

变化环境下河流健康评价研究进展

高 凡¹, 蓝 利¹, 黄 强²

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;
2. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要:全球以温度升高为主要特征的气候变化耦合人类活动影响,造成了全球性变化环境背景下大范围的水资源危机、水环境污染和水生态退化问题,威胁河流健康,已成为当今世界各国急需解决的难题。针对变化环境背景,分别从河流健康的概念和内涵、河流健康评价的内容、方法及应用等方面,评述近年来国内外河流健康评价的研究进展。将河流健康定义为,特定时期一定的社会公众价值体系下,在保障河流自身基本生存需求的前提下,能够持续地为人类社会提供高效合理的生态服务功能,并实现服务功能综合价值最大化。在前人研究基础上,指出变化环境下河流健康评价研究存在的主要问题,如河流健康概念及内涵仍存在争议,河流健康变化的驱动机制尚不明确,河流健康评价的理论及方法有待完善,河流健康评价实践滞后及评价结果未能有效指导河流管理等。提出变化环境下河流健康评价的发展趋势:以流域为基本空间尺度结合多时间尺度开展河流健康评价与调控研究,因地制宜开展河流健康评价指标体系及评价标准研究,开展基于3S等技术的河流健康评价研究,建立长期且全面的河流健康监测网络,科学界定河流健康的“基准点”,以及开展河流健康评价与水资源调控的集成研究等。

关键词:河流健康;河流生态系统;变化环境;评价指标;评价方法

中图分类号:X171.1;X24 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)06-0081-07

Advances on evaluation of river health in changing environments//GAO Fan¹, LAN Li¹, HUANG Qiang²(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Global climate change is mainly manifested by the temperature increase due to the impact of human activities. In global environmental scale, it is the main cause of water resources crises, water pollution and ecological degradation issues that threaten river health and it has become a critical issue that must be solved for many countries around the world. By focusing on the background of changing environments, this paper discusses the progress and achievements in the studies on the evaluation of rivers' health both domestic and abroad for the past few years. The reviewing aspects include the definition and the contents of river health, methods and applications of health evaluation. Under a certain social public value system at a specific time, river health can be defined as the ability to sustainably provide the neighboring populations with high environmental standards and the achievement of maximum added value from its exploitation with the prerequisite of maintaining the river's own fundamental ecological requirements. Based on previous studies, the major problems of river health evaluation under changing conditions were highlighted. For example, the definition and connotation of river health are still under debate and the driving mechanism of river health variation remains unclear. Also, further improvement is required for the theory and methodology of river health evaluation and finally the practice of river health evaluation is delayed and the evaluation results cannot be applied in river management effectively. It is recommended to follow the trend of development for river health evaluation in changing environments, which mainly focuses on the studies of river health evaluation and regulation at watershed scales combined with multiple temporal scales. It is also proposed to conduct research on the evaluation indicator system and the evaluation standard of river health according to local conditions. Research on river health evaluation using technologies such as 3S, construction of a long-term and comprehensive river health monitoring network, defining the "reference points" for river health in a scientific manner and integrated research on river health evaluation and water resources regulation should be carried out.

Key words: river health; river ecosystem; changing environments; evaluation index; evaluation method

河流是地球上多样化生态系统中最重要生态系统之一。从系统的角度,河流具有较强的抗干扰能力,但外界干扰超过其自我修复能力后,河流会发生不可逆退化,并导致诸多项服务功能的下降甚至消失。全球环境变化早在 20 世纪 80 年代就成为国际学术界关注的热点问题^[1]。近年来,全球以温度升高为主要特征的气候变化耦合人类活动影响,造成了全球性变化环境背景下大范围的水资源危机、水环境污染和水生态退化问题^[1-3],对河流造成了一系列干扰,主要表现在:①对河流形态的干扰;②对水量及水流连续性的干扰;③对水质的干扰;④外来物种的引入造成本地土著物种及特色物种的消失;⑤对水生生物、河岸带生物栖息地的干扰及破坏造成的生物多样性减少;⑥对河道外土地的干扰造成的对河流的间接干扰等。这些干扰改变了河流天然的形态结构,影响了河流固有的水生态环境及水循环过程,破坏了河流生态系统赖以生存的水量、水质、水流连续性、形态多样性、栖息地完整性等生境因子^[4],并出现了一系列诸如河道水量剧减甚至断流、地下水位下降、水质污染、生物多样性减少等水生态与环境问题,威胁河流生命延续,并对人类健康及经济社会发展构成严重威胁。

整个 20 世纪发生在地球上的种种生态危机事实促使人们不得不重新看待河流,思考河流的价值,重新定位人与河流之间的关系,并采取措施,修复或重建河流生态系统,恢复河流服务功能。河流健康理念基于此背景提出^[5],赋予河流生命的意义,从河流生命维持的角度界定了人类对河流索取的限度和开发利用阈值,从河流健康维持的角度提出了河流管理的新目标,只有维护河流健康才能有效保障人类健康与经济社会的可持续发展。本文通过回顾国内外河流健康研究成果,在前人研究基础上,系统评述近年来河流健康研究进展,指出变化环境下河流健康评价研究面临的挑战,并对未来研究进行展望,旨在为建立及完善河流健康评价理论及方法体系提供有益借鉴。

1 河流健康概念及内涵辨析

河流健康的概念是伴随土地健康、生态系统健康等概念的出现应运而生,是与人类健康类比的观念,目前其概念及内涵还存在许多争议。研究者不同的学科背景和研究视角,加上河流自然环境和生态系统本身的复杂性,河流健康概念的表述呈现出多元化格局。归纳起来,主要概括为河流生态系统健康和河流健康两大类,也称为狭义的河流健康和广义的河流健康^[4-10]。

由于“河流健康”概念来源于认为“对河流生态系统保护是河流面临的主要挑战”的西方国家^[6-7],因此,在过去相当长一段时间内,对河流健康的研究多以河流生态系统为主体^[4-10],河流健康即河流生态系统健康。Schofield 等^[8]提出河流健康是河流与同一类型的没有受到破坏的河流的相似程度,尤其在生物多样性和生态系统功能方面;Simpson 等^[11]把河流受扰前的原始状态作为河流的健康状态,认为河流健康是指河流生态系统能够支撑和维持河流主要的生态过程;美国《清洁水法令》认为河流健康指的是物理、化学、生物的完整性,即生态系统维持其自然结构和功能的状态^[5]。

随着对河流健康概念及内涵的逐步理解,更多学者认为河流健康应包含人类健康^[10],即应在保持生态系统自我维持与自我更新能力的同时,满足人类对河流的合理需求。Simpson 在后来的河流健康定义中,将人类作为生态系统的组成部分,将河流对人类的服务功能作为河流应支撑与维持的主要生态过程之一^[11];Fairweather^[12]认为河流健康,应包含公众对河流的环境期望,以及关于河流健康的社会、经济和政治观点;Meyer^[13]认为健康的河流除了要维持生态系统的结构与功能,还要支撑其社会价值;Rogers 等^[14]从管理角度界定河流健康概念,认为健康的河流不仅要保持生态学意义上的完整性,还应强调为人类服务功能的发挥,只有两者统一才有助于实现河流生态系统的良性循环和为人类服务功能的持续供给。

我国学者更倾向于后一种提法。邵坚^[15]认为河流健康应包含对水资源合理开发利用行为的认可,河流管理应兼顾人类需求和河流生态系统健康;杨文慧等^[9]认为河流健康指河流系统的结构和各项功能都处于良好状态,保证河流可持续开发利用目标的实现。此外,还有学者将河流健康概念定义为河流健康生命或河流生命健康,认为河流健康是在河流生命存在的前提下,人们对其生命存在状态的描述。李国英^[16]指出维持黄河健康生命就是要维护黄河的生命功能;蔡其华^[17]阐述了长江健康生命的概念,以河流为定义主体,强调河流生命的健康及河流功能的健康。

综上所述,河流健康概念涉及范畴较广。由于各个国家及地区河流本底条件不同,受到干扰的类型和强度有别,面临的生态环境问题多样,研究主体、目的及视角也有区别,因此,河流健康概念及内涵才会出现多元化的表述。河流生态系统健康以河流生态系统为研究对象,认为河流健康即河流生态系统健康,也称为狭义的河流健康。而更多学者倾

向于认为河流健康以河流复合生态系统为研究对象,考虑河流生态系统并兼顾人类需求,也称为广义的河流健康。近年来,有学者将河流健康研究对象从河流扩至整个流域尺度,基于流域健康角度论述河流健康。

本文以河流复合生态系统为定义主体,针对河流健康概念界定的三要素:定义主体、研究对象、参照标准^[5,18],将河流健康概念定义为,特定时期一定的社会公众价值体系判断下,在保障河流自身基本生存需求的前提下,能够持续地为人类社会提供高效合理的生态服务功能,并实现服务功能综合价值的最大化。

2 河流健康评估的内容、方法及应用

河流健康的概念,严格来讲,与其认为是一个科学概念,不如将其看作是一种河流管理的工具^[19]。研究河流健康的目的在于在河流上建立一种基准状态,并作为河流管理的目标,通过一套科学的诊断体系,评估河流健康状态的变化方向及趋势,据此进行河流的适应性动态管理。因此,河流健康评价研究主要集中在评价指标的选择与处理,评价指标体系与评价标准的建立,以及评价模型与方法的研究等方面^[4-20]。

从河流健康评价的技术手段看,主要包括河流水体物理化学评估(水质评价)、生物栖息地质量评估、水文评估和生物评估4个方面^[5]。从评价原理看,可以分为两类:一类是预测模型法(predictive model)或多元变量统计分析方法(multivariate statistical methods);一类是多指标方法(multimetries index)^[4-6,10,21-22]。从评价方法看,可以分为两类:一类是生物监测指标法或指示物种法,一类是综合评价指标法或结构功能指标法。

生物监测指标法的关键是指示生物的选择,主要是着生藻类(以硅藻为主)、无脊椎动物和鱼类^[5,20],代表性方法如澳大利亚河流评价方案(AUSRIVAS),是一种快速生物评价法,利用大型无脊椎动物的生存状况评价河流健康^[23];Karr^[24]提出的生物完整性指数(IBM)由反映水域生态系统的生物群落物种组成、营养结构、个体健康状况等3个方面的12个指标量化后形成,同时水环境按照生物完整性分为6个等级,是目前较普及的河流生态系统健康评价方法,指示生物由最初的鱼类推广至其他生物^[5]。该类方法的局限是需要有大量的生物数据及生物与环境之间的关系研究作为评价基础,在缺乏长期生物观测的区域,该方法的使用受到了限制,且不同的指示物种及不同的参数选择评价结果

都会出现偏差^[6],此外,该类方法能反映河流生态系统的健康水平,但不足以反映河流综合健康水平^[25]。

综合评价指标法又可以分为单一指标评价法和指标体系综合评价法。由于在流域范围内对所有干扰都敏感的指标是不可能存在的^[6],故单一指标评价法目前较少使用,而指标体系综合评价法可以全面、系统地反映河流系统状态,在美国和澳大利亚等国家被广泛应用,近年来在我国也逐渐得到推广,代表性方法较多。其中,最具代表性的方法是Ladson等^[23]提出的澳大利亚溪流状况指数(ISC),该方法构建了由河流水文、形态特征、河岸带、水质及水生生物等5个方面22个指标组成的评价指标体系,综合评价了澳大利亚80多条河流健康状况;南非河流健康计划采用河流无脊椎动物、鱼类、河岸植被、生境完整性等作为河流健康的评价指标^[26];美国环保署1989年发展了快速生物评价协议(RBP),1999年又更新了新版本的RBP,该方法采用生物集合体资料评价河流状态,以无人类干扰或受人类干扰较小的河流为参考,并采用相应于生物指标的生境指标修正生物指标,使生物质量评价结果可以更好地反映河流受损状态^[27];英国20世纪90年代建立的河流保护评价系统(SERCON)从物理多样性、自然性、代表性、稀有性、种群丰度、特有性等方面采用了35个特征指标评价河流状态^[28];Robert等^[29]提出河岸带、河道、环境目录(RCE)评分,综合考虑河流理化及社会经济等16个特征因子用于评价非点源污染农业区小溪流的健康状态;澳大利亚水生生物环境质量指数(IAEQ)^[30]采用水质、泥沙中有毒物质、大型底栖无脊椎动物、鱼类和河岸植被等5方面指标评价维多利亚州的内陆水体;维多利亚河流环境状态(ECVs)^[31]采用河床组成、河岸植被、濒危植被、覆盖物、水深、流速等10个指标评价维多利亚州河流环境状态;澳大利亚昆士兰河流状态调查(SRS)方法采用包括水文、河道栖息地、横断面、景观休闲和保护价值等11个方面指标评价河流的物理和环境状态^[32]。

国内也多采用指标体系综合评价法进行河流健康评价研究。上海市环境监测中心建立了由理化、生物、营养状况和景观指标等组成的黄浦江水环境状态评价指标体系^[19];长江水利委员会提出了由总目标层、系统层、状态层和要素层4级16个指标构成的健康长江评价指标体系,形成了我国首个能用数值表达的健康河流定量评价体系^[6,11];赵彦伟等^[33]提出了包含水量、水质、水生生物、物理结构与河岸带5大要素19个指标的河流健康评价指标体

系用于宁波市河流健康状况的评价;杨文慧等^[9]从河流结构健康指数、生态环境功能健康指数、社会服务功能健康指数 3 个方面选取 24 个指标构建了河流健康评价指标体系;孙雪岚等^[6]从河道健康、河流生态系统健康以及社会经济价值等方面选取 24 个评价指标构建了河流健康评价指标体系;吴阿娜^[19]从理化参数、生物指标、形态结构、水文特征、河岸带状况等方面构建河流健康评价指标体系用于上海地区城市河流健康状态的评价;张亮等^[34]从河道形态、河岸带状况及河床形态等方面选取 9 个指标建立河流形态学评价指标体系;邓晓军等^[35]基于城市河流健康的内涵,构建出包含自然生态、社会经济和景观环境等 3 个方面 24 个指标的河流健康评价指标体系用于城市河流健康评价研究;王勤花等^[36]在分析干旱半干旱地区河流系统特征基础上,从水资源、植被、物化特征、社会经济等方面选择 25 个关键性控制指标用于指导干旱半干旱地区河流健康评级。石教智等^[37]结合东江河流系统实际,从河流生境、生物、社会功能等方面选择 16 个指标用于评估河流健康。目前较具代表性的河流健康评价方法、评价指标及内容比较见表 1。

3 变化环境下河流健康评价存在的问题

伴随河流健康理念的提出,尽管国内外研究在河流健康概念与内涵的探讨、理论与方法的研究等方面取得了许多有价值的成果,但就目前的发展现状看,一些关键科学问题仍未得到有效解决,主要包括:

a. 从河流健康的概念及内涵看,目前对于河流健康概念的争议,一方面体现在定义对象的确定上,即究竟是河流生态系统还是兼顾人类需求的河流复合生态系统;另一方面体现在河流健康内涵的准确描述上。河流健康概念定义的不一致反映了研究者看待问题的角度、层次及侧重点的不同,就目前发展趋势看,越来越多的学者及流域管理机构认为“健康工作的河流”是人类保护河流的初衷和目的。

b. 从河流健康的机制研究看,由于我国自然地带差异性显著,不同地区的河流,由于类型、结构功能、生物组成、干扰类型及强度的不同,影响河流健康的因素也不同。目前研究中,较少提出针对不同河流的河流健康影响因子的识别方法,且对于引起河流健康变化的驱动因子及驱动机制与过程也尚未深入研究。

c. 从河流健康评价理论和方法看,河流健康评价研究至今不过三十多年的历史,真正兴起则是近十几年,理论及方法仍有待进一步完善,特别是指标体系的构建、不同类型指标数据的收集与处理、权重的确定,以及评价标准的制定等方面。近年来,河流健康评价多倾向于指标体系综合评价法,就目前发展看,该方法也存在一定的缺陷。首先,评价时空尺度的选择直接关系指标数据的获取,是河流健康评价的关键;其次,由于河流系统本身的复杂性,指标的选择尤其重要,指标不易于收集或量化、监测成本过高、指标太多导致不具备可操作性等均会影响河流健康评价结果;再次,评价标准的制定,多以河流的原始状态或不受人类干扰的状态为基准,而忽略

表 1 国内外主要河流健康评价方法、评价指标及内容对比

国家	评价方法	类别	河流健康评价指标及内容									
			水文	水质	物理结构	河岸质量	水生生物	防洪	景观	水资源	通航	水电
澳大利亚	AUSRIVAS	生物监测指标	✓	✓	✓		✓					
	ISC	综合指标	✓	✓	✓	✓	✓					
	SRS	综合指标	✓		✓	✓			✓			
	ECVs	综合指标	✓		✓	✓			✓			
	IAEQ	综合指标		✓			✓					
	HPM	综合指标	✓	✓	✓	✓						
	GRS	综合指标	✓		✓	✓	✓					
美国	RBP _s	综合指标	✓		✓	✓						
	IBI	生物监测指标	✓	✓		✓	✓					
	RCE	综合指标			✓	✓	✓					
英国	RHS	综合指标	✓		✓	✓						
	RIVPACS	生物监测指标					✓					
	SERCON	综合指标	✓		✓	✓	✓					
南非	IHI	综合指标	✓	✓	✓	✓	✓					
	RHP	综合指标	✓	✓	✓	✓	✓					
中国	黄浦江水环境评价	综合指标	✓	✓	✓				✓			
	健康黄河评价	综合指标	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
	健康长江评价	综合指标	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
	健康珠江评价	综合指标	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

了在现有外界环境条件下,该标准实现的可能性;最后,在河流健康评价结果的表达方面,由于河流本身是不断变化的,评价结果较少通过比较得出河流状态是趋于健康或不健康。

d. 从河流健康评价实践看,与国外相比国内相对滞后,存在较大差距。尽管近年来我国在河流健康评价指标体系、评价方法等方面开展了一系列工作,取得了一定成绩,一些大型河流如黄河、长江、珠江等都提出了量化的河流健康评价指标体系及评价工作流程,但目前河流健康评价仍较多停留在水质监测方面,评价指标多借助河流的理化参数或少量的生物监测指标,在河流生态完整性监测方面无论是监测网络建设还是监测数据收集等均较为缺乏,水质水量监测结果也未能与生物栖息地质量及生物多样性数据相关联,不能反映河流的真实状况,有待从技术、方法、机制、政策及法律法规等方面继续深入研究。

e. 从基于河流健康的水资源调控研究看,河流健康评价结果尚未与水资源调控相耦合。由于我国人水矛盾突出,水资源调控、水库调度及水资源配置工作任务重、难度大,且现有研究中,经济效益最大、缺水量最小或发电量最大等仍是水资源调控的主要目标,虽然已经开始重视河流生态系统保护,但如何将河流健康的评价结果与河流管理目标相关联,并量化为可调控的定量目标,应用于水资源多目标调控中,目前相关研究成果较少,且河流健康研究多停留在理论方法研究及概念内涵的探讨上,尚未真正实现指导河流管理。

4 变化环境下河流健康评价研究展望

a. 以流域为基本空间尺度、结合多时间尺度开展河流健康评价与调控研究是未来河流健康研究的重点。流域是基本的水文地貌单元,流域内的水资源是自然和人类共同所有的,人与自然之间最终必须通过协调才能实现人水和谐、人与自然和谐。因此,流域被公认为是水资源一体化管理的重要单元。通过开展流域尺度河流健康评价研究,重视河流生态系统与流域土地利用、人类行为、景观格局之间的相互耦合作用,可以更好地协调河流的开发与保护,符合人类价值期望。此外,河流是不断变化的,河流健康评价应加强河流健康动态评价,不仅可以判断河流健康状态变化的趋向,还可以评估河流管理行为的成效,为河流管理部门制定对策提供科学依据。

b. 因地制宜开展河流健康评价指标体系及评价标准研究是河流健康研究的关键。今后研究中应充分考虑我国各自然区(流)域本底条件及人类活

动干扰的差异性,根据每条河流及其不同河段的自然、社会经济条件及河流生态系统的结构和功能,分析影响河流健康的因子,因地制宜地构建特定河段特定时期的河流健康评价指标体系及评价标准。评价标准的制定应充分体现可持续发展的理念,考虑在特定环境背景下实现的可行性。此外,在理论和方法上应进一步加强河流健康评价指标体系构建中指标的筛选、权重的确定以及评价方法的研究,这对于提高河流健康评价结果的合理性和可信度具有重要的意义。

c. 开展基于3S等技术的河流健康评价研究是未来河流健康评价研究的重要技术手段。随着3S等技术的发展,一方面,为大尺度流域生态环境实时、动态信息的获取提供了高新的技术手段,另一方面,也为空间信息的进一步提取、处理以及分析提供了先进的操作平台。目前,利用多波段、多时相遥感影像数据评估大尺度流域生态环境状况已成为国内外研究热点^[5,30],可为河流不同时空尺度指标数据的快速、准确获取提供便捷;同时,可将评价结果及动态变化信息在空间上显示。3S技术与河流健康评价的集成为河流健康评价提供了最佳的技术途径。

d. 建立长期且全面的河流健康监测网络是保障河流健康的重要基础。河流及其生态系统是一个动态变化的复杂系统,多时间尺度河流健康评价与动态变化分析依赖于长期、可靠的监测数据的支撑。因此,加强对河流健康评价指标及其主要胁迫因子的长期监测研究,是河流健康评价急需解决的问题。

e. 科学的界定河流健康的“基准点”是基于河流健康的水资源调控的关键。河流健康概念是基于人类或生物健康概念衍生的,是一个相对的概念,需要在健康与亚健康或不健康之间确定河流健康的基准点,将河流健康目标作为水资源调控的目标之一,其关键在于确定河流健康基准点,以此指导河流的水量调度与河流管理工作。

f. 开展河流健康评价与水资源调控的集成研究,并探讨维持河流健康的河流调控管理研究是今后及未来河流管理的新方向。河流健康是今后及未来河流管理的新目标^[38-44]。因此,应在全面评估河流健康状态基础上,设定基于河流健康的河流管理目标,开展河流健康评价与水资源调控的集成研究,并制定相应的河流管理对策。

参考文献:

[1] 杨玉盛. 全球环境变化对典型生态系统的影响研究:现状、挑战与发展趋势[J]. 生态学报,2017,37(1):1-11.
(YANG Yusheng. The impacts of global environmental

- changes on typical ecosystem: status, challenges and trends[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1): 1-11. (in Chinese))
- [2] 吕振豫, 穆建新, 刘姗姗. 气候变化和人类活动对流域水环境的影响研究进展[J]. *中国农村水利水电*, 2017(2): 65-73. (LÜ Zhengyu, MU Jianxin, LIU Shanshan. A review of the impacts of climate change and human activities on water environment [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(2): 65-73. (in Chinese))
 - [3] 夏军, 石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 292-301. (XIA Jun, SHI Wei. Perspective on water security issues of changing environment in China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 292-301. (in Chinese))
 - [4] 于伟. 天津海河沿岸景观的生态化建设研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
 - [5] 高凡. 高强度人类活动区河流健康评价与调控研究: 以渭河关中段河流系统为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2012.
 - [6] 孙雪岚, 胡春宏. 关于河流健康内涵与评价方法的综合评述[J]. *泥沙研究*, 2007, 10(5): 74-81. (SUN Xuelan, HU Chunhong. Review on river health connotation and assessment method [J]. *Journal of Sediment Research*, 2007, 10(5): 74-81. (in Chinese))
 - [7] 沈海波. 青山湖流域水环境评价研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2013.
 - [8] SCHOFIELD N J, DAVIES P E. Measuring the health of on rivers [J]. *Water*, 1996, 5(6): 39-43.
 - [9] 杨文慧, 杨宇. 河流健康概念及诊断指标体系的构建[J]. *水资源保护*, 2006, 22(6): 28-32. (YANG Wenhui, YANG Yu. Concept and assessment indicator system of river health [J]. *Water Resources Protection*, 2006, 22(6): 28-32. (in Chinese))
 - [10] 黄保强, 李荣芳, 曹文洪. 河流生态系统健康评价及对我国河流健康保护的启示[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(8): 4600-4602, 4641. (HUANG Baoqiang, LI Rongfang, CAO Wenhong. River eco-system health assessment and implication for river protection in China [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(8): 4600-4602, 4641. (in Chinese))
 - [11] SIMPSON J, NORRIS R, BARMUTA L, et al. Austria's national river health program[R]. Victoria: State of the Rivers Project, 1999.
 - [12] FAIRWEATHER P G. State of environmental indicators of river health: exploring the metaphor [J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41: 221-234.
 - [13] MEYER J L. Stream health: incorporating the human dimension to advance stream ecology [J]. *Journal of the North American Ethological Society*, 1997, 16: 439-447.
 - [14] ROGERS K, BIGGS H. Integrating indicators, endpoints and value systems in strategic management of the river of the Kruger National Park [J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41: 254-263.
 - [15] 邵坚. 河流健康与水安全思考[J]. *华北水利水电学院学报(社科版)*, 2006, 22(3): 110-112. (SHAO Jian. Think of river healthy and water security [J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power (Social Science)*, 2006, 22(3): 110-112. (in Chinese))
 - [16] 李国英. 黄河治理的终极目标是“维持黄河健康生命”[J]. *人民黄河*, 2004, 26(1): 1-3. (LI Guoyin. “Keeping healthy life of the Yellow River”: a ultimate aim of taming the Yellow River [J]. *Yellow River*, 2004, 26(1): 1-3. (in Chinese))
 - [17] 蔡其华. 维护健康长江促进人水和谐[J]. *人民长江*, 2005, 36(3): 1-3. (CAI qihua. Water from the Yangtze to promote people to maintain healthy and harmonious [J]. *Yangtze River*, 2005, 36(3): 1-3. (in Chinese))
 - [18] 闫正龙, 高凡, 黄强. 基于 PSR 模型和粗糙集的平原地区河流系统健康评价指标体系研究[J]. *西北农林科技大学(自然科学版)*, 2013, 41(12): 200-209. (YAN Zhenglong, GAO Fan, HUANG Qiang. PSR model and rough set theory health evaluation index system for river system in plains [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2013, 41(12): 200-209. (in Chinese))
 - [19] 吴阿娜. 河流健康评价: 理论、方法与实践[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
 - [20] 蔡守华, 胡欣. 河流健康的概念及指标体系和评价方法[J]. *水利水电科技进展*, 2008, 28(1): 23-27. (CAI Shouhua, HU Xin. Concept of river health and index system for its evaluation [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2008, 28(1): 23-27. (in Chinese))
 - [21] 宋智刚, 王伟, 姜志强, 等. 应用 F-IBI 对太子河流域水生生态健康评价的初步研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2010, 25(6): 480-487. (SONG Zhigang, WANG Wei, JIANG Zhiqiang, et al. An assessment of ecosystem health in Taizi River Basin using F-IBI [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2010, 25(6): 480-487. (in Chinese))
 - [22] 庞治国, 王世岩, 胡明罡. 河流生态系统健康评价及展望[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2006, 4(2): 151-155. (PANG Zhiguo, WANG Shiyan, HU mingzhi. Assessment of river ecosystem health and its prospect [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hudropower Research*, 2006, 4(2): 151-155. (in Chinese))
 - [23] LADSON A R, WHITE L J, DOOLAN J A, et al. Development and testing of an index of stream condition of water way management in Australia [J]. *Freshwater Biol*, 1999, 41: 453-468.
 - [24] KARR J R. Defining and measuring river health [J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41(2): 221-234.
 - [25] 徐宗学, 李艳丽. 河流健康评价指标体系构建及其应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(1): 1-9. (XU Zongxue, LI Yanli. Establishment and application of

- assessment index system for river health: a case study in the Huntai River Basin [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2016, 14(1): 1-9. (in Chinese))
- [26] BOULTON A J. An overview of river health assessment: philosophies, practice, problems and Prognosis [J]. Fresh Water Biology, 1999, 45: 469-479.
- [27] HUGHES R M, PAULSENS S G, STODDAR J L. EMAP-surface water: a multi-assemblage probability surveys of ecological integrity in the USA [J]. Hydrobiologia, 2000, 422-423, 429-443.
- [28] RAVEN P J, HOLMESNT H, NAURA M, et al. Using river habitat survey for environmental assessment and catchment planning in the UK [J]. Hydrolbiologia, 2000, 422-423, 359-367.
- [29] ROBERT C, PETERSEN J R. The RCE: a riparian, ethanol, and environ mental in venture for small stream sin the agricultural land serape [J]. Freshwater Biology, 1992, 27: 295-306.
- [30] Offices of the Commissioner for the Environ. Mental State of the environment report [R]. Victoria: Offices of the Commissioner for the environ, 1988.
- [31] MITCHELL P. The environmental condition of VICTORIA streams department of water resources [R]. Melbourne, Australia: Offices of the Commissioner for the Environ, 1990.
- [32] ANDERSON J R. Development and validation of methodology [R]. Brisbane: State of the Rivers Project, 1993.
- [33] 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 studu on assessment of urban river ecosystem health [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 349-355. (in Chinese))
- [34] 张亮, 潘伟斌, 蔡建楠. 城市河流健康的形态学指标体系研究 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(30): 14862-14864. (ZHANG Liang, PAN Weibin, CAI Jiannan. Study on the morphology indication system of urban river health [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(30): 14862-14864. (in Chinese))
- [35] 邓晓军, 许有鹏, 翟禄新, 等. 城市河流健康评价指标体系的构建及应用 [J]. 生态学报, 2014, 34(4): 993-1001. (DENG Xiaojun, XU Youpeng, ZHAI Luxin, et al. Establishment and application of the index system for urban river health assessment [J]. Acta Ecological Sinica, 2014, 34(4): 993-1001. (in Chinese))
- [36] 王勤花, 尉永平, 张志强, 等. 干旱半干旱地区河流健康评价指标体系研究 [J]. 生态科学, 2015, 34(6): 56-53. (WANG Qinhua, WEI Yongping, ZHANG Zhiqiang, et al. Research on river health evaluation indicators study in arid and semi-arid areas [J]. Ecological Science, 2015, 34(6): 56-53. (in Chinese))
- [37] 石教智, 吴文娇, 吴龙华, 等. 东江河流系统健康诊断及分析 [J]. 水电能源科学, 2006, 34(1): 35-39. (SHI Jiaozhi, WU Wenjiao, WU longhua, et al. Health diagnosis and analysis of Dongjiang River System [J]. Water Resources and Power, 2006, 34(1): 35-39. (in Chinese))
- [38] 高凡, 黄强, 闫正龙. 基于 3S 的塔里木河干流生态水平动态监测及生态需水研究 [J]. 西北农林科技大学 (自然科学版), 2010, 38(1): 188-194. (GAO Fan, HUANG Qiang, YAN Zhenglong. Study on dynamic monitoe of ecological level and ecological water requirement in the main straim of Tarim River based on 3S technology [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2010, 38(1): 188-194. (in Chinese))
- [39] 徐昕, 陈青生, 董壮, 等. 预测-综合指标评价模型在河流健康评价中的应用: 以江苏省骨干河流健康评价为例 [J]. 中国农村水利水电, 2016(5): 23-32. (XU Xin, CHEN Qinsheng, DONG Zhuang, et al. Prediction-comprehensive index assessment model in the evaluation of river health [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(5): 23-32. (in Chinese))
- [40] 冯文娟, 李海英, 许立刚, 等. 河流健康评价: 内涵、指标、方法与尺度问题探讨 [J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(3): 34-39. (FENG Wenjuan, LI Haiying, XU Ligang, et al. River health assessment: intension, indexes, methods and scales [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(3): 34-39. (in Chinese))
- [41] 徐宗学, 武玮, 殷旭旺. 渭河流域水生态系统群落结构特征及其健康评价 [J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(1): 23-30. (XU Zongxue, WU Wei, YIN Xuwang. Community structure characteristics and health assessment of aquatic ecosystem in Weihei Basin, China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(1): 23-30. (in Chinese))
- [42] 耿芳, 董增川, 徐伟. 基于云模型的黑龙江上中游河流健康评价 [J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 131-135. (GENG Fang, DONG Zengchuan, XU Wei. River health assessment of upper and middle reaches of Heilongjiang River based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 131-135. (in Chinese))
- [43] 毛雪慧, 黄凌, 黄奕龙, 等. 深圳观澜河综合整治河流健康影响评估 [J]. 水资源保护, 2015, 31(1): 80-85. MAO Xuehui, HUANG Ling, HUANG Yilong, et al. Assessment on impacts of Guanlan River comprehensive treatment in Shenzhen City to river health [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(1): 80-85. (in Chinese))
- [44] 吴计生, 梁团豪, 霍堂斌, 等. 嫩江下游尼尔基-三岔河口段河流健康评价 [J]. 水资源保护, 2015, 31(1): 86-90. WU Jisheng, LIANG Tuanhao, HUO Tangbin, et al. Assessment on river health of Nierji Sancha River Estuary of Nenjiang River downstream [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(1): 86-90. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-04-15 编辑: 骆超)