

乌梁素海冰封期污染物分布及迁移特征研究

卢兴顺¹, 丁晓宇¹, 赵子闻¹, 李 佳¹, 武琳慧^{1,2}

(1. 内蒙古大学生态与环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010021;

2. 内蒙古自治区环境污染控制与废物资源化重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要:分析冰封期冰-水介质、各冰层间污染物质的分布迁移规律,揭示污染物质的水平空间分布,为后续乌梁素海冰封期水质评价、湖泊营养物质分布规律、湖泊富营养化治理等研究提供理论依据。2019年1月在乌梁素海12个采样点使用冰柱采集器和“注射器”式采水器采集冰样和水样,测定表层冰、冰-水界面冰和水样中总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、总有机碳(TOC)、盐分(Na⁺、Cl⁻)等污染物浓度,采用冰-水分配系数分析污染物在冰水体体系中的迁移特征。结果表明,水体TN、NH₃-N、TOC、Na⁺及Cl⁻浓度分别是冰体的2.03、5.09、3.76、202.87和182.23倍,冰体TP浓度是水体的1.94倍;冰体内部,TN浓度冰-水界面冰是表层冰的1.48倍,其他污染物浓度表层冰是冰-水界面冰的1~1.59倍;TN、NH₃-N、TP、TOC、Na⁺及Cl⁻冰-水分配系数分别为0.63、0.40、3.25、0.34、0.01和0.01。随着结冰过程,TN、NH₃-N、TOC由冰体向冰下水体不断迁移,而TP是冰体浓度高于冰下水体,Na⁺和Cl⁻由于冰晶的析出使绝大部分溶质在冰下水体中浓缩。

关键词:冰封期;污染物;分布;迁移;乌梁素海

中图分类号:X524,X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)06-0041-08

随着经济快速发展,大量生活污水和工业、农业废水等排入地表水体,污水中富含的氮(N)、磷(P)、有机毒物等有害物质造成地表水体生态功能破坏、水生生物锐减等现象。目前,对于地表水环境问题,全球大约75%以上封闭型水体存在富营养化(Freedman B, 2002),由于其污染范围广、治理困难等特点,已成全球关注的重大水环境污染问题之一(董志勇, 2006)。乌梁素海作为河套灌区农田退水及周边村镇的工业废水、生活污水的主要承泄体,每年有大量的N、P污水被排入湖区。尚士友等(2003)早期研究发现,每年排入的总氮为1 088.59 t,总磷为65.75 t,水中氮储备量已达其临界负荷的14倍,使乌梁素海成为以大型水生植物过量生长为主要表征的草型富营养化湖泊,水体受到严重污染;杨文焕等(2021)研究发现,2013–2019年入湖污染物有所减少,主要污染物指标可达Ⅴ类水质标准,但仍不符合自然水体水质指标,且每年仍有大量氮磷

污染物入湖,至使湖泊富营养化程度加重。为了缓解乌梁素海富营养化问题,2018年以后引黄河水进行生态补水进入常态化。王一舒等(2020)研究发现,进行生态补水后,2019年氮磷入湖通量分别为2 037.23、55.82 t,水中氮磷储量仍较高,水体水质污染仍然严重。

在我国北方地区每年11月份以后,随着环境温度下降,地表水开始结冰,形成长达5~6个月冰封期(张岩等, 2013)。冰封期形成冰盖,水体流动性减弱,当污水排入,污染物不能随水流快速扩散而富集,加剧了水体富营养化问题,而且冰盖的形成阻隔了外部水体进入、阻碍了水体复氧,消减太阳辐射量,使得光解反应及各类生物化学反应速率下降,水体自净作用削弱(张岩, 2012);同时结冰过程的冷冻浓缩作用使得各类污染物不断地由冰体迁至冰下水体,乃至迁移到沉积物中富集(Kriss et al, 2010),使得冰封期水污染问题进一步加重。

近年来,湖泊冰封期污染问题相关报道逐年增多(杨文焕等, 2018a; 姜涛, 2019; 韩知明等, 2017; 刘晓旭等, 2015; 高宁, 2018),对于乌梁素海的研究也受到人们关注。目前,关于乌梁素海富营养污染的研究集中在富营养元素的空间分布特征(李兴等, 2009)、冰体物理特性对营养物质分布特征的影响(孙驰, 2019)、藻类分布与水体营养物质的响应机制(李佳等, 2019)、植物对营养盐的吸收(宋晋栋等, 2020)及运用生态模型对乌梁素海富营养化模拟

收稿日期:2020-12-28

基金项目:国家自然科学基金(41701281, 42067037);内蒙古“一湖两海”科技重大专项(ZDZX2018054)。

作者简介:卢兴顺,1994年生,男,硕士,主要研究方向为环境微生物与资源化。E-mail:15149266589@163.com

通信作者:武琳慧,1982年生,女,博士,副教授,主要从事微生物生态学和微生物与废物资源化方面研究。E-mail:imuwu-linhui@163.com

和调控(李建茹等,2020)等方面,而对结冰过程中污染物的分布及迁移规律的研究相对较少。因此,本研究以乌梁素海为研究对象,分析冰封期冰-水介质、各冰层间污染物质的分布迁移规律,揭示污染物质的水平空间分布,为后续乌梁素海冰封期水质评价、湖泊营养物质分布规律、湖泊富营养化治理等研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域及采样点布设

乌梁素海位于内蒙古乌拉特前旗境内,是河套灌区污水的承泄体。湖泊总面积 333.48 km²,是同纬度最大的淡水湖泊。该流域多年平均气温为 6.6℃,11 月初开始结冰,形成冰盖,翌年 4 月冰盖开始融化,冰封期长达 5 个月,有明显的冻融周期,冰厚可达 70 cm。冰盖形成以后,湖泊水接近静水体,其环流作用减弱(张岩等,2013),造成污染物大量聚集。

按照我国水环境生态系统调查规范,根据乌梁素海的污染源分布、水文及环境特征(李兴等,2012),对乌梁素海布设如图 1 的 12 个采样点,同时根据水域污染状态及水动力学特征将样点划分为湖区进水区(P1、P2、P3、P4)、湖区中部(P5、P6、P7、P8)、湖区出水区(P9、P10、P11、P12)。

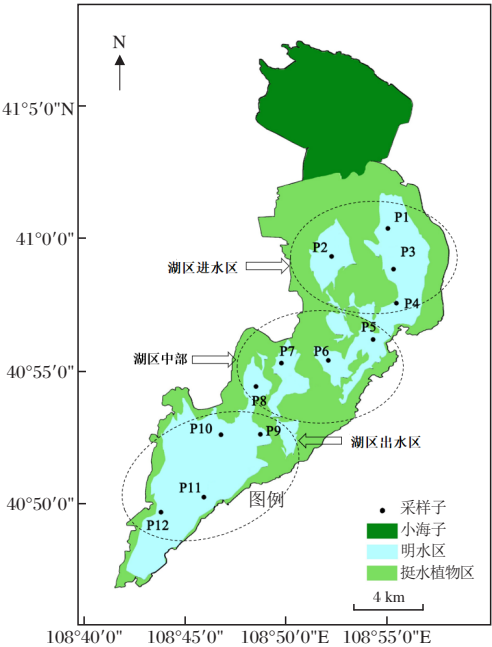


图1 乌梁素海采样点分布

Fig.1 Location of the sampling points in Ulansuhai Lake

1.2 样品采集与处理

本研究于 2019 年 1 月在乌梁素海各采样点上使

用冰柱采集器和“注射器”式采水器采集冰样和水样。为避免冰体表面附着的杂质对监测结果的影响,用冰柱采集器取出冰芯后,在冷冻环境中将其放置在切割板上,首先去除冰表面杂质,再用冰锯将收集到的冰柱根据冰厚均分为 2 层:表层冰、冰-水界面冰,分别置于水桶内,及时送回实验室,在室温条件下自然融化,然后测定融水中的总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、总有机碳(TOC)、钠离子(Na⁺)、氯离子(Cl⁻)浓度。现场监测的指标为水深、冰厚和 pH 等。采集完冰样后,用“注射器”式采水器通过冰孔取冰下 0.5 m 和底泥上 0.5 m 处水样混合,以保证测量结果可客观反映不同采样点水质。将混合水样于聚乙烯瓶中保存,并于 12 h 内于实验室分析 TN、NH₃-N、TP、TOC、Na⁺、Cl⁻ 浓度,水质指标的测定方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》,具体见表 1。其中每个指标做 3 组平行,最终结果取平均值。实验数据通过 Microsoft Excel 2019、Origin2019 软件进行分析和作图。

表 1 相关水质指标的测定方法

Tab.1 Methods for determining water quality indices

水质指标 Water quality indexes	测定方法 Determination methods
总氮(TN)	碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法
氨氮(NH ₃ -N)	纳氏试剂分光光度法
总磷(TP)	过硫酸钾消解—钼酸铵分光光度法
总有机碳(TOC)	燃烧氧化—非分散红外吸收法
钠离子(Na ⁺)、氯离子(Cl ⁻)	离子色谱仪

1.3 污染物迁移特征分析

采用冰-水分配系数分析污染物在冰水体系中的迁移特征。

冰-水分配系数指溶质在冰水两相中浓度的比值,它可反映冰水两相中溶质的浓度关系,也可以表征结冰过程中不同物质由冰体向水体的排出效应。定义分配系数为(吕宏洲等,2015):

$$K=C_s/C_L$$
 ①

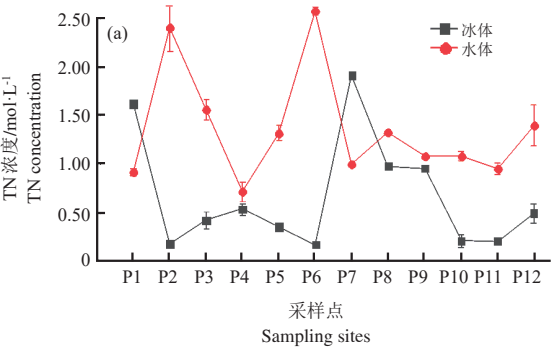
式中, K 为冰-水分配系数, C_s 为冰中溶质浓度 (mol/L)(由于本研究将冰分为表层冰和冰-水界面冰, C_s 用二者平均浓度表示), C_L 为冰下水中溶质浓度 (mol/L)。

2 结果与分析

2.1 污染物浓度分布

2.1.1 TN 冰体和水体中 TN 浓度分布如图 2(a)。冰体 TN 浓度 0.17~1.91 mol/L, 平均 0.67 mol/L; 水体 TN 浓度 0.71~2.57 mol/L, 平均 1.36 mol/L。水体 TN 浓度是冰体的 2.03 倍, 且具有显著性差异 ($P<0.05$)。

不同冰层中TN浓度分布见图2(b)。表层冰TN浓度0.11~1.69 mol/L,平均0.54 mol/L;冰-水界面冰TN浓度0.17~2.14 mol/L,平均0.80 mol/L。冰-水界面冰TN浓度大于表层冰,是表层冰的1.48倍,但差异不显著。



湖区TN在水平空间上整体表现为:湖区中部>湖区进水区>湖区出水区。湖区中部由于区域相对较封闭,水体流动性差,大量的污染物富集,使得TN浓度偏高,尤其P6点TN浓度最高。而P2处于进水区,农田退水携带大量化肥农药等物质进入,使得水体中TN浓度也比较高。

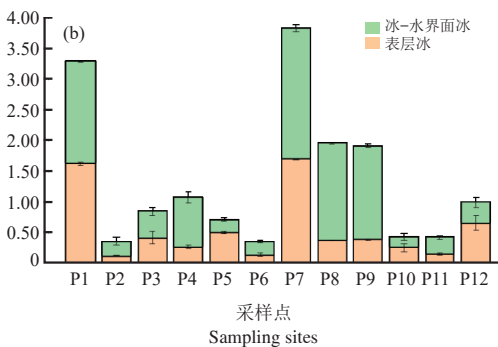
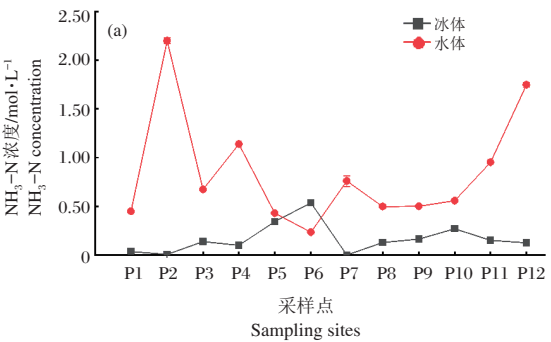


图2 乌梁素海TN浓度分布

Fig.2 Spatial distribution of total nitrogen (TN) in Ulansuhai Lake

2.1.2 NH₃-N 冰体和水中NH₃-N浓度分布如图3(a)。冰体NH₃-N浓度0.00~0.54 mol/L,平均0.17 mol/L;水体NH₃-N浓度0.23~2.20 mol/L,平均0.84 mol/L。水体NH₃-N浓度是冰体的5.09倍,且具有显著性差异($P<0.05$)。

不同冰层中NH₃-N浓度分布见图3(b)。表层冰NH₃-N浓度0.00~0.59 mol/L,平均0.18 mol/L;冰-水界面冰NH₃-N浓度0.00~0.48 mol/L,平均0.15 mol/L。表



层冰NH₃-N浓度是冰-水界面冰的1.20倍,冰-水界面冰与表层冰NH₃-N浓度差异不显著,且部分点由于NH₃-N浓度较低,处于标准检测线下,所以记为0。

NH₃-N在水平空间上分布为:湖区进水区>湖区出水区>湖区中部。一般意义来讲,氨氮主要来源为工农业废水和生活污水排放,湖区进水区P2由于农田退水进入,使得水体中NH₃-N浓度很高。

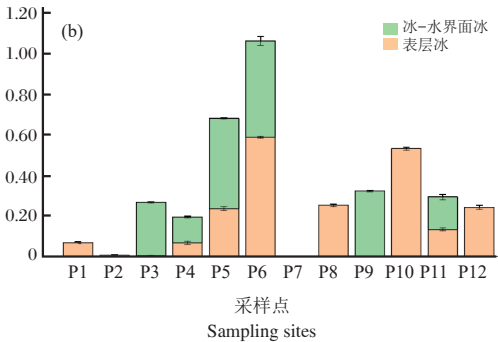


图3 乌梁素海NH₃-N浓度分布

Fig.3 Spatial distribution of ammonia nitrogen (NH₃-N) in Ulansuhai Lake

2.1.3 TP 冰体和水中TP浓度分布如图4(a)。冰体TP浓度0.03~0.16 mol/L,平均0.09 mol/L;水体TP浓度0.00~0.11mol/L,平均0.05 mol/L。冰体TP浓度是水体的1.94倍,且具有显著性差异($P<0.05$)。

TP在不同冰层中浓度分布见图4(b)。表层冰TP浓度0.02~0.21 mol/L,平均0.11 mol/L;冰-水界面冰TP浓度0.01~0.20 mol/L,平均0.07 mol/L。表层冰TP浓度是冰-水界面冰的1.48倍,但差异不显著。

TP在水平空间上分布为:湖区中部、湖区进水区>湖区出水区。

区>湖区出水区。

2.1.4 TOC 冰体和水中TOC浓度分布如图5(a)。冰体TOC浓度0.02~0.14 mol/L,平均0.08 mol/L;水体TOC浓度0.14~0.46 mol/L,平均0.30 mol/L。水体TOC浓度是冰体的3.76倍,具有显著性差异($P<0.05$)。

不同冰层中TOC浓度分布见图5(b)。表层冰TOC浓度0.00~0.25 mol/L,平均0.10mol/L;冰-水界面冰TP浓度0.00~0.15 mol/L,平均0.06 mol/L。表层冰TOC浓度是冰-水界面冰的1.59倍,但差异不显著。

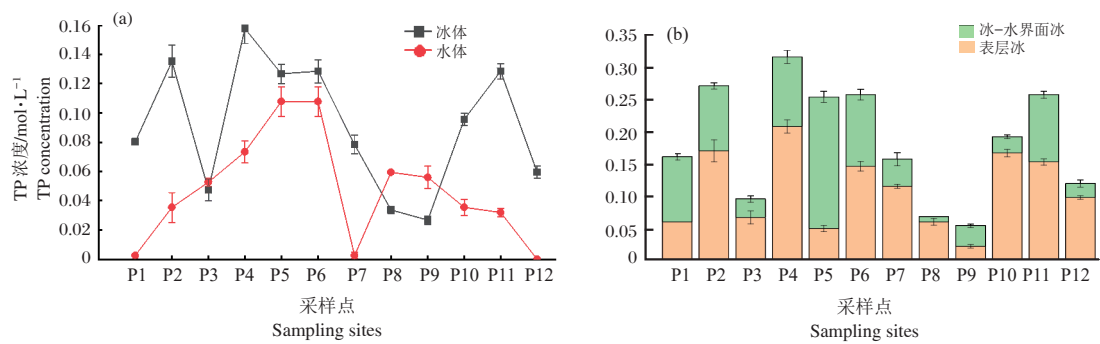


图 4 乌梁素海 TP 浓度分布

Fig.4 Spatial distribution of total phosphorus (TP) in Ulansuhai Lake

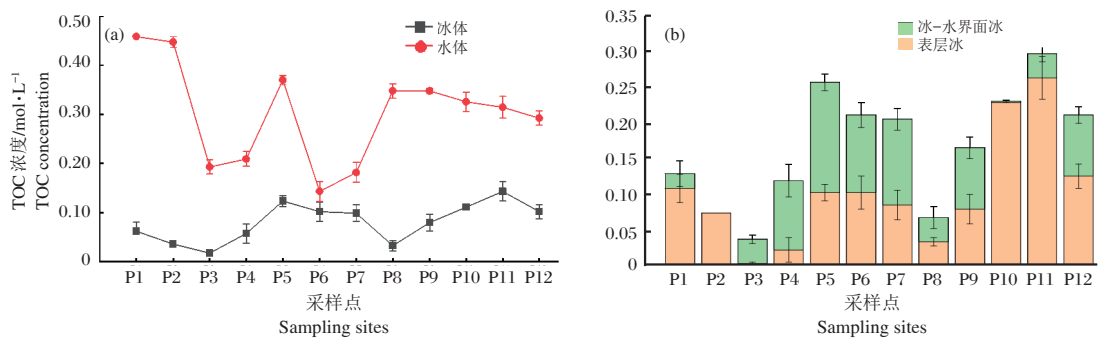


图 5 乌梁素海 TOC 浓度分布

Fig.5 Spatial distribution of total organic carbon (TOC) in Ulansuhai Lake

湖区 TOC 在水平空间上分布为:湖区出水区>湖区进水区、湖区中部。出水区水域较宽,水流缓慢,污染物沉积作用加剧,而且冰覆盖下风的扰动小,沉积效果好;同时较多水生植物,植物残体经过微生物分解和矿化,不断与水体发生交换,逐步沉积和埋藏于沉积物中,沉积物在净化上覆水环境的同时,也将污染物再次释放到上覆水体中,使得 TOC 浓度较高。

2.1.5 盐分 冰体和水体中 Na^+ 和 Cl^- 浓度分布特征如图 6(a)、图 7(a), Na^+ 和 Cl^- 的浓度水体远大于冰体。冰封期乌梁素海 Na^+ 在冰体和水体浓度变化范围分别为 0.43~14.38 和 522.27~1 191.00 mol/L , 均值分别为 3.81 和 772.93 mol/L , 水体是冰体浓度的 202.87 倍, 且具有极显著性差异 ($P<0.01$)。 Cl^- 在冰体和水体浓度变

化范围分别为 1.55~17.58 和 377.91~1 862.17 mol/L , 均值分别为 5.48 和 998.63 mol/L , 水体是冰体浓度的 182.23 倍, 且具有极显著性差异 ($P<0.01$)。

不同冰层中 Na^+ 和 Cl^- 浓度分布特征如图 6(b)、图 7(b)。冰封期乌梁素海 Na^+ 在表层冰和冰-水界面冰浓度变化范围分别为 0.30~26.46 和 0.31~19.88 mol/L , 均值分别为 3.87 和 3.74 mol/L ; Cl^- 在表层冰和冰-水界面冰浓度变化范围分别为 1.46~31.92 和 1.64~24.47 mol/L , 均值分别为 5.65 和 5.31 mol/L 。 Na^+ 和 Cl^- 的浓度在不同冰层中分布差异不显著。

湖区 Na^+ 在水平空间上分布为:湖区进水区>湖区中部>湖区出水区; Cl^- 在水平空间上分布为:湖区进水区>湖区出水区、湖区中部。

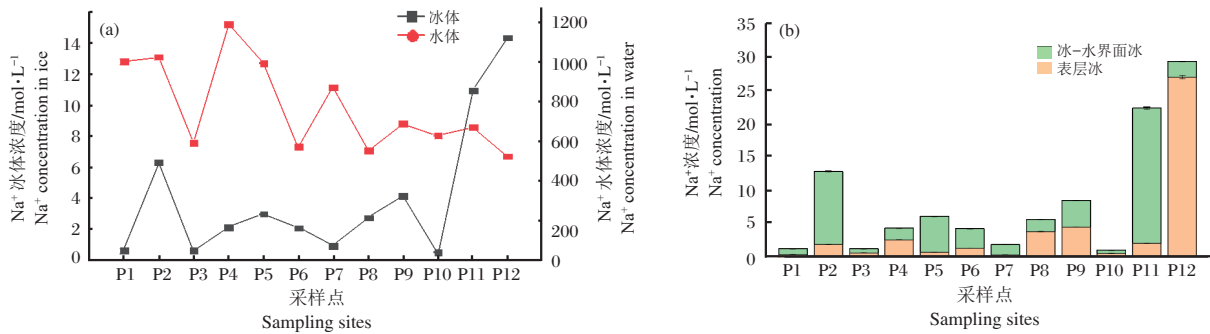


图 6 乌梁素海 Na^+ 浓度分布

Fig. 6 Spatial distribution of sodium ions (Na^+) in Ulansuhai Lake

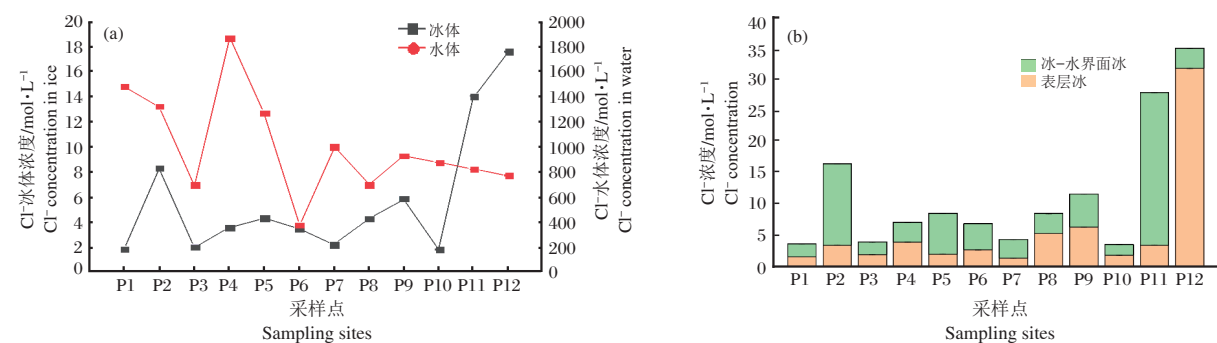


图 7 乌梁素海Cl⁻浓度分布

Fig. 7 Spatial distribution of chloride ions (Cl⁻) in Ulansuhai Lake

2.2 污染物迁移特征

污染物冰-水分配系数见表2。

表2 污染物冰-水分配系数

Tab.2 Spatial distribution coefficients of contaminant concentrations in the ice-water media						
采样点	TN	NH ₃ -N	TP	TOC	Na ⁺	Cl ⁻
P1	1.76	0.09	8.00	0.22	0.00	0.00
P2	0.08	0.00	3.50	0.09	0.01	0.01
P3	0.27	0.21	1.00	0.04	0.00	0.00
P4	0.76	0.09	2.29	0.38	0.00	0.00
P5	0.27	0.79	1.18	0.67	0.00	0.00
P6	0.07	2.35	1.18	0.45	0.00	0.01
P7	1.92	0.00	8.00	0.71	0.00	0.00
P8	0.74	0.26	0.50	0.17	0.01	0.01
P9	0.89	0.32	0.50	0.23	0.01	0.01
P10	0.19	0.48	2.50	0.31	0.00	0.00
P11	0.22	0.16	4.33	0.42	0.02	0.02
P12	0.35	0.07	6.00	0.32	0.03	0.02
均值	0.63	0.40	3.25	0.34	0.01	0.01

冰-水体系中,随着结冰过程,TN、NH₃-N、TOC由冰体向冰下水体不断迁移,而TP是冰体浓度高于冰下水体,Na⁺和Cl⁻由于冰晶的析出使绝大部分溶质在冰下水体中浓缩。

3 讨论

3.1 乌梁素海冰-水体系中污染物的分布特征

本研究发现结冰过程中TN、NH₃-N、TOC在水体中的浓度大于冰体,污染物随结冰过程由冰体向水体迁移,与相关研究(杨文焕等,2018a;杨文焕等,2018b;李卫平等,2020;于玲红等,2016)结果一致。淡水湖结冰过程,冰下水体温度不高于4℃,冷能经由冰盖传至冰下水体,水体中营养盐凝固点低于水分子,水分子晶核不断长大渐形成临界尺寸冰核,平稳析出并形成洁净的冰层,而污染物迅速析出被排斥至水体中(Gay et al,2003)。由此可以看出,湖泊水体由液态变为固态过程中,固态部分污染物被排斥到未冻结的液态水体中,产生浓缩效应,使得乌梁素海水体污染呈

现加剧趋势。

TP在冰体浓度高于冰下水体,与相关研究结果(高宁等,2017)不同。原因可能是在结冰过程中,冰体大量俘获析出后的TP还未来得及迁移,且其俘获TP受到冰生长速率、水体TP含量、冰体结构和冰下水环流等多因素的影响(Nakawo et al 1981),使得TP在冰体的浓度高于水体,而其他污染物由于冷冻浓缩进入水体。自20世纪90年代至今,我国湖泊中TP含量明显增多,而TN含量变化不大,导致TN与TP比值大幅下降,所以解决我国湖泊富营养化问题的关键在于对“磷”素的输入控制(蔡龙炎等,2010)。对于乌梁素海水体结冰过程,冰体中的N元素由冰体向水体迁移,而P元素赋存于冰体中,形成冰封期以高N湖水为主。来年冰体融化,大量冰体P元素进入水体,成为水体富营养化的潜在诱因。

3.2 乌梁素海不同冰层中污染物分布特征

李卫平等(2020)已对乌梁素海冰-水体系中污染物的分布特征进行了研究。为更加确切地了解污染物如何分布迁移,我们并非将采集的冰块整体融化来测定冰体中污染物的变化,而是将冰块进行分层,探究其不同冰层中如何变化从而向冰下水体迁移的;同时,指标上不仅测定了表征富营养化的氮磷,还测定了表征有机物污染的TOC及含盐量(Na⁺、Cl⁻)指标。研究发现,不同冰层中NH₃-N、TP、TOC在表层冰的含量高于冰-水界面冰,与相关研究结果(杨文焕等,2018a;高宁等,2017;杨文焕等,2018b)具有一致性。(1)乌梁素海气候条件特殊,昼夜温差大,使得湖水在结冰初期处于反复的冻融过程。白天温度较高,冰体融化时会释放原本被冻结在冰体内的营养盐,由于湖区水动力条件较弱,被释放的营养盐大多停留在冰水界面层;夜晚温度降低时,营养盐被再次冻结。如此反复使得该时期的冰体表层营养盐含量较高。(2)当夜晚温度降低时,表层冰的温度较低,冰生长速率较快,从而能捕获更多的营养物质;而冰-水界面冰

的生长受上层冰盖保温作用,冰的生长速率小俘获较少的营养物质,导致 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TOC在冰体的生长过程进入表层冰。(3)与表层冰的水量蒸发散失有关(于玲红等,2013)。

TN在冰-水界面冰含量高于表层冰,与北方寒区湖泊相关研究结果(李卫平等,2014;黄继国等,2009)不同。一是冰层厚度稳定后,由于冷冻浓缩作用,冰体中的营养盐自上而下慢慢迁移进入水体;二是随着冰层厚度增加,冰体中氢键间的作用力变小,迁移通道空间密度较大,水体中营养物质较易迁移进入冰-水界面冰。

3.3 乌梁素海溶解性盐分布特征

乌梁素海湖水中溶解性盐的主要成分是 Na^+ 和 Cl^- (吕宏洲等,2015),湖泊水体属于[Cl]NaⅢ型水(崔凤丽等,2013)。水体中 Na^+ 和 Cl^- 浓度增加时,加剧湖泊的盐化程度,进而影响鱼类等生长,威胁生态环境安全(丁天明等,2001)。本文结论表明 Na^+ 和 Cl^- 水体浓度大于冰体,与姜涛等(2019)研究所得出的结论一致,表明乌梁素海湖水中 Na^+ 和 Cl^- 在水体结冰过程中,由于冰晶的析出使绝大部分溶质在冰下水体中浓缩。自然环境下,水体冻融结冰过程中,盐分在冰-水介质、各冰层以及水体-沉积物之间都是不断迁移转化的,我们可以这样理解这种迁移扩散趋势:湖水结冰过程中,首先形成的是一些细小、平整且不含杂质的冰晶,而后这些冰晶不断地相互连接合并,形成具有一定柔性的冰。随着温度持续降低,大量柔性冰相互结合变厚,最后形成坚硬的冰盖。在冰-水界面附近,大量水分子由于氢键的作用而缔结析出,随后附着在冰盖下表面,随温度持续降低冻结成冰层。此时冰层中含有大量盐分,后续由于冷冻浓缩原理,湖冰对盐分产生排斥效应,使得盐分由冰体迁移至水体。此过程致使冰-水界面处盐分的浓度远高于整个液相中的浓度,在浓度差的推动下,固-液界面处的盐分又向液相扩散(李畅游等,2016)。表明在湖泊结冰过程中,盐分在冰下水体中浓缩,结冰过程有排斥盐分效应,致使水体中盐分的浓度高于冰体中的浓度。水体盐分浓度的升高导致一部分盐分迁移至沉积物,致使沉积物中盐分浓度的升高。

参考文献

蔡龙炎,李颖,郑子航,2010.我国湖泊系统氮磷时空变化及对富营养化影响研究[J].地球与环境,38(2):235-241.
崔凤丽,李畅游,史小红,等,2013.乌梁素海主要离子季节变化特征分析[J].干旱区资源与环境,27(8):137-142.
丁天明,王飞,严世强,等,2001.我国沿岸海域环境污染对渔

业可持续发展的影响及对策探讨[J].水产科技情报,28(1):44-48.
董志勇,2006.环境水力学[M].北京:科学出版社:1.
高宁,乔玲敏,张岩,等,2017.乌梁素海结冰过程中总磷的迁移过程研究[J].海洋湖沼通报,(2):48-52.
高宁,2018.水体结冰和融冰过程中典型污染物的迁移规律研究[D].山东烟台:烟台大学:7.
韩知明,贾克力,赵胜男,等,2017.呼伦湖冰封期与非冰封期营养盐与离子分布特征研究[J].生态环境学报,26(7):1201-1209.
黄继国,傅鑫廷,王雪松,等,2009.湖水冰封期营养盐及浮游植物的分布特征[J].环境科学学报,29(8):1678-1683.
姜涛,2019.冰封期乌梁素海N、P和TDS在水体和沉积物中的分布及迁移特征[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学:4.
姜涛,张生,赵胜男,等,2019.乌梁素海盐分在冰水沉积物间的分布及迁移特征[J].湖泊科学,31(4):969-975.
李佳,侯俊青,赵子闻,等,2019.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,42(9):61-67.
李兴,李畅游,李卫平,等,2009.内蒙古乌梁素海不同形态氮的时空分布[J].湖泊科学,21(6):885-890.
李兴,张树礼,李畅游,等,2012.乌梁素海浮游植物群落特征分析[J].生态环境学报,21(11):1865-1869.
李建茹,李兴,李卫平,等,2020.基于AQUATOX模型的乌梁素海富营养化模拟及控制研究[J].生态环境学报,29(6):1215-1224.
李卫平,徐静,于玲红,等,2014.乌梁素海冰封期营养盐及浮游植物的分布特征[J].生态环境学报,23(6):1007-1013.
李卫平,滕飞,杨文焕,等,2020.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,39(2):122-128,144.
李畅游,史小红,赵胜男,等,2016.乌梁素海湖冰环境特征及物质迁移规律研究[M].北京:科学出版社:90.
刘晓旭,李畅游,李文宝,等,2015.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,27(6):1159-1167.
吕宏洲,李畅游,史小红,等,2015.不同条件下乌梁素海污染物在冰-水体系中分布规律的模拟[J].湖泊科学,27(6):1151-1158.
宋晋栋,杨婷婷,张晶,等,2020.芦苇对乌梁素海氮磷营养盐吸附动力学实验研究[J].中央民族大学学报(自然科学版),29(02):27-31.
孙驰,2019.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].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学:8.
尚士友,杜健民,李旭英,等,2003.乌梁素海富营养化及其防治研究[J].内蒙古农业大学学报,24(4):7-12.
王一舒,吴仁人,荣楠,等,2020.乌梁素海氮磷污染通量输入及

- 海区水质空间异质性研究[C]//中国环境科学学会. 2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集: 第 2 卷: 7.
- 杨文焕, 齐璐, 李卫平, 等, 2018a. 包头南海湖冰封期不同形态氮的空间分布[J]. 东北农业大学学报, 49(3): 42–49.
- 杨文焕, 崔亚楠, 李卫平, 等, 2018b. 冰封期湿地沉积物碳、氮、磷分布及污染评价[J]. 环境化学, 37(2): 98–106.
- 杨文焕, 尹强, 钟清涛, 等, 2021. 2013–2019 年乌梁素海排干入湖污染负荷与湖区水质的响应关系[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 42(1): 7–15, 30.
- 于玲红, 吕超, 李卫平, 等, 2013. 冰封期乌梁素海冰层中营养盐垂直分布特征分析[J]. 环境工程, (S1): 170–174.
- 于玲红, 王晓云, 李卫平, 等, 2016. 包头南海湿地冰封期水质特征[J]. 湿地科学, 14(6): 810–815.
- 张岩, 2012. 乌梁素海结冰过程中污染物迁移机理及其应用研究[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学: 42.
- 张岩, 李畅游, SHEN Hung Tao, 等, 2013. 乌梁素海湖泊冰生长过程中总氮的迁移规律[J]. 水科学进展, 24(5): 728–729.
- Freedman B, 2002. Environmental Ecology[M]. San Diego: Academic Press: 5.
- Gay G, Lorain O, Azouni A, et al, 2003. Wastewater treatment by radial freezing with stirring effects[J]. Water Research, 37(10): 2520–2524.
- Kriss R I, Raul P, Aud L, et al, 2010. Effects of small-scale turbulence on lower trophic levels under different nutrient conditions[J]. Journal of Plankton Research, 32(2): 197–208.
- Nakawo M, Sinha N K, 1981. Growth Rate and Salinity Profile of First-Year Sea Ice in the High Arctic[J]. Journal of Glaciology, 27(96): 315–330.

(责任编辑 张俊友)

Distribution and Exchange of Pollutants During the Icebound Season of Ulansuhai Lake

LU Xing-shun¹, DING Xiao-yu¹, ZHAO Zi-wen¹, LI Jia¹, WU Lin-hui^{1,2}

(1. College of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010000, P.R.China;

2. Inner Mongolia Key Laboratory of Environmental Pollution Control & Waste Resource Reuse, Inner Mongolia, Hohhot 010021, P.R.China)

Abstract: Ulansuhai Lake receives most of the farmland drainage in the Hetao Irrigation Area, as well as domestic sewage and industrial wastewater from the villages and towns around the lake. As a result, annual loading of nitrogen and phosphorus to the lake is high. The distribution of pollutants and the exchange of pollutants at the ice–water interface and in the different ice layers of Ulansuhai Lake were investigated during the icebound period in this study. In January 2019, water and ice samples were collected at 12 sampling sites in Ulansuhai Lake (P1–P4 in the lake inlet; P5–P8 in the open area of the lake; P9–P12 in the lake outlet). The concentrations of total nitrogen (TN), ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$), total phosphorus (TP), total organic carbon (TOC), salt (Na^+ , Cl^-) and other pollutants in the surface ice, the ice–water interface and water were determined. The migration characteristics of pollutants between water and ice were then analyzed using the distribution coefficients (C_i/C_w) of contaminant concentrations in the ice–water media. The concentrations of TN, $\text{NH}_3\text{-N}$, TOC, Na^+ and Cl^- in water were 2.03, 5.09, 3.76, 202.87 and 182.23 times higher than those in ice, while the TP concentration in ice was 1.94 times of that in water. The TN concentration in the ice at the ice–water interface was 1.48 times that in the surface ice while the concentration of other analytes in the surface ice was 1–1.5 times that in the ice–water interface. There were no significant difference among pollutant concentrations within the ice. Spatially, $\text{NH}_3\text{-N}$ and Na^+ concentrations were high in the lake inlet, TN and TP were highest in the open area, and TOC was the primary pollutant in the lake outlet. The distribution coefficients for TN, $\text{NH}_3\text{-N}$, TP, TOC, Na^+ and Cl^- in the ice–water media were, respectively, 0.63, 0.40, 3.25, 0.34, 0.01 and 0.01. The freezing process tends to exclude pollutants from the developing ice crystal, except for TP. The results of this study provide a theoretical basis for water quality assessment of lakes during the icebound period and support efforts to treat eutrophication and prevent pollution in Ulansuhai Lake and other lakes in cold and arid regions.

Key words: icebound period; pollutant; distribution; migration; Ulansuhai Lake