

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdcqk.2020.0145

杨希,陈兴伟,方艺辉,等.基于分段-综合评价法的闽江下游河道健康评价[J].南水北调与水利科技,2019,17(6):148-155.  
YANG X, CHEN X W, FANG Y H, et al. Health evaluation of the Minjiang River lower reaches based on the segmented-comprehensive evaluation method[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 148-155. (in Chinese)

## 基于分段-综合评价法的闽江下游河道健康评价

杨希<sup>1</sup>, 陈兴伟<sup>1,2,3</sup>, 方艺辉<sup>1</sup>, 康辉平<sup>4</sup>, 李孝成<sup>4</sup>, 邓海军<sup>1,2,3</sup>, 林炳青<sup>1</sup>

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福州 350007;  
3. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 4. 福建省水利水电科学研究院, 福州 350001)

**摘要:**为进一步深化入海河流感潮河道的健康评价研究,根据感潮河道水文、水环境及水生态特点,建立包括河流形态、水文、水质、咸潮入侵、生物和社会服务功能等6方面12个具体评价指标的感潮河道健康评价指标体系,提出河道分段与全河道综合的解决长河道自然特征与社会功能空间差异问题的评价方法,并以闽江下游河道为例进行健康评价。闽江下游河道可以分为水口坝下一分流口段、分流口—洪山桥(北港)段、洪山桥—汇流口(北港)段、分流口—汇流口(南港)和汇流口—闽江口段等5个河段,除了分流口—汇流口(南港)河段健康状态为亚健康,其他河段为一般,闽江下游河道总体健康状态为一般。基于分段-综合河流健康评价模型,获取河流健康等级标准及各河段健康状况,采用博弈论优化指标的组合权重,可降低因主观因素对评价结果带来的影响,值得进一步推广应用。

**关键词:**感潮河道健康评价; 指标体系; 评价模型; 博弈论; 闽江下游

中图分类号: X826 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Health evaluation of the Minjiang River lower reaches based on the segmented-comprehensive evaluation method

YANG Xi<sup>1</sup>, CHEN Xingwei<sup>1,2,3</sup>, FANG Yihui<sup>1</sup>, KANG Huiping<sup>4</sup>, LI Xiaocheng<sup>4</sup>, DENG Haijun<sup>1,2,3</sup>, LIN Bingqin<sup>1</sup>

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Fujian Province Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fuzhou 350007, China;  
3. State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China;  
4. Fujian Institute of Water Resources and Hydropower, Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** In order to study the health evaluation of the tidal river, 12 specific aspects including river morphology, hydrology, water quality, saltwater invasion, biological and social service functions were constructed based on the hydrological, water environment and water ecological characteristics of tidal channel. A segmented-comprehensive evaluation method was proposed to solve the special difference between the natural characteristics and social function of the long river channel. For health evaluation, the lower reaches of the Minjiang River were taken as an example in this study. The lower reaches of the Minjiang River can be divided into 5 segments, i. e., the dam of Shuikou power station-Bifurcated segment, Bifurcated-Hongshan Bridge (North channel) segment, Hongshan Bridge-Confluence (North channel segment Bifurcated-Confluence (South channel) segment and Confluence-Mingjiang River mouth segment, respectively. The results revealed that health state of the Bifurcated-Confluence (South channel) segment was categorized in sub-health, while the other 4 segments channels and the overall health status of the

收稿日期: 2019-05-09 修回日期: 2019-08-30 网络出版时间: 2019-09-03

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190903.1018.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41877167)

作者简介: 杨希(1995—),男,湖南怀化人,主要从事水文水资源方面研究。E-mail: 2483927065@qq.com

通信作者: 陈兴伟(1963—),男,福建福鼎人,教授,博士,主要从事流域水沙污染物过程与防灾减灾研究。E-mail: cxwchen215@fjnu.edu.com

lower reaches of the Minjiang River were in general grade. Based on the segmented-integrated river health evaluation model, the grade criteria of river health and the health status of each river segment can be obtained. The use of game theory to optimize the combined weights of indicators can reduce the subjective impact of weight on the evaluation results, which is worthy of further promotion and application.

**Key words:** tidal reach health assessment; index system; evaluation model; game theory; lower reaches of Minjiang River

河流作为典型的复杂淡水生态系统,具有维持地球表层系统的物质循环,提供生物栖息地、泄洪、航运、景观等多种功能,并担负着重要的生态及社会经济职能<sup>[1]</sup>。由于气候变化与人类活动的双重影响,河流水污染和水生态退化等问题已严重威胁到区域水安全<sup>[2]</sup>。因此,基于河流特性,综合考虑河流服务功能,遵循科学评价原则进行河流健康评价工作,对于流域水资源利用和管理具有重要意义<sup>[3]</sup>。

我国的河流下游河道一般是人口密集、经济发达地带,通常受到潮汐影响,具有河流与河口的生态特征和服务功能。目前国外对感潮河口段健康评价主要从水生生态系统角度出发<sup>[4]</sup>,很少考虑到人类活动对其影响以及河口对人类的服务功能。国内在漳卫新河口,长江口和珠江口等河口开展了生态系统健康评价工作,牛明香等对这些工作进行了综述<sup>[5]</sup>,认为河口生态系统健康评价研究还需要在概念、影响机理、空间尺度选取以及新技术新方法的应用等方面进一步加强。李可任等基于和谐论的黄河下游河段健康评价,应用了花园口、高村、利津三个监测断面水文站实测数据资料,在一定程度上反映了黄河下游河段健康的空间差异<sup>[6]</sup>,但对河口的潮汐影响考虑不够。从不同河段的空间差异来看,包括河口在内的河流下游河道,通常长度比较长,且受径流和海洋潮汐的双重作用,导致水文、水环境和水生态指标在不同的河段存在较大的差异,在水文观测站点不足的情况下如何在河流下游河道健康评价中考虑这种空间差异性,值得进一步研究。

河流健康评价广为应用的方法是指示物种法和指标体系法<sup>[8]</sup>。指示物种法有澳大利亚的河流评价计划和欧盟的水框架导则<sup>[9-10]</sup>等。但指示物种法存在许多缺陷,如不同的研究对象及监测参数会导致不同的评价结果,无法综合评价河流健康状况问题。指标体系法综合了多项指标,在河流健康评价中应用日趋广泛<sup>[8]</sup>。指标体系法即根据河流的自身特征和服务功能构建评价指标体系,通过数学模型确定河流健康等级<sup>[11]</sup>。常用的

数学方法包括层次分析法<sup>[12]</sup>、熵值法<sup>[13]</sup>、灰色关联法<sup>[14]</sup>、模糊综合评价法<sup>[15]</sup>等,这些方法未考虑各单项指标之间具有不相容性的问题,且评价等级界限具有模糊性,不过潘峰等<sup>[16]</sup>应用的模糊物元模型认为比较好地解决了这些不足。采用模糊物元模型将河流健康评价指标体系中的多个指标转化为综合指标。通常情况下,模糊物元模型中使用的权重是由主观赋权像层次分析法得到,如果将模糊物元模型与博弈论<sup>[12]</sup>相结合,通过博弈论组合主客观赋权后得到权重,可有效降低主观性,使得综合评价结果更合理。

因此,为进一步深化包括河口在内的感潮河道健康评价研究,以闽江下游河道为研究区,根据感潮河道水文、水环境和水生态特点,建立感潮河道健康评价指标体系,提出河道分段与全河道综合的解决长河道自然特征与社会功能空间差异问题的评价方法,并尝试应用集成博弈论和模糊物元的组合模型,进行健康评价。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

闽江流域(116°23′~119°35′E, 25°23′~28°16′N)地处我国东南部,发源于闽赣交界的武夷山脉,全长541 km,流域面积60 992 km<sup>2</sup>,是福建省最大的河流。闽江自水口坝下为闽江河口(或称闽江下游),长约117 km。水口坝下至汤院全长22 km,为闽清段;汤院至淮安河长36 km,为闽侯段;自淮安起,闽江被福州的南台岛分为南北两支(南港和北港),北港穿越福州市中心区,经文山里、洪山桥、闽江大桥至罗星塔,长约34 km,河道相对窄深,最窄处枯水水面宽130 km;南港绕过南台岛南面在罗星塔与北港相汇,长约76 km,在中段有大樟溪汇入,滩槽多变,大小沙洲多达20~30处。南北港在马尾罗星塔汇合后,转向东北进入通海河段,长约12 km。闽江在亭江又被琅岐岛分为南北两支,南支为梅花水道,长约18 km,经长乐市梅花镇入海;北支经连江县琯头镇长门流入东海,长约13 km,见图1。



图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

由于河道采砂和水口大坝的拦沙,闽江下游河道下切严重,潮区界已上溯到水口大坝坝下,全河段属于感潮河道。

### 1.2 数据来源

水文、水质数据主要依据水文、环保部门监测站网的监测数据。生物及社会服务功能数据参考已有的研究成果<sup>[17-18]</sup>。

### 1.3 评价指标体系及等级划分

根据闽江下游河道的特点,从河流形态<sup>[19-20]</sup>、水文<sup>[21]</sup>、水质<sup>[22]</sup>、咸潮入侵<sup>[23]</sup>、生物<sup>[24-25]</sup>、社会服务功能<sup>[26]</sup> 6 个不同的方面反映河流健康状况,并选择 12 个指标构建闽江下游河道健康评价指标体系。本文的评价标准以国家标准<sup>[27]</sup>、前人的研究<sup>[28-30]</sup>和研究区域实际情况所确定。各指标及其评价标准

见表 1。

### 1.4 基于分段-综合的河流健康评价模型

如前所述,由于长河道中水文、水环境和水生态的空间差异,基于单一水文站点的河流健康评价不尽合理。因此提出基于分段-综合评价模型。其要点是,首先,基于河道的特点进行分段。其次建立全河道二维非恒定水动力水质模型,通过模型模拟,辅助河道分段,并为分段的部分评价指标提供赋值。最后,建立集成博弈论和模糊物元法的组合模型,进行分段和全河道的综合健康评价。

#### 1.4.1 二维非恒定水动力水质模拟模型

二维非恒定水动力水质模型(表 2)是描述河道内水污染物随空间变化规律的数学模型,目前已在不同地区的感潮河段得到广泛应用。二维水动力

表 1 闽江下游河道健康评价指标及标准

Tab. 1 Health assessment indicators and standards of lower reaches of Minjiang River

指标层	评价标准				
	健康	亚健康	一般	亚病态	病态
河床稳定性(C <sub>1</sub> )	0.9~1.0	0.8~0.9	0.7~0.8	0.5~0.7	0~0.5
纵向比降(C <sub>2</sub> )	0~0.01	0.01~0.02	0.02~0.03	0.03~0.04	0.04~0.06
弯曲程度(C <sub>3</sub> )	2.0~3.0	1.5~2.0	1.3~1.5	1.0~1.3	0~1.0
河口径流指标(C <sub>4</sub> )	0.8~1.0	0.5~0.8	0.4~0.5	0.3~0.4	0~0.3
化学需氧量(C <sub>5</sub> )	0~2	2~4	4~6	6~10	10~15
氨氮(C <sub>6</sub> )	0~0.15	0.15~0.50	0.50~1.00	1.00~1.50	1.50~2.00
总磷(C <sub>7</sub> )	0~0.02	0.02~0.10	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4
溶解氧(C <sub>8</sub> )	7.5~10.0	6.0~7.5	5.0~6.0	3~5	2.0~3.0
盐度入侵强度/%(C <sub>9</sub> )	80~100	60~80	40~60	20~40	0~20
叶绿素/%(C <sub>10</sub> )	80~100	60~80	40~60	20~40	0~20
鱼类资源/%(C <sub>11</sub> )	80~100	60~80	40~60	20~40	0~20
通航保证率(C <sub>12</sub> )	0.95~1.00	0.90~0.95	0.80~0.90	0.70~0.80	0~0.70

模型是以水下地形资料为基础,根据模拟的潮位、潮流与实测值进行验证,从而在水动力模型的基础上,水质模型模拟污染物的空间变化。本文利用方艺

辉<sup>[31]</sup>基于 2013 年实测资料对闽江下游所构建的二维非恒定水动力水质模型,进行研究区河道水污染物空间变化的模拟,从而对闽江下游河进行划分。

表 2 二维非恒定水动力水质模型简介

Tab. 2 Brief introduction of two-dimensional non-constant hydrodynamic water quality model

输入	方法	输出
①地形数据;②水文数据; ③其它:水质、波浪、风速等数据资料;	①二维水动力模型:连续性方程和动量方程; ②二维水质模型:污染物控制方程,并对水质边界条件设置;	①二维水动力模型:水位、流速等水动力因子; ②二维水质模型:溶解氧、氨氮等水质因子

### 1.4.2 博弈论和模糊物元法组合的评价模型

利用层次分析法<sup>[12]</sup>和熵值法<sup>[13]</sup>得到评价指标的权重,利用博弈论模型优化组合主客观权重得到综合权重,即在不同权重之间去极小化可能的权重与基本权重的偏差,进一步提高评价结果的可靠性<sup>[32]</sup>。应用到模糊物元模型中可得到河流健康评价综合标准及各河段健康状态。最终,利用各河段的所占评价河段长度的权重,得到评价河段的健康状态。

#### 1.4.2.1 基于博弈论的组合赋权法

假设通过  $L$  种赋权方法得到一组权重集  $W_k^T = \{W_1^T, W_2^T, \dots, W_k^T\} (k=1 \sim L)$ , 并以任意线性组合构建权重向量集  $W$ 。为寻找最满意的向量,使可能权重向量与基础向量的达到最小值。计算公式为

$$W = \sum_{k=1}^L \beta_k W_k^T, (\beta_k > 0) \quad (1)$$

$$\min \left\| \sum_{k=1}^L \beta_k W_k^T - W_i \right\|_2, (i=1 \sim L) \quad (2)$$

式中:  $\beta_k$  为组合系数。

根据矩阵的微分性质可得

$$\sum_{k=1}^L \beta_k \times W_i \times W_k^T = W_i \times W_k^T, (i=1 \sim L) \quad (3)$$

计算求得组合系数集  $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k\}$ , 对其进行归一化处理, 并得到组合权重为

$$W^* = \frac{\sum_{k=1}^L \beta_k W_k^T}{\sum_{k=1}^L \beta_k} \quad (4)$$

#### 1.4.2.2 模糊物元模型

考虑到河流健康评价的概念具有模糊性, 河流各要素以及各指标之间又存在不相容的关系, 应用到河流健康评价中能够克服指标之间的不相容性。具体步骤参考文献<sup>[16]</sup>。

#### 1.4.2.3 分段与综合评价

对于每个河段, 基于统一的评价指标体系, 以及博弈论和模糊物元法的组合模型, 分别进行各个河段的健康评价。

为了得到整个河道的总体健康评价, 需综合各个河段的健康评价结果。首先, 用欧式贴近度确定各河段的贴近度  $e_i$ ; 其次, 以各河段长度占总河长的比例作为权重, 记为  $L_i (i=1 \sim n)$ ; 最后, 进行河流健康综合评价, 计算公式为

$$R_{\text{综合}} = \sum_{i=1}^n e_i L_i \quad (5)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 河流分段

#### 2.1.1 河流的水功能区划分

水功能区是指为满足水资源合理开发、利用、节约和保护的需求, 根据水资源的自然条件和开发利用现状, 按照流域综合规划、水资源与水生态系统保护和经济社会发展要求, 依据主导功能划定范围并执行相应水环境质量标准的水域。根据《全国重要江河湖泊水功能区划(2011—2030年)》中关于闽江下游水环境功能的区划, 闽江下游河道可划分为 7 个功能区(表 3)。

表 3 闽江下游河道功能区划

Tab. 3 Regionalization of water environment function for lower reaches of Minjiang River

功能区名称	起点—讫点	功能	长度/km	水质目标
闽江闽清、闽侯县饮用水源区	水口坝—候官	饮用、渔业	4.9	II、III
闽江北港福州市区饮用水源区	候官—洪山桥	饮用	5.9	II、III
闽江北港福州市区过渡区	洪山桥—彬德闸	过渡区	23.0	III
闽江北港北岸福州城区景观娱乐用水区	彬德闸—马尾双峰	景观、过渡	11.0	III-V
闽江北港南岸福州城区景观娱乐用水区	洋恰闸—下洋	景观、过渡	28.5	III-V
闽江福州渔业用水区	彬德闸、洋恰闸连线—金刚腿	渔业	36.5	III
闽江南港福州市区、长乐饮用水源区	候官—营前水闸	饮用、渔业、工业	60.9	II、III

### 2.1.2 基于水动力水质模型模拟的分段

通过多种边界条件情景下闽江下游河道二维水动力水质模型的模拟,对河道水流水质变化有了进一步的认识。一是即使在枯水大潮情景下,水口坝下断面到分流口水动力条件比较相近,该河段的水质也主要受大坝下泄水流水质的影响。二是在 2013 年地形条件下,南港的平均分流比为 80%左右,北港为 20%左右,南北港差异显著。三是对于北港河段而言,由于洪山桥—马尾河段入河排污口较多,水质受到影响,污染带分布较为明显。受潮汐顶托作用,污染带可以上溯至洪山桥,所以将洪山桥断面作为河段功能分区断面,从而将北港河段划分为分流口—洪山桥的北港上段,以及洪山桥—汇流口的北港下段。四是南北港汇流口以下,潮汐影响越加明显。到白岩潭潮位站,潮流流量主要受潮汐影响,径流影响较小。

### 2.1.3 综合分段结果

在已有水功能区划的基础上,结合闽江下游河道二维非恒定水动力水质模型揭示的河道水动力水环境特征,本文将闽江下游分为 5 段,见表 4。

## 2.2 闽江下游河道健康评价结果

### 2.2.1 分段评价结果

将各河段的指标数据输入到模糊物元模型与

博弈论相结合的模型中,首先应用博弈论模型得到各指标的权重(表 5)。结合表 1,可知对河流健康影响较大的指标为河床稳定性、河口径流系数、盐度入侵指数,其权重分别为 0.106、0.165 和 0.114。

表 4 闽江下游河段划分

Tab. 4 The division of lower reaches of the Minjiang River

河段编号	河段
1	水口坝下一分流口
2	分流口—洪山桥(北港)
3	洪山桥—汇流口(北港)
4	分流口—汇流口(南港)
5	汇流口—闽江口

利用模糊物元模型计算河流健康水平的等级以及不同河段的健康状况,等级划分标准见表 6,各河段的健康水平见表 7。结果表明:所划分的河段中有 4 个河段(水口坝下一分流口、分流口—洪山桥(北港)、洪山桥—汇流口(北港)、汇流口—闽江口)均处于一般水平;分流口—汇流口(南港)为亚病态状态;闽江下游河道健康的平均水平为 0.409 3 水口坝下一分流口、分流口—洪山桥(北港)、洪山桥—汇流口(北港)均高于平均水平,汇流口—闽江口、分流口—汇流口(南港)远低于平均水平。其中,分流口—汇流口(南港)较差。

表 5 采用博弈论计算评价指标体系中各指标的权重

Tab. 5 Weights of indices of evaluation index system calculated using Game Theory method

指标	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>
权重	0.106	0.057	0.064	0.165	0.079	0.080	0.082	0.087	0.114	0.050	0.043	0.073

表 6 闽江下游河道健康等级标准

Tab. 6 Grade standard for the health of lower reaches of the Minjiang River

评价等级	健康	亚健康	一般	亚病态	病态
分值区间	≥0.589 3	0.512 9~0.589 3	0.512 9~0.334 6	0.277 2~0.334 6	≤0.277 2

表 7 闽江下游各河段健康评价结果

Tab. 7 Health evaluation results of sections in the lower reaches of Minjiang River

河段	水口坝下一分流口	分流口—洪山桥(北港)	洪山桥—汇流口(北港)	分流口—汇流口(南港)	汇流口—闽江口
结果	一般	一般	一般	亚病态	一般

### 2.2.2 河道健康综合评价结果

根据式 5,计算得到评价各河段贴近度  $R_{河段}$ ,然后对闽江下游进行总体评价,参考罗晓丽<sup>[6]</sup>对河流总体健康度的计算方法,根据各河段长度占总评价河长的长度权重,与各河段的贴近度乘积,计算得到闽江下游河道健康指数为 0.398 8。

$$R_{河段} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0.443 0 & 0.447 03 & 0.480 4 & 0.288 5 & 0.364 6 \end{pmatrix}$$

$$R_{闽江下游} = [0.443 0 \ 0.470 3 \ 0.480 4 \ 0.288 5 \ 0.364 6] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 0.360 \\ 0.039 \\ 0.162 \\ 0.222 \\ 0.217 \end{bmatrix} = 0.398 8$$

## 2.3 评价结果合理性分析

运用分段—综合评价法对闽江下游河道进行健

康评价,结果表明,分流口-汇流口(南港)为亚病态,其余河段为一般状态,反映了不同河段健康状况的空间差异。闽江下游河道健康状况不容乐观的原因,主要是改革开放以来,人口快速增长及城市化进程不断加快给闽江下游带来巨大生态环境压力<sup>[32]</sup>。例如,闽江下游流经福州市,它是中国内河密度最大的城市<sup>[33]</sup>,城市内河污水经常未达标而直接排入闽江;下游河道采砂严重造成河床下切;近十几年来,闽江下游总体水质较好,各指标均满足Ⅲ类水要求,但其局部水质有恶化的趋势<sup>[34]</sup>,一些珍稀鱼类大量减少<sup>[16]</sup>。因此运用分段-综合评价法对闽江下游河道健康评价的结果与闽江下游实际情况相符。

本文通过从河流形态、水文、水质、咸潮入侵、生物、社会服务功能六个方面构建评价指标体系,较好地反映了感潮河段健康的综合信息。通过构建河道二维非恒定水动力水质模型,辅助河道分段与评价指标赋值,有效解决了河流河口段水文观测站点不足、评价指标取值困难的问题,从而较好地反映了评价指标在较长河段内存在的不同,更好地揭示了较长河道河流健康状态的空间差异。与其他一些河口的不分段方法<sup>[4-5]</sup>或黄河下游以水文站断面进行分段的方法<sup>[6]</sup>相比,具有一定的优越性。因此,分段-综合河流健康评价方法值得进一步推广应用。

### 3 结 论

(1)根据感潮河道的水文、水环境和水生态特征,建立了包括河流形态、水文、水质、咸潮入侵、生物、社会服务功能等六个方面的感潮河道健康评价指标体系。提出了基于二维水动力水质模型模拟结果与实测资料相结合进行河道分段,进而分段评价与全河道综合评价相结合,以客观反映河道健康空间差异的分段-综合河流健康评价模型。

(2)闽江下游河道可分为水口坝下一分流口段、分流口-洪山桥(北港)段、洪山桥-汇流口(北港)段、分流口-汇流口(南港)和汇流口-闽江口段等5个河段;除了分流口-汇流口(南港)河段健康状况为亚病态,其他河段为一般,闽江下游河道总体健康状况为一般。表明分段-综合健康评价模型不仅可以反映各个河段健康水平的空间差异特征,也能反映整个河道的总体健康状况。

#### 参考文献(References):

[1] 栾建国,陈文祥. 河流生态系统的典型特征和服务功能[J]. 人民长江,2004,35(9):41-43. (LUAN J G, CHEN W X. Typical characteristics and service functions of river

ecosystem[J]. Yangtze River, 2004, 35(9): 41-43. (in Chinese)) DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2004.09.016.

[2] 朱卫红,曹光兰,李莹,等. 图们江流域河流生态系统健康评价[J]. 生态学报,2014,34(14):3969-3977. (ZHU W G, CAO G L, LI Y, et al. Research on the health assessment of river ecosystem in the area of Tumen River basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14): 3969-3977. (in Chinese)) DOI:10.5846/stxb201306101587.

[3] XIANG Z, YU M, XIA J, et al. A combined model for river health evaluation based upon the physical, chemical, and biological elements[J]. Ecological Indicators, 2018, 8(4): 416-424. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.08.049.

[4] 杜泳. 基于多源遥感数据的钱塘江感潮河口段生态健康评价[D]. 杭州:浙江大学,2015. (DU Y. Ecological health evaluation of Qiantang River tidal estuary based on multi-source remote sensing data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese))

[5] 牛明香,王俊. 河口生态系统健康评价研究进展[J]. 生态学杂志,2014,33(7):1977-1982. (NIU M X, WANG J. Review on estuary ecosystem health assessment[J]. Journal of Ecology, 2014, 33(7): 1977-1982. (in Chinese)) DOI:10.13292/j.1000-4890.20140429.002.

[6] 李可任,左其亭. 基于和谐论的黄河下游河段健康评价[J]. 水电能源科学,2013,31(1):68-71,103. (LI K R, ZUO Q T. Health assessment of lower reaches of Yellow River based on harmony theory[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(1): 68-71, 103. (in Chinese))

[7] 赵彦伟,杨志峰. 河流健康:概念、评价方法与方向[J]. 地理科学,2005,25(1):119-124. (ZHAO Y W, YANG Z F. River health: Concept, assessment method and direction[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(1): 119-124. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2005.01.019.

[8] SUDARYANTI S, TRIHADININGRUM Y, HART BT, et al. Assessment of the biological health of the Brantas River, East Java, Indonesia using the Australian river assessment system (AUSRIVAS) methodology[J]. Aquatic Ecology, 2001, 35(2): 135-146. DOI:10.1023/a:1011458520966.

[9] KALLIS G, BUTLER D. The EU water framework directive: measures and implications[J]. Water Policy, 2001, 3(2): 125-142. DOI: 10.1016/S1366-7017(01)00007-1.

[10] 徐宗学,顾晓昀,左德鹏. 从水生态系统健康到河湖健康评价研究[J]. 中国防汛抗旱,2018,28(8):17-24,29. (XU Z X, GU X Y, ZUO D P. Studies on the health assessments: from aquatic ecosystems to Rivers/Lakes [J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28

- (8):17-24, 29. (in Chinese)) DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2018125.
- [11] 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 Y W, YANG Z F. Preliminary study on assessment of urban river ecosystem health[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 349-355. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2005.03.007.
- [12] 杨婷. 湘江流域河流健康水文条件评价研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2010. (YANG T. Hydrological conditions of the Xiangjiang River valley river health assessment [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2010. (in Chinese))
- [13] 张楠, 孟伟, 张远, 等. 辽河流域河流生态系统健康的多指标评价方法[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 162-170. (ZHANG L, MENG W, ZHANG Y, et al. Multi-variable assessment of river ecosystem health in Liao River basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(2): 162-170. (in Chinese)) DOI:10.13198/j.res.2009.02.40.zhangn.010.
- [14] 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 X J, XU Y P, ZHAI L X, et al. Establishment and application of the index system for urban river health assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 993-1001. (in Chinese)) DOI:10.5846/stxb201209221339.
- [15] 潘峰, 梁川, 王志良, 等. 模糊物元模型在区域水资源可持续利用综合评价中的应用[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 271-275. (PAN F, LIANG C, WANG Z L, et al. Fuzzy matter-element model for evaluating sustainable utilization of regional water resources[J]. Advances In Water Science, 2003, 14(3): 271-275. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2003.03.004.
- [16] 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 C J, DONG Z C, FAN K M, 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)) DOI:1000-1980(2012)06-0622-07.
- [17] 罗希茜. 闽江水口下游鱼类资源初步调查[J]. 亚热带资源与环境学报, 2018, 13(3): 54-58. (LUO X Q. Preliminary investigation of fish resources in the lower reaches of Min River [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2018, 13(3): 54-58. (in Chinese)) DOI:10.19687/j.cnki.1673-7105.2018.03.007.
- [18] 王键, 陈岚, 陈凯, 等. 2009 年秋季闽江下游及闽江口水域叶绿素 a 含量的分布特征及其与环境因子的关系[J]. 应用海洋学学报, 2012, 31(3): 362-367. (WANG J, CHEN L, CHEN K, et al. Distribution characteristics of chlorophyll a concentration and environmental factors in the Minjiang River Estuary during Autumn 2009[J]. Journal of Applied Oceanography, 2012, 31(3): 362-367. (in Chinese)) DOI:10.3969/J.ISSN.1000-8160.2012.03.009.
- [19] 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. (YU Z H. Assessment of river health under the background of urbanization in Taihu Lake basin [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015. (in Chinese))
- [20] 范习超. 基于模糊粗糙集的河流结构健康评价模型的优化与应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2016. (FANG X C. Optimization and application of river structure health assessment model based on fuzzy rough set [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [21] 李嘉薇, 陈新美. 河流生态健康评价中功能指标分析与计算[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 53-56. (LI J W, CHEN X M. Analysis and Calculation of ecological function index in the river health assessment[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(5): 53-56. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2013.05053.
- [22] 龚松柏, 高爱国, 林建杰, 等. 闽江下游及河口沉积物总碳的地球化学特征[J]. 应用海洋学学报, 2018, 37(3): 321-329. (GONG S B, GAO A G, LIN J J, et al. Geochemical characteristics of total carbon in sediments of the lower reaches of Minjiang and its estuary[J]. Journal of Applied Oceanography, 2018, 37(3): 321-329. (in Chinese)) DOI:10.3969/J.ISSN.2095-4972.2018.03.003.
- [23] 褚克坚, 阚丽景, 华祖林, 等. 平原河网地区河流水生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 K J, KAN L J, HUA Z L, 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)) DOI:10.11660/slfdx.20140520.
- [24] 朱英. 河流生态健康评价中生物指标的研究与应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2008. (ZHU Y. Research and application of biological index in the river ecosystem health assessment[D]. Shanghai: East China Normal University, 2008. (in Chinese))
- [25] 袁欣智. 闽江干流叶绿素 a、浊度遥感监测与分析

- [D].福州:福州大学,2016.(YUAN X Z. The Monitoring and analysis of chlorophyll-a and turbidity by remote sensing in Minjiang River [D]. Fuzhou: Fuzhou University,2016. (in Chinese))
- [26] 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.(YANG L P. Determination and confirmation of key index on river health evaluation[D]. Kunming: Yunnan University, 2012. (in Chinese))
- [27] GB 3838-2002,地表水环境质量标准[S]. (GB 3838-2002, Environmental quality standards for surface water[S]. (in Chinese)).
- [28] LEOPOLD L B, WOLMAN G M, MILLER J P. Fluvial processes in geomorphology [D]. W. H. Freeman and Company: San Francisco, CA, USA, 1964. DOI:10.1016/0022-1694(65)90101-0.
- [29] 王淑英,王浩,高永胜,等. 河流健康状况诊断指标和标准[J]. 自然资源学报,2011,26(4): 591-598. (WANG S Y, WANG H, GAO Y S, et al. Index system and criteria for diagnosing the status of river health[J]. Journal of Natural Resources,2011,26(4): 591-598. (in Chinese)) DOI:10.11849/Zrzyxb. 2011. 04. 005.
- [30] 水利部水资源司河湖健康评估全国技术工作组. 河流健康评估指标、标准与方法(试点工作用)(1.0版)[R]. 北京:水利部水资源司,2010,10. (National technical working group on river and lake health assessment of department of water resources, ministry of water resources. Indicators, standards and methods of River Health Assessment (For pilot work) (version 1.0)[R]. Beijing: department of water resources, ministry of water resources,2010,10.
- [31] 方艺辉. 闽江河口水环境数值模拟与决策支持系统[D]. 福州:福建师范大学,2018.(FANG Y H. Numerical simulation and decision support system of water environment in the Min River Estuary of China [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2018. (in Chinese))
- [32] 从丽侠. 闽江福州段水质遥感监测及其与土地利用联动分析[D]. 福州:福建农林大学,2007.(CONG L X. Monitoring of water quality Minjiang River in Fuzhou based on remote sensing and analysis of relation between it and land use[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University,2007. (in Chinese))
- [33] 罗君沂,韦素琼. 福州市内河旅游开发的市民意向及发展思路[J]. 华中农业大学学报(社会科学版),2010,3(3): 108-111. (LUO J Y, WEI S Q. The citizens' intention and the development ideas about tourism of urban river in Fuzhou [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition,2010,3(3): 108-111. (in Chinese)) DOI:10.13300/j. cnki. hnwkxb. 2010. 03. 029.
- [34] 张鹏,逢勇,石成春,等. 闽江下游水质变化趋势分析[J]. 水资源保护,2018,34(1): 64-69. (ZHANG P, PANG Y, SHI C C, et al. Analysis of change trend of water quality in Minjiang River downstream [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1): 64-69. (in Chinese)) DOI:10.3880/j. issn. 1004-6933. 2018. 01. 11.