

# 州河水质评价及溶解氧与各项水质指标相关性分析

张海杰<sup>1</sup>, 黄 梅<sup>1</sup>, 孙亚琴<sup>1</sup>, 邓小函<sup>1</sup>, 蔡佳芹<sup>2</sup>, 杜承臻<sup>2\*</sup>, 符 东<sup>2</sup>, 陈春坛<sup>2</sup>

<sup>1</sup>四川省达州生态环境监测中心站, 四川 达州

<sup>2</sup>四川文理学院化学化工学院, 四川 达州

收稿日期: 2023年11月18日; 录用日期: 2023年12月22日; 发布日期: 2023年12月29日

## 摘 要

为更好掌握州河水质现状, 基于州河流域内2018~2022年白鹤山、舵石盘2个监测断面的逐月水质数据, 采用单因子评价法、综合水质标识指数法和主成分分析法, 对该流域水质进行评价, 单因子评价法表明州河主要限制因子为总磷(TP)和氨氮(NH<sub>3</sub>-N), 综合水质标识指数法评价结果表明, 州河水质良好, 可以达到II类水标准, 但溶解氧(DO)浓度波动幅度较大。主成分分析也发现州河在冬季和春季水质更差。主成分分析共提取出2个因子, 进一步的相关性分析表明DO与水温、COD<sub>Mn</sub>存在负相关关系, 与NH<sub>3</sub>-N、TP、pH存在正相关关系。

## 关键词

单因子评价法, 综合水质标识指数法, 主成分分析法, 相关性分析, 溶解氧

# Water Quality Evaluation and Correlation Analysis between Dissolved Oxygen and Various Water Quality Indicators in Zhou River

Haijie Zhang<sup>1</sup>, Mei Huang<sup>1</sup>, Yaqin Sun<sup>1</sup>, Xiaohan Deng<sup>1</sup>, Jiaqin Cai<sup>2</sup>, Chengzhen Du<sup>2\*</sup>, Dong Fu<sup>2</sup>, Chuntan Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dazhou Ecological Environment Monitoring Center Station of Sichuan Province, Dazhou Sichuan

<sup>2</sup>College of Chemistry and Chemical Engineering, Sichuan University of Arts and Sciences, Dazhou Sichuan

Received: Nov. 18<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2023; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2023

\*通讯作者。

文章引用: 张海杰, 黄梅, 孙亚琴, 邓小函, 蔡佳芹, 杜承臻, 符东, 陈春坛. 州河水质评价及溶解氧与各项水质指标相关性分析[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(6): 1363-1370. DOI: 10.12677/aep.2023.136164

## Abstract

The water quality of two monitoring sections in the Zhou River basin from 2018 to 2022, including Baihe Mountain and Duoshipan, are evaluated with single factor evaluation method, comprehensive water quality identification index method and principal component analysis to study the water environment of Zhou River basin. The single factor evaluation method can intuitively reveal the main limit factors of the Zhou River are TP and  $\text{NH}_3\text{-N}$ , and the results of the comprehensive water quality identification index method show that the water quality of the state river can reach the type II water standard, while the fluctuation of dissolved oxygen concentration is significant. Using principal component analysis (PCA), five water quality indicators are explained using two principal components, and water quality is comprehensively evaluated. Moreover, correlation analysis shows that there is a negative correlation between DO and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , and a positive correlation with  $\text{NH}_3\text{-N}$  and TP.

## Keywords

Single Factor Evaluation Method, Comprehensive Water Quality Identification Index Method, PCA, Water Quality Evaluation, Dissolved Oxygen

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

州河位于四川省达州市,对当地居民具有景观、运输、农灌、地下水补给等多项功能,其水质情况不仅影响到水生生态环境,经济可持续发展,甚至关系到饮用水安全。因此,定期监测河道水体各项指标,选择科学的水质评价方法评价州河的水质情况,为河道治理提供科学依据,对于打好污染防治攻坚战具有重要意义。

水质评价方法多种多样,国内外应用较多的有单因子指数评价法[1]、综合指数法[2]、模糊评价法[3]、神经网络评价法[4]和内梅罗指数法[5]等,这些方法各有优缺点,在使用的时候需要因地制宜,根据所评价水体具体情况进行选择。本文采用应用较广的单因子指数评价法、综合水质标识指数法以及主成分分析法对州河流域水质进行综合分析评价。

## 2. 研究区域概况

州河发源于大巴山南麓,流经宣汉县、万源市、通川区、达川区,至渠县三汇镇汇入渠江,地理坐标东经  $107^{\circ}10'\sim 109^{\circ}01'$ 、北纬  $30^{\circ}37'\sim 32^{\circ}15'$ ,河长 310 km,控制流域面积  $11165\text{ km}^2$ ,属于渠江一级支流。州河对达州市的经济、农业、人文发展都具有重要作用。然而近年来,由于工业发展和农业面源污染等问题,州河水质面临巨大压力。因此,对近年来州河水质监测数据进行分析评价,对于保障州河水质安全,提出相应的治理措施有重要意义。

## 3. 研究数据及方法

### 3.1. 数据来源

数据由达州市环境监测中心站提供,选取污染较严重的白鹤山、舵石盘 2 个水质监测断面,采用

2018~2022 年月均值, 选择五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、溶解氧(DO)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)和总磷(TP)、水温(T)、酸碱度(pH)共 7 项反映流域水质状况的水质指标进行评价。

### 3.2. 质量标准

根据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002), 水质目标考核类别均为III类。

### 3.3. 实验方法

#### 3.3.1. 单因子指数评价法

单因子指数评价法是指将水质监测数据与评价标准进行比较, 选择其中最差的水质单项指标所属水质类别来评价区域水体综合水质类别。这种方法评价思路是对所有监测指标“一票否决”或“一刀切”, 计算简单, 操作方便, 但是会弱化其他水质指标的影响, 得到的评价结果通常水质等级偏低, 不能全面地反映水质情况, 因此通常需要与其他评价方法结合使用[6]。

#### 3.3.2. 综合水质标识指数

综合水质标识指数法能够全面地评价水质情况, 不会因为某一种水质指标劣于正常标准就否定整体水质, 从而得到更加合理的结果[7]。综合水质标识指数法分为两步进行, 首先要计算出单因子水质标识指数, 对水质污染程度进行评价, 结构式为:

$$P_i = X_1 \cdot X_2 \quad (1)$$

式中是指第  $i$  项评价指标的单因子水质指数; 是指第  $i$  项评价指标的水质类别; 是指监测数据在类水质变化区间中所处的位置, 根据公式按照四舍五入的原则计算确定。

综合水质标识指数由一位整数和小数点后 3 位有效数字组成, 结构式为:

$$I = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (2)$$

$$X_1 \cdot X_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (3)$$

式中, 由计算获得,  $X_3$  和  $X_4$  根据比较结果得到,  $X_3$  为参与综合水质评价的水质指标中, 劣于水环境功能区目标的单项指标个数;  $X_4$  为综合水质类别与水体功能区类别的比较结果, 表示综合水质的污染程度, 当综合水质优于或等于水环境功能区目标时,  $X_4$  为 0,  $n$  表示参加评价的因子数量[8] [9]。

综合水质标识指数评价级别的判定标准如表 1 所示。

**Table 1.** Evaluation level judgment standard for comprehensive water quality identification index

**表 1.** 综合水质标识指数评价级别判定标准

数值范围	评价级别
$1 \leq X_1 \cdot X_2 \leq 2$	I类
$2 < X_1 \cdot X_2 \leq 3$	II类
$3 < X_1 \cdot X_2 \leq 4$	III类
$4 < X_1 \cdot X_2 \leq 5$	IV类
$5 < X_1 \cdot X_2 \leq 6$	V类
$6 < X_1 \cdot X_2 \leq 7$	劣V类, 但不黑臭
$X_1 \cdot X_2 > 7$	劣V类, 并黑臭

#### 3.3.3. 主成分分析

采用 SPSS 软件对数据进行分析, 详细步骤如下。

(1) 水质评价指标选取。由表 1 提供的检测数据, 分别对白鹤山、舵石盘 2 个水质监测断面的五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、溶解氧(DO)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)共 5 个水质检测指标进行水质主成分分析。

(2) KMO 检验统计量和 Bartlett 球形度检验。分析结果判定原始变量是否适合进行主成分分析。

(3) 对原始数据进行标准化处理。运用 Z-Score 标准化法消除不同指标间的量纲和数量级影响。

(4) 建立相关系数矩阵。

(5) 计算主成分贡献率和累积贡献率, 确定主成分个数。

(6) 确定主成分分值, 计算综合得分。综合函数值得分越高, 表明污染更严重, 从而对各个断面不同检测月份进行水质排序。

### 3.3.4. 相关性分析

采用 SPSS 软件对数据进行双变量相关分析, 探究水质变量溶解氧(DO)与水质变量五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)、水温(T)、酸碱度(pH)两者之间的相关程度, 得出两变量间的线性关系。相关系数大于 0, 则为正相关关系; 相关系数小于 0, 则为负相关关系; 相关系数的绝对值越大, 则表明相关程度越高; 如果相关系数等于 0, 则表明两个变量之间不存在线性相关关系。

## 4. 水质评价

通过单因子指数评价法、综合水质标识指数评价法及主成分分析法对州河 2018~2022 年水质监测数据进行分析评价。结果如表 2 所示, 单因子指数评价法显示流域水质总体上介于II类到III类水之间, 达到地表水III类水标准, 主要污染物为 TP 和 NH<sub>3</sub>-N, 表明 TP 和 NH<sub>3</sub>-N 是州河水质的限制因子。综合水质标识指数评价结果各断面全年水质均达到II类水标准, 水质整体情况较好。

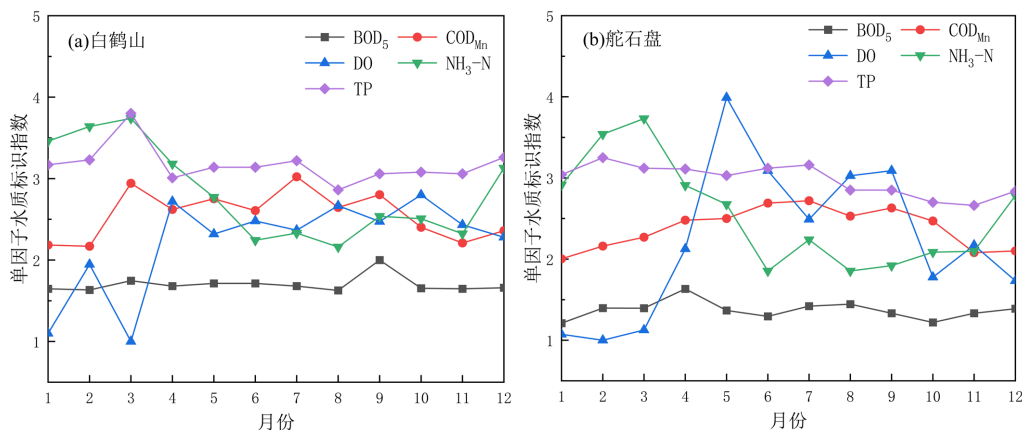
Table 2. Water quality evaluation results of each section of the Zhou River

表 2. 州河各断面水质评价结果

月份	单因子指数评价法		综合水质标识指数		综合水质标识指数评价结果	
	白鹤山	舵石盘	白鹤山	舵石盘	白鹤山	舵石盘
1	III	III	2.400	2.100	II	II
2	III	III	2.500	2.300	II	II
3	III	III	2.700	2.400	II	II
4	III	III	2.600	2.500	II	II
5	III	III	2.500	2.700	II	II
6	III	III	2.400	2.400	II	II
7	III	III	2.500	2.400	II	II
8	II	III	2.400	2.300	II	II
9	III	III	2.600	2.400	II	II
10	III	II	2.500	2.000	II	II
11	III	II	2.300	2.100	II	II
12	III	II	2.500	2.200	II	II

州河两个断面单因子水质标识指数变化趋势如图 1 所示, 结果表明, TP 和 NH<sub>3</sub>-N 是州河主要污染物, P<sub>DO</sub> 在枯水期数值较低, 在其他水质指标变化幅度不大的情况下, P<sub>DO</sub> 波动幅度较大, 甚至出现超标情况, 根据现场调查, 原因是多方面的, 一是自动监测站采水管道较长, 表面附着大量微生物, 在采样时冲洗时间不足, 导致采集水样为在管道内长时间停留的河道水, 管道内微生物呼吸耗氧导致水样 DO

偏低；二是由于强降雨导致水体上下层交换剧烈，水体溶解氧骤降。



**Figure 1.** Trend of single factor water quality indicator index changes in various sections of the Zhouhe River  
**图 1.** 州河各断面单因子水质标识指数变化趋势

## 5. 主成分分析

### 5.1. 相关系数矩阵

用 KMO 检验和 Bartlett 检验,结果如表 3 所示,各采样点 KMO 检验度结果均于 0.5~0.7 之间,Bartlett 球形度检验对应的显著性均小于 0.05, 适合做主成分分析。

**Table 3.** The value of KMO and Bartlett  
**表 3.** KMO 和 Bartlett 检验结果

采样点	KMO 值	Bartlett 球形度检验		
		近似卡方	自由度	显著性
白鹤山	0.608	24.022	10	0.008
舵石盘	0.553	23.056	10	0.011

相关系数矩阵见表 4, 绝对值越大的相关系数, 两个指标间的相关系数越强, 相关系数为正值, 则表明两个指标之间呈正相关; 相关系数为负值, 则表明两个指标间呈负相关。在白鹤山断面相关系数大于 0.3 的有 DO 与 NH<sub>3</sub>-N (R = 0.763)、DO 与 TP (R = 0.835)、BOD<sub>5</sub> 与 CODMn (R = 0.480)、NH<sub>3</sub>-N 与 TP (R = 0.658), 适合使用主成分分析。在舵石盘断面相关系数大于 0.3 的有 BOD<sub>5</sub> 与 TP (R = 0.343)、DO 与 NH<sub>3</sub>-N (R = 0.708)、NH<sub>3</sub>-N 与 TP (R = 0.585), 适合使用主成分分析。

**Table 4.** Correlation coefficient matrix  
**表 4.** 相关系数矩阵

	白鹤山					舵石盘				
	BOD <sub>5</sub>	COD <sub>Mn</sub>	DO	NH <sub>3</sub> -N	TP	BOD <sub>5</sub>	COD <sub>Mn</sub>	DO	NH <sub>3</sub> -N	TP
BOD <sub>5</sub>	1.000					1.000				
COD <sub>Mn</sub>	0.480	1.000				0.212	1.000			
DO	0.015	0.046	1.000			-0.113	-0.722	1.000		
NH <sub>3</sub> -N	-0.102	-0.218	0.763	1.000		0.234	-0.519	0.708	1.000	
TP	0.084	0.288	0.835	0.658	1.000	0.343	0.153	0.221	0.585	1.000

### 5.2. 主成分确定

主成分的方差及方差贡献率如表 5 所示。两断面的特征值大于 1 的均有 2 个成分，累积方差占比分别为 81.712%和 80.205%，对变量有足够的解释能力，即用 2 个主成分代替 5 个指标是可行的，其包含的信息量可以解释监测指标表征的大部分信息，可以用于水质的分析评价。

Table 5. Total variance explanation

表 5. 总方差解释

成分	白鹤山						舵石盘					
	初始特征值			提取平方和载入			初始特征值			提取平方和载入		
	总计	方差 /%	累积 /%	总计	方差 /%	累积 /%	总计	方差 /%	累积 /%	总计	方差 /%	累积 /%
1	2.510	50.191	50.191	2.510	50.191	50.191	2.417	48.342	48.342	2.417	48.342	48.342
2	1.576	31.521	81.712	1.576	31.521	81.712	1.593	31.862	80.205	1.593	31.862	80.205
3	0.586	11.728	93.440				0.658	13.152	93.357			
4	0.201	4.015	97.455				0.203	4.063	97.420			
5	0.127	2.545	100.000				0.129	2.580	100.000			

### 5.3. 初始因子载荷矩阵

主成分初始因子载荷矩阵如表 6 所示，其数值绝对值表示主成分与各水质监测指标的相关性关系，负值表示呈负相关，正值表示呈正相关，绝对值越接近 1，相关性越强[10]。两断面主成分 F1 中有较高载荷的主要水质指标有 DO、TP、NH<sub>3</sub>-N，主成分 F2 中有较高正载荷的主要水质指标有 COD<sub>Mn</sub>、TP、BOD<sub>5</sub>。

Table 6. Initial factor load matrix

表 6. 初始因子载荷矩阵

监测指标	白鹤山		舵石盘	
	1	2	1	2
BOD <sub>5</sub>	0.030	0.817	0.082	0.776
COD <sub>Mn</sub>	0.089	0.886	-0.733	0.559
DO	0.950	-0.024	0.899	-0.253
NH <sub>3</sub> -N	0.866	-0.295	0.922	0.249
TP	0.921	0.190	0.462	0.744

主成分载荷矩阵与因子载荷矩阵和特征值  $\lambda$  之间存在以下关系：

$$\text{主成分载荷矩阵} = \text{因子载荷矩阵} / \sqrt{\lambda}$$

计算得到白鹤山断面主成分表达式为：

$$\begin{aligned} F1 &= 0.02 \times ZBOD_5 + 0.06 \times ZCOD_{Mn} + 0.60 \times ZDO + 0.55 \times ZNH_3 - N + 0.58 \times ZTP \\ F2 &= 0.65 \times ZBOD_5 + 0.71 \times ZCOD_{Mn} - 0.02 \times ZDO - 0.23 \times ZNH_3 - N + 0.15 \times ZTP \\ F &= (2.510 \times F1 + 1.576 \times F2) \div (2.510 + 1.576) \end{aligned}$$

舵石盘断面主成分表达式为：

$$\begin{aligned} F1 &= 0.05 \times ZBOD_5 - 0.47 \times ZCOD_{Mn} + 0.58 \times ZDO + 0.59 \times ZNH_3 - N + 0.30 \times ZTP \\ F2 &= 0.61 \times ZBOD_5 + 0.44 \times ZCOD_{Mn} - 0.20 \times ZDO + 0.20 \times ZNH_3 - N + 0.59 \times ZTP \\ F &= (2.417 \times F1 + 1.593 \times F2) \div (2.417 + 1.593) \end{aligned}$$

表 7 为计算得到的不同时间各断面主成分得分和综合得分，得分越高，表明污染越严重，通过对水



质断面的综合得分比较可以看出, 各断面在冬季和春季污染较严重。

**Table 7.** Principal component score and comprehensive score  
**表 7.** 主成分得分和综合得分

月份	白鹤山						舵石盘					
	F1	排名	F2	排名	F	排名	F1	排名	F2	排名	F	排名
1	5.96	2	2.61	11	4.67	2	4.55	2	-0.36	10	2.60	3
2	5.25	3	2.57	12	4.22	6	4.85	1	0.11	9	2.97	1
3	6.78	1	3.84	3	5.65	1	4.52	3	0.32	5	2.85	2
4	4.47	9	3.38	7	4.05	8	3.25	7	1.16	1	2.42	5
5	4.76	5	3.66	4	4.34	5	1.81	12	1.13	2	1.54	12
6	4.50	8	3.50	5	4.11	7	1.99	11	0.94	4	1.57	11
7	4.67	6	4.02	2	4.42	4	2.54	8	1.04	3	1.95	8
8	4.30	10	3.39	6	3.95	9	2.19	9	1.04	3	1.74	9
9	4.60	7	4.31	1	4.49	3	2.05	10	0.94	4	1.61	10
10	4.23	11	3.08	8	3.79	11	3.32	6	0.21	7	2.09	7
11	4.50	8	2.80	10	3.84	10	3.37	5	0.19	8	2.10	6
12	4.83	4	2.97	9	4.11	7	3.88	4	0.24	6	2.43	4

## 6. 相关性分析

采用 SPSS 软件对各水质指标进行双变量相关分析, 探讨 DO 与 BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP、水温、pH 这 6 个变量之间的相关性, 分析结果如表 8。DO 与 NH<sub>3</sub>-N、TP、pH 存在正相关关系, 这可能是由于近年来州河流域水质较好, 氮、磷营养盐浓度整体维持在较低水平, 少量增长使得浮游植物适量生长, 而在真光层中, 浮游植物光合作用大于呼吸作用[11], DO 浓度升高。DO 与 COD<sub>Mn</sub>、水温存在负相关关系, 这是因为水体中的有机物质在氧化分解的过程中消耗了大量氧气, 且随着温度的升高, 水体的饱和溶解氧降低, 有机物降解的速率加快, 使得 DO 的消耗更加剧烈。

**Table 8.** Correlation analysis results  
**表 8.** 相关性分析结果

采样点	DO 与 BOD <sub>5</sub>	DO 与 COD <sub>Mn</sub>	DO 与 NH <sub>3</sub> -N	DO 与 TP	DO 与水温	DO 与 pH
白鹤山	0.056	-0.112	0.664*	0.811**	-0.587*	0.524
舵石盘	0.005	-0.739**	0.746**	0.197	-0.900**	0.855**

注: “\*”表示在 0.05 级别(双侧), 相关性显著; “\*\*”在 0.01 级别(双侧), 相关性显著。

## 7. 结论

采用综合水质标识指数法对州河水质进行评价, 结果表明 TP 和 NH<sub>3</sub>-N 为州河主要污染物, DO 波动幅度较大, 有超标情况出现, 相关性分析表明 DO 与水温、COD<sub>Mn</sub> 存在负相关关系, 与 NH<sub>3</sub>-N、TP、pH 存在正相关关系。整体而言, 州河水质良好, 可以达到 II 类水标准。根据对州河污染源的分析和 DO 不稳定的问题, 可以采取以下措施:

(1) 完善排污基础设施建设, 加强污水收集管网铺设, 建设雨污分流设施, 全面收集污水, 新建污水处理设备或对超负荷运行的污水处理厂进行扩建、改建, 对于人口分散地区因地制宜地采用就地处理技术, 确保达标排放, 从源头上控制漏排、偷排问题。

(2) 定期对监测设备进行检查、清洗、维护、更换, 增加采样冲洗时间, 防止因为设备问题造成的监测数据误差。

## 基金项目

四川省生态环境保护科技计划, 项目编号: 2023HB32。

达州市科技计划项目, 项目编号: 22ZDYF0057。

## 参考文献

- [1] 丛铭, 阳辉, 张晓静, 等. 单因子法与可变模糊法在水质评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(4): 720-728.
- [2] 叶焰中, 陈凡, 黄廷林. 基于水质综合指数法的亚热带水源型水库水质评价[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 116-124.
- [3] 强菲, 贺旭波, 李勇, 等. 基于模糊综合评价法的澄合矿区地下水水质评价[J]. 地下水, 2020, 42(5): 21-25.
- [4] 傅博, 黄国如. 广东江门四堡水库水质时空变化及综合评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 64-71.
- [5] 汤玉强, 李清伟, 左婉璐, 等. 内梅罗指数法在北戴河国家湿地公园水质评价中的适用性分析[J]. 环境工程, 2019, 37(8): 195-199+189.
- [6] 宁阳明, 尹发能. 水污染指数法和模糊综合评价法在水质评价中的应用[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 57-63.
- [7] 李华栋, 宋颖. 标识指数法在黄河山东段水质评价中的应用[J]. 三峡生态环境监测, 2023, 8(1): 86-95.
- [8] 马京久, 喻婷, 陈燕飞, 等. 基于综合水质标识指数法的汉江中下游水质评价[J]. 人民珠江, 2020, 41(9): 63-69.
- [9] 韦雨婷, 黄娟, 鲍琨, 等. 改进的综合水质标识指数法在海安市河流水质评价中的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(7): 177-182.
- [10] 郭新强. 基于主成分分析法的福建某滨海场地地下水水质评价[J]. 地下水, 2022, 44(6): 17-19.
- [11] 高锐, 黄岁樑, 孙逸璇. 潘家口水库热分层期溶解氧垂向分布及影响因素[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(3): 39-49+57.