

流域生态健康评价理论与方法研究进展

李春晖^{1,2}, 崔 嵬¹, 庞爱萍², 郑小康^{1,2}

(1. 北京师范大学环境学院 水沙科学教育部重点实验室 北京 100875 ;

2. 北京师范大学环境学院 水环境模拟国家重点实验室 北京 100875)

摘 要 对流域进行生态健康评价,将为流域的规划、管理和保护以及流域综合治理提供决策依据。本文回顾了国内外流域生态健康评价的历史和现状,着重阐述了流域生态系统健康评价的尺度与方法。流域生态系统健康评价主要有两种方法:一是生物监测法,二是指标体系法。对流域进行生态健康评价,重点在于建立评价指标体系。流域生态健康评价的指标体系应该包括生物、水质、水文、栖息地、社会经济和人类健康等六方面指标。最后,明确指标选取的基本原则,并指出了目前流域生态健康评价存在的问题及今后的研究趋势。

关 键 词 流域;生态健康;评价;进展

流域生态系统是一个社会-经济-自然复合生态系统^[1],具有生态完整性^[2]。当生态系统受各种自然或人为因素干扰,超过本身的适应能力,必然在某些方面出现不可逆转的损伤或者退化、生产力下降、生物多样性减少、对环境的调节能力下降等,具有脆弱性^[3]。例如,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,从河流水库中超量引水使得河流本身水量无法满足生态用水的最低需要^[4],水利工程导致自然河流的渠道化和非连续化,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,并危及流域生态安全^[5]。因此,流域生态系统健康的研究已日益受到人类的重视,不同国家和地区纷纷采取措施,包括对流域进行生态健康评价,以及恢复流域生态系统^[6],从生态系统健康的角度对流域环境进行综合整治。对流域进行生态健康评价,将为流域的规划、管理和保护以及流域综合治理提供决策依据,也是保障流域生态安全的基础。根据评价结果,即可对流域生态系统的某一层面采取相应保护、修复等对策措施,促进流域生态环境和经济社会全面、协调与可持续发展。

目前,我国对于流域生态系统健康的评价研究

仍然处于刚刚起步的探索阶段,因此,对于该类问题的研究具有重大的意义和前瞻性。本文系统总结了流域生态健康评价的理论与方法,并指出存在的问题和研究展望。

1 流域生态健康研究进展

生态健康是在 20 世纪 80 年代兴起的一个新的研究领域。以加拿大学者 Schaeffer 和 Rapport 为代表, Schaeffer 认为,生态健康涵义是生态系统缺乏疾病,而生态系统疾病是指生态系统的组织受到损害或减弱。生态系统中的疾病,正如人生病一样,有短期和长期的以及主要的和次要的影响。如果生态系统的自动平衡修复机制不完善以至于病态发展到疾病,那么这种疾病就要受到关注。Rapport 发展了这种观点使之更进一步成为生态系统水平上的危难和综合病症^[7,8]。一般认为,生态系统健康是指生态系统处于良好状态,生态系统不仅能保持化学、物理及生物完整性,还能维持其对人类社会提供的各种服务功能。生态系统健康的标准有活力、组织、恢复力、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 方面。它们分属于不同的自然和社会科学

收稿日期:2007-09;修订日期:2007-12。

基金项目:国家自然科学基金[50709002 和 50509002]和国家重点基础研究发展规划项目(2006CB4033)。

作者简介:李春晖(1976-),男,安徽阜阳人,教授,博士。主要研究领域为水资源、流域管理和生态健康等。

E-mail: chunhui@bnu.edu.cn

范畴,并同时考虑了时空尺度。这 8 个标准中最重要的是前 3 项^[9]。活力表示生态系统的能量输入和营养循环容量,可根据新陈代谢或初级生产力等具体指标来测量,组织即生态系统组成及途径的多样性,可根据系统组分间相互作用的多样性及数量比率来评价,一般认为,生态系统的组织越复杂就越健康,恢复力也称抵抗能力,即胁迫消失时,系统克服压力及反弹回复的容量,根据自然干扰的恢复速率和 5 生态系统对自然干扰的抵抗力来评价。一个健康的生态系统应该是稳定和可持续的,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^[10]。

国外对河流生态健康的评价研究工作开展得较早。19 世纪末期,从已严重污染的欧洲少数河流开始^[11],此时对于河流健康的评价主要停留在对水质的评价。20 世纪 80 年代初,河流管理的重点由水质保护转到河流生态系统的恢复,因为水质评价已远远不能满足河流管理的需要,不能揭示损害河流健康多方面的因素。因此,河流健康评价的内容也发生了改变,开始转向对河流生态质量的评价。

20 世纪 80 年代,出现了两种重要的河流健康评价和监测的生物学方法,即生态完整性指数 (IBI) 和河流无脊椎动物预测和分类计划 (RIVPACS)^[12]。IBI 产生于美国中西部,最初用于鱼类,后又推广到其他物种。RIVPACS 产生于 1977 年英国淡水生态所的河流实验室,早期目标是促进对保护位置的选择,物种组成类型是其分析重点。这两种评价方法在许多国家得到了应用。澳大利亚在 RIVPACS 的基础上发展了适合本国的方法 AUSRIVAS,并于 1993 年采用 AUSRIVAS 进行了第一次全国水资源健康评价^[13]。此外,河流健康评价指数还有藻类丰富度指数 (AAI)、硅藻的污染敏感性指数 (PS)、底栖生物完整性指数 (B-IBI) 等。同一时期,许多国家还发展了河流健康的综合评价方法,较具代表性的有美国的快速生物评价协议 (RBP)、英国的河流保护评价系统 (SERCON)、南非的栖息地完整性指数 (L-HI)、瑞典的岸边与河道环境细则 (RCE)、澳大利亚的河流状况指数 (ISC) 等。

较之河流生态健康评价,在流域这一尺度上进行生态健康评价的研究和实践尚不多见。美国在这一领域尝试较早,于 2005 年前后分别对国内的 Muskoka 流域、Mississippi 流域、新泽西州流域、波特兰市流域开展了生态健康评价工作。根据专家和

公众的意见,拟定了健康评价指标体系,并据此进行了流域生态健康评价。

我国学者崔保山和杨志锋指出生态系统健康是指系统内的物质循环和能量流动未受到损害,关键生态组分和有机组织被保存完整,且缺乏疾病,对长期或突发的自然或人为扰动能保持着弹性和稳定性,整体功能表现出多样性、复杂性、活力和相应的生产率,其发展终极是生态整合性^[14]。也有学者认为,健康的流域生态系统是远离流域生态系统危机综合症的,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、生物结构的退化和疾病的广泛发生及严重性等。然而,以上提出的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^[15]。目前,这种说法被越来越多的人所接受和认同。

总结国内外学者的研究成果,认为健康的流域生态系统具有以下特征^[16]: 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; 远离流域生态系统危机综合症; 能自我维持,即在外部输入时能存在,在人类管理的生态系统中,每单位产出所需外部输入不增加; 管理实践和生态系统过程不损害邻近生态系统; 经济上可行,能够提供合乎自然和人类需求的生态服务; 维持健康的人类群体。

2 流域生态健康评价理论与方法

2.1 评价尺度

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^[14]。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、法律和决策等基本要素,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。

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)^[17],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
Tab.1 Different biological characteristics and their spatial and temporal scales in basin

生物特征	时间尺度	空间尺度
藻 类	几天至几星期	m ²
大型无脊椎动物	几月至一年	几百m ²
大型水生生物	几年	几百m ²
鱼 类	几年	km ²
河岸植被	几十年	无尺度
陆地植被	几十年	无尺度

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^[18,19]。

2.2 评价方法

总结国内外流域生态健康评价的方法,主要分

为生物监测法和指标体系法^[20]。

2.2.1 生物监测法

一个世纪前,人们已开始注意到人类活动产生的污染会对河流生物造成伤害,并尝试着追踪这种生物退化的程度。生物退化甚至被视为人类活动强度的指示因子,河流的生物监测从此开始。最近二十年来,人们进一步认识到,河流生物群落具有整合不同时间尺度上各种化学、生物和物理影响的能力。这些生物群落的结构和功能特性能够反映诸如由于化学物污染、物理生境的消失和片断化,外来物种的入侵,水资源的过量抽取和河岸植被带的过度采伐所造成的水质的总体退化。生物监测可把目光集中在多种生态胁迫对水环境造成的累积效应上,应该成为河流健康评价的重要手段^[21]。生物监测法又可以进一步分为指示生物法和简单指数法。

(1) 指示生物法

最经典的生物监测方法是指示生物法。该方法对水域生物如细菌、藻类、原生动物、海绵动物、浮游动物、环节动物、软体动物、轮虫、苔藓动物、贝类、昆虫甚至水草等进行系统的调查、鉴定,根据物种的有无来评价生态系统的健康状况。近来,在指示物种的选择上,又有新的进展,有研究者选择运动范围较大的指示物种,在景观尺度上评价河流健康。Kingsford 就运用航空监测手段^[22],了解河流系统周围水鸟的数量变化与分布趋势,来研究具有较大河漫滩河流的健康状况,从而将河流与其附属湿地、河漫滩的健康联系起来。

(2) 简单指数法

20 世纪 50 年代以来,许多学者应用较简单的生物指数与物种多样性指数来逐步替代指示物种监测河流状况,得到较多的应用。

生物指数法多以鱼类、着生藻类(多为硅藻)及无脊椎动物为监测与研究对象。鱼类个体大,生长周期长,较易鉴别,且鱼类群落由不同食性种类组成,能够反映水体状态的变化,因而在实践中得到应用。以鱼类为对象的生物指数的代表是鱼类生物完整性指数(BI)与鱼类集合体完整性指数(FAI)等^[23]。

藻类的种类与数量组成是水体状况的重要指标,藻类生物指数也有不少的范例。其中,较有代表性的包括污水生物指数^[24]、硅藻生物指数、藻类丰富度指数^[25]、污染敏感性指数(IPS)、类属硅藻指数(GDI)^[26]及营养硅藻指数等。

底栖动物由于其定居性及在营养结构中的地位,故成为区域性的监测指标。早期的基于河流大型无脊椎动物监测基础上的健康状况评价指数主要包括特伦特生物指数^[27]、计分制生物指数、连续比较指数、河流无脊椎动物预测和分类系统(RIV-PACS)等,近年来逐步发展起来的有澳大利亚河流评价计划(AUSRIVAS)、南非计分系统(SASS)^[28]、底栖生物完整性指数(B-IBI)、营养完全指数(ITC)^[29]等。我国学者在借鉴国外经验的基础上,也进行了较多的利用底栖动物监测河流健康的实证研究。

常用的物种多样性指数包括马格列夫多样性指数、申农-威弗多样性指数、PFU微生物群落等。这类方法对确定物种、判断物种耐性的要求不太严格,应用起来较为简便^[30]。在我国,改进后的PFU微型生物群落法成为我国水环境生物监测的国家标准方法,得到了大量的应用。

2.2.2 指标体系法

生物监测法是目前河流生态系统健康评价的常用方法,但也存在许多缺点,如选择不同的研究对象及监测参数会导致不同的评价结果,难以确定不同生物类群进行评价时的取样尺度与频度,无法综合评价河流生态系统状况问题等。而且,一个指标只能反映干扰传播过程中造成的某方面影响,在流域范围内对所有干扰都敏感的单一河流健康指标是不可能存在的^[31]。因而,综合物理、化学、生物,甚至社会经济指标,能够反映不同尺度信息的指标体系法成为目前生态系统健康评价的重要手段^[32]。

国外已应用的指标体系法包括美国的快速生物评价草案(RBP),瑞典的岸边与河道环境细则(RCE)和澳大利亚的河流状况指数(ISC)等方法。

美国环境署提出的RBP是一种综合方法,涵盖了水生附着生物、两栖动物、鱼类及栖息地的评估方法。栖息地评估内容包括:(1)传统的物理-化学水质参数;(2)自然状况定量特征,包括周围土地利用、溪流起源和特征、岸边植被状况、大型木质碎屑密度等;(3)溪流河道特征,包括宽度、流量、基质类型及尺寸。这种方法对于河道纵坡不同的河段采用不同的参数设置。在调查方法中还包括栖息地目测评估方法。RBP设定了一种参照状态,称为“可以达到的最佳状态”,通过当前状况与参考状况总体的比较分析,得到最终的栖息地等级,反映栖息地对于生物群落支持的不同水平。对于每一个监测河段等级数值范围0~20,20代表栖息地质量最高。

瑞典的RCE是为评估农业景观下小型河流物理和生物状况的方法。这种模型假定,对于自然河道和岸边结构的干扰是河流生物结构和功能退化的主要原因。RCE包含16项特征,其中包括:岸带的结构,河流地貌特征以及二者的栖息地状况。测量范围从景观到大型底栖动物。RCE记分分为5类,范围从优秀到差。这种方法的优点是采用目测,可以进行快速观测,现场的每一个点只需要11~20 min。

澳大利亚的ISC方法是澳大利亚的维多利亚州制定的分类系统,其基础是通过现状与原始状况比较进行健康评估。该方法强调对于影响河流健康的主要环境特征进行长期评估,以河流每10~30 km为河段单位,每5年向政府和公众提交一次报告。评估内容包括5个方面,即水文、河流物理形态、岸边带、水质和水域生物,共计22项指标(见表2)^[33]。每一方面又划分若干参数,比如,水文类中,除了传统的水文状况对比外,还包括流域内特有的因素,比如水电站泄流影响,城市化对于径流过程影响等。每一方面的最高分为10分,代表理想状态,总积分为50分。将河流健康状况划分为5个等级,按照总积分判定河流健康等级,也说明河流被干扰的程度。澳大利亚据此对国内80多条河流健康状况进行了综合评价。这一方法是对河流各方面特征的综合评价,其结果更加全面、客观,是河流健康状况评价的一种发展方向。需要指出的是ISC方法中设定的参照系统是真实的原始自然状态河道,这种方法只有像澳大利亚这样开发较晚的地区才有可能采用。

另外,还有依据生态毒理学建立的评价指标体系,考虑一些污染物的特征指标,考察生物对污染物的反应指标,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^[34-35],依据生态系统医学或者流行病学方法建立评价指标体系,即从医学概念中获得综合认识受胁迫生态系统行为的途径;或者运用人类流行病学和动物流行病学来评价流域的生态系统健康^[36-37]。

采用经济学指标与生态指标相结合建立指标体系也是近年来常用的方法,它把经济学指标与生态指标相结合评价环境适宜性、动态变化趋势、环境退化预警等^[38],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^[6,19,39]。

表 2 河流状况指数 (ISC)
Tab.2 Index of stream conditions

二级指数	评估内容	参 数
水文	现实状态与曾经出现过的自然状态比较	(1) 月径流量与参照自然状态比较; (2) 流域内城市化比例; (3) 水电站泄流
河流物理形态	河道稳定性和栖息地评估	(1) 岸坡稳定性; (2) 河床淤积与退化; (3) 人工闸、栅的影响; (4) 冲积带的树木枝叶影响
岸边带	评估岸边带植被数量、质量	(1) 植被宽度; (2) 顺河向植被连续性 (用岸边植被间断的长度表示); (3) 结构完整性 (上层林木、下层林木、地被植物的密度与自然状态的比较); (4) 乡土种覆盖比例; (5) 乡土种再生性状况; (6) 湿地和洼地状况
水质	评估关键水质参数	总磷, 浊度, 电导率, pH
水域生物	描述大型无脊椎动物家族	用干扰信号指数描述大型无脊椎动物家族

2.3 评价内容

国内外对流域生态健康评价的指标虽然不完全相同,但概括起来,可对流域从六个方面进行评价,建立评价指标体系。这六方面指标分别为生物指标、水质指标、水文指标、栖息地指标、社会经济指标、人类健康指标。

2.3.1 各项指标内涵

(1) 生物指标

很久以前,研究者发现,水生态系统的任何变化都可能影响水生生物的生理功能、种类丰度、种群密度、群落结构与功能。水生生物的生物学、生态学与生理学特征成为反映水体状况好坏的重要指标。因此,通过监测一些生物或其类群的数量、生物量、生产力、结构指标、功能指标及其一些生理生态状况的动态变化,即生物监测,来描述河流生态系统的健康状况,得到了较多的应用。具体生物指标见上述的生物监测法。

(2) 水质指标

采用物理-化学手段对水质进行评估是流域生态健康评价指标之一,且已有较为成熟的技术方法。这些指标可以反映河流水流和水质变化、河势变化、土地使用情况和岸边结构。物理测量参数包括流量、温度、电导率、悬移质、浊度、颜色。化学测量参数包括 pH 值、碱度、硬度、盐度、生化需氧量、溶解氧、有机碳等。其它水化学主要控制性指标包括阴离子、阳离子、营养物质等 (磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐、氨、硅)。流域生态健康评价中水质评价更

侧重于分析水质测量参数对流域生物的潜在影响。表 3 列举了 8 种测量参数对于流域生物的潜在影响。

表 3 几种水质测量参数及其对流域生物的潜在影响
Tab.3 Several water quality measurement parameters and their potential impact on biology

测量参数	输入物质	潜在影响
电导率	盐	损失敏感物种
总磷	磷	富营养化
TN/TP	磷、氮	水华爆发
生化需氧量(BOD)	有机物	生物呼吸窒息, 鱼类死亡
浊度	泥沙	生物栖息地变化, 敏感性生物减少
悬浮物	泥沙	生物栖息地变化, 敏感性生物减少
叶绿素	营养物	富营养化
pH	酸性污染物输入	敏感物种减少
金属, 有机物	有毒物质	敏感物种减少

为满足社会公众对于水质的关注需求,一些学者试图综合各种水质指数为一组简单的水质指数。这种综合水质指数用不多的参数就可以表达水体受损的相对程度及随时间变化的过程。美国 GWQI 指标^[49]综合了 8 项水质参数 (温度、溶解氧、生化需氧量、pH 值、氨态氮+硝态氮、总磷、总悬浮物、大肠杆菌)。在计算中可以简单对于每一种具有不同测量单位的参数进行分析,随后转换为无量纲的二级指数。其范围为 10~100 (10 为最恶劣情况,100 为理想情况),表示该参数对于损害水质的作用程度。

(3) 水文指标

河流水文特征综合反映流域气候特征、地表覆盖特征及河流地形地貌与受人工设施干扰的程度,是流态变更的重要表现载体。引起水文条件变化的因素很多,包括由于气候变迁引起的径流变化、上游取水增减变化、由于水库调度和水电站泄流改变了自然水文周期、土地利用方式改变和城市化引起的径流变化等,这些都对鱼类和其他生物的栖息繁衍产生影响。以年均流量偏差和开发利用率这两个指标来描述水量受人类社会活动的干扰状况^[41]。

修订的年径流偏离比率方法(AAPPD)以月径流为基础,用实际状况与参照状况月平均径流之比率表示。其后又进行了修订,建议建立径流变动指数,用于描述鱼类多样性相关关系。澳大利亚在执行ISC(河流状况指数)中使用这种方法时,AAPED的记分标准范围为0~10。后来,又增加了2个二级指数:(1)即考虑城市化造成流域渗透性变化引起日径流变动;(2)由于水电站发电峰值引起的日径流变动。

(4) 栖息地指标

研究成果表明,假设水量与水质条件不变的情况下,生物群落多样性与生境的空间异质性存在线性关系。生物栖息地质量的表述方式,可以用适宜的栖息地数量,或者适宜栖息地所占面积的百分数表示,也可以用适宜栖息地的存在或缺失表示。另外,植被覆盖度和湿地面积变化率也可作为栖息地评价指标。

在美国已经确定了以栖息地评估为基础的自然资源总量评估方法。Bain和Hughes归纳了美国有关机构进行栖息地评估的50种不同勘查方法、总清单和报告方法,其内容偏于繁琐。现在更倾向于采用简单、成熟的测量和分析方法。美国栖息地评估程序(HEP)和栖息地适宜性指数(HIS)是美国鱼类和野生动物服务协会颁布的^[42]。它提供了150种栖息地适宜性指数(HS)标准报告。HIS模型方法认为在各项指数与栖息地质量之间具有正相关性。HSI模型包括18个变量指数,并认为这些指数可以控制鲑鱼在溪流生长栖息的条件,这些指数是:水温、深度、植被覆盖度、DO、基质类型、基流/平均流量等。栖息地适宜性指数按照0.0~1.0范围确定。

(5) 社会经济指标

社会经济系统是流域复合生态系统的组成部分,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。社会经济指标包括经济学指标,如:人均GDP、失业率等;社会指标,如:人口密度、人均资源和能量消费等,用以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^[43]。

(6) 人类健康指标

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应包括人类健康范畴。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。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、对健康有害的资源和消费限制等。

2.3.2 流域生态健康评价指标的选择原则

流域生态健康评价指标的选择应该体现5个基本原则:(1)概念的普遍性,即指标应该提供与社会公众关心的生态现状有关的信息;(2)实施的可行性,即用于监测大型和长期的项目的指标必须要可行并切合实际;(3)对可变性的响应,即选择的指标应该区分出对环境真实的可变性信号无关的那些指标,没有必要把自然的所有可变性的指标都纳入评价体系中,但是必须在条件有一定的改变之后,清楚地显示出其重大而不同的响应;(4)可解释和有效,即指标提供的结构能够清楚地被科学家、政策制定者和公众理解并接受;(5)避免指标评价的内容发生交叉,尽量使指标相互独立。

3 流域生态健康评价存在问题与展望

3.1 存在问题

关于流域生态健康评价,国内外已取得一些研究成果,但是现有的评价理论与方法中仍然存在着一些问题,需要在今后加强研究。主要问题表现在:

(1)目前在流域尺度上进行生态健康评价的研究和实践并不多见。比较成型的评价方法多停留在河

流尺度。

(2)生物监测法的主要问题在于 选择不同的研究对象及监测参数会导致不同的评价结果 ,难以确定不同生物类群进行评价时的取样尺度与频度 ,无法综合评价河流生态系统状况问题等。

(3)指标体系法是目前的发展趋势和热点。国内外一些已有的流域生态健康评价指标体系不够全面 ,有的只包含了两到三方面的指标 ,并且大部分未涉及社会经济、人类要素。

(4)就我国具体情况而言 ,国内对流域生态健康评价领域的研究 ,主要侧重于借助物理、化学手段评估流域内水质状况^[44-46] ,从系统健康的角度认识流域状态尚待进一步深入。

3.2 展望

总体来说 ,流域生态健康评价研究仍处于起步阶段 ,今后的研究将着重解决如下问题 :

(1) 目前对流域生态系统健康的定义还存在争论 ,今后应进一步加强对流域生态系统健康定义的研究。

(2)不断完善流域生态健康的评价理论和方法。在对生态、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 ,并从新的角度开拓思路 ,以建立更为合理的健康评价指标体系。

(3) 开展基于 RS、GIS、GPS 新技术的流域健康评价指标体系研究。通过 3S 技术手段可方便快捷地建立一套适用于我国的流域生态系统健康理论及评价体系 ,对主要流域进行健康评价 ,为流域管理提供基础数据和决策依据。

(4)流域生态系统是一个动态系统 ,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。

(5)应充分考虑我国各流域、各地区自然、社会、经济状况的巨大差异性 ,需要因地制宜地制定每一条流域的健康评估标准 ,国外经验值得借鉴 ,但不宜生搬硬套。

参考文献

[1] 罗初跃,周忠轩,孙 轶等.流域生态系统健康评价方法.生态学报,2003,23(8):1606-1614.
[2] 於 琨,曹明奎,李克让.全球气候变化背景下生态系统的脆弱性评价.地理科学进展,2005,24(1):61-69.

[3] 燕乃玲,虞孝感.生态系统完整性研究进展.地理科学进展,2007,26(1):17-25.
[4] 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.
[5] 陈 星,周成虎.生态安全:国内外研究综述.地理科学进展,2005,24(6):8-20.
[6] 龙 笛,张思聪,樊朝宇.流域生态系统健康评价研究.资源科学,2006,28(4):38-43.
[7] Rapport D J. Evolution of indicators of ecosystem health. In:Daniel, H.(eds). Ecological Indicators. Barking: Elsevier Science Publishers Ltd, 1992, 121-134.
[8] Robert C. Ecological economic issue and considerations in indicator development, selection, and use: toward an operational definition of system health. In:Daniel, H.(eds). Ecological Indicators. Barking: Elsevier Science Publishers Ltd, 1992, 1491-1502.
[9] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing Ecosystem Health. Trends Ecol Evolu, 1998, (13):397-402.
[10] Meyer J L. Stream health:incorporating the human dimension to advance stream ecology. Journal of the North American Benthological Society, 1997, (16):439-447.
[11] 杨文慧,严忠民,吴建华.河流健康评价的研究进展.河海大学学报,2005,33(6):607-610.
[12] Karr J R, Chuaw. Sustaining living rivers. Hydrobiologia, 2000, (422):1-14.
[13] Schofield N J, Davies P E. Measuring the health of our rivers. Water, 1996, 5(6):39-43.
[14] 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.
[15] Borman F H. Ecology: A personal history. An Review Energy and Environ, 1996, (21):1-29.
[16] Rapport D J. Ecosystem health:Exploring the territory. Ecosystem Health, 1995, 1(1):5-13.
[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] 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.
[19] 刘明华,董贵华. RS 和 GIS 支持下的秦皇岛地区生态系统健康评价.地理研究,2006,25(5):930-938.
[20] 赵彦伟,杨志峰.河流健康:概念、评价方法与方向.地理科学,2005,25(1):119-122.
[21] 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.
[22] Kingsford R T. Aerial survey of water birds on wetlands as a measure of river and flood plain health. Freshwater Bi-

- ology, 1999, (41):425~438.
- [23] Kleynhans C J. The development of a fish index to assess the biological integrity of South African rivers. *Water S.A.*, 1999, (25):265~278.
- [24] 日本水道协会. 上水试验法. 东京:日本水道协会出版社, 1970.
- [25] Marsden M W, Smith M R, Sargent R J. Trophic state of rivers in the Forth catchment, Scotland. *Aquat. Cons.*, 1997, (2):211~221.
- [26] Kwandrans J, Eloranta P, Kawecka B, et al. Use of benthic diatom communities to evaluate water quality in rivers of southern Poland. *Appl. Phycol.*, 1998, (10):193~201.
- [27] Woodiwiss F S. The biological system of stream classification used by the Trent River Board. *Chem. Ind.*, 1964, (5):443~447.
- [28] Chutter F M. Research on the Rapid Biological Assessment of Water Quality Impacts in Stream and Rivers. WRC Report No422/1/98. Water Research Commission, Pretoria, 1998.
- [29] Pavluk T I. Development of an index of trophic completeness for benthic macro-invertebrate communities in flowing waters. *Hydrobiologia* 2000, (427):135~141.
- [30] 黄玉瑶. 内陆水域污染生态学-原理与应用. 北京: 科学出版社, 2001.
- [31] Townsend C R, Riley R H. Assessment of river health: accounting for perturbation pathways in physical and ecological space. *Freshwater Biology*, 1999, (41):393~405.
- [32] 孔红梅, 赵景柱, 姬兰柱 等. 生态系统健康评价方法初探. *应用生态学报* 2002, 13(4):486~490.
- [33] 董仁哲. 国外河流健康评估技术. *水利水电技术*, 2005, (11):15~19.
- [34] Roux D J, Van Vliet H R and Van Veelen M. Towards integrated water quality monitoring: Assessment of ecosystem health. *Water S.A.*, 1993, 19(4):275~280.
- [35] Munkittrick K R and McCarty L S. An integrated approach to aquatic ecosystem health: Top-down, bottom-up or middle-out? *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1995, 4(2):77~90.
- [36] Schaeffer D J and Novak E W. Integrating epidemiology and epizootiology information in ecotoxicology studies. *Ecosystem health. Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1988, 16(3):232~241.
- [37] Rapport D J. State of Ecosystem Medicine. Contaminant Effects on Fisheries, John Wiley and Sons, New York, 1984, 315~324.
- [38] Cairns J Jr, McCormick P V and Niederlehner B R. A proposed framework for developing indicators of ecosystem health. *Hydrobiologia*, 1993, 263(1):1~44.
- [39] 王治良, 王国祥. 洪泽湖湿地生态系统健康评价指标体系探讨. *中国生态农业学报*, 2007, 15(6):152~155.
- [40] Cude C G. Oregon water quality index. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, 37(1):125~137.
- [41] 殷会娟, 冯耀龙. 河流生态环境健康评价方法研究. *中国农村水利水电* 2006, (4):55~57.
- [42] Barbour M T. Rapid Bioassessment protocols for Use in Streams and Wadeable River Periphyton Benthic Macro-invertebrates and Fish. 2nd edn, EPA 841-B-99, USEPA, 1999.
- [43] Cairns J, McCormick P V, Niederlehner B R. A proposed framework for developing indicators of ecosystem health. *Hydrobiologia*, 1993, 263:1~44.
- [44] 陈静生, 夏星辉. 中国河流水化学研究进展. *地理科学*, 1999, 19(4):290~294.
- [45] 林木隆, 李向阳, 杨明海. 珠江流域河流健康评价指标体系初探. *人民珠江*, 2006, (4):1~4.
- [46] 陈 铭, 张树清, 王志强 等. 基于 GIS 的蛟流河流域湿地生态系统健康评价. *农业系统科学与综合研究*, 2006, 22(3):165~168.

Progress on Theories and Methods of Watershed Eco-health Assessment

LI Chunhui^{1,2}, CUI Wei¹, PANG Aiping², ZHENG Xiaokang^{1,2}

(1. Key Lab of Water and Sand Science, Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Watershed ecosystem is a social-economic-natural complex ecosystem. Watershed eco-

health assessment can help watershed layout, protection and comprehensive management, and can provide basis for decision-making. In this paper, the concept and characteristics of watershed eco-health are introduced, and the history, current condition and research scale of watershed eco-health assessment are put forward. The assessment should be carried out from broad temporal-spatial scales. This research summarizes methods of watershed eco-health assessment in the past years both at home and abroad. There are two main methods: one is biological assessment and the other is indices assessment. It should be careful in selecting bio-indicator species because the sensitivity and reliability of species need to be considered simultaneously. The indices should include six categories: bio-assessment, water condition assessment, hydrological assessment, habitat assessment, social-economic assessment and human health assessment. Every category has some relative indices. Because of the complexity of watershed ecosystem, the measures of watershed eco-health indices are difficult sometimes. The measurement methods should be further developed. Ecosystem restoration is needed for those unhealthy watershed ecosystems and methods of it are introduced. Watershed eco-health assessment is a developing theory system and there are some problems that should be further discussed in this field. Last, these problems and research trends in future are pointed out.

Key words: watershed; eco-health; assessment; progress