

生态系统健康评价:方法与方向

马克明¹,孔红梅¹,关文彬²,傅伯杰¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心,北京 100085;2. 北京林业大学,北京 100083)

摘要:生态系统为人类提供了自然资源和生存环境两个方面的多种服务功能。生态系统服务功能是人类生存和发展的基础。同时,一个生态系统只有保持了结构和功能的完整性,并具有抵抗干扰和恢复能力,才能长期为人类社会提供服务。因此,生态系统健康是人类社会可持续发展的根本保证。

生态系统健康是指一个生态系统所具有的稳定性和可持续性,即在时间上具有维持其组织结构、自我调节和对胁迫的恢复能力。它可以通过活力、组织结构和恢复力等 3 个特征进行定义。

影响生态系统健康的原因有很多,多为人类活动所致。例如,污染物排放、非点源污染、过度捕捞、围湖造田、水土流失、外来种入侵和水资源不合理利用等是影响水生态系统健康的主要原因。

评价生态系统健康需要基于功能过程来确定指标,特别是评价其受干扰后的恢复能力,包括其完整性、适应性和效率。生态系统健康评价方法尚处于实验和发展阶段,有必要对现有成果进行及时总结,提出方向,以促进生态系统健康研究的发展。

生态系统健康评价主要包括指示物种和指标体系两种方法。在生态系统健康研究中,指示物种的选择应该谨慎,要综合考虑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。在水生态系统研究中,已被选择的指示物种有,浮游生物、底栖无脊椎动物、鱼类和不同水平生物的综合。

建立生态系统健康评价指标体系大致可以从两方面选择指标,即生态系统内部指标,包括生态毒理学、流行病学、生态系统医学等方面和不同尺度指标的综合;以及生态系统外部指标,比如社会经济指标。但是,其它指标可能也适于进行生态系统健康评价,如景观格局、土地利用变化。

到目前为止,对几乎所有的生态系统类型都进行过健康评价。但是,由于生态系统健康研究是一个新领域,有关它的概念、评价的指示物种和指标体系等方面存在各种争论,生态系统健康评价正在不断的争论中走向成熟。其未来发展方向是结合经济学、社会学和健康科学的定量化生物学途径。

生态系统健康评价的目的不是为生态系统诊断疾病,而是定义生态系统的期望状态,确定生态系统破坏的界限,并在文化、道德、政策、法律、法规的约束下,实施有效的生态系统管理。

关键词:生态系统;健康;评价

Ecosystem health assessment: methods and directions

MA Ke-Ming¹, KONG Hong-Mei¹, GUAN Wen-Bin², FU Bo-Jie¹ (1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2106~2116.

Abstract: Ecosystem supplies many services to human being on two aspects, the natural resources and living environment. Ecosystem service is the basis for the survival and development of human society. Meanwhile, an ecosystem could only supply long-term services when it kept the integrality of structure and function, and had the ability to resist disturbance and the resilience. Therefore, Ecosystem health could ensure ecosystem services, and is the prerequisite for sustainable development of human society.

Ecosystem health refers to the stability and sustainability of an ecosystem. That is, the ability of an

基金项目:中国科学院知识创新项目(KZCX2-405)和国家重点基础研究发展规划(G2000046807)项目

收稿日期:2000-12-28; **修订日期:**2001-08-10

作者简介:马克明(1969~),男,黑龙江肇源人,博士,副研究员。主要从事景观生态学、保护生物学、生态系统健康评价与管理、和非线性生态模型研究。

ecosystem to maintain its organization, self-adjustment, and resilience on time. It can be defined according to vigor, organization, and resilience.

The many results of human activities are the main impacts to ecosystem health. For example, sewage effluence, non-point source pollution, over-fishery, wetland cultivation, soil erosion, invasive species, irrational water use are the main reasons in aquatic ecosystems.

Ecosystem health assessment needs to determine indices based on its functions and processes, especially the resilience after disturbance, which includes the integrity, adaptability and efficiency. However, ecosystem health assessment is still in the process of experiment and developing. It is necessary to review the present results on time, and put forward the future directions in order to promote the development of ecosystem health assessment.

Indicator taxa and indices are the two methods of ecosystem health assessment. However, it should be careful in selecting indicator taxa. The sensitivity and reliability of taxa need to be considered simultaneously, which means we should know how high or low the taxa are in indicating the ecosystem. Indicator taxa selected at present mainly include, plankton, benthic invertebrates, fishes, and the integration of organisms on different levels in aquatic ecosystems.

Parameters on two aspects can be chosen in establishing the indices for ecosystem health assessment. The inner indices of ecosystem, including those in ecotoxicology, epidemiology, and ecosystem medicine, and the integration of indicators on different scales. And the outer indices of ecosystem, for example, the social and economic indices. However, the other indices are also possibly useful in ecosystem health assessment, for example, the landscape pattern, and land use change.

Almost all the types of ecosystems have been assessed by now. However, ecosystem health assessment is still a new research field that disputes existed on its concept, indicator taxa and indices, which is what we should do in the future to promote the assessment. Future direction of ecosystem health assessment is to integrate economics, social science and health science with quantitative biological approaches.

The aim of ecosystem health assessment is not to diagnose sickness, but to define an expected state of the ecosystem and the threshold to disturbance, and implement effective ecosystem management under the constraints of culture, moral, policies, laws and regulations.

Key words: assessment; ecosystem; health

文章编号:1000-0933(2001)12-2106-11 中图分类号:Q149 文献标识码:A

地球上已经不存在未受人类影响的生态系统了^[1]。人类每天制造大量的垃圾和废物,已经危害到地球的每个角落。生态系统的作用不仅是人类的垃圾堆放场,它更重要的贡献在于能够为人类社会提供一系列不可或缺的服务。

生态系统为人类提供了自然资源和生存环境两个方面的多种服务功能^[2]。它不仅包括各类生态系统为人类所提供的食物、医药及其他工农业生产原料,更重要的是它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,净化环境,维持大气化学的平衡与稳定等^[3]。人们已经认识到,生态系统服务功能是人类生存与现代文明的基础。

生态系统健康是保证生态系统服务功能的前提。一个生态系统只有保持了结构和功能的完整性,并具有抵抗干扰和恢复能力,才能长期为人类社会提供服务。因此,生态系统健康是人类社会可持续发展的根本保证。

1 生态系统健康的概念

Schaeffer 等首次探讨了生态系统健康的度量问题^[1],但是没有给出明确定义。Rapport 首次论述了生

态系统健康的内涵^[1]。认为生态系统健康(Ecosystem health)是指一个生态系统所具有的稳定性和可持续性,即在时间上具有维持其组织结构、自我调节和对胁迫的恢复能力。

生态系统健康可以通过活力、组织结构和恢复力等 3 个特征进行定义。活力(Vigor)表示生态系统的功能,可根据新陈代谢或初级生产力等来测度;组织结构(Organization)是根据系统组分间相互作用的多样性及数量来评价;恢复力(Resilience)也称抵抗力,是指系统在胁迫下维持其结构和功能的能力^[6]。

生态系统健康概念虽然只有十几年的历史,却受到了广泛关注。多次举办过有关的国际会议,成立了多个专门的学会组织,并且出现了两个专门以生态系统健康命名的国际杂志^[7]。到目前为止,对几乎所有的水生态系统类型——海洋、海岸、湿地、河流、河口和湖泊,以及部分陆地生态系统类型——森林、草原等,进行了研究。

加拿大在生态系统健康研究方面走在了世界前列,环境部、卫生部和海洋渔业部合作在 6a(1994~2000)时间内花费 1.5 亿加元在北美大湖区开展退化生境恢复、污染防治、保护人和生态系统健康^[8]。美国也正在开展全国性的生态系统健康状况评价。我国这方面研究很缺乏,刚刚起步。

目前,生态系统健康评价还处于实验和摸索阶段,尚未形成一套成熟的方法。很有必要及时进行总结,指出未来发展趋势,以利其今后发展。本文以生态系统健康研究最为丰富的水生态系统为例进行介绍。

2 影响生态系统健康的原因

各种形式的人类活动是影响生态系统健康的主要原因。如,森林砍伐、过度放牧等。就水生态系统而言,主要包括以下几个方面:

污染物排放:工业废水和生活污水中含有多种有毒污染物和过量养分,它们对生态系统健康产生不同程度的影响。Munawar 等在研究排污对加拿大多伦多滨水区(安大略湖)生态系统健康的影响时发现,一系列非本地的浮游植物对复杂营养和污染物状况都具有生理响应和生产力变化,营养物质和有毒污染物之间具有复杂的相互作用,最终决定生物健康^[9]。Evans 探讨了多种有毒污染物对加拿大大湖区生物的生态毒理作用和对生态系统健康的影响^[10]。

非点源污染:现代农业中农药和化肥的大量施用,导致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。这方面的研究实例很多,已经成为国际研究热点。我国近年来也在此方面大力开展研究和管理。

过度捕捞:人类对鱼类资源的需求激增,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。因为鱼类是水生态系统中营养顶级的物种,鱼类种群数量的降低,直接影响到它的下一营养级种群的存活状态,比如,可能导致一些鱼类食用的浮游生物和水草增加,甚至湖泊的富营养化。另一方面,也会影响到以鱼类为食的水鸟的生存。总之,生态系统中一个重要组分的变化,将会带来一系列不良影响。

围湖造田: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,破坏了水生态系统的完整性,严重威胁水生态系统的存续。这种行为的生态影响是毁灭性的。

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、透明度以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。我国在水土流失的产生、危害及控制方面的研究工作相当丰富,但是在泥沙对水生态系统影响方面的研究相对薄弱。

外来种入侵: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。Leach 对北美大湖生态系统的研究证实了这一点^[11]。但是,总体上这方面的研究目前还比较欠缺,但已经引起全球(包括我国)生态学家的重视。

水资源不合理利用:Quibell 和 Weston 研究流域水资源利用的增加对湖泊生态的影响时发现,湖泊的盐分含量与淡水供给密切相关^[12]。它在干季的盐分含量可达海水的好几倍,该系统可以忍受高盐分,并在此之后能够恢复。更重要的是,该湖泊存在几种盐分状态,每个状态对应于一种生态系统功能。不同状态之间的快速转换使系统一直处于不稳定的状态,导致生态系统整体的生物量较低、生命力减退。

总体上,水生态系统的生态毒理学研究已经比较丰富,但是,象过度捕捞、围湖造田、水土流失、外来种入侵和流域水资源利用这类人类活动导致的生态系统健康下降,以往研究中考虑得不多,现在正在受到重视。影响其他类型生态系统健康的因素与此不尽相同,需要依据特定的资源利用方式确定。

3 生态系统健康评价方法

评价生态系统健康需要基于功能过程来确定指标,特别是评价其干扰后的恢复能力,包括其完整性(Integrity)、适应性(Edaptabiliy)和效率(Efficiency)^[14]。Schaeffer 等首次探讨了生态系统健康的度量问题^[1]。

生态系统健康评价除了需要对其小尺度生态过程进行研究监测外,从景观尺度进行环境质量监测也是必不可少的步骤。将遥感、地理信息系统和景观生态学原理等宏观技术手段与地面研究紧密配合,通过景观结构变化了解其功能过程。例如,景观敏感性与土地利用变化关系密切,因此可以通过土地利用变化评估环境质量变化^[11]。

以水生态系统为例。根据水生态系统健康研究的现状,可以总结出两种评价方式:即指示物种法和指标体系方法。实际上,生态系统健康评价的最佳途径是微观与宏观相结合的综合性研究。

3.1 指示物种

鉴于生态系统的复杂性,人们经常需要采用一些指示类群(Indicator taxa)来监测生态系统健康^[15]。常用的水生态系统健康评价的指示类群包括:

3.1.1 浮游生物

水表层的小生物群落,包括病毒、细菌、自养浮游生物(Picoplankton, nanoplankton)等亚显微结构是水生态系统的重要组成部分,可以用于监测水生态系统健康^[16]。

纤毛原生生物也可以用作水生态系统健康的指示物^[17]。具体方法有 2 个:群落评价和毒理实验。群落评价一般通过取样种群特征和占居率,与原始系统进行比较。因为纤毛原生生物的丰富度、多样性和生物量与生态系统营养状况相关。毒理实验的设计采用了一系列生态系统健康指标,包括呼吸率、生长率和趋药性(Chemotactic)反应。

微生物环(Microorganism loop)是一个敏感、快速和可以早期预警人类压力的生物指标^[18],是湖泊生态系统健康评价和恢复中非常缺乏的生态技术^[19]。

采用这些小尺度、敏感、实用、廉价和自动化的生物技术监测生态系统健康已经取得了明显进展^[20],但是比较适宜的指示生物是接合体(Gametes)、胚胎(Embryos)和其它生命的初级阶段。

3.1.2 底栖无脊椎动物

生态系统观点是理解和探究自然系统中干扰效应的基础,确定底栖群落的结构和动态是理解水生态系统状态和演变过程的关键。Reice 和 Wohlenberg 探讨了采用底栖大型无脊椎动物进行生态系统健康评价的优点^[21]。

从采用底栖无脊椎动物指示生态系统健康的研究中可以总结出 3 个普适性的方法^[22]:

- 1)有机污染程度方法:需要详细了解生物种类,对污水排放的影响研究最合适。
- 2)多样性指标:不需要详细了解物种,但是忽略了重要物种的信息。
- 3)生物指标:以上两者相结合。

应用多元分析技术及与关键环境因子相关的底栖群落结构的研究已经取得了明显进展。应用这些技术可以确定一系列环境状态的参照群落,预测一个新地点出现的底栖群落及其与预期群落类型的差异。生物指标可以替代传统的化学方法作为环境标准和管理的目标。

但是,采用底栖无脊椎动物的功能特征进行生态系统健康测定还处于初级阶段。将来,生态系统健康的功能测定,比如长期的毒理和胁迫效应,应该在评价过程中加强应用。

3.1.3 营养顶级的鱼类

营养顶级的鱼类反映了整个水生态系统的环境状况。因为,它们一方面对化学污染比其它种群更加敏感;另一方面,由于处于食物链的顶级,综合反映了其它生物的变化,因此是生态系统健康监测的很好的指

示种^[21]。

最简便的方法是跟踪鱼类种群对环境退化的响应。重要指标包括:平均年龄、产卵能力和条件因素,即:捕捞、补充、多种压力、食物限制和生境变化^[21]。

此类研究由来已久, Sonstegard 和 Leatherland 就指出银大马哈鱼可以指示北美大湖区的生态系统健康^[22]。Edwards 等采用蛙鱼为指示种来监测湖泊贫营养化(Oligotrophic)^[26]。目前,采用鱼类监测水质和水生态系统健康已经成为一种常用方法。

3.1.4 不同组织水平生物的综合运用

综合运用不同的生物组织水平,亚细胞、细胞、生物个体、种群、群落和生态系统的相关信息,进行水生态系统健康评价是比较全面的方法,也是一个很有前途的研究方向。

在生态毒理研究中,生物化学反应与种群和群落变化的相关性还不清楚,需要研究化学污染物与个体、种群、生态系统响应的关系,应该对生物个体对化学污染的初级和次级响应进行测定^[23]。

通过底泥毒性化学分析、组织化学分析、病理分析、和群落结构的综合研究,可以提供不同生物组织水平,亚细胞、细胞、生物个体、种群、群落和生态系统的相关信息,通过与对照地点比较,并结合经验判断得到了毒理效应的临界值,能够对生态系统健康做出客观而全面的评价^[27]。

3.1.5 存在的问题

虽然采用生物类群指示生态系统健康的研究取得的很大进展,成为生态系统健康研究的常用的基本方法,但是仍然存在着一些问题。比如,指示物种的筛选标准不明确,有些采用了不合适的类群。

Hily 和 Merenlender 在研究了目前文献中提出的筛选标准之后认为,这些标准并不一致^[25]。而且,生物保护文献中提出的作为生态系统健康指示的 100 种脊椎动物和 32 种无脊椎动物,很少有哪个脊椎动物能够符合多个标准。因为它们中的很多物种都具有很强的移动能力,对胁迫的耐受程度比较低,与生态系统变化的相关性比较弱。大多数无脊椎动物也同样缺乏与生态系统变化的相关性,但是满足其它的选择标准。然而,用于指示生态系统健康的无脊椎动物经常是分类等级比较高,且包括了很多物种,因此难于测定每个物种的作用,同时这些物种中有些可能不是必需的,有些甚至可能是不合适的。针对这些问题,他们提出了一个逐步的筛选过程。

另外,一些监测参数的选择不恰当。例如,光合作用参数。Makarewicz 对 33 个湖泊学指标,包括光合作用参数(Pmax 和 Alpha),在安大略湖岸带观测了 2a^[28]。结果发现,温度对光合作用参数的影响很大,达到 25%。并且,由于大量的参数相关或对光合作用的影响不确定,营养状况不同的湖泊也出现了相似的光合作用。因此,光合作用参数不适于作为生态系统健康指标。

可见,在生态系统健康研究中,指示物种和指标的选择应该谨慎,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。

3.2 指标体系

前面介绍的生态系统健康评价的指示类群方法虽然简便易行,但存在一些问题,比较明显的起码有两点:1)应该选择不同组织水平的类群;2)应该考虑到不同的尺度。因此,必须建立指标体系对大量的复杂信息进行综合。比较早的完整的生态系统健康指标体系是由 U. N. Environmental Program (UNEP) 召集,1992 年在日内瓦建立的海洋生态系统健康指标体系^[29]。

生态系统健康的评价技术需要结合物理、化学、和生物的方法,应该借鉴一些常规的化学、湖沼学、生理学、生态学和毒理学手段。同时,必须超越传统途径,发展创新性的、敏感的、自动化程度比较高的和节省费用的方法,包括采用计算机辅助技术。归纳起来,目前建立水生态系统健康评价的指标体系主要有以下 5 种方法:

3.2.1 生态毒理学方法 人们认识到,采用化学指标监测污染物对生物的影响存在不确定性,进而转向强调环境的物理和化学指标与生物健康指标相结合,因为生物群落是反映整个环境条件的准确指标^[30]。基于毒理学——流行病学、简化论、因果论、以及生物标记方法,和生态学——生物和环境关系的研究方法,可以对水生态系统健康进行综合评价^[31]。这样的分层次综合评价不但能够完善野外调查和研究方案设计,

并且对数据的解释更加合理。

依据生态毒理学建立评价指标体系,首先需要考虑一些污染物的特征指标,然后需要考察生物对污染物的反应指标;最后将两者相结合筛选出具有代表性和综合性的指标建成指标体系。

污染物辨别:辨别污染物来源可以采用瞬时的(摄取和呼吸)和长期测定(繁殖和存活)相结合的方法进行^[17]。瞬时实验应该结合重要物种,如水蚤和其它物种,估计污染物对浮游动物群落的影响。通过物质平衡分析,将群落的生物测定进行组合以近似代表对生态系统的测定。然后,通过几种生物测定方法,检测高浓度混合物的毒性对生物生理过程的刺激。最终,保存详细的物种、混合毒物和生理反应资料,使用它们去简化对生物测定的解释,如水蚤类浮游动物生活史特征(早期繁殖、高净繁殖率)的变化。通过这种长期测定,可以检验群落的生态毒理学反应。

病态诊断:生物对污染物的响应开始于个体,进而影响种群过程和群落的结构和功能^[13]。污染物影响首先表现为对分子及其生物化学特性的损伤。细胞水平的技术能够帮助说明毒理效应,而在更高组织水平的综合可以了解生物生长能力。因此,通过实验室检验与就地研究相结合,在监测生理破坏的基础上,能够预测种群水平的效应,甚至更高组织水平——群落水平的生态效应。

这样,在水生态系统健康研究中,监测生态系统的食物网参数非常必要,特别是微生物食物网。微生物在指示水生态系统的多种营养方式、动态和整体景象研究中具有重要意义和价值^[18]。

Xu 应用营养状态指标(Trophic state index)、多样性指数(Diversity index)、焓(Exergy)、结构焓(Structural exergy)、和浮游植物缓冲能力(Phytoplankton buffer capacity),评价了富营养化对巢湖生态系统健康的损害,发现这些指标的季节变化可以分别指示生态系统的健康变化^[19]。

Xu 等评价了淡水生态系统在四个化学污染物(酸化、铜、油和杀虫剂)污染下的结构、功能和系统症状,基于焓、结构焓和浮游植物缓冲能力提出了一组全面的用于评价化学压力影响淡水生态系统健康的生态指标体系,并成功用于评价湖泊生态系统健康^[25]。

进一步, Xu 等提出了两个描述巢湖生态系统磷的食物网动态模型^[16]。一个考虑了大型植物,另一个没有考虑。两个模型中采用了生态系统健康的指标体系,包括焓、结构焓、浮游动物和植物生物量比例、以及 Secchi Disc 深度的透明度。结果揭示出,巢湖生态系统的大型植物恢复会降低浮游植物的生物量,增加焓、结构焓、透明度、 R_{PZDA} 和鱼类生物量,说明大型植物的恢复可以调节湖泊的生物组成结构,提高湖泊生态系统健康。

微生物时间序列分析方法也可以用于河流健康的早期预警和诊断^[27]。

综上所述,采用多种方法而不仅仅是某一种测量的指标体系进行生态系统病态的探测和诊断才是明智的选择^[38]。该指标体系应该满足 3 个标准:(1)能够诊断生态系统的病理变化;(2)能够用来预警生态系统崩溃;(3)能够反映生态系统完整性。这样,结合干扰输入变化与症状时空变化将有助于理解生态系统的崩溃和复原。

3.2.2 流行病学方法 生态系统健康是与人体健康的类比,因此人类流行病学和动物流行病学是最早用于环境健康研究的方法^[37]。

最近引入的兽医学方法评价河流健康更加具有可操作性^[40]。因为,河流与动物相似,具有多种形式,并且不能对生病进行抱怨。人类对河流的干扰也会因为我们所期望的河流用途和关注其健康的原因的变化而变化。把大量的河流特征用来进行河流健康综合评价还存在很多问题,但是,基于关键生态过程进行评价可能更加准确。在澳大利亚悉尼附近的河口和淤泥生境对红树林进行的案例研究证实了这一点^[41]。以重要生态过程,如分解、补充、捕食者-食关系等为基础,如红树叶的采食率和分解率、藻类对气根的占据、以及立地价值的估计,能够很好地评价生态过程的速率。

由于不同的测度方法会得到不同的结果,如何综合这些指标去解释问题,尚需探讨。但是这些测度方法在环境监测和管理上具有潜在的应用价值。

3.2.3 生态系统医学 当前我们主要关注的是严重受损环境的症状,但是还没有提出很好的指标体系进行早期的预警和诊断。

一个全新概念——生态系统医学(Ecosystem medicine)可用于生态系统健康评价^[42]。它是医学与环境研究的一个类比。可以从医学概念中获得综合认识受胁迫生态系统行为的途径,比如(1)受胁迫生态系统的症状;(2)生态系统健康诊断;(3)治疗草案;(4)预防性的生态系统药物。

其实,在生态系统健康研究过程中,特别是在治疗草案设计和风险评价过程中,有很多方面可以向医学学习。

3.2.4 经济学指标与生态指标相结合 人类活动、人与环境的关系是生态系统健康评价的基础。因此,生态系统健康,除了可以采用系统本身的生态毒理学指标进行评价,还可以选择区域的社会、经济、文化方面的指标进行评价。这种外部指标较之生态毒理学指标更加宏观全面,可直接用于实际的生态系统管理。

经济学指标与生态指标相结合:研究表明,生物地球化学和社会经济两类指标在环境退化条件下相互影响,环境健康指标体系的特性随管理措施的变化而变化^[43]。在评价环境适宜性、动态变化趋势、环境退化预警、或者诊断病因时,需要基于不同的指标体系和不同数据。在此,选择指标进行管理时,需要权衡预期特征、预期成本和信息质量等各个方面。当决定为了什么目的、收集什么信息时,应该首先描述指标体系及其与管理目标的适宜程度。因此,建立区域环境健康的监测指标体系,应该借鉴管理科学中主要经济指标体系(Leadingeconomic indicators)方法。

结合价值评价的趋势模拟方法:Magcau等提出一个评价生态系统健康的全面的和可操作的方法^[44]。全面性体现在,该方法基于一系列生态演替过程中的常见趋势;可操作性体现在,刻画这些趋势的数量化指标易于计算。他们提出的仿真模型,能够通过不同演替阶段的输出来刻画生态系统的发展方式,并检验了一组基于系统水平信息的指数的预测能力。这些指标可以跟踪生态演替趋势,因此这些趋势的逆向变化便揭示了人类胁迫下的生态系统响应。这些指标的表现还可以通过采用更加动态的模型技术进行提高。进一步,他们介绍了没有市场价值的生态系统组分的价值评估方法,并加入到生态系统健康评价中。这个结合了价值评价技术的生态系统健康评价证实,人类胁迫对区域生态系统影响的模拟研究是非常有价值的,将有助于人们更好地理解和管理生态系统。

3.2.5 不同尺度信息的综合运用 综合运用不同尺度的信息能够比较全面地对生态系统健康进行评价。

例如,在污染综合评价时,多尺度的化学、毒理学和群落学结构指标监测能够带来多种信息。在小尺度(Waukegan Harbor, U. S. A.)通过研究群落结构了解了污染物的空间分布,但是结果缺乏可比性。在中尺度(Toronto Harbour, Canada)发现了更大程度的变异,能够用于立地分级和优选,却损失了细节。在大尺度(National Status and Trends Program, U. S. A.),数据具有了更强的可比性,可以用于区域差异研究,但损失了更多的细节。最后, Ross 和 Munawar 通过巢式评价方法将这些信息进行综合,解决了这些问题^[45]。

综上所述,建立生态系统健康评价指标体系大致可以从两方面选择指标,即生态系统内部指标,包括生态毒理学、流行病学和生态系统医学方面;以及生态系统外部指标,比如社会经济指标。但是,其它指标可能也适于进行生态系统健康评价。比如, Malley 和 Mills 提出的全湖实验方法^[46],已经在加拿大安大略湖西北部的实验湖区(Experimental Lake Area)成功进行了应用。另外, Marshall 等提出了评价大尺度——国家和区域生态系统健康的指标体系^[47]。这个以可持续发展思想为指导(Our Common Future)、基于生态学的指标体系,虽然是针对加拿大建立的,也同样能够应用于局域、洲际、到全球尺度的生态系统长期监测。总体上,以生态学和生物学为基础,结合社会、经济和文化,综合运用不同尺度信息的指标体系应该是未来生态系统健康评价的发展方向。

4 争论与方向

生态系统健康研究是一个比较新的领域,在诸多方面已经取得了重要进展,但是仍然存在着各种各样的批评意见。生态系统健康研究正在不断的争论中完善和发展。

4.1 对生态系统健康概念的怀疑

Suter 说,“人类希望健康,同样也想保持生态系统健康,于是一个生态系统健康的比喻出现了。这是环境学家的一个错误”^[48]。(1)这个比喻同时误解了生态系统学与健康科学。生态系统不是生物,不会象生物一样生活,也不会拥有生物的健康特性。生态系统健康与医生和健康风险评价人员的健康概念不同,缺乏

可操作性:医生会预测、诊断和治疗疾病,但不会试图去建立健康指标体系。(2)试图使生态系统健康的概念具有可操作性,势必产生包含多种变量的指标体系。这种指标体系没有任何实际意义,不能用来预测,也就不能用于解决实际问题:他们没有诊断能力,一部分指标的作用可能会被另外一部分抵消。而且指标值高低的原因也不清楚。指标体系的唯一优点就是,把生态系统对多种干扰的复杂反应变为一个具有可靠名称的数字。他提出的办法是,评价生态系统的一系列真实反应,通过诊断病因,预测未来状态,将不同的处理结果进行比较。

Wicklum 和 Davics 也认为生态系统健康和生态系统完整性的概念在生态上是不适宜的^[49]。生态系统健康一词是基于人类健康的一个蹩脚类比,要求建立一个最佳的自我平衡过程,从而保持生态系统处在一个固定的最佳状态。与此相似,生态系统完整性也不是一个客观、可量化的生态系统特征。健康和完整性不是生态系统固有的特征,并且不能够得到经验观察和生态学理论的支持。

可见,有些人对生态系统健康概念的准确性还存在疑问,但不可否认这个概念所涵盖的研究问题和领域是有价值的,在生态系统管理实践中无法回避。

4.2 否认生态系统存在健康标准

Rapport 认为,与人类健康相类比^[40],生态系统似乎也应该存在健康标准,即存在最佳状态(Optimal states)^[50]。

Calow 对此持反对意见^[50],认为“生态系统不是自我复制的整体,也不存在遗传记忆,因此这种选择不合理的,是没有意义的”。“如果这样与人类健康进行类比,那么就不仅是误导,而是使之毁灭”。

Rapport 诚恳接受批评,认为最优化概念在生态系统水平无效^[51]。“很明显,生态系统与一般生物或者高级生物不同”。“一个有用的检验生态系统健康的研究,是通过检验严重受损的生态系统与完整的生态系统之间的特征差异”。

因此,“健康的生态系统可以定义为长期的持续性,但不是一般控制论意义上的稳定状态。生态系统健康标准可以通过这些状态特征和过程来确定,通过对原始和受损生态系统特征的研究相结合完成”^[51]。

实际上,生态系统本身不存在健康与否的问题,之所以关注生态系统健康是因为生态系统只有处于良好状态才能为人类提供各种服务功能。说到底,生态系统的健康标准是一个人类标准^[52]。生态系统健康研究遵循了拉马克学说——地球是一个由物质、生命和思想构成的全球系统^[53]。

4.3 生态系统健康评价的应用存在问题

Steedman 从一系列把生态系统健康当作自然资源管理目标并进行实际应用的研究中概括出了一些基本原理^[54]。但是,他指出,“即使生态系统健康的概念具有应用价值,但到目前为止,这些原理还没有被从事这方面研究和管理的专家正式说明,也不完整。生态系统健康的概念还没有与一系列实用技术联系起来”。

Wrona 和 Cash 指出,虽然环境管理的生态系统途径被公认为是适宜管理策略的基础。但是,只有环境影响评价专家认为这是一个重要发展,而这个途径本身并没有提供实际信息^[55]。比如,在评价和管理生态系统时,应该提出什么问题,使用什么工具。因此,生态系统健康的概念对于生态系统管理人员来说毫无价值。他们建议,生态系统评价应该发展适用于特定生态系统的框架。“最重要的是,考虑生态系统本身的结构和功能。在此基础上,再明确区分特定系统的人类胁迫,才可以辨识出那些最危险的组分和那些最应该重视的问题”。“应该研究环境胁迫与生态参数变化的重要关联,应用这些理解去发展综合了适宜生态指标的管理对策”。

应该承认,由于生态系统健康研究仍处于初级阶段,目前应用研究比较欠缺,并且经常在实际生态系统管理活动中出现偏差。但是,每个新概念和新理论在发展中都必须经历这样的过程,也正是今后的努力方向。

4.4 发展方向

从生态系统健康研究的现状,大致可以总结出它的两个发展方向。1)传统硬科学的数量化或半数量化的生物学途径;2)通过结合硬科学的定量化和半定量化的软科学方向^[56]。

硬科学方向越来越受到重视。因为,退化生态系统的保护和恢复迫切需要生态学技术,以期获得对尚不明确的生态恢复期望状态的综合评价。主要生物学途径包括,生物指标、物种丰富度、多样性和均匀度、多元分析方法、生物完整性指数、鱼类受威胁的生物指标、占湖沼学记录和多种规律/多种营养等——生态系统结构和功能途径。

由于软科学方向对生态系统途径、生态完整性和生态系统医学的定义还比较模糊,因此应该采取一个更加全面和完整的方式,把硬科学的定量化和半定量能力与现实和适当的软科学相结合——综合性途径。在这个思想指导下,生态系统健康研究取得了一些进展。

一个实用的综合性环境评价途径要结合生态系统学、健康科学和社会科学^[37]。它们都扮演着重要的角色:生态系统学提供了有关生态系统在胁迫和干扰的情况下的复杂动态信息;健康科学提供了病理的系统诊断、疾病分类、以及防治和恢复的方法;社会科学则提出了作为健康评价的一部分——人类价值的重要性。

由于生态系统对胁迫的响应规律非常复杂,不可能在完全理解其内在变化机制的基础上进行健康评价。但是,通过不同管理措施下生态系统服务功能的损益分析,可以对水陆生态系统健康实现整体性评价。这样,指标体系中需要对生态系统功能及其社会价值的修复过程进行考虑。

这种方法在 Laurentian Lower Great Lakes 生态系统和加拿大东部超采森林生态系统的变化过程研究中得到了应用^[37]。结果显示,文化对这两类生态系统的影响导致了具有很高价值的生态系统服务的损失。虽然这些损失通过采用新技术在剩余的低价值资源的商业利用中得到部分补偿,但是,这个过程本身还是破坏了生态系统健康,加重了生态系统退化过程。

据介绍,欧盟在全欧洲引入的流域管理方法,将对生态系统保护和恢复产生积极影响^[36]。他们将要实施的生态系统健康评价不但结合了科学性与价值判断,而且强调了公众参与的重要性。并且提出减税政策,对生态系统保护行为进行鼓励,具有很强的可操作性。

总之,发展生态系统健康评价应该以生态学、经济学和人类健康研究为基础,加深理解人类活动、环境变化和生态服务降低,以及由此造成的对人类健康、经济发展和人类生存的威胁之间的相互关联,将人类的文化价值取向与生物生态学过程进行综合^[6]。

我们应该看到,生态系统健康评价的目的不是为生态系统诊断疾病,而是在一个生态学框架下,结合人类健康观点对生态系统特征进行描述——定义人类所期望的生态系统状态。我们要定义一个(最小/最大)期望的生态系统特征,确定生态系统破坏的最低和最高阈限,在明确的可持续发展框架下进行保护工作^[35]。并在文化、道德、政策、法律、法规的约束下,实施有效的生态系统管理。

参考文献

- [1] Cairns J Jr. and Munawar M(ed). Ecosystem health through ecological restoration; barriers and opportunities. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1994, **3**(1): 5~14.
- [2] Constanza R *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, **386**: 253~260.
- [3] Cairns J Jr. and Niederlehner BR. Ecosystem health concepts as a management tool. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1995, **4**(2): 91~95.
- [4] Schaeffer DJ, Henricks EE and Kerster HW. Ecosystem health; 1. Measuring ecosystem health. *Environmental Management*, 1988a, **12**: 445~455.
- [5] Rapport DJ. What constitute ecosystem health? *Perspectives in Biology and Medicine*, 1989, **33**: 120~132.
- [6] Rapport DJ, Constanza R and McMichael AJ. Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, **13**(10): 397.
- [7] 曾德慧, 姜凤岐, 范志平, 等. 生态系统健康与人类可持续发展. *应用生态学报*, 1999, **10**(6): 751~756.
- [8] Anon W. Canada to spend \$ 150 million on Great Lakes program. *Water Environment and Technology*, 1994, **6**(7): 28.
- [9] Munawar M, Munawar IF, McCarthy L, Page W and Gilron G. Assessing the impact of sewage effluent on the ecosystem health of the Toronto Waterfront (Ashbridges Bay), Lake Ontario. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1993, **2**(4): 287~315.

- [10] Evans MS. Toxic contaminants and Great Lakes ecosystem health: Current understandings and strategies for improved assessments. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1993, **2**(2): 87~93.
- [11] Leach JH. Non indigenous species in the Great Lakes: Were colonization and damage to ecosystem health predictable? *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1995, **4**(2): 117~128.
- [12] Quibell G and Weston D. Managing catchment water use to ensure ecosystem health in a subtropical coastal lake: Lake St. Lucia South Africa. *Lake and Reservoir Management*, 1994, **9**(2): 106.
- [13] Waltner-Toews D. Ecosystem health- a framework for implementing sustainability in agriculture. *BioScience*, 1996, **46**(9): 686~689.
- [14] O'Neill RV, Hunsaker CT, Jones KB, Riitters KH, Wickham JD, Schwartz PM, Goodman IA, Jackson BI, and Ballarigeon WS. Monitoring environmental quality at the landscape scale. *BopScience*, 1997, **47**(8): 513~519.
- [15] Hilty J. and Merenlender A. Faunal indicator taxa selection for monitoring ecosystem health. *Biological Conservation*, 2000, **92**(2): 185~197.
- [16] Leppard GG and Munawar M. The ultrastructural indicators of aquatic ecosystem health. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1992, **1**(4): 309~317.
- [17] Lynn DH and Gilron GL. A brief review of approaches using ciliated protists to assess aquatic ecosystem health. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1992, **1**(4): 263~270.
- [18] Munawar M, Munawar IF, Weisse T, Leppard GG and Legner M. 1994. The significance and future potential of using microbes for assessing ecosystem health: The Great Lakes example. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1994, **3**(4): 295~310.
- [19] Munawar M, Munawar IF, Ross P and Dermott R. Exploring aquatic ecosystem health; A multi-trophic and an ecosystemic approach. *OME 36th Conference of the International Association for Great Lakes Research*, June 4-10, 1993. *Program and Abstracts*, 1993, 142.
- [20] Wells PG. Biomonitoring the Health of Coastal Marine Ecosystems—The Roles and Challenges of Microscale-Toxicity Tests. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, **39**(1~12): 39~47.
- [21] Reice SR and Wohlenberg M. Monitoring freshwater benthic macroinvertebrates and benthic processes: Measures for assessment of ecosystem health. In: Rosenberg DM and Resh VH eds, *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates*. Publisher: Chapman and Hall, New York (USA). 1993, 287~305.
- [22] Reynoldson TB and Metcalfe-Smith JL. An overview of the assessment of aquatic ecosystem health using benthic invertebrates. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1992, **1**(4): 295~308.
- [23] Hodson PV. Indicators of Ecosystem Health at the Species Level and the Example of Selenium Effects on Fish. *Environmental Monitoring and Assessment EMASDH*, 1990, **15**(3): 241~254.
- [24] Munkittrick KR, Dixon DG. Holistic Approach to Ecosystem Health Assessment Using Fish Population Characteristics. *Hydrobiologia*, 1989, **188/89**: 123~135.
- [25] Sonstegard RA and Leatherland JF. Great lakes coho salmon as an indicator organism for ecosystem health. 2. International Symposium on Responses of Marine Organisms to Pollutants. *Marine Environmental Research*, 1983, **14**: 1~4.
- [26] Edwards CJ, Ryder RA and Marshall TR. Using lake trout as a surrogate of ecosystem health for oligotrophic waters of the Great Lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 1990, **16**(4): 591~608.
- [27] Chapman PM, Power EA and Burton GA. Integrative Assessments in Aquatic Ecosystems. in: *Sediment Toxicity Assessment*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida. 1992, 313~340.
- [28] Makarewicz JC. Photosynthetic parameters as indicators of ecosystem health. *Journal of Great Lakes Research*, 1991, **17**(3): 333~343.
- [29] Shugart LR. Biological markers and indicators of marine ecosystem health. *Foreign trip report*, November 21~28, 1992. ORNL/FTR-4509.12.
- [30] Roux DJ, Van Vliet HR and Van Veele M. Towards integrated water quality monitoring: Assessment of ecosystem health. *Water S. A.*, 1993, **19**(4): 275~280.
- [31] Munkittrick KR and McCarty LS. An integrated approach to aquatic ecosystem health: Top-down, bottom-up or middle out? *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1995, **4**(2): 77~90.
- [32] McNaught DC. Zooplankters as indicators of ecosystem health: Past findings and future directions. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1992, **1**(4): 271~281.
- [33] Krantzberg G. Ecosystem health as measured from the molecular to the community level of organization, with

- reference to sediment bioassessment. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1992, **1**(4): 319~328.
- [34] Xu FL. Ecosystem health assessment of Lake Chao, a shallow eutrophic Chinese lake. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 1996, **2**(1~2): 101~109.
- [35] Xu FL, Joergensen SE and Tao S. Ecological indicators for assessing freshwater ecosystem health. *Ecological Modelling*, 1999a, **116**(1): 77~106.
- [36] Xu FL, Joergensen SE, Tao S and Li BG. Modelling the effects of ecological engineering on ecosystem health of a shallow eutrophic Chinese lake (Lake Chao). *Ecological Modelling*, 1999b, **117**(2~5): 239~260.
- [37] Holder-Franklin MA and Franklin M. River bacteria time series analysis: A field and laboratory study which demonstrates aquatic ecosystem health. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1993, **2**(4): 251~259.
- [38] Rapport DJ. Challenges in the detection and diagnosis of pathological change in aquatic ecosystems. *Journal of Great Lakes Research*, 1990, **16**(4): 609~618.
- [39] Schaeffer DJ and Novak EW. Integrating epidemiology and epizootiology information in ecotoxicology studies. 3. Ecosystem health. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1988, **16**(3): 232~241.
- [40] Fairweather PG. State of environment indicators of 'river health'; exploring the metaphor. *Freshwater Biology*, 1999a, **41**(2): 211~220.
- [41] Fairweather PG. Determining the 'health' of estuaries; Priorities for ecological research. *Australian Journal of Ecology*, 1999b, **24**(4): 441~451.
- [42] Rapport DJ. *State of Ecosystem Medicine. Contaminant Effects on Fisheries*, John Wiley and Sons, New York, 1984, 315~324.
- [43] Cairns J Jr, McCormick PV and Niederlehner BR. A proposed framework for developing indicators of ecosystem health. *Hydrobiologia*, 1993, **263**(1): 1~44.
- [44] Mageau MT, Costanza R and Ulanowicz RE. Quantifying the trends expected in developing ecosystems. *Ecological Modelling*, 1998, **112**(1): 1~22.
- [45] Ross PE and Munawar M. Small, medium and large scale assessments; What do they tell us about ecosystem health? 37th Conference of the International Association for Great Lakes Research and Estuarine Research Federation; Program and Abstracts. *Iaglr. Buffalo, NY(USA)*, 1994, 166.
- [46] Malley DF and Mills KH. Whole-lake experimentation as a tool to assess ecosystem health, response to stress and recovery: The Experimental Lakes Area experience. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1992, **1**(3): 159~174.
- [47] Marshall IB, Hirvonen H and Wiken E. National and regional scale measures of Canada's ecosystem health. In: Woodley S, Kay J and Francis G eds, *Ecological Integrity and the Management of Ecosystems*. Publisher: St Lucie Press, Boca Raton, FL(USA), 1993, 117~129.
- [48] Suter G WIL. Critique of ecosystem health concepts and indexes. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1993, **12**(9): 1533~1539.
- [49] Wicklum D and Davies RW. Ecosystem health and integrity? *Canadian Journal of Botany*, 1995, **73**(7): 997~1000.
- [50] Calow P. Ecosystems not optimized. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1993, **2**(1): 55.
- [51] Rapport DJ. Ecosystems not optimized; A reply. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1993, **2**(1): 57.
- [52] Ryder RA. Ecosystem health, a human perception: Definition, detection, and the dichotomous key. *Journal of Great Lakes Research*, 1990, **16**(4): 619~624.
- [53] Vallentyne JR and Munawar M. From aquatic science to ecosystem health: A philosophical perspective. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1993, **2**(4): 231~235.
- [54] Steedman RJ. Ecosystem health as a management goal. *Journal of the North American Benthological Society*, 1994, **13**(4): 605~610.
- [55] Wrona FJ and Cash KJ. The ecosystem approach to environmental assessment: Moving from theory to practice. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1996, **5**(2): 89~97.
- [56] Munawar M and Malley DF. The ecosystem health concept: progress and future needs. 37th Conference of the International Association for Great Lakes Research and Estuarine Research Federation; Program and Abstracts. (Summary only). Publisher: Iaglr, Buffalo, NY(USA), 1994, 166.
- [57] Rapport DJ. Ecosystem services and management options as blanket indicators of ecosystem health. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1995, **4**(2): 97~105.
- [58] Pollard P and Huxham M. The European Water Framework Directive; a new era in the management of aquatic ecosystem health? *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 1998, **8**(6): 773~792.