

# 生态系统健康影响因子及评价方法初探

范荣亮<sup>1</sup>, 苏维词<sup>2,3</sup>, 张志娟<sup>4</sup>

(1. 贵州大学资源与环境学院, 贵阳 550003; 2. 贵州科学院山地资源研究所, 贵阳 550001;

3. 重庆师范大学地理学院, 重庆 400047; 4. 贵州大学化学工程学院, 贵阳 550003)

**摘 要:** 阐述了生态系统健康的概念、内涵及其影响因子, 从生态学层次(包括生态系统水平、群落水平、种群及个体水平)、物理化学层次(包括水质、大气质量状况、土壤物理化学性质等)、人类健康与社会经济发展层次(包括社会稳定性、收入指数、人口增长率等)等三大方面构建了生态系统健康评价的指标体系。具体的介绍了生态系统健康的活力、组织结构、恢复力的评价方法和计量模型, 最后提出了生态系统健康评价所急需解决的问题和建议。

**关键词:** 生态系统健康; 指标体系; 评价方法

**中图分类号:** X171.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2006)06-0082-05

## A Preliminary Discussion on the Influence Factor and the Assessment Method of the Ecosystem Health

FAN Rong-liang<sup>1</sup>, SU Wei-ci<sup>2,3</sup>, ZHANG Zhi-juan<sup>4</sup>

(1. Resources and Environment College of Guizhou University, Guiyang 550003, China;

2. Research Institute of Mountain Resources, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China;

3. Geography College of Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

4. College of Chemistry Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

**Abstract:** The definition, connotation and the influence factor of the ecosystem health are expatiated, the indicator system is shaped through the following three facets: ecological hierarchy (including levels of the ecosystem, levels of community and levels of population and individual), physico-chemical hierarchy (water quality, atmospheric condition, the physico-chemical property of soil, etc.), health of mankind and the stage of the social economic development hierarchy (stability of the society, income index, growth rate of the population). The assessment methods are recommended particular through the discussion of vigor, construction and resilience of the ecosystem health, finally, some problem and proposals which should be settled are offered.

**Key words:** ecosystem health; index system; assessment method

生态系统是人类社会发展的根基, 它为人类社会提供了一系列不可或缺的服务, 包括自然资源和生存环境两个方面的多种服务功能<sup>[1]</sup>, 不仅维持了地球的生命支持系统, 生命物质的生物地球化学循环与水循环, 生物物种与遗传多样性, 而且还能净化环境, 维持大气化学的平衡与稳定等。除此之外, 它还包括各类生态系统为人类提供所需的食物、医药及其他工农业生产原料<sup>[2]</sup>。因此, 生态系统的健康是人类生存与现代文明的基础。但是人类活动已经威胁到生态系统的健康。特别是近些年, 由于社会经济的发展以及人们对物质生活水平要求的不断提高, 人类正以前所未有的速度和规模, 超出环境本身最大承载量的、大面积、高强度的影响环境, 破坏和改变自然生态系统, 导致生态系统的健康受到越来越严重的损害, 因而其已成为政府和学术界关注的一个热点问题, 很多人都进行了这方面的研究<sup>[1~10]</sup>。

### 1 生态系统健康的概念

生态系统健康作为一个概念, 最早可以追溯到 20 世纪 40 年代 Aldo Leopold 提出的“土地健康”定义, 认为健康的土地是指被人类占领而没有使其功能受到破坏的状况<sup>[10]</sup>。Rapport 在 20 世纪 70 年代末提出了“生态系统医学(ecosystem medicine)”的概念<sup>[11]</sup>, 认为健康的生态系统是指生态系统稳定且可持续发展、没有病痛反映, 随着时间的推移具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<sup>[12~14]</sup>。Constanza 认为如果一个生态系统稳定而且可持续, 具有活力, 能维持其组织且保持自我运作的能力, 对外界压力有一定弹性, 那么这个生态系统就是健康的<sup>[15]</sup>。Karr 等认为, 如果一个生态系统的潜能能够得到实现, 条件稳定, 当这个生态系统受干扰时具有自我修复的能力, 这样的生态

\* 收稿日期: 2005-11-17

基金项目: 国家科技攻关计划(2003BA901A12); 国家自然科学基金(40261002, 40561006); 贵州省优秀青年科技人才培养计划[黔科人合(2005)0513]; 贵州省攻关计划(黔科合 2003N YG029); 贵州省省长基金[黔省专合 2005(55)]; 贵州省自然科学基金[黔基合(2004)059、2005(2078)]部分内容

作者简介: 范荣亮(1980-), 男, 江苏省徐州人, 硕士研究生, 贵州大学资源与环境工程学院, 环境工程专业。

系统就是健康的<sup>[16]</sup>。国际生态系统健康学会将生态系统健康学定义为研究生态系统管理的、预防性的、诊断性的和预兆的特征,以及生态系统健康与人类健康之间关系的一门科学<sup>[8]</sup>。其主要任务是研究生态系统健康的评价方法、生态系统健康与人类健康的关系、环境变化与人类健康的关系以及各种尺度生态系统健康的管理方法<sup>[9]</sup>。显见生态系统健康是一个很复杂的概念,不仅包括生态系统生理方面的要素,而且还包括复杂的人类价值及生物的、物理的、伦理的、艺术的、哲学的和经济学的观点<sup>[3~7]</sup>。

笔者认为,生态系统健康是指生态系统内部各部分功能及运转没有受到损害,关键部分保留下来(如野生动物、土壤和微生物区系),系统对来自于外部或自然长期干扰效应具有抵抗力和恢复力。系统不仅具有自我运作能力,而且能够维持自身的组织结构优化和稳定,并且具有满足人类。

2 生态系统健康的影响因子及表现形式

正常需求的生态服务功能。

2.1 影响因子

生态系统健康的影响因子很多,既有自然因子,更有人为因素的影响。

2.1.1 人为因素

(1) 过渡开发利用。指人类对陆地、水体生态系统的过渡要求与收获,其后果是物种的消失、生态系统结构的失调、功能的减弱甚至消失。如过度捕捞,造成种群数量减少,破坏了生态系统原有的结构,致使其功能发生变化<sup>[17]</sup>。

(2) 物理重建。为了某种目的而改变生态系统结构和功能,可能会导致生物多样性的减少,水质下降,有毒物质增加,从而影响生态系统健康<sup>[18]</sup>。如围湖造田,一方面缩小了湖泊面积,导致湿润生境丧失,引起水生植物的局域灭绝和干旱植物的入侵;另一方面截断了湖群之间的物质、能量和物种交流,破坏了水域生态系统的完整性,严重威胁了水域生态系统的生存与可持续发展,对生态系统健康的影响是毁灭性的<sup>[19]</sup>。

(3) 外来物种的侵入。外来物种的进入,引起乡土物种的消失或生态系统水平的退化。外来种入侵后,通过竞争、捕食和改变生境,使得原有的生态系统结构和功能破坏。如,松材线虫原产北美洲,1982 年首先在南京中山陵被发现,以后相继在江苏、安徽、广东、浙江和香港成灾,它几乎毁灭了香港广泛分布的马尾松林;在上海郊区,北美一枝黄花往往形成单一优势群落,致使其它植物难以生长等。

(4) 环境污染加剧。水体污染、大气污染、土壤污染都会对生态系统健康构成危害。如贵州喀斯特地区的植被大多具有嗜钙性,但喀斯特地区的酸雨危害却十分严重。据《2004 年贵州省环境状况公报》报道,贵州全省 9 个中心城市年均降水 pH 值范围在 4.45(遵义市)~7.54(六盘水市)之间,有 6 个城市不同程度地出现酸雨,占统计城市数的 66.7%。酸雨的频繁出现,严重影响了喀斯特地区嗜钙植被生态系统的组分、结构,影响植被生态系统功能。其它污染如点源污染,现代工业废水废料中大多含有有毒有害物质和过量的养分,他们对生态系统可以产生不同程度的影响;面源污染,农药和化肥的广泛使用,致使地表径流含有多种污染物和过量养分,经常引起水体污染和富营养化,使水生态系统的结构和功能发生改变<sup>[20]</sup>。

(5) 水土流失。水土流失所产生的泥沙会影响到水体的物理性质。如浊度、透明度及水的动力学性质等,破坏水生生物群落的组成、结构和功能,导致水生态系统健康状况

的恶化<sup>[21,22]</sup>;此外,还会造成土壤肥力下降,使大量肥沃的表层土壤丧失。据统计,我国每年流失土壤约 50 亿 t,损失 N、P、K 元素约 4 000 多万 t。我国在水土流失的产生、危害及控制方面已取得了不少成就,但是在泥沙对水生态系统影响方面的研究相对薄弱。

(6) 水资源不合理利用。水资源的不合理利用引起土地生态系统的改变,造成生态系统退化。如,在我国西北内陆干旱区,由于河流上中游用水过多,造成下游河湖干涸,植被枯萎,荒漠扩大;在大中型灌溉区,由于灌溉不当,地下水位上升,造成土壤次生盐碱化等,将导致这些生态系统整体的生物量较低,甚至生命力减退。

2.1.2 自然因素

岩性、地貌、气候、水文等自然因素直接影响生态系统健康的本底状况,如在水热条件相似的情况下,喀斯特地区的生态系统更脆弱,再如陡峻边坡地段土层薄、土壤储水保水能力低、生态系统稳定性差、标志生态系统健康的结构和功能易遭破坏等。自然干扰的改变,如火灾、地震、旱涝、河流改道、病虫害爆发等,也可导致生态系统功能的削弱甚至消失<sup>[23]</sup>。

2.2 表现形式

由以上两个影响因子可以看出,干扰和胁迫是影响生态系统健康的主要因素。当生态系统在可承受的外界因子作用下,生态系统就会对干扰产生反应,其具体表现形式,见表 1。

表 1 健康的生态系统受到外界胁迫的表现形式

	反映阶段	反映结果
受胁迫的生态系统	初期反应	退化(演替偏离原轨道)
	抵抗阶段	消亡(演替偏离原轨道并消亡)
	恢复阶段	恢复(即恢复到原状态及其相似状态)
	回复阶段 <sup>[12,24,25]</sup>	进入新的状态 <sup>[24,26]</sup>

在压力胁迫下,生态系统会产生健康风险。一般来说,胁迫通常指给生态系统造成负面效应的逆向胁迫。然而并非所有胁迫都影响生态系统的活力、生存力和可持续性。事实上,许多生态系统都依靠某种胁迫来维持。这些胁迫已成为自然生态系统的组成部分,可称为正向胁迫。胁迫的表现形式多种多样,同一因子对不同生态系统的影响程度和强度也并不相同。如对水生生态系统来说主要有以下几个方面:污染物的排放、非点源污染、过度捕捞、围湖造田、水土流失、外来种的入侵、水资源的利用不合理利用等<sup>[27]</sup>。

3 生态系统健康评价的指标体系

生态系统健康评价不仅包括生态系统水平综合指标、群落水平指标、种群及个体水平指标等多尺度的生态指标来体现生态系统的复杂性;还包括了物理化学方面的指标;以及人类健康与社会经济指标<sup>[28]</sup>。

3.1 生态指标

3.1.1 生态系统水平综合指标

包括活力、组织、恢复力 3 个指标。活力(vigor)可由活动性、新陈代谢、初级生产力来衡量<sup>[29]</sup>,它是生态系统的能量输入和营养循环容量。在一定范围内生态系统的能量输入越多,物质循环越快,活力就越高,但这并不意味着能量输入高和物质循环快生态系统就更健康,尤其是对于水生生态系统来说,高输入可导致富养化。组织(organization)即系统的复杂性,这一特征会随生态系统的次生演替而发生变化和作用,可由多样性指数、网络分析获得的参数表示,其具体指标有生态系统中 r - 对策种和 k - 对策种的比率、短命种和长命种的比率,外来种和乡土种的比率等。一般认为,生态系统的组织越复杂就越健康。而恢复力(resilience)可由

模拟模型计算出来<sup>[13,15]</sup>,它是胁迫消失时,系统克服压力及反弹回复的容量,具体指标为自然干扰的恢复速率和生态系统对自然干扰的抵抗力。一般认为受胁迫生态系统比不受胁迫生态系统的恢复力更小。

### 3.1.2 群落水平指标

当生态系统受到干扰和外来压力发生改变甚至退化时,一般会在群落结构上有所表现。在一些有关生态系统健康评价的文献中,最常使用的群落结构指标有分类群组成(Composition of taxonomic groups/ assemblage)、种多样性和生物量等<sup>[30]</sup>。种多样性有丰富度和均匀度构成<sup>[31]</sup>。一些学者通过对海洋生态系统、农田生态系统和森林生态系统健康的研究,提出一个客观评价生态系统健康的度量指标-多样性-丰度关系。他们认为,在一个健康的生态系统中,多样性-丰度关系可以用对数正态分布表征。但是在恶劣条件下,多样性-丰度格局常常变化,此时,它不在表现为对数正态分布。偏离对数正态分布可能表明生态系统处于受胁迫状态的概念最早在海洋生态系统的研究中得到证实<sup>[32]</sup>。一个群落的多样性和丰度分布偏离对数正态分布越远,表明群落或其所在的生态系统就越不健康<sup>[33]</sup>。例如, Tom Person 对苏格兰一个海湾的底栖动物监测了 10 年之久, Gray 对 Person 的资料进行了整理并绘制了对数正态图表,对海湾受污染前的两组资料作完全拟合对数正态分布,而受污染后的资料显示出偏离对数正态分布的变化。Gray 发现,对一个未受干扰的生态系统(即种的迁入和迁出保持稳定)来说,对数正态分布是很好的统计学描述。对数正态分布为生态系统健康测定提供了一个有价值的尺度,它说明在生态学上生态系统健康的客观可测定性<sup>[33]</sup>。此外,群体结构<sup>[31]</sup>、关键种<sup>[31]</sup>、生物体型分布<sup>[34]</sup>、营养结构(食物网)<sup>[13]</sup>和网络分析<sup>[35]</sup>等也是近年来使用较多的指标和方法。

### 3.1.3 种群及个体水平指标

种群及个体水平指标主要运用能够衡量其他处于同域的物种的种群变化和反映生态环境变化的指示种来监测生态系统健康。这些指示种是从对其它压力的作用和生态过程的变化表现较明显的种以及从公众较熟悉的、对化学因素变化较敏感的动植物中进行筛选出来的。所以,在生态系统健康的研究中,指示种的选择应该谨慎,要综合考虑到它们的敏感性和可靠性,即要明确它们对生态系统健康指示作用的强弱。Cairns 等<sup>[31]</sup>对细胞或亚细胞水平的生化效应、个体的生长率、致癌作用、畸变和先天性缺陷、个体的不同组织对化学物质的机体耐受量、对疾病的敏感度、行为效应、藻类细胞的形态变化、雌性化;种群出生率和死亡率、种群年龄结构、种群体型结构、繁殖对数目、种群的地理分布、丰富度、产量和生物量等依赖这些指示种个体及其种群的评价指标做了总结,认为种群及个体水平的指标具有早期预警作用。Boulton<sup>[36]</sup>在研究中也发现,当这些指示种发生变化时,整个系统的性质和功能有可能还未显示出来。

### 3.2 物理化学指标

物理化学指标包括水质、大气质量状况、土壤物理化学性质等,是对生态系统的非生物环境进行检测的指标,由大气污染指数、紫外线辐射强度、土壤重金属含量、水体富营养化程度、水体矿化度、pH 值等各项指示环境质量的指标组成。这些非生物环境的因素可能是导致或影响生态过程变化的原因。如水体富营养化程度、土壤肥力、土壤中腐殖质的厚度、环境中重金属含量和河岸的坡度等等;同时,非生物环境的变化也是生态系统行为的反映,如土壤肥力、水体中的溶解氧含量等等<sup>[30]</sup>。

### 3.3 人类健康与社会经济指标

人类健康与社会经济指标必须满足以下三个条件:(1)维护人类健康;(2)保证对资源的合理利用;(3)提供适宜的生存环境条件<sup>[31]</sup>,才能从生态系统提供的服务方面集中反映生态系统要满足人类生存与社会经济可持续发展对环境的要求。这三个条件从生态和社会方面综合反映生态系统的健康状况。人类健康与社会经济指标包括重大流行疾病发生率、社会稳定性、收入指数、物价指数、工作稳定性、人口增长率、通货膨胀指数、资源消费指数、技术增长率、人类健康水平等方面<sup>[30]</sup>。人类对环境造成压力的主要因素是,人口增长、资源过度消费和技术发展导致人类对环境的影响强度不断增加。因此,人均能量消费和消费单位物质造成的环境影响,可分别作为能源消费和科学技术因素对环境的压力指标,它们可与人口增长速度来共同评价环境压力<sup>[37]</sup>。另外,社会经济指标还包括人类健康水平、区域经济的发展水平、技术发展水平、公众环境质量和生活质量的观念以及政府管理决策等。

## 4 生态系统健康评价的方法

近些年,对生态系统健康评价的研究主要集中在活力、组织结构和恢复力(或弹性力)三者的关系与如何测量上。一个健康的生态系统在活力、组织结构和恢复力(或弹性力)之间有一定的动态平衡,并能维持物种多样性和物质交换途径的多样性,缺少任何一方就会导致生态系统的健康问题。例如,一个生态系统缺少活力它是结晶态的,缺少组织结构被认为是富营养型的,缺乏恢复力,会导致生态系统非常脆弱<sup>[38]</sup>。因此,不仅要理清三者的关系还要确定三者的测量和计算方法。

### 4.1 活力的测量

生态系统活力的测量是对生态系统的活性、新陈代谢和初级生产力的测量,它是生态系统健康各主要指标中最容易测量的,可用网络分析的方法来定量的计算活力。Ulanowicz<sup>[39]</sup>提出了计算生态系统的总产量(TST)和净输入量(NI)。TST 指物质交换过程中,单位时间内物质个体沿着各个体的交换途径的物质转移量的简单相加( $TST = \sum_{i=0}^{n+T} T_{ij}$ ),NI 可直接从 TST 中求出。

### 4.2 组织结构的测量

相对于活力的测量,组织结构的测量难度要大些。它不仅包括定量分析系统各组间的相互作用以及它们与无机环境的相互作用,还要测量多样性和生态系统的组成大小以及各组间物种交换途径。Ulanowicz<sup>[39]</sup>也是用网络分析法,运用信息理论建立了一套适合于系统水平“网络分析”的定量化指标。即首先建立一个系统各个组成部分的物质与能量交换矩阵,矩阵中各元素  $T_{ij}$  表示组分从  $i$  行转移到  $j$  列的物质和能量交换。状态  $p(a_i, b_j)$  表示一单位中间变量  $i$  进入成分  $j$  ( $T_{ij}$ ) 的概率。 $T$  是系统转移的总量,由于  $T$  在这样的系统转移过程中是收敛的,可以通过  $T_{ij}/T$  求出  $p(a_i, b_j)$ ;同理,概率  $p(b_j)$  也可以通过  $T_{ij}/T$  求得。最后,离开  $i$  进入  $j$  的条件概率  $p(a_i/b_j)$  可由  $T_{ij}/T_i$  求得。因此,生态系统组织结构的计算公式为:

$$I = \frac{T_{ij}}{T \times \log(T_{ij} \times T / T_j \times T_i)}$$

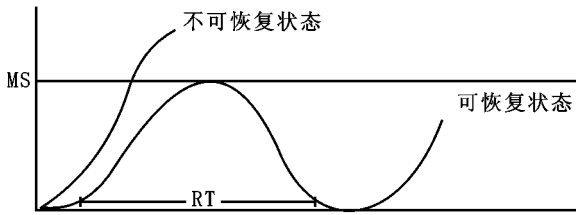
另外, Ulanowicz 还提出了自主权值(A)和系统不确定性(H)两个公式,从其它两个方面量化生态系统的组织结构,其公式为:

$$A = TI = T_{ij} \times \log(T_{ij} \times T / T_j \times T_i) \text{ 和 } H = (T_{ij} \times T) \times \log(T_{ij} / T)$$

### 4.3 恢复力的测量

恢复力是生态系统维持结构与格局的能力,直接测量比

较困难,一般要求助于计算机模型的帮助(如生物地球化学循环模型(CENTURY)和林窗动态模型(GAP))。通过这些模型可以估算出系统从胁迫状态恢复到稳定状态的时间,即恢复时间(RT)以及生态系统能够承受的最大胁迫(MS)即生态系统从一种状态到另一状态的临界值<sup>[40]</sup>。恢复力可表示为MS/RT。MS-RT关系如图1所示:



图中:纵坐标表示,可以选择活力、组织结构、优势度及关键物种中的某一项作为指标;横坐标表示系统的恢复时间。当胁迫达到MS点时即生态系统能够承受的最大胁迫,RT为生态系统的恢复时间。

图1 MS-RT的关系

除了上述评价方法以外,Schaeffer等首次探讨了生态系统健康的度量问题<sup>[41]</sup>。王小艺等认为可以从生态系统的缓冲力和持续性评估、生态系统失调综合症的诊断、生态风险评估等方面对农业生态系统健康进行评价<sup>[42]</sup>。Costanza等<sup>[15]</sup>根据生态系统可持续能力的特征,提出了基于系统层次的生态系统健康指数,暗示了生态系统健康度量标准是生态系统活力、组织结构和恢复力(或弹性力)的加权平均。生态系统健康指数(health index, )为

$$HI = V \times O \times R$$

式中:HI——系统健康指数,也是可持续性的一个度量;V——系统活力,是测量系统活动、新陈代谢和初级生产力的主要标准;O——系统组织指数,是系统组织相对复杂程度,包括其多样性和相关性;R——恢复力指标,是系统恢复力的相对程度。

## 5 问题与建议

### 5.1 生态系统健康评价面临的问题

现在关于生态系统健康的概念认识基本上来自两种途径,一种是功利实用观的面向目标途径;另一种是生态系统观的面向生态系统途径<sup>[43]</sup>。生态系统健康的兴起只有十余年

的时间,在它的发展过程中还存在着许多问题亟待解决:(1)维持生态系统健康的策略是什么?(2)生态系统是一个动态的过程,有一个产生、成长到死亡的过程,很难判断哪些是演替过程中的症状,哪些是干扰或不健康的症状;(3)健康的生态系统具有吸收、化解外来胁迫的能力,但对这种能力很难测定。(4)生态系统健康的时间尺度以及能够持续的时间;(5)生态系统健康要求考虑生态、经济和社会因子,但对各种时间、空间和异质性的生态系统而言太难,尤其是人类影响与自然干扰对生态系统的影响有何不同,目前还难以确定,以及生态系统改变到何种程度而不影响其为人类服务的生态系统服务功能。(6)生态系统健康的不确定性,虽然生态系统健康的标准已经提出了不少,但对于生态系统健康状态仍然有许多不确定性;(7)由于生态系统健康的不可确定性,很难确定生态系统在何种状态下没有干扰,在何种状态下是健康的。(8)大多数关于生态系统管理的政策辩论在管理目标上产生分歧,说明生态系统健康未达到目标管理的要求。

### 5.2 对生态系统健康评价的几点建议

(1)由于生态系统的复杂性,生态系统健康是否可以概括为一些简单而且容易测定的具体指标,以便为生态学家和政策的制定者提供参考点来评估生态系统健康受害程度以及生态系统对胁迫的反应。

(2)虽然目前提出了对组织、活力和恢复力的评价方法,但这些在实际运用中很难应用,可操作性比较差。因此,需要对人类健康、社会经济、生物科学和国家政策等方面进一步融合,以期提出新的方法来评价生态系统健康。

(3)生态系统健康的前沿性研究在于生态系统健康概念与其它生态学理论相结合,因此,应该广泛利用遥感(RS)、地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)和景观生态学原理等技术与地面研究紧密结合,来监测生态系统健康<sup>[4,7,44]</sup>,通过景观结构变化来了解其功能的变化过程。

(4)在进行生态系统健康评价的过程中,一定要综合考虑各种因素,特别注重人类在生态系统中的关键地位,从不同角度进行评价,以充分体现生态系统健康及其完整性。

(5)在各个地方,不同区域,根据当地生态系统的特点及功能特性,建立生态环境监测站,达到早期预警效果,防止病态进一步恶化。

### 参考文献:

- [1] Constanza R. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 386: 253 - 260.
- [2] Cairns J Jr, Niederlehner B R. Ecosystem health concepts as a management tool[J]. Journal of Aquatic Ecosystem Health, 1995, 4 (2): 91 - 95.
- [3] Rapport D J. Need for a new paradigm[A]. In: Rapport D J, Costanza R, Epstein P R, Cauder C, et al. Ecosystem Health[C]. Malden: Blackwell Sciences, 1998.
- [4] Rapport D J, et al. Ecosystem health: the concept, the ISEH, and the important tasks ahead[J]. Ecosystem health, 1999, 5: 82 - 90.
- [5] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. Human domination of earth's ecosystem, [J]. Science, 1997, 277: 464 - 499.
- [6] Caudet C L, Wong M P, Brady A, Kent R. The transition from environmental quality to ecosystem health[J]. Ecosystem health, 1997, 3: 3 - 10.
- [7] Rapport. Gaining respectability: development of quantitative methods in ecosystem health[J]. Ecosystem Health, 1999, 5: 1 - 2.
- [8] Mc Michael A J, Bolin B, Costanza R. Globalization and the sustainability of human health: an ecological perspectives[J]. Bioscience, 1999, 49: 205 - 210.
- [9] 曾德慧,姜凤岐,范志平,等. 生态系统健康与人类可持续发展[J]. 应用生态学报, 1999, 10(6): 751 - 756.
- [10] Leopold A. Wilderness as a land laboratory[J]. Living Wilderness, 1941, 6(2): 3.
- [11] Rapport D J, Thorpe, C, Regier, H A. Ecosystem medicine[J]. Bulletin of Ecological Society of America, 1979, 60: 180 - 182.

- [12] Rapport D J . Ecosystem Health[M]. Oxford : Blackwell Science , Inc , 1998. 1 - 356.
- [13] Rapport D J , Costanza R , McMichael A J . Assessing ecosystem health[J]. Trends in Ecology & Evolution , 1998 , 13 : 397 - 402.
- [14] Kristin S. Ecosystem health: a new paradigm for ecological assessment [J]. Trends in Ecology & Evolution , 1994 , 9 : 456 - 457.
- [15] Costanza R. Toward an operational definition of ecosystem [A]. In: Costanza R, Norton B G . & Haskell B D et al. Ecosystem health: new goals for environmental management [C]. Washington D C : Island Press , 1992. 239 - 256.
- [16] Karr J R , Fausch K D , Angermeier P L , et al. Assessing biological integrity in running waters: a method and its rationale [M]. Champaign: Illinois Natural History Survey , Illinois , Special Publication 5 , 1986.
- [17] Colwell R. Global climate and infectious disease: The cholera paradigm[J]. Science , 1996 , 274 : 2025 - 2031.
- [18] Costanza R , Mageau M. What is a healthy ecosystem ? [J]. Aquatic Ecol. , 1999 , 33(1) : 105 - 115.
- [19] Kaly U L , Jones G P. Mangrove restoration: A potential tool for coastal management in tropical developing countries [J]. Ambio , 1998 , 27(8) : 656 - 661.
- [20] Wu G(吴钢) , Li J(李静) , Zhao J - Z(赵景柱) . Fundamental Ecological and Environmental Problems and Its Countermeasures in Northwestern China[J]. China Soft Science(中国软科学) , 2000 , 10 : 12 - 17(in Chinese).
- [21] Gallopin G C. The potential of agroecosystem health as a guiding concept for agricultural research[J]. Ecosyst Health , 1995 , 1 : 129 - 141.
- [22] Schaeffer D J , Novak E W. Integrating epidemiology and epizootiology information in ecotoxicology studies: Ecosystem health[J]. Ecotoxicol Environ Safety , 1998 , 16(3) : 232 - 241.
- [23] Cairns , J Jr , Munawar M (ed) . Ecosystem health through ecological restoration: barriers and opportunities[J]. Journal of Aquatic Ecosystem Health , 1994 , 3 (1) : 5 - 14.
- [24] Odum E P. Perturbation theory and the subsidy - stress gradient[J]. BioScience , 1979 , 29 (6) : 349 - 352.
- [25] Begon M , Harper J L . Townsend C R. Ecology [M]. London: Blackwell Scientific Publications , 1990. 739 - 815.
- [26] Barrett G W , Rosenberg R. Stress Effects on Natural Ecosystems [M]. London: John Wiley & Sons Ltd. 1981. 3 - 12 , 269 - 289.
- [27] 马克明,孔红梅,关文彬,等.生态系统健康评价:方法与方向[J].生态学报,2001,21(12):2106-2116.
- [28] Rapport D J. What constitutes ecosystem health ? [J]. Perspectives in Biology and Medicine , 1989 , 33 : 120 - 132.
- [29] Mageau M T , Costanza R , Ulanowicz R E. The development and initial testing of a quantitative assessment of ecosystem health[J]. Ecosyst. Health , 1995 , 1 : 201 - 213.
- [30] 李瑾,安树青,程晓莉,等.生态系统健康评价的研究进展[J].植物生态学报,2001,25(6):641-647.
- [31] Cairns J , P V McCormick , B R Niederlehner. A proposed framework for developing indicators of ecosystem health[J]. Hydrobiologia , 1993 , 263 : 1 - 44.
- [32] Gray J S , Mirza F B. A possible method for the detection of pollution-induced disturbance on marine benthic communities [J]. Marine Pollution Bulletin , 1979 , 10 : 142 - 146.
- [33] 袁兴中,叶林奇.生态系统健康评价的群落学指标[J].环境导报,2001,1:46.
- [34] Vandermeulen H. The development of marine indicators for coastal zone management[J]. Ocean & Coastal Management , 1998 , 39 : 63 - 71.
- [35] Mageau M T , R Costanza , R E Ulanowicz. Quantifying the trends expected in developing ecosystems[J]. Ecological Modelling , 1998 , 112 : 1 - 22.
- [36] Boulton A J. An overview of river health assessment: philosophies , practice , problems and prognosis[J]. Freshwater Biology , 1999 , 41 : 469 - 479.
- [37] Peterson R W. Indicators of the causes of ecological impacts or what 's causing the global environmental crisis ? [A]. In: McKenzie D H , D E Hyatt , V J McDonald et al. Ecological indicators[M]. London and New York: Elsevier Applied Science , 1992. 89 - 100.
- [38] 肖风劲,欧阳华.生态系统健康及其评价指标和方法[J].自然资源学报,2002,17(2):203-209.
- [39] Ulanowicz R E Growth and Development: Ecosystem Phenomenology [M]. New York: Springer - Verlag , 1986.
- [40] 任海,等.生态系统健康的评估[J].热带地理,2000,20(4):310-316.
- [41] Schaeffer D J , Henricks E E , Kerster H W. Ecosystem health: Measuring ecosystem health[J]. Environmental Management , 1988 , 12 : 445 - 455.
- [42] 王小艺,沈佐锐.农业生态系统健康评估方法研究概况[J].中国农业大学学报,2001,16(1):84-90.
- [43] 王庆礼,邓红兵.对我国森林生态学研究的思考[J].科学对社会的影响,2001,(3):46-47.
- [44] Whitford W G , Rapport D J , Groothusen R M. The central rio-grade valley-organizing and interpreting ecosystem health assessment data [J]. GIS World , 1996 , 9 : 60 - 62.