



基于APCS-MLR模型的九洲江广东段不同水期水质变化特征及污染来源解析

张文博, 余香英, 薛弘涛, 刘晋涛, 蒋婧媛, 熊津晶

引用本文:

张文博, 余香英, 薛弘涛, 刘晋涛, 蒋婧媛, 熊津晶. 基于APCS-MLR模型的九洲江广东段不同水期水质变化特征及污染来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(2): 401–410.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0424>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[大伙房水库控制流域水质变化及污染源识别](#)

韩爽, 夏春龙, 王永东, 蔡喜运

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1568–1575 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0234>

[大沽河溶解态无机氮时空分布特征及来源探讨](#)

夏云, 张波涛, 姜德娟

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 182–190 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0809>

[东北典型湖泊沉积物氮磷和重金属分布特征及其污染评价研究](#)

刘丽娜, 马春子, 张靖天, 何卓识, 霍守亮, 席北斗

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 520–529 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1131>

[汉江流域农业面源污染的源解析](#)

唐肖阳, 唐德善, 鲁佳慧, 常文倩, 唐新玥

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2242–2251 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1751>

[基于APCS-MLR受体模型的农田土壤重金属源解析](#)

霍明珠, 高秉博, 乔冬云, SainbuyanBayarsaikhan, 安毅, 霍莉莉

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 978–986 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1277>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张文博, 余香英, 薛弘涛, 等. 基于APCS-MLR模型的九洲江广东段不同水期水质变化特征及污染来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 401–410.

ZHANG W B, YU X Y, XUE H T, et al. Characteristics of water quality and pollution source apportionment in wet season and dry season based on absolute principal component score–multiple linear regression in Guangdong section of Jiuzhou River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(2): 401–410.



开放科学 OSID

基于APCS-MLR模型的九洲江广东段不同水期水质变化特征及污染来源解析

张文博^{1,2}, 余香英^{1,2*}, 薛弘涛^{1,2}, 刘晋涛^{1,2}, 蒋婧媛^{1,2}, 熊津晶^{1,2}

(1. 广东省环境科学研究院, 广州 510000; 2. 粤港澳环境质量协同创新联合实验室, 广州 510000)

摘要:为探究九洲江广东段水质变化特征及其污染来源,选取了2021—2022年九洲江营仔国考断面自动站逐日水质数据,利用相关性分析、绝对主成分-多元线性回归(APCS-MLR)模型对九洲江不同水期水质特征及污染来源进行了研究。结果表明:九洲江营仔断面丰水期水质相对较差,高锰酸盐指数、总磷和浊度相较枯水期显著升高,溶解氧、pH相较枯水期显著下降;不同水期水质指标存在一定差异,与枯水期相比,丰水期pH、溶解氧和浊度与其他水质指标的相关性有所增加,而高锰酸盐指数、氨氮、总磷和总氮指标间的相关性有所减小;枯水期畜禽养殖源+城镇生活源对总磷、氨氮和总氮的绝对贡献率分别为58.47%、48.71%和44.14%,未识别污染源对高锰酸盐指数、水温、pH和电导率的绝对贡献率分别为63.08%、59.48%、54.90%和52.65%;丰水期农业面源+城镇面源对总氮、总磷和高锰酸盐指数的绝对贡献率分别为51.96%、41.38%和34.78%,气象因子对溶解氧、pH和氨氮的绝对贡献率分别为55.66%、40.75%和31.87%。综合来看,九洲江广东段水质指标枯水期主要受畜禽养殖源+城镇生活源和未识别污染源的影响,丰水期主要受农业面源+城镇面源和气象因子影响,故九洲江广东段水质管控不仅要加强畜禽养殖污染治理、城镇污水管网完善,还应注重保障生态流量、削减汛期面源污染等工作。

关键词:绝对主成分-多元线性回归模型; 污染源解析; 不同水期; 九洲江

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)02-0401-10 doi:10.11654/jaes.2023-0424

Characteristics of water quality and pollution source apportionment in wet season and dry season based on absolute principal component score–multiple linear regression in Guangdong section of Jiuzhou River

ZHANG Wenbo^{1,2}, YU Xiangying^{1,2*}, XUE Hongtao^{1,2}, LIU Jintao^{1,2}, JIANG Jingyuan^{1,2}, XIONG Jinjing^{1,2}

(1. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510000, China; 2. Guangdong–Hongkong–Macau Joint Laboratory of Collaborative Innovation for Environmental Quality, Guangzhou 510000, China)

Abstract: To explore the characteristics of water quality and identify the pollution sources in Guangdong section of Jiuzhou River during wet season and dry seasons, the daily monitoring data of Yingzai national examination section of Jiuzhou River were chosen. The characteristics of water quality and pollution sources in wet and dry seasons were analyzed by using correlation analysis and absolute principal components–multiple linear regression model (APCS-MLR). The results showed that the values of permanganate index, total phosphorus, and turbidity in wet season were higher than those in dry season. However, the values of dissolved oxygen and pH in wet

收稿日期:2023-05-30 录用日期:2023-11-07

作者简介: 张文博(1991—), 男, 安徽蚌埠人, 硕士, 工程师, 主要从事水环境保护与管理研究。E-mail: wenbozhang91@163.com

*通信作者: 余香英 E-mail: tinyfishxy@pku.org.cn

基金项目: 国家水体污染防治与治理科技重大专项(2015ZX07206-006-01); 广东省重点领域研发计划项目(2020B1111020002); 广东省环境科学研究院科技创新项目(HKYKJ-202201)

Project supported: National Water Pollution Control and Management Technology Major Projects (2015ZX07206-006-01); Key Technologies Research and Development Program of Guangdong Province (2020B1111020002); Science and Technology Innovation Program of Guangdong Provincial Academy of Environmental Science (HKYKJ-202201)

season were lower than those in dry season. Compared to the dry season, the correlations between pH, dissolved oxygen, turbidity, and other water quality indexes increased in wet season while the correlations between permanganate index, ammonia nitrogen, total phosphorus, and total nitrogen in wet season decreased significantly than those in dry season. During the dry season, the livestock and poultry breeding sources and urban living sources contributed 58.47%, 48.71%, and 44.14%, of total phosphorus, ammonia nitrogen, and total nitrogen, respectively. In the dry season, the absolute contribution rate of unidentified pollution sources to permanganate index, water temperature, pH, and conductivity were 63.08%, 59.48%, 54.90%, and 52.65%, respectively. During the wet season, the absolute contribution rate of agricultural non-point sources to total nitrogen, total phosphorus, and permanganate index were 51.96%, 41.38%, and 34.78%, respectively. The absolute contribution rates of meteorological factors to dissolved oxygen, pH, and ammonia nitrogen in wet season were 55.66%, 40.75%, and 31.87%, respectively. In conclusion, the water quality indexes of Jiuzhou River were greatly affected by livestock and poultry breeding sources and unidentified pollution sources in dry season. In the wet season the main pollution sources of Jiuzhou River were agricultural non-point sources, urban non-point sources, and meteorological factors. To improve the water quality of Guangdong section of Jiuzhou River, the following tasks must be completed: control of livestock and poultry breeding pollution, improvement of the urban sewage network, scientific protection of ecological flow, and reduction of non-point source pollution during flood season.

Keywords: APCS-MLR; source apportionment; wet and dry season; Jiuzhou River

近年来,国家和各级政府部门高度重视生态环境保护工作,水污染防治取得了一定成效,但部分流域和断面改善基础仍不牢固,持续稳定达标形势依然严峻。开展水环境污染源解析,定量分析主要污染物来源及其污染负荷相对贡献量,有助于针对性开展流域水环境治理^[1-2]。目前常用的方法有排放清单法^[3-4]、流域模型法^[5]和统计学方法^[6-7],绝对主成分-多元线性回归 (absolute principal component score - multiple linear regression, APCS-MLR) 模型就是统计学方法中一种典型的受体模型,通过对已知数据的统计分析,能较好地定量估算污染物来源及其贡献,近年来已被较多地运用于土壤^[8-10]、地下水^[11-13]、大气^[14-15]、地表水^[16-17]等污染源解析研究中。基于 APCS-MLR 模型,杜展鹏等^[18]的研究发现,滇池草海主要的污染源为农业面源、城市面源和内源,外海的主要污染源为农业面源、城镇生活污染源、城市面源和内源;张彦等^[19]的研究表明,暴雨前河流水质指标受到气象因子和河流水体内源的影响较大,暴雨后城市污染源、农业面源对河流水质指标的影响增大;Chen 等^[20]的研究显示,安徽新汴河流域主要污染源为地质过程、农业活动、畜禽养殖、生活污染和交通污染。

九洲江是一条跨粤桂两省(区)独流入海的河流。九洲江中游鹤地水库是广东省重要饮用水源地,也是环北部湾广东水资源配置工程的重要接点站,其水环境质量涉及 400 多万人的饮水安全,具有十分重要的政治、社会和经济意义。目前关于九洲江流域的研究多集中于沉积物^[21-22]、水土流失^[23]、生态补偿^[24-25]等方面,已开展的水质评价研究基本集中在九洲江广西段流域范围^[26-28],对于九洲江流域下游广东境内尚无系

统的研究。本研究利用九洲江营仔国考断面地表水水质自动站逐日监测数据,采用 APCS-MLR 模型分析了九洲江广东段不同水期水质指标的变化特征和污染来源,以期为九洲江广东段流域水质安全管理提供相关科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

九洲江处于沿海地区,是一条跨粤桂两省(区)独流入海的河流,发源于广西陆川县文龙径,流经广西博白县、广东廉江市后注入北部湾,干流全长 162 km。本文研究区域主要为九洲江广东段流域范围,干流河长 89 km,流域面积 2 145 km²,占全流域总面积的 63.1%。地势以低丘为主,中下游两岸为狭长的河谷平原,河床平均比降 0.47‰。九洲江是研究区域主要受纳水体,水系丰富,广东省境内主要包括武陵河、廉江河、沙铲河、龙潭河等一级支流及陀村河、塘蓬河、香山河、白马岭河、三叉河等二级支流。

九洲江广东段属热带、亚热带气候,季风气候明显,全年日照充足,年平均日照时数在 1 760~1 994 h。雨热同季,多年平均气温 23 ℃,多年平均年降雨量为 1 715 mm,年内降水分布不均匀,多集中在 4—9 月,约占全年降雨量的 80%。多年平均年径流量为 29.14 亿 m³[缸瓦窑(三)水文站],4—9 月汛期径流占年总量的 76.2%。

九洲江干流在广东省湛江市廉江市横山镇附近一分为二入海,其中一条为营仔河向西流经营仔镇汇入北部湾安铺港,另一条安铺河向南流经安铺镇、黎头沙汇入北部湾安铺港。安铺河、营仔河上分别建有

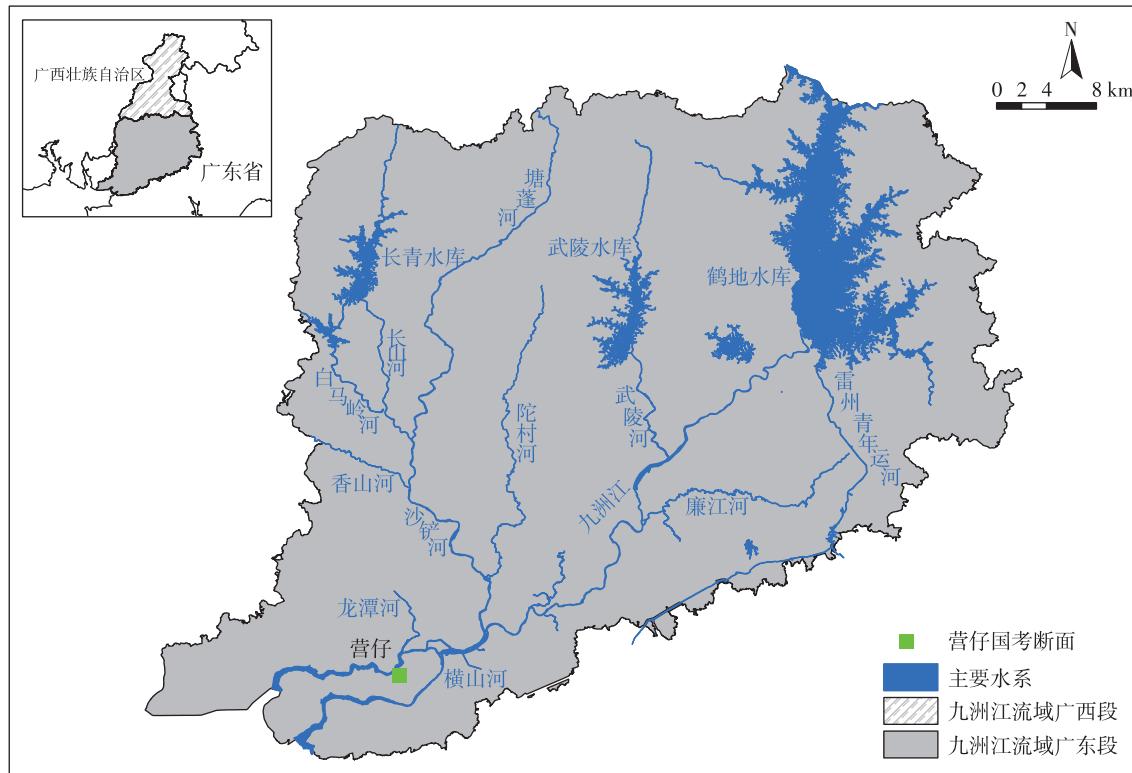


图1 研究区域及点位示意图

Figure 1 Schematic diagram of study area and stations

高墩水闸、河水闸(又名茅坡水闸)两座挡潮节制闸^[29],其中安铺河高墩水闸常闭,仅泄洪期间才开启,日常通过营仔河河水闸及其水电站控制九洲江下泄水流,营仔国考断面水质自动监测站就位于河水闸后约100 m处。

1.2 数据来源

本研究选取的九洲江营仔断面水质数据,来源于广东省环境监测中心地表水自动监测预警监控平台审核数据,时间范围为2021年1月1日至2022年12月31日逐日数据,监测指标包含水温、pH、溶解氧、电导率、浊度、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮共9项水质指标。研究中剔除了所有低于检测限的数据。

1.3 绝对主成分-多元线性回归(APCS-MLR)模型

APCS-MLR模型分析参考Cheng等^[17]、后康希等^[30]、刘庄等^[31]的研究方法,首先提取水质指标的主成分,将其得分转化为绝对主成分得分(APCS),然后各水质指标再分别对所有的APCS进行多元线性回归分析,最后将回归系数用于计算各主成分对应的污染源对某水质指标含量的贡献量。

1.4 数理统计分析

先将2021—2022年九洲江营仔断面自动站数据

按照水期划分,再对不同水期的逐日数据进行水质变化趋势、相关性变化特征、主要污染因子识别和污染源贡献率分析。采用地理信息系统ArcGIS 10.5绘制研究区域及点位示意图;采用WPS和SigmaPlot 14.0软件进行数据处理及图表制作,并通过SPSS 19.0进行显著性水平分析。

2 结果与讨论

2.1 九洲江营仔断面水质变化趋势

2021—2022年九洲江营仔断面自动站不同水期水质数据见表1,根据国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)(总氮不参评),九洲江营仔断面2021年、2022年平均水质均能达Ⅲ类水标准,水质指标年际变化幅度小,其中水温、pH、溶解氧和高锰酸盐指数变化幅度低于5%,氨氮、总氮和浊度变化幅度约为10%,总磷指标变化幅度约为16%。从逐月水质数据来看(图2),九洲江营仔断面枯水期(1—3月、10—12月)水质基本能达到Ⅲ类水,丰水期(4—9月)水质明显下降,高锰酸盐指数、总磷显著升高($P<0.01$),溶解氧、pH显著下降($P<0.01$),其中高锰酸盐指数4月、5月、7月和8月平均浓度分别为6.16、6.07、6.06

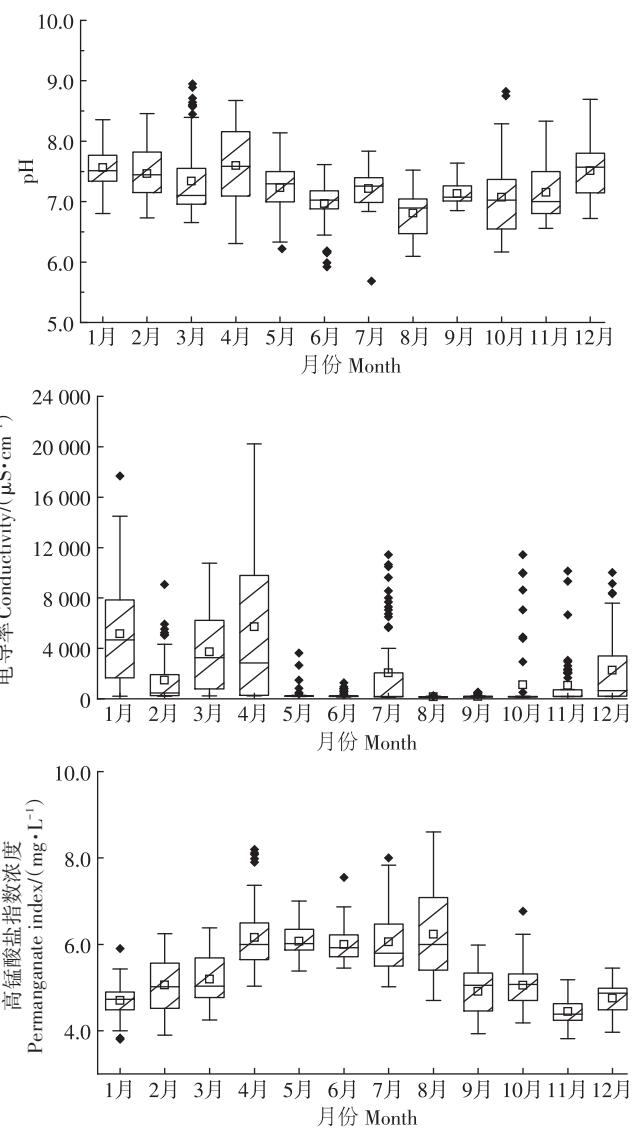
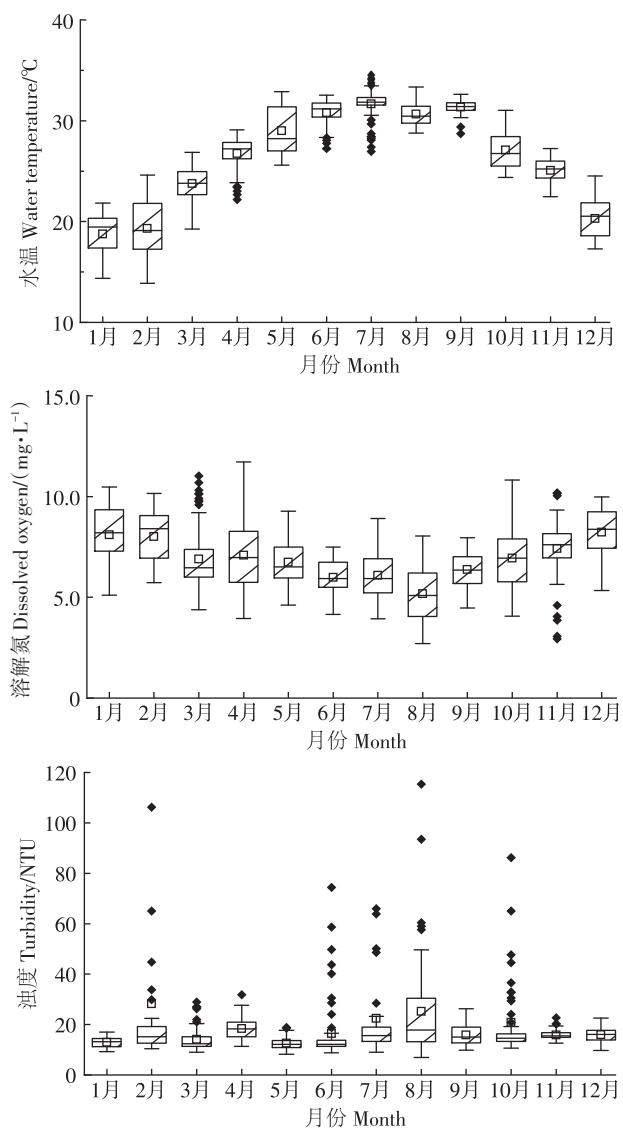
表1 九洲江营仔断面不同水期水质指标特征

Table 1 Characteristics of water quality indexes of Jiuzhou River in wet season and dry season

水质指标 Water quality index	枯水期 Dry season				丰水期 Wet season			
	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	变异系数 Variation coefficient	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	变异系数 Variation coefficient
水温/℃	22.42	13.87	31.04	0.16	30.04	22.17	34.52	0.08
pH	7.36	6.17	8.95	0.07	7.17	5.92	8.67	0.07
溶解氧/(mg·L ⁻¹)	7.60	2.93	11.02	0.20	6.24	2.70	11.71	0.23
电导率/(μS·cm ⁻¹)	2 442.21	115.09	17 683.38	1.29	1 453.64	110.89	20 230.87	2.39
浊度/NTU	17.82	9.04	265.92	1.10	18.51	6.89	164.09	0.81
高锰酸盐指数/(mg·L ⁻¹)	4.87	3.80	6.77	0.11	5.91	3.93	8.60	0.14
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.16	0.01	2.06	0.95	0.19	0.01	0.84	1.09
总磷/(mg·L ⁻¹)	0.08	0.05	0.33	0.53	0.09	0.05	0.30	0.48
总氮/(mg·L ⁻¹)	2.00	1.15	5.40	0.33	1.67	0.92	6.30	0.32

mg·L⁻¹ 和 6.24 mg·L⁻¹, 均为Ⅳ类水, 这主要与丰水期较高的面源污染负荷有关。根据统计, 九洲江流域 2022 年丰水期降雨量占年降雨总量的 82.63%, 较多

的泥沙颗粒及陆源污染物随降雨冲刷入河, 导致水体中浊度明显升高。丰水期较多的污染物汇入, 使得水体中高锰酸盐指数、总磷浓度明显升高^[32-34]。水体中



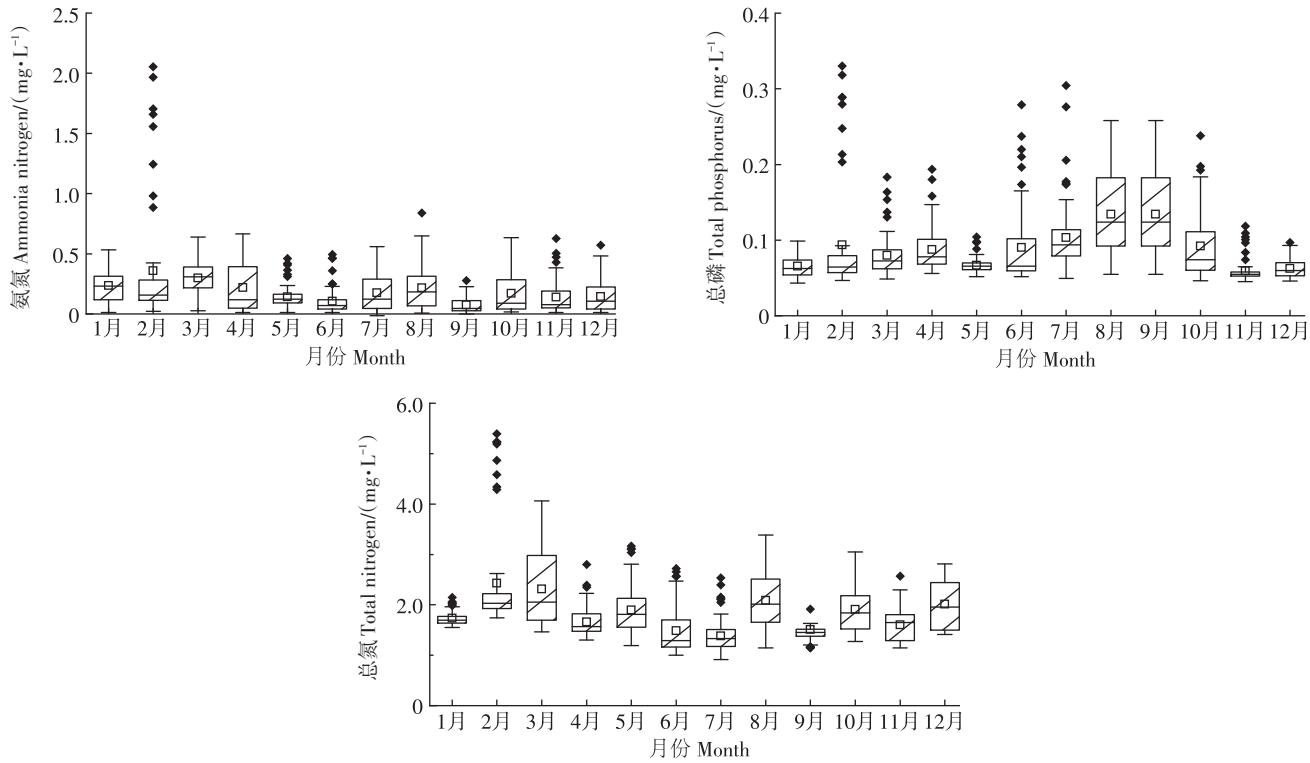


图2 九洲江不同月份水质变化特

Figure 2 Temporal characteristics of water quality in Jiuzhou River

污染物的降解过程需要消耗大量溶解氧,导致丰水期水体溶解氧浓度明显降低^[35-37]。

2.2 不同水期水质指标相关性变化特征

九洲江营仔断面自动站不同水期水质指标Pearson相关系数矩阵见表2,由表2可知九洲江营仔断面不同水期水质指标相关性存在一定差异,丰水期pH、溶解氧、浊度与其他水质指标的相关性有所增加,而高锰酸盐指数、氨氮、总磷和总氮指标间的相关性有所减小,说明丰水期降雨冲刷携带较多的污染物汇入河流,加之气温较高、闸坝调度频繁等,影响了九洲江各水质指标间的相互作用。九洲江营仔断面丰水期水温相对较高,比枯水期平均水温高了7.62℃,较高的水温不仅会降低水体中溶解氧含量(丰水期溶解氧平均浓度比枯水期低了1.36 mg·L⁻¹),也会影响浮游生物的新陈代谢和生长繁殖,进而改变各水质指标的浓度及相关性^[38-39]。九洲江流域雨热同期,丰水期降雨量占全年总降雨量的八成多,大量降雨带来较多陆源污染物的同时,往往也会造成九洲江河流水位上涨,为保障沿岸用水及防汛安全,营仔河水闸频繁开关闸(丰水期平均电导率比枯水期降低了40.48%),一定程度上也影响了水质指标之间的相关性^[40-41]。

2.3 不同水期主要污染因子识别

针对不同水期九洲江营仔断面水温、pH、溶解氧、电导率、浊度、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮等水质指标进行主成分分析。首先将不同水期水质原始数据进行标准化处理后进行KMO-Bartlett球形检验,检验结果显示枯水期KMO值为0.529,Bartlett球度检验P<0.001,丰水期KMO值为0.586,Bartlett球度检验P<0.001,可以进行主成分分析^[18-20]。本研究选取特征值大于1的成分确定为主成分^[30-31],其中枯水期提取了3个主成分(DS1、DS2和DS3),其累计方差贡献率为72.26%,丰水期也提取了3个主成分(WS1、WS2和WS3),其累计方差贡献率为70.69%,均能较好地反映原始数据信息。

枯水期第一主成分DS1特征值为2.94,方差贡献率为32.64%,主要载荷指标为总磷、总氮、氨氮、高锰酸盐指数(表3)。已有研究指出,水体中的氮、磷一般来自生活源和农业面源^[18,31]。根据《湛江市统计年鉴2022》显示,2021年廉江市生猪出栏量及年末存栏量分别约134.7万、87.8万头^[42],畜禽养殖总量较大,且相当比例为畜禽散养户,缺乏粪污处理设施或配套的设施较为落后,部分污染物直排周边沟渠。近年来

表2 不同水期九洲江水质指标相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficients of water quality indexes of Jiuzhou River in wet season and dry season

水质指标 Water quality index	水温 Water temperature	pH	溶解氧 Dissolved oxygen	电导率 Conductivity	浊度 Turbidity	高锰酸盐指数 Permanganate index	氨氮 Ammonia nitrogen	总磷 Total phosphorus	总氮 Total nitrogen
水温	1	-0.405**	-0.515**	-0.055	0.058	0.036	-0.171**	-0.103	-0.293**
pH	-0.204**	1	0.779**	-0.208**	-0.074	0.060	-0.287**	-0.242**	0.023
溶解氧	-0.156**	0.770**	1	-0.350**	-0.108*	0.009	-0.292**	-0.117*	0.106*
电导率	-0.149**	0.093	-0.062	1	-0.104*	0.157**	0.310**	-0.039	-0.258**
浊度	-0.216**	-0.165**	-0.166**	0.011	1	0.150**	0.024	0.144**	0.032
高锰酸盐指数	-0.123*	-0.015	0.085	0.226**	0.154**	1	0.384**	0.637**	0.439**
氨氮	-0.156**	-0.449**	-0.570**	0.549**	0.298**	0.308**	1	0.787**	0.575**
总磷	-0.136*	-0.437**	-0.419**	0.135*	0.703**	0.396**	0.521**	1	0.762**
总氮	-0.344**	-0.423**	-0.235**	-0.024	0.288**	0.386**	0.392**	0.532**	1

注:左下部分为丰水期水质指标相关性,右上部分为枯水期水质指标相关性;**表示在0.01水平(双侧)上显著相关,*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

Note: The lower part is the correlation of water quality index in wet season, and the upper part is the correlation of water quality index in dry season; ** indicates the correlation is extremely significant at the level of 0.01; * indicates the correlation is significant at the level of 0.05.

表3 不同水期九洲江水质指标旋转因子载荷矩阵

Table 3 Rotation factor loading matrix of Jiuzhou River
in wet season and dry season

水质指标 Water quality index	枯水期 Dry season			丰水期 Wet season		
	DS1	DS2	DS3	WS1	WS2	WS3
总磷	0.948	-0.136	0.098	0.796	-0.381	0.160
总氮	0.857	0.177	0.178	0.757	-0.203	0.022
氨氮	0.829	-0.215	-0.323	0.355	-0.493	0.704
高锰酸盐指数	0.692	0.070	0.079	0.516	0.165	0.369
溶解氧	-0.041	0.927	0.134	-0.101	0.909	-0.139
pH	-0.128	0.880	0.065	-0.226	0.891	0.048
水温	-0.284	-0.663	0.380	-0.512	-0.455	-0.182
电导率	0.027	-0.293	-0.822	-0.048	0.054	0.942
浊度	0.139	-0.179	0.546	0.731	-0.108	-0.050

廉江市积极推进城镇污水处理厂及配套管网建设,目前基本补齐了九洲江流域城镇生活污水处理能力的旱季缺口,但因污水管网建设周期长,尚未能完全发挥效能,仍有部分区域生活污水未收集处理直排河道,因此畜禽养殖源与城镇生活源仍是九洲江流域目前最主要的污染源。故DS1可定义为畜禽养殖源+城镇生活源。枯水期第二主成分DS2特征值为2.30,方差贡献率为25.56%,主要载荷指标为溶解氧、pH、水温。枯水期闸后营仔断面水位相对较低,溶解氧、pH、水温等物理因子变量容易受气象条件影响^[19,43],故DS2可定义为气象因子。枯水期第三主成分DS3特征值为1.27,方差贡献率为14.06%,主要载荷指标为电导率、浊度。九洲江流域枯水期水位较低,为了

保障沿岸农业生产用水,营仔河水闸基本不开闸,闸后营仔断面的电导率很大程度上反映了潮汐涨落的情况,而海水潮汐在底泥扰动较强的情况下也会使水体浊度升高^[44],故DS3可定义为海水潮汐+河道内源。

丰水期第一主成分WS1特征值为3.32,方差贡献率为36.87%,主要载荷指标为总磷、总氮、浊度、高锰酸盐指数。总磷作为典型污染因子之一,能较好地反映流域面源污染状况^[45]。九洲江流域畜禽养殖粪污治理水平较低,大多畜禽粪污直排池塘消纳或堆积粪污塘,易随降雨影响周边水体水质,且流域内仍以传统作业方式为主,化肥、农药施用强度高(2021年化肥、农药使用量分别为71 510、2 303 t),雨季容易造成农田氮磷流失^[46],故农业面源是流域丰水期的主要污染来源之一。此外,流域内城镇现状管网以雨污合流管为主,雨季大量生活污水溢流,影响河流水质。因此WS1可定义为农业面源+城镇面源。丰水期第二主成分WS2特征值为1.75,方差贡献率为19.47%,主要载荷指标为溶解氧、pH,该变量在自然条件下受气象条件影响较大,可定义为气象因子。丰水期第三主成分WS3特征值为1.29,方差贡献率为14.35%,主要载荷指标为电导率、氨氮。丰水期较多的降雨,使得九洲江干流水位相对较高,沿程闸坝调度较频繁,增强了对河流底泥的扰动,进而影响断面水质,故WS3可定义为海水潮汐+河道内源。

2.4 不同水期污染源贡献率分析

在主成分分析的基础上,利用APCS-MLR模型建立各主成分与水质指标的函数关系,并根据建立的

函数关系预测水质指标浓度。将不同水期水质指标预测值与实测值进行线性拟合分析可知,九洲江流域总磷、总氮、氨氮、高锰酸盐指数等指标不同水期的预测值与实测值线性拟合 R^2 均大于 0.8, P 值均小于 0.05, 表明构建的APCS-MLR模型基本可靠,计算结果较为可信。

根据APCS-MLR模型计算各污染源对不同水期水质指标的贡献结果如表4所示。枯水期畜禽养殖源+城镇生活源对总磷(58.47%)、氨氮(48.71%)和总氮(44.14%)的绝对贡献率大。丰水期农业面源+城镇面源对浊度(60.35%)、总氮(51.96%)、总磷(41.38%)和高锰酸盐指数(34.78%)的绝对贡献率大。不同水期气象因子对溶解氧绝对贡献率均最大。海水潮汐+河道内源对枯水期浊度和丰水期电导率、氨氮的绝对贡献率较大。

未识别源对物理因子水温、pH和枯水期高锰酸盐指数均有较大的绝对贡献率,相似的结果也出现在其他研究中。后希康等^[30]的研究指出未识别源对沱河总氮贡献率最大,刘庄等^[31]的研究显示未识别源对长潭水库库区 COD、氨氮、总磷的贡献率可达三至四成。这可能与基于数理统计方法对污染源解析存在一定的主观性和局限性有关,可进一步结合不同污染源特性开展相应的专项研究,同时综合运用不同污染源解析模型相互印证,增强污染源解析的准确性^[19-20]。

九洲江流域枯水期降雨少、水量小、沿程闸坝基本不开闸,外来污染输入相对稳定,外来干扰相对较小,此时水体各指标之间作用凸显,水质指标波动较大,未识别源可能主要是水体各指标之间的相互影响

和物理化学作用^[19]。此外,枯水期水体流动性较差,浮游生物的新陈代谢和生长繁殖也会受到影响,进而影响河流理化特性^[47-48]。

对于九洲江营仔断面主要超标因子高锰酸盐指数来说,枯水期主要污染来源是未识别源,丰水期主要污染来源是农业面源和城镇面源,故九洲江流域枯水期除了强化畜禽养殖污染治理、完善城镇污水管网等之外,还要优化闸坝联合调度方式,在确保行洪和排涝安全,以及满足上游用水需求的前提下,合理安排闸坝下泄水量和泄流时段,科学保障枯水期生态流量;丰水期要加强城镇管网混错接改造、老旧管网更新、破损修复改造,因地制宜推进雨污分流改造,推进粪污资源化利用,充分利用现有水塘、排水沟等建设生态沟渠、污水净化塘等设施,着力削减汛期面源污染。

3 结论

(1)九洲江营仔断面丰水期水质相对较差,高锰酸盐指数、总磷和浊度相较枯水期显著升高,溶解氧、pH值相较枯水期显著下降。

(2)九洲江营仔断面不同水期水质指标相关性存在一定差异。与枯水期相比,丰水期pH、溶解氧、浊度与其他水质指标的相关性有所增加,而高锰酸盐指数、氨氮、总磷和总氮指标间的相关性有所减小。

(3)九洲江水质指标枯水期主要受畜禽养殖源+城镇生活源和未识别污染源的影响,丰水期主要受农业面源+城镇面源和气象因子影响。故九洲江广东段流域水质管理不仅要加强畜禽养殖污染治理、城镇污水管网完善,还应注重保障生态流量、削减汛期面源污染等工作。

表4 不同水期九洲江水质指标的绝对贡献率(%)

Table 4 Main contribution rates of water quality indexes of Jiuzhou River in wet season and dry season (%)

水质指标 Water quality index	枯水期指标的绝对贡献率 Contribution rate in dry season			丰水期指标的绝对贡献率 Contribution rate in wet season			未识别源 Unidentified pollution source	
	DS1	DS2	DS3	WS1	WS2	WS3		
水温	6.12	25.51	8.89	59.48	8.45	12.17	2.16	78.27
pH	3.29	39.96	1.85	54.90	6.59	40.75	1.84	50.86
溶解氧	1.83	72.18	6.39	19.60	4.85	55.66	4.88	34.40
电导率	0.77	17.19	29.39	52.65	2.62	5.51	59.22	33.64
浊度	11.72	26.12	48.27	13.89	60.35	11.34	9.24	23.09
高锰酸盐指数	28.46	5.16	3.30	63.08	34.78	17.95	19.77	31.88
氨氮	48.71	22.38	20.77	8.13	18.54	31.87	27.32	24.54
总磷	58.47	15.93	6.45	19.15	41.38	32.01	4.86	21.34
总氮	44.14	16.15	9.65	30.07	51.96	21.08	2.90	24.62

参考文献:

- [1] 张铁坚. 保定府河流域水体污染源解析与治理技术体系研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2019: 76–84. ZHANG T J. Study on water pollution source apportionment and treatment technology system in Fuhe River basin of Baoding[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019: 76–84.
- [2] 邬剑宇. 安吉县西苕溪流域小微水体污染源解析及生态修复模式研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 76–77. WU J Y. Study on the source apportionment and ecological remediation of small water bodies in West Tiaoxi Watershed in Anji county[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 76–77.
- [3] 王萌, 王敬贤, 刘云, 等. 湖北省三峡库区1991—2014年农业非点源氮磷污染负荷分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 294–301. WANG M, WANG J X, LIU Y, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus pollution loads from agricultural non-point sources in the Three Gorges Reservoir of Hubei Province from 1991 to 2014[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2): 294–301.
- [4] 李艳红, 葛刚, 吴桂林, 等. 信江流域氮磷污染负荷估算及其控制对策[J]. 南昌大学学报(理科版), 2021, 45(2): 176–181. LI Y H, GE G, WU G L, et al. Estimation and control strategies of nitrogen and phosphorus pollution load in Xinjiang drainage basin[J]. *Journal of Nanchang University(Natural Science)*, 2021, 45(2): 176–181.
- [5] 杨中文, 张萌, 郝彩莲, 等. 基于源汇过程模拟的鄱阳湖流域总磷污染源解析[J]. 环境科学研究, 2020, 33(11): 2493–2506. YANG Z W, ZHANG M, HAO C L, et al. Source apportionment of total phosphorus pollution in Poyang Lake basin based on source-sink process modeling[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(11): 2493–2506.
- [6] 赵含嫣, 赵锐, 孙源媛, 等. 基于受体模型和控制单元分区的流域污染源解析: 以永定河张家口段为例[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(5): 758–768. ZHAO H Y, ZHAO R, SUN Y Y, et al. Watershed pollution source analysis based on receptor model and control unit division: taking Zhangjiakou section of Yongding River as an example[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(5): 758–768.
- [7] 张婉萍, 樊敏, 杨远坤, 等. 基于多元统计的沱江支流釜溪城镇河流污染特征解析[J]. 生态学杂志, 2023, 42(6): 1517–1526. ZHANG W P, FAN M, YANG Y K, et al. Analysis of urban river pollution characteristics of Fuxi River, a tributary of Tuojiang River by multivariate statistical model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(6): 1517–1526.
- [8] SAKIZADEH M, ZHANG C S. Source identification and contribution of land uses to the observed values of heavy metals in soil samples of the border between the Northern Ireland and Republic of Ireland by receptor models and redundancy analysis[J]. *Geoderma*, 2021, 404: 115313.
- [9] 张旺, 高珍冉, 郁粤鹰, 等. 基于APCS-MLR受体模型的贵州喀斯特矿区水田土壤重金属源解析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 212–219. ZHANG W, GAO Z R, TAI Y Y, et al. Source analysis of the heavy metals in paddy field soils in Karst mining areas of Guizhou us-
- ing APCS-MLR receptor model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(3): 212–219.
- [10] MA J, SHEN Z J, WANG S L, et al. Source apportionment of heavy metals in soils around a coal gangue heap with the APCS-MLR and PMF receptor models in Chongqing, southwest China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2023, 20(4): 1061–1073.
- [11] 赵大双, 姜春露, 赵琦, 等. 基于PMF和PCA-APCS-MLR模型的煤矿区地下水多环芳烃分布特征及来源解析[J]. 地球与环境, 2022, 50(5): 721–732. ZHAO D S, JIANG C L, ZHAO Q, et al. Distribution characteristics and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater of a coal mining area based on PMF and PCA-APCS-MLR model[J]. *Earth and Environment*, 2022, 50(5): 721–732.
- [12] YU L, ZHENG T, YUAN R, et al. APCS-MLR model: a convenient and fast method for quantitative identification of nitrate pollution sources in groundwater[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 314: 115101.
- [13] JIN L, YE H Y, SHI Y S, et al. Using PCA-APCS-MLR model and SIAR model combined with multiple isotopes to quantify the nitrate sources in groundwater of Zhuji, East China[J]. *Applied Geochemistry*, 2022, 143: 105354.
- [14] 张海霞, 蔡昂祖, 赵海萍, 等. 基于PMF和APCS-MLR模型的工业城市大气降尘金属源解析及综合污染评价[J]. 环境工程学报, 2022, 16(11): 3816–3827. ZHANG H X, CAI A Z, ZHAO H P, et al. Source apportionment of metals in atmospheric deposition of a typical industrial city based on PMF and APCS-MLR and comprehensive pollution assessment[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(11): 3816–3827.
- [15] WANG W J, CHEN C, LIU D, et al. Health risk assessment of $PM_{2.5}$ heavy metals in county units of northern China based on Monte Carlo simulation and APCS-MLR[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 843: 156777.
- [16] ZHANG H, LI H F, YU H R, et al. Water quality assessment and pollution source apportionment using multi-statistic and APCS-MLR modeling techniques in Min River Basin, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 41987–42000.
- [17] CHENG G, WANG M, CHEN Y, et al. Source apportionment of water pollutants in the upstream of Yangtze River using APCS-MLR[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42: 3795–3810.
- [18] 杜展鹏, 王明净, 严长安, 等. 基于绝对主成分-多元线性回归的滇池污染源解析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(3): 1130–1137. DU Z P, WANG M J, YAN C A, et al. Pollution source apportionment of Lake Dianchi based on absolute principal component score-multiple linear regression[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(3): 1130–1137.
- [19] 张彦, 邹磊, 梁志杰, 等. 暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2537–2547. ZHANG Y, ZOU L, LIANG Z J, et al. Differential characteristics and source identification of water quality of the rivers in Northern Henan before and after rainstorm[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(5): 2537–2547.

- [20] CHEN K, LIU Q M, PENG W H, et al. Source apportionment of river water pollution in a typical agricultural city of Anhui Province, eastern China using multivariate statistical techniques with APCS-MLR [J]. *Water Science and Engineering*, 2023, 16(2):165–174.
- [21] 何宇, 洪欣, 闭潇予, 等. 九洲江流域水环境重金属污染特征及来源解析[J]. *环境化学*, 2021, 40(1):240–253. HE Y, HONG X, BI X Y, et al. Characteristics and sources of heavy metal pollution in water environment of Jiuzhou River basin[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(1):240–253.
- [22] 刘珂, 王锦, 叶开晓, 等. 九洲江沉积物多环芳烃和抗生素的分布特征与风险评价[J]. *环境监控与预警*, 2022, 14(5):167–175. LIU K, WANG J, YE K X, et al. Distribution characteristics and risk assessment of antibiotics and polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediment of Jiuzhou River[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2022, 14(5):167–175.
- [23] 向慧昌, 常进. 九洲江流域水土流失现状及变化分析[J]. *中国水土保持科学*, 2022, 20(4):50–60. XIANG H C, CHANG J. Current situation and change analysis of soil erosion in Jiuzhou River Basin[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(4):50–60.
- [24] SUN X, LIU X, ZHAO S Q, et al. An evolutionary systematic framework to quantify short-term and long-term watershed ecological compensation standard and amount for promoting sustainability of livestock industry based on cost-benefit analysis, linear programming, WTA and WTP method[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28:18004–18020.
- [25] 赵素芹, 孙翔, 侯东林, 等. 应对畜禽养殖跨界污染的流域水资源生态补偿量研究:以国家生态补偿示范区九洲江流域为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(10):3247–3257. ZHAO S Q, SUN X, HOU D L, et al. Ecological compensation for cross-boundary pollution control of livestock and poultry: a case study of Jiuzhou River Basin in national ecological compensation demonstration area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10):3247–3257.
- [26] 刘捷, 邓超冰, 黄祖强, 等. 基于综合水质标识指数法的九洲江水质评价[J]. *广西科学*, 2018, 25(4):400–408. LIU J, DENG C B, HUANG Z Q, et al. Application of comprehensive water quality identification index in water quality evaluation of Jiuzhoujiang River[J]. *Guangxi Sciences*, 2018, 25(4):400–408.
- [27] 邓渠成, 尹娟, 许桂苹, 等. 基于三角模糊数-贝叶斯方法的九洲江水环境质量评价[J]. *水生态学杂志*, 2019, 40(2):14–19. DENG Q C, YIN J, XU G P, et al. Water quality assessment of Jiuzhou River based on the integrated method of triangular fuzzy numbers and Bayesian Network[J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, 40(2):14–19.
- [28] 于嵘, 潘泳羽, 苏相琴. 广西九洲江流域生态健康评价[J]. *桂林理工大学学报*, 2022, 42(1):170–176. YU R, PAN Y Y, SU X Q. Health ecosystem assessment of Jiuzhoujiang River basin in Guangxi [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2022, 42(1):170–176.
- [29] 崔珏, 张颖. 九洲江出海口段水面线计算[J]. *水电站机电技术*, 2021, 44(7):65–68. CUI J, ZHANG Y. Calculation of water surface line in the outfall section of Jiuzhou River[J]. *Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station*, 2021, 44(7):65–68.
- [30] 后希康, 张凯, 段平洲, 等. 基于APCS-MLR模型的沱河流域污染来源解析[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(10):2350–2357. HOU X K, ZHANG K, DUAN P Z, et al. Pollution source apportionment of Tuhe River based on absolute principal component score-multiple linear regression[J]. *Research of Environmental Science*, 2021, 34(10):2350–2357.
- [31] 刘庄, 丁程成, 晁建颖, 等. 基于绝对主成分-多元线性回归(APCS-MLR)模型的浙江长潭水库污染源解析[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(4):530–539. LIU Z, DING C C, CHAO J Y, et al. Pollution source apportionment of Changtan Reservoir of Zhejiang Province based on APCS-MLR model[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(4):530–539.
- [32] KUMWIMBA M N, ZHU B, SUANON F. Long-term impact of primary domestic sewage on metal/loid accumulation in drainage ditch sediments, plants and water: implications for phytoremediation and restoration[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 581:773–781.
- [33] LIN T, YU H Q, WANG Q, 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(10):368.
- [34] 汪心斐, 刘子琦, 郭琼琼, 等. 贵州黄洲河流域水质时空分布特征及污染源解析[J]. *环境工程*, 2021, 39(9):69–75. WANG X W, LIU Z Q, GUO Q Q, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and pollution source evaluation of water quality in the Huangzhouhe River Basin, Guizhou[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(9):69–75.
- [35] LI X, LU C, ZHANG Y, et al. Low dissolved oxygen in the Pearl River estuary in summer: long-term spatio-temporal patterns, trends, and regulating factors[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 151:110814.
- [36] 陈前, 唐文忠, 许妍, 等. 基于溶解氧和耗氧污染物变化的长江流域水质改善过程分析(2008—2018年)[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(1):279–287. CHEN Q, TANG W Z, XU Y, et al. Recovery process analysis of water quality in the Yangtze River Basin based on changes of dissolved oxygen and oxygen-consuming substances (2008—2018) [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(1):279–287.
- [37] 余香英, 王刚, 邹富桢, 等. 基于逐4 h尺度的粤西典型流域降雨径流污染特征分析[J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(7):910–916, 922. YU X Y, WANG G, ZOU F Z, et al. Pollutant characteristics of rainfall runoff in a typical basin in Western Guangdong based on a 4 h time step resolution[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(7):910–916, 922.
- [38] COSTA C R, COSTA M F, DANTAS D V, et al. Interannual and seasonal variations in estuarine water quality[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 5:301.
- [39] 吴丽航, 王健鑫, 许永久, 等. 长江口及邻近海域冬、夏季浮游动物群落结构的季节差异分析[J]. *浙江海洋大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(3):183–191. WU L H, WANG J X, XU Y J, et al. Seasonal difference analysis of zooplankton community structure in winter and summer in the Yangtze estuary and adjacent waters[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University(Natural Science)*, 2022, 41(3):183–191.
- [40] 左其亭, 刘静, 窦明. 阀坝调控对河流水生态环境影响特征分析

- [J]. 水科学进展, 2016, 27(3):439–447. ZUO Q T, LIU J, DOU M. Analysis of the impact of dam operations on the river water ecological environment[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(3):439–447.
- [41] BU J H, LI C H, WANG X, et al. Assessment and prediction of the water ecological carrying capacity in Changzhou city, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277:123988.
- [42] 湛江市统计局. 湛江市统计年鉴 2022[EB/OL].[2022-11-24]. https://www.zhanjiang.gov.cn/zjsfw/bmdh/tjxxw/zwgk/tjsjzl/tjnj/content/post_1702352.html. Statistics Bureau of Zhanjiang City. Statistical yearbook 2022 of Zhanjiang City[EB/OL].[2022-11-24]. https://www.zhanjiang.gov.cn/zjsfw/bmdh/tjxxw/zwgk/tjsjzl/tjnj/content/post_1702352.html.
- [43] 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. ZHANG X Y, MA P M, GAO Q H, et al. Spatial-temporal variations of water quality in upstream and downstream of Three Gorges Dam[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(3):633–645.
- [44] 苗青. 降雨与潮汐作用对莱州湾地区海水入侵的影响机制研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2013:45–49. MIAO Q. Effects of precipitation and tide on seawater intrusion in the Laizhou Bay[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, MNR, 2013: 45–49.
- [45] 王思如, 杨大文, 孙金华, 等. 我国农业面源污染现状与特征分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(4):140–147, 172. WANG S R, YANG D W, SUN J H, et al. Analysis on status and characteristics of agricultural non point source pollution in China[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(4):140–147, 172.
- [46] 贺斌, 胡茂川. 广东省各区县农业面源污染负荷估算及特征分析[J]. 生态环境学报, 2022, 31(4):771–776. HE B, HU M C. Evaluation of agriculture non-point pollution load and its characteristics in all districts and counties of Guangdong[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(4):771–776.
- [47] 白海锋, 孔飞鹤, 王怡睿, 等. 北洛河流域浮游动物群落结构时空特征及其与环境因子相关性[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(5): 789–795. BAI H F, KONG F H, WANG Y R, et al. Spatio-temporal characteristics and relationship with environmental factors of zooplankton community structure in the Beiluo River basin[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2021, 36(5):789–795.
- [48] 程成, 申艳萍, 袁伟琳, 等. 漾河干流浮游生物群落结构特征及水质环境评价[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(2):401–412. CHENG C, SHEN Y P, YUAN W L, et al. Plankton community structure and water quality evaluation in the main stream of the Luanhe River[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2022, 28(2):401–412.

(责任编辑:叶飞)