

## 冰封对乌梁素海水水质污染特征的影响

张岩<sup>1</sup>, 王楠<sup>1</sup>, 赵同国<sup>1</sup>, 李卫平<sup>2</sup>, 田业蓬<sup>3</sup>, 原凌飞<sup>4</sup>

(1.烟台大学 土木工程学院, 山东 烟台 264005; 2.内蒙古科技大学 能源与环境学院,

内蒙古 包头 014010; 3.烟台大学 特里尔可持续发展技术学院, 山东 烟台 264005;

4.烟台市套子湾污水处理有限公司, 山东 烟台 264013)

**摘要:**【目的】明确乌梁素海冰封期的水质污染特征, 揭示冰封对湖泊水质等级的影响。【方法】于2021年1月在乌梁素海布设10个采样点, 采集冰层及冰下水样品。参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)和乌梁素海的污染特征, 选取COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP、TN、氟化物和铜6项水质指标作为目标污染物, 采用单因子水质标识指数法、综合水质标识指数法和主成分分析法对乌梁素海冰封期与非冰封期的水质进行综合评价。【结果】各目标污染物的单因子水质标识指数为: 冰封期冰下水≥非冰封期≥冰封期冰融水; 6项目标污染物的污染程度依次为: TN>TP>COD<sub>Mn</sub>>NH<sub>3</sub>-N>铜>氟化物, 其中COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TN质量浓度都发生了水质等级的变化; 各采样点在冰封期的综合水质标识指数结果全部劣于非冰封期, 其中采样点II2由II类恶化为III类, 其余采样点水质等级虽未发生变化, 但其质量浓度距离相应的水质等级下限值更加接近; 乌梁素海的整体水质受NH<sub>3</sub>-N、TN和TP水质因子的影响较大, 较高的氮、磷值将为乌梁素海水体富营养化带来潜在风险; 各采样点的水质优劣顺序在空间上呈出湖区>湖中区>进湖区的变化。【结论】冬季结冰过程中, 冰对目标污染物具有排斥效应, 污染物由冰体向冰下水迁移致使冰下水中污染物质量浓度增大, 加剧了乌梁素海的水质恶化, 这为冰封期湖泊水环境管理带来严峻考验。

**关键词:** 乌梁素海; 结冰效应; 冰封期; 主成分分析法; 水质标识指数

中图分类号: X524

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022384

OSID:



张岩, 王楠, 赵同国, 等. 冰封对乌梁素海水水质污染特征的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 120-127.

ZHANG Yan, WANG Nan, ZHAO Tongguo, et al. Change in Water Quality of Ulansuhai Lake after Its Surface Freezing[J].

Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(3): 120-127.

### 0 引言

【研究意义】湖泊是地球上淡水资源的重要组成部分, 是维护水域生态系统健康发展的重要保障。在高纬度、高海拔地区, 有5000万个以上湖泊存在冰封期<sup>[1]</sup>, 形成的冰层阻挡了冰下水体与外界的物质和能量交换<sup>[2]</sup>, 降低了各种生化反应速率<sup>[3]</sup>, 使冰下水体自净能力大大减弱<sup>[4-5]</sup>。由于结冰过程中冰层的排斥作用, 污染物向冰下水迁移, 在冰下水中甚至是沉积物中聚集, 使冰下水环境受到严重破坏, 湖泊冰封期水污染严重<sup>[6-7]</sup>。在春季冰层融化过程中, 冰体内的少量污染物会在早期集中释放到冰下水中, 也会对冰下水环境再次产生影响<sup>[8]</sup>。

【研究进展】近年来, 针对冰封期湖泊国内外学者开展了越来越多的研究, 这些研究大多集中在污染物、营养盐和浮游动植物的分布及污染特征以及结冰

对湖泊冰下水污染影响。孙悦等<sup>[9]</sup>研究了白洋淀冬季冰封期的水污染特征, 结果表明TN、TP是白洋淀冬季冰封期冰下水水质的限制因子; 王司阳等<sup>[10]</sup>以乌梁素海、奈伦湖为研究对象, 对黄河流域上游干旱地区冰封期湖泊营养状态特征进行了分析, 发现冰盖的形成使湖泊富营养化程度加剧; 刘晓旭等<sup>[11]</sup>以内蒙古达里诺尔湖为研究对象, 对不同相态下湖水中的营养盐浓度分布特征和定量关系进行了研究, 结果表明冬季结冰过程中达里湖水体中的氮和磷存在浓缩效应, 导致冰封期湖内营养盐浓度超过国家V类水质标准; 李佳等<sup>[12]</sup>分析了乌梁素海冰封期浮游藻类群落结构以及与营养物质之间的关系, 揭示了营养物质在冰-水介质的分布规律, 并对冰封期的水质进行了评价; 卢兴顺等<sup>[13]</sup>分析了乌梁素海冰封期污染物的分布迁移, 揭示了乌梁素海冰封期营养物质分布规律, 为湖泊富营养化治理等研究提供理论依据。孙驰<sup>[14]</sup>基于第一性原理分析了冰的物理特点对营养元素分布的影响, 揭示了重金属在冰-水中的分布特征。【切入点】目前对非冰封和冰封条件下的湖泊水质污染特征对比以及结冰效应对水质等级变化的影响却鲜有报道。【拟

收稿日期: 2022-07-13

基金项目: 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2014HZ021); 国家自然科学基金项目(51609207); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2019MS05006)

作者简介: 张岩(1984-), 男, 教授, 主要研究方向为水资源利用与保护。E-mail: zhangyan-992@163.com

解决的关键问题】本研究将乌梁素海进行网格化处理，设置 10 个代表性采样点，参照《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002），结合了乌梁素海的环境条件，选取较为典型的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TN、氟化物和铜 6 项水质指标，运用单因子水质标识指数、综合水质标识指数以及主成分分析对该水体非冰封期和冰封期的水质进行分析，旨在从不同角度明确冰封对乌梁素海水质等级和水污染特征的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

乌梁素海(40°36′—41°03′N, 108°43′—108°57′E)位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内，河套

灌区最东部，是黄河流域内典型的寒旱区湖泊湿地，水域面积为 293  $\text{km}^2$ ，湖区水深在 0.5~1.5 m 之间，最大水深 4 m，流域基本概况如图 1 所示<sup>[15]</sup>。乌梁素海是河套灌区工农业退水的主要承泄渠道<sup>[16]</sup>，随着工农业迅速发展，大量污染物如氮、磷经由各排干进入乌梁素海，对乌梁素海水质的影响严重，某些污染物的质量浓度远超出了《地表水环境质量标准》中的限定值，甚至恶化到 V 类水标准，对湖泊的生态环境造成严重破坏<sup>[17]</sup>。湖泊于每年 11 月中下旬开始结冰，冰封期长达 5 个月，冰层厚度为 0.3~0.6 m，约占水体的 1/3<sup>[18]</sup>。冰盖形成后整个冰下水生态系统处于“静止”状态<sup>[2]</sup>，大大削弱了湖泊水体的自净能力<sup>[4]</sup>。

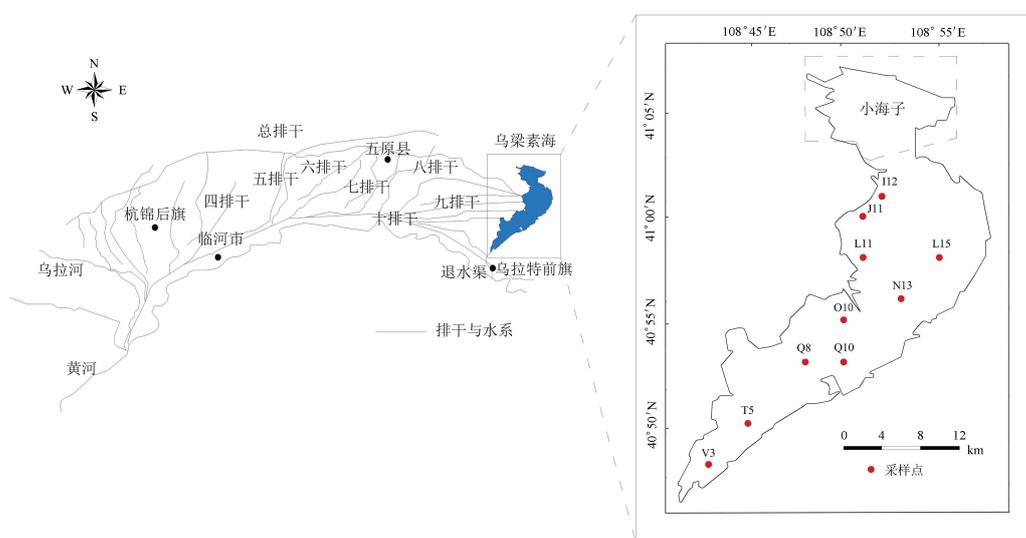


图 1 乌梁素海流域概况和采样点布设<sup>[15,18]</sup>

Fig.1 General situation of Ulansuhai Lake watershed and distribution of sampling points

### 1.2 样品采集和数据处理

根据河套灌区各排干与乌梁素海的相对位置，依据 2 km×2 km 的梅花型方式，将研究区域网格化处理，布设了 10 个采样点（图 1），包括进水区：J11、J12、西大滩 L11、北部明水区域 L15，湖中区：大卜洞 O10、芦苇区域 N13、旅游区 Q10、Q8，出水区：海壕 V3、二点 T5，于 2021 年 1 月进行冰层和冰下水的采集：用冰钻采集冰芯样品，将其放置在切割板上，用冰锯切分为 3 段冰柱，并将其分别放在塑料瓶中，在室温下自然融化；用“注射器”式采水器通过冰孔抽取各采样点的冰下水样。参照《水和废水监测分析方法》<sup>[20]</sup>，对采集的冰样以及冰下水样进行检测，用以表征乌梁素海的水质特征。

为避免研究过程中外源污染物以及降水等原因对各项水质指标的影响，根据物质守恒原理，非冰封期各指标质量浓度  $C_1$  计算式为（不考虑冰和水的密度差异）：

$$C_1 = \frac{C_{\text{ice}} \times V_{\text{ice}} + C_{\text{water}} \times V_{\text{water}}}{V_{\text{ice}} + V_{\text{water}}}, \quad (1)$$

式中： $C_{\text{ice}}$  为冰层中各项指标的质量浓度（mg/L）； $V_{\text{ice}}$  为冰层的体积（ $\text{m}^3$ ）； $C_{\text{water}}$  为冰下水体中各项指标的质量浓度（mg/L）； $V_{\text{water}}$  为冰下水的体积（ $\text{m}^3$ ）； $C_1$  为计算所得的非冰封期各项水质指标的质量浓度（mg/L）。

分配系数  $K$  用以表征污染物在结冰过程中由冰层向冰下水层迁移的能力，计算式为：

$$K = \frac{C_{\text{ice}}}{C_{\text{water}}}. \quad (2)$$

### 1.3 水质评价方法

选用单因子水质标识指数、综合水质标识指数和主成分分析对乌梁素海冰封期和非冰封期水质进行评价。通过单因子水质标识指数判断乌梁素海各采样点的水质指标是否达到《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）中的水域功能分类，将检测数据在同一类水质类别里进行定量比较，得出纵向空间水

质变化趋势；运用主成分分析能够将高维度数据化为低维度数据，以减少冗余信息所造成的误差，同时筛选出能囊括绝大部分信息的水质指标，对乌梁素海的综合水质进行分析，并对各个采样点的水质进行排序，定性、定量的描述乌梁素海不同时期的综合水质；通过综合水质标识指数对单因子水质标识指数的结果进行进一步分析，结合《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）评价湖泊的综合水质类别，将冰封期与非冰封期的水质等级进行对比，分析冰封对湖泊水质等级的影响。

### 1.3.1 单因子水质标识指数

单因子水质指数  $P_i$ <sup>[21]</sup>由 1 位整数、小数点后 2 位或 3 位有效数字组成，计算式为：

$$P_i = X_1 \cdot X_2 X_3, \quad (3)$$

式中： $X_1$  代表水质指标的水质类别； $X_2$  代表水质数据在  $X_1$  类水质变化区间中所处的位置，根据公式按四舍五入的原则计算确定； $X_3$  代表水质类别与功能区划设定类别的比较结果，视评价指标的污染程度， $X_3$  为 1 位或 2 位有效数字。

### 1.3.2 主成分分析法

通过主成分分析法将乌梁素海复杂的试验数据进行降维处理，分析各项污染物所携带的信息，筛选出比原始污染物数目少，但能影响总体水质的代表性污染物<sup>[9]</sup>，再进行成分得分系数矩阵等相关方程和公式的计算，得到 10 个采样点的主成分分析的综合得分，定量描述各采样点的污染程度，并对各个采样点的水质优劣进行排序，从空间上确定湖泊不同区域的污染程度。

### 1.3.3 综合水质标识指数

综合水质标识指数  $I_{wq}$ <sup>[22]</sup>由整数位和 3 位或 4 位小数组成，其计算式为：

$$I_{wq} = X_1 \cdot X_2 X_3 X_4, \quad (4)$$

式中： $X_1$ 、 $X_2$  由计算获得， $X_3$  和  $X_4$  根据比较结果得到。其中， $X_1$  为综合水质类别； $X_2$  为综合水质在  $X_1$  类水质变化区间内所处位置； $X_3$  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，视综合水质的污染程度， $X_4$  为 1 位或 2 位有效数字。

## 2 结果与分析

### 2.1 乌梁素海冰封期湖泊水深与冰厚分布

为了更好地表征各污染物向冰下水的迁移程度，对 10 个采样点的水深以及冰厚进行了现场测量，结果见图 2。乌梁素海全湖的平均水深为 2.19 m，西北和南部的深水较深，位于南部的采样点 T5 最深，为

3.13 m；冰厚分布较均匀，在 0.35~0.6 m 之间，平均值为 0.49 m，湖区中部地区的冰厚值多大于平均值。

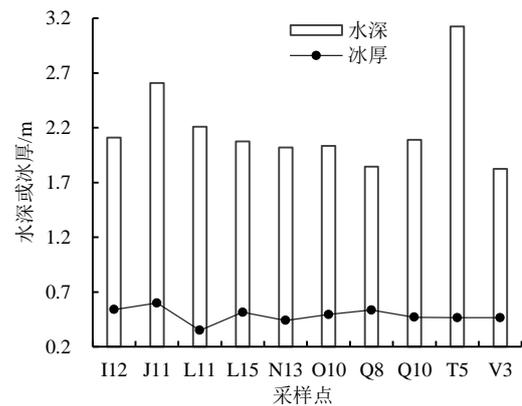


图 2 乌梁素海各采样点冰厚和水深变化

Fig.2 Variation of ice thickness and water depth at each sampling site in the Ulansuhai Lake

### 2.2 乌梁素海冰封期各项水质因子特征

由图 3 可知，6 项目标污染物在非冰封期湖水、冰融水和冰下水的含量呈“凹”字形分布，具体表现为：冰下水 > 非冰封期湖水 > 冰融水，其中  $COD_{Mn}$  和 TP 在各采样点质量浓度分布较均匀，但迁移系数  $K$  在采样点 L11 较大，分别为 0.52 和 1.04，表明该采样点的  $COD_{Mn}$  和 TP 向冰下水迁移能力较弱，更容易被冰晶捕获在冰体中，导致冰融水中  $COD_{Mn}$ 、TP 质量浓度较大。J11 采样点的  $NH_3-N$  和 TN 质量浓度远大于其他采样点，迁移系数  $K$  却远小于其他采样点，分别为 0.03 和 0.02，表明  $NH_3-N$  和 TN 的迁移能力较强，加重了冰下水的氮源污染，春季冰融期易引起水体富营养化。采样点 L11 的 TN 迁移系数  $K$  较高，为 0.23，污染物向冰下水迁移的量较少，导致冰融水中的 TN 质量浓度明显大于其他采样点。氯化物的质量浓度在整个湖区分布较均匀，但其迁移系数在 J11 采样点明显大于其他采样点，为 0.30，迁移能力较弱，所以 J11 采样点的氯化物冰中质量浓度稍高。采样点 I12 的铜质量浓度明显低于其他点，但迁移系数  $K$  却是最大，为 0.06，其他均在 0.02 以下，说明 I12 采样点低质量浓度的铜迁移能力较弱，可能是由于采样点 I12 的铜质量浓度较低，进入冰封期后向冰下水的迁移量相对较少，导致迁移系数较大。

### 2.3 乌梁素海冰封期单因子水质标识指数评价

依据《地表水质量标准》（GB 3838—2002）中地表水水域的水环境功能与保护目标的功能区对象划分，乌梁素海的水域功能分类为Ⅲ类，本研究以地表Ⅲ类水为限值，对乌梁素海非冰封期和冰封期冰下水和冰中的 6 项指标进行单因子水质标识指数计算，结果如图 4 所示。

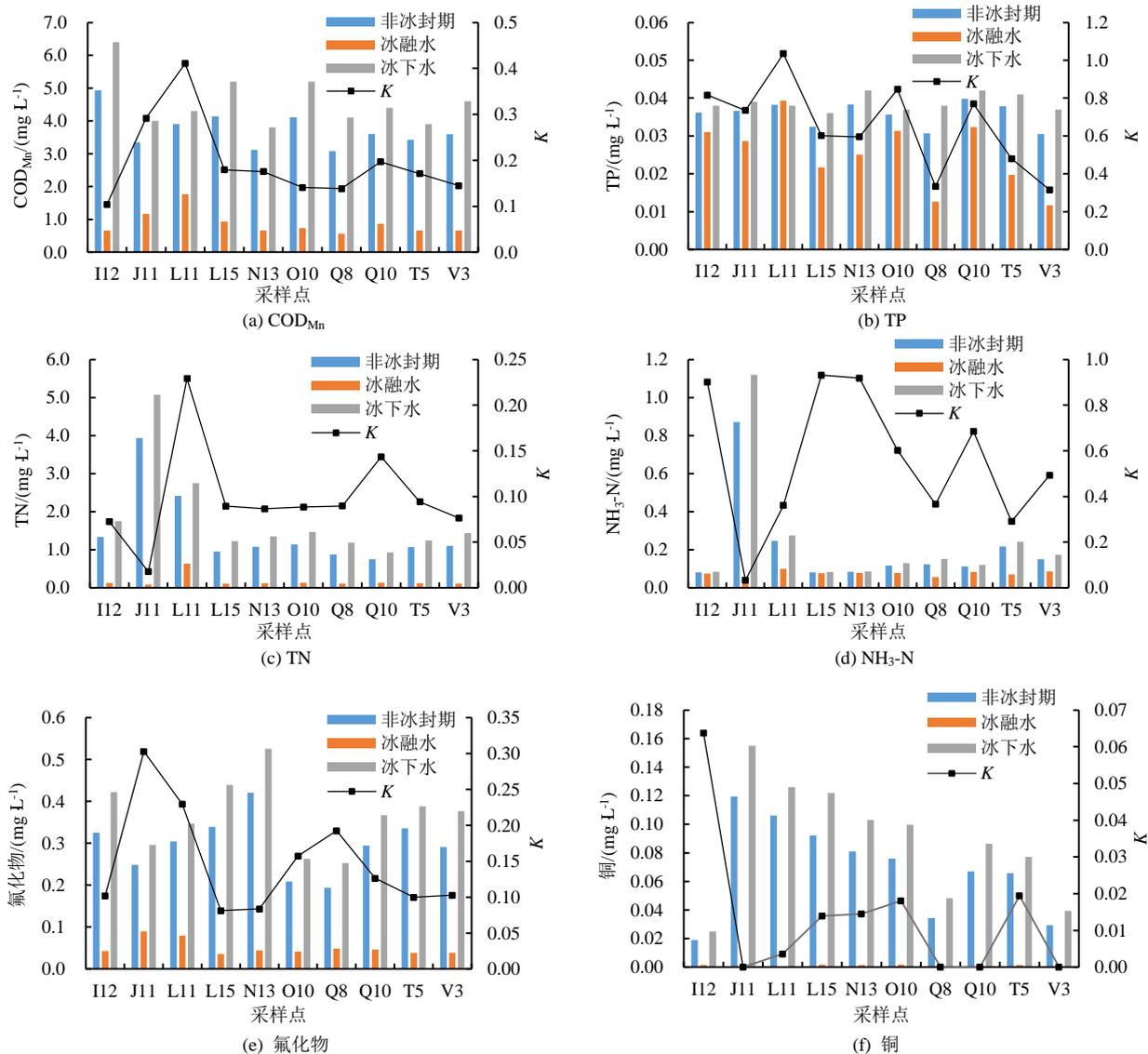
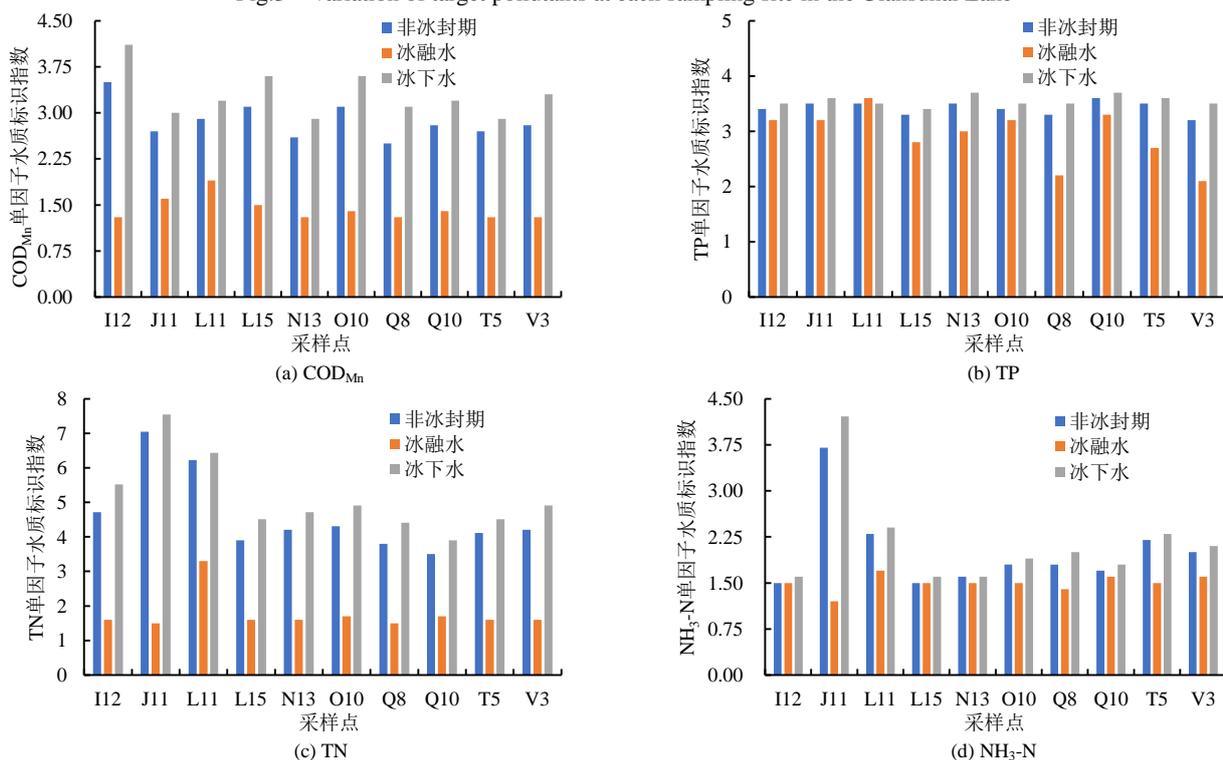


图3 乌梁素海各采样点目标污染物质量浓度

Fig.3 Variation of target pollutants at each sampling site in the Ulansuhai Lake



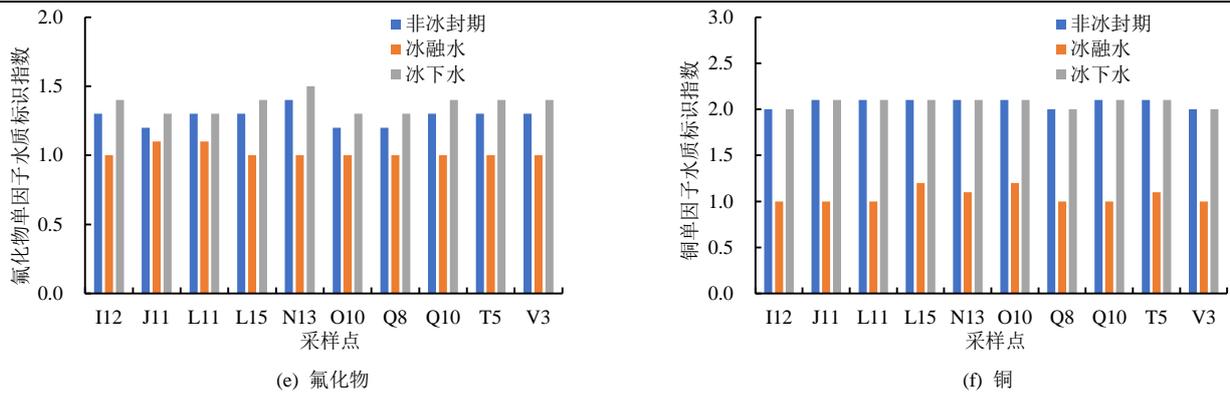


图4 乌梁素海各采样点目标污染物的单因子水质标识指数

Fig.4 Single factor water quality identification index of target pollutants at each sampling site in the Ulansuhai Lake

6项水质指标的单因子水质标识指数结果表现为：冰下水 $\geq$ 非冰封期湖水 $\geq$ 冰融水。各采样点冰融水中污染物的质量浓度未超过III类水标准，但冰封期冰下水和非冰封期结果明显大于冰融水，其中TN和TP污染最为严重，所有采样点均超出了地表III类水标准，其次为 $COD_{Mn}$ 和 $NH_3-N$ ，污染较轻的是铜和氟化物。湖泊从非冰封期进入冰封期后，有6个采样点的 $COD_{Mn}$ 下降了1个水质等级，其中采样点J11、L11、Q8、Q10和V3由II类水降低到III类水，I12采样点由III类水下降至IV类水；采样点J11和采样点Q8的 $NH_3-N$ 下降了1个水质等级，其中采样点J11从III类水恶化到IV类水，其余采样点 $NH_3-N$ 质量浓度变化未达到等级变化程度；采样点I12、L15和Q8的TN质量浓度恶化了1个水质等级，其中采样点I12恶化为V类水，其余2个采样点为IV类水，其余采样点虽未发生水质等级的变化，但TN质量浓度距离相应水质等级区间的下限值接近了21%~70%，甚至采样点J11和采样点L11的TN单因子水质标识指数为7.54和6.43，已经为劣V类水。所有采样点的TP虽未发生水质等级的下降，但都超出了III类水标准。氟化物非冰封期和冰封期冰下水的单因子水质标识指数结果在1.20~1.50之间，整体变化幅度不大。铜的非冰封期和冰封期冰下水的结果完全重合，这是因为乌梁素海水体中的铜质量浓度较低，虽然冰封期会受到冰盖的排斥作用而向冰下水迁移，但其质量浓度远远达不到水质等级单因子水质标识指数的变化幅度。

#### 2.4 乌梁素海冰封期综合水质标识指数评价

为对冰封期湖泊的横向空间的污染特征进行比较，采用综合水质标识指数能够进一步明确冰封对各采样点水质变化的影响。由图5可知，湖泊冰封期综合水质标识指数明显大于非冰封期的。采样点I12综合水质下降了1个等级，由II类水下降为III类水。其余采样点水质等级虽未发生变化，但这些采样点各项指标的质量浓度距离相应的水质等级下限值接近

10%~31%；差值最大的是采样点L15、Q8，表明进入冰封期后，污染最为严重；差值最小的是采样点L11、T5，表明污染较轻。冰封期各个采样点参与评价的水质指标未达到水环境功能区目标的数量相较于非冰封期增加了5个。

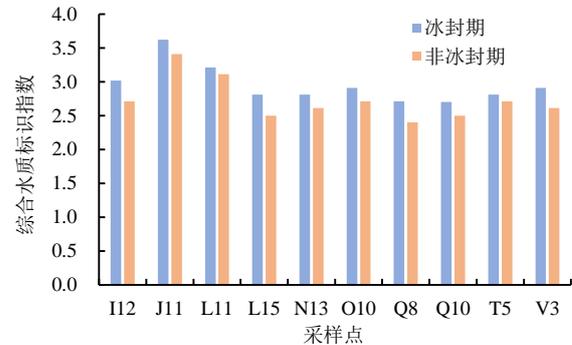


图5 乌梁素海各采样点综合水质标识指数

Fig.5 The comprehensive water quality identification index at each sampling site in the Ulansuhai Lake

#### 2.5 乌梁素海冰封期污染主成分分析

为了进一步确定冰封期湖泊水质的重要影响因素，采用主成分分析对冰封期湖泊空间上水质优劣进行排序。由表1的因子荷载矩阵可知，3个主成分的累计贡献率达到86.703%，表明这3个主成分可反映数据的大部分信息。贡献率最大的是第1个主成分为45.296%，最小的是第3个主成分为13.931%。与第1主成分关系密切的相关指标有 $NH_3-N$ 和TN；与第2主成分关系密切的指标有TP。由此可知，影响乌梁素海冰封期综合水质的主要因子为 $NH_3-N$ 、TN和TP。由表2主成分分析的因子荷载矩阵可知，3个主成分的累计贡献率达到84.376%，表明这3个主成分可反映数据的大部分信息。3个主成分中贡献率最大为44.244%，最小是24.028%。与第1主成分关系密切的相关指标有 $NH_3-N$ 和TN，因子负载为0.921和0.917；与第2主成分关系密切的指标有氟化物；与第3主成分关系密切的指标有 $COD_{Mn}$ 。因此，影响乌梁素海非冰封期综合水质的主要因子为 $NH_3-N$ 、

TN、氟化物。

表 1 冰封期主成分分析因子荷载矩阵

Table 1 Results of principal component analysis during ice-covered period

指标	成分		
	1	2	3
COD <sub>Mn</sub>	-0.513	-0.655	0.422
NH <sub>3</sub> -N	0.943	-0.112	0.046
TP	0.087	0.898	-0.127
TN	0.903	-0.227	0.225
氟化物	-0.384	0.571	0.697
铜	0.771	0.151	0.322
方差百分比/%	45.296	27.476	13.931
累计贡献率/%	45.296	72.772	86.703

表 2 非冰封期主成分分析因子荷载矩阵

Table 2 Results of principal component analysis during non-ice covered period

指标	成分		
	1	2	3
COD <sub>Mn</sub>	-0.316	0.138	0.933
NH <sub>3</sub> -N	0.921	-0.263	0.062
TP	0.428	0.723	0.076
TN	0.917	-0.156	0.256
氟化物	-0.118	0.857	-0.131
铜	0.817	0.27	-0.056
方差百分比/%	44.244	24.028	16.105
累计贡献率/%	44.244	68.271	84.376

通过因子荷载矩阵的分析可以反映出乌梁素海水质的主要影响因子是 NH<sub>3</sub>-N、TN 和 TP。根据成分得分系数矩阵等相关方程和计算式得出 10 个采样点的主成分分析的综合得分(图 6), 综合得分越高, 水质越差。各采样点水质优劣顺序为: J11<L11<N13<T5<Q10<L15<O10<I12<V3<Q8, 即进水区<湖中区<出水区, 表明流入湖泊的农业退水和工业废水等外源污染物是影响乌梁素海水质的重要原因。

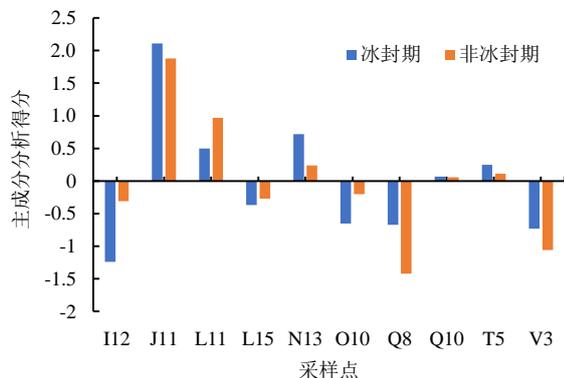


图 6 乌梁素海主成分分析综合得分

Fig.6 Principal component analysis composite score in the Ulansuhai Lake

### 3 讨论

#### 3.1 结冰过程中污染物的迁移机理

由乌梁素海冰封期和非冰封期的单因子水质标

识指数、综合水质标识指数和主成分分析评价的评价结果可知, 结冰过程中 COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP、TN、氟化物和铜 6 项水质指标均呈现出由冰体向冰下水体迁移的规律, 这可从湖冰的形成过程进行解释: 当冬季湖泊表面温度下降到 0 °C 时, 表层水达到过冷状态后水分子开始有冰核产生并形成细小、平整且不含杂质的冰晶, 这些冰晶相互连接便可形成柔性冰, 柔性冰经冻结变厚, 形成坚硬冰盖, 成核形成冰晶, 并逐渐形成冰水界面<sup>[23]</sup>, 此时空气中的冷量能只能通过湖泊表面向下传递, 由于氮、磷等污染物的凝固点较低, 冷能仅能够在冰-水界面处的水分子达到凝固点而平稳析出, 乌梁素海冰封期 6 种污染物由冰体向冰下水迁移, 水分子形成冰晶的过程中会将液态的污染物排斥到冰水界面附近; 同时湖泊结冰过程中也会产生热通量, 进而产生溶质通量, 溶质通量会比冰更快的脱离结冰区域, 即污染物质会比冰晶更快的脱离结冰区, 进而进入到冰水界面。溶质通量的驱动因素为温度梯度和质量浓度梯度: 温度梯度会驱动物质从低温区域迁移到高温区域(索雷效应)<sup>[24]</sup>, 即随着结冰过程的进行, 各污染物会由冰体迁移到冰下水体, 只有少部分污染物以“污染物胞”的形式存在于冰体中(图 7); 质量浓度梯度则会驱动物质从高质量浓度迁移至低质量浓度区域(菲克扩散定律)<sup>[24]</sup>, 即污染物质会从质量浓度较高的冰水界面迁移至冰下水中, 导致原本质量浓度较为均匀的水体发生变化, 冰下水中污染物质量浓度增加。

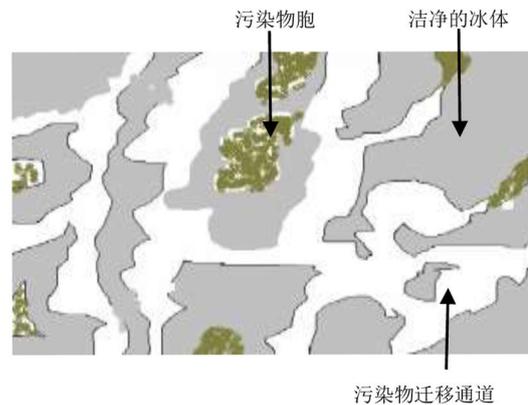


图 7 冰结构剖面示意图

Fig.7 Schematic diagram of ice structure

#### 3.2 湖泊冰封的环境效应和启示

结冰过程中污染物的迁移效应使得乌梁素海冰封期冰下水体中污染物的质量浓度增加, 冰下水环境质量的恶化会随着结冰厚度的逐渐增加而进一步加剧, 特别是 TN、NH<sub>3</sub>-N、TP 的单因子水质标识指数较高, 表明冰封对乌梁素海富营养元素的环境效应更为明显, 这与杨文焕等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。而冰下水中较高的氮、磷量将为翌年春季水体的富营养化带来

潜在风险,特别是在进水区域,随着河套灌区春灌排水的流入,富营养化的风险系数还将提高,这需要引起湖泊水管理部门的重视。同时,由于乌梁素海水深较浅,冰体所占比例较高,冰下水中污染物的浓缩系数较大,因此可从浅水湖泊冰封期污染特征的特殊性入手,探索浅水湖泊冰封期水环境治理的措施。

冰封对湖泊水质污染特征的影响也提示我们需要尤为关注水体冰封期冰下水环境质量的变化,尽管冰体的覆盖使得冰下水环境的变化更加“隐蔽”,但冰下水环境的变化绝非“静止”。特别是对于饮用水水源地而言,随着结冰过程的进行,冰下水质会逐渐变差,加之低温条件下水处理厂的化学处理工艺的速率会降低,因此如何能在水体冰封期确保出厂水达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求带来新的课题和挑战。

## 4 结论

1) 乌梁素海冰封期的综合水质标识指数结果全部劣于非冰封期,甚至出现了水质等级的下降,表明结冰过程对污染物具有浓缩效应,致使污染物被排斥到冰下水体。

2) 乌梁素海各区域的水质优劣顺序为:进水区<湖中区<出水区,表明湖区进水区的水质污染较严重,应加强对汇入湖区的农业退水和农业废水等外源污染物排放的治理。

3) 乌梁素海的水质受 $COD_{Mn}$ 、 $NH_3-N$ 、 $TN$ 、 $TP$ 水质因子的影响较大,较高的营养元素将为湖泊春季融冰期的富营养化带来潜在风险。

4) 湖泊冰封期冰下水环境质量的恶化,为冰封期湖泊的管理带来严峻的考验,也可为冰封期湖泊的治理提供新的思路,但需要进一步研究湖泊冰封期水环境治理的具体措施。

## 参考文献:

[1] VERPOORTER C, KUTSER T, SEEKELL D A, et al. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(18): 6 396-6 402.

[2] FANG X, STEFAN H G. Simulations of climate effects on water temperature, dissolved oxygen, and ice and snow covers in lakes of the contiguous US under past and future climate scenarios[J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(6): 2 359-2 370.

[3] BELZILE C, GIBSON J A E, VINCENT W F. Colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon exclusion from lake ice: Implications for irradiance transmission and carbon cycling[J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47(5): 1 283-1 293.

[4] 黄文峰, 韩红卫, 牛富俊, 等. 季节性冰封热融浅湖水温原位观测及其分层特征[J]. *水科学进展*, 2016, 27(2): 280-289.

HUANG Wenfeng, HAN Hongwei, NIU Fujun, et al. Field observations on water temperature and stratification in a seasonally ice-covered shallow thermokarst lake[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(2):

280-289.

[5] 李卫平, 滕飞, 杨文焕, 等. 乌梁素海冰封期冰-水中污染物空间分布特征及污染评价[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(2): 122-128, 144.

LI Weiping, TENG Fei, YANG Wenhuan, et al. Spatial distribution characteristics and pollution assessment of ice-water pollutants during the ice-sealing period in wuliangshuai[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(2): 122-128, 144.

[6] 姜忠峰. 乌梁素海综合需水分析及生态系统健康评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.

JIANG Zhongfeng. Analysis of ecological water requirement and ecosystem health assessment for lake wuliangshuai[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011.

[7] 周石磊, 孙悦, 岳聿丞, 等. 雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素[J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2 177-2 187.

ZHOU Shilei, SUN Yue, YUE Gecheng, et al. Spatial distribution characteristics and driving factors of aerobic denitrification bacterial community structure from Baiyangdian Lake in Xiongan new area during the winter freezing period[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2 177-2 187.

[8] XUE S, CHEN J, TIE M. Release of dissolved organic matter from melting ice[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2016, 35(5): 1 458-1 467.

[9] 孙悦, 李再兴, 张艺冉, 等. 雄安新区-白洋淀冰封期水体污染特征及水质评价[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(4): 952-963.

SUN Yue, LI Zaixing, ZHANG Yiran, et al. Water pollution characteristics and water quality evaluation during the freezing period in Lake Baiyangdian of Xiongan New Area[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(4): 952-963.

[10] 王司阳, 张笑欣, 田世民, 等. 黄河流域干旱区湖泊冰封期浮游植物群落结构特征及影响因子研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1 070-1 079.

WANG Siyang, ZHANG Xiaoxin, TIAN Shimin, et al. Study on phytoplankton community structure characteristics and its influencing factors of lakes in arid regions of the Yellow River Basin during ice-sealing period[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9): 1 070-1 079.

[11] 刘晓旭, 李畅游, 李文宝, 等. 冰封期达里诺尔湖同位素与营养盐分布特征及关系的定量分析[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(6): 1 159-1 167.

LIU Xiaoxu, LI Changyou, LI Wenbao, et al. The distribution and relationship of isotope and nutrient during freeze-up period in the Lake Dalinuer: A quantitative approach[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(6): 1 159-1 167.

[12] 李佳, 侯俊青, 赵子闻, 等. 乌梁素海冰封期浮游藻类分布特征研究及水质评价[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(9): 61-67.

LI Jia, HOU Junqing, ZHAO Ziwen, et al. Distribution characteristics of phytoplankton and water quality evaluation in the ice-sealing period of lake ulansuhai[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(9): 61-67.

[13] 卢兴顺, 丁晓宇, 赵子闻, 等. 乌梁素海冰封期污染物分布及迁移特征研究[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(6): 41-48.

LU Xingshun, DING Xiaoyu, ZHAO Ziwen, et al. Distribution and exchange of pollutants during the icebound season of ulansuhai lake[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(6): 41-48.

[14] 孙驰. 基于第一性原理的乌梁素海冰、水介质中重金属迁移特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.

SUN Chi. Transport characteristics of heavy metals based on first principle in ice and water medium in the lake ulansuhai[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.

[15] 翟佳伦, 史小红, 刘禹, 等. 乌梁素海冰封期水温与溶解氧浓度变化研究[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(3): 629-639.

ZHAI Jialun, SHI Xiaohong, LIU Yu, et al. Change law of water

- temperature and dissolved oxygen concentration of Wuliangsu Sea in icebound period[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(3): 629-639.
- [16] 卢兴顺. 植物碳源强化人工湿地处理乌梁素海农田退水效能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2022.
- LU Xingshun. Study on the efficiency of plant carbon source enhanced constructed wetlands for treating agricultural drainage water in the ulansuhai lake[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2022.
- [17] 朱鹏航. 基于 PCLake 模型的乌梁素海水质突变及阈值识别研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2022.
- ZHU Penghang. A study on water quality mutation and threshold identification in Wuliangsu lake based on PCLake model[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2022.
- [18] 全栋, 史小红, 赵胜男, 等. 2006—2017 年乌梁素海夏季水体营养状态及影响因子[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(5): 1 259-1 267.
- QUAN Dong, SHI Xiaohong, ZHAO Shengnan, et al. Eutrophication of Lake Ulansuhai in 2006—2017 and its main impact factors[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(5): 1 259-1 267.
- [19] 史小红. 乌梁素海营养元素及其存在形态的数值模拟分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- SHI Xiaohong. Modelling analysis of eutrophic elements and their speciation for Wuliangsu lake in Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2007.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [21] 徐祖信. 我国河流单因子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(3): 321-325.
- XU Zuxin. Single factor water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. *Journal of Tongji University*, 2005, 33(3): 321-325.
- [22] 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 Zuxin. Comprehensive water quality identification index for Environmental Quality assessment of surface water[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2005, 33(4): 482-488.
- [23] YU Tao, MA Jun, ZHANG Liqiu. Factors affecting ice crystal purity during freeze concentration process for urine treatment[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 14(5): 593-597.
- [24] ABDELMOATY H M, MAHGOUB A U, ABDELDAYEM A W. Performance analysis of salt reduction levels in indirect freeze desalination system with and without magnetic field exposure[J]. *Desalination*, 2021, 508: 115-121.
- [25] 杨文焕, 杜璇, 姚植, 等. 基于 VAR 模型的乌梁素海富营养化影响因素评价[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(2): 25-32.
- YANG Wenhuan, DU Xuan, YAO Zhi, et al. Evaluation of the influencing factors of wuliangsu lake eutrophication based on VAR model[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(2): 25-32.

## Change in Water Quality of Ulansuhai Lake after Its Surface Freezing

ZHANG Yan<sup>1</sup>, WANG Nan<sup>1</sup>, ZHAO Tongguo<sup>1</sup>, LI Weiping<sup>2</sup>, TIAN Yepeng<sup>3</sup>, YUAN Lingfei<sup>4</sup>

(1. Civil Engineering College, Yantai University, Yantai 264005, China; 2. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 3. Trier Institute of Technology for Sustainable Development, Yantai University, Yantai 264005, China; 4. Yantai Taoziwan Wastewater Treatment Co, Yantai 264013, China)

**Abstract:** 【Objective】 Chemical quality of surface water bodies is affected by many factors but most of them are driven by oxygen. Bioavailable oxygen in water decreases after the surface is frozen, and this paper investigates how this impacts water quality in Ulansuhai lake in Inner Mongolia. 【Method】 Ice and water samples were taken in January 2021 from 10 sites in the lake. Contents of COD<sub>Mn</sub>, nitrate, total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), fluoride and copper in each sample were analyzed. They were compared to those measured before the lake was frozen. Change in these chemicals due to freezing was assessed using the single-factor and the comprehensive water quality identification index, as well as the principal component analysis. 【Result】 ① Single factor water quality identification index analysis indicated that the content of all chemicals in fluid water was ranked in the order of water underneath ice  $\geq$  water before freezing  $\geq$  melted ice. The pollution degree of the six chemicals was ranked in the order of TN > TP > COD<sub>Mn</sub> > NH<sub>3</sub>-N > copper > fluoride. The chemicals that resulted in water quality classification change were COD<sub>Mn</sub>, NH<sub>3</sub>-N and TN. ② Comprehensive water quality identification index analysis showed that freezing worsened the water quality in all 10 sampling sites, though the deterioration varied with sampling sites. Nitrate, TN and TP had the greatest influence on water quality, as increasing nitrogen and phosphorus risked eutrophication. Spatially, water quality in the lake area was ranked in the order of outlet area > middle lake area > inlet area. 【Conclusion】 Surface freezing in Ulansuhai Lake increased chemical concentrations in the water beneath the ice, leading to water quality deterioration. To ameliorate water pollution, discharge of pollutants to the lake, especially for TN and TP in autumn and winter, should be reduced.

**Key words:** Ulansuhai Lake; icing effect; water quality evaluation; principal component analysis method; water quality identification index

责任编辑: 白芳芳