

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdcqk.2020.0014

高凡,邹兰,孙晓懿.改进综合水质指数法的乌伦古湖水质空间特征[J].南水北调与水利科技,2020,18(1):127-137. GAO F, ZOU L, SUN X Y. Analysis of the spatial characteristics of Ulungur Lake water quality based on improved comprehensive water quality index[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1): 127-137. (in Chinese)

# 改进综合水质指数法的乌伦古湖水质空间特征

高凡<sup>1</sup>, 邹兰<sup>1</sup>, 孙晓懿<sup>2</sup>

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 黄河水资源保护科学研究院, 郑州 450003)

**摘要:**湖泊水质状况是识别湖泊变化、评价湖泊健康的重要指标,关系流域生态环境安全。以典型干旱内陆湖泊:乌伦古湖为研究对象,采用改进综合水质指数法(WPASEQI)并结合GIS技术对乌伦古湖湖区(吉力湖、布伦托海)2017年水质状况及空间分布规律进行研究。结果表明:乌伦古湖水质类别及状况为Ⅲ类、轻度污染,其中,吉力湖水质类别为Ⅱ类,布伦托海水质类别为Ⅲ类,水质空间分布特征表现出越靠近湖中心东部区域,以及越远离进水口区域水质污染越严重的基本规律;乌伦古湖水质污染关键超标因子为COD、COD<sub>Mn</sub>、TN、TP、氟化物,其空间分布特征表现为,COD、COD<sub>Mn</sub>与氟化物指标浓度空间分布规律大致相似,呈现出吉力湖优于布伦托海、进水口优于湖心区的空间分布特征;TN、TP指标浓度变化差异较小,大体呈现出进水口优于湖心区、布伦托海西部优于东部的特征;富营养物、有机物以及无机物是乌伦古湖水质主要污染来源,气候变化与人类活动是导致湖泊水质进一步恶化的驱动力。

**关键词:**改进综合水质指数法;水污染指数法;水质标识指数法;水质空间分布;乌伦古湖

中图分类号:X824 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Analysis of the spatial characteristics of Ulungur Lake water quality based on improved comprehensive water quality index

GAO Fan<sup>1</sup>, ZOU Lan<sup>1</sup>, SUN Xiaoyi<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Yellow River Water Resources Protection Research Institute, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** The status of lake water quality is an important index to identify and to evaluate the lake changes and the lake health, which is directly related to the ecological environment security of the basin. By taking Ulungur Lake which is a typical arid inland lake as the research object to study the status of water quality and the spatial distribution laws in Ulungur Lake area (Jili Lake and Buluntuo Lake) for the year of 2017 using improved comprehensive water quality index (WPASEQI) and GIS technology. The main conclusions of this study are as follows; water quality of the Ulungur Lake was classified in third national standard and less polluted. Among them, water quality of the Jili Lake was classified into the second standard of the surface water environmental function, while the Buluntuo Lake was classified into the third standard. Moreover, it showed that there were significant spatial difference characteristics of water quality that were closer to the eastern part of the lake center and the beyond away from the inlet area, indicated more serious the water pollution. The key over-standard indices of water pollution in Ulun-

收稿日期:2019-05-28 修回日期:2019-08-30 网络出版时间:2019-09-05

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190905.1053.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(51769036);新疆维吾尔自治区自然科学基金(2017D01A43);新疆水资源项目“干旱区尾间湖泊水质研究”

作者简介:高凡(1980—),女,新疆乌鲁木齐人,副教授,博士,主要从事水资源系统工程与河流生态保护研究工作。E-mail: gutongfan0202@163.com

通信作者:邹兰(1994—),女,四川绵阳人,主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: 1191490234@qq.com

gur Lake were COD, CODMn, TN, TP and fluoride, and their spatial distribution characteristics were as follows; the spatial distribution laws of COD, CODMn and fluoride indices concentration were roughly similar, showing that the Jili Lake was superior to the Buluntuo Lake and the water inlet was greater to the center area. In addition, the concentration of TN and TP indicators had little difference, which generally showed that the inlet area was better than the lake center and the west of the Buluntuo Lake was better than the east, respectively. Eutrophication, organic matter and inorganic matter were the main pollution sources of water quality in the Ulungur Lake. Climate change and human activities may be the driving forces for further deterioration of lake water quality.

**Key words:** improved comprehensive water quality index; water pollution index; water quality index; spatial distribution of water quality; Ulungur Lake

干旱内陆湖泊是陆地水圈的重要组成部分,参与自然界水循环过程,同时,作为干旱区水资源的重要载体,是维系流域生态安全与区域经济社会可持续发展的敏感响应因子<sup>[1-3]</sup>。自 20 世纪 50 年代以来,我国西部气候变化显著,受此影响,分布在我国寒旱区的青藏和蒙新两大湖区的湖泊尤其是尾间湖泊对气候变化和人类活动的响应格外敏感<sup>[4-8]</sup>,突出表现为,受上中游绿洲水资源开发利用影响,湖泊出现一系列如水位下降、面积萎缩、水质咸化、水体富营养化、湖滨带生态退化等问题,引起各界广泛关注与重视<sup>[1-8]</sup>。湖泊水质状况是研究湖泊变化、评价湖泊健康的重要指标。水质评价即采取一定的方法对水体环境质量的优劣程度做出定性及定量分析<sup>[9]</sup>。现阶段水质评价方法大致可分为三类,即水质类别判定法、水质污染指数法、水质分级评分法<sup>[10]</sup>。较常用的方法如单因子指数法、水污染指数法(WPI)、综合水质标识指数法(WQI)、主成分分析法、灰色关联分析、模糊综合评价等<sup>[11-15]</sup>,各具特色与优缺点。其中,水污染指数法(WPI)<sup>[12,16]</sup>计算简便,能识别主要污染因子,可用于水质类别与定量评价,但评价结果过于保守;综合水质标识指数法(WQI)<sup>[17-18]</sup>不会因个别水质指标较差而否定综合水体质量且可进行水质的定性与定量综合评价。但上述两种方法均未考虑各指标之间的相互作用关系。基于此,本文以典型干旱内陆尾间湖泊新疆乌伦古湖为评价对象,提出一种基于主客观耦合赋权并结合水污染指数法与综合水质标识指数法的改进综合水质指数法(WPASEQI)。该方法采用以水污染指数法为分指数,依据基于层次分析法(AHP)、超标倍数法与熵权法的主客观耦合赋权的综合水质指数法,引入水质标识指数法,构建改进后的综合水质指数法,评价乌伦古湖水质特征并识别湖泊主要超标水质因子,结合 ArcGIS 10.5 空间插值分布图分析超标水质因子的空间分布规律,揭示水质污染

驱动因素,以期为干旱区内陆湖泊水质评价提供技术支持,为干旱内陆河流域水资源合理开发利用、以及顺利推行河湖长制、开展流域河湖连通的生态修复工程提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

乌伦古湖属典型的干旱内陆半封闭尾间湖,是新疆地区第二大渔业养殖基地,地处阿勒泰地区福海县境内,北与阿尔泰山接壤,南与古尔班通古特沙漠相连,地理坐标位于  $86^{\circ}59' \sim 87^{\circ}34' E$ ,  $46^{\circ}51' \sim 47^{\circ}25' N$ (见图 1)。乌伦古湖由布伦托海与吉力湖构成,入湖水来自发源于阿尔泰山东部冰川融水补给的乌伦古河,吉力湖水量直接由乌伦古河补给,布伦托海靠乌伦古河与额尔齐斯河间接补给。乌伦古湖水域总面积约为  $930 \text{ km}^2$ ,水位介于  $478.6 \sim 485 \text{ m}$ ,平均水深约为  $8 \text{ m}$ 。湖区气候寒冷干燥,降水量稀少,蒸发量巨大,地表径流补给不足,湖内原仅有 7 种土著鱼类,后引进外来鱼种,现湖区约有 22 种鱼类、90 余种底栖动物、以及浮游藻类约 164 种<sup>[19]</sup>。已有观测记录显示<sup>[20-21]</sup>,自 2005 年以来,入湖水量明显减少甚至出现断流,导致湖泊水位下降、水面面积萎缩、湖泊呈咸化趋势,湖泊水生环境与生态安全受到严重威胁,直至 1987 年“引额济海”工程扩大引水才基本维持湖泊水量平衡<sup>[20]</sup>。

### 1.2 数据来源

依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)选择 23 项水质指标进行采样监测,采样数据来源于 2017 年 8 月丰水期现场实地采样数据的平均值。考虑乌伦古湖水域面积、湖盆形状、进出水口位置以及采样的可操作性与可行性等因素,在湖区内共布设 8 个采样点, S1 至 S8 采样点所在断面分别是吉力湖进水口、吉力湖中心、中海子、农十师

渔政点、骆驼脖子、布伦托海湖心、阿克库勒、小海子,见图1。

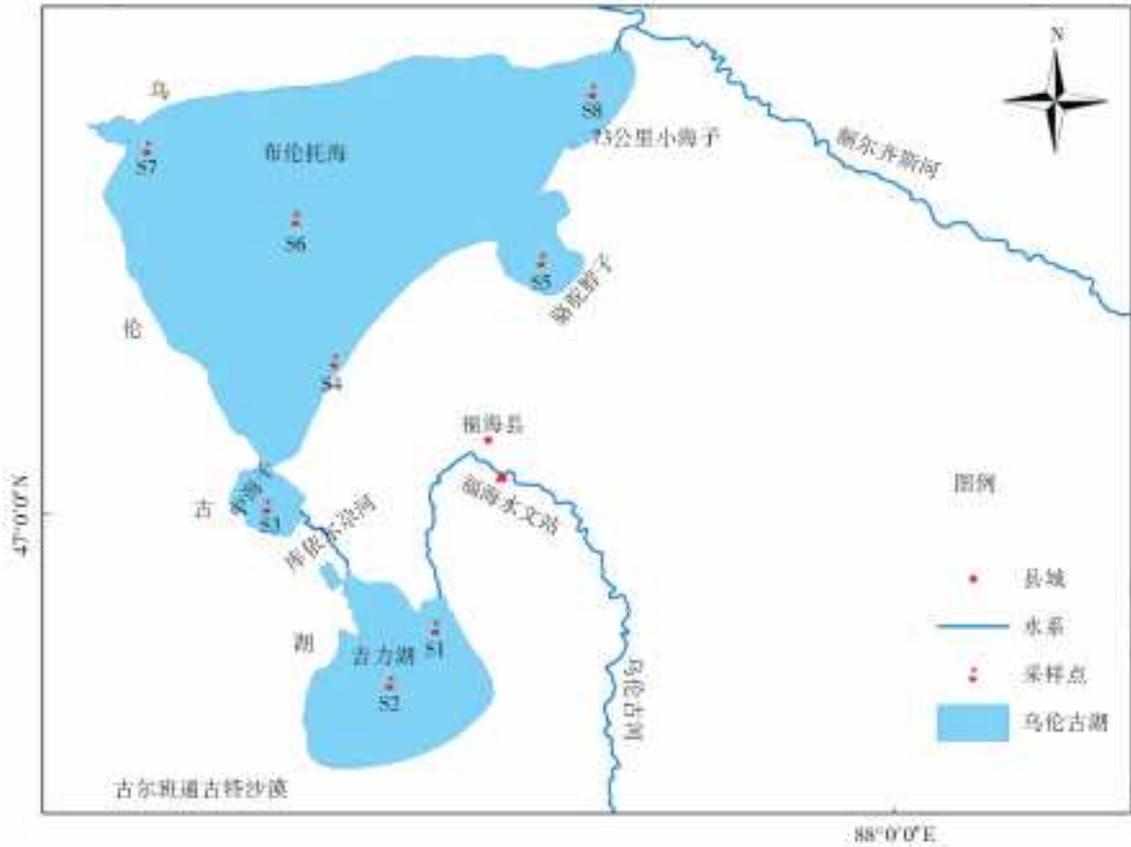


图1 乌伦古湖地理位置与采样点分布

Fig.1 Geographical location and distribution map of sampling sites in the Ulungur Lake

1.3 评价方法

本文采用改进的综合水质指数法评估水体综合环境质量状况,具体步骤如下。

1.3.1 指标耦合赋权

1.3.1.1 层次分析法

层次分析法(AHP)是将评价系统指标进行分层系列化,按照因素之间相互影响和隶属关系分层聚类组合,形成一个递阶、有序的层次结构模型<sup>[22-23]</sup>。按照本文选择的各水质指标类别建立指标分级图,见图2。各级指标打分采取专家打分法,方法流程见参考文献<sup>[23]</sup>,其中,湖泊水体富营养化指

标为主要权重指标,其次为有机污染指标,其他指标基本按照等权重赋值。

1.3.1.2 超标倍数法

超标倍数法是一种突出水质评价中最主要污染因子作用的同时考虑不同污染物标准值差异的赋权方法<sup>[24]</sup>,计算公式为

$$w_{2i} = \frac{C_i / \bar{S}_i}{\sum_{i=1}^m C_i / \bar{S}_i} \tag{1}$$

式中: $C_i$ 表示第*i*个指标的实测浓度; $\bar{S}_i$ 表示第*i*个指标所处类别标准的平均值; $w_{2i}$ 为第*i*个指标的超标倍数权重。



图2 层次分析法指标分级

Fig.2 Analytic hierarchy process indicators classification diagram

### 1.3.1.3 熵权法

熵权法是在综合考虑各指标所提供信息的基础上,反映系统信息无序化程度的一种客观赋权方法<sup>[25]</sup>,指标间的离散程度越大,信息熵越小,其对应的权重也越大,反之,信息熵值越大,权重越小。计算公式为

$$z_{ij} = \frac{C_{ij} - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (2)$$

$$z'_{ij} = \frac{1 + z_{ij}}{\sum_{j=1}^n (1 + z_{ij})} \quad (3)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n z'_{ij} \cdot \ln z'_{ij} \quad (4)$$

$$w_{3i} = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{i=1}^m e_j} \quad (5)$$

式中: $n$  和  $m$  分别为评价区域个数和指标个数; $z_{ij}$  和  $z'_{ij}$  分别代表第  $j$  个评价区域的第  $i$  个指标的标准化值与修正后的标准化值; $C_{\max}$ 、 $C_{\min}$  与  $C_{ij}$  分别表示评价指标的最优、最差标准值与实测浓度值; $e_j$  为第  $j$  个评价区域的第  $i$  个指标的熵值; $w_{3i}$  为第  $i$  个指标的熵权。

### 1.3.1.4 耦合权重

本文采取主客观耦合赋权法对湖泊权重赋值,其中,采用层次分析法确定主观权重,采用超标倍数法突出主要超标因子权重,并与熵权法组合确定客观权重,既可避免层次分析法主观臆断可能带来的不确定性,又规避了客观赋权法对原始数据多寡的依赖性,能较全面地解决各指标间的相关性、重叠性及突出性等问题。计算公式为

$$w_i = \alpha w_{1i} + \beta w_{2i} + \gamma w_{3i} \quad (6)$$

式中: $w_{1i}$ 、 $w_{2i}$ 、 $w_{3i}$  分别代表层次分析法、超标倍数法、熵权法的权重; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为三种方法对应的权重系数,根据湖泊实际情况,综合各方法的优点,取  $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 0.2$ 、 $\gamma = 0.3$ ;  $w_i$  为第  $i$  个指标对应的耦合权重。

### 1.3.2 分指数

水污染指数评价法(water pollution index, WPI)是一种将常规监测的水质污染指标浓度简化为单一性指数值的方法,其具有计算便捷、准确性高、结果直观、可比性好等优点,可分级表征水体污染程度<sup>[12,16]</sup>。本文首先采用水污染指数评价法对乌伦古湖 23 项水质监测指标进行标准化处理,得到各指标的 WPI 值;再根据插值法<sup>[12]</sup> 计算各采样断面水质评价指标的 WPI 值,取最大值作为该采样断面指标的 WPI 值,并将最大值对应的污染指标作为关键水质污染因子。

除 pH 值和溶解氧(DO)外,其他各指标计算公式为

$$WPI(i) = WPI_l(i) + \frac{WPI_h(i) - WPI_l(i)}{C_h(i) - C_l(i)} \times (C(i) - C_l(i)) \quad (7)$$

式中: $WPI(i)$  为第  $i$  个水质指标所对应的指数值; $WPI_l(i)$  为第  $i$  个水质指标所在类别标准下限质量浓度值所对应的指数值; $WPI_h(i)$  为第  $i$  个水质指标所在类别标准上限质量浓度值所对应的指数值; $C(i)$  为第  $i$  个水质指标的实测质量浓度值; $C_l(i)$  为第  $i$  个水质指标所在类别标准的下限质量浓度值; $C_h(i)$  为第  $i$  个水质指标所在类别标准的上限质量浓度值。

pH 值属于无量纲值,当 pH 值为介于 7~9 时,取  $WPI(\text{pH}) = 20$ 。

当  $\text{pH} < 6$  时

$$WPI(\text{pH}) = 100 + 6.67 \times (6 - \text{pH}) \quad (8)$$

当  $\text{pH} > 9$  时

$$WPI(\text{pH}) = 100 + 8.00 \times (\text{pH} - 9) \quad (9)$$

当 DO 质量浓度值  $\geq 7.5$  mg/L 时,取  $WPI(\text{DO}) = 20$ 。当  $2$  mg/L  $\leq$  DO 值  $< 7.5$  mg/L 时, WPI 值计算公式为

$$WPI(\text{DO}) = WPI_l(\text{DO}) + \frac{WPI_h(\text{DO}) - WPI_l(\text{DO})}{C_l(\text{DO}) - C_h(\text{DO})} \times (C_l(\text{DO}) - C(\text{DO})) \quad (10)$$

当 DO 值  $< 2$  时

$$WPI(\text{DO}) = 100 + \frac{2.0 - C(\text{DO})}{2.0} \times 40 \quad (11)$$

$$WPI = \max\{WPI(i)\} \quad (12)$$

式中: $WPI$  为第  $i$  个评价断面的水污染指数值。

### 1.3.3 权重指数

为判别各水质监测断面不同水质指标的等级情况,将各断面水质指标的 WPI 值与相应的权重相乘,定义为综合水质指数  $I_{cw}$ 。

$$I_{cw}(i) = w_i \times WPI(i) \quad (13)$$

式中: $I_{cw}(i)$  为第  $i$  个指标耦合赋权后的综合污染指数; $w_i$  为第  $i$  个指标对应的耦合权重。

### 1.3.4 综合指数

由于水污染指数法未考虑水环境中客观存在的模糊性、不确定性,以及各指标在整体环境中的权重问题<sup>[12]</sup>,因此在此基础上,引入综合水质标识指数(WQI),建立改进后的综合水质指数法,并将其定义为 WPASEQI(即 WPI-WQI,其中 A 为层次分析法, S 为超标倍数法, E 为熵权法, Q 为水质标识指数法, I 为综合污染指数法)。计算公式为

$$WPASEQI = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (14)$$

$$X_1 \cdot X_2 = \sum I_{cw}(i) \quad (15)$$

式中: $X_1 \cdot X_2$  为改进综合水质指数法的核心部分,

其值保留小数点后一位;  $X_1$  表示水体综合水质类别;  $X_2$  表示水质类别浓度区间中距离下限值的位置;  $X_3$  表示劣于水环境功能区目标的单项指标个数;  $X_4$  表示综合水质类别与水体所在功能区水质目标相差的级别。

水质类别及状况与各指数之间的对应关系见表 1, 其中  $I_{cw}$  采用综合水质标识指数法划分等级; WPASEQI 能直接反映水体综合环境质量状况, 同时采用 WPI 的分级标准, 表明其值越小水环境质量越优, 反之, 值越大水环境质量越劣。

表 1 水质类别、水质状况与各污染指数对应关系

Tab. 1 Table for corresponding relationships between classification and status of water quality and pollution indexes

水质类别	水质状况	WPI	$I_{cw}$	WPASEQI
I	优	$\leq 20$	$\leq 2$	$\leq 20$
II	良好	$\leq 40$	$\leq 3$	$\leq 40$
III	轻度污染	$\leq 60$	$\leq 4$	$\leq 60$
IV	中度污染	$\leq 80$	$\leq 5$	$\leq 80$
V	重度污染	$\leq 100$	$\leq 6$	$\leq 100$
劣 V	极度污染	$> 100$	$> 6$	$> 100$

表 2 乌伦古湖不同湖区水质指标综合权重

Tab. 2 The comprehensive weight of water quality indicators in different lake areas of the Ulungur Lake

评价指标	布伦托海			综合权重	吉力湖			综合权重
	层次分析	超标倍数	熵权		层次分析	超标倍数	熵权	
pH	1.28	10.20	1.98	3.28	1.42	13.13	2.95	4.22
溶解氧(DO)	5.09	17.65	1.69	6.58	4.28	23.62	2.49	7.61
高锰酸盐指数(COD <sub>Mn</sub> )	11.50	5.00	3.10	7.68	13.76	4.93	3.91	9.04
化学需氧量(COD)	5.09	35.22	1.45	10.02	4.28	22.98	2.50	7.49
五日生化需氧量(BOD <sub>5</sub> )	5.09	4.33	3.11	4.34	4.28	5.66	3.68	4.38
氨氮(NH <sub>3</sub> -N)	5.09	2.73	4.26	4.37	4.28	2.77	4.37	4.00
总磷(TP)	11.50	3.14	4.04	7.59	13.76	3.65	4.20	8.87
总氮(TN)	11.50	5.79	2.92	7.79	13.76	5.64	3.82	9.16
铜(Cu)	2.29	0.15	8.11	3.61	2.14	0.31	5.06	2.65
锌(Zn)	2.29	0.37	7.52	3.47	2.14	0.24	5.09	2.64
氟化物	4.94	6.03	1.50	4.13	4.36	3.44	2.72	3.68
硒(Se)	1.28	0.15	6.43	2.60	1.42	0.10	4.97	2.22
砷(As)	1.28	0.10	7.02	2.77	1.42	0.00	5.17	2.26
汞(Hg)	2.29	7.79	6.02	4.51	2.14	12.16	4.63	4.89
镉(Cd)	2.29	0.04	1.22	1.52	2.14	0.06	5.09	2.61
六价铬(Cr <sup>6+</sup> )	2.29	0.22	6.30	3.08	2.14	0.22	4.86	2.57
铅(Pb)	2.29	0.27	6.02	3.00	2.14	0.06	5.09	2.61
氰化物	4.94	0.09	1.22	2.86	4.36	0.12	5.01	3.71
挥发酚	5.09	0.09	1.22	2.93	4.28	0.12	5.01	3.67
石油类	5.09	0.06	7.87	4.92	4.28	0.07	5.07	3.68
阴离子表面活性剂	1.28	0.45	1.22	1.10	1.42	0.61	4.16	2.08
硫化物	4.94	0.09	7.49	4.74	4.36	0.12	5.00	3.70
粪大肠菌群	1.28	0.03	8.26	3.13	1.42	0.01	5.16	2.26

次为砷、粪大肠菌群、锌、镉、铅。(4)综合 3 种赋权方法进行耦合赋值,得到综合权重,其中,布伦托海占比最大指标为 COD(10.02)、TN(7.79)、COD<sub>Mn</sub>(7.68),吉力湖主要污染因子是 TN(9.16)、COD<sub>Mn</sub>(9.04)、TP(8.87),表明布伦托海主要污染特征为有机物及富营养物,吉力湖主要水质污染来源为富营养化污染。

## 2.2 湖泊水质综合评价结果

基于乌伦古湖指标综合赋权结果,将大小湖区监测断面 23 项水质指标采样数据根据式(7)—(15)计算,得到改进综合水质指数 WPASEQI 值(见图 3)。本文研究区按照水功能区划,主要适用于集中式生活饮用水地表水源二级保护区、鱼虾类越冬场、洄游通道、水产养殖区等渔业水域及游泳区,即《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)地表水功能Ⅲ类水质。由图 3 可以看出,吉力湖整体水质状况良好,其中,吉力湖进水口(S1)WPASEQI 值最小,为 30.610,水质类别及水环境质量状况分别为Ⅱ类、良好,评价指标劣于水环境功能区要求的项目为 COD 指标 1 项;吉力湖中心(S2)WPASEQI 值为 32.830,属Ⅱ类水质,水质状况良好,3 项指标(COD、TP、COD<sub>Mn</sub>)超标;布伦托海水质污染较吉力湖严重,水质状况为轻度污染,其中,中海子(S3)WPASEQI 值为 42.120,水质类别为Ⅲ类,水环境受到轻度污染,2 项指标(COD、氟化物)超标;农十师渔政点(S4)WPASEQI 值相对最高,其为 47.440,属Ⅲ类水质,水质状况为轻度污染,超标项目达 4 项(COD、氟化物、COD<sub>Mn</sub>、TP 指标);骆驼脖子(S5)、布伦托海湖中心(S6)、阿克库勒(S7)、小海子(S8)的 WPASEQI 值分别为 45.440、45.630、44.320、43.130,均属Ⅲ类水质,水质状况为轻度污染。整体看,乌伦古湖水质类别为Ⅲ类,占比 78.3%,水质状况为轻度污染,水环境符合集中式生活饮用水地表水源二级保护区。

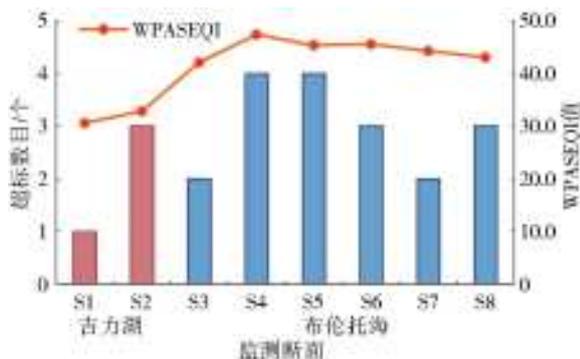


图 3 乌伦古湖监测断面改进综合水质指数与超标个数  
Fig. 3 WPASEQI values and the number of exceed standard of monitoring section in the Ulungur Lake

改进综合水质指数法具有可识别关键水质污染超标指标的的优点,基于此,分析乌伦古湖不同湖区各采样点水质超标因子结果(见表 3)。结果表明,乌伦古湖主要水质超标因子为化学需氧量(COD)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、总氮(TN)、总磷(TP)、氟化物,其中,吉力湖关键水质污染超标指标为有机物与富营养物,布伦托海关键水质污染超标指标主要为富营养化指标、有机物指标和无机物指标。

表 3 乌伦古湖各采样点水质超标指标与水质类别

Tab. 3 Exceeding standard indicators and water quality classification of sampling sites in the Ulungur Lake

不同湖区采样断面	主要污染因子与水质类别
吉力湖	S1 COD(劣 V 类)
	S2 COD(劣 V 类)、TP(Ⅳ类)、COD <sub>Mn</sub> (Ⅳ类)
布伦托海	S3 COD(劣 V 类)、氟化物(劣 V 类)、COD <sub>Mn</sub> (Ⅳ类)、TP(Ⅳ类)
	S4 COD(劣 V 类)、氟化物(劣 V 类)、COD <sub>Mn</sub> (劣 V 类)、TN(Ⅳ类)
	S5 COD(劣 V 类)、氟化物(劣 V 类)、COD <sub>Mn</sub> (Ⅳ类)
	S6 COD(劣 V 类)、氟化物(劣 V 类)、COD <sub>Mn</sub> (Ⅳ类)
	S7 COD(劣 V 类)、氟化物(劣 V 类)
	S8 COD(劣 V 类)、氟化物(劣 V 类)、TN(Ⅳ类)

## 2.3 湖泊水质空间差异化特征

### 2.3.1 乌伦古湖 WPASEQI 空间分布差异性规律

依据空间插值法对乌伦古湖水质指标进行空间差异化特征分析,分析结果见图 4。依据改进综合水质指数分级标准可知,WPASEQI 值越大表明水质状况越劣。乌伦古湖改进后综合水质指数空间分布见图 4(a),可以看出,越靠近湖中心东部区域、越远离进水口区域,WPASEQI 值越大,表明水质污染越严重。吉力湖、中海子与小海子依靠乌伦古河与额尔齐斯河水源补给,水量得到保证前提下水体自净能力强,水环境质量相对较好;布伦托海中心及东部受渔业养殖等人类活动影响,随水流方向污染物集聚于此,水环境质量相对较差。

### 2.3.2 乌伦古湖关键水质污染超标因子空间分布规律

基于参考文献[17]的综合水质标识指数法等级划分,判断综合水质指数  $I_{cw}$  的水质级别,由表 1 可知,该值越小则水质状况越优。根据前述分析,乌伦古湖关键水质污染超标指标为化学需氧量(COD)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、总氮(TN)、总磷(TP)、氟化物。

乌伦古湖关键污染因子  $I_{cw}$  空间分布差异性规律见图 4(b)—4(f)。由图 4(b)可知,乌伦古湖 COD 指标  $I_{cw}$  值呈现出吉力湖优于布伦托海、布伦

托海入水口优于湖中心、西部优于东部的空间分布差异性规律,该类污染物主要来源于湖区周边工业生产生活排水,受水流方向影响,汇聚在湖心周围静水区;图 4(c)中  $COD_{Mn}$  指标  $I_{cw}$  值空间分布规律表明,吉力湖进水口水质良好,吉力湖与小海子湖区水质状况整体为轻度污染,农十师渔政点与骆驼脖子断面水质状况为极度污染,布伦托海西部水质优于东部。由图 4(d)可知,TN 指标  $I_{cw}$  值呈布伦托海西

南部向东北部、小海子向骆驼脖子递增的趋势,在骆驼脖子附近水质类别对应Ⅳ类,为中度污染,布伦托海西部区域水质优于其他区域,属于轻度污染,吉力湖 TN 质量浓度较高,与乌伦古河农业面源污染中营养盐随水流迁移进入湖泊有关,骆驼脖子区域与额尔齐斯河来水水质含氮状况有关;由图 4(e)可知,TP 浓度与 TN 质量浓度变化范围均较小,总磷指标水质类别为地表水功能Ⅲ类或Ⅳ类,呈现出进

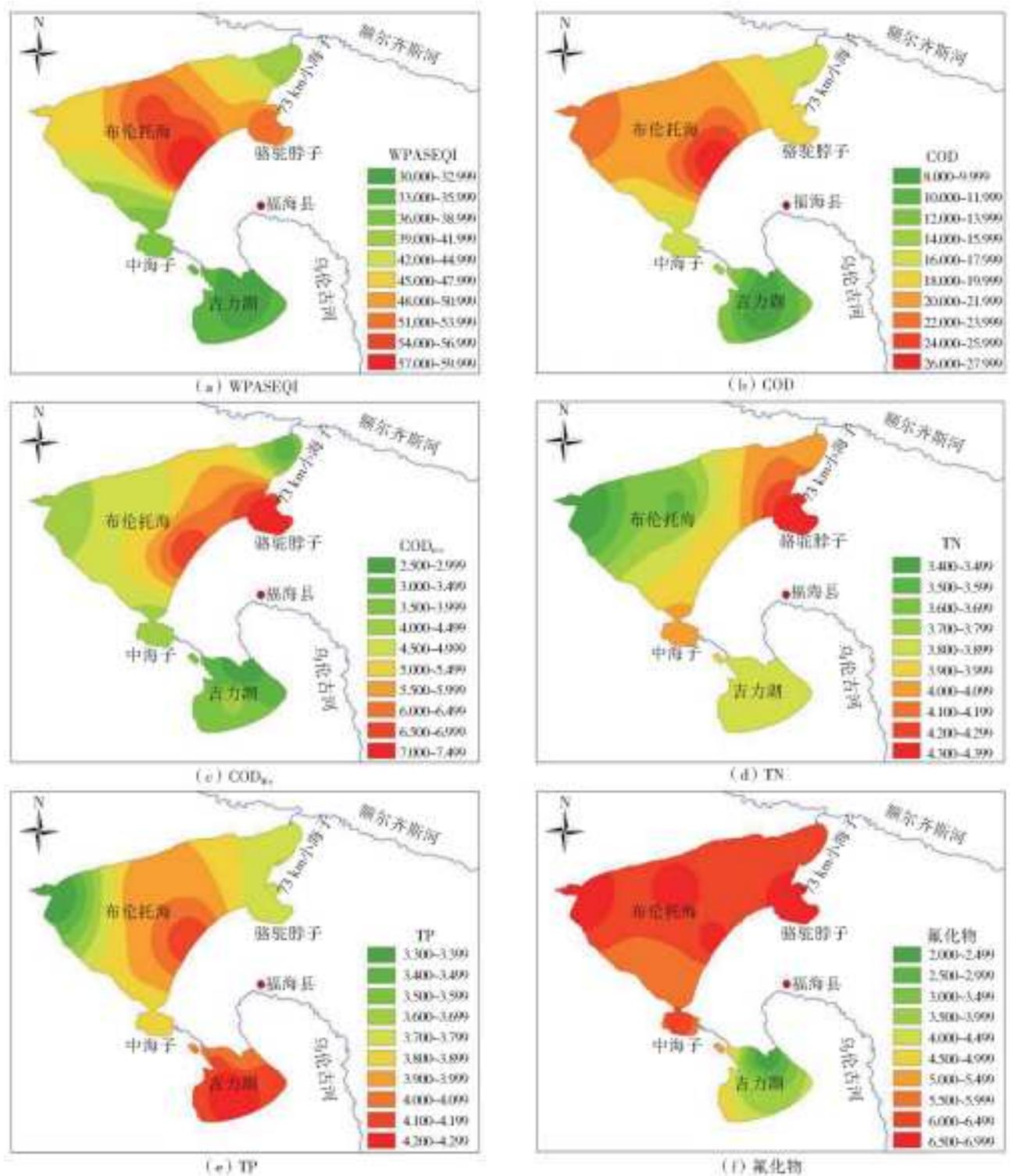


图 4 乌伦古湖 WPASEQI 值与关键污染因子  $I_{cw}$  值的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of WPASEQI values and  $I_{cw}$  values of key pollution indices in the Ulungur Lake

水口优于湖心区、布伦托海西部优于东部的空间分异规律,同时布伦托海水质污染呈由西部向东部、由南部向中部剧增的态势,导致此现象的原因可能为乌伦古河水源磷污染严重、湖岸带渔业养殖活动加剧;由图4(f)可知,全湖氟化物质量浓度处于较高水平,其中,布伦托海湖区氟化物为V类或劣V类水质,吉力湖入口水质稍好,但随水流方向氟化物质量

浓度递增且水质污染也逐渐加重。

### 2.4 改进综合指数法的优势

针对本文提出的改进综合水质指数法WPASEQI的适用性、可操作性、可靠性等问题,本文采用单因子评价法、水污染指数法、主成分分析法、模糊综合评价法4种常用的水质评价方法,对研究区进行水质评价,并列表分析不同方法的优势性,结果见表4。

表 4 改进综合水质指数法与其他常用方法结果比较

Tab. 4 Comparison of the results between WPASEQI and other common methods

优势性	不同水质评价方法				
	WPASEQI	单因子评价法	水污染指数法	主成分分析法	模糊综合评价法
计算方法简单易操作	✓	✓	✓	—	×
水质定量分析与等级评价	✓	✓	✓	✓	✓
考虑各指标之间的重叠性	✓	×	×	×	✓
突出关键污染因子的影响	✓	×	✓	×	×
判断污染因子的贡献率	✓	×	✓	✓	—
判断劣V类水体	✓	×	✓	✓	—

注:“✓”表示该优势发挥效果好;“—”表示可发挥该优势,但效果较差;“×”表示不可发挥该优势。

综合来看,改进综合水质指数法 WPASEQI 不仅综合了不同方法的优势,还避免了上述方法的缺陷;对于干旱内陆湖泊水质状况进行评估时,评价方法可应用于不同水环境的监测和评价中,具有较好的适用性,其评价结果也更具有可靠性与优越性。

## 3 讨论与结论

### 3.1 乌伦古湖水质变化驱动因素分析

乌伦古湖属于典型的半封闭型湖泊,湖泊水量通过乌伦古河直接补给与额尔齐斯河间接补给、以及地下水和区域降水补给,经过水面蒸发、入渗、以及人工引水等方式排泄,近年来,湖泊水量基本维持平衡、湖泊变化相对稳定<sup>[20]</sup>;但是,由于受气候变化与人类活动的影响,湖泊水质在很大程度上受到污染。

### 3.1.1 气候变化

结合乌伦古河流域二台水文站与福海水文站1965—2015年长系列气象资料,分析乌伦古湖水质对气候变化的响应,见图5。可以看出,乌伦古河流域气温多年来呈现显著增加趋势,且降水量也呈缓慢的增加趋势;但据资料显示,中下游径流量与入湖水量却在逐年递减,甚至出现断流<sup>[21,26]</sup>。一方面,随着气温逐年升高,导致流域沿程蒸散发量加剧,尽管降水量有所增加,但却不足以弥补平原区径流散失速率,这直接影响河流水质健康状况,致使流域生态环境受到威胁,增加污染物在下游及湖泊内富集的几率。另一方面,由于降雨量增加,致使流域沿岸荒漠化土地与耕地水土流失,农田氮磷等有机污染物随水流方向由河道及地下水系统迁移至下游湖

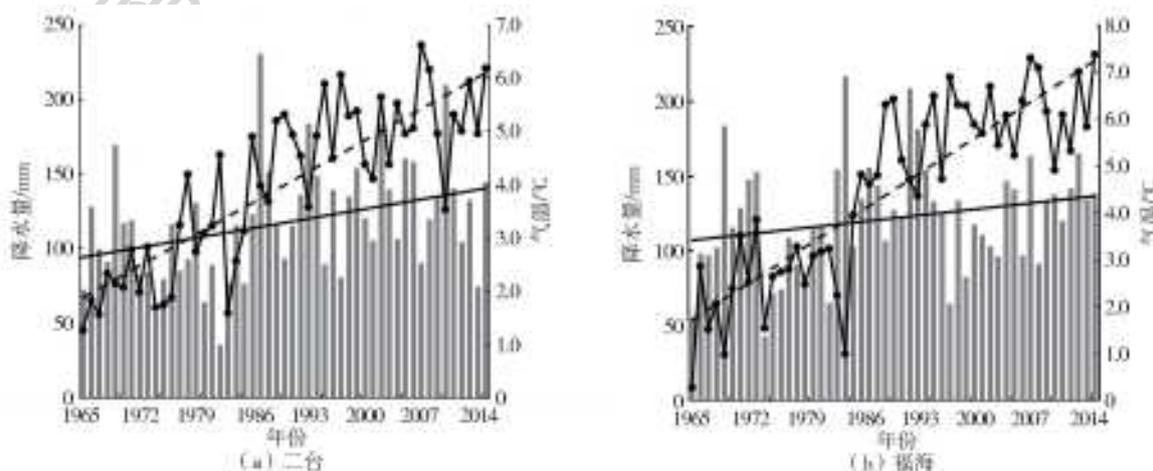


图 5 乌伦古河二台与福海水文站降水及气温变化

Fig. 5 The precipitation and temperature change of Ertai and Fuhai hydrologic stations in the Ulungur River

泊,导致湖泊富营养化程度加重。因此,乌伦古湖湖泊水质恶化是流域对气候变化的响应。

### 3.1.2 人类活动

乌伦古湖地处福海县境内,福海县工农业发展、生产生活需要以及社会经济可持续发展均与乌伦古湖水质状况息息相关。人类活动对乌伦古湖水质变化起主导作用<sup>[27]</sup>。农渔业面源污染、工业及生活点源污染、水利工程截留等水资源不合理调配是导致乌伦古湖水质不断恶化的驱动因素。农田灌溉、渔业养殖向湖泊大面积排放富营养物质与有机污染物,导致湖泊水体藻类疯长,破坏水生生物生活环境,生物多样性锐减,湖滨带植物萎缩。工业废水、居民生活污水排放大量有机与无机污染物,其中COD与氟化物最为突出,人畜长期大量引用含有过量氟化物的水会中毒致病,对人类与动物生命造成严重威胁,湖泊水体中有机物含量超标导致水中氧气不足,鱼类与大型底栖动物会因缺氧窒息而死,最终加速湖泊水质恶化,致使湖泊水生态系统失衡。大型水利工程如水库、水闸、渠道等截断水流,阻断河—河、河—湖连通,切断水文、生物、物质等信息的传递,同时不合理、无节制的引用水源会导致下游径流量及湖泊水量急剧减少,特别是农业灌溉用水<sup>[27]</sup>,这些因素会导致湖泊水体自净能力降低,水体污染程度加大,生物种类趋于单一化,水位降低,湖泊面积逐渐萎缩,水体咸化至干盐沼以致最终消失。

### 3.2 结论

(1)改进综合水质指数法(WPASEQI)采纳了水污染指数法和综合水质标识指数法的优点,并在此基础上充分考虑了各指标因子之间的交叉缺失相互作用关系,既可用于水质特征的定量分析,又能进行水质等级评价,既能突出最主要污染因子的影响,又能兼顾其他优势污染因子的贡献,该方法对于内陆湖泊水质评价具有适用性、可行性及可操作性。

(2)基于改进综合水质指数法的乌伦古湖2017年现状水平年水质评价结果表明,整体看,乌伦古湖水质类别及状况为Ⅲ类与轻度污染,水环境符合集中式生活饮用水地表水源二级保护区。其中,吉力湖水质状况良好,吉力湖进水口(S1)与吉力湖中心(S2)断面属Ⅱ类水质;布伦托海水质污染较吉力湖严重,属Ⅲ类水质,为轻度污染。乌伦古湖水质空间分布表现出越靠湖中心东部区域,以及越远离近入水口区域水污染越严重的基本特征。

(3)乌伦古湖关键水质污染超标因子为化学需氧量(COD)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、总氮(TN)、

总磷(TP)、氟化物。各水质污染超标指标的空间分布特征表现为,COD指标与COD<sub>Mn</sub>指标 $I_{ow}$ 值呈现出吉力湖优于布伦托海、布伦托海入水口优于湖心区、西部优于东部的空间分布差异性规律;TN指标 $I_{ow}$ 值呈布伦托海西南部向东北部、小海子向骆驼脖子递增的趋势,在骆驼脖子附近水质类别对应Ⅳ类,为中度污染;TP指标 $I_{ow}$ 值呈现出进水口优于湖心区、布伦托海西部优于东部的空间分异规律;氟化物指标含量全湖处于较高水平,其中,布伦托海氟化物指标 $I_{ow}$ 值远高于吉力湖,属Ⅴ类或劣Ⅴ类水质。

(4)气候变化与人类活动是影响湖泊水质恶化的主要驱动因素,其中,入湖水量减少、湖泊面积缩小可归结为湖泊水质对气候变化响应的主要原因,农渔业面源污染、工业及生活点源污染以及截流灌溉可能是人类活动影响因素中最为敏感的因子,同样也是导致污染物质出现空间差异性的重要原因。

### 参考文献(References):

- [1] 王莺,闫正龙,高凡. 1957—2015年红碱淖湖水域面积时空变化监测及驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 265-271. (WANG Y, YAN Z L, GAO F. Monitoring spatio-temporal changes of water area in Hongjiannao Lake from 1957 to 2015 and its driving forces analysis [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transaction of the CSAE), 2018, 34(2): 265-271. (in Chinese)) DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2018. 02. 036.
- [2] BAO C, FANG C L. Water resources flows related to urbanization in China: challenges and perspectives for water management and urban development[J]. Water Resources Management, 2012, 26(2): 531-552. DOI: 10. 1007/s11269-011-9930-y.
- [3] 白洁,陈曦,李均力,等. 1975—2007年中亚干旱区内陆湖泊面积变化遥感分析[J]. 湖泊科学, 2011, 23(1): 80-88. (BAI J, CHEN X, LI J L, et al. Changes of inland lake area in arid central Asia during 1975-2007: A remote-sensing analysis [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(1): 80-88. (in Chinese))
- [4] 闰利,张廷斌,易桂花,等. 2000年以来青藏高原湖泊面积变化与气候要素的响应关系[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 573-589. (LYU L, ZHANG T B, YI G H, et al. Changes of lake areas and its response to the climatic factors in Tibetan Plateau since 2000 [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(2): 573-589. (in Chinese)) DOI: 10. 18307/2019. 0225.
- [5] 丁永建,刘时银,叶柏生,等. 近50 a中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 623-632. (DING Y J, LIU S Y, YE B S, et al. Climatic im-

- plications on variations of lakes in the cold and arid regions of China during the recent 50 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 623-632. (in Chinese))
- [6] 胡安焱. 流域气候变化和人类活动对内陆湖泊影响的分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(5): 1-5. (HU A Y. Analysis on the influence of climate change and the human activities on inland lake [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(5): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2007. 05. 001.
- [7] XIA J, QIN B, LI Y Y. Water resources vulnerability and adaptive management in the Huang, Huai and Hai River basins of China[J]. *Water International*, 2012, 37(5): 523-536. DOI: 10. 1080/02508060. 2012. 724649.
- [8] 闫露霞, 孙美平, 姚小军, 等. 青藏高原湖泊水质变化及现状评价[J]. *环境科学学报*, 2018, 39(3): 900-910. (YAN L X, SUN M P, YAO X J, et al. Lake water in the Tibet Plateau: Quality change and current status evaluation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(3): 900-910. (in Chinese)) DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2017. 0390.
- [9] 富天乙, 邹志红, 王晓静. 基于多元统计和水质标识指数的辽阳太子河水质评价研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(2): 473-480. (FU T Y, ZOU Z H, WANG X J. Water quality assessment for Taizi River watershed in Liaoyang section based on multivariate statistical analysis and water quality identification index [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2): 473-480. (in Chinese)) DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2014. 02. 032.
- [10] 李名升, 张建辉, 梁念, 等. 常用水环境质量评价方法分析与比较[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(5): 617-624. (LI M S, ZHANG J H, LIANG N, et al. Comparisons of some common methods for water environmental quality assessment [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(5): 617-624. (in Chinese))
- [11] 郭晶, 王丑明, 黄代中, 等. 洞庭湖水污染特征及水质评价[J]. *环境化学*, 2019, 38(1): 152-160. (GUO J, WANG C M, HUANG D Z, et al. Pollution characterization and water quality assessment of Dongting Lake [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(1): 152-160. (in Chinese)) DOI: 10. 7524/j. issn. 0254-6108. 2018013104.
- [12] 刘琰, 郑丙辉, 付青, 等. 水污染指数法在河流水质评价中的应用研究[J]. *中国环境监测*, 2013, 29(3): 49-55. (LIU Y, ZHENG B H, FU Q, et al. Application of water pollution index in water quality assessment of rivers [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(3): 49-55. (in Chinese)) DOI: 10. 19316/j. issn. 1002-6002. 2013. 03. 010.
- [13] 林涛, 徐盼盼, 钱会, 等. 黄河宁夏段水质评价及其污染源分析[J]. *环境化学*, 2017, 36(6): 1388-1396. (LIN T, XU P P, QIAN H, et al. Assessment of water quality and analysis of pollution source in Ningxia section of the Yellow River [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(6): 1388-1396. (in Chinese)) DOI: 10. 7524/j. issn. 0254-6108. 2017. 06. 2016121801.
- [14] 章新, 贺石磊, 张雍照, 等. 水质评价的灰色关联分析方法研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(5): 117-119. (ZHANG X, HE S L, ZHANG Y Z, et al. Study on grey relational analysis method for water quality assessment [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2010, 21(5): 117-119. (in Chinese))
- [15] HOSEINI-MOGHARI S M, EBRAHIMI K, AZARNIVAND A. Groundwater quality assessment with respect to fuzzy water quality index (FWQI): An application of expert systems in environmental monitoring [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(10): 7229-7238. DOI: 10. 1007/s12665-015-4703-1.
- [16] 刘征, 刘洋. 水污染指数评价方法与应用分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2005, 3(4): 35-37. (LIU Z, LIU Y. Methods and analysis of water pollution index assessment [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2005, 3(4): 35-37. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2005. 04. 012.
- [17] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(4): 482-488. (XU Z X. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2005, 33(4): 482-488. (in Chinese))
- [18] TIAN Y L, JIANG Y, LIU Q, et al. Using a water quality index to assess the water quality of the upper and middle streams of the Luanhe River, northern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019(667): 142-151. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2019. 02. 356.
- [19] 赵永晶, 李鸿, 王腾, 等. 新疆乌伦古湖大型底栖无脊椎动物的群落结构[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(6): 974-981. (ZHAO Y J, LI H, WANG T, et al. Community structure of benthic macroinvertebrates in Lake Ulungur in Xinjiang [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(6): 974-981. (in Chinese))
- [20] 吴敬禄, 马龙, 曾海鳌. 乌伦古湖水量与水质变化特征及其环境效应[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(5): 844-853. (WU J L, MA L, ZENG H A. Water quantity and quality change of Ulungur Lake and its environmental effects [J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(5): 844-853. (in Chinese))
- [21] 孟古别克·俄布拉依汗, 贾尔恒·阿哈提, 程艳, 等. 乌伦古河断流的生态影响及成因分析[J]. *新疆环境保护*, 2016, 38(2): 5-11. (MENGUBIEKE E, JIAERHENG H, CHENG Y, et al. Influence of the Ulungur River blanking

- on the ecology and cause analysis[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2016, 38(2): 5-11. (in Chinese))
- [22] 付强,戴长雷,王斌,等. 水资源系统分析[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012: 187-196. (FU Q, DAI C L, WANG B, et al. Water resources system analysis [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012: 187-196. (in Chinese))
- [23] 吴易雯,李莹杰,张列宇,等. 基于主客观赋权模糊综合评价法的湖泊水生态系统健康评价[J]. 湖泊科学, 2017, 29(5): 1091-1102. (WU Y W, LI Y J, ZHANG L Y, et al. Assessment of lakes ecosystem health based on objective and subjective weighting combined with fuzzy comprehensive evaluation [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(5): 1091-1102. (in Chinese)) DOI: 10. 18307/2017. 0507.
- [24] 高明美,孙涛,张坤. 基于超标倍数赋权法的济南市大气质量模糊动态评价[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 150-154. (GAO M M, SUN T, ZHANG K. Dynamic fuzzy comprehensive evaluation on the atmosphere environmental quality of Jinan city based on the multiple super-scale weighting method [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(9): 150-154. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2014. 09. 021.
- [25] 刚什婷,贾涛,邓英尔,等. 基于熵权法的集对分析模型在蛤蟆通流域地下水水质评价中的应用[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(9): 23-27. (GANG S T, JIA T, DENG Y E, et al. Assessment of groundwater quality in Hamotong Drainage basin by using model of set pair analysis based on entropy weight method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(9): 23-27. (in Chinese)) DOI: 10. 11988/ckyyb. 20170156.
- [26] 努尔兰·哈再孜,沈永平,马哈提·穆拉提别克. 气候变化对阿尔泰山乌伦古河流域径流过程的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 699-705. (NUERLAN H, SHEN Y P, MAHAT M. Impacts of climate change on hydrological processes in the Ulungur River watershed, Altay Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 699-705. (in Chinese)) DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2014. 0084.
- [27] 黄智华,周怀东,薛滨,等. 人类活动对乌伦古湖环境演化的影响[J]. 人民黄河, 2011, 33(5): 60-62. (HUANG Z H, ZHOU H D, XUE B, et al. The influence of human activities on the environmental evolution of Ulungur Lake [J]. Yellow River, 2011, 33(5): 60-62. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2011. 05. 026.
- .....
- (上接第 41 页)
- [21] 北京市水务局. 北京市“十三五”时期水资源保护利用规划 [S]. 2016. (Beijing Water Authority. Water resources protection and utilization plan for the 13th five-year plan period of Beijing [S]. 2016. (in Chinese))
- [22] 徐鹤. 南水北调工程受水区多水源水价研究 [D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013. (XU H. Study on water price of multi-water resources in the reception basin of the South-to-North Water Transfer Project; In Beijing as a case [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013. (in Chinese))
- [23] 陈兴茹,刘树坤. 论经济合理的生态用水量及其计算模型(II)——应用[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(6): 1-5. (CHEN X R, LIU S K. Rational volume of ecological water consumption and its calculation model II: Application [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(6): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2006. 06. 001.
- [24] 倪红珍. 基于绿色核算的水资源价值与价格研究 [D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2004. (NI H Z. A study on water resources value and price of environment and economy coordinating development [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004. (in Chinese))
- [25] 北京市水务局. 关于本市水价有关问题的通知 [EB/OL]. <http://www.bjwater.gov.cn/bjwater/300795/300797/749090/index.html>, 2018-01-22/2019-03-12. (Beijing Water Authority. Notice on the water price in Beijing [EB/OL]. (in Chinese))
- [26] 北京市水务局. 关于调整北京市再生水价格的通知 [EB/OL]. <http://www.bjwater.gov.cn/bjwater/300817/300819/320852/index.html>, 2018-01-01/2019-03-12. (Beijing Water Authority. Notice on the adjustment of the price of renewable water in Beijing [EB/OL]. (in Chinese))
- [27] 城市供水统计年鉴 [M]. 北京:中国城镇供水协会, 2017. (Statistical yearbook of urban water supply [M]. Beijing: China Urban Water Supply Association, 2015. (in Chinese))
- [28] 裴永刚,田海涛. 北京市农业水价综合改革分析 [J]. 北京水务, 2018(4): 29-32. (PEI Y G, TIAN H T. Comprehensive reform analysis of agricultural water price in Beijing [J]. Beijing Water, 2018(4): 29-32. (in Chinese))