

# 流域生态系统健康评价研究进展

于璐璐,朱丽东,吴 涛,赵 鑫,陈 瑞,郦珂飞

(浙江师范大学地理与环境科学学院,浙江 金华 321004)

**摘 要:**流域生态系统评价体系是评价研究流域是否健康的基本依据,其评价结果为流域生态系统保护措施和政策制定提供基础。在介绍流域生态系统健康状态的前提下,总结了国内外流域生态系统评价理论和评价指标的发展历史及现状,整合出目前较为流行的评价体系,并着重阐述了五类实用模型,分别为:水基系统评价模型、改进物元分析、生物完整性指数法、压力-状态-响应模型(PSR)及景观格局分析法。针对不同的流域环境选择合适的评价体系是准确评价流域生态系统健康状况的根本。总结得到综合指标评价体系,主要包括物理、生物、社会环境、生态功能及社会功能等五种指标,在明确指标后按评价流程对流域进行系统评价。对现存的问题进行了分析与展望。

**关键词:**流域生态系统;评价指标;评价体系;评价方法;研究进展

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2017)03-0007-07

流域作为社会经济自然的复合生态系统,是一个独立的地貌单元,具有生态完整性<sup>[1]</sup>。其健康状况受自然变化和人类活动的双重影响。现存不合理的人类活动导致流域水环境严重破坏及洪涝等灾害频发,不仅对流域的生态系统健康造成了严重威胁,也对人类的可持续发展形成巨大的隐患。因而在此背景下针对流域生态系统健康的评价研究应运而生。

生态系统健康概念的提出有近 20 年的历史,1988 年,Schaeffer 等<sup>[2]</sup>首次探讨了有关生态系统健康度量的问题;1989 年,Rapport 论述了生态系统健康的内涵,从此生态系统健康研究成为了热门课题。直到 20 世纪 90 年代开始,生态系统健康的评价体系才逐渐完善。众多学者基于 Rapport 的理论提出了不同的评价指标体系,如美国环保署(Environmental Protection Agency,简称 EPA)于 1999 年提出“将重点利用 B.IBI(Benthic Integrated Biotic Index) 指标体系对水生生态系统健康进行评价<sup>[3]</sup>”。而在我国,经过近几年不断深入研究,对生态系统进行健康评价的研究也由河流扩展到湖泊、水库等其他流域类型<sup>[4]</sup>,逐渐形成了自己的体系。

但实际上国内外现存的很多理论在应用中存在体系过于庞大、可操作性差、系统研究单一和定量化评价少等问题,并且大多没有考虑生态系统服务功能指标,

也忽略了景观格局对生态系统健康的影响<sup>[5]</sup>。近年来生态系统“动态平衡”理论认为应从多方面综合建设评价指标体系,新的理论体系层出不穷。

随着流域生态系统健康的研究日益受到重视,以流域为单元建立一个合适的评价系统进行健康评价,对恢复流域生态系统以及促进流域的经济、社会和环境可持续发展在理论和实践上都有重要意义。

## 1 流域生态系统健康状态的认知

### 1.1 流域概念

流域的定义具有多样性,都含有“集水区”的概念。但现代学者认为将流域定义为河流集水区域的说法存在一定的局限性,如我国学者岳健就认为流域的概念应当包括狭义和广义两个方面,人们实际所应用的流域概念多数情况下属于广义的流域,即所有包含某水系(或水系的一部分)并由分水界或其它人为、非人为界线(如灌区界、地貌界等)将其圈闭起来的相对完整、独立的区域<sup>[6]</sup>。本文所指的流域便是广义上的流域。

在组成方面不论地形多么复杂,流域均由分水线、水文网和斜坡构成,从分水线到河川之间可分为侵蚀区、流通区和沉积区。其特征包括:流域面积、河网密度、流域形状、流域高度、流域方向或干流方向。

收稿日期:2016-07-01

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划项目(201510345024)

作者简介:于璐璐(1994-),女,浙江义乌人,本科生,专业方向为地理科学。E-mail:1016751867@qq.com

通讯作者:吴涛(1979-),男,湖南吉首人,讲师,研究方向为河口海岸带环境遥感及生态系统评价工作。E-mail:twu@zjnu.cn

## 1.2 生态系统健康状况的基本界定

生态系统健康是 20 世纪 90 年代出现的一个崭新的研究领域。目前在学术界尚无普遍认同的定义。国际生态系统健康学会将生态系统健康学定义为, 研究生态系统管理的预防性和诊断性的特征, 以及生态系统健康与人类健康之间关系的一门科学<sup>[7]</sup>, 其主要任务是研究生态系统健康的评价方法、生态系统健康与人类健康的关系以及各种尺度生态系统健康的管理方法<sup>[8]</sup>。

不同学者对此定义不同, 但随着对流域生态系统研究的不断深入, 人们已经认识到评价流域生态系统健康还需要考虑其它外界因素, 尤其是人类活动的干扰。因此为了生态系统的可持续发展, 建立相应的评价体系也就迫在眉睫。

## 2 流域生态系统健康评价的理论基础

流域生态系统健康评价的对象经历了从单一观察目标到综合、多层次目标的变化, 有关的指导理论所围绕的评价对象也表现出同样的趋势。

针对单一的评价对象, 国内外提出的理论更偏重于水质评价, 如综合污染指数理论、BP 神经网络分析理论、热力学理论、水足迹理论、分形理论系统、聚类分析理论等<sup>[9-11]</sup>。

较为热门的水足迹理论是在 2002 年由荷兰的 Hoekstra 教授通过类比“生态足迹”概念而得出的: 水足迹是“水在生产 and 消费过程中踏过的脚印”<sup>[12]</sup>, 即一个区域或个人在一定时间内消费所需的总水资源数量。其作为一种衡量水消费和水污染体积的指标在定量评价水资源可持续利用方面有着重要的应用价值。

分形理论是一门研究不规则自相似体系的理论, 是在 20 世纪 60、70 年代由美国科学家 B.B.Mandelbrot 提出的, 其基本观点是: 局部结构放大后以某种方式与整体相似的形体。其描述的特征向量分维数反映了研究目标的平均斑块面积大小和边界的曲折性。在评价流域生态系统时, 可通过观察某种土地利用类型的分维数, 若分维数随时间的变化而增大, 则说明土地利用形态变得更复杂、更不规则, 规模上呈现扩展趋势<sup>[13]</sup>。

针对综合性的评价对象, 国内外学者也提出了许多相关理论, 如生态系统健康等级理论、灰关联理论、粗糙集理论、熵理论、云理论、集对分析理论等, 评价对象的综合性使评价指标体系更加完善、客观。

其中生态系统健康的等级理论认为生态系统中存在不同等级层次的行为或动态, 且彼此之间相互联系,

所以研究时至少要同时考虑上一层、核心层和下一层等 3 个相邻的层次<sup>[14]</sup>; 而灰关联理论则主要是将整个流域生态环境作为研究对象, 通过计算各评价要素相应级别的隶属程度, 最后得到隶属程度最大者所对应的质量标准级别就是评价要素的质量状态, 在逐一确定各评价要素的质量等级后得到对应的流域生态质量状况, 最终为流域生态系统治理提供科学依据<sup>[15]</sup>。

粗糙集理论是用来处理分析不确定性信息的, 主要是在保持分类不变的情况下对其指标属性矩阵进行约简, 从而计算出各指标的客观权重<sup>[16]</sup>; 评价指标同样相对客观的还有熵理论。美国数学家 N·Weaner 和 C·E·Shannon 在熵的概念上提出了更为广义的信息熵, 即随机无约束程度的一种变量<sup>[17]</sup>。在评价流域健康的时候, 可利用熵值大小与有序度成反比来确定河流水环境现状的监测指标的权重; 云理论则有机地结合了不确定性概念的模糊性和随机性, 解决了隶属函数中在等级的隶属度相等的基础上最大隶属度失效问题, 使隶属度能更好地反映原始数据信息, 指标也更加客观, 更好地分析处理了模糊信息, 为定性定量相结合的处理方式提供了强有力的手段<sup>[18]</sup>。

## 3 流域生态系统健康状况评价指标体系

流域生态系统健康评价指标体系是通过选取适当指标来客观地反映流域生态系统健康状况, 进而为流域可持续管理提供依据。而其意义在于将不可统一度量的抽象概念转换为可统一评判的数值, 来量化衡量流域健康的特征值。

典型的单一指标可以用来推断生态系统的几个属性, 特别是具有早期预警和诊断性功能的指标最有价值, 但为了更加真实地反映制约流域生态系统健康的因素, 需要综合多方面的指标来描述流域生态系统所处的状态, 同时指标的选取应遵循科学性、全面系统性、可行性和定性定量相结合等原则, 从而全方面地反映流域生态系统健康。

PETERSEN<sup>[19]</sup>建立的含河岸带土地利用指标、生物指标以及河道物理指标的 RCE (Riparian, Channel, and Environmental Inventory) 系统, 就是根据实际调查情况所得的各项指标分数总和对流域生态系统进行健康判断。例如黄河流域生态系统进行综合评价时, 选取了低限流量、平滩流量和湿地面积等 9 个指示性因子来具体表达流域生态系统健康状况, 并限定了这些因子在未来不同阶段的量化指标<sup>[20]</sup>; 衡水湖流域生

态系统则选取了流域的年径流深度、水质、生物和目前主要的生态问题建立了流域生态系统健康评价指标体系,并运用层次分析法计算出流域生态系统健康评价得分,得出衡水湖流域生态系统健康处于中等或者亚健康态<sup>[21]</sup>;福建东溪流域生态系统基于PSR框架模型和流域生态系统特点选取了人口密度、GDP (Gross Domestic Product)年增长率、人均拥有水资源量、森林覆盖率、工业废水达标率等36个指标参数构建指标体系<sup>[22]</sup>。

综合前人研究,本文总结得到的评价指标体系包括流域生态特征指标、流域功能指标及其细化指标如表1所示。

表1 流域生态系统健康评价指标体系<sup>[23-28]</sup>  
Table1 The watershed ecosystem health evaluation index system<sup>[23-28]</sup>

一级指标	二级指标	三级指标	具体参数
流域生态特征指标	物理化学指标	气象	气温,湿度,风向,风速,年降水量,蒸发量,日照和辐射强度,气象灾害等
		大气	CO <sub>2</sub> 浓度,AQI和首要污染物,SO <sub>2</sub> 、NO <sub>2</sub> 的浓度,颗粒物浓度,与疾病有关的空气污染事件
		水文	水域面积,年净流量,泥沙含量
		水环境	水质指标(包括pH,NH <sub>3</sub> N,COD,BOD,高锰酸盐指数,总磷,水质类别,浊度)
	生物指标	土壤	土壤有机质含量,pH值,重金属含量等
		植物	植被第一性潜在生产率,植被覆盖率,生物量,
流域功能指标	社会环境指标	人类活动	人均GDP,人口密度,人口增长率,人口素质(高中以上文化程度),城市化面积,耕地面积比重
	生态功能	防洪功能	洪水调节(防洪库容、河堤防洪标准、设计水位、堤顶高程)
		栖息地功能	湿地面积
	社会功能	休闲娱乐	旅游人次,游客承载力

该体系包含了流域生态特征指标和流域功能指标2个1级指标,包括物理化学、生物、社会环境、生态功能、社会功能共5个2级指标和气象、水文等10个三级指标,一共80多个指标参数。针对不同的评价项目,不同的区域尺度和评价目的,可以适当选取评价参数,建立合适的评价指标体系。

4 流域的健康状况评价模型

自1925年美国的Streeter和Phelps建立S-P模型(Streeter-Phelps)以来,流域生态系统评价模型就在不断的更新与发展。在20世纪60年代以前,国内外学

者对流域的评价主要集中在水质标准上,以此发展出了水污染指数评价法、模糊综合评价法、物元分析法及神经网络法等。

但流域评价过程总会存在许多不确定因素,因此国内外研究人员相继提出了许多评价模型及方法。目前采用较多的评价方法主要有:水基系统评价模型、改进物元分析模型、生物完整性指数法、溪流指数法、模糊评价方法、PSR概念(Pressure-State-Response Model)模型以及景观格局分析方法等等。当前比较重要的或应用相对成熟的方法有以下五类(见表2),本文也在每一类下适当补充一些学者用该方法做出来的典

表2 评价模型及方法  
Table2 The evaluating models and approaches

评价模型	评价项目	主要指标参数
水基系统评价	稳定态 N	水资源开发利用率、饮用水源水质达标率、排灌能力、人均GDP;
	和谐度 M	人口密度、生活污水处理率、万元GDP用水量、工业废水排放达标率、水域面积比重、森林覆盖率、生物多样性指数、化肥使用强度、水土流失治理率;
改进物元分析	演进率 DS	稳定态演进率、和谐态演进率;
	水环境指标	溶解氧、氨氮、高锰酸钾指数、化学需氧量、五日生化需氧量、粪大肠菌群、锰、铅等;
生物完整性指数法	硅藻完整性指数	有机污染硅藻指数、硅藻营养指数、经济群落代用指数、硅藻属指数等;
	鱼类群落完整性指数	
压力-状态-响应模型(PSR)	无脊椎动物群落指数	物种丰富度、生物移动性、生境指标、其他等;
	压力状态响应	人类活动、人口、工农业、环境变化、生物、土地/水面面积变化、功能退化、制度和政策、管理水平等;
景观格局分析法	空间分布特征指数	景观多样性指数、优势度指数、均匀度指数、斑块分维数;
	景观异质性指数	聚集度、破碎化指数、景观破碎化指数、廊道密度指数、斑块密度指数、景观斑块破碎化指数、景观斑块形状破碎化指数;



型成果。

#### 4.1 水基系统评价模型

水基系统<sup>[29]</sup>是刘宁提出的在一定水文尺度和空间范围内,水及与其相关的涉水介质和涉水工程共同构成的基础生境。在此基础上发展得到的水基系统评价模型——即在一定流域尺度范围内,从一个全新的角度去评判涵盖水、气、生物、土壤、社会经济等诸多内容的水环境健康状况,将水基系统各组成部分具体到流域尺度上。该模型主要通过稳定度、和谐度和演进率进行评价。根据不同的评价情景,水基系统评价模型也在不断发展;2015年刑贞相等人<sup>[30]</sup>在水基系统模型框架下,对挠力河流域进行健康状况的评价,证明了水基系统在解决水资源问题以及在健康综合评价方面的有效性;2011年姚巍等人<sup>[31]</sup>在认识到GIS技术在流域健康评价研究中的重要作用而构建了基于GIS的流域水基系统的管理决策系统,为流域水基系统的研究提出了新思路、新方向。

#### 4.2 改进物元分析模型

1983年,蔡文<sup>[32]</sup>首次根据不相容问题建立了对指标性能参数的质量评定模型,即直接求出关联度,进而对事物等级进行批判。其基本概念<sup>[33]</sup>是使用“事物、特征、量值”这三个要素组成有序三元组,来描述事物的基本元(物元),并分析这些物元及其变化规律。但该理论在现实运用过程中没有考虑到因区间长度改变而引起的点与区间的影响,因而孙学颖等人<sup>[34]</sup>就对传统的模型进行改进,采用熵权法确定指标的权重,从而构建出改进物元分析模型对北之江流域生态系统健康进行评价。改进物元分析模型主要从水质的评价指标权重及关联度进行测量评价,该方法应用于流域水质评价能够避免在水质指标值界于相邻级别时的判断困难。

#### 4.3 生物完整性指数

生物指数是利用不代表群落结构和组成的指示生物(Bioticindicator)来反映水体污染程度,但考虑到单一生物指数不能全面地反映生物群落状态,因此Karr等<sup>[35]</sup>首先提出了以底栖动物为基础的评价指数IBI(Index of Biological Integrity)模型,通过3方面指数来反映生态系统健康状况(如表2)。

生物完整性指数是目前水生生态系统研究中应用最广泛的指标,应用于水生生态科学研究、资源管理、环境工程评价等多方面;法国学者通过IBI来评价塞纳河流域受城镇化、渠道化和农业排放后的累

积影响,以及鲑鱼养殖业对溪流生态系统的影响;印度学者用IBI指数评价受重金属和有机污染的Khan和Kshipro河流的健康;国内也有学者赵湘桂<sup>[36]</sup>采用生物完整性指数研究漓江水质健康状况。随着IBI方法的不断更新,研究范围也在不断的扩大,目前在藻类、浮游生物、湿地、溪流和河口地区均有涉及。

#### 4.4 压力—状态—响应模型(PSR)

PSR模型是世界银行、联合国粮农组织、联合国发展署、联合国环境署联合开展的土地质量指标(Land Quality Indicators,简称LQI)项目所提出的研究成果。主要是由互为因果关系的压力、状态和响应三部分组成(如表2),即由于人类活动对生态系统环境资源产生压力;生态系统环境资源因压力改变了其原有的性质或自然资源的数量(状态);人类又可通过技术及管理政策对这些变化作出反应(响应)<sup>[37]</sup>。由于该模型具有系统性、综合性等特点,是寻找人类活动与环境影响之间因果链的有效途径,因而得到了研究者较为普遍的认可与应用。但在实际应用过程中,要注意结合当地的具体情况,加减相应的评价指标来灵活应用。

在实际应用方面,PSR模型不仅运用于水环境安全评价,还涉及了城市土地资源利用评价、城市规划环境影响评价以及湿地生态系统健康进行评价等领域。经过研究者不断的改进和修正,在此基础上发展的模型还有PSIR概念模型(pressure-state-impact-response framework,压力—状态—影响—响应框架);PSRP框架(pressure-state-response-potential framework,压力—状态—响应—潜力框架);DPSIR概念模型(driving force-pressure-state-impact-response framework,驱动力—压力—状态—影响—响应框架)<sup>[38]</sup>等。

#### 4.5 景观格局分析方法

景观,是由一组以相似方式重复出现的,相互作用的生态系统所组成的异质性陆地区域<sup>[39]</sup>。对景观格局特征进行分析将有利于正确评价流域生态状况与自然和人类活动的关系<sup>[40]</sup>。近年来随着高光谱和高分辨率传感器的广泛使用,使斑块能够体现更加丰富的信息,提高了景观生态学在流域生态健康研究中定量分析的精度和准确度,加上GIS与遥感技术的结合,使景观格局分析法成为区域和流域等中大尺度生态区健康调查和监测的必要手段。通过对流域生态系统内各类斑块数量与面积、斑块优势度与多样性指数、

斑丰度与类斑丰度、带丰度及带斑比等景观格局指标的计算分析,来评价流域生态系统治理效益<sup>[41]</sup>。

近年来,在对景观的定量分析研究过程中国内外学者提出了许多景观格局指标。通常从分析的角度可将这些指数分为斑块水平指数(patch-level index)、斑块类型水平指数(class-level index)以及景观水平指数(landscape-level index)三种类型。

## 5 展望

在不断引进新的评价系统同时,国内的评价体系也在发展。但相较国外而言我国仍存在许多不足,如大多指标侧重于从河流水质状况对流域健康进行评价,这就导致评价结果无法全面地反映流域的健康状况。国内外最新的研究成果表明我们可以采用多重指标体系对水域和陆域进行综合度量,结合美国环保署 EPA 提出的基本原则,本文就近代我国流域生态环境的健康评价现状提出以下建议:

(1)扩大时间尺度。随着评价体系的不断完善,现在越来越多的评价体系都有其完整的指标。但很多学者忽视了流域生态系统的状态变化具有一定的滞后性,使得政府部门无法及时做到防治,一方面导致了流域难以短时间恢复,另一方面也会使当地的居民深受其害。因此,本文认为我们可以在评测指标的基础上增加时间尺度,如将每3年水质变化或每年的流域内城市排污量的变化,与流域的变化建立相关的数学模型,从而得到更为精准的评价结果。

(2)叠加空间尺度。流域生态系统评价体系的基本单位从刚开始的水域,到水域—陆域,再到现在的岸边带、水域和陆域的划分,不得不说我国该领域上的研究在不断的进步。但近年来,国内学者似乎陷入了一个思维框架,对流域的健康评价大多从一个空间尺度进行分析。然而近年有学者发现从不同的空间尺度进行研究,其内容与结论都会有所不同。因此,本文认为我们在评价流域健康状况时可以从多个空间尺度进行研究,最终将各个尺度的研究成果进行横向对比,使其结果更加的全面、客观。

(3)政府助持。流域生态系统的健康评价大多由研究者进行,而数据的收集与整理却基本掌握在政府部门,这在一定程度上就导致了研究的不便。在空间尺度上学者采用GIS、遥感等软件对数据进行处理,可流域在空间上的分布绝大部分是跨经济单位或跨行政单位,而公众所得的数据常常是按行政单位分割开,加之

各单位的记录指标又不相同,导致了无法获取流域的整体信息;在时间尺度上虽然有水文站对河流进行监测,但其监测指标往往是一些常规指标,如氮含量、洪水水位等,针对不同流域所设计的特定指标数据却无法获取,如岸坡稳定性、河床淤积程度等等。致使研究者在研究时只能进行现场评测,在一定程度上存在较大的误差。

总之,无论是时间尺度还是空间尺度的优化,都需要政府的助持,若各行政区域间涉及相同流域,则开放信息,并统一指标;另一方面建议水文站根据所处流域的特殊性增加相应指标,如岸边带指标等等。

参考文献:

- [1] 吴炳方,罗治敏.基于遥感信息的流域生态系统健康评价——以大宁河流域为例[J].长江流域资源与环境,2007,(1):102-106.(WU Bingfang, LUO Zhimin. Ecosystem health assessment of Daning river basin in the three gorges reservoir based on remote sensing[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2007,(1):102-106. (in Chinese))
- [2] Schaeffer D J, Henricks EE, Kemter H W. Ecosystem health, measuring ecosystem health [J]. Journal of Environmental Management, 1988, 12: 445-455.
- [3] BARBOUR M T, GERRITSEN J, SNYDER B D. Rapid bioassessment protocols for use in Wadeable streams and rivers [DB/OL]. <http://www.antiessays.com/free-essays/Rapid-Bioassessment-Protocols-For-Use-In-367284.html>.
- [4] 张颖,胡金,万云,等.基于底栖动物完整性指数 B-IBI 的淮河流域水系生态健康评价[J].生态与农村环境学报,2014,30(3):300-305. (ZHANG Ying, HU Jin, WAN Yun, et al. Eco-health assessment of Huaihe River system based on benthic-index of biotic integrity[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, 30(3):300-305. (in Chinese))
- [5] 方庆,董增川,刘晨,等.基于景观格局的区域生态系统健康评价——以滦河流域行政区为例[J].南水北调与水利科技,2012,10(6):37-41. (FANG Qing, DONG Zengchuan, LIU Chen, et al. Regional ecosystem health assessment based on landscape pattern: a case study for the administrative region in the Luanhe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(6):37-41. (in Chinese))
- [6] 岳穆,穆桂金,杨发相,等.关于流域问题的讨论[J].干旱区地理, 2005, 28(6):776-780. (YUE Jian, MU Guijin, YANG Faxiang, et al. Discussion on conceptional issues of drainage basins[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(6):776-780. (in Chinese))
- [7] COSTANZA R. Toward an operational definition of health [A]. In: Costanza R, Norton B, Haskell B. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management[C]. Washington DC: Island Press, 1992.

- [8] KARR J R, FAUSCH K D, ANGERMEIER P L, et al. Assessing Biological Integrity in Running Waters: A Method and Its Rationale [M]. Champaign: Illinois Natural History Survey, Illinois, Special Publication 5, 1986.
- [9] 赵显波, 雷晓云, 沈志伟, 等. 人工神经网络在新疆蘑菇湖水库水质评价中的应用[J]. 石河子大学学报, 2007, 25(2): 236–239. (ZHAO Xianbo, LEI Xiaoyun, SHEN Zhiwei, et al. Application of artificial neural network to Xinjiang Mugu Lake reservoir water quality evaluation[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2007, 25(2): 236–239. (in Chinese))
- [10] 乔云波. 三峡库区宜昌至泄滩段水质污染现状及对策[J]. 氨基酸和生物资源, 2006, 28(2): 72–75. (QIAO Yunbo. Present situation of water pollution in the Three Gorges area from Yichang to Xietan and countermeasures[J]. Amino Acids & Biotic Resources, 2006, 28(2): 72–75. (in Chinese))
- [11] 刘心彪. 地下水中元素存在形式分析及其在水质评价中应用[J]. 地下水, 2007, 29(3): 17–19. (LIU Xinbiao. Analysis of element existing format and its application in the evaluation of water quality[J]. Ground Water, 2007, 29(3): 17–19. (in Chinese))
- [12] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual Setting the Global Standard [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [13] 杨涵, 陈学刚, 董煜. 基于分形理论的新疆额尔齐斯河流域湿度稳定性评价[J]. 新疆师范大学学报, 2013, 32(3): 18–23. (YANG Han, CHEN Xuegang, DONG Yu. Wetland stability analysis on Irtysh river basin of Xinjiang based on fractal theory and GIS[J]. Journal of Xinjiang Normal University, 2013, 32(3): 18–23. (in Chinese))
- [14] Noss R F. Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach[J]. Conservation Biology, 1990, 4(4): 355–364.
- [15] 李如忠. 基于灰关联理论的流域生态环境评价[J]. 合肥工业大学学报, 2002, 25(3): 464–467. (LI Ruzhong. Eco-environmental assessment of basins based on grey associative theory[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2002, 25(3): 464–467. (in Chinese))
- [16] 张文修, 吴伟志, 梁吉业, 等. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (ZHANG Wenxiu, WU Weizhi, LIANG Jiye, et al. Rough Sets and Its Method [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [17] 李江, 郭庆胜. 基于信息熵的城市用地结构动态演变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(9): 394–395. (LI Jiang, GUO Qingsheng. Analysis of dynamic evolution in urban land-use composition based on shannon entropy[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(9): 394–395. (in Chinese))
- [18] 张泽中, 齐青青, 高芸, 等. 基于云理论的河流生态影响综合评价[J]. 华北水利水电大学学报, 2014, 35(2): 30–34. (ZHANG Zhezong, QI Qingqing, GAO Yun, et al. Comprehensive evaluation of river ecosystem based on cloud theory [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2014, 35(2): 30–34. (in Chinese))
- [19] Petersen R C. The RCE: a riparian, channel, and environmental inventory for small stream in the agriculture landscape [J]. Freshwater Biology, 1992, 27: 295–306.
- [20] 刘国彬, 胡维银, 许明祥. 黄土丘陵区小流域生态经济系统健康评价 [J]. 自然资源学报, 2003, 18 (1): 44–49. (LIU Guobin, HU Weiyin, XU Mingxiang. An analysis on eco-economy system health in Zhifanggou small watershed of Ansai on loess hilly-gullied region [J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(1): 44–49. (in Chinese))
- [21] 赵彦伟, 杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 349–355. (ZHAO Yanwei, YANG Zhifeng. Preliminary study on assessment of urban river ecosystem health [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 349–355. (in Chinese))
- [22] 李春晖, 郑小康, 崔巍, 等. 衡水湖流域生态系统健康评价[J]. 地理研究, 2008, 27(3): 565–573. (LI Chunhui, ZHEN Xiaokang, CUI Wei, et al. Watershed eco-health assessment of Hengshui lake [J]. Geographical Research, 2008, 27(3): 565–573. (in Chinese))
- [23] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康的时空尺度特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 121–125. (CUI Baoshan, YANG Zhifeng. Temporal-spatial scale characteristic of wetland ecosystem health [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(1): 121–125. (in Chinese))
- [24] 俞小明, 石纯, 陈春来, 等. 河口滨海湿地评价指标体系研究[J]. 国土与自然资源研究, 2006, 2: 42–44. (YU Xiaoming, SHI Chun, CHEN Chunlai, et al. A study on the evaluation index system of an estuarine wetland [J]. Territory & Natural Resources Study, 2006, 2: 42–44. (in Chinese))
- [25] 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. (JIANG Weiguo, LI Jing, LI Jiahong, et al. Assessment of wetland ecosystem health in the Liaoh River delta [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 408–414. (in Chinese))
- [26] 付在毅, 许学工, 林辉平, 等. 辽河三角洲湿地区域生态风险评价[J]. 生态学报, 2001, 21(3): 365–373. (FU Zaiyi, XU Xuegong, LIN Huiping, et al. Regional ecological risk assessment of in the Liaoh River delta wetlands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(3): 365–373. (in Chinese))
- [27] 吴涛, 赵冬至, 康建成. 流域—河口三角洲湿地生态系统健康评价研究进展[J]. 海洋环境科学, 2009, 29(2): 286–292. (WU Tao, ZHAO Dongzhi, KANG Jiancheng. Research progress on health evaluation of wetland ecosystem in valley-estuarine delta area [J]. Marine Environmental Science, 2009, 29(2): 286–292. (in Chinese))
- [28] 李浩宇, 颜宏亮, 孟令超, 等. 河流—流域生态系统健康评价研究进展[J]. 水利科技与经济, 2013, 19(9): 1–4. (LI Haoyu, YAN Hongliang, MENG Lingchao, et al. Research progress on river and watershed ecosystem health assessment [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2013, 19(9): 1–4. (in Chinese))
- [29] 刘宁. 水基系统的概念内涵与演进研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 476–481. (LIU Ning. Study on the concept, connotation and evolution of the base-system of water [J]. Advances in water Science, 2005, 16(4): 476–481. (in Chinese))
- [30] 刑贞相, 李晶, 郭皓, 等. 挠力河流域水基系统健康评价及指标体系研究 [J]. 中国农村水利水电, 2015, (2): 8–12. (XING Zhenxiang, LI Jing, GUO Hao, et al. Research on water-based system health evaluation index system on Naolihe catchment [J]. China Rural



- Water and Hydropower, 2015, (2): 8–12. (in Chinese))
- [31] 姚巍, 付强, 纪毅, 等. 基于 GIS 的流域水基系统健康评价的研究进展[J]. 水利科技与经济, 2011, 17(1): 48–51. (YAO Wei, FU Qiang, JI Yi, et al. Research progress of evaluation on health of basin base-system of water based on GIS [J]. Water Conservancy Science and Technology, 2011, 17(1): 48–51. (in Chinese))
- [32] 蔡文. 物元模型及应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994: 25–28. (CAI Wen. Matter Elements Model and Its Application [M]. Beijing: Scientific and Technological Literature Publishing House, 1994: 25–28. (in Chinese))
- [33] 方国华, 黄显锋. 多目标决策理论、方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (FANG Guohua, HUANG Xianfeng. Multi-objective Decision-making Theory, Method and Its Application [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [34] 孙学颖, 唐德善, 张新娇. 改进物元分析模型在北之江流域水质评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(3): 55–58. (SUN Xueying, TANG Deshan, ZHANG Xinxiao. Application of improved matter-element model in water quality assessment of Beizhijiang drainage basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(3): 55–58. (in Chinese))
- [35] Karr J R, Chu E W. Sustaining living rivers[J]. Hydrobiologia, 2000, 422–423: 1–14.
- [36] 赵湘桂. 漓江生态系统健康的水生生物监测技术与评价方法研究[D]. 广西大学, 2009. (ZHAO Xiangui. Research on Aquatic Organisms Monitoring Technique and Assessing Approaches for Health of Lijiang Aquatic Co-system [D]. Guangxi University, 2009. (in Chinese))
- [37] 于伯华, 吕昌河. 基于 DPSIR 概念模型的农业可持续发展宏观分析[J]. 中国人口资源与环境, 2004, 14(5): 68–71. (YU Bohua, LV Changhe. Application of DPSIR framework for analyses of sustainable agricultural development [J]. China Population · Resources and Environment, 2004, 14(5): 68–71. (in Chinese))
- [38] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(1): 121–125. (CHEN Wenbo, XIAO Duning, LI Xiuzhen. Classification, application, and creation of landscape indices [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(1): 121–125. (in Chinese))
- [39] 蒋学玮, 周正立, 李凯荣, 等. 景观生态学原理在流域规划中的应用[J]. 西北林学院学报, 2003, 18(2): 112–115. (JIANG Xuewei, ZHOU Zhengli, LI Kairong, et al. Application of landscape ecology principle in watershed planning [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2003, 18(2): 112–115. (in Chinese))
- [40] CUI L J, PADDENBURG ANNA VAN, ZHANG MY. Applications of RS, GIS and GPS technologies in research, inventory and management of wetlands in China [J]. Journal of Forestry Research, 2005, 16(4): 317–322.
- [41] Griffiths G. Remote sensing and landscape ecology: Landscape patterns and landscape change [J]. International journal of Remote Sensing. 2000, 21 (13): 2537–2539.

## Research Progress of Basin Ecosystem Health Assessment

YU Lulu, ZHU Lidong, WU Tao, ZHAO Xin, CHEN Rui, LI Kefei

(College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

**Abstract:** The evaluation system of watershed ecosystem is the basis for evaluating the health of the watershed, and the evaluation results provide the basis for the protection measures and policy making of the watershed ecosystem. In the premise of introducing watershed ecosystem health, this paper summarized the development history and current situation of the ecological system assessment theory and evaluation indicator at home and abroad, integrated the popular evaluation systems, and discussed the five kinds of practical models including the water-based system evaluation model, the improved matter-element analysis, the biological integrity index method, the model of pressure state response (PSR) and the landscape pattern analysis. It is essential to select appropriate assessment system for evaluating the health status of the watershed ecosystem. The comprehensive index evaluation system, including the 5 indicators of physical environment, biological environment, social environment, ecological function and social function, was obtained to evaluate the watershed system. The paper also made prospects according to the existing problems of the evaluation system.

**Key words:** basin ecosystem; evaluation indicator; evaluation system; evaluation method; research progress