

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.026

长江下游平原河网地区生态护岸对河流生态系统影响的评价指标体系

廖迎娣^{1,2}, 范俊浩¹, 张欢¹, 张诗敏¹, 陈达^{1,2}

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:为评价长江下游平原河网地区生态护岸对河流生态系统的影响,构建了生态护岸对河流生态系统影响评价指标体系。根据生态护岸对河流生态系统的影响方式以及健康河流的特征,提出以水质状况、生物状况、水文特征、地貌特征和社会经济5个方面作为评价指标体系的准则层;采用频度分析法和相关性分析法,对现有关于生态护岸、河流生态系统评价等的研究成果进行分析,筛选出18项关键指标;提出了指标赋分、生态护岸综合影响指数计算方法以及影响等级标准,可用于长江下游平原河网地区生态护岸建设的评价。

关键词:生态护岸;河流生态系统;评价指标体系;平原河网;长江下游

中图分类号:TV861 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)04-0189-06

Evaluation index system for ecological revetment impact on river ecosystem in plain river network at lower reaches of the Yangtze River // LIAO Yingdi^{1,2}, FAN Junhao¹, ZHANG Huan¹, ZHANG Shimin¹, CHEN Da^{1,2} (1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to evaluate the ecological revetment impact on the river ecosystem in plain river network at lower reaches of the Yangtze River, an evaluation index system was constructed. Based on the pattern of ecological revetment impact on the river ecosystem and the characteristics of healthy rivers, 5 aspects of water quality status, biological status, hydrological characteristics, geomorphological characteristics and socio-economy were proposed as the criterion layers of the evaluation index system. Furthermore, frequency and correlation analysis methods were applied to analyze the existing research findings in ecological revetments and river ecosystem evaluation, where 18 key indicators were highlighted. Moreover, a scoring method, a calculation method for the comprehensive index of the ecological revetment impact and criteria for grading the impact were proposed. The system can be used to evaluate the construction of ecological revetment in plain river network at lower reaches of the Yangtze River.

Key words: ecological revetment; river ecosystem; evaluation index system; plain river network; lower reaches of the Yangtze River

长江下游平原河网地区地势低平、水资源丰富、岸线利用率高、人类开发活动高度密集^[1-2],是我国经济较为发达,发展较为迅速的地区。近年来,随着经济高速发展和城镇化快速推进,生活、工农业生产污染物大量进入河流区域,河流生态系统面临严重威胁^[3]。在此背景下,坚持开发与保护并重,实现人水和谐,加强改善流域水生态环境已成为区域发

展的重要议题^[4-5]。

生态护岸、生态输(调)水和磁化诱导等生态修复技术的研发与应用已成为目前研究热点^[6-7],其中,生态护岸是集防洪、景观、社会和生态为一体的河流生态修复技术,在河流治理工程中已得到越来越多的应用^[8-9]。但是,针对生态护岸对河流生态系统影响或修复效果的评价还缺少有效的方法。基

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(B200204013)

作者简介:廖迎娣(1977—),女,副教授,博士,主要从事港口航道工程研究。E-mail: liaoyingdi@hhu.edu.cn

通信作者:陈达(1978—),男,教授,博士,主要从事港口航道工程研究。E-mail: chenda@hhu.edu.cn

于此,本文采用频度分析法和相关性分析法,结合长江下游平原河网特点,对现有关于生态护岸、河流生态系统评价等的研究成果进行分析,筛选关键评价指标,构建长江下游平原河网地区生态护岸对河流生态系统影响的评价指标体系,可为实现生态护岸效果的定量化评价提供技术支撑。

1 评价指标体系构建原则与方法

生态护岸对河流生态系统影响评价实质上是评价生态护岸工程对河流生态系统修复的效果,是一个较为复杂的过程。在体系构建和指标选取过程中应遵循科学性、代表性、层次性和可操作性等原则^[10]。本文采用层次分析法构建目标层、准则层和指标层3级评价指标体系。目标层代表生态护岸对河流生态系统的影响程度;准则层是对目标层和指标层之间影响机制的分类概括和解释说明^[11];指标层则是由多个能够直接反映河流生态系统状况的指标组成。根据生态护岸对河流生态系统的影响方式以及健康河流的特征,本文提出以水质状况、生物状况、水文特征、地貌特征和社会经济5个方面作为评价指标体系的准则层,在此基础上分别确定关键性指标,以全面评估生态护岸对河流生态系统的影响。

2 评价指标的选取

评价指标的筛选包含3个步骤:①指标梳理。在查阅2007—2021年发表的80余篇与河流生态健康、生态护岸、河流生态修复效果和水生态文明等相关文献的基础上,梳理出具有代表性且包含具体评价指标体系的文献共55篇,涉及评价指标共222个。②初步筛选。按照已构建的准则层将上述评价指标进行分类,以指标采用频次代表该指标的认可度,采用频度分析法筛选出采用频次不少于4次的指标作为候选指标。③适应性遴选。遵循指标选取原则,根据指标的内涵对候选指标进行相关性分析,避免各指标间存在较强的关联或表达重复。

2.1 水质状况

水质状况指标反映生态护岸对河流水质的影响程度以及自净能力的恢复程度,经过初步筛选共有溶解氧、水功能区水质达标率、氨氮、化学需氧量、总磷、生化需氧量、总氮、河道水质类别、酸碱度、高锰酸盐指数、重金属、饮用水安全保证率、底泥平均污染指数、河道内底质和大肠杆菌群等15项候选指标,各指标对应采用频次分别为20次、17次、16次、15次、11次、7次、6次、5次、5次、5次、5次、4次、4次和4次。优先选取采用频次不少于6次的指标,即溶解氧、水功能区水质达标率、氨氮、化学需

氧量、总磷、生化需氧量和总氮7项指标。其中,水功能区水质达标率属于综合性指数,其内涵包含其他6项指标,能够反映河流水质的总体状况,但它在揭示与其他指标之间的关联度上存在困难^[12];溶解氧、氨氮等6项理化参数指标能直观反映河流健康的问题所在,进而能够对生态护岸的维护与管理提出针对性的指导意见。如溶解氧的高低与大型无脊椎动物数量密切相关^[13];氨氮会对鱼类造成摄食降低、生长减缓和组织损坏等危害,与鱼类的存活状况相关^[14]。由于长江下游平原河网地区河流流速缓慢,水动力条件较弱,水体污染以富营养化为主^[1],上述6项指标可以反映河流水体营养化和自净能力。综上分析将水质状况关键指标定为溶解氧(C_1)、氨氮(C_2)、化学需氧量(C_3)、总磷(C_4)、生化需氧量(C_5)和总氮(C_6)6项,数据的采集与标准可参照SL219—2013《水环境监测规范》以及GB3838—2002《地表水质量标准》。

2.2 生物状况

生物状况指标主要反映生态护岸对鱼类、底栖动物、浮游生物和藻类等生物的存活状况的影响,经过初步筛选共有底栖动物多样性、浮游植物多样性、浮游动物多样性、鱼类多样性指数、珍稀水生物存活状况、鱼类完整性指数和固着藻类多样性等7项候选指标,各指标对应采用频次分别为23次、22次、17次、8次、8次、7次和6次。在河流生态系统食物链中,底栖动物、浮游植物、浮游动物和鱼类从属于不同的层次,分别代表着不同的生命形态和营养类型^[15]。其中,浮游动物多样性与底栖动物多样性之间存在较强的相关性,不宜同时作为评价指标^[16];底栖动物生命周期较长,能反映长期生态护岸对河流生态系统的扰动程度^[17],因此保留底栖动物多样性指标,剔除浮游动物多样性指标;珍稀水生物存活状况在大部分地区缺乏历史资料的参考,且在实际操作过程中该类生物难以捕捉,不符合可操作性原则,予以剔除;鱼类多样性指数和鱼类完整性指数均受渔民滥放、滥捕等人为因素的干扰,并不能客观反映生态护岸对河流鱼类生存的影响,且后者是包括物种丰富度指标、群落结构组成指标等16项分指标的综合性指标,其获取过程极其烦琐,因此这两项指标均剔除。综上分析,将生物状况关键指标定为采用频次较高的底栖动物多样性(C_7)和浮游植物多样性(C_8)2项,两者均可采用Shannon-Weaner多样性指数进行计算:

$$H = - \sum_{k=1}^K P_k \ln P_k \quad (1)$$

式中: H 为Shannon-Weaner物种多样性指数; K 为总

的物种数; P_k 为物种 k 的个体数与总个体数的比值。

2.3 水文特征

水文特征指标主要反映生态护岸对河流水文要素的影响,经过初步筛选共有生态流量保障程度、流速分布、流量过程变异程度、水土流失率、水温变异程度和水量等 6 项候选指标,各指标对应采用频次分别为 25 次、11 次、11 次、9 次、8 次和 6 次。其中,生态流量保障程度出现频次最高,该指标主要通过河流长序列水文数据来反映河流的水文特征,且能够同时表征流量过程变异程度和水量,因此剔除流量过程变异程度和水量这两项指标。由于建造生态护岸的首要目的是保护河岸免受冲刷,所以水土流失在本文所研究的评价指标体系中不具有代表性。综上分析,将水文特征关键指标定为生态流量保障程度(C_9)、流速分布(C_{10})和水温变异程度(C_{11}) 3 项。

生态流量是维持水生生物存在、污染物稀释自净、河流水沙平衡和生态系统平衡所需要的最小流量^[18],而在高度人工化城市中生态流量是指能保障城市河流连通性和景观娱乐等功能正常发挥的流量条件^[19],应根据研究区域的特征,评估计算生态流量。考虑到长江下游平原河网地区水资源时间分布不均的特点,生态流量保障程度可用评估年河道实测日均流量大于生态基流的天数占总天数的比例来表征^[20],计算公式如下:

$$C_9 = (d_s/365) \times 100\% \quad (2)$$

式中 d_s 为评估年实测日均流量达到河道生态流量的天数。

河流生态环境中不同流速条件更利于不同生物群落的聚集^[21],且流速分布与河流物质的交换扩散以及泥沙输移有关,在一定程度上影响着河流的自净能力^[1]。流速分布可根据河流断面流速分布的差异程度进行定性描述。

水温是水环境变化的重要驱动因子,水温的改变会直接或间接影响河流水质状况和水生生物状况^[17]。水温变异程度可由评估年逐月实测月均水温与多年平均月均水温变异最大值表示^[22],计算公式如下:

$$C_{11} = \max |T_m - \overline{T_m}| \quad (3)$$

式中: T_m 为评估年 m 月实测月均水温; $\overline{T_m}$ 为 m 月多年平均月均水温。

2.4 地貌特征

地貌特征指标主要用以表征生态护岸对河岸带与河道自然结构形态特征的影响,河流地貌直接影响着水生生物栖息环境的质量,很大程度上决定着

河流生物的种类及其群落的结构组成,是维持河流健康的重要前提^[23]。经过初步筛选共有河岸带植被覆盖率、纵向连通性、岸坡稳定性、蜿蜒度、河床稳定性、护岸形式、天然湿地保留率、河岸植被结构完整性、河道渠化程度、岸坡倾角、河岸带宽度、河岸缓冲带宽度、横向连通性、水系连通性、岸坡抗蚀性、岸坡高度和渗透性等 17 项候选指标,各指标对应采用频次为 30 次、20 次、20 次、15 次、14 次、10 次、9 次、8 次、8 次、7 次、7 次、6 次、5 次、5 次、4 次、4 次和 4 次。由于指标较多,优先选用认可度较高、采用频次不少于 8 次的指标。其中,河岸带植被覆盖率与河岸植被结构完整性均表征河岸带植被状况,内容存在交叉,选取采用频次较高的河岸带植被覆盖率指标;生态护岸应以保证岸坡稳定为前提条件进行生态修复,岸坡稳定性指标不具有代表性,予以剔除;护岸形式和河道渠化程度的内涵有所关联,均反映河岸渠化或硬质化的影响,选取采用频次较高的护岸形式指标;天然湿地保留率属于面源指标,不适用于评价河段尺度,予以剔除。综上分析,将地貌特征关键指标定为河岸带植被覆盖率(C_{12})、纵向连通性(C_{13})、蜿蜒度(C_{14})、河床稳定性(C_{15})和护岸形式(C_{16}) 5 项。

河岸带是河流生态系统的重要组成部分,河岸带植被覆盖率是表征河岸带植物群落存活状况的量化指标,能间接反映河流的水土保持度和生境质量,计算公式如下:

$$C_{12} = (S_p/S) \times 100\% \quad (4)$$

式中: S_p 为河岸带植被占有面积; S 为河岸带总面积。

河流物质循环、信息交换和生物迁徙在纵向上的畅通程度影响着水质、生物群落种类等参数的时空分布,纵向连通性表征河流纵向连通程度,计算公式如下:

$$C_{13} = N/l \quad (5)$$

式中: N 为研究河段拦河建筑物的数量; l 为研究河段沿河流中线的实际长度。

弯曲是河流的自然属性,河流的蜿蜒曲折有利于流速的多样性分布、多种生境的形成和水生生物群落的发展,蜿蜒度表征河流的弯曲程度,计算公式如下:

$$C_{14} = L/L \quad (6)$$

式中 L 为研究河段河流的直线长度。

较为稳定的河床有利于水位的稳定,能够营造良好生物栖息地,河床稳定性是表征河床稳定程度的指标,反映河床在纵向、横向和垂向维持自身结构形态平衡的能力。该指标为定性指标。

不同的护岸形式对两栖动物影响极大,最优形式为对河流横向连通无干扰的护岸,最差则为直立硬质护岸。护岸形式为定性指标,反映陆地系统和水生生态系统之间能量、信息和物质交换通道的顺畅程度。

2.5 社会经济

河流生态系统不但承载着自然服务功能,同时也承载着社会服务功能^[24],社会经济指标主要反映生态护岸对河流生态系统在社会服务功能以及经济效益两方面的影响。经过初步筛选共有防洪能力、水资源开发利用、建造维护成本、社会公共认可度、文化美学功能、水能资源开发利用、供水保证率、休闲娱乐功能、通航保证率、可亲水度、景观舒适度、排涝能力、维护成本、建筑材料环保性和景观多样性等 15 项候选指标,各指标对应采用频次分别为 21 次、15 次、11 次、10 次、8 次、8 次、7 次、7 次、7 次、6 次、6 次、6 次、5 次、5 次和 4 次。优先选取采用频次不少于 8 次的指标。防洪能力一般由河流达标堤防长度与河流总堤防长度的比值来表示,而生态护岸的建设需满足防洪要求,所以该指标予以剔除;水资源开发利用和水能资源开发利用是指流域内各类生产、生活和生态用水的总量占流域内水资源的比重,与本评价指标体系所针对的河段研究尺度不符,数据不易获取,予以剔除;社会公共认可度、文化美学功能都表达了群众对河流生态景观美学功能的满意程度,均为定性指标,为了尽可能减少定性指标数量以降低主观因素的影响,选择社会公共认可度来涵盖其他指标的功能。综上分析,将社会经济关键指标定为建造维护成本(C_{17})和社会公共认可度(C_{18})2 项。

景观化是生态护岸在保障水安全和生态健康基础上的一项有益补充,提升了河岸水景观效果,但过度景观化却是浪费国家资源的不良现象,因此需定性分析工程建造维护成本是否经济合理。

社会公共认可度是指居民或游客对河岸带景观、休闲娱乐等设施的满意程度,可以从景观的文化美学性、休闲娱乐丰富度和景观多样性等方面进行现场调研打分。该指标为定性指标。

3 评价方法

通过以上分析,从水质状况、生物状况、水文特征、地貌特征和社会经济 5 个方面构建包含 13 项定量指标与 5 项定性指标的生态护岸对河流生态系统影响评价指标体系,如图 1 所示。在此基础上,采用综合评价指数法定量评价生态护岸对河流生态系统的影响,最终可得到生态护岸综合影响指数:

$$I = \sum_{i=1}^5 W_i \sum_{j=1}^{n_i} w_j F_{ij} \quad (7)$$

式中: I 为综合影响指数; W_i 为第 i 个准则层权重; w_j 为第 i 个准则层中第 j 个指标在该准则层所占的权重; F_{ij} 为第 i 个准则层中第 j 个指标的赋分值; n_i 为第 i 个准则层指标数。

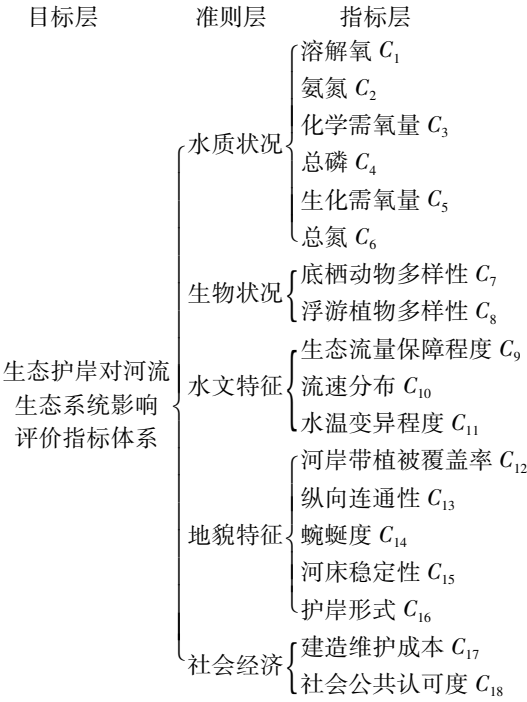


图 1 生态护岸对河流生态系统影响评价指标体系
Fig. 1 The evaluation index system for ecological
revetment impact on river ecosystem

各指标赋分等级定为理想状态(4 分)、健康(3 分)、亚健康(2 分)、不健康(1 分)和病态(0 分)共 5 个等级。在对各指标进行赋分时,应尽量参照国家或行业明确的适用标准,确定各等级的赋分区间或定性评价标准;若无相关标准可参考,则可通过借鉴国内外相关研究成果、区域规划要求或采用专家咨询等方法来确定。

在实际工程评价过程中,应首先对上述 18 项指标进行实测、定量计算或定性评价,在此基础上分别进行赋分,再选择合适的赋权方法确定各准则层和指标的权重,按照式(7)计算出生态护岸综合影响指数 I 。根据 I 级($3.2 < I \leq 4.0$)、II 级($2.4 < I \leq 3.2$)、III 级($1.6 < I \leq 2.4$)、IV 级($0.8 < I \leq 1.6$)和 V 级($0 \leq I \leq 0.8$)共 5 个综合影响指数等级,评估生态护岸对河流生态系统的影响等级,评价生态护岸对河流生态系统的修复程度。

4 结 语

本文采用频度分析法和相关性分析法,构建了水质状况、生物状况、水文特征、地貌特征和社会经

济5个方面18项指标的生态护岸对河流生态系统影响评价指标体系,提出了各项指标的赋分方法和生态护岸综合影响指数计算方法以及生态护岸对河流生态系统影响等级标准,可为长江下游平原河网地区生态护岸建设与评价提供科学手段。生态护岸对河流生态系统影响评价是一个复杂的多层次、多因素的综合评价过程,在实际应用中应结合研究区域的特点,充分分析各项指标的敏感性,合理确定指标和准则层的权重,准确评价生态护岸对河流健康的实际影响。

参考文献:

- [1] 褚克坚, 阚丽景, 华祖林, 等. 平原河网地区河流水生态评价指标体系构建及应用[J]. 水力发电学报, 2014, 33(5): 138-144. (CHU Kejian, KAN Lijing, HUA Zulin, et al. Construction and application of an indicator system for assessment of river ecosystem in plain tributary networks [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(5): 138-144. (in Chinese))
- [2] 陈达, 钟菁, 吴腾, 等. 江苏省长江岸线利用率影响因素分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 17-24. (CHEN Da, ZHONG Jing, WU Teng, et al. Factors influencing utilization rate of Yangtze River Shoreline in Jiangsu Province [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 17-24. (in Chinese))
- [3] 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 等. 长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析: 以秦淮河流域为例[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3291-3303. (MA Xiaoxue, GONG Chang, GUO Jiaxun, et al. Water pollution characteristics and source apportionment in rapid urbanization region of the Lower Yangtze River; considering the Qinhuai River Catchment [J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3291-3303. (in Chinese))
- [4] 廖迎娣, 张欢, 侯利军, 等. 江苏长江岸线生态修复评价指标体系研究[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 3910-3916. (LIAO Yingdi, ZHANG Huan, HOU Lijun, et al. Discussion on evaluation indicator system of ecological remediation along the shoreline of Yangtze River in Jiangsu Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 3910-3916. (in Chinese))
- [5] 吴宸晖, 鞠茂森. 河流生态修复的国际经验及对长江大保护的启示[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 136-144. (WU Chenhui, JU Maosen. International experience of river ecological restoration and its enlightenment to the Yangtze River Protection [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 136-144. (in Chinese))
- [6] 张列宇, 祝秋恒, 李晓光, 等. 磁化诱导技术在水生态修复中的应用与研究展望[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 132-139. (ZHANG Lieyu, ZHU Qiuhe, LI Xiaoguang, et al. Application and prospect of magnetization induction technology in water ecological restoration [J].

Water Resources Protection, 2021, 37(1): 132-139. (in Chinese))

- [7] 段学军, 王晓龙, 徐昔保, 等. 长江岸线生态保护的重大问题及对策建议[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11): 105-112. (DUAN Xuejun, WANG Xiaolong, XU Xibao, et al. Major problems and countermeasures of ecological protection on the waterfront resources along the Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(11): 105-112. (in Chinese))
- [8] YAO S, YUE H, LI L. Analysis on current situation and development trend of ecological revetment works in middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Procedia Engineering, 2012, 28: 307-313.
- [9] 黄显峰, 郑延科, 方国华, 等. 平原河网地区河流生态修复技术研究与实践[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 170-176. (HUANG Xianfeng, ZHENG Yanke, FANG Guohua, et al. Research and practices of river ecological restoration technology applied in plain river network area [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 170-176. (in Chinese))
- [10] 刘联兵, 李凌云, 王家生, 等. 环境友好型护岸技术评价指标体系研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(9): 165-167. (LIU Lianbing, LI Lingyun, WANG Jiasheng, et al. Study on evaluation index system for environmental friendly revetment technique [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(9): 165-167. (in Chinese))
- [11] 齐涛, 薛雄志, 卢昌义. “网状”生态指标体系构建及其指标权重分配方法[J]. 生态学报, 2007(1): 235-241. (LIN Tao, XUE Xiongzi, LU Changyi. Methods for developing a net shape ecological indicator system and assigning rational weights to the indicators [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007(1): 235-241. (in Chinese))
- [12] 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 major evaluation indicators on river health evaluation [J]. Geographical Research, 2012, 31(3): 389-398. (in Chinese))
- [13] BEYENE A, ADDIS T, KIFLE D, et al. Comparative study of diatoms and macroinvertebrates as indicators of severe water pollution: case study of the Kebena and Akaki rivers in Addis Ababa, Ethiopia [J]. Ecological Indicators, 2009, 9(2): 381-392.
- [14] 杨玉珍, 王婷, 马文鹏. 水环境中氨氮危害和分析方法及常用处理工艺[J]. 山西建筑, 2010, 36(20): 356-357. (YANG Yuzhen, WANG Ting, MA Wengpeng. On harms of ammonia and nitrogen in water environment and its analysis methods and common treatment craft [J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(20): 356-357. (in Chinese))
- [15] 郭海娟, 肖霄, 孔祥震, 等. 太湖流域水生生物水质基准推导的物种选择[J]. 环境保护科学, 2017, 43(5): 57-61. (GUO Haijuan, XIAO Xiao, KONG Xiangzhen, et al. Species selection derived from the water quality criteria based on hydrobios in the Taihu Lake Basin [J].

- Environmental Protection Science, 2017, 43 (5): 57-61. (in Chinese))
- [16] 左其亭,陈豪,张永勇. 淮河中上游水生态健康影响因子及其健康评价[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1019-1027. (ZUO Qiting, CHEN Hao, ZHANG Yongyong. Impact factors and health assessment of aquatic ecosystem in Upper and Middle Huai River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 1019-1027. (in Chinese))
- [17] 顾晓昀,徐宗学,刘麟菲,等. 北京北运河河流生态系统健康评价[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2576-2587. (GU Xiaoyun, XU Zongxue, LIU Linfei, et al. Health assessment of the stream ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China [J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2576-2587. (in Chinese))
- [18] 金纯,姜翠玲,吴为. 基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2): 8-14. (JIN Chun, JIANG Cuiling, WU Wei. Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2): 8-14. (in Chinese))
- [19] 华祖林,董越泽,褚克坚. 高度人工化城市河流生态水位和生态流量计算方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 140-144. (HUA Zulin, DONG Yueyang, CHU Kejian. Calculation method of ecological water level and discharge in highly artificial urban river [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 140-144. (in Chinese))
- [20] 王莉,徐聪,于鲁冀. 沙颍河流域(河南段)清洁河流评价指标体系构建研究[J]. 生态经济, 2017, 33(9): 164-169. (WANG Li, XU Cong, YU Luji. Study on the construction of evaluation index system of clean river in Shaying River Basin (Henan Section) [J]. Ecological Economy, 2017, 33(9): 164-169. (in Chinese))
- [21] 王佳,郭纯青. 漓江城市段河流生态健康评价[J]. 水科学与工程技术, 2011(5): 68-71. (WANG Jia, GUO Chunqing. Evaluation of river ecology healthiness for Guilin City Section of Lijiang River [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2011(5): 68-71. (in Chinese))
- [22] 陈俊贤,蒋任飞,陈艳. 水库梯级开发的河流生态系统健康评价研究[J]. 水利学报, 2015, 46(3): 334-340. (CHEN Junxian, JIANG Renfei, CHEN Yan. Evaluation on the health of river ecosystem under the cascade development of reservoirs [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(3): 334-340. (in Chinese))
- [23] 朱惇,贾海燕,周琴. 汉江中下游河流健康综合评价研究[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(1): 1-8. (ZHU Dun, JIA Haiyan, ZHOU Qin. Comprehensive health evaluation of the Middle and Lower Hanjiang River [J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(1): 1-8. (in Chinese))
- [24] 王鹏全,吴元梅,张丽娟,等. 湟水干流西宁段河流健康评价模型[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 9-15. (WANG Pengquan, WU Yuanmei, ZHANG Lijuan, et al. River health assessment model for Xining section in main stream of Huangshui River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 9-15. (in Chinese))

(收稿日期:2021-09-16 编辑:熊水斌)

(上接第 173 页)

- [25] 姜章泽君. 基于熵值赋权与 GIS 的多情景内涝风险评估研究[D]. 南昌:南昌大学, 2020.
- [26] 孙艺珂,王琳,祁峰. 基于改进综合水质标识指数法的山东省水库水质特征分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(6): 726-732. (SUN Yike, WANG Lin, QI Feng. Analysis of water quality evolution of the reservoirs in Shandong Province based on improved water quality identification index [J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2019, 55(6): 726-732. (in Chinese))
- [27] 柴乃杰,陶李培,李翔. 基于改进集对分析的混凝土再生粗骨料质量评价方法[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(10): 149-155. (CHAI Naijie, TAO Lipei, LI Xiang. A method of assessing recycled coarse aggregate for concrete based on improved set pair analysis [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(10): 149-155. (in Chinese))
- [28] 刘修英,黄功学,郑志宏,等. 贾鲁河郑州段水质评价和污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 40-46. (LIU Xiuying, HUANG Gongxue, ZHENG Zhihong, et al. Water quality evaluation and pollution source apportionment to Zhengzhou section of Jialu River [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 40-46. (in Chinese))
- [29] XU Panpan, ZHANG Qiying, QIAN Hui, et al. Characterization of geothermal water in the piedmont region of Qinling Mountains and Lantian-Bahe Group in Guanzhong Basin, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(15): 442. 1-442. 17.
- [30] 王建,彭金华. 深圳市石岩河水质改善长效机制研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(4): 79-81. (WANG Jian, PENG Jinhua. Study on the long-term mechanism of water quality improvement of Shiyan River in Shenzhen [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(4): 79-81. (in Chinese))
- [31] 郑明凤,陈斯典,秦华鹏,等. 降雨径流污染对深圳湾富营养化影响的模拟研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(9): 133-138. (ZHENG Mingfeng, CHEN Sidian, QIN Huapeng, et al. A simulation study on effects of urban rainfall runoff pollutions on eutrophication in deep bay, Shenzhen, China [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(9): 133-138. (in Chinese))

(收稿日期:2021-04-30 编辑:熊水斌)