

文章编号:1001-8166(2011)08-0887-10

生态系统健康:理论/概念与评价方法*

孙 燕¹,周杨明²,张秋文¹,易善桢¹

(1. 华中科技大学数字流域科学与技术湖北省重点实验室,湖北 武汉 430074;

2. 江西省山江湖开发治理委员会办公室,江西 南昌 330046)

摘 要:生态系统健康研究是目前生态与环境领域兴起的研究热点之一。在阅读和分析大量国内外文献的基础上,系统总结了健康和生态系统健康的概念,指出引入生态系统健康概念的目的是要得到一个重要生态指标清单,以此开展生态系统健康评价。然后,总结出生态系统健康评价的3种主要方法:指示物种法、指标体系法和指示区域法,并以代表实例阐述了此3种方法的使用。最后指出生态系统健康面临的争议与挑战,如生态系统健康的概念、健康标准或参考状态等,以及需要进一步探讨的问题。

关 键 词:健康;生态系统健康;生态系统健康评价

中图分类号:X171.1 **文献标志码:**A

1 健康:从人到生态系统

健康的概念来源于医学,最初主要用于描述人体处于一种良好的状态,后来逐渐用于动植物^[1]。世界卫生组织(World Health Organization, WHO)将健康定义为:“Health is a state of complete physical, mental and social well-being and not merely the absence of disease or infirmity. (健康不仅仅意味着没有疾病或者不虚弱,它是一种完全的生理上的、心理上的和社会关系上的良好状态。)”^[2]。这个概念从人类自身的角度对个人健康作了阐述,它涉及到个人所处的社会关系,但是没有牵涉到人所生活的自然环境。

随着社会经济的发展,人类活动对环境产生的不利影响不断扩大,影响的范围从区域尺度扩展到地球的各个圈层。大量的证据表明人类主导的生态系统承受了巨大的压力,生态系统的功能出现了紊乱^[3]。地球上各类生态系统都遭受到了严重破坏,全球变暖、臭氧层破坏、酸雨、土壤侵蚀、土地荒漠化

和盐碱化、水体富营养化、生物多样性丧失、资源耗竭等生态与环境问题愈演愈烈^[4],这些问题已经严重危及到人类的生存和地球的可持续发展。随着环境污染对人体健康的危害不断显现(如70年代之前世界八大公害事件:伦敦烟雾事件、洛杉矶光化学烟雾事件、日本的水俣病和骨痛病等^[5]),人们对环境污染造成的健康问题越来越重视,健康的概念又逐步应用到环境学和医学的交叉研究领域,出现了公众健康学(Public Health Science)、环境健康学(Environmental Health)、环境医学(Environmental Medicine)等学科。如成立于1966年的美国国立环境健康科学研究所(National Institute of Environmental Health Sciences),主要从事与环境相关的(人类)疾病研究^[6]。

既然污染了的环境会对人类的健康造成损害,那么如何消除这些威胁呢?很久以来,人们都没有把人类健康问题与生态环境问题联系在一起。20世纪30年代以来,生态学的理论和方法日趋完善,研究范围包括从生态系统中生命和无生命组分的分

* 收稿日期:2011-02-22;修回日期:2011-05-06.

* 基金项目:华中科技大学大气水资源开发与应用专项基金;国家自然科学基金项目“异构地理信息共享中的实体建模与模式匹配研究”(编号:40971208)和“基于空间映射表的水体亚像元定位模型与算法研究”(编号:41001236)资助.

作者简介:孙燕(1977-),女,山东威海人,讲师,主要从事空间信息科学研究. E-mail: syartemis@sina.com

子生物学分析到全球的宏观研究^[7];同时,生态系统生态学的理论和应用也取得了巨大的进展^[8]。在这样的背景下,一些生态学家开始用生态学的观点来探索人类健康问题,将健康的概念扩展到区域水平(生态系统、流域、景观),将研究的重点从人类自身转移到人类赖以生存的自然生态系统上。1994年6月,第一届国际生态系统健康与医学研讨会在加拿大首都渥太华举行,这次大会重点评价了各种实现生态系统健康的方法,并讨论了在地区、国家和全球尺度上生态系统健康的监测、评价和恢复的问题,同时宣告“国际生态系统健康学会”(International Society for Ecosystem Health, ISEH)成立,这标志着生态系统健康研究的兴起^[9]。ISEH的主要目标之一是了解人类活动、生态变化和人类健康之间的重要联系^[10]。生态系统健康的观点拓展了人们对自身健康和疾病来源的理解^[11],其引发的问题必须依靠自然科学、社会科学和健康科学的有效综合才能解决。

2 生态系统健康的概念及其应用

2.1 生态系统健康的概念

人类作为一种生命体必须依赖一定的自然环境才能存活,一个地区环境的好坏直接关系到该地区社会经济的发展和人类的生存与繁衍。地球上各种生态系统为人类提供了自然资源和生存环境2个方面的多种服务,是地球的生命支持系统^[12]。人类要想持续地获得这种服务就必须保证生态系统的健康,这也就是人类关注生态系统健康的动力之一。

事实上,生态系统健康作为一个概念和一种新出现的实践活动,其原始的思想可追溯到苏格兰地质学家 James Hutton 提出的将地球当作一个综合系统的概念(Lovelock 1988)^[10]。根据 Lovelock 的盖娅(Gaia)理论,大地本身是一个生命体;地表、空气、海洋和地下水系等通过各种生物的、物理的和化学的过程,维持着一个生命的地球^[10]。今天,人们对生态系统这一概念的理解是:生态系统是在一定的空间和时间范围内,在各种生物之间以及生物群落与其无机环境之间,通过能量流动和物质循环而相互作用的一个统一整体。在20世纪40年代的自然学家 Aldo Leopold 的著作中可以找到生态系统健康思想的根源^[13]。1941年,Aldo Leopold 将土地健康(Land health)定义为土地自我更新的能力^[13],并使用土地疾病(Land sickness)来描述土地出现的土壤侵蚀、肥力丧失、水文异常、物种入侵和当地物种的

灭绝等症^[14]。1942年,新西兰土壤学会(成立于1941年,后改名为新西兰土壤与健康学会)在新西兰出版了《土壤与健康》(*Soil and Health*)杂志,积极倡导发展有机农业,提出了“健康的土壤→健康的食品→健康的人”的理念^[13]。

20世纪60~70年代以后,随着全球环境日趋恶化,生态系统遭受了严重破坏,科学家们开始关注受损生态系统的管理问题。在 Odum 倡导下,20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),具有自我调节和反馈的功能,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。与此同时,Woodwell 和 Barrett 极力提倡胁迫生态学(Stress Ecology)^[15]。Hans Selye 从生理学角度研究了生物体对胁迫的反应,提出了一个框架来确定生物体共同的胁迫症状和适应阶段,并用“生物危困综合症(Biological Distress Syndrome)”这一术语来描述生物体对胁迫的反应^[16]。1979年,Rapport 等^[17]提出了生态系统医学(Ecosystem Medicine)的概念,旨在将生态系统作为一个整体进行评估。1981年,Rapport 等认为 Selye 提出的概念有助于发展胁迫生态系统的诊断和处理手段。1985年,Rapport 等^[16]依据 Selye 的框架来研究生态系统在受到胁迫时的行为,并仿照“生物危困综合症”,在生态系统水平上提出了“生态系统危困综合症(Ecosystem Distress Syndrome)”来反映胁迫对生态系统所造成的影响。这种综合症有如下症状:初级生产力降低、物种多样性丧失、机会物种和外来物种占优势、关键种群的波动增加、生物结构衰退、疾病发生几率增加等。

Holling 就认为一个系统在面对干扰时,有保持其结构和功能的能力,恢复能力越大,系统越健康。Karr 等指出无论是个体生物系统或是整个生态系统,它能实现内在潜力,状态稳定,受到干扰时仍具有自我修复能力,管理它也只需要最小的外界支持,这样的生态系统被认为是健康的^[18]。1988年,Schaeffer 等^[19]依据人类和动物的健康评价,探讨了生态系统健康的度量问题,并指出需要发展生态系统的诊断方法和具体的参数及标准来定义生态系统健康。1989年,Rapport 论述了生态系统健康的内涵,认为生态系统健康的定义可以根据人类健康的定义类推而来;他曾经用“为自然号脉”、“监测自然疾病”、“临床生态学”等术语来强调生态健康与人类医学的相似性;他还指出一个健康的生态系统会

表现出某些复杂自组织系统的基本特征,包括 Bertalanffy 提出的复杂生态系统进化的4个主要特征:一体化、分异、机械化和集中化^[18]。

1990年10月和1991年2月分别在美国马里兰州和华盛顿特区召开了关于生态系统健康的研讨会,目的是就生态系统健康的定义达成一些共识。在会后出版的论文集中, Costanza 将以往生态系统健康的定义总结如下:①健康是生态内稳定现象;②健康就是没有疾病;③健康是多样性或复杂性;④健康是稳定性或恢复力;⑤健康是活力或增长的空间;⑥健康是系统组成要素间的平衡。最后, Haskell、Horton 和 Costanza 综合了与会专家、学者的意见将生态系统健康定义为:如果一个生态系统是稳定的和可持续发展的,那么它就是一个健康的、没有疾病症状的(Free from “Distress Syndrome”)系统;换言之就是该系统在时间上能够维持其组织结构、能够进行自我调节和具有对胁迫的恢复能力^[14,20,21]。这个定义与 Karr 的定义基本上相一致,它与可持续性的理念有非常紧密的联系,适用于所有的复杂系统,可以采用活力、组织和恢复力来度量生态系统健康^[9,29]。至此,生态系统健康的概念初步形成。这个概念并不是生态系统健康的最终定义,但它为后继的研究提供了起点,随后又有学者对它进行了补充和完善。Mageau 等认为就人类社区的利益而言,一个健康的生态系统是能为人类社区提供生态系统服务支持,如食物、纤维、吸收和再循环垃圾的能力、饮用水、清洁空气等^[64]。Rapport^[30]在原有的活力、组织和恢复力3个评价指标的基础上,新增了生态系统服务功能的维持、管理的选择、外部输入减少、对邻近系统的危害和人类健康影响5个指标。Rapport 等也强调除了生态方面的健康外,满足人类合理需求的能力也是健康的重要内容^[20]。

2.2 生态系统健康的应用

近年来,生态系统健康已经成为一个重要的环境概念。最初在引入这一概念时,目的是要得到一个重要生态指标的清单,以评价生态系统健康^[11]。

尽管对生态系统健康的认识并没有达成共识^[68],但是生态系统健康概念依然在实践中得到了广泛的应用。1992年联合国环境与发展大会通过的《里约环境与发展宣言》(The Rio Declaration on Environment and Development)中,第七条原则就强调各国应本着全球伙伴精神进行合作,以保护和恢复地球生态系统的健康与完整性^①。随后,许多国家及国家间合作计划都引入了生态系统健康的概

念,如美国农业部林业局(USDA Forest Service)的“国家森林生态系统健康监测计划”(National Forest Health Monitoring Program)^[43]、美国和加拿大政府资助的“五大湖生态系统健康评价”(Assessing the state of ecosystem health in the Great Lakes)^[40]、美国政府资助的“生态系统健康的威胁——化学污染”项目(Stresses on Ecosystem Health—Chemical Pollution)(WRI, 2002)、澳大利亚国家水土资源审计委员会的生态系统健康专题研究项目(Ecosystem Health Theme of the Commitment to a National Land and Water Resource Audit, Australia)(1996—2001)^[46]、1991年启动的加拿大“北部河流研究计划”(Northern River Basins Study)^[52]、加拿大政府资助的“国家农业生态系统健康评价”(National agricultural ecosystem health assessment)和“城市生态系统健康指标”(Indicators of Urban Ecosystem Health)、中国国家自然科学基金委员会资助的“湖泊生态系统健康影响因素及其动力学机制”^[53,54]。

在国内,也有很多地方机构资助不同尺度、不同领域的生态环境健康研究,如上海重大环保科研项目和国家高技术研究发展计划(863)项目资助的“上海城市生态系统健康评价”^[73]、福建省科技计划资助的“人类活动影响下的海岛生态系统健康评价”^[74]等。

在实践中,科学家们采用一些具体的指标来对大尺度范围的各种生态系统进行了评价,如淡水生态系统、海洋生态系统(美国 Chesapeake 湾等)、森林生态系统、草地生态系统、湿地生态系统、农业生态系统等^[1,29,44,49,55]。随着实践经验的不断积累,生态系统健康的内涵得到了不断丰富。

生态系统健康是一个科学的学科,还是仅仅利用现有多个学科理论与知识的一项实践活动,这个问题还有待于生态系统健康实践的发展来解决。Rapport 等^[11]认为生态系统健康具有跨学科的本质,是一门综合性学科,它为理解人类活动、生态变化、生态系统服务、经济和人类健康的关系提供了新方法和新概念。目前,生态系统健康涉及的学科主要有社会学、经济学、医学、预防医学、环境科学、生物学、生态学等^[38],涉及的生态学原理主要有动态性原理、等级性原理、创造性原理、相关性原理、有限性原理、多样性原理等^[5,63]。在加拿大、美国、澳大

① [http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp? ArticleID=1163&DocumentID=78&l=en](http://www.unep.org/Documents/Multilingual/Default.asp?ArticleID=1163&DocumentID=78&l=en)

利亚等国家,一些职业技术学校 and 大学已经开设了生态系统健康的课程^[20,34]。

实际上,很多学者都认识到确定生态系统健康的定义并不是最终的目的,它只是理解经济系统(人类活动)和生态系统之间关系的第一步。生态系统健康研究的主要挑战是如何将生态学知识与社会学和健康学知识进行有效的综合,如何将生态系统健康与生态系统服务联系在一起。而生态系统健康评价要求分析人类对生态系统和景观所施加的压力、生态系统结构和功能变化、生态系统服务变化以及社会反应之间的联系^[32]。目前,对生态系统健康的关注已经从最初的理论上的概念争议,转移到实践中定量评价方法的讨论。正如 Rapport 等^[10]所言:我们应当继续鼓励跨学科的合作;鼓励生态系统健康概念的发展以及哲学和伦理理解的加强;发展生态系统健康定量评价方法(高科技和非技术的方法);继续帮助在职业学校发展新的课程;通过联合组织国际会议促进生态系统健康在环境管理上的应用。

3 生态系统健康评价

世界卫生组织提出的健康定义已为世界上大多数国家承认,但“完全的体格上、精神上、社会关系上的良好状态”是一个不易掌握的标准。那么医学上是如何判断一个人是否健康呢?在临床上,医务工作者使用已经建立的已知疾病目录和大量的“标准人”参考数据来进行健康诊断。此外,医生的诊断还很大程度上依赖于自己或别人所获得的临床经验。医学上对人类健康诊断的过程如下:①确定症状;②量测重要的体征;③进行临界诊断;④进行测试以验证诊断;⑤做出正式诊断;⑥开处方^[17]。生态系统健康评价(Ecosystem Health Assessment)可以参考人类健康检查来进行,但是迄今为止还没有建立完整的生态系统疾病目录和参考标准。实际上,生态系统健康评价与人类健康诊断存在着很大差异。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,结合人类健康的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^[72]。

无论是对个体、种群,还是生态系统,健康评价都带有一定的主观色彩,这是因为“健康”状态的界定受到人类社会的价值观念和认识水平的影响。说到底,生态系统的健康标准是一个人类标准^[38]。尽管如此,我们仍然可以采用一系列指标(如初级生产力、生物多样性、群落结构、经济活动等)来客观

地确定生态系统的状态^[33]。目前,地球上的生态系统或多或少都受到了人类的影响^[48],而且全球生态系统普遍出现了退化的趋势。在这种形势下,发展或改进生态系统健康评价方法是一个比较紧迫的任务^[29,33]。

由于对生态系统健康认识的不同,在实践中所采用的健康标准也不一样。一些研究者把未经过人类干扰的生态系统的原始状态作为健康的参考状态(如孔红梅^[56]以原始的未受人为干扰的红松阔叶林作为健康森林生态系统的标准,对不同时期受到不同程度干扰的红松阔叶林进行了健康评价,其结论是遭受干扰后,森林经历的恢复时间越长,就恢复得越健康),有些研究者认为可以用生态系统的演替顶级状态作为生态系统健康的参考状态,还有人提出利用热力学原理来判断生态系统健康^[68],这些标准并没有得到大多数学者的认同,只在有限的区域内进行了尝试。实际上,现有的生态系统健康评价都是研究者根据具体的对象和自己的理解对生态系统健康的内容进行重新规定,然后再选取指标进行评价。如美国林务局从经济利益出发,定义生态系统健康为经济树种免受病虫害和火灾危害的程度,以及生态系统向人类稳定地提供产品与服务的能力。

正如价值估算并不是生态系统服务价值评估的最终目的^[15],对生态系统健康状态的判定也不是生态系统健康评价的最终目的。从人类自身利益的角度来看(生态伦理中的人类中心主义),生态系统健康评估的目的是为了在生态系统退化发生之前,采取措施来缓解生态系统所遭受的压力,以维持生态系统自身的可持续性,同时也确保生态系统能够持续地提供人类所需的各种服务(如食物、纤维、饮用水、清洁空气、废弃物分解、固碳制氧、保持水土、物质循环等)。因此,生态系统健康评价的最终目的是组织生态系统的各种信息为生态系统管理提供科学基础,以确保生态系统能持续稳定地提供人类所需的各种生态服务。

健康和可持续性都是具有尺度依赖性的概念^[12],因此,需要在不同的尺度上建立不同的定量评价方法。目前,生态系统健康的评价方法主要有指示物种法和指标体系法。

3.1 指示物种法

维持健康的生态系统是生物多样性保护的前提条件。鉴于生态系统的复杂性,保护生物学家发展了一些间接的方法来监测生态系统的变化。指示类

群(Indicator taxa,指物种或分类级别较高的类群)就经常用于间接监测生态系统健康^[19]。指示物种法主要是通过监测生态系统中指示物种对环境胁迫的反应,如种群数量、生物量、年龄结构、毒理反应、多样性、重要的生理指标等,来间接评价生态系统的健康状况。孔红梅等^[57]总结了水生生态系统和森林生态系统常用的一些指示物种。对于水生生态系统而言,其常用的指示物种如:浮游生物^[3]、底栖无脊椎动物^[37]、营养顶级的鱼类^[21,4]等。

此外,综合运用亚细胞、细胞、生物个体、种群、群落和生态系统等各个生物组织水平上的相关信息,进行水生生态系统健康评价是一个比较全面的方法,具有很好的发展前景^[72]。

指示物种法最初在水生生态系统健康的评价中得到广泛应用,随后逐步发展成为了生态系统健康评价的基本方法。该方法比较简单、容易操作,但是缺乏完善的指示物种筛选标准,指示物种选取的好坏直接影响到评价结果的可靠性。由于生态系统的复杂性,单凭一些指示物种是无法完全反映整个生态系统的状态的,为此,Schaeffer等^[19]建议不能仅依靠单一的物种来评价生态系统的健康状态。因此,在选取指示物种时,要了解物种在生态系统中所处的地位与作用,明确它们对生态系统健康指示作用的强弱。

3.2 指标体系法

3.2.1 指标的分类与选择方法

根据不同的分类标准,可以将指标分成不同的类别。一般地,生态系统健康的评价指标包括生态指标、物理化学指标、社会经济指标(包括人类健康)三大类。生态指标是反映生态系统特征和状态的生物指标,它分为生态系统、群落、种群与个体等不同层次的指标或指标体系;物理化学指标是检测生态系统的非生物环境的指标;社会经济指标着眼于生态系统对人类生存与社会发展的支持作用,采用经济参数和社会发展的环境压力指标等来衡量生态服务的质量与可持续性^[60]。由于生态系统退化会增加对人类健康的威胁,人类健康已成为可持续性的重要标准之一^[32]。

Cairns等认为选择什么样的指标通常由具体的生态系统管理目标决定,在他们提出的生态系统健康指标选择框架中,将指标分为3类:①适宜度指标,用来判断预期的生态系统目标是否实现;②诊断指标,可以确定评价对象偏离预期目标的原因,根据这些原因可以提出实现预期目标的补救措施;③早

期预警指标,对生态系统所承受的压力非常敏感,能及时侦测即将发生的生态系统退化现象,如敏感种个体的生理指标^[4]。

在生态系统健康评价实践中,所选指标的不同往往反映了具体的评价对象、评价目标以及评价者知识背景和理论依据的差异^[3]。指标选择的途径主要有2种^[16]:单一途径和综合途径。单一途径只侧重应用生物的或理化方面的指标,后者则同时考虑了不同范畴的评价指标,其中还包括生命支撑系统对社会经济和人类健康作用的指标,以期获得综合全面的结果。

指标体系建立的一般步骤:①选择能够表征生态系统主要特征的参数;②对这些特征进行归类,分析每个特征的生态健康的意义;③确定每类特征因子的权重系数以及各类因子中具体因子的权重;④对这些特征因子进行度量;⑤确定评价方法,建立生态系统健康的评价体系。

3.2.2 指标体系建立的实例——评价生态系统水平的综合性指标体系

综合性指标体系并不是为特定的生态系统量身定制的,这样的指标体系无须重大改动就可以用来评价各类生态系统的健康状况。

生态系统健康的定义与胁迫生态学的概念^[27]在一定程度上具有很大的一致性,而胁迫生态学主要从系统的结构、活力和恢复力3个方面来定义健康^[29]。因此,一些学者^[29,9,12]认为可以用活力(Vigor, V)、组织(Organization, O)和恢复力(Resilience, R)3个特征来衡量生态系统是否健康(表1)。Costanza等^[20]认为系统的活力、组织和恢复力处于某种平衡是一个健康系统所具有的重要特征,提出了综合性的系统健康指数(Health Index, HI)来衡量生态系统的健康状况:

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

上式中,V为系统活力,表示生态系统功能,可根据系统活性、新陈代谢或初级生产力等来测量;O为系统组织指数,它是一个介于0~1之间的相对值,包括系统的多样性和连通性,可以根据系统组分内部以及组分之间相互作用的数量及多样性来评价;R为系统恢复力指数,也是一个介于0~1之间的相对值,它反映系统受到压力后维持自身活力和组织结构的能力,可以根据系统在胁迫出现时维持系统结构和功能的能力来评价。当系统变化超过它的恢复力时,系统立即“跳跃”到另一个状态。

从理论上而言,可以从生态系统活力、组织和恢

表 1 生态系统健康的构成及其各项测量指标

Table 1 Structure and assessment criteria of ecosystem health

健康的构成	相关概念	相关的测量指标	测量指标的起源	使用方法
活力	功能	GPP, NPP, GEP	生态学	
	生产力	GNP	经济学	测量
	生产量	新陈代谢	生物学	
生产力	结构	生物多样性指数	生态学	
	生物多样性	平均共有信息 (Ulanowicz, 1986) 预测率 (Turner et al., 1989)	生态学	网络分析
恢复力		生长范围 (Bayne, 1987)		
		种群恢复时间 (Pimm, 1984)	生态学	模型模拟
		抗干扰能力 (Holling, 1987)		
综合		优势度 (Ulanowicz, 1986)	生态学	
		生物完整性指数 (Karr, 1991)		

复力 3 个方面分别选取相应的测量指标来评价生态系统的健康状况。Costanza 也认识到有些量测指标 (如组织和恢复力方面的指标) 在实际上是很难测量的, 因而限制了这套指标体系的应用。Costanza 提出的这套指标体系主要体现了生态系统自身的生态学特性, 对社会经济方面的因素考虑较少, 只采用了 GNP 这个综合性经济指标。

Fan 等针对中国沙坡头特殊的干旱环境, 将 Costanza 的健康指数模型改进为^[24]:

$$HI_i = \sqrt{V_i \times O_i \times R_i} \quad (0 \leq HI_i \leq 1, i = 1 \sim 8)$$

$$V_i = \frac{l_i}{l_{\max}}, V_i \in [0, 1]$$

$$O_i = \frac{1}{3} \left(\frac{h_i}{h_{\max}} + \frac{d_i}{d_{\max}} + \frac{k_i}{k_{\max}} \right), O_i \in [0, 1]$$

$$R_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \min \left\{ \left(\frac{x_i}{x_{ia}} \right)^2, 1 \right\}}, R_i \in [0, 1]$$

其中 HI_i 为子系统 i 的健康指数; V_i 为子系统 i 的活力指数, $V_i \in [0, 1]$; O_i 为子系统 i 的组织指数, $O_i \in [0, 1]$; R_i 为子系统 i 的恢复力指数, $R_i \in [0, 1]$ 。 l_i 、 h_i 、 d_i 和 k_i 分别表示样地中新枝的长度、植株高度、基部直径和树冠范围, l_{\max} 、 h_{\max} 、 d_{\max} 和 k_{\max} 为相应的最大值; x_i 为第 i 层土壤的含水量, x_{ia} 为第 i 层土壤最大含水量。

另有一些学者通过一些具体的指标对海洋生态系统、淡水生态系统、森林生态系统、干旱草原生态系统的活力、组织结构和恢复力等进行了评估^[69,71], 此处不再详述。

3.3 关键区域指示法 (指示区域法)

除了指示物种法和指标体系法, 还有学者建议可以采用一些关键的敏感区域作为生态系统健康的指示器。David Schindler 建议将湖泊作为评价生态

系统健康的“警报器”^[9]。湖泊汇集了各种陆地水体, 而水循环是地球上其他物质循环 (如 N、P 等) 的载体, 它的健康与否在一定程度上可以间接反映该湖泊集水范围内的生态系统健康状况, 尤其是水生生态系统。当然, 具有这种指示作用的湖泊必须具备一定的条件: ①该湖泊是流域内所有水体的汇集点; ②湖泊与汇入的支流具有良好的水文和生态联系; ③没有人工渠道直接向湖泊排污, 换言之, 就是假设污染物来源主要通过入湖径流输入。

指示区域法实际上是从指示物种法变化而来的, 它对于评价大尺度生态系统的健康具有很强的实践意义。

上述生态系统健康评价方法, 无论是指示物种法、指标体系法还是指示区域法, 都离不开各种指标或指示器的支持。虽然生态系统是处于一种动态平衡中, 它会随着时间的变化而发生改变, 但是在逐步的、有序的变化过程中它会维持某种连续性和有序性, 急剧的变化往往会导致生态系统的破坏。就某一类生态系统而言, 尽管其状态不断发生改变, 但是只要它没有转变成另外一种生态系统, 那么它所提供的主要的生态服务 (或者成为生态系统服务) 就不会发生根本性变化 (注意这里并不是说生态系统所提供的服务是一成不变的)。这样, 我们就可以从生态系统所提供的服务的质量和数量来度量该生态系统的健康状况。如一片森林, 尽管它可以提供多种类型的生态服务 (如水土保持、固碳制氧、木材等), 但是在特定的时间内其所提供的服务总量应该是一定的, 或许我们还无法确定这片森林至少提供多少服务才是正常的或健康的, 但是我们可以从其服务质与量的变化来判断生态系统健康变化的趋势。

换句话说,我们可以从某项生态系统服务的变化来判断生态系统健康的变化。即,尽管我们不知道系统内部的具体结构,但是可以通过输入和输出对系统的状态做出判断。这种在其他不少领域中广泛应用的黑箱评价方法,笔者认为或可成为以后生态系统健康评价的发展方向之一。

4 争议与挑战

由于健康的概念本身就比较模糊,想要在此基础上定义精确的生态系统健康的概念自然困难重重。因此,“生态系统健康”的概念一提出就引起了广泛的争议。以 Costanza 和 Rapport 为代表的生态学家建议将生态系统健康作为环境评价和管理的终点,并认为健康的生态系统应该能够维持所必需的重要体征,能够处理胁迫,能够在受到胁迫后恢复平衡;此外,Rapport 还认为生态系统健康的概念可以引起公众对环境问题的关注^[12,42]。然而,以 David Policansky 和 Glenn Suter 为代表的科学家对生态系统健康的提法存有疑问。Calow 认为“类推”方法在科学的发展过程中非常有用,但是不能把一些不适宜的原理从一个系统引入到另一个系统;生物体上使用的“健康”概念与生态系统上所使用的“健康”概念,这二者的原理是不一样的;与生态系统相比,生物体的健康状态更容易且更客观地被确定^[6]。还有学者认为生态系统并不是有机体,它们不能像生物体那样活动,也不具有生物体的特性(如健康);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^[42,45]。生态系统健康是基于人类健康的一个错误类推;健康和完整性都不是生态系统固有的特征,它们既没有得到经验性证据的支持,也没有得到生态学理论的支持^[50]。

尽管 Calow 指出生物体和生态系统的“健康”在内涵上存在差异,但是他认为^[7]:“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。生态系统健康的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对比研究来完成。”Rapport 认为虽然生态系统健康还存在不具有可操作性的缺点,但这也正是需要一种新的综合性科学的原因;通过发展一种综合社会、生物和健康的新学科,可以使生态系统健康的概念具有可操作性^[29,42]。实际上,健康的概念在种群水平上的应用由来已久,将这个概念扩展到生态系统和景观的层次是一个自然而然的过程^[29]。

另外还有关于健康标准或参考状态的争议。生

态系统“健康”与否并不是根据生态系统的“自然”程度来判定,而是由生态系统的自我维持和更新能力决定^[2]。事实上,绝大多数的原始生态系统已经消失了,残存下来的微乎其微,但是,如果人类以一种可持续的方式来开发利用生态系统,那么,新的生态系统一样可以保有健康。

总之,生态系统健康研究还处于茁壮发展的初级阶段,还存在很多的问题和挑战。当前,生态系统健康研究急需进行深入思考和探讨的主要问题如下^[32]:①生态系统改变到什么程度才是不健康的(即生态系统健康的范围)?②如何区分人类影响和自然干扰,何种干扰可造成生态系统的的健康?③什么样的景观格局和人类居住区格局能减少疾病的传播?④生态系统健康可维持多久,如何保持生态系统健康?⑤生态系统健康的评价方法缺乏可操作性,尚需进一步研究。回答好了这些问题,必将实现生态系统健康研究的理论和方法创新,推动生态系统健康研究的进一步发展。

参考文献 (References):

- [1] Allen E. Forest health assessment in Canada [J]. *Ecosystem Health*, 2001, 7(1): 28-34.
- [2] World Health Organization. Constitution of the World Health Organization [EB/OL]. http://policy.who.int/cgi-bin/om_isapi.dll?hitsperheading=on&infobase=basdoc&jump=Constitution&softpage=Document42#JUMPDEST_Constitution, 2011.
- [3] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. Human domination of Earth's ecosystems [J]. *Science*, 1997, 277(5325): 494-499.
- [4] Hester R E, Harrison R M. Global Environmental Change [M]. *Issues in Environmental Science and Technology*, No. 17. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2002.
- [5] Zhou Zongcan. Environmental Medicine [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001: 7-10. [周宗灿. 环境医学 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001: 7-10.]
- [6] Zeng Dehui, Jiang Fengqi, Fan Zhiping, et al. Ecosystem health and sustainable development for human [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(6): 112-117. [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): 112-117.]
- [7] Thompson J N, Reichman O J, Morin P J, et al. Frontiers of ecology [J]. *BioScience*, 2001, 51(1): 15-24.
- [8] Shang Yuchang. General Ecology (Second Edition) [M]. Beijing: Peking University Press, 2002: 1-5. [尚玉昌. 普通生态学 (第二版) [M]. 北京: 北京大学出版社, 2002: 1-5.]
- [9] Shrader-Frechette K S. Ecosystem health: A new paradigm for ecological assessment? [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1994,

- 9(12): 456-457.
- [10] Rapport D J, Böhm G, Buckingham D, *et al.* Ecosystem health: The concept, the iseh, and the important tasks ahead[J]. *Ecosystem Health*, 1999, 5(2): 82-90.
- [11] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, 13(10): 397-402.
- [12] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(6 630): 253-260.
- [13] Rapport D J. What constitute ecosystem health? [J]. *Perspectives in Biology and Medicine*, 1989, 33: 120-132.
- [14] Callicott J B. Aldo leopold's metaphor[C]//Costanza R, Norton B G, Haskell B D, eds. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management. Washington DC: Island Press, 1992: 42-56.
- [15] Ren Hai, Wu Jianguo, Peng Shaolin, *et al.* Evaluation and monitoring of ecosystem healthy[J]. *Tropical Geography*, 2000, 20(4): 68-74. [任海, 邬建国, 彭少麟. 生态系统健康的评估[J]. 热带地理, 2000, 20(4): 68-74.]
- [16] Rapport D J, Riegler H A, Hutchinson T C. Ecosystem behavior under stress[J]. *American Naturalist*, 1985, 125: 617-640.
- [17] Rapport D J, Thorpe C, Regier H A. Ecosystem medicine[J]. *Bulletin of the Ecological Society of American*, 1979, 60: 180-182.
- [18] Liu Jianjun, Wang Wenjie, Li Chunlai, *et al.* Research review on ecosystem health [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(1): 41-44. [刘建军, 王文杰, 李春来. 生态系统健康研究进展[J]. 环境科学研究, 2002, 15(1): 41-44.]
- [19] Schaeffer D J, Herricks D E, Adwin E, *et al.* Ecosystem health; I. Measuring ecosystem health[J]. *Environmental Management*, 1988, 12: 445-455.
- [20] Costanza R, Mageau M. What is a healthy ecosystem? [J]. *Aquatic Ecology*, 1999, 33: 105-115.
- [21] Costanza R, Norton B G, Haskell B D. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management[M]. Washington DC: Island Press, 1992.
- [22] Kay J, Schneider E D. Embracing complexity, the challenge of the ecosystem approach[J]. *Alternatives*, 1994, 20(3): 32-38.
- [23] Lee B J, Regier H A, Rapport D J. Ten ecosystem approaches to the planning and management of the Great Lakes[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 1982, 8(3): 505-519.
- [24] Lu F, Li Z. A model of ecosystem health and its application[J]. *Ecological Modelling*, 2003, 170(1): 55-59.
- [25] Milsky D J. A Conceptual Analysis of Ecosystem Health[M]. Chicago: University of Illinois at Chicago, 2004.
- [26] Norton B G. A new Paradigm for environmental management [C]//Costanza R, Norton B G, Haskell B D, eds. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management. Washington DC: Island Press, 1992: 23-41.
- [27] Odum E P. Trends expected in stressed ecosystems[J]. *BioScience*, 1985, 35: 419-422.
- [28] Palmer M A, Bernhardt E S, Chornesky E A, *et al.* Ecological Science and Sustainability for a Crowded Planet; 21st Century Vision and Action Plan for the Ecological Society of America[R]. The Ecological Society of America, 2004.
- [29] Costanza R, Mageau M. What is a healthy ecosystem? [J]. *Aquatic Ecology*, 1999, 33: 105-115.
- [30] Rapport D J. Defining ecosystem health [C] // Rapport D J, Costanza R, Epstein P R, eds. Ecosystem Health. Oxford: Blackwell Science Inc., 1998: 18-33.
- [31] Howard J, Rapport D. Ecosystem health in professional education: The path ahead[J]. *EcoHealth*, 2004, 1(S1): 3-7.
- [32] Costanza R, Jørgensen S E. Conclusion [C] // Costanza R, Jørgensen S E, eds. Understanding and Solving Environmental Problems in the 21st Century: Toward a New, Integrated Hard Problem Science. Amsterdam; Elsevier, 2002: 218-221.
- [33] Rapport D J, Hilden M, Weppling K. Restoring the health of the Earth's ecosystems: A new challenge for the earth sciences[J]. *Episodes*, 2000, 23(1): 12-19.
- [34] Rapport D J, Lee V. Ecosystem Health: Coming of age in professional curriculum[J]. *EcoHealth*, 2004, 1(S1): 8-11.
- [35] Fairweather P G. State of environment indicators of 'River Health': Exploring the metaphor [J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41(2): 211-220.
- [36] Haskell B D, Norton B G, Costanza R. What is ecosystem health and why should we worry about it? [C]//Costanza R, Norton B G, Haskell B D, eds. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management. Washington DC: Island Press, 1992: 3-20.
- [37] Reynoldson T B, MEtcalfe-Smith J L. An overview of the assessment of aquatic ecosystem health using benthic invertebrates[J]. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1992, 1: 295-308.
- [38] Ryder R A. Ecosystem health, a human perception; Definition, detection, and the dichotomous[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 1990, 16(4): 619-624.
- [39] Hilty J, Merenlender A. Faunal indicator taxa selection for monitoring ecosystem health[J]. *Biological Conservation*, 2000, 92(2): 185-197.
- [40] Shear H. The development and use of indicators to assess the state of ecosystem health in the Great Lakes [J]. *Ecosystem Health*, 1996, 2: 241-258.
- [41] Shear H, Stadler-Salt N, Bertram P, *et al.* The development and implementation of indicators of ecosystem health in the Great Lakes Basin [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2003, 88: 119-152.
- [42] Costanza R. Toward an operational definition of ecosystem health [C]//Costanza R, Norton B G, Haskell B D, eds. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management. Washington DC: Island Press, 1992: 239-256.
- [43] Stolte K W. 1996 National Technical Report on Forest Health [R]. Washington DC: USDA Forest Service, 1997.
- [44] Stone C, Old K, Kile G, *et al.* Forest health monitoring in Australia: National and regional commitments and operational realities[J]. *Ecosystem Health*, 2001, 7(1): 48-58.

- [45] Suter G W. Critique of ecosystem health concepts and indexes [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1993, 12(9): 1 533-1 539.
- [46] Tait J T P, Cresswell I D, Lawson R, et al. Auditing the health of Australia's ecosystems [J]. *Ecosystem Health*, 2000, 6(2): 149-163.
- [47] Calow P. Ecosystem not optimized [J]. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1993, 2: 55.
- [48] Boulton A J. An overview of river health assessment: Philosophies, practice, problems and prognosis [J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41: 469-479.
- [49] Wichert G A, Rapport D J. Fish community structure as a measure of degradation and rehabilitation of riparian systems in an agricultural Drainage Basin [J]. *Environmental Management*, 1998, 22(3): 425-443.
- [50] Wicklum D, Davies R W. Ecosystem health and integrity? [J]. *Canadian Journal of Botany*, 1995, 73(7): 997-1 000.
- [51] Bertollo P. Assessing ecosystem health in governed landscapes: A framework for developing core indicators [J]. *Ecosystem Health*, 1998, 4(1): 33-51.
- [52] Wrona F J, Cash K J. The ecosystem approach to environmental assessment: Moving from theory to practice [J]. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1996, 5: 89-97.
- [53] Xu F L, Lam K C, Zhao Z Y, et al. Marine coastal ecosystem health assessment: A case study of the Tolo Harbour, Hong Kong, China [J]. *Ecological Modelling*, 2004, 173(4): 355-370.
- [54] Xu F L, Zhao Z Y, Zhan W, et al. An ecosystem health index methodology (Ehim) for lake ecosystem health assessment [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 188(2/4): 327-339.
- [55] Xu Fuliu, Tao S, Dawson R W, et al. Lake ecosystem health assessment: Indicators and methods [J]. *Water Research*, 2001, 35(13): 3 157-3 167.
- [56] Kong Hongmei. Theory and Indicator System of Forest Ecosystem Health Assessment [D]. Beijing: Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2002. [孔红梅. 森林生态系统健康理论与评价指标体系研究 [D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心, 2002.]
- [57] Kong Hongmei, Zhao Jingzhu, Ma Keming, et al. Assessment method of ecosystem health [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4): 104-108. [孔红梅, 赵景柱, 马克明, 等. 生态系统健康评价方法初探 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(4): 104-108.]
- [58] Daily G C, Soderqvist T, Aniyar S, et al. The value of nature and the nature of value [J]. *Science*, 2000, 289(5 478): 395-396.
- [59] Li Wenhua, Zhao Jingzhu. Progresses and Perspectives of Ecological Research [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004. [李文华, 赵景柱. 生态学研究的回顾与展望 [M]. 北京: 气象出版社, 2004.]
- [60] Li Jin, An Shuqing, Cheng Xiaoli, et al. Advances in assessment of ecosystem health [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2001, 25(6): 641-647. [李瑾, 安树青, 程小莉, 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.]
- [61] Kay J. A non-equilibrium thermodynamic framework for discussing ecosystem integrity [J]. *Environmental Management*, 1991, 15(4): 483-495.
- [62] Calow P. Critics of ecosystem health misrepresented [J]. *Ecosystem Health*, 2000, 6(1): 3-4.
- [63] Ji Lanzhu. Research on ecosystem health [M] // Li Wenhua, Zhao Jingzhu, eds. Progresses and Perspectives of Ecological Research. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 453-481. [姬兰柱. 生态系统健康研究 [M] // 李文华, 赵景柱, 编著. 生态学研究的回顾与展望. 北京: 气象出版社, 2004: 453-481.]
- [64] Cui Baoshan, Yang Zhifeng. Research review on wetland ecosystem health [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 20(3): 31-36. [崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康研究进展 [J]. 生态学杂志, 2001, 20(3): 31-36.]
- [65] Zhang Jiaen, Luo Shiming. Basic content and evaluation index system of agro-ecosystem health [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 174-177. [章家恩, 骆世明. 农业生态系统健康的基本内涵及其评价指标 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 174-177.]
- [66] Calow P. Can ecosystems be healthy? Critical consideration of concepts [J]. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery (Formerly Journal of Aquatic Ecosystem Health)*, 1992, 1(1): 1-5.
- [67] Cairns J, Jr McCormick P V, Niederlehner B R. A proposed framework for developing indicators of ecosystem health [J]. *Hydrobiologia*, 1993, 263: 1-44.
- [68] Zhang Zhicheng, Niu Haishan, Ouyang Hua, et al. Ecosystem health: Concept analysis [J]. *Resources Science*, 2005, 27(1): 136-145. [张志诚, 牛海山, 欧阳华. “生态系统健康”内涵探讨 [J]. 资源科学, 2005, 27(1): 136-145.]
- [69] Yang Zhifeng, Cui Baoshan, Liu Jingling, et al. Research on Theory, Method and Practices of Ecological Environment Water Demand [M]. Beijing: Science Press, 2003. [杨志峰, 崔保山, 刘静玲, 等. 生态环境需水量理论、方法与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.]
- [70] Jiang Weigou, Li Jing, Li Jiahong, et al. Assessment of wetland ecosystem health in the Liaohe River Delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 408-414. [蒋卫国, 李京, 李加洪, 等. 辽河三角洲湿地生态系统健康评价 [J]. 生态学报, 2005, 25(3): 408-414.]
- [71] Lu Jianjian. Estuarine Ecology [M]. Beijing: Maritime Press, 2003. [陆健健. 河口生态学 [M]. 北京: 海洋出版社, 2003.]
- [72] Ma Keming, Kong Hongmei, Guan Wenbin, et al. Ecosystem health assessment: Methods and directions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 150-160. [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): 150-160.]

- [73] Zeng Yong, Shen Genxiang, Huang Shenfa, *et al.* Assessment of urban ecosystem health in Shanghai[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(2):208-212. [曾勇, 沈根祥, 黄沈发, 等. 上海城市生态系统健康评价[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(2):208-212.]
- [74] Yan Li, Wang Jinkeng, Huang Hao, *et al.* An assessment of ecosystem health in Dongxi River Basin based on PSR framework

[J]. *Resources Science*, 2008, 30(1):107-113. [颜利, 王金坑, 黄浩. 基于 PSR 框架模型的东河流域生态系统健康评价[J]. 资源科学, 2008, 30(1)107-113.]

- [75] Marshall I, Hirvonen H, Wiken E. "National and regional scale measures of Canada's ecosystem health" in Woodley[C] // Kay S, Francis J, G, eds. *Ecological Integrity and the Management of Ecosystems*: St. Lucie Press, 1993:117-130.

Ecosystem Health: Theory, Concept and Assessment Methods

Sun Yan¹, Zhou Yangming², Zhang Qiuwen¹, Yi Shanzhen¹

(1. *Hubei Key Laboratory of Digital Valley Science and Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;*

2. *Office of the Mountain-River-Lake Development Committee of Jiangxi Province, Nanchang 330046, China*)

Abstract: Ecosystem health is a new research topic in the field of ecology and environment science. Firstly, based on the understanding and analysis of a lots of literature both at home and abroad, this article entirely summarizes the evolvement of the concept of health from mankind to ecosystem and aims at obtaining the assessment criteria of ecosystem health. Then, the article proposes the concept and applicaiton of three kinds of main research methods about ecosystem health assessment: ① indicator species, ② indicator system, and ③ indicator area. Finally, this article provides some focus challenging and controversial topics of ecosystem health and the major issues which need further discussion in the future.

Key words: Health; Ecosystem health; Ecosystem health assessment.

2011 年第 9 期要目

- 我国水资源研究与发展的若干思考 夏 军, 瞿金良, 占车生
 云南的一条可能的生物地理线 朱 华
 土壤斥水性及其生态水文效应研究进展 刘立超, 杨昊天, 李新荣, 高艳红, 贾荣亮
 美国 MARS 海底观测网络中国节点试验
 彭晓彤, 周怀阳, 吴邦春, 吕 枫, 吴正伟, 杨灿军, 李培良, 李德俊