功地恢复到一定的或原有的乃至更高的水平。可以确切的说,生态恢复和生态重建是对生态系统的一个修复、管理和改善的过程,是人们对原来破坏性行为的不可缺少的补救措施之一。

生态恢复和重建工作对于整个湖滨生态系统来说产生巨大的影响。这种影响主要表现为以下几个方面^[15]。首先削弱或减少剧烈的水土流失,防止湖滨区域内大量表层肥沃的土地受到冲刷,保护湖滨土地的肥力,提高周边土地的生产潜力。其次,起到对湖滨生态系统的自身保护作用,恢复岸边植被直接保护了该地区的生物多样性,减少流域内人为因素或自然因素对种群数量或种群结构的影响,同时退田还湖、控制围垦等一系列的措施的实施进一步为濒临于灭绝的动植物提供了适宜的生长和栖息的环境。Thom等通过实验发现,与生态恢复前相比,经过恢复的滨海湿地的浮游生物的数量和种类都有了明显的增长^[16]。第三,湖滨湿地生态系统的重建和恢复有效提高了湿地的蓄洪能力,减少湖滨周边地区旱涝灾害出现的频率,增强整个生态系统的抗灾能力。比如对于长江洪水,仅靠加固干堤、束洪归槽,只会出现“堤高水更涨”的恶性循环,因此,根治长江水患的重要措施之一就是增加中游的调蓄能力,在江汉平原湖区大规模的实施“退田还湖”、“清淤还湖”等措施^[17]。第四,由于水土流失影响力的削弱,同时对湖滨生态系统的保护措施的实施,生态恢复使区域生态环境朝着有利方面发展,湖滨生态系统出现良性循环,这种良性循环保证了湖泊内物质和能量的输出和输入平衡,减少了进入湖区主河道的淤积^[18],提高了整个水系的环境质量。

2.2 湖滨湿地生态恢复与生态系统稳定性之间的关系

湖滨湿地是个动态的生态系统,与周边环境不断地进行物质、能量和信息的交流,是从一个群落经过一系列的演变成为一个新的群落,历经很多短暂性的稳定和变换,直到相对稳定。受到人为因素和自然因素影响的湿地生态系统的这种自我恢复力和抵抗力明显下降,物质、能量和信息的健康循环被破坏。实践证明,对湖滨湿地采取必要的恢复和重建,有力地维护和支持了整个生态系统的稳定性。

湖滨湿地生态恢复与重建保护了生物的多样性。湿地独特的生态环境,为多种植物群落提供了适宜的居住之所,被誉为湖滨生态系统天然的基因库。我国湿生植物2760余种,湿生药用植物250余种,很多脊椎动物也常居于此,这里是多种水禽和野生动物的栖息地^[18]。据统计资料显示,仅地处湖南省北部的洞庭湖湿地系统,维管束植物共计170科637属1428种,虾蟹动物5科7种,贝类动物9科48种,两栖类动物6科12种,鱼类多及12目23科114种等等^[2]。生态恢复和重建就是利用各种人工

手段,使已经受到破坏的生态系统从远离初始状态的方向回到干扰开发前或者破坏前的初始状态。它一方面降低了人为因素对生态系统的不良影响,另一方面提高了生态系统抵御自然灾害的能力,缓解了外部环境变化对系统内的各种水生、陆生或两栖动植物的作用强度,有利于稀有物种的繁衍,保护了湖滨湿地系统的生物多样性,提高了湖滨生态系统的稳定性。

湖滨湿地的恢复和重建保护了生态系统中的潜在资源。湿地生态系统是许多粮食植物的重要生境,其中的一部分可以开辟为耕地、林地或者是牧场。湖滨湿地的恢复和重建就是通过合理的人工规划,利用适当的生态工程技术,将湿地的开发和保护并行,适度科学的开发湖滨湿地,使之在成为湖滨地区的缓冲带的同时,创造出巨大的物质财富。因为污染或不恰当的资源开发,太湖西部湖岸湿地遭到了严重的破坏,通过清理整顿、退耕还湖和生态修复,在治理外源污染的同时,加强对湿地自身的保护和修复,消除了蓝藻水华,促进了旅游业和渔业的健康发展,促进了太湖周边地区经济的发展,为各种维护生态平衡、维持生态系统稳定性的措施的进一步实施提供了坚实的物质基础。

湖滨湿地生态系统的恢复和重建提高了湿地系统的净化能力。作为自然界的“肾脏”,湖滨湿地具有重要的净化水源的功能。受到一定破坏的湖滨湿地系统的植被覆盖率较低,湿地植物或微生物对氮的聚积和沉积作用降低,同时水生植物对水体中营养及有毒物质的吸收和吸附作用削弱,结果水体富营养化,湖水变黑变臭,使整个湖泊水系水质下降,容易导致更大范围的生态破坏,整个湖泊流域生态系统的稳定性遭到破坏。利用水生植被恢复技术、截污工程技术等一系列湖滨湿地修复重建的生态工程技术能够有效地防止上述情况的发生。

3 湖滨湿地生态系统稳定性评价

在湖滨湿地生态系统内,要找出评价湖滨湿地恢复效益的具体指标,全面而准确的反映湖滨湿地生态恢复的生态效益是比较困难的。因为湖滨湿地生态系统恢复是一个涉及自然、社会与经济的改造过程,同时湖滨湿地系统又是一个比较复杂的生态系统,而且不同的纬度地区之间环境因素千差万别,所以应从具体的方面深入地研究湖滨湿地生态系统恢复的生态效益。稳定性是生态系统最重要的性质之一,是衡量生态系统健康状态的一个重要指标。系统如果不稳定,就会产生自发的灾害,因而会给人类带来巨大的灾难^[19]。因此,从生态系统的稳定性角度出发来研究湖滨湿地生态恢复的生态效益是一种切实可行的方法。

3.1 系统整体稳定性

湖滨湿地生态系统的稳定性与常规的环境质量评价不同,因为有很多因子无法直接测量,所涉及到的不确定性因素众多,因此对于这类问题建议采用不确定性聚类分析的方法进行评价。

3.1.1 评价指标的选择 湖滨湿地的系统稳定程度可以从多方面进行说明,结合湖滨湿地生态系统建设的需要,可以从湿地重建和恢复后生物的多样性程度、自然保护区所占的比重以及自然灾害的等级 3 方面出发,对湖滨湿地生态恢复的生态效益进行评价。

关于生物多样性和生态系统的稳定性之间的关系,从 20 世纪 70 年代以来,一直是很多知名的生物学家争论不休的话题之一,认识分歧的结果就在学术界产生两大阵营。以 Elton 和 Odum^[20,21]为代表的早期生物学家通过经验观察得出生物多样性会提高生态系统的稳定性;而借助理论模型进行研究的 Garder, A sbby 和 M ay^[22,23]则提出相反的结论,他们认为生物的多样性将会降低系统的稳定性。这两种争论产生的原因,笔者认为主要是对于稳定性概念的混淆导致。从系统整体稳定性来看,一个复杂系统相对于外界扰动来说,其稳定性要强于同样条件下的相对简单的系统,在农业生产中这个理论早已就得到广泛应用,多种作物混交种植及采取多样性的种植方式是防治害虫爆发和提高土地生产力的重要举措^[24,25]。目前国内外多用生物多样性指数来定量评价生物多样性。作为评价多样性的工具,生物多样性指数要注重客观地反映群落内各种群在个体数量上的绝对差异,从而尽可能地客观地反映生物多样性的现状。针对目前使用的大多数物种多样性计算公式中的缺陷,王寿兵^[26]对 Shannon-W iener 指数进行修正,并且通过验证得到了比较满意的结果。

$$D = - \log N \sum_{i=1}^s (P_i \times \log P_i) \quad (1)$$

式中, D 为生态系统多样性指数; N 为种群数; P 为所有种群的个体数; P_i 为种群 i 的个体占总种群的个体的比例。

自然保护区所占比重即自然保护区所占的国土面积与湖滨湿地的总面积的比值。建立各种湿地类型的自然保护区是保护湿地生态系统和湿地资源最为有效的措施之一,同时也是湖滨湿地生态恢复与重建工作中的重要组成。我国已经建成的太湖湿地自然保护区和湖南省东洞庭湖自然保护区在保护生物多样性、防洪抗灾方面发挥了巨大的作用,进一步有效的维护了其湖滨生态系统的稳定性。自然保护区所占比重因此成为评价生态系统稳定性的指标之一。

从稳定系统的抗扰能力出发,将湿地生态恢复与重建后出现自然灾害的等级作为衡量湖滨湿地生态系统稳定的评价指标,因为在确定灾害等级的工作牵涉到很多不确定因素,笔者建议选取属性指标和经济损失量指标。其中属性指标涉及死亡人数、重伤人数、损失持续时间及其它指标,而经济损失指标从财产损失、救灾费用和效益损失 3 个方面来反映^[27],具体因子的定量采取灰色聚类的方法。

3.2 系统结构稳定性

系统的结构稳定性是从生态系统物种之间的作用强度入手,以物种之间的能量流作为研究对象,研究过程涉及能值理论与方法。能值理论是美国著名生态学家 Odum 创立的,随着研究的不断深入和实践的需要,能值理论已经越来越成熟,其研究也已经逐步深入到生态系统稳定性方面的研究。Odum 利用能量转化率的理论探讨生物系统的能量等级与稳定性, Bastianoni 和 Marchettini^[28] 将 energy 与 exergy 之间的转化率当作衡量系统复杂性、内部热动力效率和环境稳定性的总尺度,蔡博峰^[29] 将能值理论在生态系统的稳定性方面又向前推进了一步,提出用系统内能值转化率的数学平均值来表征系统的第 2 类稳定性。综合以上的各种研究成果,结合能值理论,定量的计算能值的大小和系统内能值转化率,可以客观、科学地对湖滨湿地生态系统的结构稳定性进行评价。

3.2.1 能值分析理论 能值分析理论就是将能值为统一度量标准,将系统内各种生态流转化为能值来计算。地球上能量(包括生态系统的能量)都直接或间接的来自于太阳能,所以实际应用是以利用的太阳能作为标尺,即是将系统中的任何资料、产品在其形成过程中直接或间接利用的太阳能质量作为其太阳能值(solar energy),单位为太阳能焦耳(solar energy joules, 即 sej)^[30]。将太阳能值引入到生态系统的结构稳定性,解决了生态界长期以来关于生态系统内不同性质、不同类型能量之间统一衡量标准的难题。能值转化率在考虑能量大小的同时,而且考虑了能值的好坏,在衡量湖滨湿地经过生态恢复达到系统结构稳定性的程度时的作用是不言而喻的。作为一种数学比值,能值转化率反映形成单位某种能量所需的太阳能之量,它是衡量某种能量能值的尺度,一种能量的能值转化率越高,其在能量系统中的等级层次就越高,相应的一个系统的能值转化率越高,其系统的结构稳定性就越强。

3.2.2 能值分析湖滨湿地生态系统结构稳定性的步骤 作为衡量湖滨湿地生态恢复与重建工作成败的尺度之一,能值分析的步骤可以分为 5 步:(1) 收集各种数据资料,并对其进行整理分类,用于评定的原始数据主要来自于实地调查和近年的考察资料;(2) 绘制湿地能量系统图解,以期对湿地生态系统有一个整体的认识;(3) 编制能值系统评价表,列出湿地系统的主要能源;(4) 查取资料获得各种资源相应的能值转化率,求出各种能值转化率的数学平均值,得到生态系统的结构稳定性指数。

4 结论

湖滨湿地生态恢复与重建在维护全球生态平衡方面有深远的意义,能够为整个湖滨生态系统创造不可忽视的生态效益。本文从生态系统的整体稳定性和结构稳定性出发,以生物多样性指数、自然保护区比重和自然灾害等级作为整体稳定性评价指标,将能值分析方法作为系统的结构稳定性度量方法,通过构筑合理的评价体系(见图 1),可以对湖滨湿地生态恢复做出客观、科学的评价。与此同时,在湖滨湿地的生态系统稳定性评价方面目前还存在着一些问题,如系统中各种物种的能值转化率的确定、不同的地区之间是否采用统一标准,如果采取不同标准,这些区域又将如何区分等等,虽然湖滨湿地生态系统稳定性评价体系为我们解决环境问题提供了新的概念框架和研究手段,但这些问题尚有待进一步研究。

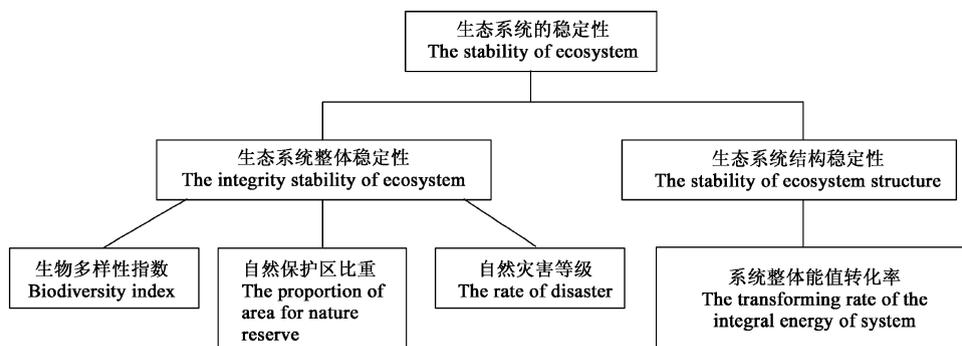


图 1 评价体系

Fig 1 The system of estimate

References

- [1] Liu Q S. *Ecological Protection*. Beijing: China Environmental Science Press, 2003. 134~ 146
- [2] Liu Q S, Li Y F. *Wetland and Wetland Protection*. Beijing: China Environmental Science Press, 2003.
- [3] Well M J and Turpin T. Creating a wetland using rainwater as mitigation for loss of waterfowl habitat. *Water and Environment Management*, 1999, 13(3): 157~ 163.
- [4] George M Huddleston, W Barry Gillespie, John H Rodgers. Using constructed wetlands to treat biochemical oxygen demand and

- ammonia associated with a refinery effluent *Ecotoxicology and Environment Safety*, 2000, **45**(2): 188~ 193.
- [5] Paula Selby. From cropland to wetland to classroom. *Land and Water*, 2002, **44**(5): 55~ 57.
- [6] David Pearson. From wasteland to wetland *Ecodesign*, 2000, **8**(2): 12~ 14.
- [7] Ren H, Wu J G, Peng S L. Evaluation and monitoring of ecosystem health. *Tropical Geography*, 2000, **20**(4): 310~ 316.
- [8] Liu Z W. History and status of research of ecosystem stability. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, **16**(2): 58~ 61.
- [9] Tilman D. Causes, consequences and ethics of biodiversity. *Nature*, 2000, **405**: 208~ 211.
- [10] MacNaughton S J. Stability and diversity of ecological communities. *Nature*, 1978, **274**: 251~ 253.
- [11] May R M. Will a large complex system be stable. *Nature*, 1972, **238**: 413~ 414.
- [12] Solbrig O T. Biodiversity: scientific issues and collaborative research proposal *MAB Digest 9. Pairs: UNESCO*, 1991. 39~ 49.
- [13] Cui B S, Liu X T. Review of wetland restoration studies. *Advance in Earth Science*, 1999, **14**(4): 358~ 364.
- [14] Paula Selby. From cropland to wetland to classroom. *Land and Water*, 2002, **44**(5): 55~ 57.
- [15] Christina S, Bush Thom, Megan K G, et al. Evaluation of nekton use and habitat characteristics of restored Louisiana marsh. *Ecological Engineering*, 2004, **23**: 63~ 75.
- [16] Wang X L. Evaluation on vulnerability of wetland and ecological rehabilitation of Jiangnan Plain. *Journal of Central China Normal University (Nat Sci)*, 2001, **35**(2): 237~ 240.
- [17] Hong-Yuan Lee, Shang-Shu Shih. Impacts of vegetation changes on the hydraulic and sediment transport characteristics in Guandu mangrove wetland. *Ecological Engineering*, 2004, **23**: 85~ 94.
- [18] Cai X M. Ecosystem and Ecology. Beijing: Science Press, 2002. 277~ 283.
- [19] Ma F Y. Research advance on ecosystem stability. *Journal of Desert Research*, 2002, **22**(4): 401~ 407.
- [20] Elton C S. *The ecology of invasion by animals and plants*. London: Chapman & Hall, 1977.
- [21] Odum E P. *Fundamentals of ecology*. Philadelphia: Saunders, 1971.
- [22] Gardner M R, Ashby W R. Connectance of large dynamic (cybernetic) system: critical value for stability. *Nature*, 1970, **228**: 784.
- [23] May R M. Will a large complex system be stable. *Nature*, 1972, **238**: 413~ 414.
- [24] Wang G H. Further Thoughts on diversity and stability in ecosystem. *Biodiversity Science*, 2002, **10**(1): 126~ 134.
- [25] Yue T X. Studies and questions of biological diversity. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(3): 462~ 467.
- [26] Wang S B. A question on the traditional biodiversity index. *Journal of Fudan University (Nature Science)*, 2003, **42**(6): 867~ 867, 874.
- [27] Feng L H, Zhao H X, Qu Y T. Comprehensive evaluation of disaster grade. *Journal of Catastrophology*, 2002, **17**(4): 16~ 20.
- [28] Simone Bastianoni, Nadia Marchettini. Energy/Exergy ratio as a measure of level of organization of system. *Ecological Modelling*, 1997, **99**: 33~ 40.
- [29] Cai B F, Qin D T. Application of energy theory in research of ecosystem stability. *Environmental Science*, 2004, **25**(5): 10~ 14.
- [30] Lan S F, Yu X H. *Energy and energy ecology—academic method and practice*. Jilin: Jilin Science and Technology Press, 1993. 100~ 104.

参考文献:

- [1] 刘青松. 生态保护. 北京: 中国环境科学出版社, 2003. 134~ 146.
- [2] 刘青松, 李扬帆. 湿地与湿地保护. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [7] 任海, 邬建国, 彭少麟. 生态系统健康的评估. 热带地理, 2000, **20**(4): 310~ 316.
- [8] 刘增文, 李雅素. 生态系统稳定性研究的历史与现状. 生态学杂志, 1998, **16**(2): 58~ 61.
- [13] 崔保山, 刘兴土. 湿地恢复研究综述. 地球科学进展, 1998, **14**(4): 358~ 364.
- [16] 王学雷. 江汉平原湿地生态脆弱性评估与生态恢复. 华中师范大学学报, 2001, **35**(2): 237~ 240.
- [18] 蔡晓明. 生态系统生态学. 北京: 科学出版社, 2002. 277~ 283.
- [19] 马风云. 生态系统稳定性若干问题研究评述. 中国沙漠, 2002, **22**(4): 401~ 407.
- [24] 王国宏. 再论生物多样性与生态系统的稳定性. 生物多样性, 2002, **10**(1): 126~ 134.
- [25] 岳天祥. 生物多样性研究及其问题. 生态学报, 2001, **21**(3): 462~ 467.
- [26] 王寿兵. 对传统生物多样性指数的质疑. 复旦学报(自然科学版), 2003, **42**(6): 867~ 868, 874.
- [27] 冯利华, 赵浩兴, 瞿有甜. 灾害等级的综合评价. 灾害学, 2002, **17**(4): 16~ 20.
- [29] 蔡博峰, 秦大唐. 能值理论在生态系统稳定性研究中的应用. 环境科学, 2004, **25**(5): 10~ 14.
- [30] 蓝盛芳, 俞新华. 能量与能值生态学——理论方法与实践. 吉林: 吉林科技出版社, 1993. 100~ 104.