

DOI: 10.5846/stxb201807081484

粟一帆, 李卫明, 艾志强, 刘德富, 朱澄浩, 李金京, 孙徐阳. 汉江中下游生态系统健康评价指标体系构建及其应用. 生态学报, 2019, 39(16): - - .
Su Y F, Li W M, Ai Z Q, Liu D F, Zhu C H, Li J J, Sun X Y. Establishment and application of the index system for health assessment of the middle and lower reaches of the Hanjiang River. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): - - .

汉江中下游生态系统健康评价指标体系构建及其应用

粟一帆, 李卫明*, 艾志强, 刘德富, 朱澄浩, 李金京, 孙徐阳

三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002

摘要: 水利工程建设影响了河流生态系统健康, 为探究梯级水库、跨流域调水等水利工程建设对长江流域河流生态系统健康的影响, 以汉江中下游为例, 采用频次分析法和相关性分析法对评价指标进行筛选, 用最小二乘法 and 熵系数法相结合的综合权重模型确定各评价指标权重, 从整体性、稳定性及可持续性 3 个方面构建了河流生态系统健康评价指标体系, 并利用赋分法进行河流健康评价。结果表明, 汉江中下游河流健康评价指标体系包含流量过程变异程度、输沙量变化、河流连通性、富营养化状况、鱼类物种数等 11 个指标。评价结果显示汉江中下游河流生态健康状况表现出较强的空间异质性, 且健康状况逐年降低。靠近丹江口水库的区域较好, 越往下游越差。

关键词: 汉江; 河流生态系统; 健康评价; 指标体系; 梯级水库; 调水工程

Establishment and application of the index system for health assessment of the middle and lower reaches of the Hanjiang River

SU Yifan, LI Weiming*, AI Zhiqiang, LIU Defu, ZHU Chenghao, LI Jinjing, SUN Xuyang

College of Hydropower and Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China

Abstract: River ecosystem is one of the most important natural ecosystems. It plays a vital role in the exchange of material, energy and information. Humans have been altering natural rivers for different purposes such as navigation, irrigation, flood control, and power generation. While great social and economic benefits are achieved, these projects can cause ecological problems such as eutrophication, black and odorous water, and insufficient eco-flow. The problems of river ecosystem health as a result of human activities have drawn great attention. Questions remained unclear regarding river management. One is the method to evaluate river health condition affected by humans. The other is to minimize the adverse impact of water conservancy and hydropower projects on river ecosystem. In this study, a river health evaluation method was proposed from the perspective of ecosystem integrity, stability, and sustainability. The proposed method is based on the harmony theory, the comprehensive weight model combined with the least squares method, and the entropy coefficient method. A new framework for assessing river health was developed from the perspective of harmony and health between hydraulic engineering and the river ecosystem. As a case study, the method and framework were applied to the middle and lower reaches of the Hanjiang River, an important tributary of Yangtze River, China. The health status of the river ecosystem and crucial drivers were evaluated. The results indicated that: (1) a total of 11 indicators including sediment transport, river connectivity, eutrophication status, fish biological integrity index, etc. contributed to the index system for health assessment of the studied site; (2) the ecological environment of Hanjiang water was generally poor and change gradually along the river. River health levels were generally “healthy” in the upstream, mostly “sub-healthy” in the midstream, and

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51309139)

收稿日期: 2018-07-08; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lwm000001@126.com

“unhealthy” in the downstream. This indicates that pollution in Hanjiang River was more serious in the downstream; (3) the physical attributes of the river were altering to that of a lake due to an increasing number of cascaded dams and inter-basin water transfer projects. The speed of such a change scales with the extent of hydraulic engineering intervention. This study will serve as an important reference for basin management in Hanjiang River.

Key Words: Hanjiang River; stream ecosystem; health assessment; index system; cascade projects; water diversion project

河流生态系统是最重要的自然生态系统之一,作为陆地生态系统和水生态系统的枢纽,在物质、能量和信息的交换过程中,发挥着重要的作用^[1-2]。水利水电工程在取得巨大社会 and 经济效益的同时,对河流生态系统产生了一系列生态环境问题,如水华、黑臭水体、生态流量不足等问题日益突出^[3-4]。水利水电工程开发等人为影响下的河流生态系统健康问题一直受到学术界的高度关注,但目前尚未得到很好解决。如何合理评估受人类影响的河流健康状况,尽可能减小水利水电工程开发对河流生态系统的不良影响,是河流管理的重要内容之一。

河流生态系统健康评价过程中,指标评价体系的构建至关重要。国外在二十世纪后期建立了不同的指标评价体系用于河流健康评价。如英国在 1984 年提出了河流无脊椎动物预测和分类计划^[5],瑞典在 1992 年提出了岸边与河道环境细则^[6],澳大利亚在 1999 年根据河流水文、形态、河岸带等特征提出了溪流健康指数^[7]等。我国在研究初期较多的借鉴国外评价体系进行河流健康评价,如杨莲芳^[8]应用生物多样性指数评价了安徽九华河水系的健康状况。近年来部分学者依据不同的指标归类标准,建立了各自的河流指标评价体系进行河流健康评价,如邓小军^[9]构建出包含自然生态、社会经济和景观环境等 3 个方面 24 个指标的城市河流健康评价指标体系,对漓江市区段进行健康评价;顾晓昀^[10]选取涵盖水生生物、水文、水质和栖息地的 22 个评价指标,构建了北运河河流生态系统健康评价指标体系进行健康评价;李卫明等^[11]构建了包含水文、物理结构、化学、生物、服务等指标的评价体系对水电开发下的雅砻江下游进行了健康评价。

综上所述,虽然国内外已经构建了很多评价指标体系,但存在评价指标归类标准不明确,指标归类错综复杂的问题;缺乏对水利工程造成的非连续性河流进行健康评价研究以及指标权重分配过于主观或客观的问题,导致评价体系不能广泛应用。因此,亟待建立一套评价指标分类合理、适用于非连续性河流和指标权重分配合理的评价体系。

汉江是长江最大的支流,流域内建有丹江口、崔家营等梯级水库^[12],是南水北调中线工程取水源地。近年来汉江出现了水质恶化现象,下游水华频发。为此,本文选取汉江污染较严重的中下游为研究对象,通过探讨河流生态系统健康的内涵,尝试从生态系统的整体性、稳定性、可持续性 3 方面构建汉江水域生态健康指标评价体系,采用频次分析和相关分析筛选河流生态系统健康评价指标,基于最小二乘法 and 熵系数法建立综合指标权重体系进行评价分析,以期对汉江生态系统的管理和恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

汉江是长江最大的支流,干流全长 1577 km,流域面积为 17.43 万 km²,位居长江水系各流域之首。流经陕西、湖北两省,在武汉汇入长江。湖北省丹江口以上为汉江流域上游,河谷狭窄,长约 925 km;丹江口至钟祥为中游,河谷较宽,沙滩多,长约 270 km;钟祥至汉口为下游,长约 382 km。流域内规划建设多个电站,自上至下依次为丹江口—王甫洲—新集—崔家营—雅口—碾盘山—兴隆 7 个梯级枢纽,王甫洲水电站、崔家营水电站和兴隆水电站分别于 2000 年、2010 年和 2014 年建成投入使用;丹江口水库作为南水北调中线工程水源地,于 2014 年正式开始供水。为探明水利工程对汉江中下游(图 1)生态健康的影响,本文选取湖北省水网例

行监测断面和沿河水文站共 12 个代表监测断面的数据进行分析,断面布置情况及名称见图 1(#1—#12)。

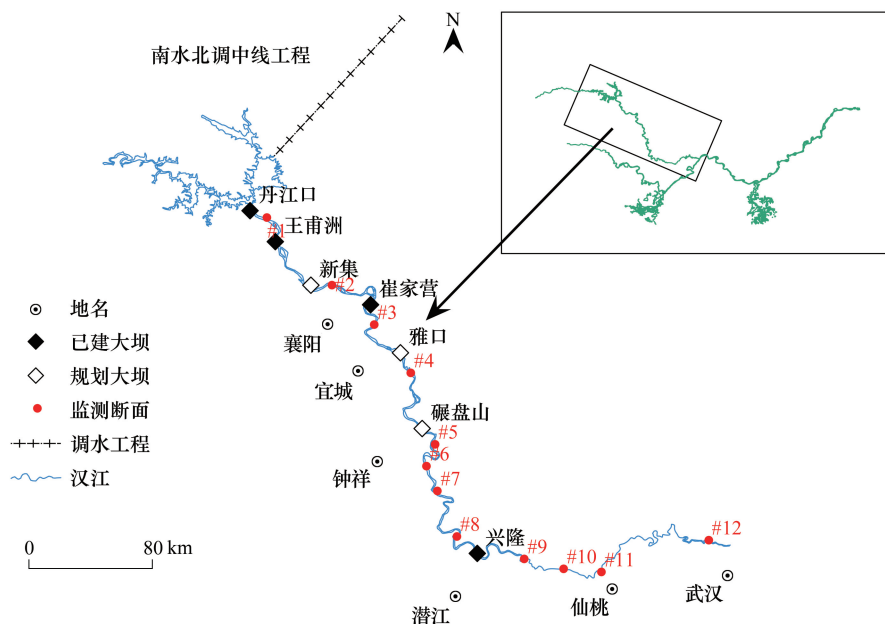


图 1 汉江中下游研究区域图

Fig.1 Research Area of the middle and lower reaches of the Hanjiang River

#1 为黄家岗水文站;#2 为襄阳白家湾;#3 为襄阳余家湖;#4 为钟祥斗转;#5 为钟祥皇庄;#6 为皇庄水文站;#7 为沙洋水文站;#8 为天门罗汉闸;#9 为天门岳口;#10 为潜江泽口;#11 为仙桃水文站;#12 为汉口水文站

1.2 河流生态系统健康评价指标体系构建

1.2.1 生态健康河流内涵

由于汉江中下游同时受梯级水库和南水北调工程的影响,常用的以水文情势、河岸带结构、水质、水生生物等为分类标准的指标体系^[13-14]不能很好的适用,有必要将河流生态系统当作一个整体^[15-16],从生态系统的整体性、稳定性、可持续性 3 个固有特性出发,定义合理的要素层,并统一指标层和要素层隶属标准,以便建立适合情势复杂河流的健康评价指标体系。

健康的河流生态系统应该是具备良好的整体性,能够维持较高的稳定性,并能实现良好的可持续性^[16-18]。然而,随着经济社会的发展,人类在自然河流上进行梯级水电开发和进行调水工程,已成为水资源获取的重要途径。水利工程建设后,首先是生态系统的整体性受到影响,大坝的建设对洄游鱼类产生阻隔影响,水文情势的改变导致生物栖息地面积减少;其次,河流的稳定性也受到影响,生态系统变得脆弱,受到外界干扰后的抵抗能力和恢复能力明显减弱;同时生物多样性的减少也会影响生态系统的可持续性。因此,健康的河流生态系统应从整体性、稳定性及可持续性三个方面表征生态系统健康状况。

(1) 整体性

生态系统的整体性具有完整的结构、行为和功能,它由生态系统组分的多样性、差异性和相关性三个要素构成^[19-20]。健康的水生态系统并非原始未经扰动的生态系统,但它必须是相对完整的^[21]、仍具有与原生态系统具有类似结构和功能,其生境具备繁杂的异质性。董哲仁^[22]提出了河流生态系统结构和功能整体性模型,并将水文情势、水力条件和地貌景观格局作为生态系统整体性的基本特征要素。

(2) 稳定性

生态系统稳定性存在两个方面:一是系统保持现行状态的抵抗干扰能力,二是系统受扰动后恢复至扰动前状态的恢复能力^[20-23]。即用生物群落、物种个体及其生境恢复速度与恢复程度衡量^[23-24]。柳新伟等^[25]认为生态系统的稳定性是处于生态阈值内的生态系统的敏感性及其恢复能力,其中敏感性与上述抵抗干扰能力的

意思相近,反映的是同一特征。

(3) 可持续性

生态系统的可持续性即生态系统长时间维持其内在组成成分、组织结构、功能的动态健康及发展进化的潜在(和显在)的能动性的总和^[21]。可持续性为生态系统健康的充分条件,也是生态系统的内在特征^[26]。生态系统的可持续性可用生态整合性、活力及组织力 3 个特征要素表征。

根据上述关于河流生态系统整体性、稳定性及可持续性的定义,具体的指标分类标准见表 1。

表 1 河流生态系统健康指标分类标准
Table 1 River ecosystem health indicators classification criteria

特征 Trait	要素 Element	涵义 Meaning	衡量指标 Index
整体性 Integrity	水文情势	水文状况的变化对河流生态系统具有驱动作用,该变化对生态过程具有动态响应。	流量、水文频率、持续时间、水文条件变化
	水力条件	水力条件描述了水力因子与生物生活史特征的适宜性关系	流态、流速、水位、水温、底质
	地貌空间格局	河流地貌格局反映了河流形态及栖息地结构的完整性	河流形态、景观格局、栖息地、蜿蜒性、连通性
稳定性 Stability	抵抗力	系统保持现行状态的能力	生物存活状况、纳污能力、富营养化状况
	恢复力	系统受扰动后回归原始状态的能力	生物群落、生境恢复速度与恢复程度
可持续性 Sustainability	生态整合性	生态系统内在的组份、功能、结构及其生物物理环境的完整性	组份的多样性格局、组份间的结构关联性、生态系统功能过程(基因遗传、生境(景观)多样性、理化环境变异性、营养联结性、种间亲缘关系、种间相互作用强度、物质循环、能量流动)
	自维持活力	生态系统可通过内在机制利用或转化系统内外可利用的物质、能量,以支持其生存、演替或进化	代谢水平、代谢效率、涵养能力、初级生产力
	自组织力	生态系统充分利用太阳能等环境能量,并通过适应外界扰动以改进、重组并发展系统的组织结构和功能,从而使系统相对发展或进化。	组织成熟度、能源资源耗散的有效性、进化、演替的有序性(营养结构、生物化学、物种多样性、资源利用、能量循环、能量及养分再生能力、能流数量与质量、种间相互作用格局)

1.2.2 评价指标的选择与筛选

查阅并分析了 1970—2017 年以来国内外关于河流健康、生态河流、河流生态系统相关的 237 篇期刊论文,按照表 1 的指标分类标准进行分类,共获得 3 类 71 个指标。其中整体性指标有 34 个,包括水深、岸坡坡度、输沙量等;稳定性指标有 18 个,包括 BOD、pH、经济鱼类存活状况、大型底栖动物存活状况等;可持续性指标有 19 个,包括 DO、底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数、浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数等。

对 71 个指标进行筛选,筛选原则:1)能全面反映河流生态系统的各种属性;2)指标能及时反映生态系统的各种变化;3)指标间的独立性。筛选的步骤包括频次分析和独立性分析。频次分析是通过频次分析法筛选指标体系,将所有文献中的指标体系进行统计分析,得出每个指标的使用频率,设置合适的筛选频次,将超过该频次的指标作为筛选结果,采用 Excel 2016 进行频次分析;独立性分析是通过设置相关系数 $|r|>0.75$ 为阈值,以 Pearson 相关性分析法筛选出相互独立的指标。采用 SPSS 22 进行 Pearson 相关性分析。

1.2.3 评价指标权重的计算

为了避免评价指标权重过于主观或客观的问题,建立了将最小二乘法主观权重模型和熵系数客观权重模型集成的综合权重求解模型^[27]。

首先定义一个折衷系数 $\beta(1 \geq \beta \geq 0)$,通过最小二乘法主观决策矩阵 F 和熵系数客观决策矩阵 C 构建综合决策矩阵 Q, $Q = \beta F + (1 - \beta)C$,其中

$$q_{ii} = \beta f_{ii} + (1 - \beta)c_{ii}, i \in [1, n]$$
(1)

$$q_{ij} = \beta f_{ij}, i \neq j \text{ 且 } i, j \in [1, n], \quad (2)$$

则综合权重模型可表示为

$$\begin{cases} \min z^2 = w^T Q w, \\ \text{s.t. } e^T w = 1, \\ w \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

求解得

$$w = Q^{-1} e / e^T Q^{-1} e \quad (4)$$

1.2.4 评价标准与评价方法

本文选用赋分法中的四分法进行河流健康评价^[28],四分法评价标准见表2。具体方法是,利用 SPSS 22 软件对各指标数据集的均值、标准差、最小值、最大值及 5%、25%、50%、75%、95% 五个分位数进行统计,对比四分法的评价标准对指标进行赋分。将指标总分五等分,构建出河流健康评价标准,分值从大到小依次分别代表河流生态系统健康等级为自然状态、健康、亚健康、不健康和病态。

表 2 四分法评价标准

Table 2 Quartile evaluation criteria

分位数 Quantile	<5%	5%—24.5%	25%—49.9%	50%—74.9%	>75%
评分 Standard	6—8	4—6	2—4	0—2	0
健康等级 Health lever	自然状态	健康	亚健康	不健康	病态

根据构建的汉江中下游生态系统健康评价指标体系,计算河流生态健康综合指数:

$$H = \sum_{i=1}^n (W_i \times I_i) \quad (5)$$

式中, H 为河流生态健康综合指数, W_i 为评价指标权重指标, I_i 为评价指标标准化值。

2 结果

2.1 评价指标的筛选

依据 1.2 中的相关规定,选择 10% 作为筛选频次,对候选评价指标进行初步筛选,指标中的鱼类生物多样性指数、底栖动物多样性指数等均指的是 Shannon-Wiener 指数,下文均简称为多样性指数,结果如图 2。对于整体性指标,输沙量变化和悬移质变化均反映河流的水力条件,但考虑到汉江中下游水流较平缓,选取输沙量作为水力评价指标。对于稳定性评价指标,大型底栖无脊椎动物存活状况、经济鱼类存活状况、纳污性能指数、珍稀鱼类存活状况都可以用来表征河流生态系统的抵抗力,但大型无脊椎动物存活状况因采样方法或调查方式的不同而差异较大,属于不稳定指标,因此不予考虑;纳污性能指数是一个定义不够明确的指标,难以定量考量,因此不作为评价指标;珍稀特有鱼类存活状况和经济鱼类存活状况均可反映一个区域的干扰程度,考虑到数据的可得性,选择经济鱼类存活状况作为评价指标;富营养化状况、pH、水功能区水质达标率 3 个指标可以反映河流水生态系统的恢复状况,pH 的变化虽可以反映水质的恢复状况,但不够全面,予以剔除。对于可持续性指标,鱼类数据、底栖动物数据、浮游藻类数据均可表征河流的可持续性,但对于大型流域,底栖动物和浮游藻类存在采样较繁琐、分类鉴定复杂、历史数据系列不完整等缺陷,故选择鱼类物种数和鱼类生物多样性指数作为评价指标;自维持活力是水生态系统中生物保持生态系统活跃、物质交换过程的因素,一般考虑生物的生存状态,因而选择 DO 和生态流量保障程度作为评价指标。最终筛选出 13 个初选指标,初选指标见表 3。指标计算方法见表 4。

采用 barbour^[29] 提出的以相关系数 $|r| > 0.75$ 表示 2 个指标具有高度的相关性原则,对余下的 13 个指标进行 Pearson 相关性分析,分析结果如表 5 所示。

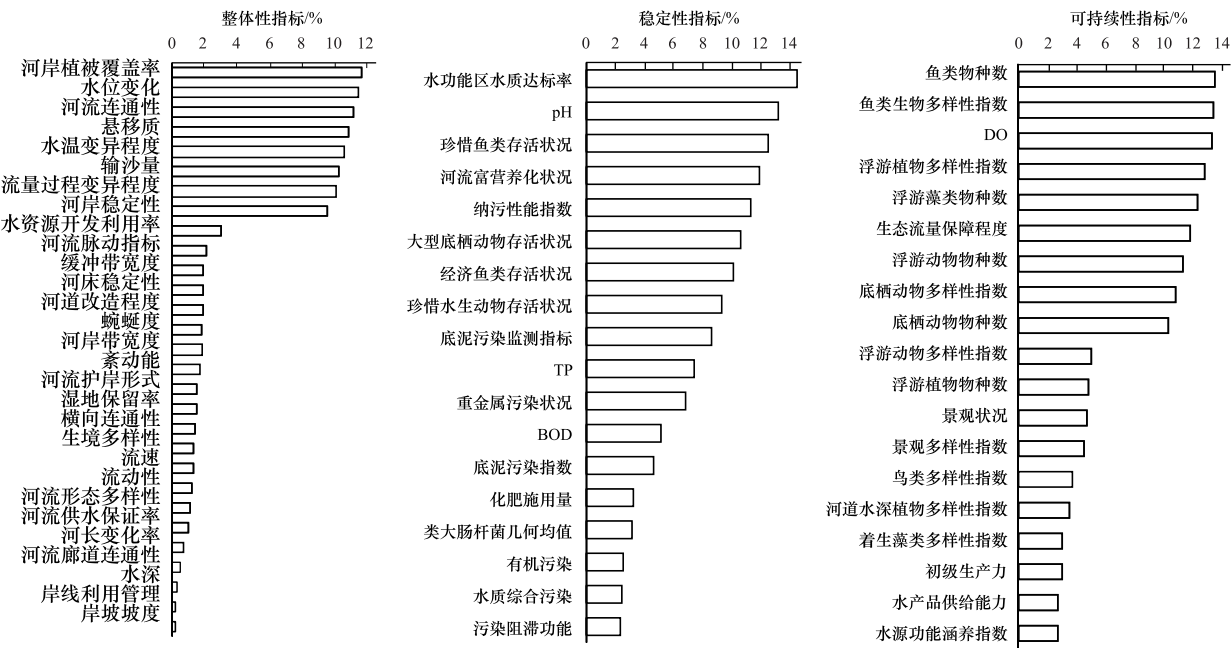


图 2 指标分类及引用频率

Fig.2 Index classification and citation frequency

表 3 汉江中下游生态系统健康评价指标初选体系

Table 3 Primary Ecosystem Health Evaluation Index System of Hanjiang River			
目标层	分类层	要素层	指标层
Destination layer	Classification layer	Element layer	Index layer
汉江中下游水域生态系统健康 The healthy of the middle and lower reaches of Hanjiang river	整体性	水文情势	流量过程变异程度 (L1)
			水位变化 (L2)
			水温变异程度 (L3)
			输沙量变化 (L4)
		地貌空间格局	河岸植被带覆盖率 (L5)
			河流连通性 (L6)
	稳定性	抵抗力	富营养化状况 (L7)
			水功能区水质达标率 (L8)
			经济鱼类存活状况 (L9)
	可持续性	生态整合性	鱼类物种数 (L10)
			溶解氧 (Dissolved Oxygen, DO) (L11)
		自维持活力	生态流量保障程度 (L12)
			鱼类生物多样性指数 (L13)

Pearson 相关性分析结果表明,水位变化与生态流量保障程度、水位变化与鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数、富营养化状况与水功能区水质达标条件的相关系数均大于 0.75,存在较高的相关性(表 3)。生态流量保障程度是河流健康的重要影响因子之一,同时鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数在河流健康评价中应用更广,因此剔除水位变化指标;富营养化状况和水功能区水质达标率均能反映河流的稳定性,但鉴于水体富营养化状况更能揭示河流水华爆发的原因,因此剔除水功能区水质达标条件指标。根据上述分析,汉江中下游生态系统健康评价指标体系见表 6。

表 4 汉江中下游生态系统健康评价指标计算方法

Table 4 Ecosystem Health Evaluation Index calculation method of Hanjiang River

指标 Index	计算方法 Computing method	计算说明 Statement of calculation
流量过程变异程度 Variation degree of flow process	$P = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \frac{Q_i}{Q_b} \times 100\%$	Q_i 为 <i>i</i> 月实测值, Q_b 为 <i>i</i> 月基准值
水位变化 Variation of water level	$H = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} [Z_i - Z_o] / Z_o$	Z_i 为评估年月均值, Z_o 为基准年月均值
水温变异程度 Degree of water temperature variation	$T = T_i - T_b$	T_i 为实测值, T_b 为多年平均值
输沙量变化 Change in sediment transport	$S = \frac{S_i}{S_b} \times 100\%$	S_i 为实测值, S_b 为多年平均值
河岸植被带覆盖程度 Degree of bank vegetation coverage	NDVI 指数法	-
河流连通性 River connectivity	断点或节点闸、坝数量/河流长度	-
富营养化状况 Eutrophication	$TSI_M = 10 \times (2.46 + \ln(A) / \ln(2.5))$	A 为叶绿素 a 的浓度值
水功能区水质达标率 Water qualification rate	$p = \sum S_i - S \times 100\%$	S_i 为达标面积, S 为总面积
经济鱼类存活状况 Economic fish survival	$d = (S - 1) / \ln(N)$	S 为经济鱼类物种数, N 为中物种数
鱼类物种数 Species of fish	图鉴对比	-
溶解氧 DO Dissolved Oxygen	碘量法	-
生态流量保障程度 Degree of eco-flow protection	$D = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (Q_i / Q_j)$	Q_i 为评估年月均值, Q_j 为基准年月均值
鱼类生物多样性 Fish biodiversity	$H = \sum W_i / \ln(W_i)$	Shannon-Wiener 多样性指数法

表 5 相关分析结果

Table 5 Results of Spearman and Pearson correlation analysis

	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13
L1	1												
L2	0.125	1											
L3	0.458	0.022	1										
L4	-0.666	0.355	-0.600	1									
L5	-0.675	-0.152	0.691	0.658	1								
L6	0.567	-0.196	0.621	-0.287	-0.430	1							
L7	-0.022	0.547	0.021	0.456	-0.186	-0.298	1						
L8	-0.301	-0.255	-0.634	-0.172	0.539	-0.291	0.778 **	1					
L9	-0.097	0.501	0.154	0.286	-0.271	-0.267	-0.552	-0.602	1				
L10	0.443	0.174	0.628	-0.386	0.298	-0.098	0.551	0.636	-0.613	1			
L11	0.519	0.089	0.563	0.064	-0.644	0.069	0.620	0.645	-0.700	0.591	1		
L12	-0.433	-0.766 **	-0.411	-0.172	0.300	-0.593	-0.277	0.015	0.520	-0.022	-0.295	1	
L13	0.359	0.783 **	0.312	0.329	-0.312	0.404	0.480	0.367	-0.487	0.088	-0.694	-0.414	1

** $P < 0.01$

2.2 评价指标的权重

利用 Matlab 2014a 计算出最小二乘法和熵系数法权重模型的决策矩阵,依据建立的综合权重模型,设折中系数为 0.5,进行评价指标权重计算,计算结果见表 7。

表 6 汉江中下游生态系统健康评价指标体系

Table 6 Ecosystem Health Evaluation Index System of Hanjiang River				
目标层 Destination layer	分类层 Classification layer	要素层 Element layer	指标层 Index layer	
汉江中下游水域生态系统健康 The healthy of the middle and lower reaches of Hanjiang river	整体性	水文情势	流量过程变异程度	(L1)
		水利条件	水温变异程度	(L3)
		地貌空间格局	输沙量变化	(L4)
			河岸植被带覆盖率	(L5)
	稳定性	抵抗力	河岸稳定性	(L6)
			富营养化状况	(L7)
		恢复力	经济鱼类存活状况	(L9)
	可持续性	生态整合性	鱼类物种数	(L10)
		自维持活力	DO	(L11)
			生态流量保障程度	(L12)
		自组织力	鱼类生物多样性指数	(L13)

表 7 指标权重计算结果

Table 7 The Result of Index Weight											
项目 Project		指标及权重值 Indicators and weight values									
指标编号 Number	L1	L3	L4	L5	L6	L7	L9	L10	L11	L12	L13
权重值 Value	0.098	0.063	0.053	0.070	0.067	0.183	0.117	0.084	0.070	0.105	0.091

2.3 评价方法与评价标准

根据统计的各指标数据集的均值、标准差、最小值、最大值及 5%、25%、50%、75%、95%五个分位数与四分法的评价标准进行对比,得到四分法评价标准表见表 8。

表 8 指标评价标准

Table 8 Index evaluation criteria							
指标 Index	分位数 Quantile		分值标准 Score standard				
	5%	95%	8	6	4	2	0
L1	1.0%	34.5%	<1.0%	1.0%—2.2%	2.2%—5.2%	5.3%—21.2%	>21.3%
L3	10.0%	95.6%	<10.0%	11.0%—30.0%	31.0%—50.0%	51.0%—90.0%	>90.0%
L4	0.17	0.86	>0.71	0.64—0.70	0.36—0.63	0.18—0.36	<0.17
L5	0.122	0.480	>0.470	0.400—0.470	0.301—0.399	0.201—0.300	<0.200
L6	5%	95%	>95%	75%—95%	50%—75%	25%—50%	<25%
L7	58.5%	96.4%	>96.4%	87.8%—96.3%	70.8%—87.7%	62.7%—70.7%	<62.7%
L9	5	57	>57	45—57	30—45	15—30	<15
L10	6.19	7.50	>7.50	7.21—7.50	7.08—7.20	6.63—7.07	<6.62
L11	5%	95%	>95%	75%—95%	50%—75%	25%—50%	<25%
L12	0.15	3.24	>3.24	2.27—3.23	1.97—2.26	1.76—1.96	<1.75
L13	1.22	3.55	>3.55	2.78—3.54	2.43—2.77	2.15—2.42	<2.14

评价指标共有 11 项指标,每项指标最高得 8 分,因此总分为 88 分,将总分五等分构建出河流健康评价标准,汉江中下游生态系统健康评分等级划分见表 9。

表 9 汉江生态系统健康评价等级划分

Table 9 River Health Assessment Evaluation Criterial of Hanjiang River					
健康度 Health degree	自然状态 Nature	健康 Health	亚健康 Sub-health	不健康 Unhealth	病态 Ill
分值 Value	72.1—88.0	54.1—72.0	36.1—54.0	18.1—36.0	0—18.0

2.4 河流生态系统健康评价结果

2.4.1 数据来源

汉江中下游健康评价所需数据主要来源于水利部长江水利委员会的《长江流域及西南诸河水资源公报》(1998—2016 年)、襄阳市环境保护局的《汉江水质月报》(1998—2017 年)、湖北省多年的《重点城市集中式饮用水源地水质月报》(1998—2017 年)、《湖北省水资源公报》(1998—2017 年)、《湖北省环境健康公报》(1998—2017 年)、《湖北省统计年鉴》(1998—2017 年)和沿河的 12 个监测断面的多年站点数据。

2.4.2 评价结果

本文以丹江口大坝蓄水前 1969—1972 年的多年月平均数据为历史状态参照,选择 1998 年(历史参照年)、2012 年(崔家营水库使用后两年)及 2017 年(南水北调中线工程通水后 3 年),3 个典型年份作为评估年,依据上述建立的河流生态系统评价体系对汉江中下游进行河流健康评价。

根据建立的评价体系,汉江中下游河流生态系统健康评价结果如图 3。1998 年汉江中下游 12 个监测断面中,3 个断面处于健康等级,占 25%;5 个断面处于亚健康等级,占 41.7%;4 个断面处于不健康等级,占 33.3%,健康状况呈沿程降低的趋势。2012 年 2 个断面处于健康等级,占 16.7%;4 个断面处于亚健康等级,占 33.3%,6 个断面处于不健康等级,占 50%,不健康断面数相对于 1998 年有所增加,河流健康状况有所下降。2017 年 1 个断面处于健康等级,占 8.3%;3 个断面处于亚健康等级,占 25%;8 个断面处于不健康等级,占 66.7%,不健康等级断面数持续增加,汉江中下游健康状况有进一步恶化的趋势。

为探明汉江中下游健康状况在流域上的表现,利用 ArcGIS 10.2 的反距离插值工具(Inverse Distance Weighted, IDW)对汉江中下游河流生态系统健康指数进行插值计算,得到该结果在汉江中下游的分布状况如图 4 所示。从整个流域来看,汉江中下游河流生态系统健康状况具有明显的空间异质性,健康等级较高的地区主要分布在丹江口及以上地区,河流健康状况沿程降低。1998 年不健康的区域大致分布在潜江及以下地区,2012 年不健康的区域有所增加,接近钟祥地区,至 2017 年,不健康的区域持续增加。

3 讨论

总体来说,汉江中下游流域的健康状况呈现出明显的空间异质性,且健康状况逐年降低。汉江中下游河流健康状况沿程降低,中游健康状况普遍好于下游。由于汉江中游两岸高山耸立、峡谷多,河流河道曲折多变,水流急,水量大^[30],污染物随水流运动,不易聚集,大多向下游传播,或被沿岸植被固定,以致出现河流健康状况沿程降低的状况;另一方面,自丹江口大坝加高后,丹江口水库水域面积达 1022.75 km²,蓄水量达 290.5 亿 m³,为坝后区域提供了丰富的水资源^[12],因此中游区域健康状况相对较好;而下游地区靠近长江入河口,河面宽,河流流速降低^[31],沿河污染物大量聚集加剧了水华爆发的可能性;同时周边城市如武汉、襄阳等近年来发展迅速,加快的城市化进程严重影响河流健康状况;并且随着南水北调、梯级水库的修建运行^[32-33],河流水资源量较少,河流连通性遭到破坏,汉江中下游健康状况逐年降低。

从评价结果可以看出,1998 年汉江中下游的整体健康状况相对于其他年份较好,不健康等级的断面占 33.3%,且多集中于长江入河口的区域,这与 1998 年汉江水华从武汉逆流而上,至襄阳趋于正常的现象相一致^[30]。分析发现出现这种状况可能与长江的顶托作用有关^[31]。丹江口水库建库后对汉江的洪峰起了调蓄作用,改变了汉江和长江的两江的洪峰遭遇情况,两江洪峰错开,加大了长江顶托作用的时间和范围,下游地区流速变缓,河流趋近静态,营养物质淤积,河流呈现不健康状态;近期有学者研究表明,长江干流对支流的“倒灌”作用形成的倒灌异重流^[34-35],亦是引起支流水华的重要因素之一。

2012 年汉江的河流健康状况相较于 1998 年有所下降,襄阳范围已处于亚健康状态,不健康区域已由潜江上移至钟祥附近。分析发现,汉江中游地区健康状况下降的原因主要与丹江口水库加高工程的实施和王甫洲及崔家营水库的建成运行相关^[36]。丹江口水库加高后,水库正常蓄水位从 157 m 提高至 170 m,高速的下泄水流带来气体过饱和的问题^[37],下游鱼类由于气泡病的影响大量死亡,鱼类物种和存活率下降;同时下泄

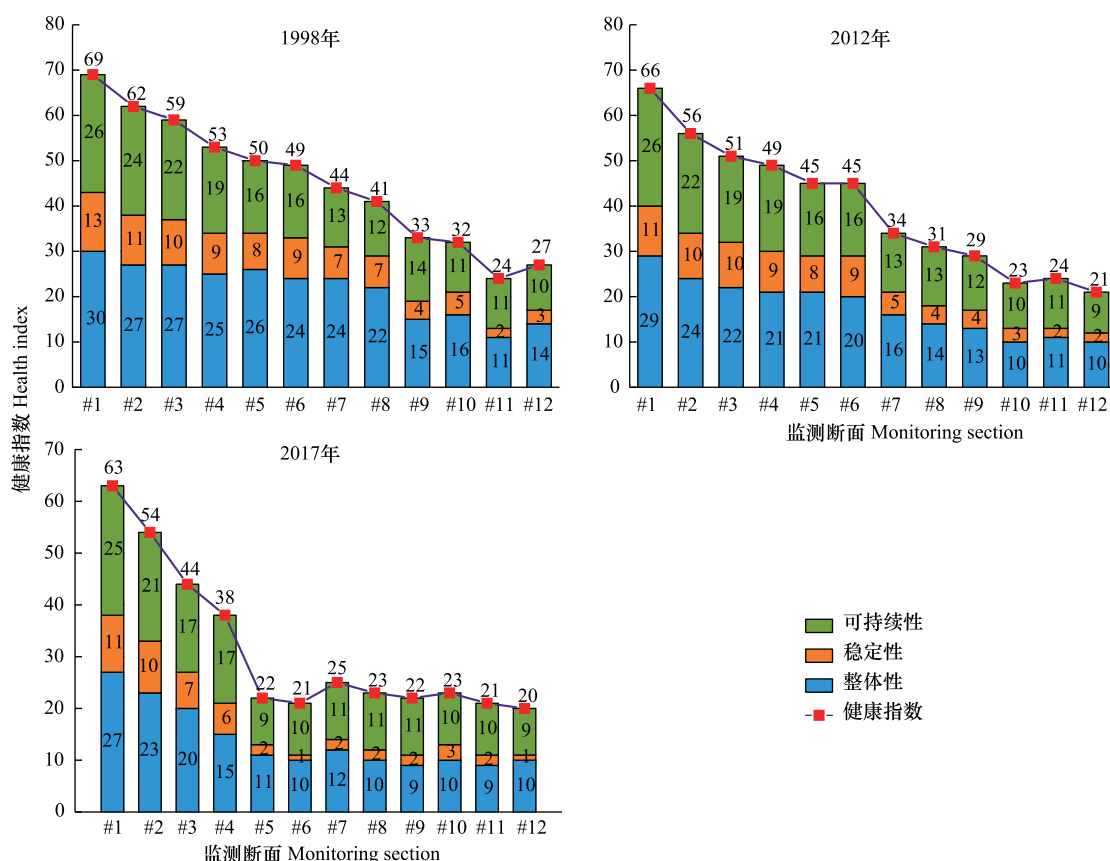


图3 汉江中下游河流生态系统健康评价结果

Fig.3 Ecosystem Health Assessment Results of Hanjiang River

的低温水导致鱼类产卵场向下游水温高的区域迁移,繁殖量减小,破坏了坝下底栖动物、浮游生物的适宜生态环境;另一方面,随着王甫洲和崔家营水电站投入使用,几十公里的回水区将汉江分隔成湖泊型河流,水流变成静态水^[38],大量研究表明,水华的爆发是充足的阳光、充足的营养盐、适宜的水温、缓慢的水流综合作用的结果^[39],梯级水库的运行利于污染物的淤积和藻类的生长^[40-41]。汉江下游不健康区域增进的原因,可能是由于梯级水库建成后,拦蓄了大量的水流,下游水资源量减少,河流健康状况下降;同时沿河流经湖北钟祥市、天门市、武汉市等人口聚集地,是湖北境内经济发展最快的区域。沿河工业废水和生活污水的无序排放、农业过度施肥等,造成大量污染物汇集入河流,水体富营养化严重,水华现象频发。

2017年汉江的河流健康状况相对其他两个评估年进一步下降,不健康区域持续上移,接近襄阳地区,潜江以下区域健康程度持续下降,但下降趋势有所减缓。分析发现,汉江中下游不健康区域上移的现象可能主要与南水北调中线工程和兴隆水库建成运行相关。大量研究表明,引水工程会对流域的地下水位、生物多样性以及生物生境造成影响^[42-43],丹江口水库为南水北调中线水源地和渠首所在地,汉江干流也是南水北调的备用水源地。工程的运行调用了丹江口水库部分蓄水,导致下泄流量减少,下游水环境容量降低,平均水位下降,多年平均流量减少,对灌溉和取水有利的中水历时大幅下降;兴隆水电站正常蓄水位 36.2 m,水库总库容 4.85 亿 m^3 ,回水区段近 70 多公里。兴隆水电站的修建,形成了汉江中下游丹江口-王甫洲-崔家营-兴隆为主的四级水库,河流连通性大幅降低,生态流量无法保障,水生生物栖息地遭到破坏,河流富营养化现象严重。潜江以下区域相对于兴隆坝上区域健康状况下降趋势减缓,可能与引江济汉工程^[44]的实施相关。引江济汉工程自 2010 年开工到 2014 年通水以来,极大缓解了南水北调后汉江中下游水量减少的矛盾,潜江以下河段水资源量得到补充,河流活性恢复,打破了以往的静水状态,破坏了水华爆发的必要条件,河流的自净能力得到有效恢复,减少了 N、P 等营养盐的富集。且近年来的一系列诸如“一河一策”、“长江大保护”等相关政策

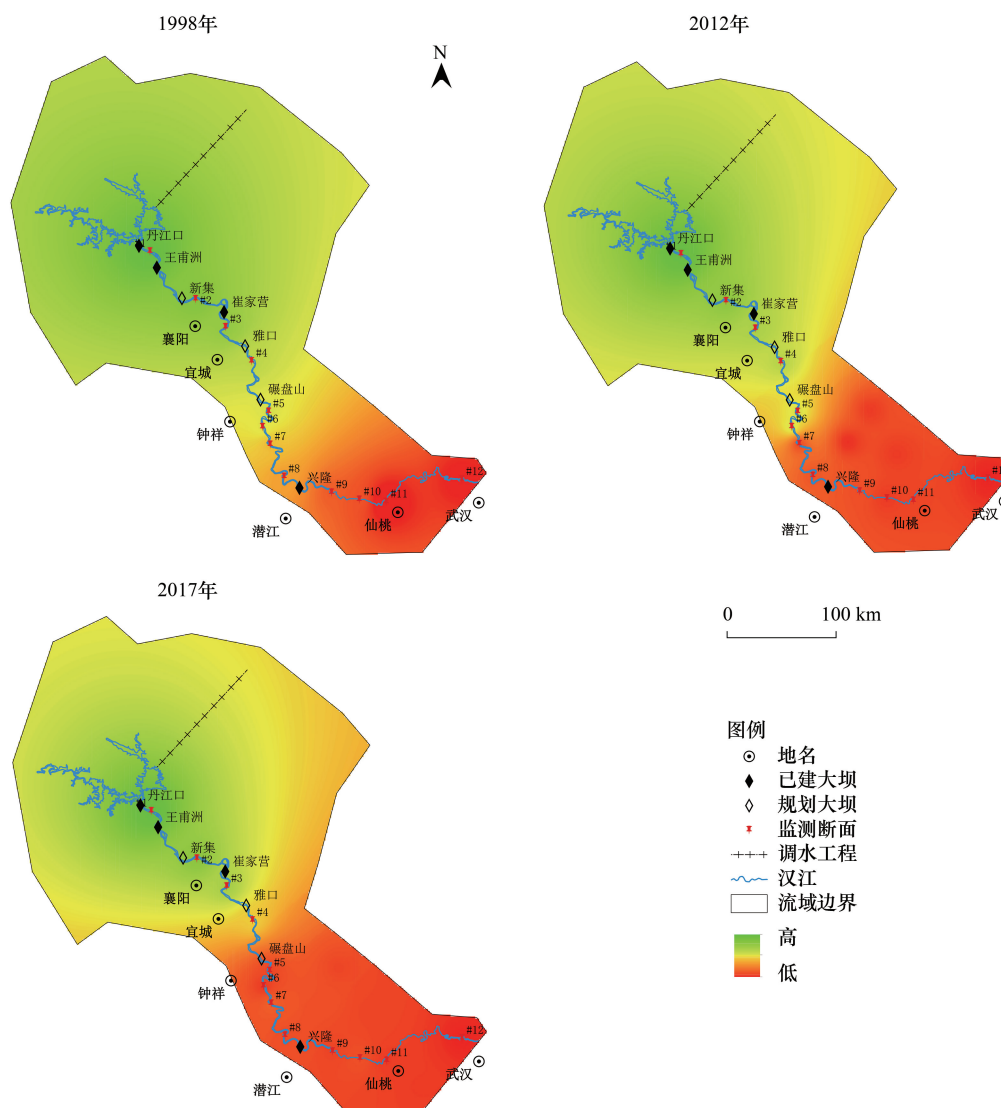


图4 综合健康指数插值结果

Fig.4 Comprehensive health index interpolation results

#1 为黄家岗水文站;#2 为襄阳白家湾;#3 为襄阳余家湖;#4 为钟祥斗转;#5 为钟祥皇庄;#6 为皇庄水文站;#7 为沙洋水文站;#8 为天门罗汉闸;#9 为天门岳口;#10 为潜江泽口;#11 为仙桃水文站;#12 为汉口水文站

和汉江闸站整治等工程对汉江中下游河流生态恢复也起了积极作用。

近年来,国内众多学者针对汉江中下游生态健康开展了一系列研究。李柏山^[30]构建基于综合健康指数法流域生态系统健康评价指标体系,选取 2001—2010 年数据对汉江流域进行健康评价。结果表明汉江生态处于不健康状态,其结果与本研究基本一致。陈燕飞等^[45]采用季节性肯达尔检验法对汉江中下游溶解氧等 5 个水质指标进行检测和预测,结果表明汉江中下游水质呈现沿程下降的趋势,评价结果与本研究基本相当。本研究构建的汉江中下游健康评价指标体系具有分类明确、客观,指标数据易获得等特点,可以快速、准确评价出河流所处的健康状况。水利工程对河流造成的非连续性生态水文情势异变,严重影响了河流的生态健康,仅从水文、水质、水生生物等几个方面开展健康评价已无法满足要求,从河流生态系统的整体性、稳定性和可持续性探讨河流健康,将会是未来研究的发展趋势。

4 结论

(1) 基于生态系统健康内涵构建出包含整体性、稳定性及可持续性 3 个方面的生态系统健康河流评价指标体系,采用频次分析法和相关性分析法对指标进行筛选,并用最小二乘法和熵系数法相结合的综合权重模型确定各评价指标权重。以受筑坝和调水工程影响的汉江中下游为例进行了河流健康评价,评价体系具有一定的可行性。

(2) 江中下游流域的健康状况呈现出明显的空间异质性,且健康状况逐年降低。靠近丹江口水库的区域较好,越往下游越差。不健康区域逐年增进,2017 年已接近襄阳附近。

(3) 随着“长江大保护”、“河湖长制”等政策的提出,引江济汉等治理措施的实施,汉江下游潜江-武汉段的健康状况下降趋势减缓。然而由于梯级水库、调水工程的建设,汉江中下游的健康依旧存在风险。

致谢:李瑞萍教授在文章的修改和润色中给予了极大帮助,谨致谢忱!

参考文献 (References):

- [1] 熊春晖, 张瑞雷, 徐玉萍, 张玮, 陈萍萍, 王丽卿. 应用底栖动物完整性指数评价上海市河流健康. 湖泊科学, 2015, 27(6): 1067-1078.
- [2] 朱卫红, 曹光兰, 李莹, 徐万玲, 史敏, 秦雷. 图们江流域河流生态系统健康评价. 生态学报, 2014, 34(14): 3969-3977.
- [3] Fan H, He D M, Wang H L. Environmental consequences of damming the mainstream Lancang-Mekong River: a review. Earth-Science Reviews, 2015, 146: 77-91.
- [4] Svensson O, Bellamy A S, Van den Brink P J, Tedengren M, Gunnarsson J S. Assessing the ecological impact of banana farms on water quality using aquatic macroinvertebrate community composition. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(14): 13373-13381.
- [5] Wright J F, Sutcliffe D W, Furze M T. Assessing the Biological Quality of Fresh Waters: RIVPACS and Other Techniques. Ambleside: Freshwater Biological Association, 2000.
- [6] Petersen Jr R C. The RCE: a riparian, channel, and environmental inventory for small streams in the agricultural landscape. Freshwater Biology, 1992, 27(2): 295-306.
- [7] Sudaryanti S, Trihadiningrum Y, Hart B T, Davies P E, Humphrey C, Norris R, Simpson J, Thurtell L. Assessment of the biological health of the Brantas River, East Java, Indonesia using the Australian River Assessment System (AUSRIVAS) methodology. Aquatic Ecology, 2001, 35(2): 135-146.
- [8] 杨莲芳, 李佑文, 戚道光, 孙长海, 田立新. 九华河水生昆虫群落结构和水质生物评价. 生态学报, 1992, 12(1): 8-15.
- [9] 邓晓军, 许有鹏, 翟禄新, 刘娅, 李艺. 城市河流健康评价指标体系构建及其应用. 生态学报, 2014, 34(4): 993-1001.
- [10] 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨. 北京北运河河流生态系统健康评价. 环境科学, 2018, 39(6): 2576-2587.
- [11] 李卫明, 艾志强, 刘德富, 周晓明. 基于水电梯级开发的河流生态健康研究. 长江流域资源与环境, 2016, 25(6): 957-964.
- [12] Song X X, Zhuang Y H, Wang X L, Li E H. Combined effect of danjiangkou reservoir and cascade reservoirs on hydrologic regime downstream. Journal of Hydrologic Engineering, 2018, 23(6): 05018008.
- [13] 陈森, 苏晓磊, 党成强, 高婷, 黄慧敏, 董蓉, 陶建平. 三峡水库河流生境评价指标体系构建及应用. 生态学报, 2017, 37(24): 8433-8444.
- [14] 曹宸, 李叙勇. 区县尺度下的河流生态系统健康评价——以北京房山区为例. 生态学报, 2018, 38(12): 4296-4306.
- [15] Karr J R. Defining and assessing ecological integrity: beyond water quality. Environmental Toxicology and Chemistry, 1993, 12(9): 1521-1531.
- [16] Luo Z L, Zuo Q T, Shao Q X. A new framework for assessing river ecosystem health with consideration of human service demand. Science of the Total Environment, 2018, 640-641: 442-453.
- [17] Li T H, Ding Y, Xia W. An integrated method for waterway health assessment: a case in the Jingjiang reach of the Yangtze River, China. Physical Geography, 2018, 39(1): 67-83.
- [18] Kumara A, Sharmab M P, Raic S P. A novel approach for river health assessment of Chambal using fuzzy modeling, India. Desalination and Water Treatment, 2017, 58: 72-79.
- [19] 朱建刚, 余新晓, 甘敬, 张振明. 生态系统健康研究的一些基本问题探讨. 生态学杂志, 2010, 29(1): 98-105.
- [20] Costanza R, Norton B G, Haskell B D. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management. Washington: Island Press, 1992.
- [21] Rapport D J, Böhm G, Buckingham D, Cairns Jr J, Costanza R, Karr J R, De Kruijf H A M, Levins R, McMichael A J, Nielsen N O, Whitford

- W G. Ecosystem health: the concept, the ISEH, and the important tasks ahead. *Ecosystem Health*, 1999, 5(2): 82-90.
- [22] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇, 张晶. 河流生态系统结构功能整体性概念模型. *水科学进展*, 2010, 21(4): 550-559.
- [23] 刘增文, 李雅素. 生态系统稳定性研究的历史与现状. *生态学报*, 1997, 16(2): 58-61.
- [24] Mageau M T, Costanza R, Ulanowicz R E. Quantifying the trends expected in developing ecosystems. *Ecological Modelling*, 1998, 112(1): 1-22.
- [25] 柳新伟, 周厚诚, 李萍, 彭少麟. 生态系统稳定性定义剖析. *生态学报*, 2004, 24(11): 2635-2640.
- [26] 胡聃. 生态系统可持续性的一个测度框架. *应用生态学报*, 1997, 8(2): 213-217.
- [27] 吴坚, 梁昌勇, 李文年. 基于主观与客观集成的属性权重求解方法. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(3): 383-387.
- [28] 王硕, 张建云, 林育青, 陈求稳, 陈凯, 李卫明. 基于大型底栖动物多度量指数的河流多尺度评价. *环境科学研究*, 2018, doi: 10.13198/j.issn.1001-6929.2018.07.16.
- [29] Barbour M T, Gerritsen J, Griffith G E, Frydenborg R, McCarron E, White J S, Bastian M L. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15(2): 185-211.
- [30] 李柏山. 水资源开发利用对汉江流域水生态环境影响及生态系统健康评价研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [31] 瞿月平, 黄勇, 何志高, 吴国君. 长江回水顶托对汉江兴隆至汉川水沙过程的影响. *中国水运*, 2014, (11): 62-64.
- [32] Yan Z H, Yang H H, Dong H K, Ma B N, Sun H W, Pan T, Jiang R R, Zhou R R, Shen J, Liu J C, Lu C H. Occurrence and ecological risk assessment of organic micropollutants in the lower reaches of the Yangtze River, China: a case study of water diversion. *Environmental Pollution*, 2018, 239: 223-232.
- [33] 纪道斌, 龙良红, 徐慧, 刘德富, 宋林旭. 梯级水库建设对水环境的累积影响研究进展. *水利水电科技进展*, 2017, 37(3): 7-14.
- [34] 黄亚男, 纪道斌, 沈君坤, 刘德富, 吴庆, 王雄. 汛期香溪河库湾倒灌异重流变化及其成因分析. *水力发电学报*, 2018, 37(5): 80-92.
- [35] 吕林鹏, 纪道斌, 龙良红, 王雄, 宋林旭. 汛末蓄水期神农溪库湾倒灌异重流特性及其对水华的影响. *水生态学杂志*, 2018, 39(1): 9-15.
- [36] Wang Y K, Zhang N, Wang D, Wu J C, Zhang X. Investigating the impacts of cascade hydropower development on the natural flow regime in the Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 1187-1194.
- [37] Cao L, Li K F, Liang R F, Chen S C, Jiang W, Li R. The tolerance threshold of Chinese sucker to total dissolved gas supersaturation. *Aquaculture Research*, 2016, 47(9): 2804-2813.
- [38] Montanhini Neto R, Nocko H R, Ostrensky A. Carrying capacity and potential environmental impact of fish farming in the cascade reservoirs of the Paranapanema River, Brazil. *Aquaculture Research*, 2017, 48(7): 3433-3449.
- [39] 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 崔玉洁, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明. 降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析. *环境科学*, 2018, 39(2): 774-782.
- [40] 文威, 李涛, 韩璐. 汉江中下游干流水电梯级开发的水环境影响分析. *环境工程技术学报*, 2016, 6(3): 259-265.
- [41] 刘清香, 王婷, 许旭明, 倪晋仁. 汉江中下游硅藻群落时空分布及其影响因素研究. *北京大学学报: 自然科学版*, 2018, 54(4): 848-856.
- [42] Sun H R, Gao B, Gao L, Xu D Y, Sun K. Assessing Cu remobilization in reservoir riparian soils prior to water impoundment using DGT and geochemical fractionation. *Geoderma*, 2018, 327: 55-62.
- [43] Qin Y W, Wen Q, Ma Y Q, Yang C C, Liu Z C. Antibiotics pollution in Gonghu Bay in the period of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(11): 419.
- [44] 王婷婷, 张万顺, 彭虹, 朱齐艳, 张斌. 引江济汉工程对汉江中下游生态环境影响. *水土保持研究*, 2007, 14(4): 40-43.
- [45] 陈燕飞, 张翔. 汉江中下游干流水质变化趋势及持续性分析. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7): 1163-1167.