

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220594

基于 DPSFR 和物元可拓模型的河流生态安全空间分异研究

周 惟¹, 徐 慧¹, 陶潺潺²

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司, 江苏 南京 210029)

摘要: 河流生态安全既与河流自身物理、化学和生物完整性密切相关, 也受其所流经地区的自然、经济、社会条件影响, 基于“驱动力—压力—状态—功能—响应”(DPSFR) 框架和物元可拓模型, 构建了河流生态安全评价体系, 以洪汝河为例, 将其按自然地理、水利工程等空间差异划分为 10 个评价单元, 开展河流生态安全评价和空间分异特征研究。结果表明, 2017 年洪汝河生态安全水平处在临界安全状态, 并存在向不安全等级发展的趋势, 其空间分异特点为上游优于下游, 支流优于干流, 在功能和响应层表现尤为明显。各指标中总磷、人均综合用水量、河流纵向连通度、水质考核断面达标率是影响洪汝河生态安全空间分布差异的主要因素。响应层是与洪汝河生态安全空间分异呈现显著相关的准则层。

关键词: 河流生态安全; DPSFR; 物元可拓法; 洪汝河

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)01-0042-04

1 概况

洪汝河地处伏牛山余脉向黄淮平原交接区域, 为淮河上游主要支流之一, 介于东经 113.4°~115.2°、北纬 32.6°~33.6°之间, 横跨河南省及安徽省, 并在王家坝附近汇入淮河干流。河道主流全长 455 km, 总流域面积为 12 380 km², 其中 11 741 km² 在驻马店市市域范围内, 约占总流域面积的 95%。由于其沿岸流经区大部分为平原, 受不同季风气候交替控制, 极端气候频发, 加之流经区域为我国重要农耕区, 人口稠密、人类活动剧烈, 造成水质污染严重, 生态系统越来越脆弱, 生态安全面临较大威胁。目前, 对河流生态安全的研究已较多, 如彭斌等^[1] 构建了涵盖水文状况、河流形态、水质情况和水生动植物等四要素的适宜广西河流水生态安全的指标评价体系; 康辉平等^[2] 运用分布式 SWAT 水文模型及非恒定二维水动力水质模型, 综合评价了感潮河流的生态安全; NAWAB J 等^[3] 选取水质、沉积物和鱼类三个指标, 并从印度河上中下游取样分析, 评估了印度河的生态风险状况。但在河流生态安全

研究中有关空间分异规律的探讨尚不多见。为此, 本文以洪汝河为例, 分析了河流生态安全系统的运行机制, 基于驱动力—压力—状态—功能—响应(DPSFR) 框架和物元可拓模型, 构建了河流生态安全综合评价体系, 并根据河流及其所在流域的空间分布特性划分河流评价单元, 对河流及其各评价单元的生态安全状态进行评价, 探讨了河流生态安全空间分布特征及其分异规律, 为提升河流生态安全水平的空间差异化策略的制定提供了参考依据。

2 评价单元划分

洪汝河为淮河一级支流, 主要由汝河和小洪河两大支流构成。洪汝河流域面积较大, 河流流经地区自然地理、社会经济及水利工程建设等情况差异较大, 河流生态安全水平的空间差异明显。为客观反映洪汝河生态安全水平的空间差异, 根据流域 DEM 数据、水文水质站点分布及水闸水库大坝等水利工程位置信息, 将洪汝河划分为 10 个不同评价单元(图 1), 分别为汝河干流 4 个、汝河支流 2 个、小洪河干流 4 个。

收稿日期: 2022-03-28, **修回日期:** 2022-04-25

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021043)

作者简介: 周惟(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为流域水生态, E-mail: 451899317@qq.com

通讯作者: 徐慧(1969-), 女, 博士、副教授, 研究方向为水生态及景观规划、水土资源综合利用与保护, E-mail: njxh@hhu.edu.cn

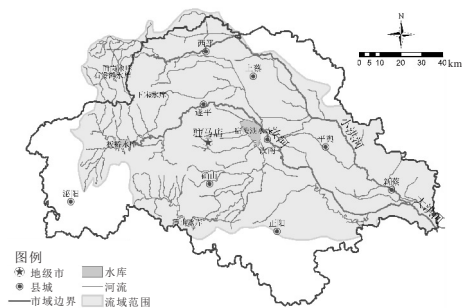


图 1 洪汝河评价单元划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Hongru River evaluation unit division

3 研究方法 with 数据来源

3.1 基于 DPSFR 框架的指标体系构建

河流生态安全系统与其所在流域自然生态、社会经济系统高度耦合,借鉴驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)模型原理,关注生态问题之间的因果关系,从系统、整体的角度分析河流生态系统与社会经济的相互作用。结合人地关系地域系统理论、生态价值理论和协同治理理论,得出河流生态安全系统是由驱动力、压力、状态、功能、响应五个子系统之间不断互馈循环的一个过程。与 DPSIR 模型不同的是,功能子系统以生态价值理论为基础,表现为河流在状态变化下为人

类生产生活提供的服务功能。相较于影响而言,功能子系统可更直接地反映河流在状态变化后的生态系统情况,是状态变化的结果。

基于河流生态安全系统运行的驱动力—压力—状态—功能—响应(DPSFR)过程机制,根据全面系统性、简明科学性、相互独立性、逻辑层次性、可操作性、地域性等指标体系构建原则,建立河流生态安全评价指标体系。

3.2 权重计算

采用层次分析法确定各层级元素指标的权重,并咨询生态环境、社会经济、工程建设等领域相关人员,使得判断结果更为客观准确,符合研究区实际情况。

3.3 评价标准

根据《地表水环境质量标准》^[4]、《气象干旱等级》^[5]、《河南省农业与农村生活用水定额》^[6]、《城市居民生活用水量标准》^[7]、《生态河湖状况评价规范》^[8]和《驻马店水资源公报(2017)》等国家、地方、行业标准和相关报告,参考相关生态安全评价研究成果^[9],将 34 个指标等级和洪汝河生态安全综合评价等级由优向劣逐次划分为安全(I)、较安全(II)、临界安全(III)及不安全(IV),指标分级具体见表 1。

表 1 河流评价指标体系及等级标准
Tab. 1 River evaluation index system and grade standard

准则层	指标层	单位	性质	指标等级			
				I	II	III	IV
驱动力	气象干旱水平 D_1	%	正向	[100, -15]	[-15, -30]	[-30, -45]	[-45, -100]
	人均 GDP D_2	万元/人	正向	[21, 14]	(14, 8.4)	(8.4, 3.5)	(3.5, 0)
	人口密度 D_3	人/km ²	负向	[0, 100]	[100, 500]	[500, 1 000]	[1 000, 2 000]
	城镇居民人均可支配收入 D_4	万元/人	正向	[10, 7.7]	(7.7, 4)	(4, 1.4)	(1.4, 0)
压力	耕地面积占比 D_5	%	负向	[0, 6.7]	[6.7, 13.1]	[13.1, 27.5]	[27.5, 80]
	城市化率 D_6	%	负向	[0, 15]	[15, 50]	[50, 80]	[80, 100]
	万元 GDP 用水量减少率 D_7	%	正向	[100, 25]	(25, 10)	(10, 5)	(5, 0)
	农业用水量百分比 D_8	%	负向	[0, 30]	[30, 50]	[50, 70]	[70, 100]
	地下水埋深变化率 D_9	%	负向	[-100, -30]	[-30, -10]	[-10, 5]	[5, 100]
	人均综合用水量 D_{10}	m ³ /人	负向	[0, 100]	[100, 150]	[150, 300]	[300, 500]
状态	污水处理率 D_{11}	%	正向	[100, 95]	(95, 85)	(85, 50)	(50, 0)
	农业化肥施用水平 D_{12}	kg/hm ²	负向	[0, 255]	[255, 364]	[364, 504]	[504, 1 000]
	农药施用水平 D_{13}	kg/hm ²	负向	[0, 0.25]	[0.25, 1.64]	[1.64, 6.42]	[6.42, 20]
	农膜使用水平 D_{14}	kg/hm ²	负向	[0, 5]	[5, 10]	[10, 20]	[20, 50]
	PM ₁₀ 浓度 D_{15}	μg/m ³	负向	[0, 50]	[50, 100]	[100, 150]	[150, 500]
	生态用水满足度 D_{16}	%	正向	[100, 40]	(40, 30)	(30, 10)	(10, 0)
	化学需氧量 D_{17}	mg/L	负向	[0, 15]	[15, 20]	[20, 30]	[30, 100]
	氨氮 D_{18}	mg/L	负向	[0, 0.5]	[0.5, 1]	[1, 1.5]	[1.5, 20]
	总磷 D_{19}	mg/L	负向	[0, 0.1]	[0.1, 0.2]	[0.2, 0.3]	[0.3, 5]
	重金属(Cr ⁶⁺) D_{20}	mg/L	负向	[0, 0.01]	[0.01, 0.05]	[0.05, 0.1]	[0.1, 1]
功能	河流蜿蜒度 D_{21}	%	正向	[1.4, 1.3]	(1.8, 1.4)	(1.8, 1.4)	[1.4, 1.1]
	河流纵向连通度 D_{22}	%	正向	[100, 70]	(70, 50)	(50, 30)	(30, 0)
	水生生物多样性指数 D_{23}	%	正向	[4, 3]	(3, 2)	(2, 1)	(1, 0)
	水产品产值水平 D_{24}	千元/hm ²	正向	[150, 75]	(75, 52.5)	(52.5, 15)	(15, 0)
	地表水供水占比 D_{25}	%	正向	[100, 80]	(80, 50)	(50, 30)	(30, 0)
	水景区岸线占比 D_{26}	%	负向	[0, 5]	[5, 10]	[10, 20]	[20, 100]
	水土流失面积占比 D_{27}	%	负向	[0, 10]	[10, 30]	[30, 50]	[50, 100]
响应	森林覆盖率 D_{28}	%	正向	[100, 50]	(50, 30)	(30, 20)	(20, 0)
	水域面积率 D_{29}	%	正向	[30, 10]	(10, 7)	(7, 2.5)	(2.5, 0)
	节能环保投入水平 D_{30}	%	正向	[5, 3]	(3, 2)	(2, 1)	(1, 0)
	水事务投入水平 D_{31}	%	负向	[0, 7]	[7, 15]	[15, 20]	[20, 70]
	第三产业比重 D_{32}	%	正向	[100, 70]	(70, 60)	(60, 40)	(40, 0)
	水质考核断面达标率 D_{33}	%	正向	[100, 80]	(80, 70)	(70, 50)	(50, 0)
	水质监测断面密度 D_{34}	个/km ²	正向	[150, 25]	(25, 10)	(10, 1)	(1, 0)

3.4 物元可拓评价方法

由于河流生态安全评价系统影响因素众多,评价指标体系是多层次的复合体系,评价过程复杂,因此选用物元可拓模型^[10]作为河流生态安全评价方法。某一点 X_0 到 $X = (a, b)$ 的距离 $\rho(X, X_0)$ 为:

$$\rho(X, X_0) = |X - (b + a)/2| - (b - a)/2 \quad (1)$$

式中, b, a 分别为区间最大、最小值。

单一指标关联度 $K_j(v_i)$ 计算公式为:

$$K_j(v_i) = \begin{cases} -\rho_{ji}(v_i, V_{ji})/V_{ji} & v_i \in V_{ji} \\ \frac{\rho_{ji}(v_i, V_{ji})}{\rho_{ji}(v_i, V_{pi}) - \rho_{ji}(v_i, V_{ji})} & v_i \notin V_{ji} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\rho_{ji}(v_i, V_{ji})$ 为 v_i 到 V_j 的距离; $\rho_{ji}(v_i, V_{pi})$ 为点 v_i 到 V_{pi} 的距离; V_{ji} 为指标值所属区间的区间距离。

综合关联度 $K_{jv}(N_v)$ 计算公式为:

$$K_{jv}(N_v) = \sum_{i=1}^n \omega_i K_j(V_i) \quad (3)$$

式中, ω_i 为指标权重; $K_{jv}(N_v)$ 为多指标综合关联度。

若 $K_{jv} = \max(K_{jv}(N_v))$, 则待评物元 N_v 属于评价等级 j 。

3.5 数据来源

评价指标各数据的主要来源见表 2, 少部分非驻马店市流域的评价指标数据采用其所在行政区的数据。

表 2 洪汝河生态安全评价体系指标数据来源

Tab. 2 Data sources of the indicators of the Hongru River ecological security evaluation system

指标	数据来源
$D_1, D_7, D_8, D_9, D_{10}, D_{25}$	驻马店水资源公报(2017)
D_5, D_{31}	驻马店市各县(区)统计公报(2018)
D_{28}, D_{31}	驻马店年鉴(2018)
D_{27}	驻马店市水土保持规划(2016~2030)
D_{34}	驻马店水资源保护规划
D_1, D_7, D_8, D_{25}	河南省水资源公报(2017)
D_{12}, D_{13}, D_{14}	河南省调查年鉴(2017)
$D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_{30}, D_{32}$	河南省统计年鉴(2018)
D_{23}	各县(区)殖水域滩涂规划
$D_{11}, D_{16}, D_{17}, D_{18}, D_{19}, D_{33}, D_{20}$	驻马店市水文局数据
$D_{15}, D_{17}, D_{18}, D_{19}, D_{20}$	驻马店市各区县生态环境网站
$D_{21}, D_{22}, D_{26}, D_{29}$	谷歌地图
D_{24}	驻马店市情网

4 结果分析

4.1 整体评价

表 3 为洪汝河生态安全评价等级。由表 3 可

表 3 洪汝河生态安全评价等级

Tab. 3 Hongru River ecological security evaluation scale

项目	关联度				评价趋势	
	I	II	III	IV	等级	等级
驱动力 D	-0.007 5	-0.036 7	-0.001 7	-0.022 7	III	IV
压力 P	-0.022 5	-0.020 2	-0.012 5	-0.014 9	III	IV
状态 S	-0.020 4	-0.031 0	-0.060 7	-0.018 4	IV	
功能 F	-0.026 6	-0.074 4	0.043 2	-0.117 8	III	II
响应 R	-0.048 9	-0.075 0	-0.034 1	-0.013 7	IV	
综合关联度	-0.125 9	-0.237 4	-0.065 8	-0.187 6	III	IV

知,2017 年洪汝河整体生态安全评价等级为 III 级,处在临界安全等级,有向不安全等级发展的趋势。各准则层中,驱动力、压力和功能层的最大关联度值均属临界安全等级,状态和响应层的最大关联度值处于不安全等级。功能层生态安全状态最好,有向较安全等级改善的趋势,尤其水域面积率、地表水供水占比 2 个指标表现较好。状态和响应层生态安全问题最严重,其中水质考核断面达标率、节能环保投入水平、总磷已处于不安全等级,需得到相关部门的重视并采取相应措施。

4.2 空间差异分析

利用 ArcGIS 将各评价单元综合及准则层的生态安全水平在地图上可视化得到图 2、3。由图 2、3 可知,洪汝河生态安全水平整体呈现出从上游到下游逐渐变差、支流优于干流的分布特点, I、II、III、IV 级河段的长度分别占洪汝河总长度的 23.72%、23.57%、19.35%、33.36%。从各准则层角度出发,驱动力层评价等级一致,洪汝河均为临界安全状态;压力层大部分处于临界安全状态,支流臻头河安全等级为 I,练江河因流经市辖区安全等级 IV;状态层生态安全表现较差,73.4% 的洪汝河处于或低于临界安全状态;功能层洪汝河上游和支流均处于较安全状态;响应层上游安全等级优于较安全状态,呈现上游优于下游的特征。综上所述,功能和响应层与河流整体生态安全水平空间分布特点最为一致,驱动力层空间分布无差异性,压力层和状态层空间分布较为随机。就各评价单元而言,汝河干流 4 个评价单元中,两个上游单元处于安全等级,其中响应层表现最佳,汝河中下游响应层生态安全问题最为突出,该河段节能环保投入水平低。汝河 2 个支流单元为较安全等级,功能层最安全,其中地表供水占比大,森林覆盖率高,水土流失面积比例小。小洪河干流仅杨庄一五沟营段为较安全等级,小洪河中下游响应和功能层生态安全问题较重,水质达标率低,节能环保投入水平不够。

4.3 空间差异相关性分析

剔除评价等级空间分布无差异的指标,其余

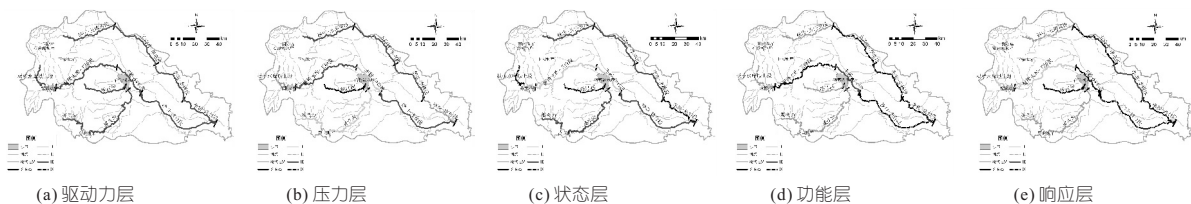


图 2 洪汝河生态安全准则层各单元评价结果空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of the evaluation results of each unit of the Hongru River ecological safety criterion layer

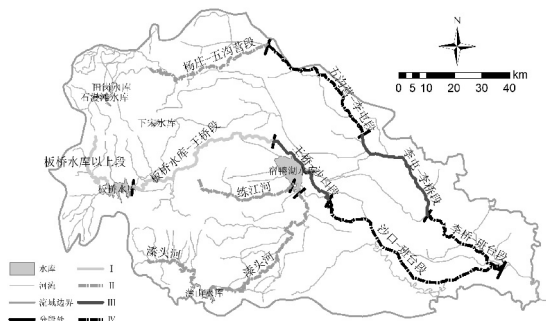


图 3 洪汝河生态安全评价结果空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution map of ecological security assessment results of Hongru River

指标与洪汝河综合生态安全评价等级分布情况进行 SPSS 双变量相关性分析,结果见图 4。由图 4

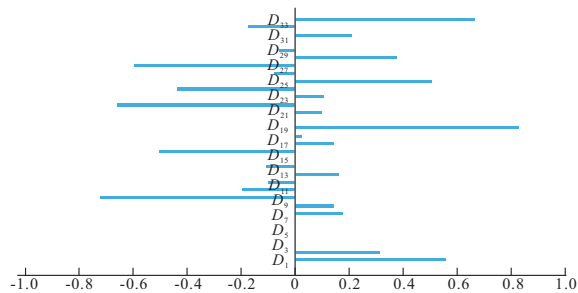


图 4 各指标与综合关联度的皮尔逊相关性系数

Fig. 4 Pearson correlation coefficient between each index and comprehensive correlation degree

可知,人均综合用水量、水质考核断面达标率、河流纵向连通度与综合评价等级相关性呈现 0.05 级别,相关系数分别为 -0.718、0.662、-0.625;总磷与综合评价等级相关性呈现 0.01 级别,相关系数为 0.822。说明洪汝河生态安全评价等级的空间分异与这四个指标评价等级的空间分布密切相关。响应层与综合评价等级相关性呈现 0.01 级别,相关系数为 0.853;功能和状态层的相关系数分别为 0.609、0.138;而压力和驱动力层与综合评价等级不存在明显相关性。可见,响应层与洪汝河生态安全评价等级的空间分异相关性,影响程度深,这与空间差异特征分析结论一致。应当充分利用空间分异规律,以响应层和指标为突破口,针对生态安全问题严重的评价单元进行优先修复,缩小河道生态空间差异,高效提升整体生态安全水平。

5 结论

a. 本文以洪汝河为例,构建了基于改进的 DPSFR 的河流生态安全评价体系,筛选出影响其空间分异的因子,为河流空间差异化保护与治理策略的制定提供理论支撑。

b. 2017 年洪汝河整体生态安全水平处在临界安全等级,有向不安全等级发展的趋势,整体分布特征为从上游到下游逐渐变差,支流优于干流。

参考文献:

- [1] 彭斌,顾森,赵晓晨,等. 广西河流水生态安全评价指标体系探究[J]. 中国水利, 2016(3): 46-49.
- [2] 康辉平,李孝成,陈兴伟,等. 福建省河流生态安全评价方法及其应用[J]. 水利科技, 2019(3): 1-6.
- [3] NAWAB J, KHAN S, WANG X P. Ecological and health risk assessment of potentially toxic elements in the major rivers of Pakistan: General population vs. fishermen[J]. Chemosphere, 2018, 202: 154-164.
- [4] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准:GB3838-2002[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 气象干旱等级:GB/T20481-2017[S]. 北京:中国标准质检出版社,2018.
- [6] 河南省市场监督管理局. 河南省农业与农村生活用水定额:DB41-T958-2020[S]. 郑州:黄河水利出版社,2020.
- [7] 中华人民共和国建设部. 城市居民生活用水量标准:GB/T50331-2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [8] 江苏省市场监督管理局. 生态河湖状况评价规范:DB32/T3674-2019[S]. 北京:中国标准质检出版社,2020.
- [9] 王洋,方创琳,王振波. 中国县域城镇化水平的综合评价及类型区划分[J]. 地理研究, 2012, 31(7): 1305-1316.
- [10] 甘蓉,宣昊,刘国东,等. 基于博弈论综合权重的物元可拓模型在地下水质量评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(1): 39-42, 90.

用于维持河道稳定、水生或两栖生物栖息环境、相关物质与能量传输的顺畅等方面,有利于维护和促进东江河流系统的健康;社会发展程度的提高一方面表明经济发展水平的提高,另一方面也能够体现出人们对东江认知能力的提高,从而体现了人们维护和促进东江河流系统健康意愿和能力的提高;河流管理水平的提高有利于科学制定相关政策与制度、引导公众积极参与东江河流系统健康保护、及时制止损害东江河流系统健康的行为或措施等,从而进一步促进和改善东江河流系统的健康状况。查证结果还显示,污水排放(第二、三产业污水排放、城镇生活污染排放)、流域内非生态用水(工农业用水、生活用水)、流域外调水、非生态友好型水利工程(鱼类洄游通道未设置率、河岸侵占率、河岸硬化化比)对东江河流系统健康具有负面影响。

5 结论

a. 本文在分析影响东江河流系统健康警源

Analysis and Verification of Alert Source for Early Warning of Dongjiang River System Health

FANG Chen-zhuo¹, LIN Zhi-wei², LUO Ci-lan², WU Long-hua¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Dongjiang River Basin Administration of Guangdong Province, Huizhou 516003, China)

Abstract: As a key point in early-warning of river system health, alert source verification is an important basis for eliminating hidden trouble and maintaining the river system health. Based on the analysis of the alarm source factors affecting the health status of Dongjiang river system, the alarm source index system was constructed, and the alert sources verification model of Dongjiang river system health was established by the partial least squares regression (PLSR) method. This model was used to verify main alarm source factors for affecting the health status of the Dongjiang river system (2015-2019), and the influence trend and degree of different alarm source factor on the health status of Dongjiang river system were analyzed. The results show that annual rainfall is the most direct and significant positive effect factor on the health status of Dongjiang River system. In addition, factors such as ecological water use, social development and river management level in this basin also play a promoting role. However, the flood disaster, sewage discharge, water for production and living, non-eco-friendly water conservancy facilities in this basin, and inter-basin water transfer have obvious negative effects on the health of Dongjiang river system.

Key words: river system health; early-warning; alert source verification; partial least squares regression; Dongjiang River

(上接第 45 页)

Research on Spatial Differentiation of River Ecological Security Based on DPSFR and Matter-element Extension Model

ZHOU Wei¹, XU Hui¹, TAO Chan-chan²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Water Conservancy Engineering Technology Consulting, Nanjing 210029, China)

Abstract: The ecological security of rivers is not only closely related to the physical, chemical and biological integrity of the river itself, but also affected by the natural, economic and social conditions of the regions through which it flows. Based on the "driving force-pressur-state-function-response" (DPSFR) framework and matter-element extension model, a river ecological security evaluation system was constructed. Taking Hongru River as an example, it was divided into 10 evaluation units according to the spatial differences such as physical geography and water conservancy projects, and the river ecological security evaluation and spatial differentiation characteristics research were carried out. The results show that the ecological safety level of the Hongru River in 2017 was in a critical safety state, and there was a tendency to develop to an unsafe level. Its spatial differentiation characteristics were that the upstream was better than the downstream, and the tributaries were better than the mainstream, especially in the functional and response layers. Among the indicators, total phosphorus, per capita comprehensive water consumption, river longitudinal connectivity, and water quality assessment cross-section compliance rate are the main factors affecting the spatial distribution of ecological security differences in Hongru River. The response is a criterion layer that is significantly related to the spatial differentiation of the ecological security of the Hongru River.

Key words: river ecological security; DPSFR; matter element extension; Hongru River

因素的基础上,建立了东江河流系统健康的警源指标体系,利用偏最小二乘回归法构建了东江河流系统健康警源查证模型,并利用该警源查证模型对东江河流系统 2015~2019 年的健康状况进行查证分析。

b. 查证结果表明,年降雨量对东江河流系统健康的正面促进作用最为直接和显著;另外,生态用水、流域内社会发展状况和河流管理水平等因素也发挥了正面促进作用;而洪水灾害、流域内的污水排放、生产生活用水、流域外调水及非生态友好型水利工程设施对东江河流系统的健康有明显的负面影响。

参考文献:

- [1] 吴龙华,杨校礼. 广东省东江河流系统健康诊断体系构建[J]. 环境保护前沿, 2014, 4: 28-33.
- [2] 鲁庆华,任康乐,周凤玺. 基于偏最小二乘法实现非线性回归分析[J]. 甘肃科技, 2005(11): 146-148.
- [3] 罗批,郭继昌,李镡,等. 基于偏最小二乘回归建模的探讨[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2002(6): 783-786.