

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.06.021

河流健康评价指标与权重分配的统计分析

苏辉东¹, 贾仰文¹, 牛存稳¹, 童伟军²

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 中建集团水务环保有限公司, 北京 100037)

摘要:为研究河流健康评价指标及其权重的特征和规律,通过文献调研,筛选出 150 篇代表性文献,并对其中 41 个典型评价案例中准则层和指标权重进行了统计分析。结果表明:不同文献对河流健康评价准则层划分较为统一,而对指标的选取和权重取值差别较大;将河流健康评价划分成水文、水质、生物、生境物理和经济服务功能 5 项是评价准则层较为公认的划分方式,其相应权重期望值分别为 0.15、0.21、0.18、0.22 和 0.24;河流健康评价的指标主要包括径流变化率、水功能区水质达标率、鱼类完整性指数、底栖动物完整性指数、河岸植被覆盖率、河流连通性、湿地保留率、流域天然植被覆盖率、水资源利用率以及河岸景观适宜度,其相应归一化后的权重期望值为 0.15、0.21、0.11、0.07、0.09、0.07、0.06、0.09、0.08 和 0.07。

关键词:河流健康;评价指标;权重分配;统计分析

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)06-0138-07

Statistical analysis of river health assessment indicators and weight distribution//SU Huidong¹, JIA Yangwen¹, NIU Cunwen¹, TONG Weijun² (1. *The State Key Laboratory of Simulations and Regulations of Water Cycles in River Basins (SKL-WAC), China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR), Beijing 100038, China*; 2. *China Construction Water Affairs Environmental Protection Co., Ltd., Beijing 100037, China*)

Abstract: In order to study the characteristics and rules of river health evaluation indexes and their weights, 150 representative literatures were selected through literature research, and 41 typical evaluation cases were statistically analyzed. The results show that different literatures divide the river health evaluation criteria layer in a unified way, but the selection of indicator layer and the value of weight are quite different. The river health assessment is divided into five parts: hydrology, water quality, biology, habitat physics and economic service function, which are generally recognized in the assessment criteria layer. The expected values of corresponding weights are 0.15, 0.21, 0.18, 0.22 and 0.24, respectively. The indicators of river health assessment mainly include runoff change rate, water quality standard rate of water function area, fish integrity index, benthos integrity index, riparian vegetation coverage rate, river connectivity, wetland retention rate, natural vegetation coverage rate of the basin, water resource utilization rate and riparian landscape suitability. The corresponding normalized weight expectation values are 0.15, 0.21, 0.11, 0.07, 0.09, 0.07, 0.06, 0.09, 0.08 and 0.07.

Key words: river health; assessment indicator; weight distribution; statistical analysis

随着生态系统健康研究的深入,河流健康逐渐受到关注,河流健康评价工作对河流保护与管理及可持续利用的基础性作用和指导性作用日益凸显^[1-3]。20 世纪 70 年代以来,美国^[1,4]、澳大利亚^[5]、南非^[6]、英国^[7]以及我国^[8-10]等都先后开展了

河流健康评价的相关研究。有的学者强调河流的自然属性,多从生态健康角度出发评价河流健康^[11],认为结构功能完整的或未受干扰的河流为健康河流^[12-13];有的学者认为河流也具有社会属性^[3],河流对人类的经济服务功能也属于健康河流范

基金项目:坪山河干流综合整治及水质提升工程专项课题(CSCEC-PSH-2017-02);“十二五”国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB452701);中国工程院咨询研究项目(2016-ZD-08)

作者简介:苏辉东(1992—),男,博士研究生,研究方向为水文模型。E-mail:694702713@qq.com

通信作者:贾仰文,教授级高级工程师。E-mail:jiayw@iwahr.com

畴^[14-16]。目前对具体河流健康进行评价时仍旧存在很大的主观性,其原因主要有两点:一是不同地域的河流、不同类型的河流千差万别,如南北方差异、东西部差异、城市河道与天然河流的差异、河流干流与支流的差异等,水文水资源、生态环境、生物、经济社会属性不尽相同,可以说世界上不存在两条完全相同的河流;二是评价者或者管理者的知识背景、采用的方法、评价目的、数据的多少等因素都会导致河流健康评价的指标体系、权重及指标的赋值标准存在差异,甚至对河流健康内涵的理解也不统一。可见河流健康评价工作极其复杂,评价结果很难相互对比,不利于顶层决策、管理以及后续的生态修复工作。

针对河流健康评价会“因河而异”采用不同的指标体系、权重和指标赋值标准的问题,目前主要有两种解决方法,一种是将不同河流的信息分类加以整理,比如将河流分为生态型河流^[17]、山地型河流^[18]、灌溉区河流、城市型河流^[19-20]等,以及特定的河流,如长江^[21]、黄河^[22]和珠江^[23-24],根据相邻或相似性原理,将一条河流的评价指标和方法移植到另一条河流。由于相似河流往往比较难找,而且仍然无法对不同类型河流的健康程度进行横向对比,适用范围仍有限。另一种方法是构建一种普适性的评价指标体系与方法指导全国的河湖健康评价^[25],如水利部试行的《河流健康评估指标、标准与方法》(1.0版)以及冯彦等^[26]提出的河流健康评价主评价指标体系。此方法指标体系的构建、权重的分配以及评价标准的选择等都存在一定的问题,有待进一步研究与完善。冯彦等^[26]及杨丽萍^[27]通过对大量河流健康相关文献的河流健康评价指标体系以及指标的归纳、整理和筛选,得到一个完整的河流健康评价主评价指标体系,但其对指标体系权重的分配和主评指标的赋值并未展开详细的分析。

鉴于此,本文通过文献调研,选出150篇相关的文献、41个典型评价案例,对其中的指标体系及其权重进行归纳整理,分析指标体系和权重的特征和规律,寻求多样本的指标体系和权重期望值,以期为河流健康评价指标体系的构建、指标权重的分配及不同的河流健康评价提供参考。

1 研究方法思路

河流健康评价的3个决定性因素为指标(index)、指标权重(weigh)和指标赋值(eigenvalue),这3个决定性因素因河流类型以及所在地区自然地理条件不同而变化,评价结果难免具有主观性。指标的重要性或影响因子称为权重,指

标的健康状况称为指标赋值。河流健康是公众对河流的期望,反映了不同背景下的价值取向^[28],如城市型河流水质达到标准Ⅲ类以上,为人类提供较高的经济服务功能,能生存一些鱼类就能满足公众的要求,人们就会认为河流是健康的,赋值应该在60分及以上(满分是100分);而生态功能保护区的河流,公众对河流健康的期望水质要求可能是Ⅱ类,甚至Ⅰ类,为人类提供经济服务功能要求则很低,鱼类要求保持未受扰动的原始状态。两种不同地域、类型的河流,指标的重要性(或权重)未发生改变,但公众对指标期望值(赋值标准)发生了改变。因此,从另一个角度来看,权重是可以不变的,但指标赋值的标准(通过关键阈值的不同实现)是不断改变的,每条河流指标的关键阈值是不一样的。

指标权重是指各指标对河流健康的“贡献程度”或者“影响因子”,在河流健康评价实践中起到关键的作用。确定权重的方法主要有层次分析法^[29]、专家咨询法、主成分分析法^[30]、熵值法、博弈论的综合权重法^[31-32]等。由于权重确定方法本身的多样性,再加上专家的知识背景和经验的差别、河流健康内涵及评价目的的不同,使得指标和权重会出现很大的偏差,进而导致这类方法难以避免权重分配的主观性,且很难评判、对比其优劣。本文对国内外具有代表性的多指标河流健康评价的权重分配进行统计,并采用统计学求数学期望的方法得到各个指标的权重(或称为影响因子),以期能集合大多数评价者的共识,获得一个可供参考的较为客观的指标体系及权重。数学期望的计算公式如下:

$$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx \quad (1)$$

式中: $E(x)$ 为数学期望; $f(x)$ 为权重 x 的概率密度函数。

在实际计算时,如果数据中出现一两个极端数据,会削弱平均数的代表性。为了消除这种现象,可将少数极端数据去掉,剔除概率密度较小的极大值和极小值,选择分布较为集中的权重区段,再求数学期望来进行优化。修正后的期望值 $E'(x)$ 的计算公式如下:

$$E'(x) = \int_{x_1}^{x_2} xf(x)dx \quad (2)$$

其中 (x_1, x_2) 满足以下条件:

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x)dx = F(x_2) - F(x_1) = 0.8 \quad (3)$$

式中: $E'(x)$ 为修正后的期望值; $F(x)$ 为变量 x 的概率分布函数,其计算式为

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (4)$$

2 准则层的权重统计分析

在中国知网上搜索 2000—2017 年的中文核心期刊、CSCD 期刊以及硕博论文关于河流健康的典型文献及案例,并检索 SCI 论文中关于国外河流健康的典型文献及案例。根据文献的下载次数、引用次数、发文期刊本身的质量初步筛选出 150 篇相关文献,再从中选择在河流健康评价中给出了指标体系及权重的文献,一共筛选出 41 个典型评价案例。对这些文献分类整理发现,基于多指标综合评价河流健康的文献中,91% 以上文献的准则层为 5 个,分别为水文、水质、生物、生境物理、经济服务功能。按照这 5 个分类,对 41 个案例中准则层权重进行统计分析,结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,经济服务功能的权重最大,平均值为 0.24,约占准则层的 1/4。为进一步分析权重的合理取值,对每个准则层权重统计其概率密度分布曲线,结果如图 1 所示。从图 1 可以看出,水文、生物、生境物理和经济服务功能的概率分布比较集中,且 $E(x)$ 都在权重分布集中的区间。对 $E(x)$ 进行修正,修正后的 $E'(x)$ 的取值分别为 0.15、0.16、

0.18、0.19、0.24。 $E(x)$ 与 $E'(x)$ 差异很小,说明 $E(x)$ 取值较为合理。从图 1 还可以看出,水文和经济服务功能基本符合正态分布,虽然水文的权重极值差异很大(0.01 ~ 0.51),但分布较为集中(0.15 上下),具有“集中趋势”,所以水文类指标权重取 0.15 能符合大多数评价者的共识。为进一步分析准则层权重平均值的可靠性,采用标准偏差来估算和评定,结果如表 2 所示。从标准差来看,生物的标准差最小,这说明生物在河流健康评价中的权重为 0.18 是普遍接受的权重值;标准差第二小的是水文,表明其权重 0.15 也是很认可的权重。

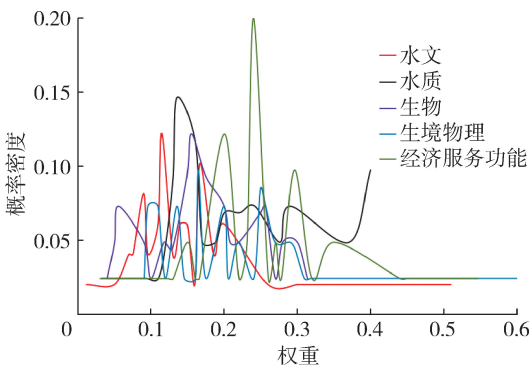


图 1 准则层权重的概率密度分布曲线

表 1 典型案例河流健康评价准则层权重统计结果

案例来源	准则层权重					案例来源	准则层权重				
	水文	水质	生物	生境物理	经济服务功能		水文	水质	生物	生境物理	经济服务功能
杜东 ^[33]	0.08	0.25	0.26	0.18	0.24 *	王志刚 ^[53]	0.12	0.29	0.27	0.21	0.11
高永胜 ^[2]	0.07	0.12	0.08	0.26	0.47	吴阿娜 ^[54]	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
龚蕾婷 ^[34]	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	杨丽萍 ^[27]	0.19	0.19	0.16	0.17	0.30
郭坤荣 ^[35]	0.15	0.40	0.25	0.10	0.10	杨文慧 ^[55]	0.17	0.28	0.10	0.26	0.20
黄舟 ^[36]	0.12	0.16	0.30	0.27	0.15	姚睿宸 ^[56]	0.20	0.09	0.06	0.40	0.24
霍堂斌 ^[37]	0.16	0.16	0.22	0.16	0.30	姚睿宸 ^[56]	0.09	0.03	0.05	0.66	0.17
贾蕊 ^[38]	0.11	0.14	0.16	0.32	0.27	姚睿宸 ^[56]	0.12	0.08	0.05	0.48	0.28
康世磊 ^[39]	0.51	0.16	0.04	0.22	0.07	姚睿宸 ^[56]	0.11	0.14	0.16	0.15	0.45
李鹏程等 ^[40]	0.11	0.11	0.22	0.36	0.20	姚睿宸 ^[56]	0.01	0.14	0.06	0.25	0.55
李自明 ^[41]	0.17	0.33	0.15	0.14	0.22	尤洋等 ^[17]	0.31	0.35	0.20	0.11	0.03
李自明 ^[41]	0.30	0.19	0.09	0.22	0.20	于志慧 ^[57]	0.13	0.12	0.12	0.31	0.32
李自明 ^[41]	0.10	0.40	0.18	0.09	0.23	袁茜 ^[58]	0.10	0.22	0.13	0.20	0.35
罗彬源 ^[42]	0.05	0.37	0.21	0.24	0.13	张朝 ^[59]	0.09	0.40	0.18	0.10	0.23
罗晓丽等 ^[43]	0.12	0.13	0.15	0.34	0.26	张立 ^[60]	0.07	0.26	0.26	0.17	0.24 *
吕纯剑 ^[44]	0.09	0.24	0.31	0.11	0.24 *	张立 ^[60]	0.17	0.17	0.16	0.26	0.24 *
毛雪慧等 ^[45]	0.13	0.13	0.12	0.27	0.35	张伟华 ^[61]	0.14	0.14	0.28	0.14	0.30
邱祖凯 ^[46]	0.14	0.40	0.26	0.10	0.09	张颖睿 ^[62]	0.12	0.16	0.30	0.27	0.15
山成菊等 ^[31]	0.19	0.15	0.09	0.29	0.27	张娟等 ^[63]	0.14	0.16	0.1	0.36	0.23
苏辉东 ^[47]	0.08	0.13	0.15	0.29	0.35	张柱 ^[64]	0.17	0.17	0.25	0.17	0.24 *
孙博等 ^[48]	0.14	0.14	0.28	0.14	0.30	Ladson 等 ^[5]	0.15	0.16	0.15	0.30	0.24 *
田野 ^[49]	0.38	0.22	0.16	0.12	0.12	Kleynhans ^[65]	0.13	0.20	0.17	0.26	0.24 *
王冰洁 ^[50]	0.17	0.28	0.18	0.30	0.08	Kleynhans ^[65]	0.12	0.13	0.25	0.26	0.24 *
王国胜 ^[51]	0.09	0.37	0.21	0.17	0.16	Petersen 等 ^[66]	0.15 *	0.21 *	0.13	0.27	0.24 *
王晖文 ^[52]	0.26	0.13	0.06	0.11	0.44	平均值 $E(x)$	0.15	0.21	0.18	0.22	0.24

注: * 表示原体系中没有、本文统计时加入的准则层权重,均取统计平均值 0.24。

表2 河流健康评价准则层权重统计分析结果

准则层	指标内涵	权重			
		平均值	最小值	最大值	标准差
水 文	水量与动力学特征、与地下水体的联系	0.15	0.01	0.51	0.09
水 质	氧化条件、盐度、酸化状况、营养条件以及特定污染物等	0.21	0.03	0.40	0.10
生 物	水生植物指标、鱼类指标、底栖无脊椎动物指标	0.18	0.04	0.31	0.07
生境物理	河流的连续性、河流形态、河岸地带的结构、生境数量与质量指标	0.22	0.09	0.66	0.11
经济服务功能	土地利用、防洪、景观、水资源利用状况等	0.24	0.03	0.55	0.11

3 指标层指标的选择与权重的确定

采用频度统计法对筛选出的 150 篇文献进行频度统计,对频度靠前的指标体系进行统计分析。在统计过程中,对名称、内涵或表达形式相近的指标进行相似性处理,都归为同一指标。例如,鱼类多样性指数、鱼类保留率、鱼类损失指数、敏感性鱼种数、鱼种数、土著鱼种数、外来鱼种数、鱼优势度指数、个体异常性鱼种数、鱼生物完整性指数等,本文都归类为鱼类指标。统计后得到河流健康评价的指标及其出现次数情况如表 3 所示。

对表 3 中的主要指标进行适当合并、归类、分析和筛选,构建新的指标体系。新的指标体系既要尽量精简、易于开展评价,又要尽可能多地指示河流健康的主要物理化学特征。即综合考虑指标的代表性、普遍性、可量化性和易获得性,同时考虑指标之间的相关性与重复性,删除显著相关的指标。结合国内外 41 个河流健康评价实例的指标权重统计结果,按照准则层权重获取的方法,对指标层的指标权重进行重新分配,构建河流健康评价指标体系如图 2 所示(括号中数据为权重)。

图 2 给出的评价指标体系及指标权重可为后续河流健康评价指标体系构建与权重分配提供参考。其中,水文指标中径流变化率反映径流量和过程的变异;水质指标中水功能区水质达标率能较多反映水质的信息;生物指标采用可以自由移动的鱼类和相对静止的底栖动物来表征;生境物理 3 个指标分别表征河道的稳定性、连通性和生境数量和质量;经济

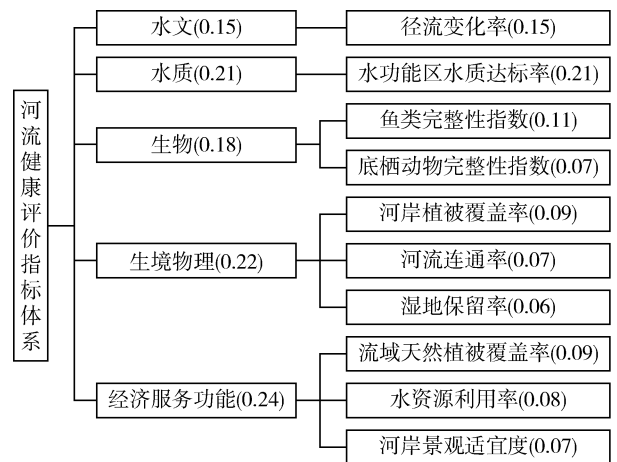


图2 河流健康评价指标体系框架及其指标的权重

济服务功能中流域天然植被覆盖率、水资源利用率、河岸景观适宜度分别主要表征流域内土地利用情况、水资源开发利用程度和景观适宜性。评价与管理者可以在此指标体系的基础上,根据实际情况和需要灵活增加 1~3 个需考虑的特色指标,并对主评指标和权重进行合理调整。

4 结 语

有效开展河流健康评价是河流管理与修复的基础性工作,有利于促进生态保护与水资源可持续利用。目前对河流健康的研究处于探索阶段,从指标的选择到权重的分配存在各种观点和方法,难以找到一种方法来评价各种指标和权重的优劣,也难以判断哪种方法的评价结果更合理。本文通过对 150 篇河流健康评价文献的分析,发现不同的研究者对准

表3 河流健康评价指标的采用情况

准则层	指标层采用的指标及出现的次数
水 文	径流变化率(37)、输沙变化(19)、流速-流态(17)、水位变化(13)、断流概率(7)
水 质	生态需水保证率(45)、水质达标率(40)、水质综合污染指数(37)、DO(29)、盐度(22)、水温(21)、总磷(16)、底泥污染状况(15)、BOD ₅ (14)、富营养化指数(14)、pH 值(14)、氨氮(11)、重金属污染指数(10)、高锰酸盐指数(10)、浑浊度(10)
生 物	鱼类(33)、大型底栖动物(28)、浮游动物(25)、浮游植物(23)、珍稀动物存活状况(20)、流域生物多样性指数(15)、水生植物(11)、外来物种(7)
生境物理	河岸植被覆盖率(47)、河床稳定性(43)、河岸稳定性(38)、河流连通性(38)、底质(28)、湿地保留率(22)、流域天然植被覆盖率(25)、蜿蜒度(23)、生境数量与质量(20)、土壤侵蚀(15)、河道稳定性(14)、比降(12)、河道遮阴率(12)、水面宽变化(12)、栖息地状况(11)
经济服务功能	水资源利用率(46)、防洪工程完善率(39)、景观适宜指数(34)、城市供水保证率(29)、土地利用(28)、航运(25)、取水量(20)、人工设施造成的生境破碎率(15)、饮水安全保障程度(14)、单方水 GDP(10)、城市化面积(10)、污水处理率(9)

则层划分较为统一,集中在水文、水质、生物、生境物理、经济服务功能等方面,而权重取值差别很大。通过进一步筛选得到了河流健康评价实例中准则层和指标层的常用指标及其采用情况,并计算了其相应的归一化后的权重期望值。通过分析现有研究中河流健康评价指标和权重的采用特征和期望值,提出了一个适宜河流健康评价的通用指标体系框架,并给出了准则层和指标层的权重。该通用指标体系框架集合了河流健康评价的共识,能增加河流健康评价的横向可比性,使评价结果相对客观,可供评价者参考。考虑到不同地域河流的差异性,可以适当增加反映当地河流特性的指标,来建立综合指标体系。此外,应对不同类型河流评价指标的赋值标准开展研究,采用实际案例加以验证,以快速获得更客观的河流健康评价结果。

参考文献:

- [1] 吴阿娜,杨凯,车越,等. 河流健康状况的表征及其评价[J]. 水科学进展,2005,16(4):602-608. (WU E'na, YANG Kai, CHE Yue, et al. Characterization of rivers health status and its assessment[J]. Advances in Water Science,2005,16(4):602-608. (in Chinese))
- [2] 高永胜. 河流健康生命评价与修复技术研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2006.
- [3] 王超,夏军,李凌程. 河流健康评价研究与进展[J]. 水资源研究,2014,3(3):189-197. (WANG Chao, XIA Jun, LI Lingcheng. Progress in river health assessment[J]. Journal of Water Resources Research,2014,3(3):189-197. (in Chinese))
- [4] BARBOUR M T, GERRITSEN J, SNYDER B D, et al. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish [R]. Washington, DC: US Environmental Protection Agency,1999.
- [5] LADSON A R, WHITE L J, DOOLAN J A, et al. Development and testing of an index of stream condition for waterway management in Australia [J]. Freshwater Biology,1999,41(2):453-468.
- [6] 董哲仁. 国外河流健康评估技术[J]. 水利水电技术,2005,36(11):15-19. (DONG Zheren. Foreign river health assessment technology[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2005, 36 (11): 15-19. (in Chinese))
- [7] RAVEN P J, HOLMES N T H, NAURA M, et al. Using river habitat survey for environmental assessment and catchment planning in the UK[M]. Dordrecht:Springer, 2000:359-367.
- [8] 王兴顺,刘凌,闫峰. 基于盲数理论的河流健康评价[J]. 水资源保护,2014,30(3):14-18. (WANG Xingshun,LIU Ling, YAN Feng. River health assessment based on blind number theory [J]. Water Resources Protection,2014,30(3):14-18. (in Chinese))
- [9] 杨文慧,严忠民,吴建华. 河流健康评价的研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(6):607-611. (YANG Wenhui, YAN Zhongming, WU Jianhua. Advances in river health assessment[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2005,33(6):607-611. (in Chinese))
- [10] 文伏波,韩其为,许炯心,等. 河流健康的定义与内涵[J]. 水科学进展,2007,18(1):140-150. (WEN Fubo, HAN Qiwei, XU Jiongxin, et al. Definition and connotation of river health [J]. Advances in Water Science,2007,18(1):140-150. (in Chinese))
- [11] SCHOFIELD N J, DAVIES P E. Measuring the health of our rivers[J]. Water,1996,5(6):39-43.
- [12] ROSET N, GRENOUILLET G, GOFFAUX D, et al. A review of existing fish assemblage indicators and methodologies [J]. Fisheries Management & Ecology, 2010,14(6):393-405.
- [13] KARR J R. Defining and measuring river health [J]. Freshwater Biology,2010,41(2):221-234.
- [14] MEYER J L. Stream health: incorporating the human dimension to advance stream ecology [J]. The North American Benlho-Logical Society,1997,16(2):439-447.
- [15] VUGTEVEEN P, LEUVEN R S E W, HUIJBREGTS M A J, et al. Redefinition and elaboration of river ecosystem health: perspective for river management [J]. Hydrobiologia,2006,565(1):289-308.
- [16] 高永胜,王浩,王芳. 河流健康生命评价指标体系的构建[J]. 水科学进展,2007,18(2):252-257. (GAO Yongsheng, WANG Hao, WANG Fang. Construction of evaluation index system for river's healthy life [J]. Advances in Water Science,2007,18(2):252-257. (in Chinese))
- [17] 尤洋,许志兰,王培京,等. 温榆河生态河流健康评价研究[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(3):19-24. (YOU Yang, XU Zhilan, WANG Peijing, et al. Study on the health assessment of ecotype river in Wenyuhe River [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009,20(3):19-24. (in Chinese))
- [18] 肖敦宇. 山地城市河流健康的景观适宜度评价研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [19] 张远,郑丙辉,刘鸿亮,等. 深圳典型河流生态系统健康指标及评价[J]. 水资源保护,2006,22(5):13-17. (ZHANG Yuan, ZHENG Binghui, LIU Hongliang, et al. Ecosystem health indicators and evaluation of Shenzhen typical river [J]. Water Resources Protection, 2006, 22 (5):13-17. (in Chinese))
- [20] 邓晓军,许有鹏,翟禄新,等. 城市河流健康评价指标体系构建及其应用[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 Ecologic Sinica, 2014, 34 (4): 993-1001. (in Chinese))
- [21] 王龙, 邵东国, 郑江丽, 等. 健康长江评价指标体系与标准研究[J]. 中国水利, 2007(12): 12-15. (WANG Long, SHAO Dongguo, ZHENG Jiangli, et al. Evaluation index system and standard of healthy Yangtze River [J]. China Water Conservancy, 2007(12): 12-15. (in Chinese))
- [22] 刘晓燕, 张原峰. 健康黄河的内涵及其指标[J]. 水利学报, 2006, 37 (6): 649-654. (LIU Xiaoyan, ZHANG Yuanfeng. The connotation and index of healthy the Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37 (6): 649-654. (in Chinese))
- [23] 金占伟, 李向阳, 林木隆, 等. 健康珠江评价指标体系研究[J]. 人民珠江, 2009 (1): 20-22. (JIN Zhanwei, LI Xiangyang, LIN Mulong, et al. Health Pearl River evaluation index system [J]. People's Pearl River, 2009 (1): 20-22. (in Chinese))
- [24] 高凡, 蓝利, 黄强. 变化环境下河流健康评价研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37 (6): 81-87. (GAO Fan, LAN Li, HUANG Qiang. Advances on evaluation of river health in changing environments [J]. Advance in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (6): 81-87. (in Chinese))
- [25] 彭文启. 河湖健康评估指标、标准与方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16 (5): 394-404. (PENG Wenqi. Retrospect and prospect of structural materials research in hydropower projects [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(5): 394-404. (in Chinese))
- [26] 冯彦, 何大明, 杨丽萍. 河流健康评价的主评指标筛选[J]. 地理研究, 2012, 31 (3): 389-398. (FENG Yan, HE Daming, YANG Liping. Selection of main assessment indicators for river health assessment [J]. Geographical Research, 2012, 31 (3): 389-398. (in Chinese))
- [27] 杨丽萍. 河流健康评价关键指标的确定与验证[D]. 昆明: 云南大学, 2012.
- [28] 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 (5): 74-80. (SUN Xuelan, HU Chunhong. A comprehensive review on the connotation and evaluation methods of river health [J]. Sediment Research, 2007 (5): 74-80. (in Chinese))
- [29] 李传哲, 于福亮, 秦大庸, 等. 基于层次分析法的河流健康模糊综合评价[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25 (增刊1): 24-27. (LI Chuazhe, YU Fuliang, QIN Dayong, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of river health based on analytic hierarchy process [J]. Advance in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25 (Sup1): 24-27. (in Chinese))
- [30] 刘振宇, 唐洪武, 肖洋, 等. 淮河沉积物总磷和重金属沿程变化及污染评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 16-22. (LIU Zhenyu, TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Variation and pollution evaluation of the total phosphorus and heavy metals in sediments of Huaihe River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(1): 16-22. (in Chinese))
- [31] 山成菊, 董增川, 樊孔明, 等. 组合赋权法在河流健康评价权重计算中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40 (6): 622-628. (SHAN Chengju, DONG Zengchuan, FAN Kongming, et al. Application of combination weighting method to weight calculation in river health evaluation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40 (6): 622-628. (in Chinese))
- [32] 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))
- [33] 杜东. 太湖主要入湖河流生态系统健康评价[D]. 武汉: 湖北大学, 2013.
- [34] 龚蕾婷. 太湖流域典型入湖河流的健康评价[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [35] 郭坤荣. 大汶河生态健康评价研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2007.
- [36] 黄舟. 基于 GIS 与 RS 的楠溪江流域生态健康评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [37] 霍堂斌. 嫩江下游水生生物多样性及生态系统健康评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [38] 贾蕊. 赣江南昌段河流健康评价研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [39] 康世磊. 秦岭太平河平原区段河流健康评价及格局化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [40] 李鹏程, 韩春, 王月敏, 等. 改进的 RAGA_PPC 模型及其在河流健康评价中的应用[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(9): 18-22. (LI Pengcheng, HAN Chun, WANG Yuemin, et al. Improved RAGA_PPC model and its application in river health assessment [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(9): 18-22. (in Chinese))
- [41] 李自明. 基于多层次灰色聚类模型的河流健康综合评价研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [42] 罗彬源. 结合 GIS 技术的河流健康多层次灰关联评价研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2008.
- [43] 罗晓丽, 董增川, 徐伟, 等. 基于尺度划分的滦河河流生态健康评价[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 91-95. (LUO Xiaoli, DONG Zengchuan, XU Wei, et al. Health assessment of Luan River based on scale division [J]. South-to-North Water Transfer and Water Conservancy Science and Technology, 2016, 14 (5): 91-

95. (in Chinese))
- [44] 吕纯剑. 基于辽宁省辽河流域水生生态功能三级分区的河流健康评价[D]. 沈阳:辽宁大学,2013.
- [45] 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))
- [46] 邱祖凯. 洱海入湖河流健康评价:以白鹤溪为例[D]. 苏州:苏州科技大学,2015.
- [47] 苏辉东. 基于层次分析法的拉萨河河流健康评价[D]. 兰州:兰州大学,2017.
- [48] 孙博,马涛,李伟. 辽河健康评价与治理保护研究[J]. 中国农村水利水电,2016(5):27-32. (SUN Bo, MA Tao, LI Wei. Research on health assessment and management protection in Liaohe River[J]. China Rural Water Conservancy and Hydropower,2016(5):27-32. (in Chinese))
- [49] 田野. 黄河内蒙古段河流健康评价[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [50] 王冰洁. 京郊山区河流健康评价与应用:以安达木河为例[D]. 北京:北京林业大学,2015.
- [51] 王国胜. 河流健康评价指标体系与 AHP:模糊综合评价模型研究[D]. 广州:广东工业大学,2007.
- [52] 王晖文. 河北省河流生态健康评价及修复技术研究[D]. 保定:河北农业大学,2010.
- [53] 王志刚. 北京北部山区河流健康评价及其诊断研究[D]. 北京:北京林业大学,2016.
- [54] 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.
- [55] 杨文慧. 河流健康的理论构架与诊断体系的研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- [56] 姚睿宸. 项目前评价体系在河流系统治理工程中的应用[D]. 重庆:西南交通大学,2016.
- [57] 于志慧. 太湖流域平原河网地区城市化背景下的河流健康评价研究[D]. 南京:南京大学,2015.
- [58] 袁茜. 山地城市河流与湖库健康度评价研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [59] 张朝. 重庆市河流健康指标体系的构建与评价研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
- [60] 张立. 健康长江水域生态指标体系与评价方法初步研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- [61] 张伟华. 河流健康评价与保护对策分析:以海城河为例[J]. 水利规划与设计,2015(11):9-11. (ZHANG Weihua. River health assessment and conservation strategy analysis:taking Haicheng River as an example[J]. Water Conservancy Planning and Design,2015(11):9-11. (in Chinese))
- [62] 张颖睿. 小清河流域生态健康评估研究[D]. 济南:山东大学,2017.
- [63] 张娟,郝达平,鞠伟. 基于层次分析法的城市河流健康评价研究[J]. 水资源保护,2016,32(增刊1):154-157. (ZHANG Juan,HAO Daping,JU Wei. Research on urban river health assessment based on analytic hierarchy process [J]. Water Resources Protection,2016,32(Sup1):154-157. (in Chinese))
- [64] 张柱. 河流健康综合评价指数法评价袁河水生态系统健康[D]. 南昌:南昌大学,2011.
- [65] KLEYNHANS C J. A qualitative procedure for the assessment of the habitat integrity status of the Luvuvhu River (Limpopo system, South Africa) [J]. Journal of Aquatic Ecosystem Health,1996,5(1):41-54.
- [66] PETERSEN J R, ROBERT C. The RCE: a riparian, channel, and environmental inventory for small streams in the agricultural landscape [J]. Freshwater Biology,1992,27(2):295-306.

(收稿日期:2019-01-04 编辑:熊水斌)

(上接第8页)

- [16] 张麟,黄华兵,王先伟,等. 城市内涝模型参数灵敏度分析与方法比较[J]. 中国给水排水,2018,34(3):129-134. (ZHANG Lin,HUANG Huabing,WANG Xianwei,et al. Sensitivity analysis of urban flooding model parameters using local and global approaches [J]. China Water & Wastewater,2018,34(3):129-134. (in Chinese))
- [17] GUO J C Y, URBONAS B, MACKENZIE K. Water quality capture volume for storm water BMP and LID designs [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2014,19(4):682-686.
- [18] 车伍,张鹏,张伟,等. 初期雨水与径流总量控制的关系及其应用分析[J]. 中国给水排水,2016,32(6):9-14. (CHE Wu,ZHANG Kun,ZHANG Wei,et al. Analysis of initial rainfall and total runoff volume control [J]. China Water & Wastewater,2016,32(6):9-14. (in Chinese))
- [19] 李明怡. 城市径流总量控制指标分解及实现路径探索与实践[J]. 水资源保护,2017,33(5):81-85. (LI Mingyi. Exploration and practice regarding decomposition and implementation of urban total runoff control index [J]. Water Resources Protection,2017,33(5):81-85. (in Chinese))
- [20] 李俊奇,李小静,王文亮,等. 美国雨水径流控制技术导则讨论及其借鉴[J]. 水资源保护,2017,33(2):10-16. (LI Junqi,LI Xiaojing,WANG Wenliang,et al. Technical guidance for stormwater runoff control in United States and its significance [J]. Water Resources Protection,2017,33(2):10-16. (in Chinese))
- [21] CAHILLT H. Low impact development and sustainable stormwater management [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc.,2012.

(收稿日期:2019-07-04 编辑:彭桃英)