

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.023

# 改进综合水质标识指数法在珠江口水系 水质评价中的应用

林涛<sup>1,2</sup>, 尹静<sup>1,2</sup>, 张博<sup>1</sup>, 单永体<sup>1,2</sup>, 杨鹏<sup>1,2</sup>, 杨颖<sup>2</sup>, 余义瑞<sup>2,3</sup>

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075;

2. 西安中交环境工程有限公司, 陕西 西安 710075; 3. 深圳市宝安区水务局, 广东 深圳 518101)

**摘要:**为了解珠江口水系近年来水质变化特征,基于2018—2020年51个采样点的逐月水质数据,运用主因子分析法对评价指标进行筛选,结合不同赋权法对传统综合水质标识指数法的权重进行改进,对珠江口水系河道水质进行了评价并分析了水质时空分布特征。结果表明:组合集成赋权的综合水质标识指数法综合了超标污染物和其他指标的客观权重,结果合理可信,适合于时空尺度大的流域水质评估;各河道水质呈现出逐年改善的趋势,由以劣V类为主转变为以Ⅲ类为主,满足水环境功能区划目标;研究区西部地区河道水质整体略低于东部地区,西部地区南山片区河道水质优于大空港片区,但大空港和前海片区河道水质提升效果显著;河道上游水质总体较下游好,入海口水质随季节波动较大且普遍受海水污染和挡潮闸运行的影响。

**关键词:**水质评价;综合水质标识指数法;组合集成赋权;主因子分析法;珠江口水系

**中图分类号:**TV213.4;X824

**文献标志码:**A

**文章编号:**1004-6933(2022)04-0166-08

**Application of improved comprehensive water quality identification index method in water quality evaluation of the Pearl River Estuary** // LIN Tao<sup>1,2</sup>, YIN Jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, SHAN Yongti<sup>1,2</sup>, YANG Peng<sup>1,2</sup>, YANG Ying<sup>2</sup>, YU Yirui<sup>2,3</sup> (1. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 2. Xi'an Zhongjiao Environmental Engineering Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 3. Water Resources Bureau of Baoan District, Shenzhen 518101, China)

**Abstract:** To study the characteristics of water quality variation in the Pearl River Estuary during the recent years, the water quality in the Pearl River Estuary is evaluated and the tempo-spatial distribution characteristics of water quality is analyzed, based on data from 51 monthly collected water quality sampling points from 2018 to 2020, with evaluation indices filtered using principal factor analysis and improvement on traditional comprehensive water quality identification index method using combinatorial integration method. Results show that the comprehensive water quality identification index method combined with combinatorial integration method takes both excessive pollutants index and other indices into account, so as to obtain reasonable and reliable results, which means the method is suitable for large-scale watershed water quality assessment. The water qualities in all drainages tend to improve over the years, mainly from class of inferior V to III, which met the water quality goals in water environment function zones. The water quality in the western regions was slightly worse than that in the eastern regions. The river water quality in the Nanshan district was better than that in the Dakonggang district, however the improvement in river water quality in Dakonggang and Qianhai district was more significant. The water quality of the upstream was generally better than that of the downstream. Estuary water quality fluctuates greatly with the seasons, which was generally affected by sea water pollution and the tidal sluice operations.

**Key words:** water quality evaluation; comprehensive water quality identification index method; combinatorial integration method; principal factor analysis; the Pearl River Estuary

准确评估流域水质污染程度、精准掌握河道水质分布特点是流域水环境治理与管理的基础工作,

对水环境安全保障、水资源科学管理等具有重要意义<sup>[1-5]</sup>。目前,应用于水质评价的方法中,模糊数学

评价法的结果不够直观<sup>[6]</sup>,污染指数法无法定量分析污染程度<sup>[7]</sup>,灰色聚类评价法和人工神经网络法分析过程复杂且无法定性评价水质<sup>[8-9]</sup>,单因子指数评价法结果趋于保守<sup>[10]</sup>,而综合水质标识指数法<sup>[11]</sup>则可以定量分析水质优劣、定性评价水质类别以及判别单项水质指标与综合水质结果是否满足水环境功能区划目标。

综合水质标识指数法在流域水质评价领域应用越来越广,但其结果是基于单因子水质标识指数的算术均值,未考虑各项水质指标所反映信息量的差异性和主观权重影响<sup>[12]</sup>。目前,对其权重进行改进的研究较多,如程卫国等<sup>[13]</sup>采用变异系数法、张龙玲等<sup>[14]</sup>采用主成分分析法、王涛等<sup>[15]</sup>采用熵权系数法、王琳等<sup>[16]</sup>采用超标倍数赋权法以及张铖铖等<sup>[17]</sup>采用组合赋权法等对综合水质标识指数权重进行改进,但这些改进方法在一定程度上缺乏对指标的信息量权重、超标污染权重或主观权重影响的综合反映。本文将熵权系数法和超标倍数赋权法组合集成后运用于综合水质标识指数法的权重改进,提出了改进权重综合水质标识指数法,将其应用于珠江口水系水质评价,并通过与多种水质评价方法进行比对来检验方法的合理性和适用性。

## 1 研究区概况与研究数据

### 1.1 珠江口水系概况

珠江口水系位于广东省深圳市西部(22.44°N~22.74°N、113.76°E~113.93°E),东起羊台山,西至珠江口东岸,北接茅洲河流域,南临深圳湾;属亚热带海洋性气候,年均气温22.4℃,降雨集中于4—9月,年均降水量为1926 mm<sup>[18]</sup>;共有河流41条,总长度约为163.8 km(暗涵段约占26%),集水面积约为363.8 km<sup>2</sup>,水源主要依靠降水补给,河道主要功能为城市防洪(潮)排涝、生态环境、景观及雨洪利用,但受河道硬化、暗涵化的影响,导致部分河道功能丧失<sup>[19-20]</sup>。根据《珠江口流域综合治理方案》,珠江口水系被划分为大空港、前海、铁石以及南山四大片区,各片区采样点位置见图1。

根据低潮时海岸线遥感影像,自1979年以来海岸线平均外推约1.44 km,研究区内海岸变迁较大,河道在107国道断面下游,其比降变缓,水动力条件变差<sup>[21]</sup>。珠江口水系主要包括宝安区和南山区部分街道,是深圳经济特区和社会主义先行示范区的核心区域,经济发达、工商企业密集。经济的发展不仅带来了机遇,也带来源源不断的污染物质,使得城市河道生态环境面临着巨大压力<sup>[22]</sup>。另一方面,受珠江口海潮顶托影响,海域污染物随潮汐水动力作

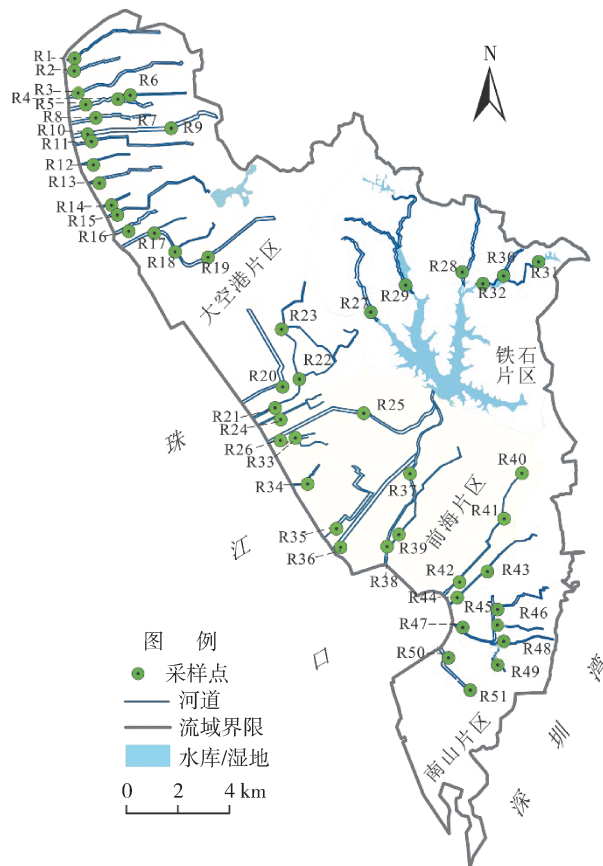


图1 研究区域及采样点分布

Fig.1 Study area and sampling locations

用返回河道,对感潮河段的水质产生了很大的影响,入海口虽有挡潮闸拦截了大量污染物,但也影响了河流水动力条件,对河道水环境造成正反两方面的影响<sup>[23]</sup>。

### 1.2 水样采集和分析方法

选用珠江口水系2018年1月至2020年12月51个采样点逐月水质数据,数据来自深圳市生态环境局和深圳市宝安区水资源公报。

水质指标有流速、透明度、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)、氟化物(F<sup>-</sup>)、氧化还原电位(ORP)和阴离子表面活性剂(LAS)。在采样过程中,严格按照HJ 494—2009《水质 采样技术指导》中的河流地表水采样要求,利用聚乙烯瓶收集河道水样并冷藏(4℃)转运至实验室,其中流速、透明度和DO由便携式流速仪(LS1206B)、便携式超声波检测仪(ZMSS-100)和YSI多参数探头测定,其余水质指标由室内化验分析得到。参照《水和废水监测分析方法(第4版)》的要求,样品测试分析过程均使用标准试剂配备的溶液,并利用平行样品进行数据质量把控,其中COD采用重铬酸钾法、NH<sub>3</sub>-N采用纳氏试剂比色法、F<sup>-</sup>采用离子选择电极法、TP采用钼酸铵分光光

度法、LAS 采用亚甲基蓝分光光度法测定。

1.3 数据处理方法

采用 Microsoft Excel 2010 整理数据,SPSS 20.0 分析数据, ArcGIS10.6、AutoCAD2007、CorelDraw12 绘图。

2 研究方法

2.1 水质评价指标的筛选

水质是由多因子共同作用的结果,且不同因子之间存在较大的相关性,如果直接对水质数据进行评价,会使评价结果所反映的水质信息存在一定程度的重叠和掩盖。因此,本文利用主因子分析法对水质基本指标进行主因子提取,确定各变量对主因子影响的大小,并以此来评判水质指标对综合水质的影响程度,并将选取的指标运用水质标识指数法进行水质评价与时空分布特征分析<sup>[24]</sup>。

2.2 评价指标赋权方法

a. 熵权系数法。熵权系数法是根据指标所代表信息量的大小来赋权的方法<sup>[25]</sup>。该方法综合考虑各指标间内在联系对评价结果的影响,是一种客观型指标赋权方法,通过对水质数据进行标准化处理并计算指标熵值,进而确定熵权。熵权系数法计算公式为

$$e_i = - \frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^n \left[ \frac{1 + Z_{ij}}{\sum_{j=1}^n (1 + Z_{ij})} \ln \frac{1 + Z_{ij}}{\sum_{j=1}^n (1 + Z_{ij})} \right]$$

(1)

$$w'_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^m (1 - e_i)}$$

(2)

式中: $Z_{ij}$ 为水样  $j$  水质指标  $i$  的标准值; $m$  为水质指标的总数; $n$  为水样的总数; $e_i$  为水质指标  $i$  的熵权值; $w'_i$  为水质指标  $i$  的熵权系数法权重。

b. 超标倍数赋权法。超标倍数赋权法是根据指标的标准值与限定值之间的差异来赋权的方法<sup>[26]</sup>。该方法强调指标在所有指标中的重要性和其对评价结果的影响力,是一种突出型指标赋权方法。超标倍数赋权法计算公式为

$$w''_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{Z_{ij}}{s_i}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{Z_{ij}}{s_i}}$$

(3)

式中: $w''_i$  为水质指标  $i$  的超标倍数赋权法权重; $s_i$  为水质指标  $i$  的水质目标(根据《深圳市地表水环境功能区划》,本区域水功能区划水质目标需满足 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》V 类标准)。

c. 组合集成法。组合集成法是对客观型指标赋权和突出型指标赋权进行集成的方法<sup>[27]</sup>,组合集成的权重综合了两者优点。本文采用乘法组合集成法计算各项水质指标的综合权重:

$$w_i = \frac{w'_i w''_i}{\sum w'_i w''_i}$$

(4)

式中  $w_i$  为水质指标  $i$  的综合权重。

2.3 改进权重的综合水质标识指数法

本文通过组合集成法对综合水质标识指数法的权重进行改进,以进一步提升综合水质标识指数法的适用性和可靠性。综合水质标识指数  $I$  由整数位、小数点后 3 位小数位组成,其形式为

$$I = X_1 \cdot X_2 X_3 X_4$$

(5)

式中: $X_1$  为综合水质类别; $X_2$  为综合水质在  $X_1$  类水质变化区间内所处位置; $X_3$  为参与综合水质评价的单项指标中劣于水环境功能区划目标的个数; $X_4$  为综合水质类别与水环境功能区类别的比较结果,视水体的污染程度而定。 $X_1 \sim X_4$  具体计算方法可参见文献[10]。可通过综合水质标识指数值判定某水体的综合水质类别,具体的综合水质类别评价标准见表 1。

表 1 水质类别评价标准

Table 1 Evaluation standard of water quality classes

| 综合水质标识指数 | 综合水质类别    |
|----------|-----------|
| (1,2]    | I 类       |
| (2,3]    | II 类      |
| (3,4]    | III 类     |
| (4,5]    | IV 类      |
| (5,6]    | V 类       |
| (6,7]    | 劣 V 类但不黑臭 |
| >7       | 劣 V 类且黑臭  |

2.4 水质时空变化评价方法

流域内水质随时间和空间变化程度以时间变化率  $T$  和空间变化率  $S$  表示<sup>[28]</sup>,计算公式为

$$T = \frac{I_t - I_{t'}}{I_t} \times 100\%$$

(6)

$$S = \frac{I_s - I_{s'}}{I_s} \times 100\%$$

(7)

式中: $I_t$ 、 $I_{t'}$  分别为某采样点在  $t$ 、 $t'$  时期综合水质标识指数; $I_s$ 、 $I_{s'}$  分别某时期采样点  $s$ 、 $s'$  的综合水质标识指数。

通过对时间变化率  $T$  和空间变化率  $S$  的计算,分析判定水体水质的时空变化规律,具体的水质变化评价标准见表 2。

3 结果与分析

3.1 水质评价指标的确定

对 9 项检测指标数据进行主因子分析,结果表

表 2 水质时空变化评价标准

Table 2 Evaluation standard of tempo-spatial variation of water quality

| T/%         | S/%         | 水质变化情况 |
|-------------|-------------|--------|
| ≤ -20       | ≤ -20       | 明显恶化   |
| ( -20, -10] | ( -20, -10] | 轻微恶化   |
| ( -10,10]   | ( -10,10]   | 基本不变   |
| (10,20]     | (10,20]     | 轻微改善   |
| >20         | >20         | 显著改善   |

明第 1、2、3 主成分的特征值均大于 1,且对水质信息解释方差的贡献率分别为 44.977%、26.914% 和 10.314%,3 个主成分对水质信息解释方差累计贡献率为 82.205%,表明对这 3 个主成分进行评价可以揭示原始数据的基本信息。以各因子荷载的绝对值大于 0.7 的水质指标作为水质评价因子<sup>[29]</sup>,由表 3 可以得出与第 1 主成分关系密切的水质指标有 DO、NH<sub>3</sub>-N 和 LAS,与第 2 主成分关系密切的水质指标为 COD 和 F<sup>-</sup>,与第 3 主成分关系密切的水质指标为 TP,因此,将 DO、NH<sub>3</sub>-N、LAS、COD、F<sup>-</sup> 和 TP 这 6 个水质指标用于综合水质评价。

表 3 水质旋转因子荷载值

Table 3 Load value of water quality rotation factor

| 指标                 | 荷载值     |         |         |
|--------------------|---------|---------|---------|
|                    | 第 1 主成分 | 第 2 主成分 | 第 3 主成分 |
| 流速                 | 0.124   | 0.658   | -0.411  |
| 透明度                | -0.047  | 0.036   | 0.652   |
| DO                 | -0.745  | 0.289   | 0.004   |
| COD                | 0.172   | 0.764   | 0.043   |
| NH <sub>3</sub> -N | 0.926   | -0.059  | 0.021   |
| TP                 | 0.060   | 0.041   | 0.858   |
| F <sup>-</sup>     | 0.265   | 0.674   | 0.321   |
| LAS                | 0.873   | -0.083  | -0.041  |
| ORP                | -0.684  | 0.119   | 0.086   |
| 特征值                | 3.955   | 1.028   | 1.013   |

3.2 水质评价结果与分析

3.2.1 单因子水质标识指数计算

利用单因子水质标识指数法对研究区水质进行评价,结果见表 4。由表 4 可知,2018 年采样点 R5 的各项水质指标评价结果最差,均低于劣 V 类标准阈值,2019 年采样点 R31 和 2020 年采样点 R29 的各项水质指标评价结果最优,均满足Ⅲ类水质标准,各项水质指标的评价结果逐年改善。各年度不同采样点的各项水质指标评价结果表现出显著差异,例如:2019 年采样点 R1 的 F<sup>-</sup> 和 LAS 的评价结果满足Ⅱ类水质标准,DO 和 COD 的评价结果满足Ⅳ类水质标准,而 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的评价结果超过 V 类水质标准。由此可知,采用单因子指数评价法进行水质评价时,受超标因子影响,导致评价结果差距较大,

不能全面反映水质状况。

表 4 单因子水质标识指数的评价结果

Table 4 Evaluation results of single factor identification index method

| 年份   | 采样点 | 水质标识指数 |       |                    |        |                |        | 水质类别 |
|------|-----|--------|-------|--------------------|--------|----------------|--------|------|
|      |     | DO     | COD   | NH <sub>3</sub> -N | TP     | F <sup>-</sup> | LAS    |      |
| 2018 | R1  | 6.065  | 6.291 | 12.519             | 9.498  | 2.870          | 7.136  | 劣 V  |
|      | R5  | 6.667  | 8.852 | 22.133             | 15.377 | 6.382          | 10.639 | 劣 V  |
|      | R18 | 6.335  | 8.030 | 18.479             | 13.604 | 2.674          | 10.067 | 劣 V  |
|      | R29 | 4.573  | 3.843 | 6.066              | 4.997  | 2.498          | 2.845  | 劣 V  |
|      | R31 | 6.093  | 6.773 | 15.354             | 8.905  | 2.299          | 7.581  | 劣 V  |
|      | R51 | 2.154  | 6.282 | 3.389              | 3.542  | 2.785          | 2.629  | V    |
| 2019 | R1  | 4.267  | 4.923 | 7.269              | 6.081  | 2.517          | 2.592  | 劣 V  |
|      | R5  | 6.147  | 6.011 | 9.863              | 8.256  | 2.536          | 6.622  | 劣 V  |
|      | R18 | 5.994  | 6.068 | 10.111             | 8.040  | 2.941          | 6.031  | 劣 V  |
|      | R29 | 3.680  | 3.991 | 5.067              | 4.422  | 2.320          | 2.539  | V    |
|      | R31 | 3.258  | 3.893 | 3.893              | 3.925  | 2.281          | 2.588  | Ⅲ    |
|      | R51 | 3.538  | 6.395 | 4.022              | 3.383  | 2.327          | 2.592  | 劣 V  |
| 2020 | R1  | 4.690  | 5.057 | 4.927              | 4.042  | 2.529          | 2.500  | V    |
|      | R5  | 3.742  | 4.477 | 6.539              | 4.825  | 2.685          | 2.671  | 劣 V  |
|      | R18 | 4.943  | 5.158 | 6.675              | 5.708  | 2.524          | 2.983  | 劣 V  |
|      | R29 | 2.086  | 4.283 | 2.925              | 3.417  | 2.513          | 2.383  | Ⅲ    |
|      | R31 | 3.783  | 4.238 | 2.466              | 3.775  | 2.472          | 2.421  | Ⅳ    |
|      | R51 | 3.450  | 5.220 | 3.369              | 2.760  | 2.485          | 2.429  | V    |

3.2.2 综合水质标识指数评价

根据单因子水质标识指数的计算结果和研究区地表水环境功能区划目标,结合不同赋权方法分别对各采样点进行综合水质评价,结果见表 5。

表 5 综合水质标识指数的评价结果

Table 5 Evaluation results of integrated water quality identification index method

| 年份   | 采样点 | 不同赋权方法的综合水质标识指数 |        |         |        |
|------|-----|-----------------|--------|---------|--------|
|      |     | 传统方法            | 熵权系数法  | 超标倍数赋权法 | 组合集成法  |
| 2018 | R1  | 7.452           | 7.152  | 8.052   | 7.952  |
|      | R9  | 9.053           | 8.653  | 10.550  | 9.154  |
|      | R18 | 9.854           | 11.356 | 10.955  | 11.656 |
|      | R28 | 4.320           | 4.320  | 4.320   | 4.520  |
|      | R31 | 7.852           | 6.851  | 8.153   | 7.652  |
|      | R42 | 5.420           | 5.353  | 6.037   | 5.820  |
| 2019 | R48 | 4.120           | 3.320  | 3.620   | 3.320  |
|      | R1  | 4.620           | 4.520  | 4.420   | 4.220  |
|      | R9  | 7.852           | 8.052  | 8.453   | 8.153  |
|      | R18 | 6.541           | 7.141  | 6.641   | 6.941  |
|      | R28 | 4.110           | 4.210  | 3.910   | 3.810  |
|      | R31 | 3.300           | 3.200  | 3.500   | 3.200  |
| 2020 | R42 | 4.610           | 4.600  | 4.500   | 4.410  |
|      | R48 | 4.010           | 3.710  | 3.310   | 3.310  |
|      | R1  | 3.900           | 4.000  | 3.500   | 3.300  |
|      | R9  | 4.510           | 4.510  | 4.410   | 3.810  |
|      | R18 | 4.610           | 4.910  | 4.210   | 4.210  |
|      | R28 | 3.300           | 3.600  | 2.900   | 3.100  |
| 2020 | R31 | 3.100           | 3.400  | 3.000   | 3.100  |
|      | R42 | 3.600           | 3.500  | 3.400   | 3.200  |
|      | R48 | 3.500           | 3.400  | 2.900   | 3.000  |

由表 5 可知,采用不同赋权方法的综合水质标识指数法与传统方法相比,评价结果更加符合实际水质情况,传统方法将单项水质指标的结果进行均衡化来反馈水质类别,忽视了各项指标的信息量权重和主观权重的作用,导致部分河道(R18、R48 等采样点)评价结果与实际情况不符;超标倍数赋权法赋权的综合水质标识指数法充分考虑了超标污染物对水质结果的贡献,但实际水体中往往存在超标污染物指标的权重是未超标的几倍以上,导致超标污染物指标权重的计算结果偏大,使得水质评价结果较差(R31、R42 等采样点);熵权系数法赋权的综合水质标识指数法综合考虑了各项水质指标之间的联系,但存在分摊各项水质指标对水质影响的缺陷,导致评价指标的权重差异不大,与传统方法的评价结果相近;组合集成法赋权的综合水质标识指数法综合了超标污染物指标的贡献与极值对评价结果的影响,同时客观反映了各项水质指标赋权的重要程度,其评价结果整体介于超标倍数赋权法和熵权系

数法两种赋权方法之间,其结果更加符合实际情况,该方法在大流域水质评价方面具有较强的优越性。

3.3 水质时空分布特征分析

图 2 和图 3 分别为珠江口水系 2018—2020 年非汛期和汛期水质时空变化分布。各河道水质时空差异明显,其中 2018—2019 年非汛期和汛期南山片区河道水质优于前海片区,铁石片区河道水质最优,而大空港片区河道水质最差;2020 年非汛期和汛期大空港片区河道水质优于前海片区,铁石片区河道水质最优,而南山片区河道水质最差。评价结果与实际情况较为一致,由于铁石片区河道上游水源丰富、居民区和工厂分布较少、污染排放量少,且该区域河道为饮用水源二级保护区,河道保护与管理较其他河道更严格,使得铁石片区河道水质最优;而其他片区河道受城中村和企业漏排污水、城区非点源污染、拦潮闸影响以及海水污染,导致河道水质受污染影响较大。大空港片区河道水质改善效果较前海

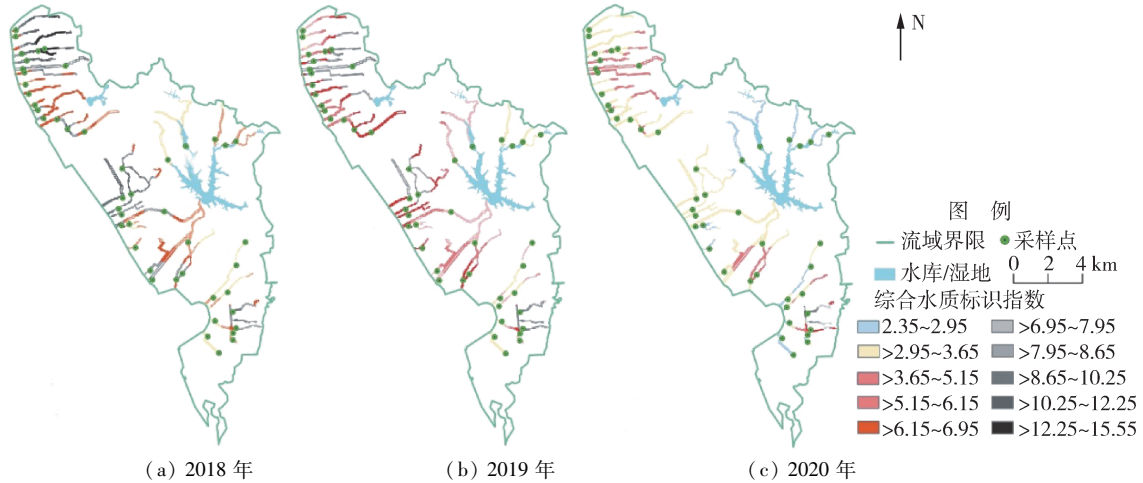


图 2 珠江口水系非汛期水质时空分布  
Fig.2 Tempo-spatial distribution of water qualities in the Pearl River Estuary during non-flood seasons

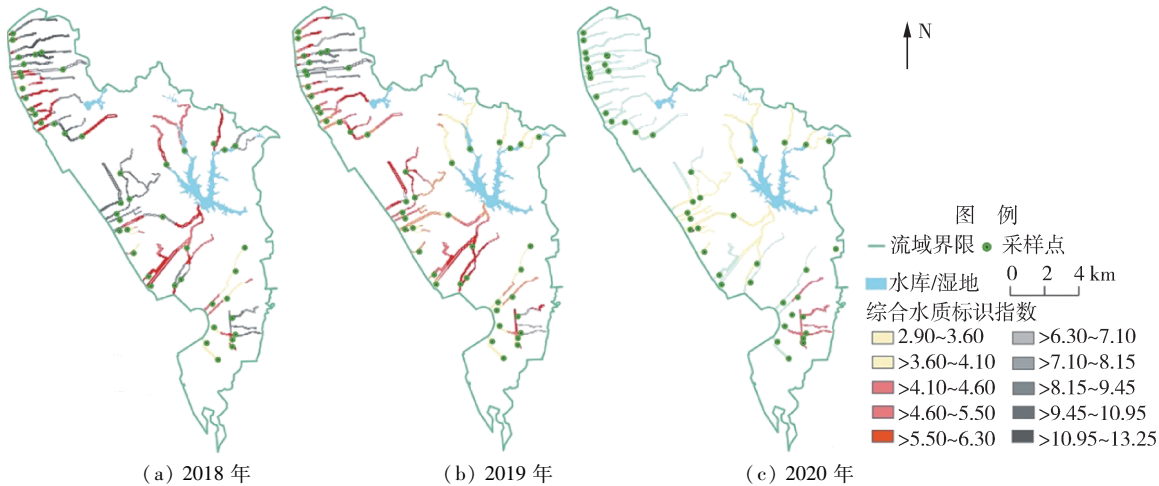


图 3 珠江口水系汛期水质时空分布  
Fig.3 Tempo-spatial distribution of water qualities in the Pearl River Estuary during flood seasons

和南山片区河道显著,这与片区内治污基础建设、污染源分布差异以及河道治理进程有密切联系。

3.3.1 时间分布

表6为与2018年非汛期相比的典型采样点水质时间变化率分布情况。

表6 与2018年非汛期相比典型采样点水质时间变化  
Table 6 Temporal variations of water qualities at typical sampling point compared with non-flood season in 2018

| 采样点 | 2018年<br>非汛期<br>综合水质<br>标识指数 | T/%         |              |             |              |             |
|-----|------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|     |                              | 2018年<br>汛期 | 2019年<br>非汛期 | 2019年<br>汛期 | 2020年<br>非汛期 | 2020年<br>汛期 |
| R1  | 8.202                        | 6.71        | 48.57        | 48.07       | 59.86        | 59.44       |
| R10 | 7.642                        | 2.80        | -18.35       | -1.73       | 42.50        | 54.65       |
| R18 | 9.826                        | -36.29      | 31.47        | 35.62       | 60.76        | 47.29       |
| R27 | 4.161                        | -74.13      | -8.65        | 14.32       | 31.83        | 27.84       |
| R38 | 7.311                        | 13.96       | 7.33         | 13.84       | 51.99        | 49.93       |
| R46 | 8.523                        | -7.32       | -0.97        | 17.75       | 17.94        | 21.03       |
| R51 | 2.910                        | -1.16       | -5.53        | -0.95       | 7.68         | 6.62        |

a. 2018年汛期。①大空港片区河道采样点R1~R5、R10、R13、R14、R17和R20~R23水质变化不明显,R6、R9、R15和R16轻微改善,R7、R8、R11和R12显著改善,R19轻微恶化,R18明显恶化。采样点R18上游管网仍为雨污混流制,汛期污水溢流导致水质恶化,R18所属河道为R19河道的支流,R18水质明显恶化是导致R19水质轻微恶化的直接原因。②前海片区河道采样点R24、R25、R26、R33、R34、R39、R41和R43水质变化不明显,R35、R36和R38水质显著改善,R40水质受山区雨洪污染影响发生轻微恶化,但R37受其上游两岸工业园区(汽车维修厂等)的面源污染影响以及R42受汛期截污管溢流和入海口污染物的影响,水质明显恶化。③南山片区河道采样点R45、R46和R48~R51水质变化不明显,R47水质轻微改善。④铁石片区河道采样点R29~R32水质明显恶化,汛期入河面源污染和农业退水污染严重,已建管网区域仍有漏排污口水不断出现,导致大量漏排污水直排入河,造成汛期河道水质明显恶化。

b. 2019年非汛期。①大空港片区河道采样点R8、R14和R1水质变化不明显,R7、R9、R13、R16和R24水质轻微改善,R1~R6、R15、R17、R18和R20~R23水质显著改善,R10、R11、R12受当期河道清淤施工影响,沉积物污染上覆水体,导致水质明显恶化;②前海片区河道采样点R33、R37、R38和R41~R44水质变化不明显,R25、R26、R35、R36和R39水质显著改善,而R40受新圳河上游工业园区污水口排污影响水质明显恶化;③南山片区河道采样点R45~R48、R50和R51水质变化不明显,R49

水质显著改善;④铁石片区河道采样点R29~R32水质变化不明显。

c. 2019年汛期仅有采样点R40水质发生轻微恶化,R11、R27、R43受集水区内污水溢流和非点源污染影响水质明显恶化,其余采样点水质均呈现出不同程度改善。

d. 2020年非汛期和汛期水质时间变化率分布情况相似,均呈现出水质显著或轻微改善的规律。

河道水质持续改善要归功于过去几年政府采取的污染治理(如雨污分流、建管纳污、生态清淤、多源补水等)、挡潮闸管理以及污水处理厂提质扩容改造等措施,不仅提高了集水区生活、工业污水收集率和污水截流标准以及尾水排放标准,还清理了河道垃圾和淤泥。但在已建管网区域仍不断有污水漏排,导致污水溢流入河<sup>[30]</sup>。另外,受下垫面硬化率增大的影响,污染积累量与降雨径流量呈现出增大的趋势,河道水质往往在雨天会出现黑臭“反弹”现象<sup>[31]</sup>。

3.3.2 空间分布

珠江口水系多为各自独立的小河流域,各河流之间不存在水文水动力、水环境等条件的必然联系,但受区域地形地貌、气象条件以及人类活动相似性的影响,各区域河道水质存在客观相似性,因此,对研究区内采样点超过两个的河道进行水质空间变化分析,结果见表7。由表7可知:①采样点R5水质在2018年汛期、非汛期以及2019年汛期较R4明显恶化,其他时期水质变化不明显;②R8在2018年汛期、非汛期以及2019年汛期水质较R7显著改善,而其他时期水质轻微改善;③R10水质在2018年非汛期较R9显著改善,而在2018年非汛期较R9明显恶化,其他时期水质改善不明显;④R26水质在2019年非汛期较R25明显恶化,其他时期水质改善不明显;⑤R32水质在2019年汛期较R31显著改善,2020年汛期明显恶化,而其他时期恶化不明显;⑥R38水质在2018年非汛期和汛期以及2019年非汛期较R37明显恶化,其他时期变化不明显;⑦R41水质在2018年非汛期较R40轻微恶化,2019年汛期、2020年非汛期和汛期较R40显著改善,其他时期水质改善不明显;⑧R42水质在2018年汛期和非汛期以及2019年非汛期较R41明显恶化,其他时期水质轻微恶化;⑨R44水质在2019年汛期较R43显著改善,2019年非汛期和2020年汛期较R43轻微改善,2020年非汛期较R43改善不明显;⑩R48水质在2018年和2019年非汛期较R47显著改善,在2019年汛期较R47轻微改善,在2020年汛期较R47恶化不明显;⑪R51水质在2018年和2019年

非汛期较 R50 轻微改善,在 2019 年汛期较 R50 恶化但不明显,在 2020 年汛期和非汛期较 R50 均显著改善。可见,随着水环境治理与管理工作的开展,河道整体水质呈现出显著改善趋势,但河道上游水质总体较下游水质好,入海口水质随季节波动较大。

表 7 同一河道水质空间变化

Table 7 Spatial variations of water qualities in the same river

| 对比的两个采样点  | S/%           |              |               |              |               |              |
|-----------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
|           | 2018 年<br>非汛期 | 2018 年<br>汛期 | 2019 年<br>非汛期 | 2019 年<br>汛期 | 2020 年<br>非汛期 | 2020 年<br>汛期 |
| R4 与 R5   | -45.94        | -53.53       | -7.58         | -62.96       | -12.69        | 6.04         |
| R7 与 R8   | 20.52         | 16.45        | 10.61         | 27.25        | 16.15         | 10.61        |
| R9 与 R10  | 22.65         | 11.15        | -9.84         | 3.92         | 3.02          | 6.45         |
| R25 与 R26 | -9.58         | -10.63       | -38.35        | 2.32         | 2.19          | 1.45         |
| R31 与 R32 |               |              | 1.45          | 12.05        | -6.80         | -13.01       |
| R37 与 R38 | -61.29        | -22.21       | -35.59        | 1.88         | 0.87          | 17.38        |
| R40 与 R41 | -22.33        | 0.89         | 23.87         | 4.13         | 20.50         | 18.17        |
| R41 与 R42 | -24.33        | -64.42       | -28.78        | -7.91        | -7.27         | -2.90        |
| R43 与 R44 |               |              | 18.69         | 38.00        | 0.55          | 14.16        |
| R47 与 R48 | 32.89         | 10.65        | 33.43         | 12.19        | -7.32         | 14.44        |
| R50 与 R51 | 15.97         | 12.32        | 15.74         | -5.92        | 23.77         | 27.87        |

4 结 论

a. 改进权重后的综合水质标识指数法综合考虑了超标污染物的影响,客观反映了各项水质指标赋权的重要程度。组合集成法赋权与其他方法赋权的综合水质标识指数法对比表明,组合集成法赋权的综合水质标识指数法流域水质评价结果合理可信且更符合实际情况,充分反映了主、客观因素对水质结果的影响,在大流域水质评价方面具有较强的优越性。

b. 评价结果显示,除采样点 R45 和 R46 水质在 2018—2020 年仅仅有轻微改善外(水质类别持续为劣 V 类),其他河道采样点水质状态均有显著改善,劣于水环境功能区划目标的单项水质指标数显著下降,各河道水质类别由以劣 V 类为主改善至以Ⅲ类为主,达到水环境功能区划目标。

c. 珠江口水系水质在空间上呈现出东部河道优于西部、河道上游总体较下游好、入海口处水质随季节波动较大的规律;在时间上,各河道水质状况逐年好转,同年度汛期优于非汛期,V 类水质的河道达标率已由 2018 年汛期的 25.64% 提升至 2020 全年的 97.43%,研究区内黑臭水体基本被消除。过去几年政府采取的一系列河道污染治理和管理措施,使得河道水质状态得到了持续提升,但随着下垫面硬化率的增大,非点源污染风险仍然是制约流域水质持续提升的瓶颈。

参考文献:

[ 1 ] LIN Tao, YU Huiqin, WANG Qi, et al. Surface water quality assessment based on the integrated water quality index in the Maozhou River Basin, Guangdong, China[ J ]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80: 368.

[ 2 ] SUN Wei, XIA Chunyu, XU Meiyin, et al. Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River [ J ]. Ecological Indicators, 2016, 66: 306-312.

[ 3 ] 梁志宏,陈秀洪,罗欢,等.深圳湾水质时空分布特征及污染源解析[ J ]. 水资源保护, 2020, 36 ( 4 ): 93-99. ( LIANG Zhihong, CHEN Xiuhong, LUO Huan, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of water quality in Shenzhen Bay and pollution source analysis[ J ]. Water Resources Protection, 2020, 36 ( 4 ): 93-99. ( in Chinese ) )

[ 4 ] 苏程佳,陈晓宏,谭永强,等.潭江水质时空变化特征及其驱动因子[ J ]. 水资源保护, 2021, 37 ( 4 ): 109-116. ( SU Chengjia, CHEN Xiaohong, TAN Yongqiang, et al. Spatial and temporal variation characteristics of water quality in Tanjiang River and its driving factors[ J ]. Water Resources Protection, 2021, 37 ( 4 ): 109-116. ( in Chinese ) )

[ 5 ] 孙瑞瑞,吕文,顾林森,等.阳澄西湖人湖河道水质时空变化特征[ J ]. 水资源保护, 2021, 37 ( 4 ): 105-108. ( SUN Ruirui, LYU Wen, GU Linsen, et al. Spatial and temporal variation characteristics of water quality in rivers flowing into West Yangcheng Lake[ J ]. Water Resources Protection, 2021, 37 ( 4 ): 105-108. ( in Chinese ) )

[ 6 ] 尹海龙,徐祖信.河流综合水质评价方法比较研究[ J ]. 长江流域资源与环境, 2008, 17 ( 5 ): 729-733. ( YIN Hailong, XU Zuxin. Comparative study on typical river comprehensive water quality assessment methods [ J ]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17 ( 5 ): 729-733. ( in Chinese ) )

[ 7 ] 赖坤容,周维博.灰色关联分析在延安市宝塔区延河段水质评价中的应用[ J ]. 成都理工大学学报( 自然科学版 ), 2010, 37 ( 5 ): 570-573. ( LAI Kunrong, ZHOU Weibo. Application of the grey association analysis method to the Yanhe water environmental quality assessment in Yan'an, Shannxi, China[ J ]. Journal of Chengdu University of Technology ( Science & Technology Edition ), 2010, 37 ( 5 ): 570-573. ( in Chinese ) )

[ 8 ] 杨咏,徐盼盼,钱会,等.基于人工蜂群算法的 BP 双隐层神经网络水质模型[ J ]. 环境监测与技术管理, 2018, 30 ( 2 ): 21-26. ( YANG Mi, XU Panpan, QIAN Hui, et al. Water quality evaluation model based on artificial bee colony algorithm and BP double hidden layer neural network [ J ]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2018, 30 ( 2 ): 21-26. ( in Chinese ) )

- [9] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 321-325. (XU Zuxin. Single factor water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(3): 321-325. (in Chinese))
- [10] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 483-488. (XU Zuxin. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(3): 483-488. (in Chinese))
- [11] 林涛, 徐盼盼, 钱会, 等. 黄河宁夏段水质评价及其污染源分析[J]. 环境化学, 2017, 36(6): 1388-1396. (LIN Tao, XU Panpan, QIAN Hui, et al. Assessment of water quality and analysis of pollution source in Ningxia section of the Yellow River[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(6): 1388-1396. (in Chinese))
- [12] 富天乙, 邹志红, 王晓静. 基于多元统计和水质标识指数的辽阳太子河水质评价研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 473-480. (FU Tianyi, ZOU Zhihong, WANG Xiaojing. Water quality assessment for Taizi River watershed in Liaoyang section based on multivariate statistical analysis and water quality identification index[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(2): 473-480. (in Chinese))
- [13] 程卫国, 李亚斌, 苏燕, 等. 不同赋权方法的综合水质标识指数法对比分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(11): 93-99. (CHENG Weiguo, LI Yabin, SU Yan, et al. Comparative analysis of comprehensive water quality identification index method based on different weighting method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(11): 93-99. (in Chinese))
- [14] 张龙玲, 徐慧, 管桂玲, 等. 改进的综合水质标识指数法在上海市长宁区水质评价中的应用[J]. 水资源保护, 2014, 30(3): 81-85. (ZHANG Longling, XU Hui, GUAN Guiling, et al. Application of improved comprehensive water quality identification index method to evaluation of water quality in Changning District, Shanghai City[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(3): 81-85. (in Chinese))
- [15] 王涛, 魏亚妮, 钱会. 权重对水质模糊综合评价的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(2): 87-90. (WANG Tao, WEI Yani, QIAN Hui. Influence of different weights on fuzzy comprehensive evaluation method for water quality[J]. South-to-North Water Transfer Water Science & Technology, 2010, 8(2): 87-90. (in Chinese))
- [16] 王琳, 孙艺珂, 祁峰. 基于改进综合水质指数法的水库水质特征分析[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 174-180. (WANG Lin, SUN Yike, QI Feng. Analysis on water quality of reservoirs based on improved integrated water quality index method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 174-180. (in Chinese))
- [17] 张铨铨, 杨侃, 刘建林, 等. 基于组合赋权法的多元SPA-ITFN 模型在再生水评估中的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(10): 45-51. (ZHANG Chengcheng, YANG Kan, LIU Jianlin, et al. The application of Multi-SPA-ITFN model based on combination weighting method in reclaimed water assessment[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(10): 45-51. (in Chinese))
- [18] 史贵君, 郭力源, 林涛, 等. 深圳市降水变化特征及其未来变化情况预测分析[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(5): 28-33. (SHI Guijun, GUO Liyuan, LIN Tao, et al. Variation characteristics and future changes of precipitation in Shenzhen[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(5): 28-33. (in Chinese))
- [19] 党二莎, 唐俊逸, 周连宁, 等. 珠江口近岸海域水质状况评价及富营养化分析[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(4): 580-587. (DANG Ersha, TANG Junyi, ZHOU Lianing, et al. Water quality assessment and eutrophication analysis in coastal waters of Pearl River Estuary[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2019, 34(4): 580-587. (in Chinese))
- [20] 宋芳, 秦华鹏, 陈斯典, 等. 深圳河流域水污染源解析研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 317-328. (SONG Fang, QIN Huapeng, CHEN Sidian, et al. Water source apportionment of pollutions in Shenzhen Bay Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(2): 317-328. (in Chinese))
- [21] 刘旭拢, 邓孺孺, 许剑辉, 等. 近40年来珠江河口区海岸线时空变化特征及驱动力分析[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(10): 1336-1345. (LIU Xulong, DENG Ruru, XU Jianhui, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of coastlines and driving force analysis of the Pearl River Estuary in the past 40 years[J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(10): 1336-1345. (in Chinese))
- [22] 蔡文博, 韩宝龙, 逯非, 等. 全球四大湾区生态环境综合评价研究[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8392-8402. (CAI Wenbo, HAN Baolong, LU Fei, et al. Comprehensive evaluation of the eco-environment in the four global bay areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8392-8402. (in Chinese))
- [23] 李慧玲, 陈菁, 金秋, 等. 水闸规模对河道水动力水环境的影响研究[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 181-185. (LI Huiling, CHEN Jing, JIN Qiu, et al. Study on influence of sluice size on hydrodynamic and water environment of river channels[J]. Yangtze River, 2019, 50(2): 181-185. (in Chinese))
- [24] 周及, 关卫省, 付林涛. 基于多元统计的西安市河流水质评价及污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 79-84. (ZHOU Ji, GUAN Weisheng, FU Lintao. Water quality assessment and pollution source analysis of Xi'an river based on multivariate statistics[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 79-84. (in Chinese))

- 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)