

# 嘉陵江四川中下游段水质时空变化特征及影响因素分析

段 慧, 范 力, 向秋实, 吴 瑶\*

(四川省生态环境监测总站, 四川 成都 610091)

**摘 要:** 使用单因子指数法和内梅罗污染指数法分析 2016 年~2020 年嘉陵江四川段中下游 10 个自动监测断面的水质状况, 并使用 Spearman 相关系数法进行水质时空变化特征及影响因素分析。结果表明, 琼江大安 2017 年为 IV 类水质, 最大超标因子为 TP, 超标倍数为 1.23; 西充河彩虹桥 2018 年为 IV 类水质, 最大超标因子为  $\text{NH}_3\text{-N}$ , 超标倍数为 1.60; 其余断面均未出现超标。2017 年大安断面内梅罗污染指数为 1.00, 轻度污染, 最大污染因子是 TP; 2018 年彩虹桥断面内梅罗污染指数为 1.33, 轻度污染, 最大污染因子是  $\text{NH}_3\text{-N}$ ; 其余断面均为清洁。西充河彩虹桥断面各年月际内梅罗污染指数呈下降或平稳趋势, 琼江大安断面先上升后下降至平稳趋势, 嘉陵江沙溪、巴河江陵、渠江团保岭、渠江赛龙、涪江百顷均有平稳或上升趋势。2016 年~2020 年各年份 Spearman 相关系数( $r_s$ )为  $-0.9 \sim 0.3$ ,  $|r_s| \leq W_p$ , 各监测断面年际水质变化平稳。

**关键词:** 嘉陵江四川中下游; 单因子指数法; 内梅罗污染指数法; Spearman 相关系数法; 时空变化特征

**中图分类号:** TV21      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1166(2023)03-0059-06

**DOI:** 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023030059

**Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Water Quality in the Middle and Downstream Reaches of Jialing River in Sichuan and Analysis on Its Influencing Factors / DUAN Hui, FAN Li, XIANG Qiushi, WU Yao\* / (Sichuan Environmental Monitoring Center, Chengdu 610091, China)**

**Abstract:** Using the methods of the single factor evaluation, the Nemerow pollution index and the Spearman's rank correlation coefficient, the temporal and spatial variation characteristics of water quality and its influencing factors in the middle and downstream reaches of Jialing river in Sichuan from 2016 to 2020 were analyzed based on the automatic monitoring data of ten river sections. The result showed that, the water quality in Daan section of Qionghong river reached at level of class IV in 2017, the maximum exceeding standard factor was TP, and the multiple exceeded the standard was 1.23. The water quality in Caihongqiao section of Xichong river reached at level of class IV in 2018, the maximum exceeding standard factor was  $\text{NH}_3\text{-N}$ , and the multiple exceeded the standard was 1.60. The results of water quality in other river sections did not exceed the prescribed limit. The Nemerow pollution index of the water quality in Daan section with slight pollution was 1.00 in 2017, and the maximum pollution index was TP. The Nemerow pollution index of the water quality in Caihongqiao section with slight pollution was 1.33 in 2018, and the maximum pollution index was  $\text{NH}_3\text{-N}$ . The other river sections had good quality clean water. The result of monthly variation of Nemerow pollution index in Caihongqiao section showed a down-trend or stable trend. The result in Daan section showed tendency to ascend, followed to descend and then remained stable. But the results of other monitoring river sections such as Shaxi section of Jialing river, Jiangling section of Bahe river, Tuanbaoling section of Qujiang river, Sailong section of Qujiang river and Baiqing section of Fujiang river all showed tendency to stable or ascend. The annual Spearman's rank correlation coefficient ( $r_s$ ) from 2016 to 2020 was  $-0.9 \sim 0.3$ ,  $|r_s| \leq W_p$ , and the yearly water quality in all monitoring river sections remained stable.

**Key words:** the middle and lower reaches of Jialing river in Sichuan; the single factor evaluation method; the Nemerow pollution index method; the Spearman's rank correlation coefficient method; temporal and spatial variation characteristics

嘉陵江流域面积达 3.58 万平方公里, 是长江干流上游左岸主要支流, 也是长江上游重要的生态屏障

和水源涵养地。在四川省境内, 嘉陵江流经广元市、南充市、遂宁市、广安市、达州市等五市, 流域面

收稿日期: 2022-08-15      修回日期: 2022-09-22

作者简介: 段 慧(1982-), 女, 四川成都人, 高级工程师, 主要从事环境监测等工作。

通信作者: 吴 瑶, E-mail: 23031632@qq.com

积约 641 公里,主要支流有白龙江、东河、西河、渠江、涪江等,是四川省重要的河流。作为川渝两地交界河流,川渝两地以水环境质量改善为目标,对嘉陵江联合开展水污染联防联控,流域水环境质量得到持续改善。尽管水质优良率始终保持在全省前列,但部分支流水质仍不稳定,流域水质及污染状况的研究受到关注<sup>[1-4]</sup>。为了对嘉陵江水质进行评价并对其变化趋势进行分析,本文结合单因子指数法和内梅罗污染指数法,对嘉陵江四川段人口密度相对上游较高的中下游,10 个自动监测断面的水质状况进行评价;使用 Spearman 相关系数法进行水质变化趋势分析,探寻影响部分超标断面水质变化的因素,提出相关建议。

## 1 材料与方法

表 1 监测断面基本情况

序号	断面名称	所属河流	所属水系	所在城市	交界情况
1	沙溪	嘉陵江	嘉陵江	南充市	市界(广元市-南充市)
2	彩虹桥	西充河	嘉陵江	南充市	—
3	烈面	嘉陵江	嘉陵江	广安市	市界(南充市-广安市)
4	金子	嘉陵江	嘉陵江	广安市	省界出川(川-渝)
5	江陵	巴河	渠江	达州市	市界(巴中市-达州市)
6	团堡岭	渠江	渠江	达州市	市界(达州市-广安市)
7	赛龙	渠江	渠江	广安市	省界出川(川-渝)
8	百顷	涪江	涪江	遂宁市	市界(绵阳市-遂宁市)
9	老池	涪江	涪江	遂宁市	省界出川(川-渝)
10	大安	琼江	涪江	遂宁市	省界出川(川-渝)

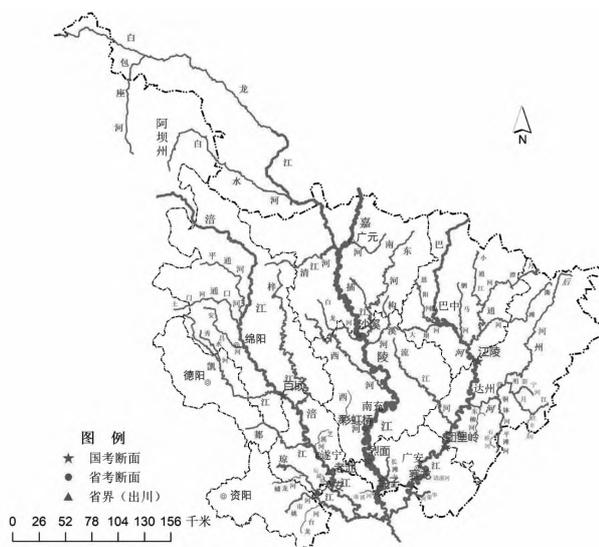


图 1 监测点位分布图

### 1.1 水质监测资料

#### 1.1.1 数据来源

根据历年嘉陵江四川段中下游污染源研究结果显示,流域内人口众多,居民生产、生活导致的面源污染影响部分支流水质<sup>[5-6]</sup>,主要包括化学需氧量、总磷、氨氮等。与传统的水质手工监测比较,自动监测具有实时、连续监测的优势。因此,本文选取 2016 年~2020 年嘉陵江四川段中下游 10 个断面的溶解氧(DO)、高锰酸盐指数( $I_{Mn}$ )、氨氮( $NH_3-N$ )和总磷(TP)4 个指标自动监测数据进行水质评价及趋势分析。

#### 1.1.2 监测断面

本次选取的 10 个监测断面位于嘉陵江四川段人口密度相对上游较高的中下游区域,各断面基本情况见表 1,具体点位分布如图 1 所示。

### 1.2 水质评价法

#### 1.2.1 单因子指数法

单因子指数法是将参评因子的多次监测值的极值或平均值与评价水体中该因子的标准值(依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III 类标准限值<sup>[7]</sup>)相比较,根据对比结果判定该因子的水质类别。该评价法是环境水质评价的基础,以最大污染因子的指数确定水体类别。其计算公式为:

$$P_i = \frac{C_{i,max}}{C_{i,s}} \quad (1)$$

根据《环境影响评价技术导则 地表水环境》(HJ 2.3—2018),河流水体溶解氧污染指数计算公式如下:

$$s_{DO,j} = DO_s / DO_j \quad DO_j \leq DO_f \quad (2)$$

$$S_{DO,j} = \frac{|DO_f - DO_j|}{DO_f - DO_s} \quad DO_j > DO_f \quad (3)$$

公式(1)中:  $P_i$  为参评因子  $i$  的水质指数;  $C_{i,max}$  为参评因子  $i$  的最大实测浓度值;  $C_{i,s}$  为参评因子  $i$  的标准限值。公式(2)和公式(3)中:  $S_{DO,j}$  为溶解氧的标准指数;  $DO_j$  为溶解氧在  $j$  点的实测统计代表值,  $mg \cdot L^{-1}$ ;  $DO_s$  为溶解氧的水质评价标准值,  $mg \cdot L^{-1}$ ;  $DO_f$  为溶解氧饱和和溶解氧浓度,  $mg \cdot L^{-1}$ ; 河流  $DO_f = 468 / (31.6 + T)$ , 其中  $T$  为实测水温平均值,  $^{\circ}C$ 。

1.2.2 内梅罗污染指数法

内梅罗污染指数法由单因子指数法发展而来, 能够全面地反映出各种污染物对环境受污染程度的贡献, 是一种加权型多因子环境质量指数, 能够兼顾极值或突出最大值, 具有较高的客观性<sup>[8]</sup>, 近年来在环境水质状况研究中应用较为广泛<sup>[9-11]</sup>。计算公式如下:

$$P_{综} = \sqrt{\frac{(\frac{C_i}{C_{i,s}})_{max}^2 + [\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\frac{C_i}{C_{i,s}})]^2}{2}} \quad (4)$$

式中:  $P_{综}$  为内梅罗污染指数;  $C_i$  为第  $i$  项评价指标的实测值;  $C_{i,s}$  为第  $i$  项评价指标的标准限值(依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III 类标准限值);  $n$  为评价指标的个数。

根据各污染指标的标准浓度, 计算各级标准对

表2 Spearman 相关系数的临界值( $W_p$ )

N	$W_p$		N	$W_p$	
	显著水平 (单侧检验) 0.05	显著水平 (单侧检验) 0.01		显著水平 (单侧检验) 0.05	显著水平 (单侧检验) 0.01
4	1.000	—	16	0.425	0.601
5	0.900	1.000	18	0.399	0.564
6	0.829	0.943	20	0.377	0.534
7	0.714	0.893	22	0.359	0.508
8	0.643	0.833	24	0.343	0.485
9	0.600	0.783	26	0.329	0.465
10	0.564	0.746	28	0.317	0.448
12	0.506	0.712	30	0.306	0.432
14	0.456	0.645	—	—	—

2 结果与讨论

2.1 水质评价结果与分析

2.1.1 水质评价结果

采用单因子指数和内梅罗污染指数对嘉陵江四川段中下游 2016 年~2020 年年均监测数据进行水质评价与分析, 结果见表 3。

应的内梅罗标准污染指数值: 当  $P_{综} < 1$ , 为清洁;  $1 \leq P_{综} < 1.6$ , 轻度污染;  $1.6 \leq P_{综} < 2.4$ , 中度污染;  $P_{综} > 2.4$ , 重度污染。(注: 饱和  $DO_f$  的温度由流域内 10 个自动监测断面 2016 年~2020 年平均温度值计算得到为  $19^{\circ}C$ )。

1.3 水质变化趋势分析方法

在水环境质量评价中常采用 Spearman 相关系数法来描述污染物的变化趋势<sup>[12]</sup>, 该方法是对已知时段各项污染因子的监测值进行统计分析, 评价污染因子从过去到现在的变化趋势, 同时采用 Daniel 的趋势检验来衡量环境污染变化趋势在统计上是否具有显著性, 其计算公式如下:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N^3 - N} \quad (5)$$

式中:  $r_s$  为相关系数;  $X_i$  为周期 1 到周期  $N$  按浓度从小到大排列的序号;  $Y_i$  为按时间排列的序号;  $N$  为时间周期数。

将  $r_s$  绝对值同 Spearman 相关系数统计表中临界值  $W_p$  (如表 2 所示) 进行比较。如果  $|r_s| > W_p$ , 则表明变化趋势有显著意义; 如果  $r_s$  为负值, 则表明为下降趋势, 反之则为上升趋势。当  $|r_s| \leq W_p$  则表明变化趋势没有显著意义, 说明在评价时段内水质变化稳定或平稳。

单因子指数评价结果显示, 琼江大安 2017 年为 IV 类水质, 超标因子为 TP, 超标倍数为 1.23; 西充河彩虹桥 2018 年为 IV 类水质, 超标因子为  $NH_3-N$ , 超标倍数为 1.60; 其余断面均未出现超标。

内梅罗污染指数法评价结果显示, 2017 年大安断面  $P_{综}$  为 1.00, 轻度污染, 最大污染因子是 TP; 2018 年彩虹桥断面  $P_{综}$  为 1.33, 轻度污染, 最大污

表3 2016年~2020年嘉陵江四川段中下游水质评价结果统计

监测断面	2016年				2017年				2018年				2019年				2020年			
	单因子 指数评价 结果	内梅罗污染 指数( $P_{综}$ )		单因子 指数评价 结果	内梅罗污染 指数( $P_{综}$ )		单因子 指数评价 结果	内梅罗污染 指数( $P_{综}$ )		单因子 指数评价 结果	内梅罗污染 指数( $P_{综}$ )		单因子 指数评价 结果	内梅罗污染 指数( $P_{综}$ )						
		结果	对应 等级		结果	对应 等级		结果	对应 等级		结果	对应 等级		结果	对应 等级	结果	对应 等级			
沙溪	II	0.45	清洁	II	0.20	清洁	II	0.22	清洁	I	0.20	清洁	II	0.18	清洁					
彩虹桥	III	0.88	清洁	III	0.82	清洁	IV(NH <sub>3</sub> -N, 1.60)	1.33	轻度 污染	III	0.65	清洁	III	0.65	清洁					
烈面	II	0.48	清洁	II	0.35	清洁	II	0.47	清洁	II	0.28	清洁	II	0.29	清洁					
金子	II	0.48	清洁	II	0.31	清洁	II	0.46	清洁	II	0.45	清洁	II	0.23	清洁					
江陵	II	0.31	清洁	II	0.46	清洁	II	0.32	清洁	II	0.27	清洁	II	0.24	清洁					
团堡岭	II	0.50	清洁	III	0.52	清洁	II	0.51	清洁	II	0.47	清洁	II	0.38	清洁					
赛龙	II	0.51	清洁	II	0.48	清洁	II	0.51	清洁	III	0.46	清洁	II	0.51	清洁					
百顷	II	0.50	清洁	II	0.48	清洁	II	0.35	清洁	II	0.30	清洁	II	0.33	清洁					
老池	III	0.52	清洁	II	0.50	清洁	II	0.40	清洁	II	0.51	清洁	II	0.52	清洁					
大安	III	0.71	清洁	IV(TP,1.23)	1.00	轻度 污染	III	0.69	清洁	III	0.60	清洁	III	0.67	清洁					

染因子是 NH<sub>3</sub>-N; 其余断面均为清洁。

2.1.2 未达标断面的水质状况及成因分析

为进一步探究上述不达标断面的水质状况及污染成因,对2016年~2020年大安和彩虹桥2个断面各监测指标分别进行月均值浓度变化分析。

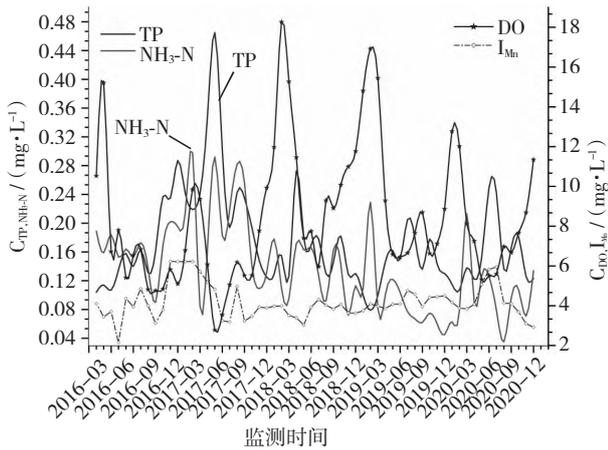


图2 2016年~2020年大安水质月均值浓度变化

从大安(图2)和彩虹桥(图3)监测结果可以看出,大安 DO 2016年8月~2016年10月和2017年5月、6月不达标,尤其是2017年5月最低浓度为 2.78 mg·L<sup>-1</sup>; I<sub>mn</sub> 2016年11月~2017年2月出现超标,其超标浓度范围为 6.21 mg·L<sup>-1</sup>~6.23 mg·L<sup>-1</sup>; TP 2016年10月~2017年6月、8月、9月,2018年4月和2019年7月以及2020年6月、7月超标明显,最大月

均浓度出现在2017年5月为 0.465 mg·L<sup>-1</sup>。

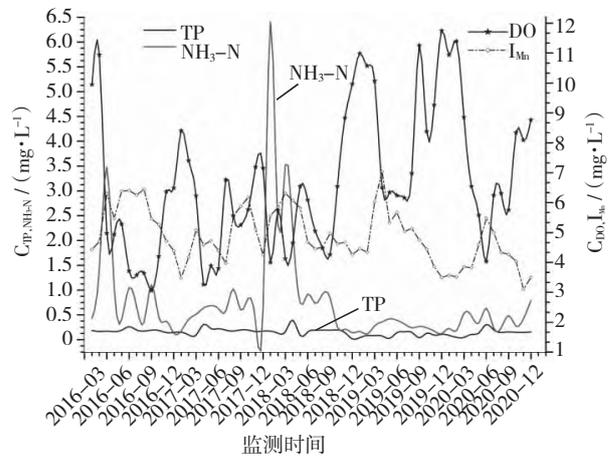


图3 2016年~2020年彩虹桥水质月均值浓度变化

彩虹桥 DO 2016年3月、4月、6月~10月,2017年4月~6月和2018年1月、3月、4月、8月、9月以及2020年6月出现不达标,最低浓度出现在2016年9月为 3.06 mg·L<sup>-1</sup>; TP 2016年6月和2017年4月~6月和2018年4月出现明显超标,最大月均浓度出现在2018年4月,为 0.396 mg·L<sup>-1</sup>; NH<sub>3</sub>-N 2016年2月~4月、6月、9月,2017年8月和2018年1月~4月超标明显,最大月均浓度出现在2018年1月为 6.44 mg·L<sup>-1</sup>; I<sub>mn</sub> 2016年3月、5月~8月,2017年10月和2018年3月、4月以及2019年3

月、4月出现超标,其超标浓度范围为 6.03 ~ 7.04  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

由监测结果可以看出,大安和彩虹桥超标明显的主要指标为 TP 和  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,其次是 DO,两个监测断面水质明显变差的时段为枯水期(1月~3月)和平水期(4月~6月、10月~12月),而在丰水期(8月~9月)均出现过仅 DO 偏低的现象。究其原因,可能是枯水期和平水期降水量不足、河流水体自净能力较差,河流沿岸居民在农业生产、生活及畜禽养殖等过程中产生的污染物进入水体导致水质变差<sup>[3-4,6]</sup>。对于水体中 DO 浓度,除受水生植物生长以及人类活动影响外,温度和压力也是其浓度变化的重要因素。一般情况下,温度越高,水分子之间的间隙就越小,水溶氧能力就越差;气压越低,空气中的氧气在渗透入水的过程中阻力越大,水溶氧能力就会变差。从季节上来说,丰水期正值夏季,夏季高温低压天气较多,加之雨水充足及藻类等水生植物生长迅速,植物消耗一部分氧气以及雨水的稀释作用,导致 DO 降低。

## 2.2 水质变化趋势

### 2.2.1 年际变化趋势

采用 Spearman 相关系数法对嘉陵江四川段中下游 10 个监测断面 2016 年~2017 年内梅罗污染指数进行相关系数分析。

从各年份内梅罗污染指数相关系数分析结果显示,当  $N = 5$ ,显著性水平为 0.05 时,各断面内梅罗污染指数相关系数  $r_s$  为  $-0.9 \sim 0.3$ ,其  $|r_s|$  均小于等于临界值 ( $W_p = 0.900$ ),变化趋势无显著意义,说明在各监测断面年际水质变化平稳。

### 2.2.2 各年份月际变化趋势

根据 2016 年~2020 年月均值计算内梅罗污染指数的 Spearman 相关系数,结果如图 4 所示。由分析结果得知,当  $N = 12$ ,显著性水平为 0.05 时,  $|r_s|$  大于临界值 ( $W_p = 0.506$ ),内梅罗污染指数变化趋势有显著意义的如下:2016 年彩虹桥呈下降趋势,大安呈上升趋势;2017 年沙溪呈上升趋势,大安呈下降趋势;2018 年彩虹桥和大安均呈下降趋势;2019 年赛龙和 2020 年江陵、团保岭、百顷均呈上升趋势。由此可见,嘉陵江四川段中下游西充河彩虹桥断面各年月际内梅罗污染指数呈下降或平稳趋势,琼江大安断面先上升后下降至平稳趋势,这可能是由于区域内各相关部门的大力整顿,河流沿岸污染源得到有效管控,使河流水质状况得到有效改善;而嘉陵

江干流沙溪、巴河江陵、渠江团保岭、渠江赛龙、涪江百顷均有平稳或上升趋势。

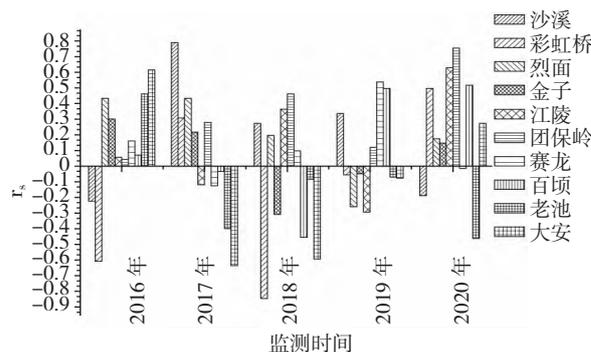


图4 2016年~2020年月际内梅罗污染指数 Spearman 相关系数变化特征

## 3 结论及建议

(1) 单因子指数法和内梅罗污染指数法评价结果显示,2016年~2020年嘉陵江四川省境内流域中下游出现年度水质评价不达标的断面为2017年琼江大安和2018年西充河彩虹桥,水质类别为IV类,均为轻度污染,超标因子分别为TP和 $\text{NH}_3\text{-N}$ ,其余断面均满足III类水质标准。

(2) 从内梅罗污染指数相关系数分析结果来看,2016年~2020年各年份间 $|r_s|$ 均小于等于临界值,变化趋势无显著意义,说明嘉陵江四川省境内流域中下游各监测断面年际水质变化平稳;根据各年份月均值计算内梅罗污染指数相关系数结果得知,西充河彩虹桥断面各年月际内梅罗污染指数呈下降或平稳趋势,琼江大安断面先上升后下降至平稳趋势,而嘉陵江干流沙溪、巴河江陵、渠江团保岭、渠江赛龙、涪江百顷均有平稳或上升趋势。

(3) 在农村水污染中,由农业生产、畜禽养殖、人类生活活动等引起的农业面源污染已成为其水体污染的主要来源<sup>[13]</sup>。近年来嘉陵江流域水环境质量得到持续改善,水质优良率始终保持在全省前列,而四川省境内流域中下游部分支流水质仍不稳定,河流沿岸居民在农业生产、生活及畜禽养殖过程中产生的农业面源污染对河流水体的影响较明显,各级政府及相关部门应采取有效措施,进一步加大对嘉陵江流域尤其是部分支流的水污染防治、监管力度,从而预防、控制和减少水环境污染。

## 参考文献:

[1] 何虎军,张柳青,黎云祥,等.南充市嘉陵江干流高锰

- 酸盐指数和氨氮动态变化及影响因素 [J]. 四川环境, 2018, 37(06): 95 - 101.
- [2] 袁 娟, 舒 丽, 权秋梅, 等. 嘉陵江一级支流县域河流水质现状综合分析与评价——以南充市蓬安县为例 [J]. 四川环境, 2021, 40(03): 124 - 131.
- [3] 刘臣伟, 陈 梅, 苏良湖. 琼江上游流域水质改善方案研究 [G] // 中国环境科学学会科学技术年会论文集, 2018: 1527 - 1532.
- [4] 何虎军, 蔡金王, 都 雯, 等. 南充西充河流域水体高锰酸盐指数和氨氮时空分布特征的分析 [J]. 四川环境, 2019, 38(02): 37 - 45.
- [5] 刘凌雪, 敖天其, 胡 正, 等. 琼江流域(安居段)水质及面源污染综合评价 [J]. 水土保持研究, 2019, 26(06): 372 - 376.
- [6] 杨 雯, 敖天其, 王文章, 等. 基于输出系数模型的琼江流域(安居段)农村非点源污染负荷评估 [J]. 环境工程, 2018, 36(10): 140 - 144.
- [7] 中华人民共和国国家标准. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [8] 刘研萍, 文 雪, 张继方, 等. 秸秆沼渣中重金属的安全风险分析 [J]. 中国沼气, 2014, 32(01): 90 - 94.
- [9] 陈雨艳, 杨 坪, 向秋实, 等. 岷江流域水质状况评价及变化趋势分析 [J]. 中国环境监测, 2015, 31(06): 53 - 57.
- [10] 姜厚竹, 王英伟, 郑国臣. 松花江流域省界缓冲区典型断面水质状况分析研究 [J]. 环境科学与管理 2016, 41(08): 129 - 134.
- [11] 张云霞, 魏 晓, 汪 涛. 沱江流域河流氮、磷浓度时空分布特征及污染状况评价 [J]. 环境污染与防治, 2021, 43(08): 1028 - 1034.
- [12] 蒋红斌, 余全智, 何 鑫. 遂宁涪江流域 TP 时空分布及环境容量研究 [J]. 环境科学与技术, 2018, 41(S2): 100 - 103.
- [13] 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(03): 95 - 98.