

# 流域生态系统健康评价方法

罗跃初, 周忠轩, 孙 轶, 邓红兵, 张 萍, 吴 钢

(中国科学院生态环境研究中心 系统生态重点实验室, 北京 100085)

**摘要:**介绍了流域生态系统健康的定义、特征及其研究尺度, 讨论了流域生态系统健康评价的科学基础及目标, 着重阐述了流域生态系统健康评价的方法。流域生态系统健康评价主要有两种方法: 一是指示物种评价法, 二是指标体系评价法。流域生态系统健康的综合评价必须包括生态学、物理化学、社会经济和人类健康四个范畴。还对流域生态系统健康评价指标的度量进行了初步的探讨, 最后提出了流域生态系统健康评价存在的问题及今后的研究趋势。

**关键词:**流域生态系统健康; 评价; 范畴; 指标

## Assessment methods of watershed ecosystem health

LUO Yue-Chu, ZHOU Zhong-Xuan, SUN Yi, DENG Hong-Bing, ZHANG Ping, WU Gang  
(Key Laboratory of System Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1606~1614.

**Abstract:** Watershed ecosystem health is the prerequisite for sustainable development of the watershed. The aim of watershed ecosystem health assessment is to recover and manage watershed ecosystem and to realize sustainable development of the watershed. Healthy watershed ecosystems possess the following characteristics: they are resilient to normal perturbations encountered in their evolutionary history; they are free of Ecosystem Distress Syndrome; they are self-sustaining; management practices and ecosystem processes do not impair adjacent ecosystem; they are economically viable; they sustain healthy human communities.

Watershed ecosystem is a social-economic-natural complex ecosystem; and watershed natural ecosystem consists of terrestrial ecosystem, land/water ecotone ecosystem and freshwater ecosystem. The assessment of watershed ecosystem health should be carried out from broad temporal-spatial scales. River continuum and temporal-spatial scales of different biological features in a watershed should be taken into account.

A rational aim for ecological improvement of unhealthy watershed ecosystems could be towards a reference state of maximum naturalness attainable under the given conditions in a watershed. For anthropogenically modified watersheds, the reference state of watershed ecosystem health assessment might be 'relative ecological integrity'.

Indicator species assessment and indices assessment are the two main methods of watershed ecosystem health assessment. However, it should be careful in selecting indicator species. The sensitivity and

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(70173035)

**收稿日期:**2002-03-25; **修订日期:**2003-05-20

**作者简介:**罗跃初(1975~), 男, 湖南安化人, 博士生, 主要从事生态系统健康与模型、流域生态学研究。E-mail: yuechuluo@163.net

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No. 70173035)

**Received date:** 2002-03-25; **Accepted date:** 2003-05-20

**Biography:** LUO Yue-Chu, Ph. D. candidate, main research fields: ecosystem health and model and watershed ecology.

reliability of species need to be considered simultaneously. Terrestrial ecosystem indicator species, land/water ecotone ecosystem indicator species and freshwater ecosystem indicator species should be simultaneously selected to assess watershed ecosystem health. The indices of watershed ecosystem health assessment should include four categories: ecological category, physical-chemical category, social-economic category and human health category. Every category has some relative indices. Ecological indices are those reflecting the characters and states of a watershed ecosystem and are classified into terrestrial ecosystem indices, land/water ecotone ecosystem indices, freshwater ecosystem indices and integrated watershed indices. The physical-chemical indicators relate to the abiotic environment of a watershed ecosystem. The social-economic and human health indicators are focussed on the supporting role of watershed ecosystems in human survival and watershed development, with economic parameters and environmental pressure indices of social development being adopting to measure the quality and sustainability of watershed ecological service. Because of the complexity of watershed ecosystems, the measures of watershed ecosystem health indices, especially some ecological indices, are difficult. The measurement methods should be further developed.

The assessment of watershed ecosystem health has a history of only ten years. There are some problems that should be further discussed in this realm. This paper puts forward these problems and research trends in future.

**Key words:** watershed ecosystem health; assessment; category; indices

文章编号:1000-0933(2003)08-1606-09 中图分类号:Q149 文献标识码:A

流域作为一种特殊的区域,以丰富的水资源哺育着人类,灌溉着农田,净化着环境,以干支流航运为联系纽带沟通着全流域,以广阔的水域养育了千万种水生生物,以蕴藏着的巨大水能为流域经济振兴提供强大的动力。然而,长期以来,由于人们对流域生态环境的破坏和对流域资源的过度开发和利用,流域水体受到的污染已越来越严重,植被的破坏、水土流失的加剧、泥石流和洪水频度的加大及程度的加剧,这些因素已严重影响到流域生态系统的健康<sup>[1]</sup>。因此,流域生态系统健康的研究已日益受到人类的重视,不同国家和地区已越来越把以流域为单元,建立生态系统健康的评价体系、恢复流域生态系统或从生态系统健康的角度综合整治流域环境作为流域开发的重要措施<sup>[2]</sup>。从流域巨系统出发,综合考虑流域内部不同生态系统(自然生态系统、社会生态系统和经济生态系统)之间及每一生态系统内部的健康作用机制,探讨流域生态系统健康的评价方法,对认识流域生态系统的健康程度,监测其演变规律,优化系统的结构与功能,以及对流域综合开发与管理及流域可持续发展具有重要的理论意义和指导意义。本文参考十多年来陆地生态系统健康和水生生态系统健康评价的研究成果,对流域生态系统健康评价方法进行了初步的探讨。

1 流域生态系统健康的定义及其特征

人们对流域生态系统的健康从不同立场有众多观点和侧重表述<sup>[3~10]</sup>。从功利主义的观点,流域生态系统健康状态被认为是流域中对流域有影响的生物与非生物的因素(如害虫、种群、土地利用方式、收获等)对现在和未来的流域管理不产生威胁,即流域管理目标的满足。功利主义的观点使得流域生态系统健康能从多方面进行评价。但它会造成“认为是健康的某一单一的流域内不同子系统的状态从另一方面被认为是不健康的。”从生态系统的角度,人们也提出了许多概念。如“健康的流域生态系统是人类、植物、动物、水体、土壤及它们的物质环境的功能聚合体”、“健康的流域生态系统是处于平衡的生态系统”、“一个健康的流域生态系统是一个对变化有弹性的系统”、“健康的流域生态系统是具有流域生态系统生产力和受压迫后能恢复的巨生态系统”等等。然而,什么才是平衡?怎样意味着正常功能?如何去度量流域生态系统的弹性和恢复力?等等问题很难被人们理解和度量。因此学者们提出具体的建议,认为健康的流域生态系统是远离流域生态平衡综合症,的危机综合症主要表现为:初级生产力的下降(对流域内陆地生态系统而言)或增加(对流域内水生生态系统而言)、营养的流失、生物多样性的丧失、关键种群的波动增强、生物结构

的退化（正常演替过程的颠倒由此机会种取代了在生境和资源利用上更专门的种）和疾病的广泛发生及严重性等<sup>[11]</sup>。

然而，以上提出的这些定义倾向于强调流域生态系统健康的生态学方面，更为综合的考虑应该将流域看作一个社会-经济-自然复合生态系统，将人类健康和社会经济因素考虑在内。理解流域生态系统的全面性和整体性需要考虑把人类作为生态系统的组成部分而不是同其分离。所以流域满足人类需求和愿望的程度应该纳入流域生态系统健康的定义中<sup>[12, 13]</sup>。总之，健康的流域生态系统具有以下特征<sup>[14, 15]</sup>：①对流域进化过程中遇到的正常干扰（如洪水、干旱、火灾等）具有恢复力；②远离流域生态系统危机综合症；③能自我维持，即在没有外部输入时能存在，在人类管理的的生态系统（如流域内农业、森林生态系统）中，每单位产出所需外部输入不增加；④管理实践和生态系统过程不损害邻近生态系统；⑤经济上可行，能够提供合乎自然和人类需求的生态服务；⑥维持健康的人类群体。

2 流域生态系统健康研究的尺度

尺度通常是指观察或研究对象的空间分辨率和时间单位，它标志着对所研究对象细节的了解水平。在生态学中，尺度是指所研究生态系统的面积大小（空间尺度）或其动态变化的时间间隔（时间尺度）。以不同尺度研究时，内容也不相同<sup>[3]</sup>。流域生态系统是一个社会-经济-自然复合生态系统，可分为流域生态、经济和社会子系统三大部分，其中包含着人口、环境、资源、物资、资金、科技、政策、法律 and 决策等基本要素，各要素在时间和空间上，以社会需求为动力，以流域可持续发展为目标，通过投入产出链渠道，运用科学技术有机组合在一起，构成一个开放的系统。自然子系统是基础，经济子系统是命脉，社会子系统是主导。流域复合系统中各要素通过社会、经济 and 自然再生产相互制约、交织而组成流域的结构；流域复合系统的生产和再生产过程是物流、能流、信息流和资金流的交换和融合过程，因此，流域复合系统具有物质循环、能量流动、信息传递和资金增值四大功能。仅考虑流域生态系统的自然部分，可以将其划分为陆地生态系统、水陆交错带生态系统及水生态系统 3 类，进一步可分为各种生态系统类型，具体到每一个自然生态系统，其结构和功能与一般生态系统相同<sup>[16]</sup>。监测和评价流域生态系统健康须从流域生态系统的结构和功能研究入手，从单一子系统、小集水区、整个流域复合系统、流域与流域之间以及这些不同层次对干扰和环境变化的响应等尺度上考虑，结合干扰周期和生物特征（见表 1）<sup>[17]</sup>，建立长期时间尺度上的健康监测指标，研究流域生态系统动态和演替过程。具体来说，可以从两个层次上开展流域生态系统健康的研究，第一层次，将整个流域视为一个水陆相互结合、相互作用的大系统，关心流域内不同组成子系统之间的物质能量流动规律及其健康状况；第二层次，研究流域各主要组成系统的结构与功能，如河网、湖泊、自然植被、农田、城市等，关心这些系统本身的物质能量流动规律、健康状况及其对整个流域健康的影响。

表 1 流域内不同生物特征及其时空尺度

Table 1 Temporal-spatial scale of different biological features in a watershed		
生物特征 Biological feature	时间尺度 Temporal scale	空间尺度 Spatial scale
藻类 Algae	几天至几星期 Days~weeks	平方米 m <sup>2</sup>
大型无脊椎动物 Macroinvertebrates	几月至一年 Month~1 year	几百平方米 Several 100 m <sup>2</sup>
大型水生植物 Macrophytes	几年 Years	几百平方米 Several 100 m <sup>2</sup>
鱼类 Fish	几年 Years	平方公里 km <sup>2</sup>
河岸植被 Riparian vegetation	几十年 Decades	无尺度 No scale
陆地植被 Upland vegetation	几十年 Decades	无尺度 No scale

流域生态系统健康研究的空间尺度中要特别考虑流域的水系。在流域中，由源头集水区的第一级河流起，以下流经各级河流流域，形成连续的、流动的、独特而完整的系统，称为河流连续统（river continuum）<sup>[16]</sup>。河流连续统概念把河流网络看作一个连续的整体系统，强调生态系统中河流群落及一系列功能与流域的统一性，把河流视作一个不同时间和空间尺度范畴内的连续变化梯度。河流连续统常表现为一种树枝状网络，流经一些不同的地理地带，并且接纳大量的支流。支流的健康受损害常会影响到干流乃至整个流域的健康状况。因此，在选择流域生态系统健康研究的尺度时要充分考虑流域干支流的连

续性。

在流域生态系统中,水陆交错带是联系陆地生态系统和水生态系统的纽带和桥梁,具有保持物种多样性、拦截和过滤物质流、稳定毗邻生态系统及净化水质等多种生态功能,同时在生态环境改变速率上、抵抗外界干扰的能力上、生态系统的稳定上及对流域生态变化的敏感上等均表现出可明确表达的脆弱性<sup>[18]</sup>。因此,水陆交错带被认为是流域生态系统健康研究的重要地带,可为流域健康状况变化提供早期预警。

流域生态系统是一个开放系统,同时也是一个相对异质性的系统,流域各子系统之间不断地进行着能量、物质和信息流动,其中一个子系统健康受损将会对流域内其他系统乃至整个流域健康产生影响。流域内水陆相结合、相互作用是流域生态系统的一个重要特征<sup>[2]</sup>。此外,流域内人类活动如土地利用格局的改变、农田灌溉及施肥、地下水的开采、各种水利工程措施、城市化等都会对流域生态系统的健康状况产生重要影响。流域内水陆相互关系及人类活动影响是流域生态系统健康研究必须考虑的重要特征。

3 流域生态系统健康评价的科学基础和目标

流域生态系统健康评价的目的是为了生态恢复与管理,并实现流域的可持续性。对于受到人类强烈干扰的流域生态系统来说,要恢复到受干扰前的原始状态不仅是不可能的,也是不现实的。流域生态恢复应该以特定流域状况下可实现的最大自然性(maximum naturalness)为依据,以近自然状态(near-natural state)为其参考状态,以相对生态完整性(relative ecological integrity)为目标<sup>[17]</sup>。因此,健康的流域生态系统不一定是原始的生态系统,但它必须是一个相对完整的生态系统,具有复杂生境异质性特征,是稳定和可持续的,即随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<sup>[9]</sup>。这是流域生态系统健康评价的基础。

在流域生态系统健康评价中,要特别考虑流域的连接度(connectivity),即纵向、横向和垂直连接度<sup>[17]</sup>。流域的连接度不仅依赖于环境特征,而且依赖于生物有机体的行为。功能意义上的连接度要与结构连接度区别开来,结构连接度是物理上的连接,包括流域各单元之间永久的或暂时的连接。如果物理连接度没有受到损害,生物有机体能在纵向、横向和垂直方向自由移动,则流域具有高连接度。例如,流域内水生态系统中洄游鱼类的生存依赖于它们生境的物理连接度(产卵-觅食-过冬生境的连接度)。流域的连接度是流域生态系统健康评价的一个重要科学基础。

流域生态系统健康评价必须达到以下 5 个目标:①评价结果能完整准确地反映流域生态系统的健康状况,能够提供现状的代表性图案,以判断其适宜程度;②对流域生态系统健康进行长期监测和评价能够提供流域生态系统健康状况随时间的变化趋势(退化或恢复);③为流域生态系统健康提供早期预警,以便在不利影响产生之前采取措施预防不利影响的产生;④对流域内各类生态系统的生物物理状况和人类胁迫进行监测和评价,寻求自然、人为压力与流域生态系统健康变化之间的关系,以探求流域生态系统健康受损的原因;⑤定期地为政府决策、科研及公众要求等提供流域生态系统健康现状、变化及趋势的统计总结 and 解释报告,以便提出合理的流域综合开发和管理措施。

4 流域生态系统健康评价方法

流域生态系统健康评价除了需要对流域内不同类型生态系统的生态过程进行研究监测外,从景观和流域尺度进行环境质量监测也是必不可少的步骤。将遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和景观生态学原理及宏观技术手段与地面调查研究紧密配合,通过景观结构变化了解其功能过程。流域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<sup>[19]</sup>。具体方法有指示物种评价法和指标体系评价法。

4.1 指示物种评价法

指示物种评价法是陆地生态系统和水生态系统健康评价的常用方法<sup>[19~21]</sup>。指示物种评价生态系统健康主要是依据生态系统的**关键物种**、**特有物种**、**指示物种**、**濒危物种**、**长寿物种**和**环境敏感物种**等的数量、生物量、生产力、结构指标、功能指标及一些生理生态指标来描述生态系统的健康状况。指示物种评价法比较适用于流域内自然生态系统的健康评价。鉴于流域生态系统的复杂性,经常需要采用一些指示类群(Indicator taxa)来评价流域内自然生态系统健康。指示物种评价法包括单物种生态系统健康评价和多物种生态系统健康评价。单物种生态系统健康评价主要是选择对生态系统健康最为敏感的指示物种,这一物



种是特定生态系统所具有并对环境因子特别敏感,当生态系统的某一项或几项环境因子发生微小变化时,都会对这一物种的生长特征(生物量、活性、形态等)产生影响。同时,这一物种的多少也可以指示这一特定生态系统受胁迫的程度,也能反应生态系统对这一胁迫影响的反馈程度及特定生态系统的恢复程度。多物种生态系统健康评价主要是指在某一生态系统内,选定指示生态系统结构和功能不同特征的指示生物,建立多物种健康评价体系,这一体系内不同的指示物种指示了生态系统不同特征(结构、功能等)的健康程度,反应了生态系统不同特征的负荷能力和恢复能力,这是评价流域内自然生态系统的较好的方法。由于流域自然生态系统的复杂性,通常采用多物种生态系统健康评价法,即从流域内陆地生态系统、水陆交错带生态系统和水生生态系统中选取指示各生态系统结构和功能不同特征的指示生物,建立多物种健康评价体系来综合评价流域自然生态系统健康。

虽然采用指示物种评价生态系统健康的研究取得了很大进展,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等。另外,一些监测参数的选择不恰当也会给生态系统健康评价带来偏差<sup>[19]</sup>。可见,在流域自然生态系统健康评价研究中,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,即要明确它们对流域自然生态系统健康指示作用的强弱。

4.2 指标体系评价法

前面介绍的流域自然生态系统健康评价的指示物种方法虽然简便易行,但存在一些不足,比较明显的起码有 5 点:①应该选择不同组织水平的物种类群;②应该考虑不同尺度;③同一组织水平内应考虑到指示物种间的相互作用;④应考虑到指示物种在不同尺度转换时的监测指标变化;⑤未考虑流域内社会经济和人类健康参数,不能全面反映流域生态系统的健康状况。因此,必须建立包括社会经济和人类健康指标在内的指标体系,对大量复杂信息进行综合。

指标体系法评价流域生态系统健康首先要选用能够表征流域生态系统主要特征的指标;其次要对这些特征进行归类区分,分析各个特征对生态健康的意义;再次是对这些特征因子进行度量,确定每个特征因子在流域生态系统健康中的权重系数,每类特征因子在流域生态系统健康中的比重;最后建立流域生态系统健康评价的指标体系。针对流域内不同类型的生态系统,其特征因子、特征因子的权重、各类特征因子的比重及评价指标体系是不一样的。

4.2.1 流域生态系统健康评价的范畴及其相应指标 流域生态系统是一个社会-经济-自然复合生态系统,流域自然生态系统又包括陆地生态系统、水陆交错带生态系统和水生生态系统;健康的流域生态系统不仅仅是生态上合理的,而且必须是经济上可行,能够提供合乎自然和人类需求的生态服务,且能维持健康的人类群体。因此,流域生态系统健康的指标体系评价必须考虑以下 4 个范畴。

(1)生态学范畴 生态系统健康深深扎根于生物学和生态学,生物学和生态学在生态系统健康研究中起着关键作用<sup>[23]</sup>。因此,生态学范畴是流域生态系统健康评价的主要范畴。流域生态系统健康的生态指标包括流域内不同类型自然生态系统之间及每一生态系统内部的生态指标,每一生态系统的生态指标又包括个体及种群水平、群落水平和生态系统水平指标<sup>[23~32]</sup>。流域生态系统健康的生态指标见表 2。

(2)物理化学范畴 物理化学范畴集中于流域生态系统的非生物环境的测定。物理化学因素可能是导致或影响流域生态系统生态过程变化和人类健康的原因。同时,物理化学因素的变化也是流域生态系统行为的反应。物理化学范畴涉及流域内大气、水、土壤等环境要素<sup>[23]</sup>(表 3)。

(3)社会经济范畴 社会经济系统是流域复合生态系统的组成部分,流域生态系统健康评价着重于整体性评价,因为受控流域的生态环境质量与人类活动的变化密切相关,流域生态系统的健康问题是人类产生的,不可能存在于人类的价值判断之外,而人类价值判断最终由社会经济和文化因素形成,因此,不考虑社会经济和文化因素的流域生态系统健康评价是没有意义的。因此,评价流域生态系统健康必须考虑社会经济范畴。健康的流域生态系统必须满足流域社会经济可持续发展的要求。可选取一些社会经济指标来评价流域社会系统的健康状况。这些指标包括来源于经济学的指标,如:GDP,人均纯收入,失业率等。同时,还有着眼于造成环境压力的社会指标,如人口增长、资源消费和技术发展导致人类对生态环境的影

响强度不断增加,是人类对生态环境造成压力的主要因素<sup>[33]</sup>。因此,可用人口增长率、人均资源和能量消费与消费单位物质造成的生态环境影响来共同评价社会经济对生态环境造成的压力。此外,社会经济范畴还包括流域内的主要经济活动、流域土地利用和分布、施肥及农业灌溉等开发利用、流域保护、公众参与、环保意识、社会公共政策和相关法律等方面<sup>[30]</sup>。

表 2 流域生态系统健康评价的生态指标

Table 2 The ecological indices of watershed ecosystem health assessment

指标类型 Type of index	陆地生态系统指标 Terrestrial ecosystem index	水陆交错带生态系统指标 Water/land ecotone ecosystem index	水生生态系统指标 Freshwater ecosystem index	流域综合指标 Integrated watershed index
具体指标 Specific index	动植物区系组成,物种多样性(种类数量和相对丰度),生物量,初级生产力,外来物种比例,生境数量和质量,生态服务功能(保持水土、涵养水源、净化空气、营养元素循环等),生态系统水平指标(稳定性、完整性、活力、组织结构及恢复力)①	生物多样性(物种丰富度、物种多样性指数、景观多样性指数、优势度指数等),外来物种比例,物种垂直结构与水平分布,物种繁殖或再生,生物量及初级生产力,生境数量和质量,生态服务功能(调节功能、净化功能、社会文化功能及产品功能),生态系统水平指标②	水生动植物区系组成,物种多样性,物种大小分布,生物量,初级生产力,食物网(营养)结构,水生生境的类型和面积,生态服务功能(调节功能、净化功能、产品功能等),生态系统水平指标③	流域自然生态系统类型和面积,不同类型生态系统间的景观格局状况,不同系统间的能量、物质和物种流,不同系统间的协调性,流域干支流的连续性,流域纵向、横向和垂直连接度④

① Composition of flora and fauna, species diversity (number of species and relative abundance), biomass, primary production , proportion of exotic species, quantity and quality of habitats, ecosystem services (soil and water conservation, water self-restraint, air purification, nutrient element cycling etc.), ecosystem level indices (stability, integrity, vigor, organization and resilience) . ② Biodiversity (species richness, species diversity index, landscape diversity index, predominance index etc.), proportion of exotic species, vertical structure and horizontal distribution of species, reproduction and regeneration of species, biomass, primary production , quantity and quality of habitats, ecosystem services (regulation function, purification function, social-cultural function and production function), ecosystem level indices ③ Composition of aquatic flora and fauna, species diversity, size distribution of species, biomass, primary production , food web (trophic) structure, aquatic habitat type and area, , ecosystem services (regulation function, purification function, production function), ecosystem level indices ④ Types and area of natural ecosystem in a watershed, landscape patterns condition between different ecosystems, matter , energy and species flow between ecosystems, harmony among ecosystems, continuity of stems and branches in a watershed, watershed connectivity etc.

(4)人类健康范畴 人类是流域生态系统的一个组成部分,因此,健康的流域生态系统必须能够维持健康的人类群体,流域生态系统健康评价必须包括人类健康范畴。流域生态系统健康受损对人类的影响可分为直接影响和间接影响。直接影响是通过食物链中有毒物质的富集或通过疾病的传播而危害人体健康,间接影响如农业病虫害的增多导致流域内农业生态系统生产力的下降,食物不足引起人类营养不良以及身体抵抗力的下降,最终使人类更易遭到疾病的侵袭<sup>[14]</sup>。人类健康指标包括死亡率、主要疾病发生程度、文化水平、环境因子对健康的潜在危害、对健康有害的资源 and 消费限制等。

4.2.2 流域生态系统健康评价指标的度量 在上述流域生态系统健康评价指标中,大部分指标可通过常规的物理、化学、生物学、野外调查测试和社会经济调查的方法来度量,但有些生态指标是难以度量的,如生态服务功能、生态系统的稳定性、完整性、活力、组织结构、恢复力、流域自然生态系统间的协调性等。Scaeffier 等<sup>[34]</sup>首次探讨了生态系统健康的度量问题,Ulanowicz 和 Rapport 等<sup>[10, 35]</sup>发展了生态系统健康评价的活力、组织力、网络力的度量公式。在健康评价中,直接的测量、网络分析和模型模拟是常用的指标度量方法<sup>[10]</sup>。表 4 列出了部分流域生态系统健康评价指标的相关度量及方法。

表 3 流域生态系统健康评价的物理化学指标

Table 3 The physical-chemical indices of watershed ecosystem health assessment

指标类型 Type of index	大气指标 Air index	水指标 Water index	土壤指标 Soil index
具体指标 Specific index	SO <sub>2</sub> 、NO <sub>x</sub> 的浓度, 颗粒物浓度, 与疾病有关的空气污染事件, 气象灾害, 辐射暴露等 <sup>①</sup>	水资源总量, 平均年降水量和蒸发量, 水质 (持久性有毒化学物质如: PCB、PAH、重金属等, COD, BOD <sub>5</sub> , 溶解氧, pH 值, 电导率, N、P 营养物等), 水位, 水温, 浊度, 沉积物状况, 河流淤积程度, 水陆交错带的水状况等 <sup>②</sup>	土壤有机质含量, pH 值, 营养元素含量, 土壤结构, 土壤生物种类和数量, 土壤酶活性, 土壤污染程度等 <sup>③</sup>

①Concentrations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, concentration of particles, incidence of air pollution rated disease and illness, weather disaster, radiation exposure etc. ②Total amount of water resources, average annual precipitation and evaporation, water quality (persistent toxic chemicals: PCB, PAH, heavy metal etc. , COD, BOD<sub>5</sub>, disssolved oxygen, pH, conductivity, nutrient etc. ), water level and temperature, turbidity, sedimentation, degree of siltation, water condition of water/land ecotone etc. ③Amount of soil organic matter, soil pH, nutrient level, soil structure, species number of soil organisms, soil enzyme activity, degree of soil pollution etc.

表 4 流域生态系统健康评价指标的相关度量及方法

Table 4 Relative measures and methods of indices of watershed ecosystem health assessment

健康指标 Health index	相关度量 Relative measure	可行的方法 Practicable method
营养元素循环 Nutrient element cycling	营养元素累积量 Amount of nutrient element accumulation	测量法 Measurement method
能量流动 Energy flow	能量累积量 Amount of energy accumulation	测量法
净化空气 Air cleansing	CO <sub>2</sub> 固定量 Amount of CO <sub>2</sub> fixation	测量法
稳定性 Stability	演替趋势 Alternative trend	模拟模型 Simulation modeling
完整性 Integrity	生物多样性, 群落结构 Biodiversity, community structure	测量法
活力 Vigor	初级生产力, 新陈代谢 Primary production, metabolism	测量法
组织结构 Organization	多样性指数, 平均互信息可预测性 Diversity index, average mutual information predictability	网络分析 Network analysis
恢复力 Resilience	恢复时间, 可承受的最大胁迫 Recovery time, accepted maximum stress	模拟模型
协调性 Harmony	边界 Boundary	测量法

流域生态系统健康评价指标的度量是一件十分复杂的工件,因为流域生态系统是一个社会-经济-自然复合生态系统,流域内每个生态系统都有许多组分、结构和功能,各有一套独立的系统,因此,必须对每个生态系统的健康指标加以具体度量。同时,流域生态系统是动态的,条件在变,新条件下生态系统内敏感物种能动性也发生相应变化;而且,生态系统健康评价指标的度量本身往往因人而异。事实上,每一位科学家都有自己的专长、特殊兴趣与追求,常用自己熟悉的专业技术去选择不同方法。显然,流域生态系统健康评价指标的度量还不完善,尚需做更多工作,有待于新的发展。

5 流域生态系统健康评价存在的问题及今后的研究趋势

流域作为社会-经济-自然复合生态系统,是生态系统健康研究较为合适的尺度。相对于传统的环境评价方法仅仅着眼于物理化学参数或生物检测技术的局限性,流域生态系统的健康评价作为一门交叉科学的实践,不仅包括流域内陆地生态系统、水陆交错带生态系统、水生生态系统的生态指标来体现流域生态系统的复杂性,万寿数据物理、化学方面的指标,以及社会经济、人类健康指标,反映了流域生态系统为人类社会提供生态系统服务的质量和可持续性。因此,流域生态系统健康评价为区域生态环境评价提供了一种

新方法。然而,流域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,这一学科涉及的研究领域较宽,内容较多,制约流域生态系统维持和发展的因素,及相互之间的关系也较为复杂,同时流域内不同生态系统本身内部的结构与过程差异较大。这就导致了流域生态系统健康评价研究的复杂性、多学科综合性和多因子的系统性。总之,在该领域还存在不少问题,还有许多工作要做。这主要体现在以下几个方面:①目前对流域生态系统健康的定义还存在争论,尽管流域生态系统健康的标准已提出不少,但对于流域生态系统健康状况仍有许多不确定性,尤其是流域生态系统在什么状态下才是健康的?流域生态系统改变到什么程度其为人服务的功能仍能维持?生态学家和政策制定者找不到准确参考点来评价流域生态系统健康的受损程度。因此,今后应进一步加强对流域生态系统健康定义的研究,提出更为合理的健康评价标准和参照系,并从新的角度开拓思路。②由于流域生态系统的复杂性,特别是流域生态系统与外界环境紧密联系,流域生态系统健康很难简单概括为一些易测的具体指标,今后的工作应集中在生态、社会经济和人类健康整合的基础上对流域生态系统健康进行综合评价研究,以此来提出流域生态系统健康管理对策。③流域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,哪些是胁迫或不健康的症状,尤其是幼年 and 老年的生态系统。因此,应建立长期时间尺度的健康监测指标,研究流域生态系统的演替过程和动态,记录生态系统在各种胁迫下的反应。④由于目前全球大部分流域生态系统均受到人类不同程度的影响,面对的是改变了的流域生态系统,因此在进行健康评价时应该以系统的自组织能力及其稳定性为依据,不能过多地依赖自然性。⑤随着全球流域生态系统的不断退化,迫切需要建立一套健康预警指标及其预报模型,需要研究压力之下流域生态系统的风险评价。⑥遥感和地理信息系统等新技术和新方法在流域生态系统健康评价中的广泛应用<sup>[36]</sup>,为流域生态系统健康的定量化评价和相关模型的建立提供了快速、准确和经济可行的技术和方法,将会大大推动流域生态系统健康评价的发展。

## References:

- [1] Wu G, Cai Q H. Expression as a whole of research content of the watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18** (6): 575~581.
- [2] Yan S Y, Wang X R. Watershed ecology, flood disaster control, water pollution control and sustainable development in TaiTu Basin. *Journal of Lake Sciences*, 2001, **13**(1): 1~8.
- [3] Cui B S, Yang Z F. Research review on wetland ecosystem health. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, **20**(3): 31~36.
- [4] Costanza R and Mageau M. What is a healthy ecosystem? *Aquatic Ecology*, 1999, **33**(1): 105~115.
- [5] Kerr S R and Dickey L M. Measuring the health of aquatic ecosystems. In: Cairns V W, Hodson P V, Nriagu J O eds. *Contaminant Effects on Fisheries*. J. Wiley and Sons, New York, 1984.
- [6] Minns C K, Moore J E, Schindler D W, *et al.* Assessing the potential extent of damage to inland lakes in eastern Canada to acidic deposition IV: Predicted impacts on species richness in seven groups of aquatic biota. *Canada Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 1990, **47**: 821~830.
- [7] Schaeffer D J and Cox D K. Establishing ecosystem threshold criteria, In: Costanza R, Norton B, Hashell B eds. *Ecosystem Health—New Goals for Environmental Management*. Island Press, Washington, D. C., 1992.
- [8] Smol J P. Paleolimnology: An important tool for effective management. *J. Aquat. Ecosyst. Health*, 1992, **1**(1): 49~59.
- [9] Costanza R. Toward an operational definition of health, In: Costanza R, Norton B, Haskell B eds. *Ecosystem Health—New Goals for Environmental Management*. Island Press, Washington, D. C., 1992.
- [10] Ulanowicz R E. *Growth and Development; Ecosystems Phenomenology*. Springer-Verlag, New York, 1986.
- [11] Rapport D J. Evolution of indicators of ecosystem health, In: Daniel H ed. *Ecological indicators*. Barking: Elsevier Science Publishers Ltd, 1992. 121~134.
- [12] Cairns J Jr and Munawar M. Ecosystem health through ecological restoration: Barriers and opportunities. *J. Aquat. Ecosyst. Health*, 1994, **3**(1): 5~14.
- [13] Borman F H. Ecology: A personal history. *Ann Review Energy and Environ.*, 1996, **21**: 1~29.
- [14] Rapport D J. Ecosystem health: Exploring the territory. *Ecosystem Health*, 1995, **1**(1): 5~13.
- [15] Harwall M A, Myers V, Yong T, *et al.* A framework for an ecosystem integrity report card. *Bioscience*, 1999,



49: 543~556.

[16] Deng H B, Wang Q L and Cai Q H. Watershed ecology new discipline, new idea and new approach. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1998, **9**(4): 443~449.

[17] Bundi U, Peter A, Frutiger A, *et al.* Scientific base and modular concept for comprehensive assessment of streams in Switzerland. *Hydrobiologia*, 2000, **422/423**: 477~487.

[18] Gregory S V, Swanson F J, McKee W, *et al.* An ecosystem perspective of riparian zones. *Bioscience*, 1991, **41**: 540~551.

[19] Ma K M, Kong H M, Guan W B, *et al.* Ecosystem health assessment methods and directions. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(12): 2106~2116.

[20] Tang T, Cai Q H, Liu J K. River ecosystem health and its assessment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(9): 1191~1194.

[21] Kong H M, Zhao J Z, Ji L Z, *et al.* Assessment method of ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(4): 486~490.

[22] Hilty J and Merenlender A. Faunal indicator taxa selection for monitoring ecosystem health. *Biological Conservation*, 2000, **92**(2): 185~197.

[23] Bertollo P. Assessing ecosystem health in governed landscapes: a framework for developing core indicators. *Ecosystem Health*, 1998, **4**(1): 33~51.

[24] Rapport D J, *et al.* Evaluating landscape health: integrating societal goals and biophysical process. *Journal of Environmental Management*, 1998, **53**: 1~15.

[25] Rapport D J, Regier H A and Hutchison T C. Ecosystem behavior under stress. *Am. Naturalist*, 1985, **125**: 617~640.

[26] Costanza R. Predictors of ecosystem health, In: Rapport D J, Costanza R, Epstein P R, *et al.* eds. *Ecosystem Health*. Malden and Oxford: Blackwell Science, 1998. 81~102.

[27] Karr J R. Defining and assessing ecological integrity: beyond water quality. *Environmental Toxicity and Chemistry*, 1993, **12**: 1521~1531.

[28] Valdermeulen H. The development of marine indicators for coastal zone management. *Ocean & Coastal Management*, 1998, **39**: 63~71.

[29] Xu F L, Jorgensen S E and Tao S. Ecological indicators for assessing freshwater ecosystem health. *Ecological Modeling*, 1999, **116**: 77~106.

[30] Cairns J, McCormick P V and Niederlehner B R. A proposed framework for developing indicators of ecosystem health. *Hydrobiologia*, 1993, **263**: 1~44.

[31] Aguilar B J. Applications of ecosystem health for the sustainability of managed system in Costa Rica. *Ecosystem Health*, 1999, **5**: 36~48.

[32] O'Connor R J, Walls T E and Hughes R M. Using multiple taxonomic groups to index the ecological condition of lakes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, **61**: 207~228.

[33] Peterson R W. Indicators of the causes of ecological impacts or what's causing the global environmental crisis? In: McKenzie D H, Hyatt D E & McDonald ed. *Ecological indicators*. London and New York: Elsevier Applied Science, 1992. 89~100.

[34] Scaffer D J, Henricks E E and Kerster H W. Ecosystem health 1. Measuring ecosystem. *Environment Management*, 1988, **12**: 445~455.

[35] Rapport D J. *Ecosystem Health*. Oxford: Blackwell Science, Inc, 1998.

[36] Patil G P and Myerst W L. Environmental and ecological health assessment of landscapes and watersheds with remote sensing data. *Ecosystem Health*, 1999, **5**(4): 221~224

参考文献:

[1] 吴刚,蔡庆华.流域生态学研究内容的整体表述.生态学报,1998, **18**(6): 575~581.

[2] 阎水玉,王祥荣.流域生态学与太湖流域防洪、治污及可持续发展.湖泊科学,2001, **13**(1): 1~8.

[3] 崔保山,杨志峰.湿地生态系统健康研究进展.生态学杂志,2001, **20**(3): 31~36.

[16] 邓红兵,王庆礼,蔡庆华.流域生态学——新科学、新思想、新途径.应用生态学报,1998, **9**(4): 443~449.

[19] 马克明,孔红梅,关文彬,等.生态系统健康评价:方法与方向.生态学报,2001, **21**(12): 2106~2116.

[20] 唐涛,蔡庆华,刘建康.河流生态系统健康及其评价.应用生态学报,2002, **13**(9): 1191~1194.

[21] 孔红梅,刘建康,王庆礼,等.生态系统健康评价方法初探.应用生态学报,2002, **13**(4): 486~490.