



典型农业区河流水质评价及影响因素分析

付凯, 高红杰, 李发东, 吴坤, 张秋英, 李兆, 毛珊珊, 李曹乐, 王健祺

引用本文:

付凯,高红杰,李发东,吴坤,张秋英,李兆,毛珊珊,李曹乐,王健祺. 典型农业区河流水质评价及影响因素分析[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 583–597.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0881>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用整合分析方法探究我国不同土地利用类型区域河流硝酸盐的来源

张金兰, 蔺祖弘, 白文荣, 郇正来, 张婷婷, 林爱军, 肖勇

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 746–754 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0492>

尼山水库小流域典型面源污染来源及特征分析

王立萍, 娄山崇, 孙秀玲, 尹儿琴, 孙甲玉

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 26–35 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0067>

平原河网区排水沟塘水质动态与景观特征的关系

贾忠华, 尹玺, 罗纨, 邹家荣, 陈诚

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 665–676 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0416>

巢湖地区农村生活污水产排污调研方法及实证

何源, 吕锡武, 郑向群, 张丹丹, 吴晓斐, 黄治平

农业资源与环境学报. 2022, 39(2): 319–325 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0131>

丹江口水库总氮、氨氮遥感反演及时空变化研究

刘轩, 赵同谦, 蔡太义, 肖春艳, 陈晓舒, 张文静

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 829–838 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0195>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

付凯, 高红杰, 李发东, 等. 典型农业区河流水质评价及影响因素分析[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 583–597.

FU K, GAO H J, LI F D, et al. River water quality evaluation and analysis of influencing factors in typical agricultural areas[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 583–597.

典型农业区河流水质评价及影响因素分析

付凯^{1,2}, 高红杰¹, 李发东^{3,4}, 吴坤⁵, 张秋英^{1*}, 李兆^{1,3}, 毛珊珊^{1,2}, 李曹乐¹, 王健祺³

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 茂名市生态环境局, 广东 茂名 525400)

摘要:随着农业、农村和城镇化快速发展, 施肥、畜禽养殖和农村污水排放等使河流水质日益恶化、氮磷污染严重, 导致水环境问题加剧。本研究以位于广东省高州市的白沙河为例, 在旱季和雨季采集水样, 测定河水主要水质指标的时空变化特征, 利用水质指数(WQI)、灌溉用水评价模型、主成分分析法, 结合土地利用类型, 评估白沙河水质和影响因素。结果表明: 水质指标呈现明显的季节变化特征, 旱季各项水质指标均大于雨季, 降雨对pH、电导率(EC)、NH₄⁺-N、Ca²⁺、Na⁺、Cl⁻和SO₄²⁻的影响较大。雨季66%的水样WQI为优, 显著优于旱季; 旱季水样WQI值较高, 水质较差水样主要集中于上游工业园及中下游区域。农田灌溉用水水质评价表明, 雨季河流水质适合灌溉, 旱季部分河水在灌溉前需要采取处理措施。主成分分析(PCA)和相关性分析(CA)显示白沙河流域的主要污染源与农业面源、居民生活污水和工业园排水有关, 影响水质的关键因子是NH₄⁺-N、总磷(TP)和NO₃⁻; 土地利用类型分析表明水田和建设用地区、农村居民点和林地分别是旱季、雨季水质的主要影响因子, 250 m缓冲区尺度下, 水田和农村居民点与水质的关联性较强。研究表明, 白沙河旱季水质较差, 与工业排水造成的点源污染有关; 在250 m缓冲区尺度下河流水质与农业面源污染有关。

关键词:高州; 白沙河; 水质评价; 时空变化; 土地利用

中图分类号: X824; X522 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2023)03-0583-15 doi: 10.13254/j.jare.2022.0881

River water quality evaluation and analysis of influencing factors in typical agricultural areas

FU Kai^{1,2}, GAO Hongjie¹, LI Fadong^{3,4}, WU Kun⁵, ZHANG Qiuying^{1*}, LI Zhao^{1,3}, MAO Shanshan^{1,2}, LI Caole¹, WANG Jianqi³

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Nature Resource Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Maoming Ecological Environment Bureau, Maoming 525400, China)

Abstract: The rapid development of agriculture and urbanization has led to the deterioration of river water quality and serious nitrogen and phosphorus pollution brought about by fertilization, livestock breeding, and rural uncollected sewage discharge, resulting in the intensification of water pollution. In this study, water samples were collected during the dry and rainy seasons from the Baisha River, located in Gaozhou City, Guangdong Province, to determine the spatial and temporal characteristics of the main water quality indicators of the river. The water quality index (WQI), an irrigation water evaluation model, principal component analysis, and land use type were used to evaluate the water quality and influencing factors of the Baisha River. The results showed that the water quality indexes exhibited obvious seasonal changes, and all water quality indexes were greater in the dry season than in the rainy season, and rainfall had a greater influence on pH, EC, NH₄⁺-N, Ca²⁺, Na⁺, Cl⁻ and SO₄²⁻. The WQI of 66% of the water samples in the rainy season is excellent, which is

收稿日期: 2022-12-15 录用日期: 2023-04-28

作者简介: 付凯(1998—), 男, 贵州印江人, 硕士研究生, 从事生态水文环境研究。E-mail: fukai20200825@163.com

*通信作者: 张秋英 E-mail: zhangqy@craes.org.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800301); 高州市水生态环境保护治理总体技术服务项目(XCGZ-202219)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2016YFD0800301); Gaozhou Water Ecological Environment Protection and Management Overall Technical Service Project (XCGZ-202219)

significantly better than that in the dry season; the *WQI* values of the water samples in the dry season are higher and mainly concentrated in the upstream industrial park and the middle and downstream areas. The evaluation of river water quality for agricultural irrigation shows that the water quality is suitable for irrigation in the rainy season, while some water in the dry season need to be treated before irrigation. Principal component analysis (PCA) and correlation analysis (CA) show that the main sources of pollution in the Baisha River basin are related to agricultural surface sources, residential sewage, and industrial park drainage, and the key factors affecting water quality are $\text{NH}_4\text{-N}$, TP, and NO_3 ; land use type analysis shows that paddy fields and construction land in the dry season, and rural settlements and forest land in the rainy season, are the main influencing factors of water quality respectively, and the association between paddy fields and rural settlements and water quality is stronger at the 250 m buffer scale. This study shows that the poor water quality of the Baisha River in the dry season is related to point source pollution caused by industrial drainage; the water quality of the river at the 250 m buffer scale is related to agricultural surface source pollution.

Keywords: Gaozhou; Baisha River; water quality assessment; spatio-temporal change; land use

我国农业发展在取得巨大成就的同时,面临着水资源短缺、耕地数量减少、农业环境污染和水环境污染等问题^[1-2]。随着农业现代化的推进,农业区水环境形势愈发严峻^[3]。与城市河流相比,农业区河流面积广,水环境污染不仅直接影响居民的日常生活,还影响农业可持续发展^[4]。我国人均水资源占有率远低于世界平均水平,且地理分布极其不均衡^[5],保护水资源对生态环境至关重要^[6]。水质评价是水资源管理的关键^[7],通过水质评估可以了解水质的状况、趋势并确定水质变化的关键决定因素^[8]。水质评价有多种方法,包括统计分析、模型模拟和水质指数 (Water Quality Index, *WQI*) 等方法,水质指数广泛应用于地表水 (尤其是河流) 和地下水的水质评价^[9-10]。Gao 等^[11]采用 *WQI* 对长江、黄河、淮河、海河和辽河流域微量元素进行评价,结果表明五个流域整体水质优良; Tong 等^[12]采用 *WQI* 评价我国地表水和地下水微量元素,结果表明大部分地表水微量元素平均值高于地下水; Ustaoglu 等^[13]采用 *WQI* 评价土耳其亚热带河流水质,结果表明水质特征很好。

白沙河位于广东省高州市,河流水质目标为 IV 类。白沙河流域工业化和城镇化正处于快速发展时期,流域内主要土地利用类型为水田和农村居民用地。白沙河经过多年治理,虽有成效,但是河流污染问题仍未从根本上得到解决。根据实地调查和资料分析,白沙河流域以农业种植为主,农业种植集约化和信息化程度较低,农药和化肥被大量使用,导致面源污染问题相对突出;流域内生活污水处理设施不完善,并开展水产养殖和畜禽养殖,生活废水和养殖废水进入河流造成污染;同时,流域内还存在工业污染。本研究通过采集白沙河干支流样品,运用多元统计、主成分分析和水质指数等方法,研究白沙河流域水污染的时空变化特征、来源及水质状况。本研究旨在:

(1)比较旱季和雨季河流水质及影响因素;(2)比较旱季和雨季河流灌溉水质及影响因素;(3)探讨河流水质与土地利用类型之间的关系。研究结果可以为白沙河流域水环境污染综合治理、水资源利用和可持续发展提供重要数据信息。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白沙河流域位于广东省高州市西南端,年平均气温 22.8 °C,年降雨量 1 892.7 mm,雨季为 4—9 月,旱季为 10 月至次年 3 月。流域内地形地貌复杂,丘陵、平原交错,地势东北高、西南低,河床平缓,水流自北向南流动。白沙河是小东江一级支流,发源于高州市泗水镇谢牛岭(左源)及石仔岭街道塘背村五指山(右源),流经深河、车田屋等村,最后于邹屋附近流入茂南区^[14]。白沙河全长 40 km,总流域面积 234 km²,枯水期流量约 0.5~2.0 m³·s⁻¹,平均流量 5.72 m³·s⁻¹。白沙河在高州市境内的流域面积为 76.9 km²,干流(主河道)长度为 12 km。白沙河高州段农业活动剧烈,沿岸以种植水稻为主,同时还分布荔枝、龙眼、香蕉和玉米等农作物。目前沿岸仅存一家大型生猪养殖场,水产养殖分布广泛,牛、鸡和鸭等畜禽养殖零散分布。沿岸工业主要集中于金山工业园以及下游造纸厂。

1.2 样品采集

分别于 2022 年 3 月和 6 月采集水样 35 个,共 70 个,采集时用 GPS 记录采样点坐标(图 1)。采样瓶浸入水面下 20~50 cm,样品用蒸馏水清洗过的聚乙烯塑料瓶保存,每个点采集水样 500 mL,采用便携式多参数仪 (SL1000, HACH, 美国) 现场测定 pH 和电导率 (EC)。样品在野外避光保存,运回后立即存放在 4~5 °C 冰箱中。经 0.45 μm 滤膜过滤后,总磷 (TP)、铵态

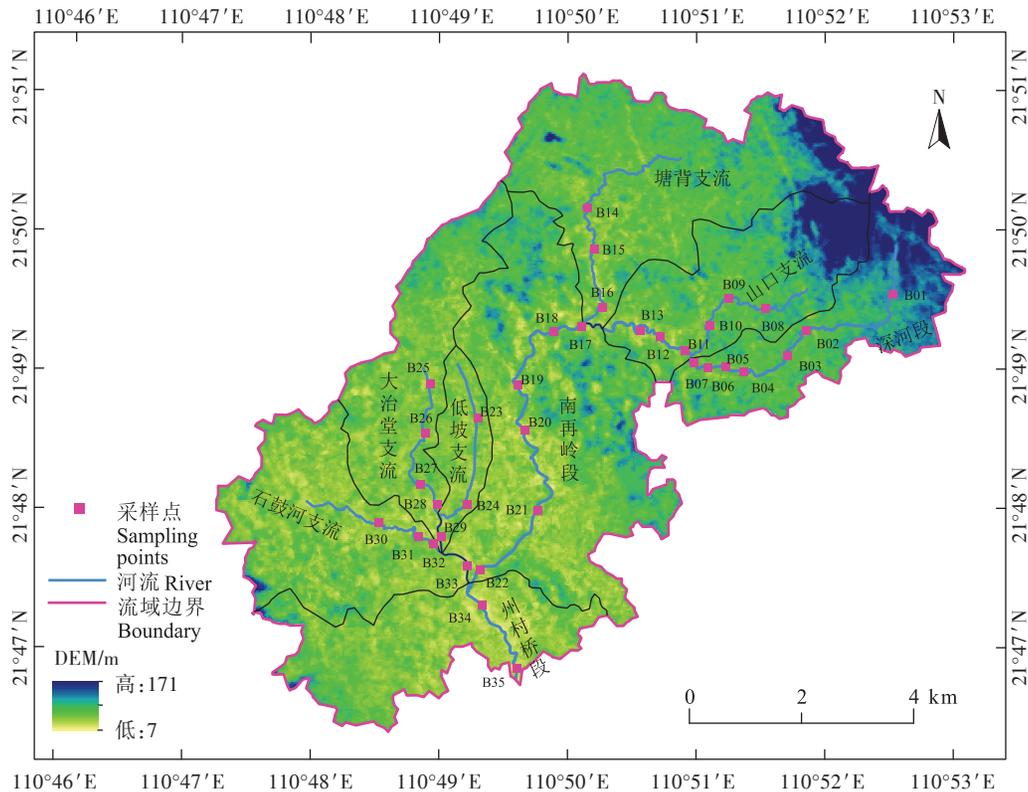


图1 白沙河流域高州段采样点分布

Figure 1 Sampling points distribution of Baisha River basin

氮($\text{NH}_4\text{-N}$)用紫外分光光度计(UV-2550, 岛津公司, 日本)测定,在中国科学院禹城综合实验站完成。主要阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+)用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES, PerkinElmer, 美国)测定,阴离子(SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^-)用离子色谱仪(ICS-900, Thermo Fisher Scientific, 美国)测定,所有元素分析误差控制在5%以内,测试精度为 $\pm 0.001 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,样品水化学分析在中国科学院地理科学与资源研究所完成。

1.3 研究方法

1.3.1 水质评价

水质指数(WQI)是常用的水质评价指标,计算方法如公式(1)和公式(2)所示。根据WQI值,水质可分为五类: $WQI < 50$,水质优; $50 \leq WQI < 100$,水质良好; $100 \leq WQI < 200$,水质差; $200 \leq WQI < 300$,水质很差; $WQI \geq 300$,不能饮用^[6]。

$$WQI = \sum [W_i \times (C_i/S_i) \times 100] \quad (1)$$

$$W_i = w_i / \sum w_i \quad (2)$$

式中: w_i 为每个参数的权重; $\sum w_i$ 为所有参数的权重之和^[5]; C_i 为测量的微量元素浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; S_i 为饮用水标准的微量元素浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.3.2 灌溉用水评价

地下水中高浓度的盐分会导致盐渍土的产生,而灌溉水中的高钠会提高碱度。灌溉用水中钠的危害可以用钠吸附比(SAR)表示。SAR是评估钠与钙和镁浓度相关的危害的指标^[6],计算方法见公式(3):

$$SAR = [\text{Na}^+] / \sqrt{\frac{[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]}{2}} \quad (3)$$

灌溉水质也可以通过钠百分比(SP)评估^[7],计算方法见公式(4):

$$SP = \frac{[\text{Na}^+] + [\text{K}^+]}{[\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]} \times 100\% \quad (4)$$

1.4 土地利用数据

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心数据平台。数据分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,包括7种土地利用类型的信息(图2、表1):①水田;②旱地;③林地;④草地;⑤水库坑塘;⑥农村居民点;⑦建设用地。

在地理空间数据云下载 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 分辨率的数字高程模型(DEM),利用ArcGIS 10.8提取流域范围。基于流域DEM和河流水系,划分8个子流域(图1),比较土地利用类型与水质之间的关系。利用ArcGIS

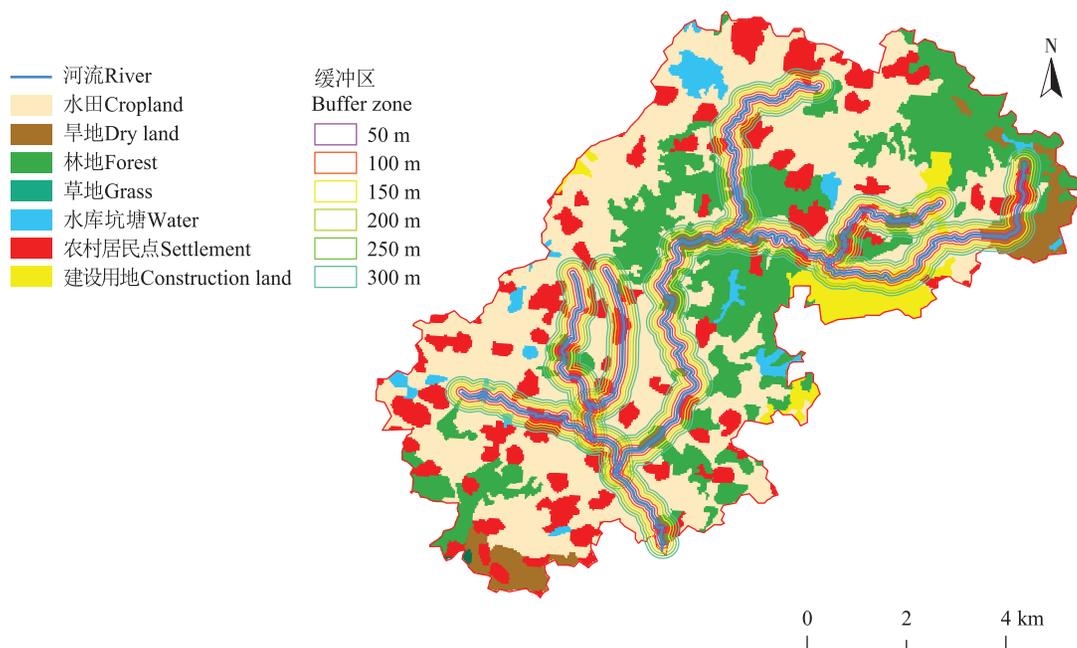


图2 白沙河流域土地利用分布及缓冲区划分

Figure 2 Land use distribution and buffer zone division of Baisha River basin

10.8 计算 8 个子流域的土地利用类型比例。在结合先前研究^[18-20]的基础上,根据白沙河流域实际情况,选择 50、100、150、200、250 m 和 300 m(图 2)为缓冲区半径,并与土地利用类型数据叠加获得不同空间尺度的土地利用数据。

1.5 统计分析

对于水质特性,分别计算旱季和雨季流域的两个统计特征,即平均值和标准差。对对数转换后的水质值进行单向方差分析(ANOVA 检验),以确定两个季节之间的差异显著性。

采用约束排序分析法分析土地利用类型对河流水质的解释能力,典型对应分析(CCA)和冗余分析(RDA)是约束排序分析的两种方法,这两种方法均可

获得因变量和解释变量之间的关系。在排序分析之前需对水质数据进行除趋势对应分析(DCA)。本研究以水质为因变量,以土地利用类型为解释变量,分析土地利用类型对水质指标的解释能力,同时用二维排序图直观展示出来。利用 SPSS 26.0、Canoco 5 和 Origin 2022b 实现数据分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 白沙河流域土地利用分布

表 1 显示了各子流域的土地利用分布情况。水田、农村居民点和林地是该流域最常见的土地利用类型。旱地、草地、水库坑塘和建设用地是子流域中相对较小的组成部分。水田是大多数子流域的主要土

表 1 子流域土地利用分布(%)
Table 1 Land use distribution at the sub-basin(%)

土地利用类型 Land use type	深河段 Shen River reach	山口支流 Mountain pass tributary	塘背支流 Tangbei tributary	南再岭段 Nanzailing reach	低坡支流 Low slope tributary	大治堂支流 Dazhitang tributary	石鼓河支流 Shigu River tributary	州村桥段 Zhou Village bridge section
水田 Cropland	29.27	42.68	54.26	45.36	69.70	71.56	62.5	52.97
旱地 Dry land	20.02	0.62	0.47					11.94
林地 Forest	16.06	36.79	22.05	42.48	4.26	4.16	10.20	14.87
草地 Grass								0.62
水库坑塘 Water	1.45	0.99	5.68	2.27		2.94	3.42	0.62
农村居民点 Settlement	7.10	11.91	17.54	7.81	26.04	19.47	23.73	18.98
建设用地 Construction land	26.10	7.01		2.08		1.87		

地利用类型,面积占比从29.27%到71.56%不等(平均约为54%)。在大多数子流域观察到大量的农村居民点,占比在7.10%~26.04%之间。8个子流域中有7个拥有大量林地(>2.0%),其中南再岭段子流域林地面积占比达42.48%。

2.2 水质参数的时空分布特征

旱季河水表现为轻度碱性特征,pH值为7.09~9.34,平均值为8.09;雨季河水表现为轻度酸性特征,pH值为4.47~7.27,平均值为5.60(表2)。河水的EC值在旱季为74.40~590.00 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,雨季为55.50~157.60 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

水质各指标(表2、图3)显示,旱季平均值均大于雨季(NO_3^- 除外);pH、EC、 NH_4^+-N 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 平均值在雨季明显低于旱季,波动较大。 NH_4^+-N 和TP最大值出现在上游,下游也呈现较大的值。不同季节pH、EC、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 和 F^- 均在中下游浓度增加。

白沙河不同采样点水质参数浓度季节变化见图3。pH和EC的峰值分别为9.34和590.00 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, NH_4^+-N 、TP、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 和 F^- 的峰值分别为9.20、7.07、39.42、10.05、70.10、42.27、75.01、40.85、66.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和0.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均出现在旱季。水质参数平均值呈现季节变化特征,pH、EC、 NH_4^+-N 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 季节变化较大,TP、 F^- 和

NO_3^- 季节变化较小。TP在旱季平均值为劣V类,雨季为IV类。

2.3 水质评价

将本研究白沙河水质参数与《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[22]和《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)^[25]进行比较:旱季20%的样品TP超过地表水环境质量IV类标准,雨季达到54%;旱季26%的样品pH值超过农田灌溉用水标准(>8.5),雨季46%的样品则低于农田灌溉用水标准(<5.5)。

旱季WQI值介于24.12~804.98之间(图4)。水样WQI值为“优”的样品约占29%,42%的样品为“良好”,20%的样品为“差”,9%的样品为“不能饮用”。白沙河中WQI值为“差”的样点分布于农业生产区、工厂和居民区周边;分布在工业园排水口下游、居民点和农田下游的水样WQI值为“不能饮用”。对水样WQI值贡献最大的两个参数是 NH_4^+-N 和TP,旱季 NH_4^+-N 和TP浓度高,主要来源于排放的生活污水和农业生产施用的氮肥、磷肥^[26-27]。

雨季的WQI值介于22.59~137.23之间。大约66%的样品质量为“优”,31%的样品质量为“良好”,3%的样品质量为“差”。B34采样点样品为“差”,雨季河水的WQI值小于旱季,这可能是由于 NH_4^+-N 是B34水样的最大贡献参数,其与上游农业和工业生产

表2 白沙河理化参数及WQI计算参数统计

Table 2 Statistics of physicochemical parameters and parameters used for WQI calculation in the Baisha River

指标 Index	旱季 Dry season				雨季 Rainy season				WQI参数 WQI parameter		
	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Ave.	标准差 SD	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Ave.	标准差 SD	标准值 Standard value	权重 Weight	相对权重 Relative weight
pH	7.09	9.34	8.09	0.59	4.47	7.27	5.60	0.85	6.5~8.5 ^a	4	0.093 0
EC/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	74.40	590.00	304.81	105.90	55.50	157.60	118.18	22.86	1 500 ^a	4	0.093 0
$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.01	9.20	1.32	2.13	<0.01	2.24	0.16	0.44	0.3 ^d	5	0.116 3
TP/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.02	7.07	0.51	1.35	0.05	0.93	0.32	0.17	0.2 ^b	5	0.116 3
$\text{Na}^+(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	4.85	70.10	22.82	13.61	4.03	10.74	7.33	1.70	200 ^a	2	0.046 5
$\text{K}^+(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	2.44	42.27	14.22	7.83	2.98	9.95	7.49	1.66	10 ^c	2	0.046 5
$\text{Ca}^{2+}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	7.97	39.42	24.90	6.12	6.73	19.48	14.83	2.74	200 ^c	2	0.046 5
$\text{Mg}^{2+}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1.61	10.05	4.77	1.59	1.46	3.26	2.34	0.46	150 ^c	2	0.046 5
$\text{Cl}^-(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1.58	66.06	23.20	14.01	3.51	12.41	7.22	1.84	250 ^a	3	0.069 8
$\text{SO}_4^{2-}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1.20	75.01	30.17	18.67	4.62	24.22	16.69	4.51	250 ^a	4	0.093 0
$\text{NO}_3^-(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.01	40.85	8.10	8.49	1.10	14.87	8.38	3.25	10 ^c	5	0.116 3
$\text{F}^-(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.05	0.70	0.26	0.19	0.12	0.36	0.22	0.05	1 ^a	5	0.116 3

注:a.《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)^[21]; b.《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[22]; c.世界卫生组织(WHO)标准^[23]; d.基于归一化值60的参考值^[24]。

Note: a. Hygienic Standard for Drinking Water Quality of the People's Republic of China (GB 5749—2022); b. Surface Water Environmental Quality Standard of the People's Republic of China (GB 3838—2002); c. World Health Organization (WHO) standards; d. Reference value based on normalized value 60.

活动有关。因此,白沙河的主要污染源是工业、城镇生活污水和农业污染。总体而言,河流上游水质最好,中游次之,下游质量最差,劣质水样分布在农业及工业区周边。

2.4 灌溉用水评价

不达标的水源灌溉会导致土壤质量下降和农作物减产,对人体构成潜在威胁^[28]。USSL和Wilcox图法是两种常用的能综合反映灌溉水质的方法^[29],既能

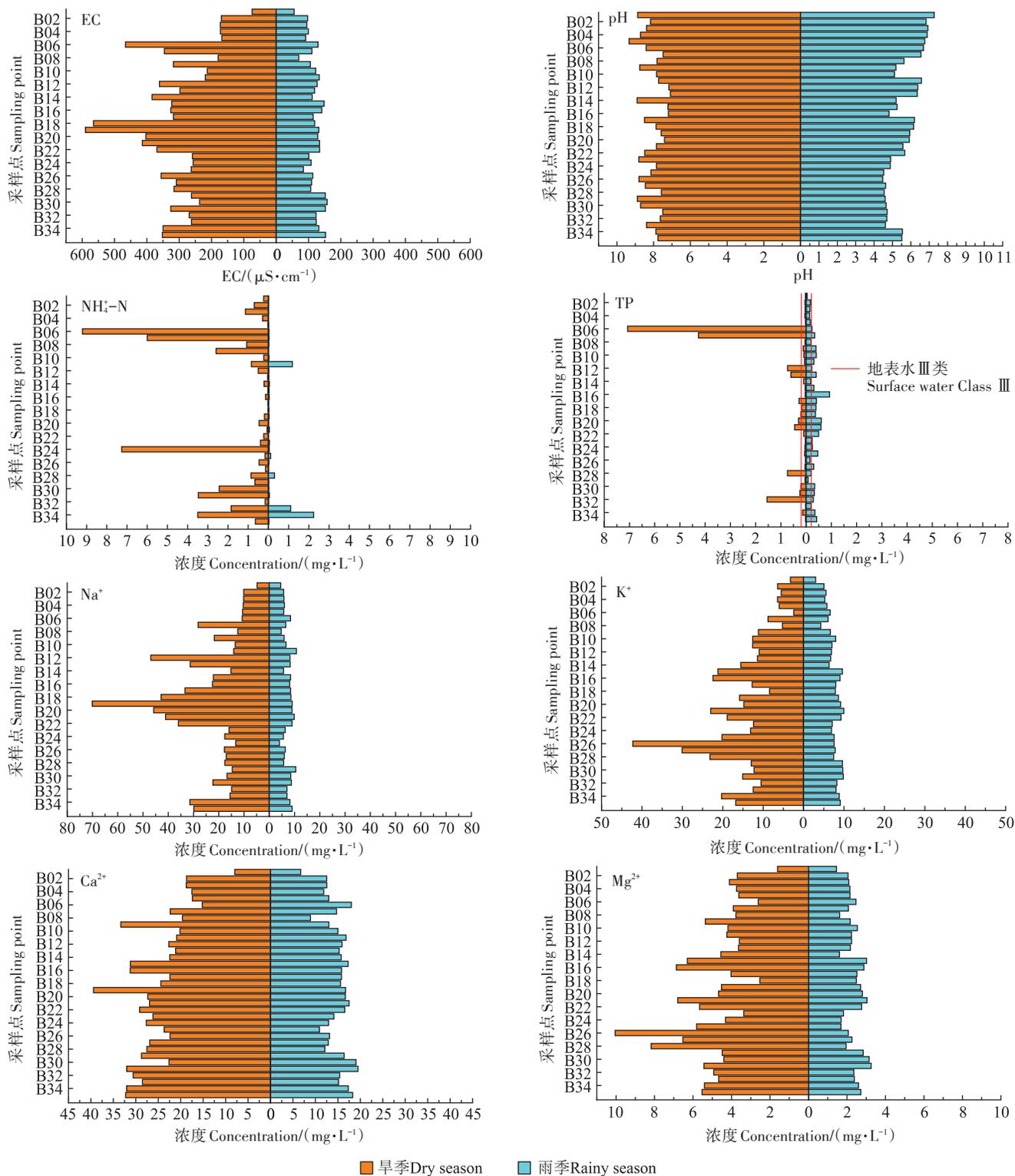
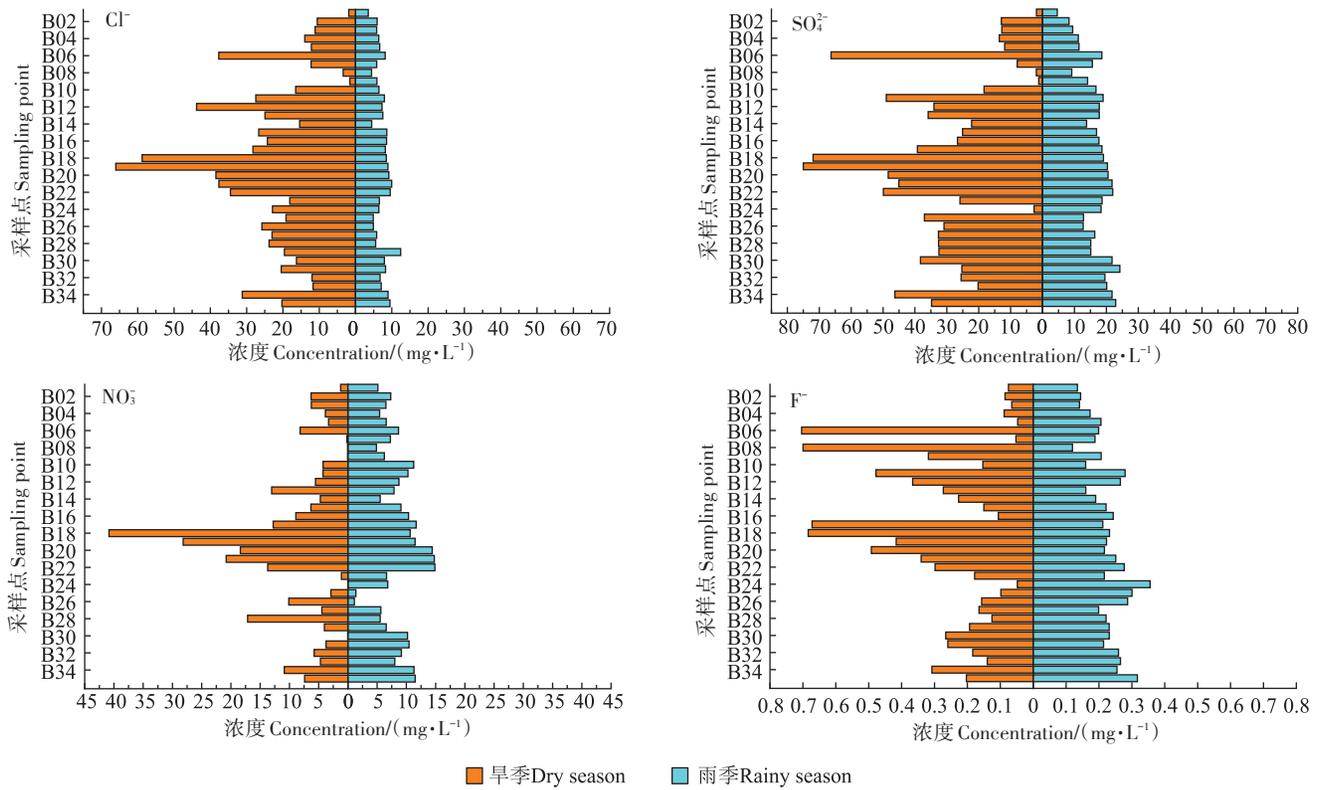


图3 白沙河流域旱季和雨季水质空间对比

Figure 3 Spatial comparisons of water quality indexes in dry season and rainy season in Baisha River basin



续图3 白沙河流域旱季和雨季水质空间对比

Continued figure 3 Spatial comparison of water quality in dry season and rainy season in Baisha River basin

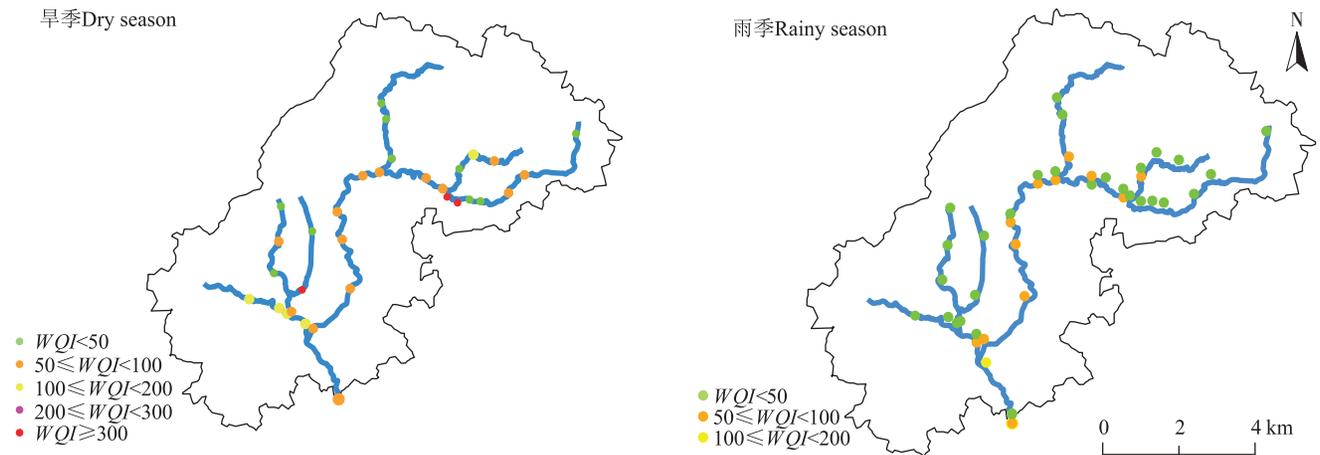


图4 白沙河流域WQI空间分布格局

Figure 4 Spatial distribution pattern of WQI in the Baisha River basin

反映灌溉水水质对土壤的影响,也能反映对植物的影响^[30]。盐度和碱度危害都可以使用USSL图^[31]更好地展示,分别用EC和SAR表示。美国盐度实验室将EC分为四类:C1,低($<250 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$);C2,中等($250 \sim <750 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$);C3,高($750 \sim <2\ 250 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$);C4,很高($\geq 2\ 250 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)^[31]。同样,高SAR值也分为:S1,低(<10);S2,中等($10 \sim 18$);S3,高($>18 \sim 26$);

S4,很高(>26)。白沙河是农业活跃地区,河流水质对当地农业生产具有重要意义。旱季SAR值在2.22~14.95之间变化,平均值为5.83。在USSL图(图5)中,可以观察到在C1S1和C2S1区域中样本数量最多,这说明这些水样没有风险,水质适合灌溉。旱季部分水样属于C2S2(中盐中碱)区,这表明该区域河水在采取预防措施后可以用于灌溉。

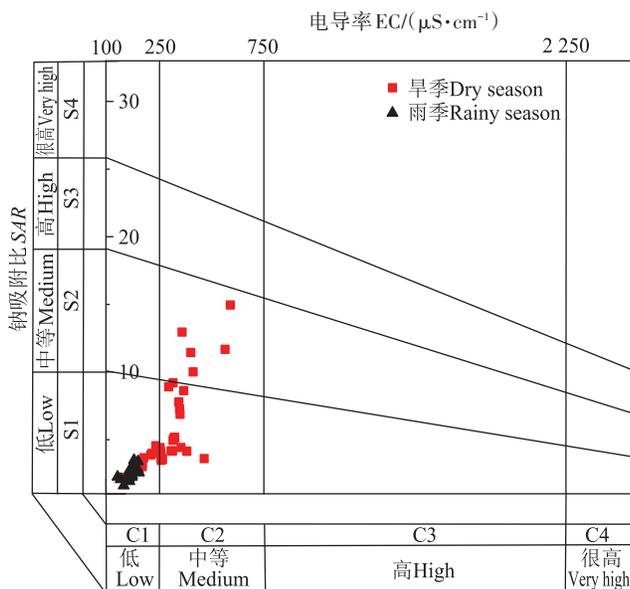


图5 白沙河河水灌溉等级 USSL 图

Figure 5 Irrigation water grade of river water in Baisha River basin by USSL diagram

灌溉水中过量的钠会取代土壤水中的钙和镁,降低土壤的渗透性,导致土壤无法耕种^[31]。当土壤中钠的浓度增加时,会限制空气循环并导致形成不适合植物生长的坚硬而致密的干燥土壤^[32]。灌溉用水可溶性钠百分比的最大允许限值为60^[31]。图6中的可溶性钠百分比表明,与旱季相比,雨季河水灌溉水质良好,可直接用于灌溉,合理的灌溉不会造成盐害和碱害。在旱季,26%的样品SP值超过60,因此不适合直接灌溉使用,需要在灌溉前进行特殊处理。

2.5 土地利用与水质的关系及时空效应

Kolmogorov-Smirnov 拟合优度检验表明,旱季变量中, $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TP、pH、 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 不符合正态分布($P < 0.05$),因此,对这些变量进行了对数变换,以便进一步分析。对数变换结果表明,除 Cl^- 和 NO_3^- 外,所有的对数变换水质参数符合正态分布($P > 0.05$),因此 Cl^- 和 NO_3^- 未用于相关性分析。雨季变量中, $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TP和pH不符合正态分布($P < 0.05$),因此,对这些变量进行了对数变换,以便进一步分析。对数变换结果表明,除 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和pH外,所有的对数变换水质参数符合正态分布($P > 0.05$),因此 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和pH未用于相关性分析。从表3可见,旱季TP与建设用地呈现正相关关系,与水田呈负相关关系; F^- 与林地呈现正相关关系。雨季 K^+ 、 SO_4^{2-} 和 F^- 与建设用地均呈负相关关系,同时水田和农村居民点与 F^- 均呈正相关关系。

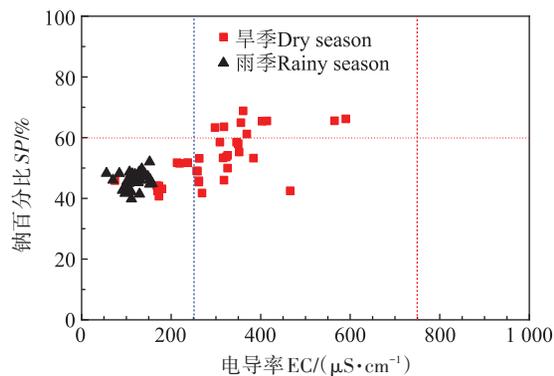


图6 白沙河河水灌溉等级 Wilcox 图

Figure 6 Irrigation water grade of river water in Baisha River basin by Wilcox diagram

RDA 分析结果表明,在子流域水系中,旱季农村居民点与 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、pH和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 呈正相关,与 EC 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 F^- 和TP呈负相关;水库坑塘面积占比与 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 EC 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 呈正相关,与 F^- 、pH、TP和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 呈负相关;林地与 EC 、TP、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 和 F^- 呈正相关,与pH、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 呈负相关(图7);旱地和建设用地与pH、TP和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 均呈正相关。在雨季水田和农村居民点与 EC 、TP、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 F^- 均呈正相关;旱地和建设用地与水质指标均呈负相关;林地与TP、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 F^- 呈正相关;水库坑塘与 EC 、TP、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 呈正相关(图8)。

在各缓冲区尺度下,旱季水田面积占比在各缓冲区与TP和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 呈正相关(图7)。在雨季,农村居民点面积占比在各缓冲区内与所有污染物均呈正相关;林地和水田面积占比在各缓冲区内与所有污染物均呈负相关(图8)。

2.6 PCA 主要影响因素分析

根据 Kaiser Meyer-Olkin (KMO) 检验分析,旱季和雨季的KMO值分别为0.56和0.76, Bartlett球形检验的显著性为0,表明本研究中的数据适合进行主成分分析(PCA)^[33]。运用SPSS 22.0对旱季和雨季水质指标进行主成分分析,得到水质指标的特征值和方差的贡献率(表4),根据相关研究^[33],将特征值大于1的成分确定为主成分,因此在旱季和雨季分别提取3个主成分,累积方差贡献率分别达到75.78%和81.71%。

旱季和雨季河流水质指标旋转因子荷载情况见图9。旱季提取到的第一主成分特征值为4.98,方差贡献率为41.46%,主要荷载指标为 EC 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 。河水中 Cl^- 主要来源于农业化合物(KCl)、含

表3 雨季和旱季土地利用类型与水质指标之间的皮尔逊相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficient between land use types and water quality index in rainy and dry seasons

季节 Season	水质指标 Index	水田 Cropland	旱地 Dry land	林地 Forest	草地 Grass	水库坑塘 Water	农村居民点 Settlement	建设用地 Construction land
旱季 Dry season	EC	0.078	-0.275	0.401	0.211	0.283	-0.182	-0.502
	NH ₄ ⁺ -N	0.150	0.370	-0.576	0.232	-0.658	0.438	0.208
	TP	-0.717*	0.703	0.052	-0.322	-0.112	-0.565	0.943**
	pH	0.061	0.282	-0.448	-0.308	-0.253	0.018	0.481
	Na ⁺	-0.118	-0.168	0.546	0.275	-0.081	-0.312	-0.354
	K ⁺	0.689	-0.420	-0.279	0.171	0.426	0.384	-0.668
	Ca ²⁺	0.686	-0.412	-0.223	0.721	0.180	0.613	-0.912**
	Mg ²⁺	0.604	-0.355	-0.278	0.137	0.565	0.331	-0.571
	SO ₄ ²⁻	0.018	-0.109	0.337	0.311	0.109	-0.266	-0.339
雨季 Rainy season	F ⁻	-0.410	-0.182	0.800*	0.016	-0.129	-0.559	-0.091
	EC	0.336	-0.205	-0.053	0.531	0.438	0.351	-0.661
	TP	-0.018	-0.338	0.500	0.162	0.445	-0.128	-0.537
	Na ⁺	-0.059	-0.117	0.399	0.439	0.165	-0.142	-0.429
	K ⁺	0.057	-0.434	-0.093	0.396	0.406	0.430	-0.825*
	Ca ²⁺	0.182	-0.101	0.043	0.535	0.303	0.252	-0.563
	Mg ²⁺	-0.007	-0.074	0.210	0.309	0.479	-0.042	-0.362
	Cl ⁻	0.152	-0.010	0.114	0.645	0.027	0.047	-0.499
	SO ₄ ²⁻	0.469	-0.278	-0.106	0.564	-0.096	0.499	-0.731*
NO ₃ ⁻	-0.223	0.033	0.428	0.400	-0.031	-0.189	-0.266	
F ⁻	0.856**	-0.289	-0.558	0.555	-0.258	0.800*	-0.744*	

注:*表示水质指标间在0.05水平上显著相关;**表示水质指标间在0.01水平上显著相关。

Note:* and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively.

盐的生活污水(NaCl为主)等^[34];NO₃⁻和K⁺主要来源于居民生活废水、农业生产的化肥等^[35],SO₄²⁻来源于农药中含硫化合物^[35]及工业活动^[36],第一主成分中的水质指标主要受人类活动影响,水质指标之间的相关性呈现相同的特征。旱季第二主成分特征值为2.62,方差贡献率为21.83%,主要荷载指标为K⁺、Mg²⁺和Ca²⁺。河水中K⁺主要来源于生活废水及化肥,Mg²⁺和Ca²⁺主要受岩石风化影响^[37]。旱季第三主成分特征值为1.50,方差贡献率为12.49%,主要荷载指标为NH₄⁺-N和TP,氮磷污染与农业灌溉退水及畜禽养殖排水、居民生活污水排放有关^[38-39]。雨季提取到的第一主成分特征值为7.10,方差贡献率为59.18%,主要荷载指标为EC、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻和TP。雨季第二主成分特征值为1.61,方差贡献率为13.44%,主要荷载指标为F⁻和K⁺;雨季第三主成分特征值为1.09,方差贡献率为9.09%,主要荷载指标为NH₄⁺-N。

雨季水质指标污染来源与旱季保持一致,主要与农业面源^[40]、生活污水、工业生产有关(图10)。白沙河流域是高州市经济最发达的地区,工业发展迅速、农业生产活动频繁、居住人口众多,污水处理设

施缺乏有效运维,导致部分生活污水直排,且农业生产过程中的化肥和牲畜粪便也会排入白沙河,导致水质变差。

3 讨论

从时间变化上来看,旱季河水表现为轻度碱性特征,雨季河水表现为轻度酸性特征,雨季水质优于旱季。旱季主控因素为SO₄²⁻、Ca²⁺和Cl⁻;雨季主控因素为SO₄²⁻、Ca²⁺和NO₃⁻。流域内主要农作物有水稻、玉米和蔬菜,3月份农业施肥和农药喷洒量低,6月份农业施肥和农药用量增加。3月份河流流量低,河水自净能力较差,工业区和生活废水排放导致SO₄²⁻和Cl⁻含量增加;6月份进入雨季,河流流量增加,河流自净能力得到提高^[41],SO₄²⁻浓度虽然低于旱季但仍为主要控制因素,NO₃⁻浓度虽低于SO₄²⁻但比旱季明显增加。

土地利用是人类活动在空间上的综合反映,一是通过不同人类活动方式以不同强度影响营养盐进入水体的输入量;二是通过用地方式改变地表粗糙度从而影响地表径流过程和营养盐进入水体的过程。本研究采用水质和土地利用类型监测及数理统计的方

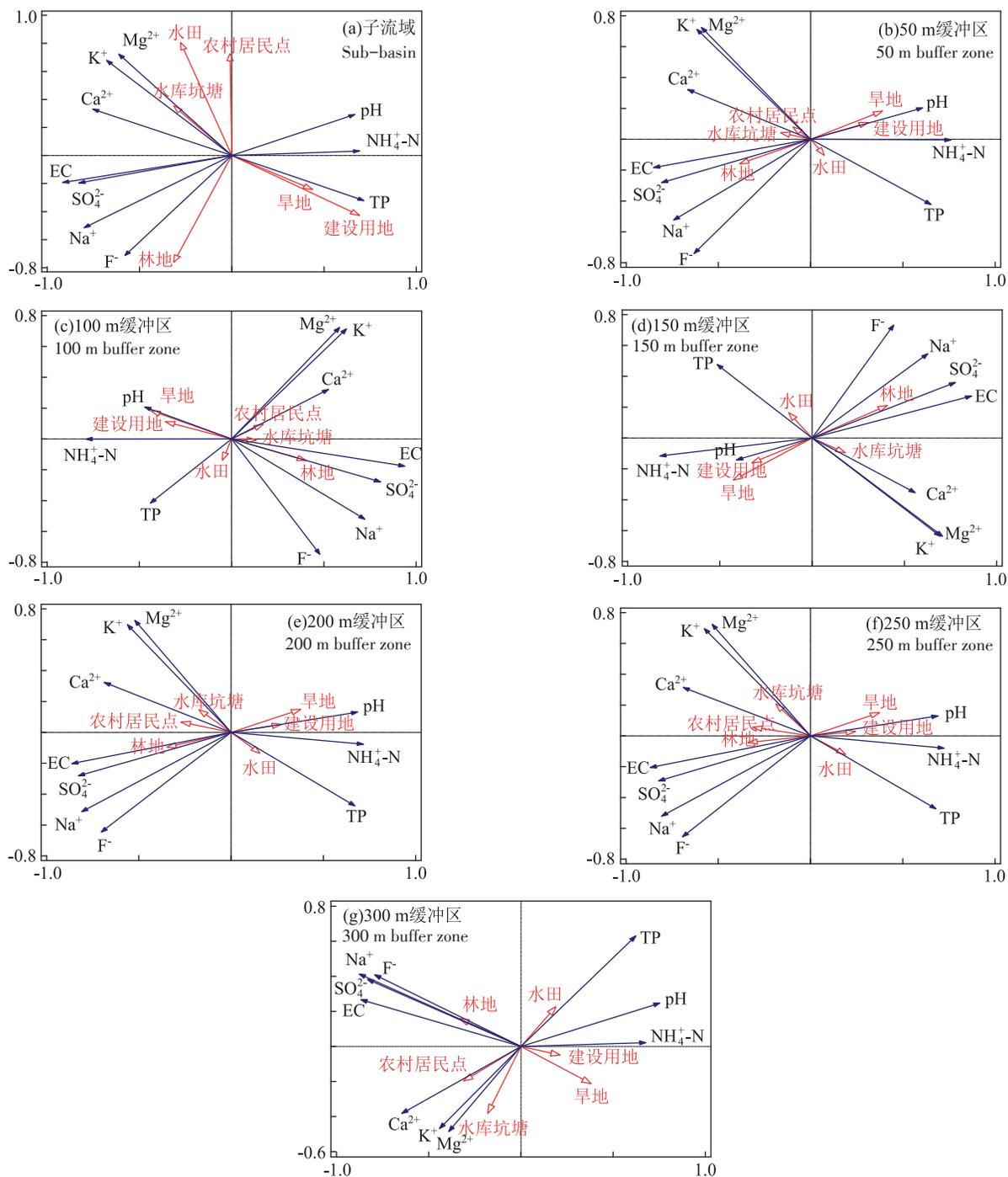


图7 旱季水质与土地利用类型RDA分析

Figure 7 RDA analysis of water quality and land use type in dry season

法,观察并分析白沙河流域用地类型与水质参数间存在的规律性。

RDA分析结果表明,在子流域尺度上,旱地和建设用地面积占比在旱季与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和TP呈正相关,这与已有研究结论一致^[42],说明旱地和建设用地是水体潜在的污染物的来源。旱地由于耕作和施肥等农业活动,土壤中氮、无机物和农药等污染物经降雨和灌

溉冲刷后随径流输入河流^[42],导致水体污染。建设用地与大量高强度的人类活动有关,容易产生生活污水和工业废水,从而污染水体。水田和水库坑塘面积占比与 K^+ 呈正相关,这与农田在耕作中大量施肥有关,水库坑塘涉及水产养殖,营养物质进入水体造成污染。雨季农村居民点和水田面积占比与所有污染物均呈正相关,这可能是由于在雨季水田中施用的农

表4 白沙河河流水质指标主要成分解释总方差

Table 4 Total variance of the interpretation of the main components of Baisha River water quality indexes

季节 Season	主成分 Primary composition	初始特征值 Initial eigenvalue			提取荷载平方和 Sum of square extract loads			旋转荷载平方和 Sum of square of rotational loads		
		总计 Aggregate contribution	方差贡献率 Variance rate/%	累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	总计 Aggregate contribution	方差贡献率 Variance rate/%	累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	总计 Aggregate contribution	方差贡献率 Variance rate/%	累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%
旱季 Dry season	F1	4.98	41.46	41.46	4.98	41.46	41.46	4.72	39.33	39.33
	F2	2.62	21.83	63.29	2.62	21.83	63.29	2.51	20.90	60.23
	F3	1.50	12.49	75.78	1.50	12.49	75.78	1.87	15.55	75.78
雨季 Rainy season	F1	7.10	59.18	59.18	7.10	59.18	59.18	6.36	53.00	53.00
	F2	1.61	13.44	72.62	1.61	13.44	72.62	2.31	19.23	72.23
	F3	1.09	9.09	81.71	1.09	9.09	81.71	1.14	9.48	81.71

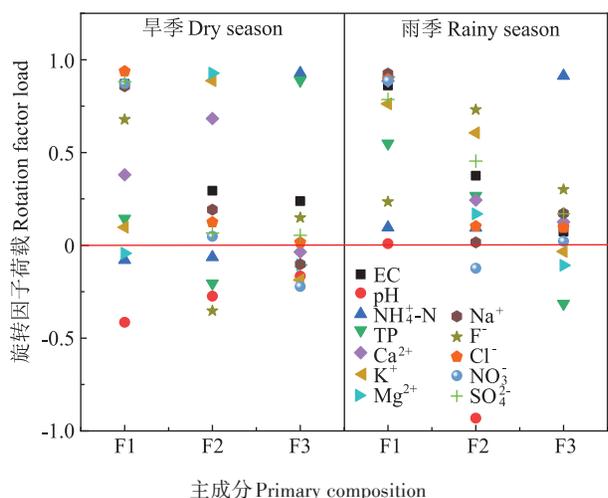


图9 白沙河流域水质指标的旋转因子荷载矩阵

Figure 9 Rotation factor loading matrix of water quality indexes in Baisha River basin

河两岸分布,污染物易通过农田和工业排水进入河流造成污染。旱地和建设用地面积占比均与pH呈正相关;50~250 m缓冲区水库坑塘与EC、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺和SO₄²⁻呈正关,50~300 m缓冲区水库坑塘与pH、TP和NH₄⁺-N呈负相关,白沙河流域水库坑塘以水产养殖为主,大量的饲料溶于水后通过排水进入河流;林地面积占比在各缓冲区内与EC、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻和F⁻正相关,流域内林地以种植荔枝和龙眼为主并沿河分布,水样采集期正处于果树施肥期间,营养物易进入河流。雨季农村居民点与各缓冲区内污染物均呈正相关关系,可能与农村居民点内居民生活污水收集处理率不高及污水处理设施在雨季出现溢流有关。各缓冲区内旱地和建设用地面积占比与F⁻呈正相关,与其他水质指标呈负相关;50 m缓冲区水库坑塘面积占比与Mg²⁺、Na⁺、NO₃⁻和TP呈正相关,水



图10 白沙河流域河流污染来源

Figure 10 Sources of river pollution in Baisha River basin

田和林地与 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 NO_3^- 和TP无相关性,与 K^+ 、 Ca^{2+} 、EC、 Cl^- 和 F^- 呈负相关;100~300 m缓冲区水库坑塘面积占比与 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 NO_3^- 和TP正相关;旱季和雨季林地各缓冲区尺度上与TP和 NH_4^+-N 存在负相关关系,与东江源流域^[18]、河湟谷地^[19]和潭江流域^[43]的研究结论一致,表明随着林地占比增大水体质量趋好,同时林地对以上两种污染物具有明显的削减作用。

相关性分析表明,旱季建设用地与TP呈正相关,建设用地是人类活动频繁的区域,工业用水和城镇污水排放给河水带来点源污染^[44]。

由图11可知,在所有空间尺度下,旱季250 m缓冲区尺度水田对河流的水质解释率最高,雨季250 m缓冲区尺度农村居民点对河流水质解释最高。其中

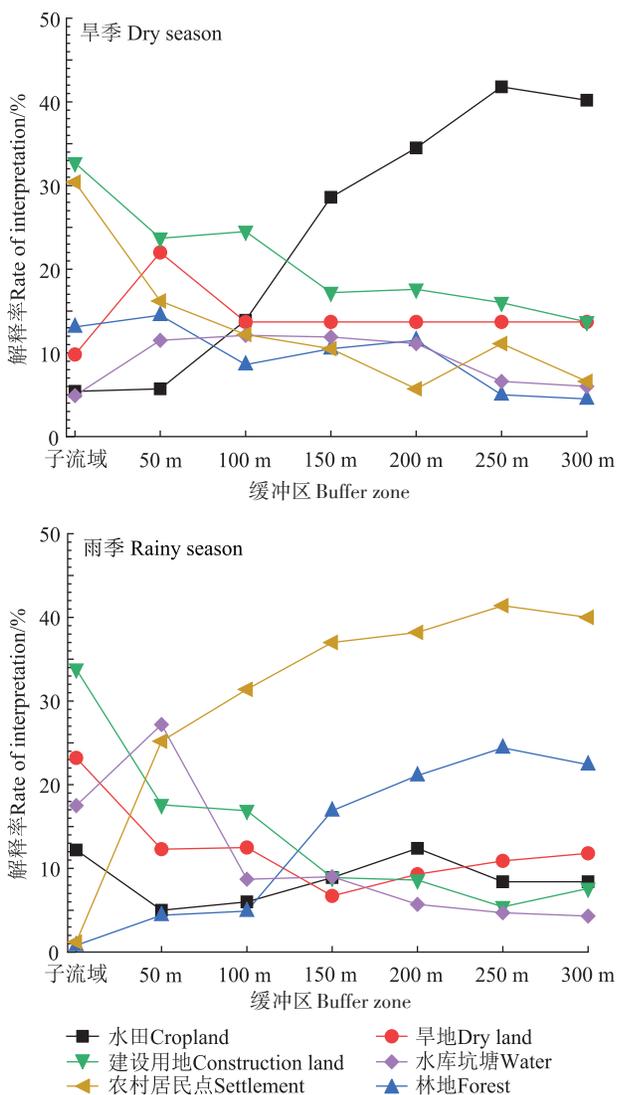


图11 不同时空尺度下土地利用类型的解释度

Figure 11 Explained variance of land use types at different spatio-temporal scales

旱季主要的土地利用类型为水田和建设用地,雨季主要的土地利用类型为农村居民点和林地。

4 结论

本研究采用水质监测与数理统计结合的方法,以白沙河流域为例观察分析典型农业区水质指标的变化及影响因素,结论如下:

(1)降雨对pH、EC、 NH_4^+-N 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的影响较大,且旱季各水质指标整体都大于雨季。雨季TP由旱季时的劣V类提升为IV类。

(2)WQI水质评价结果显示,白沙河流域雨季河流水质明显优于旱季,66%水样为“优”,降水对白沙河水质有一定的改善作用。旱季水质较差的水样集中于工业园排水渠旁、居民区和农业耕种区。灌溉水质评价表明,雨季河流水质适合灌溉。旱季26%的水样超过钠百分比(SP)限值,需要在灌溉前进行处理。

(3)主成分分析表明,白沙河流域水质主要受农业面源、居民生活污水及工业园排水影响。影响水质的关键因子是 NH_4^+-N 、TP和 NO_3^- 。

(4)土地利用类型分析表明,白沙河流域旱季主要影响因子为水田和建设用地,雨季主要影响因子是农村居民点和林地;250 m缓冲区尺度下,在旱季和雨季,水田和农村居民点与水质的关联性均较强。

研究结果可以为白沙河流域近流域土地利用优化和水污染防治提供科学依据。此外,通过相关性分析得到的部分规律难以解释,如流域范围内水质指标与旱地没有呈现显著的相关关系,在流域尺度上面源污染特征不明显,需要进一步加强水质监测来进行分析研究。

参考文献:

- [1] 张宇,朱立志.关于“乡村振兴”战略中绿色发展问题的思考[J].新疆师范大学学报(哲学社会科学版),2019,40(1):65-71. ZHANG Y, ZHU L Z. The green development in the strategy of “rural revitalization”[J]. *Journal of Xinjiang Normal University (Philosophy and Social Sciences)*, 2019, 40(1):65-71.
- [2] 王立萍,娄山崇,孙秀玲,等.尼山水库小流域典型面源污染来源及特征分析[J].农业资源与环境学报,2022,39(1):26-35. WANG L P, LOU S C, SUN X L, et al. Analysis of sources and characteristics of typical non-point pollution in a small watershed of Nishan Reservoir, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(1):26-35.
- [3] 张丹,段慧,杨洪霞,等.农村河流断面污染物通量估算研究[J].中国沼气,2015,33(3):95-98. ZHANG D, DUAN H, YANG H X, et al. Study on the estimation of river pollutant flux in rural area[J]. *China*

- Biogas*, 2015, 33(3):95-98.
- [4] 江静, 王咏, 张刚, 等. 饮马河支流伊通河农村段水质时空特征及评价研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2017, 49(4): 140-148. JIANG J, WANG Y, ZHANG G, et al. Temporal and spatial characteristics and evaluation of water quality in Yitong River rural section of Yinma River tributary[J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 49(4): 140-148.
- [5] SHEN D J, SPEED R. Water resources allocation in the People's Republic of China[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2009, 25(2): 209-225.
- [6] XIAO J, WANG L Q, DENG L, et al. Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 650(2): 2004-2012.
- [7] FRANCO S, GAETANO V, GIANNI T. Urbanization and climate change impacts on surface water quality: Enhancing the resilience by reducing impervious surfaces[J]. *Water Research*, 2018, 144(1): 491-502.
- [8] WU Z S, LAI X J, LI K Y. Water quality assessment of rivers in Lake Chaohu basin (China) using water quality index[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107021.
- [9] SUTADIAN A D, MUTTIL N, YILMAZ A G, et al. Development of river water quality indices: A review[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(1): 1-29.
- [10] NONG X Z, SHAO D G, ZHONG H, et al. Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WQI) method[J]. *Water Research*, 2020, 178(1): 115781.
- [11] GAO B, GAO L, GAO J B, et al. Simultaneous evaluations of occurrence and probabilistic human health risk associated with trace elements in typical drinking water sources from major river basins in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 666(20): 139-146.
- [12] TONG S M, LI H R, TUDI M, et al. Comparison of characteristics, water quality and health risk assessment of trace elements in surface water and groundwater in China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 219: 112283.
- [13] USTAOĞLU F, TEPE Y, TAS B. Assessment of stream quality and health risk in a subtropical Turkey river system: A combined approach using statistical analysis and water quality index[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 113: 105815.
- [14] 张汉. 白沙河污染的成因和对策[J]. 资源节约与环保, 2014(5): 167-168. ZHANG H. Causes and countermeasures of Baisha River pollution[J]. *Resources Economization & Environment Protection*, 2014(5): 167-168.
- [15] MENG Q P, ZHANG J, ZHANG Z Y, et al. Geochemistry of dissolved trace elements and heavy metals in the Dan River drainage (China): Distribution, sources, and water quality assessment[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2016, 23(8): 8091-8103.
- [16] RICHARDS L A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils [R]. Washington D C: US Department of Agriculture, 1954: 154.
- [17] WILCOX L V. Classification and used of irrigation waters[R]. Washington D C: USDA, 1955: 969.
- [18] 陈优良, 邹文敏, 刘星根, 等. 东江源流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5053-5063. CHEN Y L, ZOU W M, LIU X G, et al. Scale effects of landscape pattern on water quality in Dongjiang River source watershed[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(11): 5053-5063.
- [19] 李好好, 黄懿梅, 郭威, 等. 河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(8): 4042-4053. LI H H, HUANG Y M, GUO W, et al. Influence of land use and land cover patterns on water quality at different spatio-temporal scales in Hehuang Valley[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(8): 4042-4053.
- [20] 张殷俊, 陈爽, 相景昌. 河流近域土地利用格局与水质相关性分析——以巢湖流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(9): 1054-1061. ZHANG Y J, CHEN S, XIANG J C. Correlation between the water quality and Land use composition in the river side area: A case of Chaohu Lake basin in China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(9): 1054-1061.
- [21] 国家卫生健康委员会, 国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. National Health Commission, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standards for drinking water quality: GB 5749—2022[S]. Beijing: China Standards Press, 2022.
- [22] 国家生态环境保护部, 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. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Environmental quality standards for surface water: GB 3838—2002[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [23] KARUNANIDHI D, ARAVINTHASAMY P, SUBRAMANI T, et al. Revealing drinking water quality issues and possible health risks based on water quality index (WQI) method in the Shanmuganadhi River basin of south India[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, 43(3): 931-948.
- [24] 李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 等. 水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2158-2165. LI Y Q, HUANG T L, ZHANG H H, et al. Succession characteristics of algae functional groups and water quality assessment in a drinking water reservoir[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2158-2165.
- [25] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 农田灌溉水质标准: GB 5084—2021[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2021. Ministry of Ecology and Environment, State Administration for Market Regulation. Standard for irrigation water quality: GB 5084—2021[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2021.
- [26] 孟祥巍, 许学工. 平原城市河流面源污染研究范围及方法的选择与效果比较[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 145-150. MENG X W, XU X G. The studied area selection and result comparison of river non-point source pollution in plain urban area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(1): 145-150.
- [27] MENG Z L, YANG Y G, QIN Z D, et al. Evaluating temporal and spatial variation in nitrogen sources along the lower reach of Fenhe River

- (Shanxi Province, China) using stable isotope and hydrochemical tracers[J]. *Water*, 2018, 10(2):231.
- [28] RAYCHAUDHURI M, RAYCHAUDHURI S, JENA S K, et al. WQI to monitor water quality for irrigation and potable use[M]. Bhubaneswar, Odisha, India: Directorate of Water Management, 2014:43.
- [29] ZHOU Y H, LI P Y, XUE L L, et al. Solute geochemistry and groundwater quality for drinking and irrigation purposes: A case study in Xinle City, north China[J]. *Geochemistry*, 2020, 80(4):125609.
- [30] 庞国涛, 阎琨, 李伟. 钦州钦南区水化学特征及健康风险评估[J]. 环境化学, 41(11):1-11. PANG G T, YAN K, LI W. Hydrochemical characteristics and water quality evaluation of Qinnan District, Qinzhou City[J]. *Environmental Chemistry*, 2022,41(11):1-11.
- [31] SAHOO S, KHAOASH S. Impact assessment of coal mining on groundwater chemistry and its quality from Brajrajnagar coal mining area using indexing models[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020,215:106559.
- [32] RAMESH K, ELANGO L. Groundwater quality and its suitability for domestic and agricultural use in Tondiar River basin, Tamil Nadu, India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*,2012,184(6):3887-3899.
- [33] VAROL M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River(Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011,195(15):355-364.
- [34] EVANS C D., REYNOLDS B, CURTIS C J, et al. A conceptual model of spatially heterogeneous nitrogen leaching from a Welsh Moorland catchment[J]. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2004,4(6):97-105.
- [35] 李俊云, 李林立, 谢世友, 等. 人类活动对川东平行岭谷区岩溶地下水化学性质季节变化的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2007(4):514-518. LI J Y, LI L L, XIE S Y, et al. Anthropogenic effect on geochemical property of Karst groundwater in paralleled ridge-valley of east Sichuan[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007(4):514-518.
- [36] 林永生, 裴建国, 杜毓超, 等. 基于多元统计方法的岩溶地下水化学特征及影响因素分析[J]. 环境化学, 2016, 35(11):2394-2401. LIN Y S, PEI J G, DU Y C, et al. Hydrochemical characteristics of Karst groundwater and their influencing factors based on multiple statistical analysis[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(11):2394-2401.
- [37] 徐谨立, 王志兵, 王希杰, 等. 广州流溪河河水主要化学组成时空分布特征及控制因素[J]. 地球化学, 2021,50(2):211-218. XU J L, WANG Z B, WANG X J, et al. Spatial and temporal variations of the river water chemistry in the Liuxihe River, Guangzhou, Guangdong [J]. *Geochimica*, 2021, 50(2):211-218.
- [38] 鲍林林, 李叙勇. 河流沉积物磷的吸附释放特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2017, 26(2):350-356. BAO L L, LI X Y. Release and absorption characteristics of phosphorus in river sediment and their influential factors[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(2):350-356.
- [39] 杨荣金, 王逸卓, 李秀红, 等. 官厅水库水质评价及时空变化特征[J]. 水资源保护, 2021, 37(6):135-141. YANG R J, WANG Y Z, LI X H, et al. Water quality evaluation and spatiotemporal variation characteristics of Guanting Reservoir[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(6):135-141.
- [40] 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.
- [41] 王季震, 张美一, 陆建红. 降雨对河流水质的不确定性影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(5):74-76. WANG J Z, ZHANG M Y, LU J H. Study of the influence of rainfall uncertainties on river water quality[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2005, 24(5):74-76.
- [42] 彭勃, 付永胜, 赵君凤, 等. 小流域土地利用景观格局对水质的影响[J]. 生态科学, 2019, 38(3):90-99. PENG B, FU Y S, ZHAO J F, et al. Effect of land use landscape pattern on water quality in small watershed[J]. *Ecological Science*, 2019,38(3):90-99.
- [43] 唐廉, 胡晓辉, 权冠中, 等. 潭江流域水质时空分布特征及其与土地利用的相关性分析[J]. 地球与环境, 2018, 46(4):364-372. TANG L, HU X H, QUAN G Z, et al. Spatiotemporal distribution of water quality in the Tanjiang River and its correlation with the land use[J]. *Earth and Environment*, 2018,46(4):364-372.
- [44] 王一舒, 吴仁人, 荣楠, 等. 西江下游流域水质与不同空间尺度土地利用的响应关系[J]. 水资源保护, 2021, 37:97-104. WANG Y S, WU R R, RONG N, et al. Response relationship between water quality in the lower reaches of Xijiang River basin and land use at different spatial scales[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37:97-104.