

生态系统健康的评估

任海¹, 邬建国², 彭少麟³

(1. 中国科学院华南植物研究所, 广东 广州 510650; 2. 美国亚利桑那州立大学 生命科学系, 美国 菲尼克斯; 3. 中国科学院广州分院, 广东 广州 510070)

摘要: 生态系统健康(学)是本世纪80年代后期发展起来的生态学分支之一,它主要研究人类活动、社会组织、自然系统及人类健康的整体性。生态系统健康是指生态系统随着时间的进程有活力并且能维持其组织结构及自主性,在外界胁迫下容易恢复。评估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、管理选择、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。文中提出了在时间和空间格局上对生态系统健康进行研究或评价的等级概念,即生态系统的基本性质包括结构、功能、动态与服务,而生态系统又可分为基因、物种-种群、群落-生态系统、景观-区域等4个层次,两者通过巢式等级整合。此外,还讨论了生态系统健康与干扰、生态系统稳定性、生态系统管理、生态系统可持续性,以及生态恢复之间的关系。

关键词: 生态系统健康; 组织; 生态系统管理; 恢复生态学; 等级概念

中图分类号: XI71.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-5221(2000)04-0310-07

早在本世纪初,就有科学家预言全球环境将恶化,进而对人类的生存产生潜在的威胁。在随后的社会发展进程中,虽然有的国家、组织、单位及个人做了大量努力来解决环境问题,但不幸的是许多预言潜在的威胁已变成了事实。尤其是人口过剩、能源短缺、环境污染、生物多样性减少、土地退化和气候变化已对人类和地球的可持续发展产生了恶劣影响,使地球出现了不健康的症状。1992年在巴西举行的世界环境与发展大会上,与会各国首脑一致强调“国家间将加强合作,以保护和恢复地球生态系统的健康和完整性”。科学家们在检讨这些问题时发现,以前的关于生态系统管理的理论与方法已显落后,不能指导解决这些问题,要针对生态系统已不健康的现实,把人类活动、社会组织、自然系统及人类健康等社会、生态和经济问题进行整合研究,系统研究生态系统在胁迫条件下产生不健康的症状和机理。生态系统健康(ecosystem health)正是在这一背景下产生的^[1-3]。本文将介绍生态系统健康的基本理论与评估方法,及其与相关学科的关系。

1 生态系统健康的定义及研究简史

生态系统健康既可理解为生态系统的一种状态也可理解为一门科学。不同的学者对生态系统健康

的状态与生态系统健康学科体系有不同的看法,但总的来说可概括如下:生态系统健康(学)是一门研究人类活动、社会组织、自然系统及人类健康的整合性科学;而生态系统健康是指生态系统没有病痛反应、稳定且可持续发展,即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^[3-6]。生态系统健康包括从短期到长期的时间尺度、从地方到区域的空间尺度上社会、生态、健康、政治、经济、法律的功能,从地方、区域到全球胁迫下的生态环境问题。其目标是保护和增强区域环境容量的恢复力,维持生产力并保持自然界为人类服务的功能。生态系统健康只是一种隐喻,它是评价生态系统最佳状态的一种方式。可通过全面研究生态系统在胁迫下的特征,根据生态系统条件进行系统诊断,找出生态系统退化或不健康的预警指标,进而防止其退化或生病^[3,4,6]。

最早研究生态系统健康的是Leopold,他于1941年提出了“土地健康”(land health)的概念,但未引起足够的重视^[3]。随后,科学家们一直对是否发展生态系统健康学说应用于生态系统评价和管理存在争论。在Odum倡导下,本世纪70年代兴起了生态系统生态学,这一学说继承了Clements的演替观,把生态系统看作一个有机体(生物),具自我调节和

收稿日期: 1999-12-03; 修订日期: 2000-03-09

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(39899370); 中国科学院青年创新小组和重大项目(KZ951-B1-110); 广东省自然科学基金项目(980489、980952)资助。

作者简介: 任海(1970-),男,湖北黄石人,博士,副研究员,研究方向:生态系统生态学和恢复生态学。

反馈的功能, 在一定胁迫下可自主恢复, 从而忽视了生态系统在外界胁迫下产生的种种不健康症状^[3,7]。与此同时, Woodwell (1970) 和 Barrett (1976) 极力提倡胁迫生态学 (stress ecology)^[8,9]。进入 80 年代, Rapport 等 (1985) 系统研究了胁迫下生态系统的行为, 并在随后提出不能把生态系统作为一个生物对待, 它在逆境下的反应不具自主性^[10]。以 Costanza 和 Rapport 为代表的生态学家极力认为现在世界上的生态系统在胁迫下发生问题, 已不能像过去一样为人类服务, 并对人类产生了潜在威胁。他们认为生态系统健康的概念可引起公众对环境退化等问题的关注^[3,6]。然而, 以 Policansky 和 Suter 为代表的科学家极力反对生态系统健康的提法。他们认为生态系统健康只是一种价值判断, 没有明确的可操作的定义, 会阻碍详细的科学分析进程^[6]。1992 年, “Journal of Aquatic Ecosystem Health” 诞生, 3 年之后, “Ecosystem Health” 和 “Journal for ecosystem health and medicine” 创刊, 这 3 份杂志已成为国际生态系统健康学会会员发表论点的重要刊物。1992 年, 美国国会通过了“森林生态系统健康和恢复法”, 其农业部组织专家对美国东、西部的森林、湿地等进行了评价, 并于 1993 年后出版了一系列的评估报告^[11,12]。1994 年来自 31 个国家的 900 名科学家聚集在加拿大的渥太华召开了全球生态系统健康的国际研讨会, 会议集中在评价生态系统健康, 检验人与生态系统相互作用, 提出基于生态系统健康的政策等 3 个方面, 并希望组织区域、国家和全球水平的管理、评价和恢复生态系统健康的研究^[6]。迄今西方国家已出版了关于生态系统健康的书有 6 本之多, 其中比较著名的有: Costanza 等编辑的《Ecosystem health: new goals for environmental management》(Island Press, 1992), Rapport 等主编的《Ecosystem health》(Blackwell Science, Inc, 1998), Rapport 等主编的《Evaluating and monitoring the health of large-scale ecosystem》(Springer-Verlag, 1995)。这几本书基本反映了生态系统健康作为一生态学分支的基本理论与方法, 并有一些实例研究。

2 生态系统在胁迫下的反应

1962 年 Carson 出版了《寂静的春天》一书, 向人们披露了化学物质污染生态系统后产生的恶果, 引起人们对环境恶化的广泛关注^[13]。事实上, 人类对生态系统的影响有许多方面, 至少包括过度开发利用 (overharvesting, 指对陆地、水体生态系统的过

度收获, 主要后果是物种消失), 物理重建 (Physical restructuring, 指为了某种目的改变生态系统结构与功能可能导致生物多样性减少, 水质下降, 有毒物增加, 从而影响人类生存), 外来种的引入 (Introduction of exotic species, 引进外来种引起乡土种消失及生态系统水平的退化), 自然干扰的改变 (Modification of natural perturbations, 如火灾、河流改道、地震、病虫害爆发等, 可引起生态系统的消失及退化) 等, 这些胁迫或干扰已引起了全球生态系统从区域到生物圈水平的变化^[10,14]。值得指出的是, 各种逆境对生态系统的胁迫机理不一, 有时是单一因子胁迫, 有时是多因子综合胁迫, 生态系统内个体、种群、群落和生态系统层次对胁迫的反应也是不一致的。

2.1 单因子胁迫下的反应

以森林生态系统为例, 如果从一个健康的森林生态系统中过度取柴 (收获薪材), 其树木死亡率、火险、发病率、虫害发生概率均会增加, 而其分解率、营养循环效率、多样性、景观多样性及美学价值均会减少。Rapport (1998) 曾比较了在同一种胁迫下湖泊、河流、山地 3 种生态系统的表现 (表 1), 结果显示不同生态系统在同种胁迫下的反应类似^[3]。

表 1 在同种胁迫下 3 种生态系统的表现 (根据 Rapport 1998)

指 标	低拉文田大湖	开容九开河	琼拿塔山地
系统性质			
初级生产力	+	+	0/ -
水平营养运移	+	+	+
物种多样性	-	-	- / +
疾病普遍性	+	+	+
种群调控	-	-	-
演替的逆转	+	+	+
复合稳定性	-	-	-
群落结构			
r- 对策种	+	+	+
短命种	+	+	+
更小的生物群	+	+	?
外来种	+	+	+
种间相互作用	-	-	-
边界线	+	+	+
乡土种的消失	?	+	+

注: + 增加; - 减少; 0 无变化; ? 不清楚

此外, Odum (1985) 提出了受胁迫生态系统的反应趋势, 他认为生态系统在胁迫情况下会在能量 (群落呼吸增加, 生产力/呼吸量小于或大于 1, 生产力/生物量和呼吸量/生物量增加, 辅助性能量的重要性增加, 冗余的初级生产力增加)、物质循环 (物质流通率增加, 物质的水平运移增加而垂直循环降低, 群落的营养损失增加)、群落结构 (r- 对策种的比

例增加,生物的大小减小,生物寿命或部分器官寿命缩短,食物链变短,物种多样性降低)和一般系统水平(生态系统变得更开放,自然演替逆行,资源利用效率变低,寄生现象增加而互惠现象降低,生态系统功能比结构更强壮)上发生变化^[15]。

2.2 多因子胁迫下的反应

当生态系统受多个因子胁迫时会产生累积效应,从而增加生态系统的变异程度。在这种情况下,生态系统的反应与胁迫因子的关系非常复杂,而且对人类的管理也提出了更高的要求。Rapport (1998)曾提出了一个框图展示了人类活动对生态系统变化及人类健康的影响(图1)。图中表明,人类活动会胁迫生态系统健康,导致生态系统结构发生变化,进而影响到生态系统的服务功能,对人类健康产生影响,人类不得已又会关注生态系统健康^[5]。

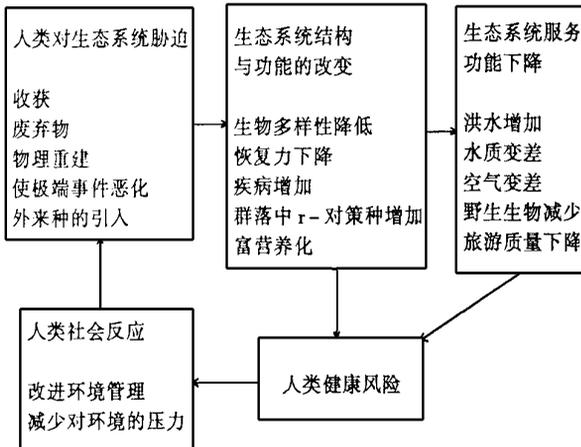


图1 人类活动与生态系统健康间的关系

2.3 生态系统对胁迫的反应过程与结果

在外界因子的作用下,在可承受范围内,生态系统的反应过程分为3个阶段:开始时为初期反应,随后是抵抗与恢复阶段,最后是回复阶段^[3,7,16]。

生态系统对胁迫的反应结果有4种:一是死亡(即偏离原轨道并消亡),二是退化(偏离原轨道),三是恢复(即回复到原状态及其附近),四是进入更佳状态^[7,17]。

3 生态系统健康的标准

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、管理选择、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^[3-5]。

活力(vigor):即生态系统的能量输入和营养循环容量,具体指标为生态系统的初级生产力和物质循环。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,高输入可导致富营养化效应。

恢复力(resilience):即胁迫消失时,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。

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。具体指标为生态系统中r-对策种与k-对策种的比率,短命种与长命种的比率,外来种与乡土种的比率,共生程度,乡土种的消亡等。一般认为,生态系统的组织越复杂就越健康。

生态系统服务功能的维持(maintenance of ecosystem services):这是人类评价生态系统健康的一条重要标准。一般是对人类有益的方面,如消解有毒化学物质,净化水,减少水土流失等,不健康的生态系统的上述服务功能的质和质量均会减少。

管理选择(management options):健康生态系统可用于收获可更新资源、旅游、保护水源等各种用途和管理,退化的或不健康的生态系统不再具多种用途和管理选择,而仅能发挥某一方面功能。

外部输入减少(reduced subsidies):所有被管理的生态系统依赖于外部输入。健康的生态系统对外部输入(如肥料、农药等)会大量减少。

对邻近系统的破坏(damage to neighboring systems):健康的生态系统在运行过程中对邻近的系统破坏为零,而不健康的系统会对相连的系统产生破坏作用,如污染的河流会对受其灌溉的农田产生巨大的破坏作用。

对人类健康的影响(human health effects):生态系统的变化可通过多种途径影响人类健康,人类的健康本身可作为生态系统健康的反映。与人类相关又对人类影响小或没有的生态系统为健康的系统。

4 生态系统健康的评估与预测

有了标准就可进行生态系统健康评价,但事实上并不容易。由于生态系统的多样性(如森林、草原、农田、水体、农村、城市等),评估人员及其目的不同,尤其是评估者感兴趣的时空尺度不一时,

评估结果的差异是非常明显的^[3, 6, 18-20]。过去人们采用生态风险评价生态系统健康。生态风险评价是评估人类活动或自然灾害对生态系统组分的伤害概率，它关注的是保存生态系统的健康而不是阻止破坏，评价的主要步骤包括调查研究、风险评估、风险定性和定量化、风险管理等。生态风险评价由于存在一些不确定性，也难以操作^[21-24]。

为了方便实现生态系统健康，研究的最终目的主要是进行管理和预测。Ulanowicz (1986) 和 Rapport (1998) 等发展了活力、组织和恢复力的测量及预测公式，利用这些公式计算出的结果即为生态系统健康的程度^[3, 25]。

4.1 活力的测量

活力即其活性、代谢及初级生产力。这是生态系统健康主要指标中最好测定的部分，可用初级生产力和经济系统内单位时间的货币流通率表示。Ulanowicz 提出用网络分析 (network analysis) 方法进行预测的两种数量方法：即计算系统的总产量 (TST) 和净输入 (NI)。 TST 即是在单位时间内沿着各个体的交换途径的物质转移量的简单相加 ($TST = \dots T_{ij}$)，而 NI 则可直接从 TST 中分离出来。

4.2 组织的测量

组织即生态系统组成及途径的多样性。在生态系统演替和进化过程中，在没有胁迫的情况下，生态系统的物质和能量运转量会增加，但其基本反馈结构会保持稳定。在胁迫下，一个组分的活力增加或减少，会引起其它组分的增加或减少，并通过各种循环最终影响到它自己。Ulanowicz 根据这些特征及网络分析方法建立了组织测量及预测方程。

首先建立一个矩阵，矩阵中每个元素 T_{ij} 表示 I 行成分到 j 列成分间物质与能量的交换。状态 $P(a_i, b_j)$ 指一个中间变量离开成分 I 并进入成分 j (T_{ij}) 的概率，由于 T 在这样的系统运移中是收敛的，就可通过 T_{ij}/T 估算 $P(a_i, b_j)$ ，同样， $P(b_j)$ 一部分进入元素 j 的概率也可通过 T_j/T 估算，最后，一部分在离开 I 进入 j 的量的条件概率 $P(b_j | a_i)$ 可通过 $T_{ij}/(\dots T_i)$ 估算。

因此，生态系统的组织测定公式为：

$$I = \dots T_{ij}/T \log (T_{ij} \cdot T / T_j \cdot T_i)$$

此外，Ulanowicz 还建立了自主权值 (A) 和系统不确定性 (H) 公式，以从其它两个方面量化组织。

$$A = T \cdot I = \dots T_{ij} \log (T_{ij} \cdot T / T_j \cdot T_i)$$

$$H = \dots (T_{ij}/T) \log (T_{ij}/T)$$

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。预测生态系统在胁迫下的动态过程一般要求用计算机模型 (诸如林窗动态模型 <如 GAP>，生物地球化学循环模型 <如 CENTURY> 等)。通过这些模型可估算出恢复时间 (RT) 及该生态系统可以承受的最大胁迫 (MS，当生态系统从一种状态转为另一种状态的临界值)。恢复力即为 MS/RT 。

5 生态系统健康的等级理论

等级理论 (Hierarchy theory) 是关于复杂系统的结构、功能和动态的系统理论。该理论认为等级系统中高层次的行为或动态常表现出大尺度、低频率、慢速度特征，而低层次为行为、过程的行为或动态则表现出小尺度、高频率、快速度的特征。不同等级层次之间还具有相互作用的关系。等级理论要求在研究复杂系统时一般至少要同时考虑核心层、上一层、下一层等 3 个相邻的层次^[26-29]。本文首次提出了在时间和空间格局上对生态系统健康进行研究或评价的等级概念 (图 2)。生态系统的基本性质包

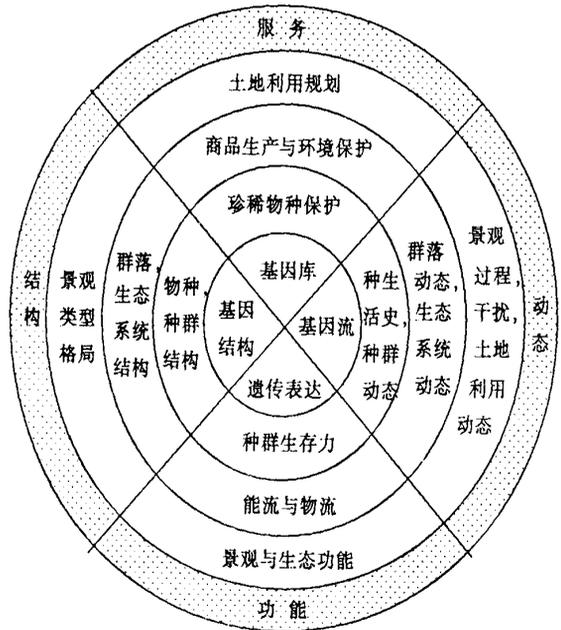


图 2 生态系统健康评估的等级概念

括结构、功能、动态与服务，而生态系统又可分为基因、物种 - 种群、群落 - 生态系统、区域景观 - 全球等 4 个层次，两者通过巢式等级整合^[28]。

6 干扰、生态系统稳定性与生态系统健康

干扰 (disturbance) 指导致一个群落或生态系统

特征（诸如种类多样性、营养输出、生物量、垂直与水平结构等）超出其波动的正常范围的因子，干扰体系包括干扰的类型、频率、强度及时间等^[30]。生态系统稳定性（ecosystem stability）是指生态系统保持正常动态的能力，主要包括恢复力（resilience，干扰后回到先前状态速度）和抵抗力（resistance，系统避免被取代的能力）。MacArthur（1955）和 Elton 等（1958）提出群落复杂性导致稳定性，但 May（1972）通过数学模型模拟表明，随着复杂性的增加生态系统趋于降低稳定性。目前关于生态系统稳定性与复杂性是否有关系及其关系如何尚有争论^[16,31-33]。

生态系统健康与干扰、生态系统稳定性具有密切的关系。一般地讲，稳定的生态系统是健康的，但健康的生态系统不一定是稳定的；干扰作用于稳定的生态系统或健康的生态系统，会导致不稳定或不健康，在一定强度范围下，干扰可能导致生态系统不健康，但仍是稳定的；健康的生态系统是未受到干扰的生态系统，但稳定的生态系统可能受到干扰；生态系统稳定性的两个重要指标是包含在生态系统健康标准中的，而且干扰与这两个指标紧密相关；生态系统的复杂性与生态系统健康的关系还很难确定。

7 生态系统管理、生态系统可持续发展与生态系统健康

90年代兴起了生态系统管理（ecosystem management），生态系统管理是指在某一限定的生态系统内协调、控制方向或人类活动，平衡长期和短期目标，并获取最大利益的行为^[34,35]。其基本思路就是了解生态系统结构、功能与动态，并用生态学原理和生态风险评价进行管理，其目标包括维持生态过程及其进化历程，按照生态学思想和进化论进行管理，维持乡土种和需要的非乡土种群，促进社会和经济的恢复，用有限价值理论进行管理，维持生态系统产品、功能和社会需求的多样性等^[36]。

可持续发展（sustainable development）是指既满足当代需求，又不影响后代需求的发展模式，它包括生态环境、经济和社会的可持续发展^[37]。

生态系统健康、生态系统管理与可持续发展三者间的关系也很紧密：生态系统健康与可持续发展是生态系统的状态，而生态系统管理则是维持这些状态的重要手段；在胁迫下，生态系统会不健康或

不持续，就需要相应的管理来回到健康与可持续方向上来；在没有胁迫的情况下，一个生态系统在发育（生长）过程中，每一个时间段均有一个健康状态，这些均为健康的生态系统，而仅仅处于发育中期（壮年期）的生态系统是可持续的，在早期和晚期均是不持续的；在生态系统壮年阶段，受到外界胁迫时，先要进行生态系统健康评价，再进行管理，以实现生态系统的可持续发展。

8 生态系统健康与恢复生态学等学科的关系

生态系统健康与恢复生态学、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关系（图3）。该图表明，生态系统健康与相关生态学分支的关系紧密，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^[28]。

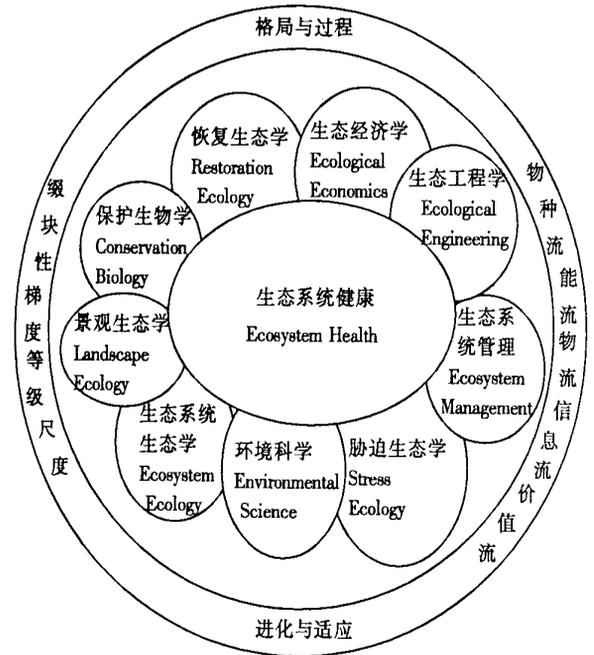


图3 生态系统健康与相关生态学分支的关系

恢复生态学是研究生态系统退化的机理，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，它强调理论研究与应用技术研究两方面。其理论研究包括生态系统结构、功能及过程，干扰与生态系统受损及其响应机制，生态系统稳定性、多样性、抗逆性、生产力和恢复力等，生态演

替规律，个体、种群、群落、生态系统、景观和区域层次的退化评估，生态系统退化及恢复过程的监测模拟及预测等；应用技术研究包括退化生态系统恢复与重建技术体系，生态系统结构与功能的优化配置及调控技术，生物多样性恢复与维持技术，生态工程技术等^[39-41]。

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；退化生态系统恢复的时间不一（轻微受损的生态系统要 3~10 年，中等的 10~20 年，严重的 50~100 年，极度的 200 年以上^[42]），而生态系统产生不健康及其治疗（恢复）时间相应地要短些。

9 生态系统健康存在的问题

生态系统健康的兴起只是近 10 年的事，还存在不少问题有待解决。这主要体现在：（1）生态系统健康的不可确定性，虽然生态系统健康的标准已提出许多，但对于生态系统健康状态仍有许多不确定性，尤其是生态系统在什么状态下才是没有干扰，才是健康的？这可能要从各种其它生物如何面对不可确定性的反应中寻找答案；（2）生态系统健康要求综合考虑生态、经济和社会因子，但对各种时间、空间和异质的生态系统而言实在太难，尤其是人类影响与自然干扰对生态系统影响有何不同难以确定，生态系统改变到什么程度其为人类服务的功能仍能维持；（3）由于生态系统的复杂性，生态系统健康很难简单概括为一些易测定的具体指标，评估方法还有待改进，否则生态学家和政策制定者找不到准确参考点来评估生态系统健康受害程度；（4）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，尤其是幼年的和老年的生态系统；（5）健康的生态系统具吸收、化解外来胁迫的能力，但这种能力还很难测定，尤其是适应在

生态系统健康中的角色如何？（6）生态系统的健康到底能持续多长时间？（7）生态系统保持健康的策略是什么？虽然生态系统健康为我们解决环境问题提供了新的概念构架和一系列研究手段，但这些问题尚有待进一步深入研究。

参考文献：

- [1] Costanza R, Norton B G, Hashell B D. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management [M]. Washington DC: Island Press, 1992. 1 - 125.
- [2] Haines A. Global health watch: monitoring impacts of environmental change [J]. Lancet, 1993, 342: 1464 - 1469.
- [3] Rapport D J. Ecosystem Health [M]. Oxford: Blackwell Science, Inc., 1998. 1 - 356.
- [4] Cech J J. Multiple Stresses in Ecosystems [M]. Boston: Lewis Publishers, 1998. 53 - 132.
- [5] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health [J]. Trends in Ecology & Evolution, 1998, 13: 397 - 402.
- [6] Kristin S. Ecosystem health: a new paradigm for ecological assessment [J]. Trends in Ecology & Evolution, 1994, 9: 456 - 457.
- [7] Odum E P. Perturbation theory and the subsidy - stress gradient [J]. BioScience, 1979, 29 (6): 349 - 352.
- [8] Woodwell G M. Effects of pollution on the structure and physiology of ecosystems [J]. Science, 1970, 168: 429 - 433.
- [9] Barrett G W. Stress ecology [J]. BioScience, 1976, 26 (3): 192 - 194.
- [10] Rapport D J, Regier H A, Hutchison T C. Ecosystem behavior under stress [J]. Am. Naturalist, 1985, 125: 617 - 640.
- [11] USDA. Northeastern area forest health report [M]. Washington D C: United states government Printing office, 1993. 3 - 4.
- [12] USDA. Integrating social science and ecosystem management: A national challenge proceedings [M]. Washington D C: United States Government Printing Office. 1995, 1 - 12.
- [13] Ehrenfeld D. The marriage of ecology and medicine: Are they compatible? [J]. Ecosystem Health, 1995, 1: 15 - 22.
- [14] Koren H. Handbook of Environmental Health and Safety [M]. London: Lewis Publishers. 1995. 1 - 103.
- [15] Odum E P. Trends expected in stressed ecosystems [J]. BioScience, 1985, 35 (7): 419 - 422.
- [16] Begon M, Harper J L, Townsend C R. Ecology [M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1990. 739 - 815.
- [17] Barrett G W, Rosenberg R. Stress Effects on Natural Ecosystems [M]. London: John Wiley & Sons Ltd. 1981. 3 - 12, 269 - 289.
- [18] Holmes T P. Contingent valuation of ecosystem health [J]. Ecosystem Health, 1996, 2: 56 - 60.
- [19] Levins R. Preparing for uncertainty [J]. Ecosystem Health, 1995, 1: 47 - 57.
- [20] Gallopin G C. Perspective on the health of urban ecosystem [J]. Ecosystem Health, 1995, 1: 129 - 141.
- [21] Hartg J H. Toward defining aquatic ecosystem health for the Great Lakes [J]. Journal of Aquatic Ecosystem Health, 1992, 1: 97 - 108.

- [22] Ludwig D. Uncertainty: resource exploitation, and conservation lessons from history [J]. *Science*, 1993, 260: 17 - 36.
- [23] Samson R N. Assessing Forest Ecosystem Health in the Inland West [M]. London: Food Products Press, 1994. 3 - 13.
- [24] Yazvenko S B. A framework for assessing forest ecosystem health [J]. *Ecosystem Health*, 1996, (2): 41 - 55.
- [25] Ukabowicz R E. Growth and Development: Ecosystem Phenomenology [M]. New York: Springer - Verlag, 1986. 15 - 78.
- [26] Noss R F. Indicators for monitoring biodiversity: A hierarchical approach [J]. *Conservation Biology*, 1990, 4 (4): 355 - 364.
- [27] Wu Jianguo, Loucks O L. From balance of nature to hierarchical patch dynamics: a paradigm shift in ecology [J]. *The Quarterly Review of Biology*, 1995, 70 (40): 439 - 465.
- [28] Hai Ren, Jianguo Wu, Shaolin Peng. A hierarchical approach to the study and monitoring of ecosystem health [A]. Rapport. Managing for ecosystem health, International Congress on Ecosystem Health [C]. Report No 24 of University of California: Davis CA USA, 1999. 93 - 94.
- [29] 邬建国. 生态学范式综论 [J]. *生态学报*, 1996, 16 (5): 449 - 460.
- [30] Mooney H A, Gohm M. Disturbance and Ecosystem [M]. Berlin: Springer - Verlag, 1983. 19 - 20.
- [31] Hilling C S. Resilience and stability of ecosystem [J]. *Ann. Rev. of Ecol. & Syst*, 1976, 4: 1 - 23.
- [32] Pimm S L. The complexity and stability of ecosystems [J]. *Nature*, 1984, 317: 321 - 326.
- [33] 孙儒泳. 动物生态学原理 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1992. 221.
- [34] Woody S. Ecological Integrity and the Management of Ecosystems [M]. Ottawa: ST Lucie Press, 1993. 19 - 46.
- [35] Boyce MS, Haney A. Ecosystem Management [M]. New Haven: Yale University Press, 1998, 1 - 60.
- [36] Simon T P. Assessing the Sustainability and Biological Integrity of Water Resources Using Fish Communities [M]. London: CRC Press, 1998. 3 - 65.
- [37] Godland R. The concept of environmental sustainability [J]. *Ann. Rev. of Ecol. & Syst*, 1995, 26: 1 - 24.
- [38] Barrett G W. Applied ecology: An emerging integrative paradigm for the 1990s [J]. *ASC Newsletter*, 1993, (1): 37.
- [39] Cairn J J. Restoration ecology [J]. *Encyclopedia of environmental biology*, 1995, 3: 223 - 235.
- [40] 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 [M]. 广州: 广东科技出版社, 1996. 1 - 256.
- [41] Milton S J. A conceptual model of arid rangeland degradation [J]. *Bio-Science*, 1994, 44: 70 - 76.
- [42] Daily G C. Restoring value to the world degraded lands [J]. *Science*, 1995, 269: 350 - 354.

EVALUATION AND MONITORING OF ECOSYSTEM HEALTH

REN Hai¹, WU Jianguo², PENG Shaolin³

(1. South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Department of Life Sciences, Arizona State University, Phoenix, USA; 3. Guangzhou Branch, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China)

Abstract: The concept of ecosystem health is reviewed and its relationship with related ecological disciplines is discussed. Ecosystem health refers to the level of an ecosystem being active, maintaining its organization and autonomy over time, performing its functions normally, and being resilient to stress. The main evaluation components of ecosystem health include vigor, resilience, organization, maintenance of ecosystem services, management options, reduction of external input, damage to neighboring systems, and human health effects. The first three indicators are important and their monitoring models are provided. Based on four primary attributes of ecosystem health—structure, function, dynamics and services, a nested hierarchy that incorporates elements of each attribute at four levels of organization—gene, species - population, community - ecosystem, and landscape - region is proposed. In addition, the relationship between ecosystem health and disturbance, stability of ecosystem, ecosystem management, ecosystem sustainability, ecological rehabilitation are discussed.

Key words: Ecosystem health; Organization; Ecosystem management; Restoration ecology; Hierarchical approach