

# 北江干流及主要支流水质及其时空变化特征

周铭浩<sup>1</sup>, 李彤<sup>1</sup>, 林学明<sup>2</sup>, 叶四化<sup>1</sup>, 张雪容<sup>1</sup>, 邓滢<sup>1</sup>

(1.广东省生态环境监测中心, 广东 广州 510308; 2.华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642)

**摘要:** [目的] 分析 2020 年北江干流及主要支流监测断面的水质情况, 为北江水环境监控及保护提供参考依据。[方法] 采用单因子评价法和主成分分析法, 研究北江水质时空变化趋势及驱动因素。[结果] 2020 年北江监测断面整体水质良好, 仅水车头、漫水河河口、黄浪水桥、龙归断面水质为 III—IV 类, 其他断面均为 II 类。北江水温和溶解氧受季节影响较大, 水体全年基本保持弱碱性, 下游营养盐和有机物污染程度高于上、中游。[结论] 由空间分析结果可知, 下游水质劣于上、中游, 其主要的影响因素是营养盐和溶解氧, pH 值单独作用不会对水质产生明显影响。季节污染程度排序为: 夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季, 其中全河段的水质主导因素为溶解氧, 而下游河段的主导因素为营养盐和有机物。

**关键词:** 北江; 水质评价; 主成分分析; 时空变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0111-10

中图分类号: X522

**文献参数:** 周铭浩, 李彤, 林学明, 等. 北江干流及主要支流水质及其时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 111-120. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.014; Zhou Minghao, Li Tong, Lin Xueming, et al. Water quality and spatial-temporal variation characteristics from main stream and main tributaries of North River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 111-120.

## Water Quality and Spatial-temporal Variation Characteristics from Main Stream and Main Tributaries of North River

Zhou Minghao<sup>1</sup>, Li Tong<sup>1</sup>, Lin Xueming<sup>2</sup>, Ye Sihua<sup>1</sup>, Zhang Xuerong<sup>1</sup>, Deng Ying<sup>1</sup>

(1. *Guangdong Ecological and Environmental Monitoring Center, Guangzhou, Guangdong 510308, China*;

2. *College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China*)

**Abstract:** [Objective] The water quality of the main stream and main tributary monitoring sections of the North River in 2020 was analyzed in order to provide a reference and basis for monitoring and protecting the water environment of the North River. [Methods] The single factor evaluation method and principal component analysis were used to determine the spatial and temporal trends and driving factors of water quality for the North River. [Results] In 2020, the overall water quality of the North River monitoring sections was good. Only the sections of Shuichetou, Manshui River estuary, Huanglongshui Bridge, and Longgui met the standards for water quality grades III—IV, and the other sections were determined to be grade II. Water temperature and dissolved oxygen in the North River were influenced by the seasons. The water body basically remained weakly alkaline throughout the year, and the pollution levels of nutrients and organic matter were higher downstream than at upstream and midstream locations. [Conclusion] Spatial analysis showed that downstream water quality was worse than upstream and midstream water quality. The main influencing factors were nutrients and dissolved oxygen. pH value alone did not have a significant impact on water quality. The seasonal pollution degree followed the order of summer > autumn > spring > winter. The dominant factor on water quality for the entire river was dissolved oxygen, while the dominant factors for the downstream river section were nutrients and organic matter.

**Keywords:** North River; water quality evaluation; principal component analysis; spatial-temporal variation

收稿日期: 2023-01-13

修回日期: 2023-03-14

资助项目: 广东省省级科技计划项目“农业面源污染绿色防控生态农场应用与示范”(2022B0202160007); 广东省自然科学基金项目“沼渣生物炭限域单原子铁活化过硫酸盐降解抗生素的效能及机制”(2022A1515010807); 广东省重点领域研发计划项目(2020B1111350001)

第一作者: 周铭浩(1990—), 男(汉族), 湖南省常德市人, 博士, 主要从事水生态环境质量监测与预警预报等研究。Email: 942414882@qq.com。

通信作者: 林学明(1989—), 男(汉族), 广东省汕尾市人, 博士, 副教授, 主要从事水生态环境修复等研究。Email: xm.lin@scau.edu.cn。

作为广东省 5 大河流之一,北江在该省的社会经济发展和生态安全方面具有重要地位。北江水资源丰富,年平均径流量达到  $4.82 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,是省内农业、工业、市政用水的重要水源<sup>[1]</sup>。北江流域是广东省“一核一带一区”区域发展格局中北部生态发展区的组成部分,其功能定位是省内的重要生态屏障<sup>[2]</sup>。近年来,北江流域(尤其下游接近珠江三角洲地区)的水域、林地、草地等面积逐渐下降,耕地面积逐渐上升,带来水环境污染风险<sup>[3]</sup>。北江干流繁多的水利工程也对河流的水生态环境造成不利影响<sup>[4]</sup>。了解北江水质的时空变化特征、分析水体污染源有助于提升水资源保护和管理的水平。

目前,水体水质分析评价方法主要包括单因子评价法、综合污染指数法、主成分分析法、灰色关联分析法、模糊数学评价法、人工神经网络等。国内外学者采用多种方法分析水体水质变化特征。李晓玉等<sup>[5]</sup>综合运用单因子评价法、综合污染指数法和主成分分析法对温榆河—北运河段进行水质分析,提取主导水质变化的影响因子;刘宇等<sup>[6]</sup>运用灰色关联分析法和主成分分析法分析了云南省抚仙湖、星云湖和杞麓湖的水质时空分布特征;武俐等<sup>[7]</sup>采用主成分分析法和模糊数学评价法综合分析了小浪底水库水质状况和影响因素;Garcia-Alba 等<sup>[8]</sup>运用人工神经网络分析了西班牙西北海岸河口水质时空分布特征。结合多种评价方法能够更全面地评价北江水质状况。本研究采用单因子评价法和灰色关联分析法对北江干流及主要支流水质进行分析评价。基于北江沿程 32 个监测断面 2020 年 1—12 月的逐月水质数据,使用主成分分析法探究了北江水质的空间和时间变化趋势,并结合北江沿岸环境特点讨论这些变化的驱动因素,以期为加强北江水环境监控、治理与保护提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

北江是珠江流域的第二大水系,发源于江西省信丰县石碣大茅坑,经大余县进入广东,在广东境内流经南雄市、始兴县、仁化县、浈江区、武江区、曲江区、英德市、清新区、清城区、三水区、四会市,在思贤滘注入珠江三角洲网河区。本次北江研究区域位于广东省境内( $112^{\circ}48'53''$ — $114^{\circ}41'09''\text{N}$ ,  $23^{\circ}09'13''$ — $25^{\circ}19'15''\text{E}$ ),主要支流包括墨江、锦江、武江、南水、滙水、连江、濠江、滨河、大燕河、漫水河、绥江等。其中,韶关市沙洲尾以上河段为北江上游、沙洲尾至清远市飞来峡河段为北江中游、飞来峡以下河段为北江下游。北江流域

多年平均降水量约为 1 800 mm,强降水大部分发生在汛期(5—8月),占年降水量 60%~70%<sup>[9]</sup>。目前,北江流域已建成孟洲坝水利枢纽、濠里水利枢纽、白石窑水利枢纽、飞来峡水利枢纽、清远水利枢纽、锦江水库、小坑水库、乐昌峡水利枢纽、南水水库、长湖水库、潭岭水库、锦潭水库共 12 宗大型水库,总库容为  $5.56 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。其中,孟洲坝、濠里、白石窑、飞来峡、清远水利枢纽位于北江干流,锦江水库、小坑水库、乐昌峡水利枢纽、南水水库、长湖水库、潭岭水库、锦潭水库分别位于北江支流锦江、枫湾河、武江、南水河、滙江、连江、黄洞河。此外,北江流域已建成中型水库 50 宗,总库容为  $1.61 \times 10^9 \text{ m}^3$ ;已建成小(一)型水库 184 宗,小(二)型水库 721 宗,总库容为  $2.61 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。北江流域水库群优化调度可带来防洪、供水、航运、旅游、环保等综合效益。

### 1.2 数据采集

本研究选取了北江干流及主要支流沿程 32 个断面作为研究对象,各监测断面位置和基本信息见图 1 和表 1。

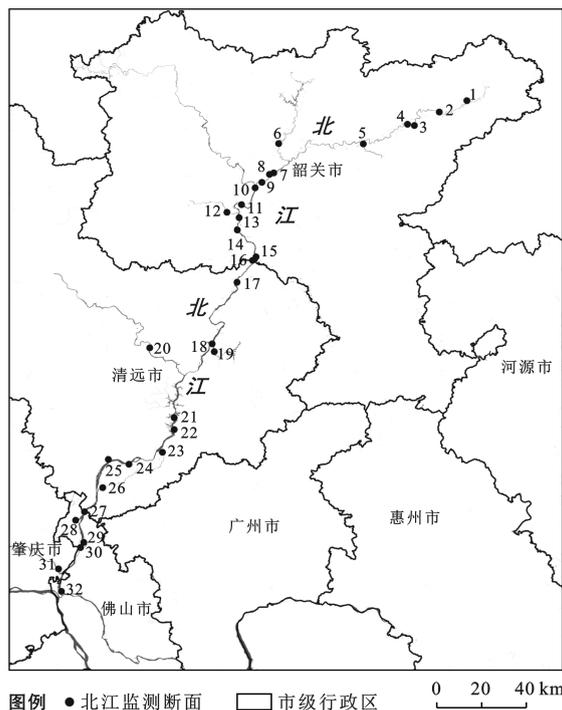


图 1 北江监测断面位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of monitoring section location in North River

2012—2021 年北江流域降雨量范围在 1 539~2 382 mm,平均降雨量为 1 959.7 mm;地表水资源量范围在  $3.65 \times 10^{10}$ ~ $6.45 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,平均地表水资源量为  $5.21 \times 10^{10} \text{ m}^3$ <sup>[10]</sup>。2020 年北江流域降雨量为 1 860.4 mm,地表水资源量为  $5.04 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,接近

2012—2021 年降雨量和地表水资源量的平均值,由此选择 2020 年水质数据研究北江水质状况的变化特征。监测断面 2020 年水质数据来源于广东省生态环境监测中心,水样采集方法依据《地表水环境质量监测技术规范》(HJ 91.2-2022)<sup>[11]</sup>,每月采样 1 次,水质监测指标包括《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中地表水环境质量标准基本项目 24 项。其中水温(WT)、溶解氧(DO)、pH 值、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总氮(TN)、总磷(TP)共 8 项指标均有完整检出值,作为主要分析指标。根据《水和废水监测分析方法》要求,WT 测定采用温度计法,DO 测定采用电化学探头

法,pH 值测定采用电极法,COD<sub>Mn</sub>测定采用酸性高锰酸盐法,BOD<sub>5</sub>测定采用稀释与接种法,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 测定采用纳氏试剂光度法,TN 测定采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法,TP 测定采用钼酸铵分光光度法<sup>[12]</sup>。由于北江流域所在的韶关市和清远市属于广东省“北部生态发展区”,控制建设重金属污染相关企业,且 2020 年研究断面的重金属铜、锌、汞、镉、六价铬、铅检出率仅 38.8%,所以本文主要研究居民生活及农业生产排放的相关水体污染物指标。上述 8 项水质监测指标中,WT,DO,pH 值属于基础理化指标,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,TP,TN 属于营养盐指标,COD<sub>Mn</sub>,BOD<sub>5</sub>属于有机物指标。

表 1 北江监测断面基本信息

Table 1 Basic information of investigated sections in North River

编号	河流	断面名称	编号	河流	断面名称
1	北江干流	河坪(上游)	17	北江干流	沙口(中游)
2	北江干流	南雄(上游)	18	北江干流	英德(中游)
3	北江干流	古市(上游)	19	滙江	滙江大坝(中游)
4	北江干流	小古藁(上游)	20	连江	高道(中游)
5	墨江	墨江出口(上游)	21	北江干流	黎溪(中游)
6	锦江	瑶山电站(上游)	22	北江干流	飞来峡水库(中游)
7	北江干流	长坝(上游)	23	滙江	滙江口(下游)
8	北江干流	黄浪水桥(上游)	24	北江干流	七星岗(下游)
9	北江干流	新韶水文站(上游)	25	滨河	飞水桥(下游)
10	武江	武江桥(上游)	26	大燕河	水车头(下游)
11	北江干流	九公里(中游)	27	北江干流	石角(下游)
12	北江干流	白土(中游)	28	漫水河	漫水河河口(下游)
13	南水	龙归(中游)	29	北江干流	北江水厂(下游)
14	北江干流	白沙(中游)	30	北江干流	芦苞(下游)
15	北江干流	大坑口(中游)	31	绥江	马房(下游)
16	北江干流	高桥(中游)	32	北江干流	梁村(下游)

### 1.3 数据分析及评价

采用单因子评价法对研究断面水质状况进行分析评价。单因子评价法根据《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》指标限制对水质进行分类,选取指标中最高类别作为水质评价结果<sup>[13-14]</sup>。

采用灰色关联分析法评价研究断面的水质状况。步骤为:①选择能体现水质变化情况的因子(DO, COD<sub>Mn</sub>, BOD<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP)作为参考序列,选择水质标准类别(I—V类)作为比较序列;②归一化及无量纲化处理所选水质数据;③根据沈珍瑶等<sup>[15]</sup>提出的方法计算绝对差;④使用平均值法求得关联度,并将关联度最大值所对应的标准作为研究断面的水质类别。

采用主成分分析法进一步分析北江研究区域

水质的主导影响因素。主成分分析法是通过重组和综合变量的方式,将相关性高的变量分在同一类因子中,这些新的公共因子保留了原来变量中存在的大部分变化,达到全面反映水质状况和污染因素的目的<sup>[16]</sup>。

本文利用软件 Excel 2021 处理所得试验数据,采用软件 ArcGIS Pro V2.5 和 Origin 2021 进行图形分析与绘制,利用软件 IBM SPSS Statistics 27 对数据进行主成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 北江干流及主要支流水质状况分析

由 2020 年北江干流及主要支流逐月监测数据可知水质指标波动较大,其中 WT 范围为 10~34℃,



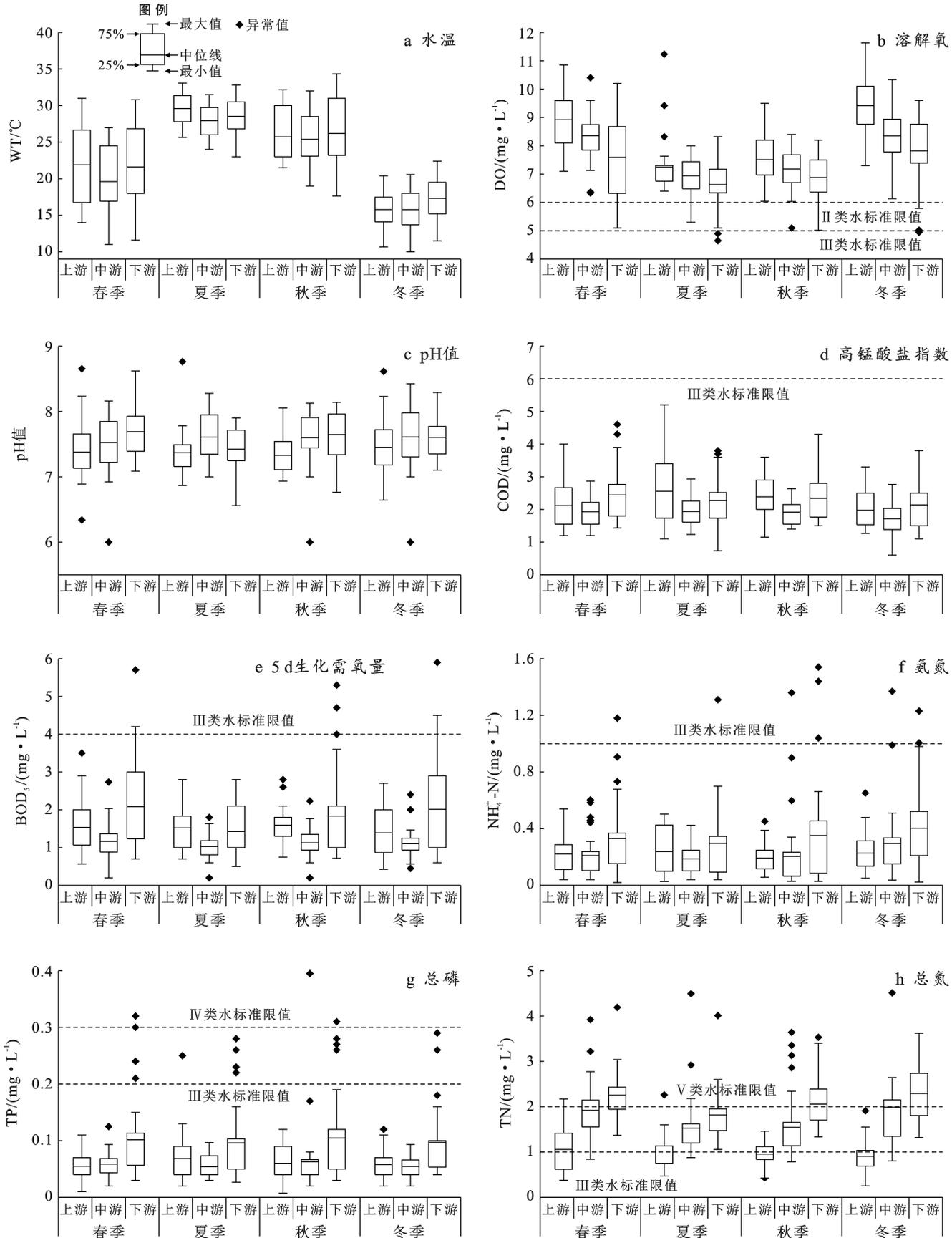


图 3 北江监测断面不同季节上中下游水质指标箱线图

Fig.3 Box plots of water quality indexes in upper, middle and lower reaches from North River monitoring section in different seasons

表 2 北江流域特征值及主成分贡献率

Table 2 Eigenvalue and contribution rate in principal component of North River

成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	总计	方差比例/%	累计/%	总计	方差比例/%	累计/%	总计	方差比例/%	累计/%
1	2.969	37.110	37.110	2.969	37.110	37.110	2.320	28.999	28.999
2	1.615	20.187	57.297	1.615	20.187	57.297	1.783	22.282	51.280
3	1.118	13.975	71.272	1.118	13.975	71.272	1.526	19.071	70.351
4	0.994	12.430	83.702	0.994	12.430	83.702	1.068	13.351	83.702
5	0.460	5.755	89.457						
6	0.360	4.497	93.954						
7	0.283	3.540	97.494						
8	0.200	2.506	100.000						

表 3 北江流域正交旋转因子载荷矩阵和特征值与方差贡献率

Table 3 Orthogonal rotation factor load matrix, eigenvalue and variance contribution rate of North River

水质指标	主成分			
	1	2	3	4
水温	-0.213	-0.008	<b>0.895</b>	0.070
pH 值	-0.019	-0.051	-0.055	<b>0.987</b>
溶解氧	-0.251	-0.150	<b>-0.833</b>	0.165
高锰酸盐指数	0.102	<b>0.870</b>	0.145	-0.156
5 d 生化需氧量	0.214	<b>0.870</b>	-0.013	0.074
氨氮	<b>0.874</b>	0.251	-0.027	-0.136
总磷	<b>0.774</b>	0.421	0.066	-0.053
总氮	<b>0.890</b>	-0.053	-0.010	0.103
特征值	2.320	1.783	1.526	1.068
方差/%	28.999	22.282	19.071	13.351
累积方差/%	28.999	51.280	70.351	83.702

注:加粗字体表示因子载荷绝对值 $\geq 0.7$ 。

### 2.3 水质空间变化特征

用表 4 中各水质指标的主成分载荷系数除以特征值的平方根,计算得到 4 个主成分中各水质指标相

$$F_1 = -0.054 X_1 + 0.018 X_2 - 0.072 X_3 - 0.100 X_4 - 0.061 X_5 + 0.253 X_6 + 0.197 X_7 + 0.311 X_8 \quad (1)$$

$$F_2 = -0.029 X_1 + 0.047 X_2 + 0.040 X_3 + 0.413 X_4 + 0.420 X_5 - 0.031 X_6 + 0.073 X_7 - 0.177 X_8 \quad (2)$$

$$F_3 = 0.494 X_1 + 0.039 X_2 - 0.440 X_3 + 0.002 X_4 - 0.068 X_5 - 0.026 X_6 + 0.015 X_7 + 0.023 X_8 \quad (3)$$

$$F_4 = 0.131 X_1 + 0.916 X_2 + 0.070 X_3 - 0.057 X_4 + 0.149 X_5 - 0.085 X_6 + 0.013 X_7 + 0.114 X_8 \quad (4)$$

$$F = \alpha_1/\alpha_{1-4} F_1 + \alpha_2/\alpha_{1-4} F_2 + \alpha_3/\alpha_{1-4} F_3 + \alpha_4/\alpha_{1-4} F_4 = 0.346 45 F_1 + 0.266 20 F_2 + 0.227 84 F_3 + 0.159 50 F_4 \quad (5)$$

式中: $F_n$  为第  $n$  个主成分得分; $X_n$  为第  $n$  个标准化水质数据; $X_1$  为水温; $X_2$  为 pH 值; $X_3$  为溶解氧; $X_4$  为高锰酸盐指数; $X_5$  为 5 d 生化需氧量; $X_6$  为氨氮; $X_7$  为总磷; $X_8$  为总氮; $F$  为主成分分析综合得分。

由公式(1)~(5)计算得出北江监测断面的主成分/综合得分及其排名见图 4。监测断面得分越高,则排名越前,水质越差。由图 4 可知,北江上、中游监

应的特征向量,再以各水质指标的相关矩阵特征向量为权重构建 4 个主成分的函数表达式见公式(1)~(4)。将各主成分的方差贡献率  $\alpha_1$  (28.999%),  $\alpha_2$  (22.282%),  $\alpha_3$  (19.071%),  $\alpha_4$  (13.351%) 与总方差贡献率  $\alpha_{1-4}$  (83.702%) 的比值作为权数,得出主成分综合评价模型,如公式(5)所示。

表 4 北江流域主成分在各水质指标上旋转后的因子载荷矩阵

Table 4 Rotated component matrix of principal components on water quality indicators of North River

水质指标	载荷系数值			
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4
水温	-0.083	-0.039	0.61	0.135
pH 值	0.027	0.063	0.048	0.947
溶解氧	-0.11	0.053	-0.544	0.072
高锰酸盐指数	-0.153	0.551	0.002	-0.059
5 d 生化需氧量	-0.093	0.561	-0.084	0.154
氨氮	0.386	-0.041	-0.032	-0.088
总磷	0.3	0.098	0.018	0.013
总氮	0.473	-0.236	0.029	0.118

测断面中,仅黄浪水桥、龙归和滙江大坝断面的综合得分大于零,其中黄浪水桥水质主要受到主成分 2 的影响,龙归受到主成分 1 的影响,滙江大坝受到主成分 1 和 3 的影响。北江下游监测断面中,仅七星岗和马房断面综合得分小于零,其余断面大于零,总体水质劣于上、中游。其中,滙江口和水车头水质受到 4 个主成分的影响,漫水河口受到前 3 个主成分的影响,北江水厂受到主成分 1,3,4 的影响,飞水桥、石角

和芦苇受到主成分 3 和 4 的影响,梁村和马房受到主成分 1 和 3 的影响,七星岗则受到主成分 4 的影响。

由此可知,营养盐和 DO 是北江下游水质较差的重要因素。

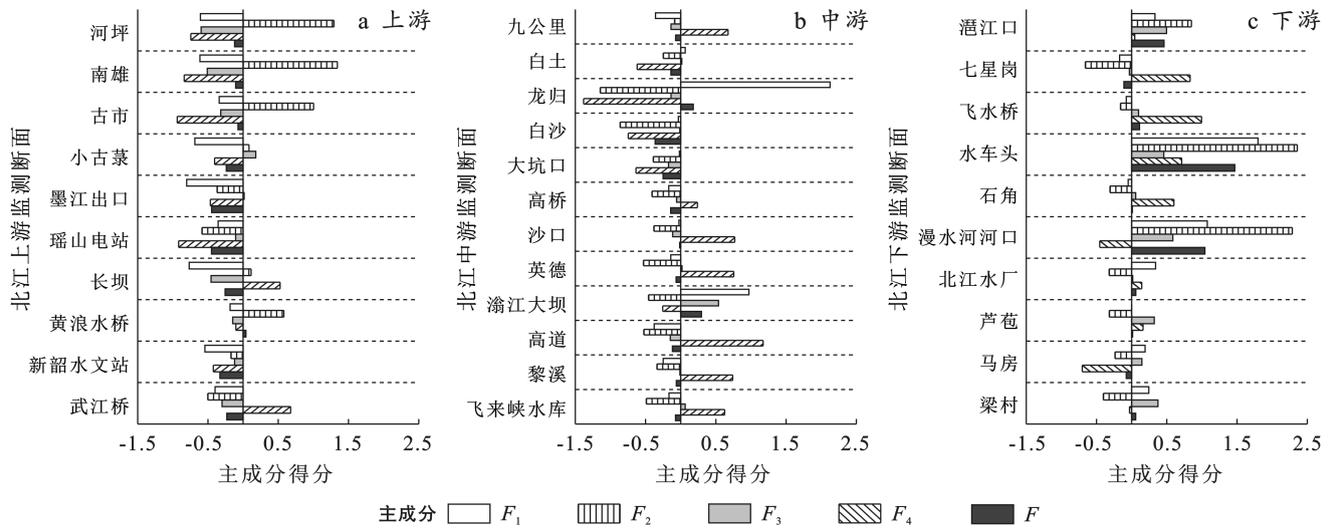


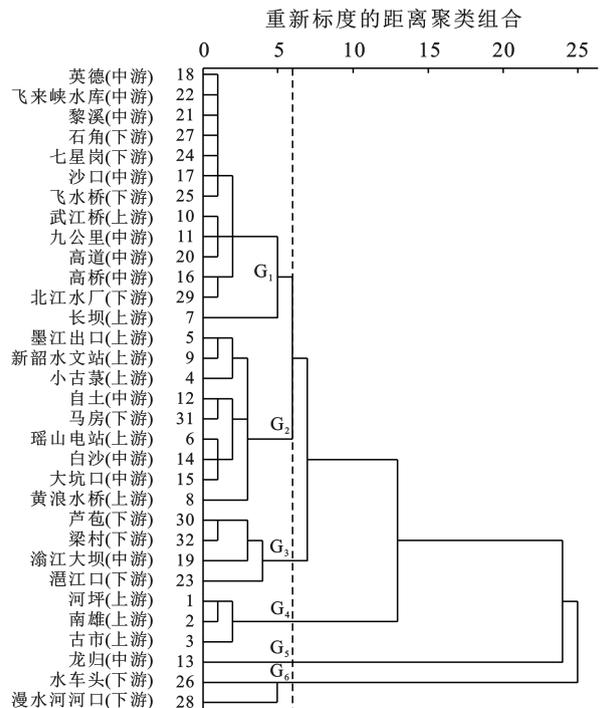
图 4 北江监测断面沿程主成分评价结果

Fig.4 Evaluation results of principal components along monitoring section from North River

为了明晰北江水质的空间差异性,采用 IBM SPSS Statistics 27 软件对 2020 年北江干流及支流 32 个监测断面的 4 个主成分得分进行系统聚类分析,得到聚类分析结果树状图(图 5)。

含水车头、漫水河河口 2 个断面,共同特征是主成分 1,2,3 得分均较高,即水质受到营养盐、有机物和 DO 的严重影响,表明该区域受到生活污水和农业面源污染的联合作用,水体污染程度高。

当欧式距离为 6 时,可将其分为 6 个组别。结合图 4 分析可知,第 1 组(G<sub>1</sub>)包含长坝、武江桥、九公里、高桥、沙口、英德、高道、黎溪、飞来峡水库、七星岗、飞水桥、石角、北江水厂 13 个断面,共同的特征是主成分 4 得分较高,即水质主要受到 pH 值的影响,该组别水质总体良好。其中下游断面飞水桥和石角叠加 DO 的影响,北江水厂叠加 DO 和营养盐的影响,水质较差。第 2 组(G<sub>2</sub>)包含小古茭、墨江出口、瑶山电站、黄浪水桥、新韶水文站、白土、白沙、大坑口、马房 9 个断面,共同特征是主成分 4 得分较低,总体水质良好,仅黄浪水桥断面受到有机物影响导致水质较差。第 3 组(G<sub>3</sub>)包含滙江大坝、滙江口、芦苇、梁村 4 个断面,共同特征是主成分 1,3 得分较高,即水质主要受到营养盐和 DO 的影响,营养盐中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 是重要的耗氧指标。第 4 组(G<sub>4</sub>)包含河坪、南雄、古市 3 个断面,共同特征是主成分 2 得分较高,其他主成分得分较低,主要的影响因素是有机污染物,总体水质良好。这 3 个断面所在的上游区域存在大片林地和草地,水体中有机物主要来源于沿岸茂密的植被<sup>[3,26]</sup>。第 5 组(G<sub>5</sub>)包含龙归断面,主要特征是主成分 1 得分最高,其他成分得分较低,由此可知该区域主要受到农业面源无机肥的污染<sup>[27]</sup>。第 6 组(G<sub>6</sub>)包



注:图中 G<sub>1</sub>—G<sub>5</sub> 为聚类分组序号。

图 5 北江监测断面聚类分析结果树状图

Fig.5 Dendrogram of cluster analysis results of monitoring section from North River

通过分析可知,  $G_1$  和  $G_2$  的 pH 值具有显著性, 但是单独作用不会对水质造成明显影响, 水质较差的上游断面黄浪水桥及下游断面飞水桥、石角、北江水厂均叠加了其他主成分的作用;  $G_3$  显示中游断面滄江大坝与下游断面濠江口、芦苞、梁村均因营养盐和 DO 的联合作用导致水质较差;  $G_4$  显示上游断面河坪、南雄、古市受到有机物的影响, 但未对断面水质造成严重影响;  $G_6$  显示下游断面水车头和漫水河河口污染类型有别于其他断面, 水质较差源于营养盐、有机物、DO 的联合作用。主成分得分聚类分析揭示了北江不同河段监测断面污染因素的相似性。

## 2.4 水质时间变化特征

在北江监测断面主成分分析的基础上, 根据综合得分模型计算不同季节、河段主成分得分, 结果见表 5。使用主成分 1 ( $PC_1$ ) 和主成分 2 ( $PC_2$ ) 建立载荷与得分图, 以分析北江不同季节主导水质成分, 主成分 1 和主成分 2 解释了接近 60% 的方差 (图 6a)。图中水质指标因子的带箭头线段越长, 表示载荷越大, 越能影响监测断面的排序; 带箭头线段之间的夹角为锐角, 表明相关水质指标因子之间呈正相关关系, 否则呈负相关关系; 椭圆为各季节监测断面样本 95% 置信区间<sup>[28]</sup>。

表 5 北江不同季节主成分得分结果

Table 5 Principal component scores of North River in varying seasons

季节	河段	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F$
春	上游	-0.527	0.197	-0.658	-0.341	-0.334
	中游	0.040	-0.380	-0.564	-0.030	-0.221
	下游	0.362	0.601	-0.095	0.500	0.344
	全河段	-0.036	0.107	-0.447	0.038	-0.080
夏	上游	-0.528	0.435	0.858	-0.334	0.075
	中游	-0.160	-0.491	0.911	0.208	0.055
	下游	0.182	-0.011	1.055	-0.178	0.272
	全河段	-0.168	-0.052	0.939	-0.082	0.129
秋	上游	-0.586	0.392	0.335	-0.467	-0.097
	中游	-0.081	-0.402	0.540	0.163	0.014
	下游	0.366	0.331	0.695	0.394	0.436
	全河段	-0.099	0.075	0.524	0.038	0.111
冬	上游	-0.480	0.090	-1.479	-0.312	-0.529
	中游	0.741	-0.685	-0.939	0.103	-0.123
	下游	0.564	0.316	-0.647	0.206	0.165
	全河段	0.304	-0.130	-1.017	0.005	-0.160

注:  $F_n$  为第  $n$  个主成分得分;  $F$  为主成分分析综合得分。

由表 5 和图 6a 可知, 夏季和冬季北江水质差异最大, 水体污染季节排序为: 夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。由季节变化考察水质污染主导成分, 可知夏、秋两季的主导成分是 DO, 由夏转秋的过程中 DO 的影

响力逐步下降, 营养盐和有机物的作用逐渐上升。如前所述, 夏季 WT 在四季中偏高 (图 3a), 导致水体中 DO 的含量偏低, 进而影响水质<sup>[29]</sup>。WT 与 DO 之间的负相关关系也在图 6a 中得到证实。北江流域的降雨主要集中于夏季, 不仅会形成地表径流, 使陆地上的营养物质和有机物进入水体, 也会增加水体水量, 稀释其中的污染物浓度<sup>[30]</sup>。由此可知, 北江全河段夏季降雨的稀释作用降低了陆源营养物和有机物的污染性, 秋季降雨量减弱则提高了水体营养物和有机物的浓度。相比于夏、秋季, 冬、春季的水质明显提高。如表 5 所示, 冬季的主导污染成分是营养盐, 而春季的主导成分则变为有机污染物, 但是低温带来的高 DO 条件提升了水体的质量。冬季水温下降, 水生植物的衰亡不仅降低营养盐的吸收能力, 而且会释放氮、磷物质, 导致水体中营养盐浓度上升<sup>[31]</sup>; 春季水温有所回升, 水生植物逐渐恢复, 并通过光合作用把营养物质转化为有机物<sup>[32]</sup>。综上所述, 对北江全河段而言, 营养物和有机物对水体水质的影响较弱, 季节、温度变化引起的 DO 浓度差异是水质变化的主导因素。

图 6b—6e 置信椭圆表示不同季节各河段水质样本的协方差结构。结合表 5 可知各季节水体污染排序大致为: 下游 > 中游 > 上游, 仅夏季中游水质稍好于上游。研究发现北江中游两岸植被林地和草地较多, 耕地和居民生活区相对较少<sup>[3]</sup>。夏季较大的雨量所产生的稀释作用进一步优化了该河段的水体质量。各季节上、中游河段水质的主导成分是 DO, 与全河段基本一致; 下游河段夏、秋季体现营养盐、有机物与 DO 共同污染作用, 冬、春季则体现营养盐和有机物的主导污染作用。

## 3 讨论

北江流域地形多为山地与丘陵, 地势北高南低, 经过飞来峡后河道逐渐平缓。20 世纪 90 年代以来, 北江干流由上至下开发建设孟州坝、濠里、白石窑、飞来峡、清远等梯级水坝, 坝址多年平均径流量依次为  $1.30 \times 10^{10}$ ,  $1.61 \times 10^{10}$ ,  $1.68 \times 10^{10}$ ,  $3.47 \times 10^{10}$ ,  $4.04 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。梯级水库群建设降低了水流流速, 有助于提高北江干流堤防稳定性, 但也可能影响陆源污染物在水体中的稀释扩散作用, 降低水体纳污降解能力。北江干流流经韶关、清远、肇庆、佛山中的 11 个区县, 总面积  $2.08 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 人口约  $6.14 \times 10^6$  人, 上游、中游和下游沿岸人口密度分别为 200, 220, 738 人/ $\text{km}^2$ 。北江流域生产活动基本以种植业、畜禽养殖业、水产养殖业等农业生产为主。流域降雨强度较大, 一方面会导致种植业农药化肥、养殖业粪污以及

农村生活污染物等面源污染进入河流,降低水体质量,另一方面又会增加河流水流量,降低污染水平。由

于北江流域水量较大,且人口密度较低,生产生活带来的污染强度较低,总体来看水质良好。

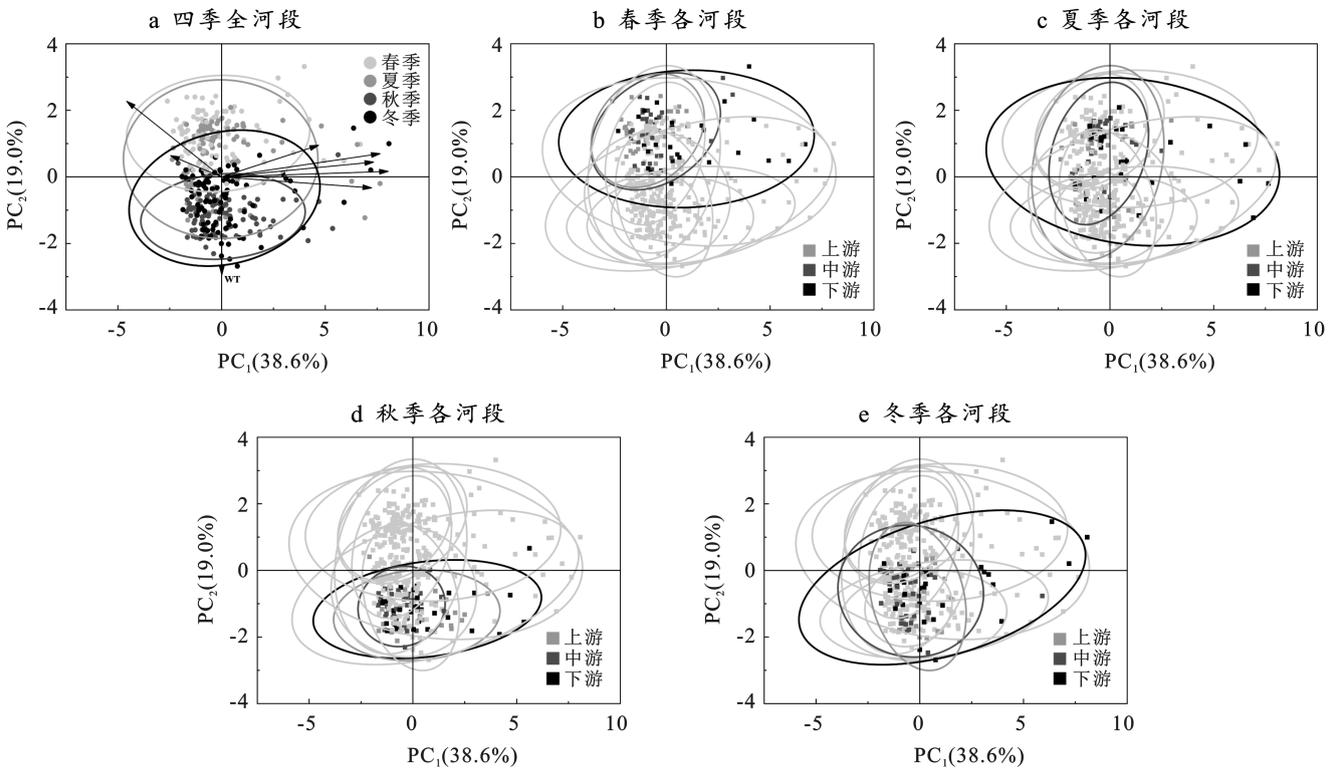


图 6 北江不同季节水质分布特征

Fig.6 Water quality distribution of North River in varying seasons

本文分析发现,北江下游水质总体劣于上中游,主要的污染指标为营养盐和 DO,表明下游较高的人口密度提升了生产生活污染强度,污染物带有明显的农业面源特征。

此外,研究发现下游断面水车头及漫水河河口指示的大燕河及漫水河有机物污染较为显著,表明这两条北江支流沿岸污染物排放量较大、收集能力较弱,亟需建设污水管网等收集设施,降低污染物入河率。广东省的主要粮食作物是水稻。早稻种植时间段为 4—7 月,晚稻种植时间段为 8—11 月,种植过程中包含基肥、蘖肥、穗肥、粒肥 4 个施肥阶段。尿素和磷酸二氢钾是重要的氮磷肥料。由此可知,夏季、秋季及春季部分时间会产生较强的农业面源氮磷污染。北江流域主要位于韶关和清远,可根据两市的月降雨量计算北江流域不同季节降雨情况(图 7)。北江流域春季、夏季、秋季、冬季降雨量分别为 1 364.9, 1 315.3,399.2,421 mm。由表 5 可知,北江全河段污染程度季节排序为:夏季>秋季>春季>冬季。夏季降雨量高于秋季,叠加种植业施肥过程影响,导致北江夏季污染程度高于秋季;尽管春季降雨量居于四季首位,但只有部分时段与施肥时间段重合,所以春季

污染程度低于夏秋两季;冬季降雨量较少,且处于农闲期,污染程度最低。

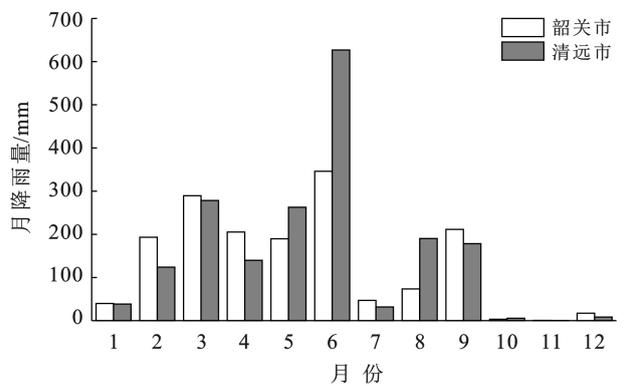


图 7 2020 年韶关和清远月降雨量

Fig.7 Monthly rainfall of Shaoguan and Qingyuan in 2020

### 4 结论

(1) 2020 年北江干流及主要支流整体水质良好, 32 个监测断面中,按单因子评价法分析,水车头及漫水河河口断面达到Ⅳ类水质标准,黄浪水桥及龙归断面达到Ⅲ类水质标准,其他干支流断面水质均为Ⅱ类。根据箱线图可知,季节变化对 WT 和 DO 的影响

较为显著,水体总体保持弱碱性,上、中游营养盐和有机物指标普遍优于下游。

(2) 使用主成分分析法研究 8 项主要监测指标,北江研究区域主要受到 4 个主成分的影响,其方差贡献率分别为 28.999%,22.282%,19.071%,13.351%,其中第一主成分反映水体营养盐信息,第二主成分反映水体有机物信息,第三、四主成分反映水体理化性质。

(3) 通过北江监测断面的主成分/综合得分,得出水质空间变化状况,总体呈现下游比上、中游污染大的趋势,营养盐和 DO 是下游水质的重要影响因素。由 4 个主成分得分的系统聚类分析可得出不同监测断面之间污染因素的相似性,pH 值单独作用不会对水质产生明显影响。

(4) 根据综合得分模型分析季节变化对北江河段的影响,可知全河段夏季和冬季的水质差异最大,污染程度季节排序为:夏季>秋季>春季>冬季,水质主导因素是 DO;下游河段夏、秋季水质由营养盐、有机物和 DO 共同作用,冬、春季水质则主要受到营养盐和有机物的影响。

#### [参 考 文 献]

- [1] 赵清贺,冀晓玉,丁圣彦,等.北江干流河岸带植物物种多样性的纵向梯度效应[J].生态学杂志,2018,37(12):3654-3660.
- [2] 吴锦泽,王明旭,叶晓颖.广东省北部生态发展区保护与发展协同共进研究[J].环境与可持续发展,2021,46(6):69-74.
- [3] 黎明.基于 SWAT 的北江流域土地覆盖及气象条件变化的水文响应模拟研究[D].广东 广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所),2015.
- [4] 高雪山,刘树锋,贾建辉,等.基于生态水力半径法的武江流域生态流量研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(2):8-12.
- [5] 李晓玉,王鹏,邵光艺,等.基于水面无人船快速监测的温榆河—北运河水质分析与评价[J].环境化学,2022,41(5):1568-1578.
- [6] 刘宇,吉正元,刘淑娟,等.三种方法在高原湖泊水质评价中的应用与比较[J].海洋湖沼通报,2020(2):166-174.
- [7] 武俐,王祖恒,王亮,等.基于主成分分析和模糊数学的黄河小浪底水质监测与评价[J].水土保持通报,2020,40(5):118-124.
- [8] García-Alba J, Bárcena J F, Ugarteburu C, et al. Artificial neural networks as emulators of process-based models to analyse bathing water quality in estuaries [J]. Water Research, 2019,150:283-295.
- [9] 王亚雄,黄淑娴,刘祖发,等.变化环境下北江下游年径流量的加权马尔可夫链预测[J].生态环境学报,2011,20

(4):754-760.

- [10] 广东省水利厅.水资源公报 [EB/OL] [2023-7-30].  
<http://slt.gd.gov.cn/szygb/index.html>.
- [11] 中华人民共和国生态环境部.地表水环境质量监测技术规范:HJ 91.2—2022[S].北京:中国环境科学出版社,2022.
- [12] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [13] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [14] 罗平平,武阳,王双涛,等.沱河流域水质的时空对比分析[J].水资源与水工程学报,2021,32(5):35-41.
- [15] 沈珍瑶,谢彤芳.一种改进的灰关联分析方法及其在水环境质量评价中的应用[J].水文,1997,17(3):13-15.
- [16] 丁启振,周金龙,季彦桢,等.石河子—昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析[J].环境科学,2023,44(3):1440-1451.
- [17] Moore R, Spittlehouse D, Story A. Riparian microclimate and stream temperature response to forest harvesting: a review [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2005,41(4):813-834.
- [18] 豆高飞.长江水热情势变化及其鱼类影响研究[D].河南 郑州:华北水利水电大学,2021.
- [19] 黄炜惠,马春子,李文攀,等.我国地表水溶解氧时空变化及其对全球变暖的响应[J].环境科学学报,2021,41(5):1970-1980.
- [20] 杨艾琳,杨芳,李少斌,等.福建省流域—近海溶解氧时空格局与低氧调控机制[J].环境科学,2022,43(11):4950-4960.
- [21] 岑言霸,苏斌,冯泽波,等.滇池入湖河流 pH 时空分异特征及其变化机理[J].科学技术与工程,2021,21(26):11432-11442.
- [22] Ravish S, Setia B, Deswal S. Groundwater quality analysis of Northeastern Haryana using multivariate statistical techniques [J]. Journal of the Geological Society of India, 2020,95(4):407-416.
- [23] 房丽晶,高瑞忠,贾德彬,等.草原流域地下水化学时空特征及环境驱动因素:以内蒙古巴拉格河河流域为例[J].中国环境科学,2021,41(5):2161-2169.
- [24] Zhang Shuang, Yang Dong, Li Fanglin, et al. Determination of regional soil geochemical baselines for trace metals with principal component regression: a case study in the Jiangnan plain, China [J]. Applied Geochemistry, 2014,48:193-206.
- [25] Xu Panpan, Zhang Qiyang, 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.

- 219-229.
- [8] 王渊,赵宇豪,吴健生.基于 Google Earth Engine 云计算的城市群生态质量长时序动态监测:以粤港澳大湾区为例[J].生态学报,2020,40(23):8461-8473.
- [9] 陈炜,黄慧萍,田亦陈,等.基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析[J].地球信息科学学报,2019,21(9):1382-1391.
- [10] Ji Jianwan, Wang Shixin, Zhou Yi, et al. Spatio-temporal change and landscape pattern variation of eco-environmental quality in Jing-Jin-Ji urban agglomeration from 2001 to 2015 [J]. IEEE Access, 2020, 8:125534-125548.
- [11] 李红星,黄解军,梁友嘉等.基于遥感生态指数的武汉市生态环境质量评估[J].云南大学学报(自然科学版),2020,42(1):81-90.
- [12] 岳奕帆,陈国鹏,王立,等.基于 Google Earth Engine 云平台的甘肃舟曲县生态环境质量动态监测与评价[J].应用生态学报,2022,33(6):1608-1614.
- [13] 付东杰,肖寒,苏奋振等.遥感云计算平台发展及地球科学应用[J].遥感学报,2021,25(1):220-230.
- [14] Noel Gorelick, Matt Hancher, Mike Dixon, et al. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone [J]. Remote Sensing of Environment, 2017,202:18-27.
- [15] 吴婧.基于 GIS 及 RS 的南宁市生态环境质量评价研究[D].广西南宁:南宁师范大学,2021.
- [16] 杨坤士,卢远,翁月梅,等.Google Earth Engine 平台支持下的南流江流域生态环境质量动态监测[J].农业资源与环境学报,2021,38(6):1112-1121.
- [17] 程志峰,何祺胜.基于 RSEI 的苏锡常城市群生态环境遥感评价[J].遥感技术与应用,2019,34(3):531-539.
- [18] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):589-595.
- [19] 钟欣呈,许泉立.基于 RSEI 模型的玉溪市生态环境变化监测与评价[J].水土保持研究,2021,28(4):350-357.
- [20] 刘林甫,盛艳,秦富仓,等.基于 RSEI 模型的砭砂岩区生态环境质量演变研究[J].水土保持通报,2022,42(1):233-239.
- [21] 王丽春,焦黎,来风兵,张乃明.基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价[J].生态学报,2019,39(8):2963-2972.
- [22] Shan Wei, Jin Xiaobin, Ren Jie, et al. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,239:118126.
- [23] Xu Hanqiu, Wang Yifan, Guan Huade, et al. Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis [J]. Remote Sensing, 2019,11(20):2345.
- [24] 吴可人,高祺,王让会等.基于 RSEI 模型的石家庄生态环境质量评价[J].地球物理学进展,2021,36(3):968-976.
- [25] 王志超,何新华.基于植被覆盖度和遥感生态指数的成都市锦江区生态质量评估[J].生态与农村环境学报,2021,37(4):492-500.
- [26] Guo Beibei, Fang Yelin, Jin Xiaobin, et al. 2020. Monitoring the effects of land consolidation on the ecological environmental quality based on remote sensing: a case study of Chaohu Lake basin, China [J]. Land Use Policy, 2020,95:104569.
- [27] Wang Le, Diao Chunyuan, Xian George, et al. A summary of the special issue on remote sensing of land change science with Google Earth Engine [J]. Remote Sensing of Environment, 2020,248:112002.

(上接第 120 页)

- [26] 李越.滦河流域(承德市境内)典型污染物超标原因解析研究[D].河北 邯郸:河北工程大学,2021.
- [27] 徐文.西南涌农业面源污染特征与控制[D].广东 广州:广东工业大学,2011.
- [28] 刘贤梅,周忠发,张昊天,等.基于主成分分析的喀斯特山区河流水质评价及水质时空特征分析:以贵州省张维河为例[J].环境工程,2019,37(10):49-54.
- [29] 张馨月,马沛明,高千红,等.三峡大坝上下游水质时空变化特征[J].湖泊科学,2019,31(3):633-645.
- [30] 唐磊,刘彦鹏,王宝明,等.常州滨江区域城镇径流污染对河道水质的影响[J].中国给水排水,2022,38(12):53-60.
- [31] 陈洪森,叶春,李春华,等.入湖河口区水生植物群落衰亡分解释放营养盐过程模拟研究[J].环境工程技术学报,2020,10(2):220-228.
- [32] 汪欣,何尚卫,潘继征,等.水生植物恢复对宛山荡水质及水体微生物代谢功能多样性的影响[J].生态与农村环境学报,2021,37(10):1352-1360.