

· 调查与评价 ·

基于博弈理论组合赋权的沱沱河流域模糊综合水质评价

宋玉庭^{1,2}, 蒋名亮^{2,3*}, 徐力刚^{2,3,4}, 牛海林¹

(1. 青海大学生态环境工程学院, 青海 西宁 810016; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所鄱阳湖湖泊湿地综合研究站, 江西 庐山 332899; 4. 中国科学院大学南京学院, 江苏 南京 211135)

摘要: 2021年6—9月对沱沱河流域的6条主要河流布设6个监测点, 监测23项水质指标并作评价, 结果显示, 10项指标检出, 13项指标未检出, 水质基本优于地表水Ⅱ类。根据水质监测数据, 采用主成分分析和相关分析法建立评价因子集, 基于博弈论对熵权法和改进的层次分析法确定的指标权重进行优化组合, 构建博弈理论组合赋权的水质模糊评价模型进行水质评价, 运用综合评判指数量化水质等级。结果表明, 流域内高锰酸盐指数(I_{Mn})、五日生化需氧量(BOD_5)、总磷(TP)、氨氮(NH_3-N)等指标是水质主要影响因子, 2021年6—9月沱沱河流域水质良好, 6条河流水质的模糊综合评价结果均在Ⅰ~Ⅱ类之间。

关键词: 水质; 博弈理论; 模糊综合评价; 沱沱河流域

中图分类号: X522; X824

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2024)06-0029-07

Fuzzy Comprehensive Water Quality Assessment of Tuotuo River Basin Based on Game Theory Combination Weighting

SONG Yuying^{1,2}, JIANG Mingliang^{2,3*}, XU Ligang^{2,3,4}, NIU Hailin¹

(1. College of Eco-environmental Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 3. Poyang Lake Laboratory for Wetland Ecosystem Research, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Lushan, Jiangxi 332899, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences (Nanjing), Nanjing, Jiangsu 211135, China)

Abstract: From June to September 2021, six monitoring sites were set up on six major rivers in Tuotuo River basin, and 23 water quality indicators were monitored and evaluated. Results showed that 10 indicators were detectable, and 13 indicators were undetected. The water quality was basically better than Class II quality standards for surface water. According to water quality monitoring data, principal component analysis and correlation analysis were used to establish an evaluate factor subset. Based on game theory, the indicator weights determined by entropy weight method and improved analytic hierarchy process were optimized and combined. The water quality was evaluated by constructing a fuzzy water quality evaluation model based on game theory combination weighting, and graded by comprehensive evaluation index. The results showed that permanganate index (I_{Mn}), five-day biochemical oxygen demand (BOD_5), total phosphorus (TP) and ammonia nitrogen (NH_3-N) were the main influencing factors. From June to September 2021, the water quality of Tuotuo River basin was good, and the fuzzy comprehensive evaluation results of the six rivers were all be-

收稿日期: 2023-10-26; 修订日期: 2024-09-05

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2022YFC3204104); 国家自然科学基金资助项目(42307106); 南京地理与湖泊研究所自主部署科研基金资助项目(2022NIGLAS-CJH04)

作者简介: 宋玉庭(1998—), 男, 青海西宁市人, 在读研究生, 研究方向为湿地生态水文。

* 通信作者: 蒋名亮 E-mail: mljiang@niglas.ac.cn.

tween Class I and Class II quality standards for surface water.

Key words: Water quality; Game theory; Fuzzy comprehensive evaluation; Tuotuo River basin

长江源区位于青藏高原腹地,是“中华水塔”三江源的重要组成部分,是中国水资源安全的战略基础,是中国乃至亚洲生态安全的重要屏障,区域内水环境是影响中国西部干旱与半干旱地区人类活动可持续发展和生态环境的关键因素^[1]。然而,受青藏高原特殊的地理和气候条件的限制,对该地区水环境的评价和分析研究略显不足。

模糊综合评价法是常用的水质评价方法^[2],其在模糊数学理论的基础上,通过隶属度和权重系数来综合判断水质级别。在评价过程中,选取合适的评价指标和指标权重对评价结果的准确性影响较大。以往研究通常依据经验选取在水环境污染中起主要作用的指标^[3],故具有一定的主观性,而主成分分析方法^[4]则可以在原始水质数据丢失最少的基础上筛选主要评价因子。单一的权重赋值法存在片面性,如层次分析法给出的权重依赖于决策者的主观判断与偏好,熵权法不考虑指标本身的差异,得到的权重可能不符合实际指标的重要程度^[5]。客观权重不能突出关键污染物的特征,主观权重容易忽略数据信息,组合权重可以避免单一权重值的局限性,而博弈理论^[6]则是一个相互比较和相互协调的赋权过程,其既能减少主观随意性又充分考虑客观数据影响。今结合由层次分析法确定的主观权重与熵权法确定的客观权重进行基于博弈理论的组合赋权,改进模糊综合评价方法,并将其应用于沱沱河流域地表水水质评价,以期为源区水环境保护提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

沱沱河流域($E89^{\circ}48' \sim E92^{\circ}54'$, $N33^{\circ}22' \sim N35^{\circ}12'$)位于青海省西南部,是长江源的主要流域。流域最高海拔6 468 m,面积17 634 km²,是高空西风带控制区^[7],气候干寒,多风少雨,终年平均气温低于0℃,每年仅有干湿两季,降水集中在7—9月,属于高寒半干旱半湿润区。

1.2 采样点布设与样品采集

结合沱沱河流域实际地形和安全等因素,依据布点的代表性、可控性等原则,在6条河流上布设6个监测点,分别为尕尔曲($E92^{\circ}22'$, $N33^{\circ}52'$),当

曲($E92^{\circ}45'$, $N33^{\circ}43'$),扎木曲($E92^{\circ}08'$, $N34^{\circ}19'$),布曲($E92^{\circ}04'$, $N33^{\circ}35'$),冬曲($E92^{\circ}30'$, $N34^{\circ}31'$),沱沱河($E92^{\circ}27'$, $N34^{\circ}13'$)。于2021年6—9月每月采集水样1次,监测《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)(以下简称《标准》)中的23项指标,分别为水温、pH值、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(I_{Mn})、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD_5)、氨氮(NH_3-N)、总磷(TP)、总氮(TN)、氟化物(F^-)、铜、锌、硒、砷、汞、镉、六价铬、铅、氰化物、挥发酚、石油类、阴离子表面活性剂和硫化物。依据《水质 采样技术指导》(HJ 494—2009)《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91—2002)进行水样采集和水质指标监测。

1.3 水质特征因子筛选

(1)主成分分析。水体综合质量评价的基础在于能够选择具有代表性的水质指标。主成分分析在保留原始数据大多数信息的前提下对水质数据通过线性变换的方式做降维处理,筛选出较少能代表数据集的主要评价指标^[8]。对所有指标进行主成分分析,应用特征值 >1 的准则确定反映水质的高特征值主成分,可以提取能够充分解释水质信息的因子,初步建立模糊综合评价的因子集。

(2)相关分析。水质理化指标为连续变量,且水质指标符合正态分布。对水质指标进行Pearson相关性分析,根据指标之间的相关性大小进行指标分组,使得同组内变量之间相关性较高,不同组变量之间相关性较低,用较少的公因子来代表原本多个监测指标的信息,以合理地解释存在于原始变量间的相关性并简化变量维数。

1.4 改进的模糊综合评价模型构建

传统模糊综合评价法主要包括评价指标的构建(确定因子集和评语集)、构建权重集、构建评判隶属矩阵、进行模糊评判^[9]。为了实现对源区地表水等级的精准判别,今在传统模糊综合评价模型的基础上,将建立的因子集与主成分分析确定的特征因子相结合;在确定各因子权重时,采用博弈理论将客观熵权法与主观层次分析法对因子的权重进行组合;在判别水质等级时,鉴于最大隶属度原则的不足,采用加权平均综合评价原则^[3]确定水质等级。

1.4.1 确定因子集与评语集

在水质综合评价模型中因子集的构建取决于主成分与相关分析筛选出的特征因子, $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 其中 u_1, u_2, \dots, u_n 为参与评价的指标。根据选取的指标, 参考相关标准建立评语集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 其中 v_1, v_2, \dots, v_m 为确定的 m 个评价等级。

1.4.2 隶属矩阵

水质评价论域是实数, 水质隶属度呈线性分布, 采用“半梯形”指标的分布函数。隶属函数适宜范围的确定过程非常重要, 在水质评价中参考《标准》将水质分为 5 个等级, 隶属度由隶属度函数决定。

I 级水质隶属度函数见公式(1), 当 $j=1$ 时:

$$r_{i1} = \begin{cases} 1 & x_i \leq s_{ij} \\ \frac{s_{i,j+1} - x_i}{s_{i,j+1} - s_{ij}} & s_{ij} < x_i < s_{i,j+1} \\ 0 & x_i \geq s_{i,j+1} \end{cases} \quad (1)$$

II ~ IV 级水质隶属度函数见公式(2), 当 $j=2, 3, 4$ 时:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_i \leq s_{i,j-1}, x_i \geq s_{i,j+1} \\ \frac{x_i - s_{i,j-1}}{s_{ij} - s_{i,j-1}} & s_{i,j-1} < x_i < s_{ij} \\ \frac{s_{i,j+1} - x_i}{s_{i,j+1} - s_{ij}} & s_{ij} \leq x_i < s_{i,j+1} \end{cases} \quad (2)$$

V 级水质隶属度函数见公式(3), 当 $j=5$ 时:

$$r_{i5} = \begin{cases} 0 & x_i \leq s_{i,j-1} \\ \frac{x_i - s_{i,j-1}}{s_{ij} - s_{i,j-1}} & s_{i,j-1} < x_i < s_{ij} \\ 1 & x_i \geq s_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

式中: r_{ij} 为第 i 项指标对 j 级水质的隶属度; x_i 为指标的实测值; s_{ij} 为第 i 项指标的第 j 级水质标准。对于 DO 等正指标, 隶属函数的表达式不变, 计算隶属度时改变符号方向。将各项指标对水质等级的隶属度集合排列可得到隶属度矩阵 M_{Fi} 。

1.4.3 组合权重确定

(1) 熵权法。其是利用信息熵计算各指标权重的方法, 为多标度综合评价提供依据。在具体应用过程中, 依据各指标的变异性大小采用信息熵计算熵权, 再对各指标权重进行修正, 得到指标权重, 计算步骤参考文献[10]。

(2) 层次分析法。其是将评价指标两两比较, 根据不同指标的相对重要程度构建判别矩阵, 对评

价指标作定性和定量分析, 得出不同指标权重的主观赋权方法, 具体计算过程见文献[11]。

(3) 博弈理论组合赋权。其以纳什均衡为目标, 协调主观与客观权重之间的冲突, 是一个相互比较、相互协调的过程, 该方法在减少主观随意性的同时充分考虑了客观数据的影响, 提高了赋权的科学合理性, 计算步骤见文献[12]。

1.4.4 综合评价指数

对隶属度矩阵与权重矩阵进行复合运算, 得到综合隶属度矩阵。传统的模糊综合评价以最大隶属度原则确定水质等级, 今通过加权平均原则对权重和隶属矩阵进行计算, 得到水质综合评价指数 (B_T), 以此量化水质等级。计算公式如下:

$$B_T = \left(\sum_{j=1}^m b_j^\beta \right) / \left(\sum_{j=1}^m b_j^\beta \right) \quad (4)$$

式中: b_j 为指标相对于第 j 级水质的隶属度; β 为加权系数, 文中取 $\beta = 2$, 以控制较大的 b_j 在评价中所起的作用。

2 结果与讨论

2.1 研究区水质现状

研究区和各监测点水质指标监测结果统计分别见表 1 和图 1(a)~(h)。在被检测的 23 项指标中, 除表 1 中列出的 10 项指标外, 其余 13 项指标均未检出, 故不作统计分析。由表 1 可知, TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 的相对标准偏差 (RSD) 较大, 属于强变异指标, pH 值和 DO 属于弱变异指标, 其他指标均处于中等变异范围。不同监测点之间的水质数据差异显著。pH 均值为 8.08, 处于微碱性水平; TN

表 1 研究区水质指标监测结果统计

Table 1 Statistics of water quality indicators in the study area

水质指标	最小值 $\rho / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	最大值 $\rho / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	平均值 $\rho / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	标准差 $\rho / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	RSD / %
DO	5.09	6.89	6.01	0.39	6.5
COD	4.00	32.00	11.33	6.67	58.9
I_{Mn}	0.83	5.60	3.07	1.41	45.9
BOD_5	1.00	5.40	2.63	1.38	52.5
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.05	0.50	0.16	0.12	75.0
TP	0.01	0.29	0.14	0.14	100
TN	0.17	2.09	0.82	0.51	62.2
F^-	0.10	0.40	0.24	0.09	37.5
水温 ^①	4.00	8.66	6.49	1.36	21.0
pH 值 ^②	7.72	8.61	8.08	0.21	2.60

①单位为 $^{\circ}\text{C}$; ②无量纲。

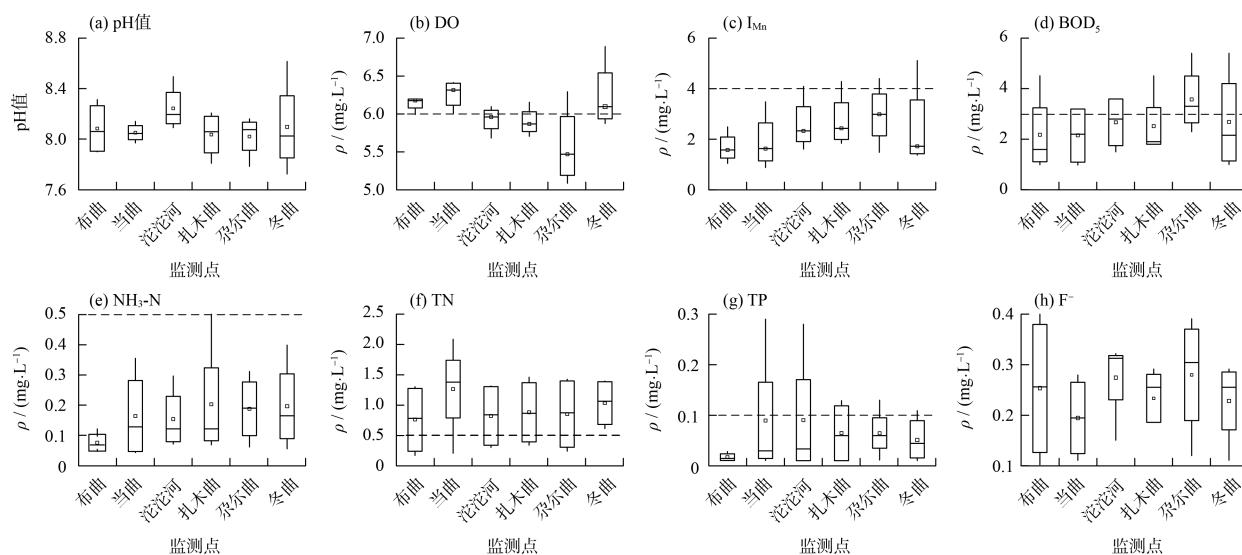


图 1 各监测点水质指标监测结果统计

Fig. 1 Statistics of water quality indicators in each sampling site

和 TP 均值均高于《标准》II 类标准限值, I_{Mn} 、 BOD_5 和 NH_3-N 均值整体处于 I 类与 II 类标准限值之间。由图 1 可见, 沱沱河、扎木曲和尕尔曲的 DO 值在 II 类与 III 类标准限值之间, 布曲、当曲和冬曲的 DO 值优于 II 类, DO 值低于《标准》II 类限值可能与当地高海拔低气压导致水体氧饱和浓度降低有关; 水体温度普遍较低; F^- 值远低于《标准》I 类限值 (1.0 mg/L)。可见, 长江源区流域水质基本处于自然状态, 受地质环境影响较大, 河流水质指标本底值较低, 此次各指标监测结果与 Liu 等^[13]在 2021 年对长江源区的研究结果一致。

2.2 评价指标体系建立

2.2.1 评价指标选取

选取各监测点位中有检测结果的 10 项水质指标作为初选评价因子进行分析, 其主成分贡献率及因子荷载量见表 2。在主成分分析前先对各指标进行 KMO 统计, 结果表明, 抽样适度测定值为 0.637, Bartlett 球度检验显著性为 0, 水质指标适合作主成分分析。由表 2 的主成分荷载信息可知, 特征值 > 1 的主成分有 3 个, 累计贡献率达到 85.60%。其中, 第一主成分 (F1) 与 I_{Mn} 、COD、 BOD_5 、 NH_3-N 、DO、 F^- 密切相关, 贡献率高达 46.40%, 说明 F1 主要代表了地表水中与氧平衡指标和 F^- 有关的信息。第二主成分 (F2) 的贡献率为 26.03%, 与 TN 和 TP 相关性极高, 说明 F2 代表水体营养化程度。第三主成分 (F3) 贡献率最小, 在 F3 上荷载高的指标是 pH

表 2 水质指标主成分荷载矩阵

Table 2 Principal component load matrix of water quality indicators

指标	F1	F2	F3
I_{Mn}	0.955	-0.168	0.080
COD	0.937	-0.229	0.045
BOD_5	0.842	-0.410	0.115
NH_3-N	0.819	0.409	-0.081
DO	-0.774	0.522	0.021
F^-	-0.745	-0.609	-0.230
TN	-0.062	0.941	0.030
TP	0.349	0.751	0.293
pH 值	-0.178	-0.146	0.865
水温	-0.397	-0.268	0.633
特征值	4.64	2.63	1.31
贡献率/%	46.40	26.03	13.17
累计贡献率/%	46.40	72.43	85.60

值和水温, 与水体一般性指标有关。3 个主成分包含了所有原始水质指标 85% 以上的信息, 能很好地反映原始水质数据携带的信息, 可以将表 1 中的 10 项水质指标作为水质模糊综合评价的待选指标。

对上述 10 项水质指标进行 Pearson 相关分析, 由相关性结果可知, COD 与 I_{Mn} 、DO 的相关系数分别为 0.88、-0.86, 与 BOD_5 存在相关系数高达 0.96 的正相关关系; F^- 与 NH_3-N 存在较高的负相关关系, 且 F^- 监测值远低于《标准》I 类限值, 对水质影响较小; pH 值和水温在《标准》中无明确等级。为避免指标间的共线性, 同时基于模糊综合评

价的可行性,最终确定水质评价因子集 $U = \{I_{Mn}, BOD_5, NH_3-N, TP, TN, DO\}$, 依据《标准》(见表 3), 结合长江源区客观的水环境现状将评价等级分为 5 类,评语集 $V = \{I, II, III, IV, V\}$ 。

表 3 水质指标各级标准限值及其加权平均值(c_{oi})

水质指标	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类	c_{oi}
I_{Mn}	2	4	6	10	15	7.5
BOD_5	3	3	4	6	10	5
NH_3-N	0.15	0.5	1.0	1.5	2.0	1.0
TP	0.02	0.1	0.2	0.3	0.4	0.2
TN	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	1.0
DO	7.5	6	5	3	2	3.48
F^-	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	0.75

2.2.2 模糊评价矩阵

根据公式(1)—公式(3)和表 3 确定各指标在不同水质等级上的隶属度函数,建立隶属度矩阵 M_{Fi} 。以沱沱河监测点位为例,其于 2021 年 6 月水质监测数据的隶属度矩阵 M_{Fi} 为:

$$M_{Fi} = \begin{bmatrix} 0 & 0.95 & 0.05 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.92 & 0.08 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.2.3 组合权重

根据熵权法求出各指标的信息熵,并计算各指标的熵权法权重 w_i^1 ,结果见图 2(a)。由图 2(a)可见, I_{Mn} 、 BOD_5 、 NH_3-N 、TP、TN 和 DO 的熵权法权重分别为 0.172 6、0.239 9、0.138 8、0.094 0、0.192 3 和 0.162 5, BOD_5 权重最高,TP 权重最低。

在层次分析法确定主观权重时,以往研究通常采用九标度法确定因子的重要程度^[14]。然而,水质指标具有实际意义,今选用单项污染指数法计算标度,对越小越优型指标,计算公式为 $d_i = c_i/c_{oi}$,对于 DO 指标, $d_i = c_{oi}/c_i$ 。其中, d_i 、 c_i 、 c_{oi} 分别为第 i 项评价指标的标度值、实测值、各级浓度标准值的均值,各级浓度标准值采用加权平均法确定^[15]。确定的评价因子 c_{oi} 结果见表 3。层次分析法确定的不同点位各指标权重 w_i^2 见图 2(a)。

以博弈论对熵权法与层次分析法得到的权重进行组合处理,最终权重值 w_i^* 见图 2(b)。在 6 个指标中,熵权法表明 BOD_5 所占权重最大,而层次分析法和组合赋权法却得出 TN 所占权重最高。TN 在不同河流的层次分析法权重范围为 0.27 ~ 0.38,利用博弈论组合之后 TN 的权重范围为 0.26 ~ 0.38,不同监测点位的权重均值 > 0.30,表明长江源区沱沱河流域水质主要影响因子为 TN; DO 和 BOD_5 权重次之; NH_3-N 在不同监测点的组合权重均值约为 0.05,对水质的影响较小。

由图 2 可见,基于博弈理论的方法计算得出的组合权重值与改进的层次分析法确定的权重相近,与熵权法得到的权重具有一定的差异。表明,在水质评价过程中向层次分析法引入基于单项污染指数的标度计算值可行,改进的层次分析法结合了水质实测值,避免了层次分析法中主观性强的不足。

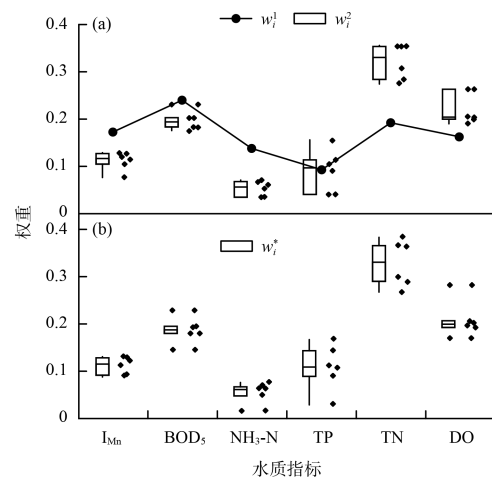


图 2 熵权法和层次分析法分别确定的权重,以及基于博弈理论的组合权重

Fig. 2 Weights determined by entropy weight method and analytic hierarchy process respectively, and combined weights based on game theory

2.3 水质评价

采用综合评价指数量化研究区 6 个监测点的水质等级,不同监测点和不同月份的水质综合评价指数分别见图 3(a)(b)。由图 3(a)可见,不同监测点的综合评价指数均值从高到低依次为冬曲(2.03) > 尕尔曲(1.76) > 扎木曲(1.75) > 沱沱河(1.67) > 布曲(1.66) > 当曲(1.54),河流水质差异可能与监测点的高程^[16]有关,当曲和布曲水位较其他河流高,受人类活动影响相对较小。

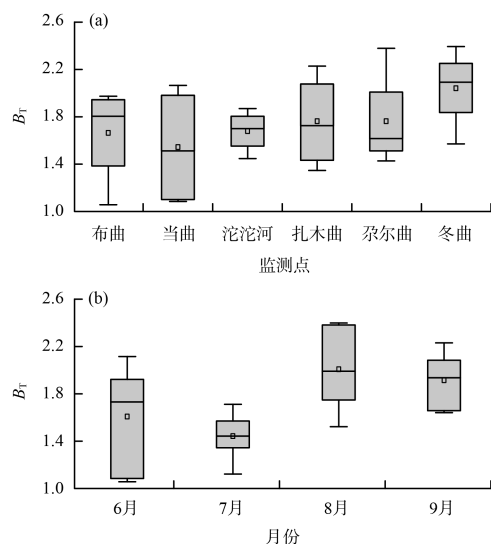


图3 不同监测点和不同月份的水质综合评价指数

Fig. 3 Water quality comprehensive evaluation index in different monitoring sites and different months

由图3(b)可见,不同月份水质综合评价指数均值从高到低依次为8月(2.00) > 9月(1.91) > 6月(1.60) > 7月(1.43)。研究区6月和7月水质较好,可能是由于6月、7月研究区气温相对较高^[17],冰川融水和降水等的稀释作用使河流水质提升;8月和9月水质等级下降,原因可能是气温下降,降水逐渐以降雪形式呈现,冰川融水和降水对径流的补给不明显,水质下降^[18]。此外,研究区水质主要由自然因素主导,流域地处高原区域,地表岩石风化及地质溶出^[19]等使河流水体营养盐浓度升高。

以改进的模糊综合评价法对研究区各监测点水质进行评价,结果见表4。由表4可知,2021年6—9月研究区水质等级为Ⅱ类或优于Ⅱ类。其中,水质等级为Ⅱ类的监测点占25.0%、Ⅰ类占45.8%、Ⅰ~Ⅱ类占29.2%。研究区水质基本达到当地水功能区标准,水体营养化程度弱,流域水质整体较好,该评价结果与黄苗等^[20]、鲁子豫等^[21]、韩谓等^[22]对长江源区水质的研究结果一致,水体

表4 不同监测点水质的综合评价结果

Table 4 Comprehensive evaluation results of water quality in different monitoring sites

月份	布曲	当曲	沱沱河	扎木曲	尕尔曲	冬曲
6月	Ⅰ类	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅱ类	Ⅰ~Ⅱ类	Ⅱ类
7月	Ⅱ类	Ⅰ类	Ⅰ~Ⅱ类	Ⅰ~Ⅱ类	Ⅰ类	Ⅰ~Ⅱ类
8月	Ⅰ~Ⅱ类	Ⅰ类	Ⅰ类	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅰ~Ⅱ类
9月	Ⅰ类	Ⅰ类	Ⅰ~Ⅱ类	Ⅱ类	Ⅰ类	Ⅰ类

污染负荷基本处于当地河流背景值范围内。

沱沱河流域特殊的地理位置与气候使当地人口稀少,河流水质主要受地表岩石风化、降水和蒸发等自然因素的影响^[23],人类活动影响小。近十年来长江源区气温显著升高,冰川融水和降水增加^[24],流域内河流水质良好,对长江源区乃至整个长江流域的水资源保护和管理具有积极意义。

3 结论

(1)运用主成分和相关分析方法确定的模糊综合评价因子集包括 I_{Mn} 、 NH_3-N 、 DO 、 TN 、 TP 、 BOD_5 ,其中 TN 是对流域水质评价结果占主导作用的因子。

(2)将熵权法和层次分析法确定的权重以博弈论的思想进行优化组合,组合权重值与改进的层次分析法确定的权重相近,说明博弈论的赋权方法集合了最大污染因子的影响与河流水体实际情况,指标权重值更合理,该评价方法可为水质评价提供新的思路。

(3)运用改进的模糊综合评价法对长江源区沱沱河流域水质进行评价,结果表明,各条河流水质基本上在地表水Ⅰ~Ⅱ类标准之间,长江源区水质良好。

[参考文献]

- [1] ZHANG Y, LIU S Y, XU J L, et al. Glacier change and glacier runoff variation in the Tuotuo River basin, the source region of Yangtze River in western China [J]. *Environmental Geology*, 2008, 56(1): 59-68.
- [2] 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.
- [3] 张彪, 姜春露, 郑刘根, 等. 改进的模糊综合评价法在某煤矿区水质评价中的应用[J]. *环境监测管理与技术*, 2022, 34(5): 27-32.
- [4] 胡冰涛, 陈玉东. 基于聚类分析和主成分分析的长江下游稻田氮磷监测指标筛选[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(11): 1495-1504.
- [5] 郑志宏. 河流健康评价与生态环境需水理论及应用研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [6] LIU Y, HU Y C, HU Y M, et al. Water quality characteristics and assessment of Yongding New River by improved comprehensive water quality identification index based on game theory[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 104: 40-52.
- [7] 唐雄朋, 吕海深. 沱沱河流域水文气象要素变化特征分析[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(12): 37-40.
- [8] 刘彦龙, 郑易安. 黄河干流水质评价与时空变化分析[J]. 环

- 境科学, 2022, 43(3): 1332-1345.
- [9] 姚靖, 李清芳, 张永江, 等. 黔江区饮用水源地水质模糊综合评价研究[J]. 环境监测管理与技术, 2017, 29(2): 31-35.
- [10] 刘红雨, 刘友存, 孟丽红, 等. 熵权法在水资源与水环境评价中的研究进展[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 299-306.
- [11] 鲍艳磊, 田冰, 张瑜, 等. 雄安新区河流健康评价[J]. 生态学报, 2021, 41(15): 5988-5997.
- [12] 陈婧, 赵敏, 周华, 等. 基于博弈论组合赋权的姜堰区模糊综合评价法及应用[J]. 水电能源科学, 2019, 37(9): 32-35.
- [13] LIU M, ZHAO L Y, LI Q Y, et al. Distribution characteristics, enrichment patterns and health risk assessment of dissolved trace elements in river water in the source region of the Yangtze River [J]. Journal of Water and Climate Change, 2021, 12(6): 2288-2298.
- [14] DING F, ZHANG W J, CHEN L Y, et al. Water quality assessment using optimized CWQHI in Taihu Lake [J]. Environmental Research, 2022, 214: 1137131.
- [15] 王肖肖, 张妙仙, 徐兵兵. 模糊标识指数与对应分析法在水质评价中的联合应用[J]. 环境科学学报, 2012, 32(5): 1227-1235.
- [16] HAN X, PAN B Z, ZHAO G N, et al. Local and geographical factors jointly drive elevational patterns of phytoplankton in the source region of the Yangtze River, China [J]. River Research and Applications, 2021, 37(8): 1145-1155.
- [17] CHEN W F, YAO T D, ZHANG G Q, et al. Accelerated glacial mass loss in the largest river and lake source regions of the Tibetan Plateau and its links with local water balance over 1976—2017 [J]. Journal of Glaciology, 2021, 67(264): 577-591.
- [18] 邵骏, 吴琼, 钱晓燕, 等. 长江源区径流季节性变化及其与影响因素的多尺度相关分析[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(7): 172-178.
- [19] QU B, ZHANG Y L, KANG S C, et al. Water quality in the Tibetan Plateau: Major ions and trace elements in rivers of the “Water Tower of Asia” [J]. Science of the Total Environment, 2019, 649: 571-581.
- [20] 黄苗, 刘玥晓, 赵伟华, 等. 长江源区近年水质时空分布特征探析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(7): 46-50.
- [21] 鲁子豫, 马燕, 李志强, 等. 青海长江源区 2005—2012 年地表水水质状况及变化趋势分析[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 53-56.
- [22] 韩谓, 潘保柱, 赵耿楠, 等. 长江源区浮游植物群落结构及分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11): 2621-2631.
- [23] ZHANG F, SHI X N, ZENG C, et al. Recent stepwise sediment flux increase with climate change in the Tuotuo River in the central Tibetan Plateau [J]. Science Bulletin, 2020, 65(5): 410-418.
- [24] 汤秋鸿, 兰措, 苏凤阁, 等. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2807-2821.
- (上接第 22 页)
- Northwest China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 841: 156733.
- [7] 马常莲, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆若羌县绿洲带地下水重金属来源解析及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2023, 43(2): 266-277.
- [8] 曹占琪, 苟金明, 邱小琮, 等. 黄河宁夏段水体重金属时空分布特征及健康风险评价[J]. 环境监测管理与技术, 2022, 34(5): 33-38.
- [9] 邵景力, 谢振华, 李志萍, 等. 地下水环境容量的基本理论和计算方法[J]. 地学前缘, 2010, 17(6): 43-50.
- [10] 范俊楠, 田文娟, 张钰, 等. 区域土壤背景重金属 Cd 环境容量分析与预测[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(S1): 241-246.
- [11] LI K Q, WANG X L. Calculation methodology of marine environmental capacity for heavy metal: A case study in Jiaozhou Bay, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(2): 282-287.
- [12] 李鸣. 鄱阳湖重金属污染特征研究及环境容量估算[D]. 南昌: 南昌大学, 2010.
- [13] 刘海, 魏伟, 宋阳, 等. 霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测[J]. 环境科学, 2023, 44(11): 6106-6115.
- [14] 赵江涛, 周金龙, 梁川, 等. 新疆焉耆盆地平原区地下水反向水文地球化学模拟[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(10): 65-70.
- [15] 彭亮, 乔英, 王环波. 焉耆盆地自然-社会水循环要素演化特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(8): 97-106.
- [16] 章文亨. 焉耆盆地地下水流系统对变化环境的响应研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- [17] 陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 等. 降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 123-130.
- [18] TOMLINSON D L, WILSON J G, HARRIS C R, et al. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index [J]. Helgoländer Meeresuntersuchungen, 1980, 33(1): 566-575.
- [19] 郭晓东, 刘强, 张慧荣, 等. 土壤重金属对地下水的危害评价方法研究——以吉林省珲春盆地为例[J]. 中国地质, 2024, 51(4): 1243-1251.
- [20] 王环波. 变化环境下焉耆盆地水盐动态响应与调控策略研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
- [21] MAMATTURSUN E, ANWAR M, AJIGUL M, et al. A human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils of Yanqi Basin, Silk Road Economic Belt, China [J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2018, 24(5): 1352-1366.
- [22] 费坤, 汪甜甜, 邹文嵩, 等. 土壤重金属污染空间插值及其验证方法研究综述[J]. 环境监测管理与技术, 2022, 34(2): 1-6.
- [23] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提, 等. 博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 地理学报, 2017, 72(9): 1680-1694.