侯晨丽,李 洋,殷震育,等.岱海冰封期冰-水-沉积物间氮源汇特征及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):309-318.
Hou C L, Li Y, Yin Z Y, et al. Nitrogen source-sink characteristics and controlling factors across the ice-water-sediment interfaces during the ice-covered period in Lake Daihai [J]. *China Environmental Science*, 2026,46(1):309-318.

岱海冰封期冰-水-沉积物间氮源汇特征及影响因素

侯晨丽[1],李 洋[1],殷震育[1],李卫平[1*],姚 植[1],于晟乾[1],邢秀明[2] (1.内蒙古科技大学能源与环境学院,黄河流域内蒙古段生态保护与综合利用自治区协同创新中心,内蒙古 包头 014010；2.凉城县岱海自然保护区服务中心,内蒙古 乌兰察布 013750)

摘要：岱海每年约 1/3 的时间处于冰封期,形成冰、水、沉积物共存的多介质格局,为厘清营养盐在冰-水-沉积物界面迁移规律,围绕岱海冰封前(10 月)和冰封期(1 月、2 月)三相介质(冰、水、沉积物)中氮营养盐的时空分布、源汇特征及驱动因子展开系统研究.结果表明:多介质中氮营养盐呈现显著的时空差异,冰体内总氮和氨氮浓度略微升高,2 月下层冰总氮浓度较 1 月更高,且下层冰体浓度高于其它分层.在冰封前到冰封后期水体和沉积物中总氮和硝酸盐氮持续增长,1~2 月水体中硝酸盐氮增长率达 62.5%.沉积物中总氮和氨氮浓度空间分布总体呈中高东低的特点,且高于冰下水体.冰封期分离系数排序为硝酸盐氮<总氮<氨氮.冰-水界面总氮迁移以硝酸盐氮为主导,1 月通量高于 2 月,沉积物是总氮和氨氮的“源”,而对硝酸盐氮呈“汇”作用,冰-水界面氮营养盐通量对其浓度的影响总体高于沉积物-水界面通量,冻结排盐效应和沉积物内源释放共同作用于水体营养盐动态变化.其中,冰增长率、溶解氧、盐度和水温是驱动冰封前后氮营养盐分布和迁移的关键环境因子.

关键词：岱海；冰封期；营养盐；交换通量；迁移模拟
中图分类号：X524 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)01-0309-10

Nitrogen source-sink characteristics and controlling factors across the ice-water-sediment interfaces during the ice-covered period in Lake Daihai. HOU Chen-li[1], LI Yang[1], YIN Zhen-yu[1], LI Wei-ping[1*], YAO Zhi[1], YU Sheng-qian[1], XING Xiu-ming[2] (1.Collaborative Innovation Center of Autonomous Region for Ecological Protection and Comprehensive Utilization in the Inner Mongolia Section of the Yellow River Basin, School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China；2.Service Center of Daihai Nature Reserve, Liangcheng County, Ulanqab 013750, China). *China Environmental Science*, 2026,46(1)：309~318

Abstract：Lake Daihai remains ice-covered for approximately one-third of the year, forming a multi-media system comprising ice, water, and sediment. To clarify the migration patterns of nutrients at the ice-water-sediment interfaces, a systematic study was conducted on the spatiotemporal distribution, source-sink characteristics, and driving factors of nitrogen nutrients in the three phases (ice, water, sediment) before the freezing period (October) and during the freezing period (January, February). The results revealed significant spatiotemporal heterogeneity of nitrogen nutrients across the media. Total nitrogen (TN) and ammonium nitrogen (NH_4^+-N) concentrations increased slightly in the ice layer. The TN concentration in the lower ice layer was higher in February than in January, with the lower ice layer exhibiting higher concentrations compared to other layers. From pre-freezing to late freezing periods, TN and nitrate nitrogen (NO_3^--N) concentrations continuously increased in the water and sediment. The NO_3^--N concentration in the water increased by 62.5% between January and February. Spatially, TN and NH_4^+-N concentrations in the sediment were generally higher in the central area and lower in the eastern part, and overall exceeded those in the under-ice water. During the freezing period, the fractionation coefficients followed the order: NO_3^--N< TN <NH_4^+-N. At the ice-water interface, NO_3^--N dominated TN migration, with a higher flux observed in January than in February. Sediment acted as a "source" for TN and NH_4^+-N, but as a "sink" for NO_3^--N. The flux of nitrogen nutrients at the ice-water interface had a greater impact on their concentrations than the sediment-water interface flux. The dynamic changes of nutrients in the water were jointly influenced by the freezing-induced salt rejection effect and endogenous sediment release. Key environmental drivers for the distribution and migration of nitrogen nutrients before and during the freezing period included ice growth rate, dissolved oxygen, salinity, and water temperature.

Key words：Lake Daihai；ice-covered period；nutrients；exchange flux；migration simulation

收稿日期：2025-06-17
基金项目：内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0410);内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(2024YXXS028,2023QNJS133,2023CXPT005);内蒙古自然科学基金资助项目(2023QN05019)
* 责任作者, 教授, sjlwp@163.com

全球超过一半湖泊位于季节性或永久性冰冻区[1],覆冰环境下形成了冰、水、沉积物共存的多介质格局.冰层在生长、覆盖和消融的过程中阻隔大气和水体间的物质和能量交换,使得湖泊冰下水体的热分层颠倒[2],对湖体营养盐[3]、溶解氧通量[4]及新陈代谢[5]等构成动态影响.冰体内部基本不发生流动作用,结构、性状相对其他介质更稳定,在冻结时由于冻结排盐作用溶质析出至冰下水体并扩散.研究表明,湖结冰过程中约有 97%的盐排斥至冰下水体中[6],导致湖水含盐量升高[7].有学者进一步发现,在冰生长过程中总氮被排斥至水体使得水体总氮含量增加,并促使总氮向沉积物迁移[8].沉积物-水界面(SWI)作为水生态系统中最重要的界面之一,沉积物中营养盐在某些条件下会以间隙水为介质,通过梯度扩散、对流以及再悬浮等过程向上覆水体释放,成为影响上覆水体的二次污染源[9].冰下低温、厌氧、低光照等独特自然条件显著影响着沉积物-水界面营养盐迁移和释放等过程[10-11].沉积物和上覆水的营养盐交换是判断湖泊沉积物具有“汇”或“源”作用的重要标志,在实际应用中,沉积物营养盐的通量值无法直接测定[12].常用的湖泊内源污染定量估算方法主要有孔隙水扩散模型、静态释放培养法(柱状芯样模拟法)和质量衡算法[13].静态释放试验已应用于如潘家口水库[14]、丘陵山区水库[15]沉积物-水界面营养盐通量的特征研究,对于寒区湖泊通量的测算,孔隙水扩散模型(如查干湖[16]、乌梁素海[17])得到了更广泛的应用.对污染物在多介质迁移研究中,有学者控制室内实验变量模拟营养物质在不同分离系数条件下的运移[18].已有研究通过建立冰和沉积物对总氮积累模型,量化对水库总氮的贡献[19].也有学者采用多介质逸度模型模拟化合物[20]、重金属[21]在各相环境中的归趋行为,该方法对营养盐的适用性还有待研究.

岱海位于中国蒙新高原湖区,每年约三分之一的时间处于冰封期,存在冰封期与非冰封期的交替变化.岱海沉积物中较高的氮负荷,具有潜在的内源氮释放风险[22].岱海还是内陆尾闾湖泊,污染物易持续累积,随着湖面萎缩湖水咸化程度逐渐增高.冰封期冻结排盐和沉积物内源释放可能进一步加重岱海水生态环境的污染负荷.目前学者多围绕沉积物-水界面源汇特征和冰-水界面污染物迁移进行了有益探索,而受环境条件限制,研究冰封期时间跨度和频率有限,缺乏对冰-水界面和沉积物-水界面营养盐迁移的系统研究.综上,本研究以岱海为研究对象,分析冰封前(10 月)和冰封期(1 月、2 月)三相介质(冰、水、沉积物)不同分层中氮营养盐时空分布、赋存形态和源汇特征,识别驱动营养盐迁移的关键水环境因子,明析寒区湖泊冰封下氮营养盐在不同介质间的迁移机制,为内源污染整治及水环境质量改善提供重要的理论和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

岱海(40°29'~40°37'N,112°33'~112°46'E)位于内蒙古自治区乌兰察布市凉城县东部岱海盆地中央,是内蒙古第三大内陆湖,属咸水湖,呈不规则长椭圆形,坡度呈中间低四周高分布,湖面水位平均海拔 1224.1m,湖泊面积约 48km^2,平均水深约 4m.岱海流域常年盛行西南风,冬季严寒漫长,夏季炎热短促,多年平均年降水量为 413.7mm,多年平均水面蒸发量为 953.3mm,日照时数最高可达 2936.9h,多年平均气温为 5℃.每年 11 月初进入冰封期,长达 100~130d,累积负积温为 610~800℃·d,冰体厚度可达 30~60cm.自 20 世纪 70 年代开始,岱海的平均矿化度不断上升,截至 2024 年 2 月,本研究测得冰封期岱海水体平均盐度为 18.3g/L,冰封前平均盐度为 16.8g/L(测定方法见 1.2 节).

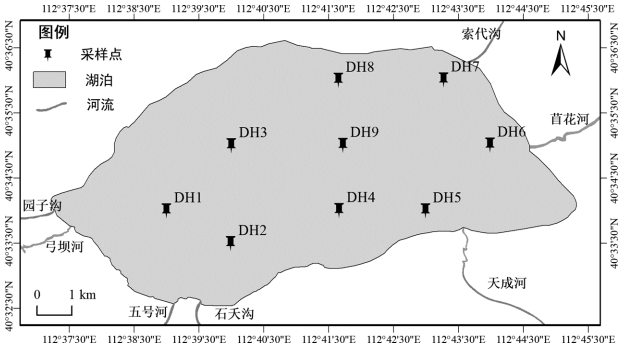


图 1 研究区域概况及采样点分布

Fig.1 Overview of the study area and distribution of sampling points

1.2 样品采集与测定方法

本研究于 2023 年 10 月 11 日(冰封期前,无冰样)、2024 年 1 月 12 日(冰封期第 50d)和 2024 年 2 月 27 日(冰封期第 96d)采集岱海上、中、下层冰、水和沉积物样,采样点分布如图 1 所示.为尽量减少人为因素对冰下水体的扰动,并保证取得冰样的纯洁度,先采集冰下水样再进行冰和沉积物的采集.首先采用冰钻将对冰盖上层进行切割破碎,接近水面时改用冰稿开出小口,使用分层取水器深入冰盖下方,分别对上、中、下层水体取样.水体中酸碱度(pH 值)、水温(T)、电导率和盐度(Sal)等指标在取样现场通过多参数水质仪(HANNA-HI98194)测定,溶解氧(DO)通过溶解氧仪(HACH-HQ2100)测定.而后在临近位置开口,利用链锯沿 40cm×40cm 的正方形边框垂直将冰盖四周锯断,进行冰体和沉积物采集.冰样使用冰镐取出采集洁净的中层冰,破碎后置于 2L 聚乙烯广口采样瓶中保存.使用原位柱状采泥器采集沉积物样品,每个点位取 3 根表层 10cm 柱状沉积物,置于自制亚克力容器中密封并垂直放置,保证原位沉积物的层次结构,用于后续间隙水的提取.所有样品于 0~4℃保温箱中避光保存,48h 内带回实验室处理测定.

总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、硝酸盐氮(NO_3^--N)、亚硝酸盐氮(NO_2^--N)、叶绿素 a(Chl.a)、化学需氧量(COD_{Cr})和悬浮物的测定参照《水和废水监测分析方法》(第四版)进行样品监测分析.经检测岱海冰、水、沉积物间隙水内亚硝酸盐氮(NO_2^--N)含量极低(<0.05mg/L),不作后续分析.溶解有机氮(DON)由差值法得出.冰样中营养盐浓度采用重力融冰装置融化后进行测定,原位柱状沉积物样品分层后置于离心机以 2000r/min 离心 20min 后取得间隙水,经 0.45μm 滤膜后与冰样和水样一同测定,方法同上.冰增长率通过计算相邻两次采样日期之间的冰厚度差值,再除以采样间隔天数获得,单位 cm/d.

营养盐的交换通量是指单位时间和单位面积内从一种介质垂直迁移到另一种介质的营养盐质量,单位 mg/(m^2·d).冰封期营养盐的交换通量涉及冰-水界面和沉积物-水界面,本研究规定营养盐由冰(沉积物)向水体转移的方向为正,反之为负.

营养盐在冰-水界面的交换通量 F_{Ice} 采用下式计算[8]:

$$F_{ice}=\frac{M_1-M_2}{At}=\frac{(N_{i1}AH_{i1}+N_{w1}A\Delta H)-N_{i2}AH_{i2}}{At} \quad (1)$$

10~1 月份冰-水界面的交换通量计算公式为:

$$F_{ice}=\frac{N_{w1}A\Delta H-N_{i2}A\Delta H}{At} \quad (2)$$

式中:(M_1-M_2)为时间间隔 td 内总氮的迁移总量,mg;A 为冰-水界面积,m^2;t 为两次取样时间间隔,d;N_{i1}、N_{i2} 分别为两时刻冰体中总氮的浓度,mg/L;H_{i1}、H_{i2} 分别为两时刻的冰厚度,cm;ΔH 为两时刻冰柱的生长高度,$\Delta H=H_{i1}-H_{i2}$,cm;N_{w1} 为后一时刻水体中总氮的浓度,mg/L.

在实际应用中,沉积物营养盐扩散通量值的测定常采用间隙水浓度扩散模型法、静态培养法进行估算而无法直接准确测定.在冰封期冰覆盖下,可以认为水体不受风浪带来的横向扰动,因此水体和沉积物间的溶质扩散可以简化为受浓度梯度和溶质扩散系数所引发的纵向传导过程,如果界面附近的水相中某化学物质的浓度随沉积物深度的变化近似于直线,其净通量可以用 Fick 第一定理进行计算,方法如下:

$$F_{sed}=f\times D_s\mathrm{d}c/\mathrm{d}z \quad (3)$$

式中:F_{sed} 为通过沉积物-水界面的扩散通量,mg/(m^2·d); $\mathrm{d}c/\mathrm{d}z$ 为沉积物-水界面间隙水中溶质的浓度梯度,mg/(L·cm);D_s 为实际溶液中溶质的分子扩散系数,m^2/s.

冻结时冰-水界面营养盐的迁移效率多采用分离系数 K 来表示,其定义为冰体中营养盐浓度与正冻水体中营养盐浓度的比值

$$K=\frac{C_i}{C_w} \quad (4)$$

式中:C_i 为冰体内营养盐浓度,mg/L;C_w 为冰下水体内营养盐浓度,mg/L.

1.3　数据处理

使用 Microsoft Excel 2021 对数据初步整理;采用 ArcGIS 10.8 软件绘制源汇空间分布图;采用 Origin2021 软件绘制冰封期氮浓度分布剖面图;运用 SPSS26 对氮浓度及环境因子数据进行正态分布检验,通过独立样本检验、方差分析等比较不同采样点有效态氮浓度的差异性,利用相关性分析对环境因子与氮释放通量间关系进行探究.运用 Canoco (V5.0)软件进行冗余分析(RDA)进一步探究营养盐

交换通量与环境因子的关系.

2 结果与分析

2.1 冰封期多介质中氮营养盐分布规律

2.1.1 时空分布特征 如图 2 所示,1~2 月冰体内总氮和氨氮平均浓度分别增长 3.8%和 6.5%.而硝酸盐氮平均浓度降低 22.2%.1 月岱海湖心区总氮有最高值(1.64mg/L),南部湖区氨氮增长 31.7%.东部湖区硝酸盐氮变化稳定.10~2 月水体总氮平均浓度持续增长至 5.32mg/L,硝酸盐氮 1 至 2 月增长 62.5%.氨氮在 0.64~0.71mg/L 间波动.从空间分布来看,总氮呈东部低(3.68mg/L)中部高(4.60mg/L)的特点,而硝酸盐氮东部最低(2.26mg/L)西部高(2.51mg/L)的特点.

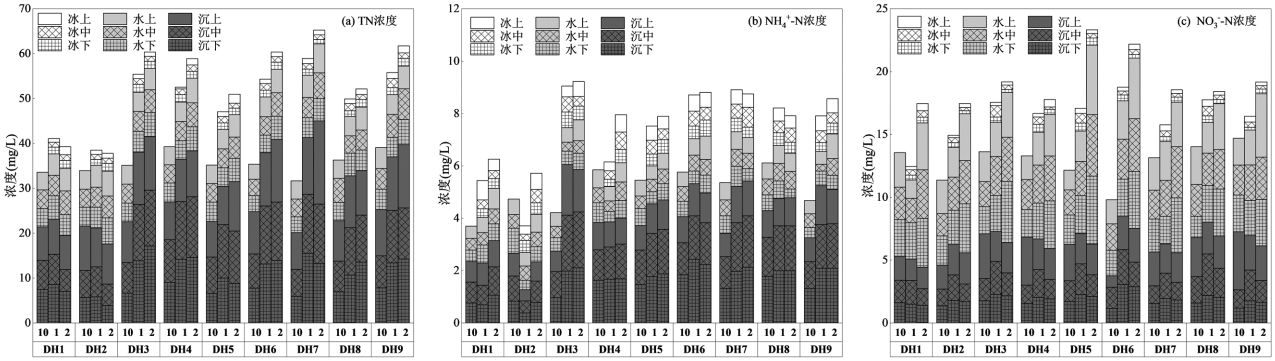


图 2 岱海各点位冰-水-沉积物中氮营养盐浓度变化

Fig.2 Variations in nitrogen nutrient concentrations across ice-water-sediment at sampling sites in Lake Daihai

沉积物间隙水中总氮、氨氮和硝酸盐氮浓度排序为 10 月<1 月<2 月.10 月沉积物间隙水中总氮浓度在 7.17~8.42mg/L,相对于冰下水体更高.从空间分布来看,岱海中部和南部的总氮浓度较高(8.42mg/L 和 8.26mg/L)西部较低(7.17mg/L);氨氮浓度范围在 0.83~1.26mg/L;南部和北部湖区硝酸盐氮浓度略高(1.56~2.42mg/L).

表 1 冰封期氮营养盐分离系数

Table 1 Separation coefficients of nitrogen nutrients during ice-covered period

月份	总氮	氨氮	硝酸盐氮
1 月	0.26	0.78	0.17
2 月	0.29	0.87	0.09

在垂直分布上,2 月下层冰总氮浓度较 1 月更高,下层冰体内总氮浓度高于其它分层.冰体内氨氮浓度均呈现为上层>中层>下层的趋势.其分离系数 1 月>2 月(表 1),表明氨氮向水体中的转移趋势增大.硝酸盐氮在 1 月和 2 月分离系数分别为 0.17 和 0.09,表明其向下转移的趋势最强.上层冰中硝酸盐氮浓度浓度均低于其它分层,其中 2 月上层冰中硝酸盐氮较 1 月增长 4.7%.而中层和下层冰体中硝酸盐氮浓度在 2 月浓度较 1 月降低了 40.7%和 18.9%,与氨氮趋势相反.

2.1.2 赋存形态 冰体内氮营养盐浓度占总氮比值的排序为:氨氮>有机氮>硝酸盐氮.多数采样点 1~2 月有机氮占比呈升高趋势,其中湖心有机氮占比可达到总氮的一半;氨氮和硝酸盐氮占比呈减少趋势.分离系数结果表明,硝酸盐氮 2 月分离系数(0.09)低于 1 月(0.17),推测冰内硝酸盐氮将随时间往下层水体中转移.因此,在冻结排盐过程中硝酸盐氮是总氮的主要组分.除 DH4 点,冰封期水体中硝酸盐氮占总氮比值整体呈增长趋势而有机氮和氨氮占比均呈减小趋势,平均占比大小为硝酸盐氮>有机氮>氨氮.与水体不同,沉积物间隙水中硝酸盐氮占总氮比值整体呈减小趋势,而有机氮占比呈增加趋势.尽管冰封期氨氮平均浓度升高,但其占总氮比值降低.

如图 3 所示,水体内氮营养盐占比排序为:硝酸盐氮>有机氮>氨氮.除 DH4 从 1~2 月硝酸盐氮占比略降低外,88.8%的监测点位硝酸盐氮占比呈增长趋势.除了 DH1 和 DH7 外,77.7%的点位从到 10~1 月硝酸盐氮占比均有所升高.66.7%和 77.7%的有机氮和氨氮占比呈降低趋势,表明氨氮和有机氮存在转化过程.

有机氮逐步分解为可溶性氨氮,导致有机氮占比减少,这种转化过程受到温度和微生物活性双重影响.氨氮作为硝化作用的主要底物被消耗,进一步削减了氨氮的浓度.沉积物间隙水中氮营养盐占比排序为:有机氮>氨氮>硝酸盐氮.10~1 月 77.7%的监测点位间隙水内氨氮占比呈降低态势.1~2 月间隙水中有机氮比例升高,氨氮和硝酸盐氮占比整体降低.虽然 10~1 月硝酸盐氮浓度呈增长态势,但 1~2 月平均浓度开始下降,与此同时,与硝酸盐氮相反,氨氮平均浓度由 1~2 月略微由 1.43mg/L 升高至 1.49mg/L.

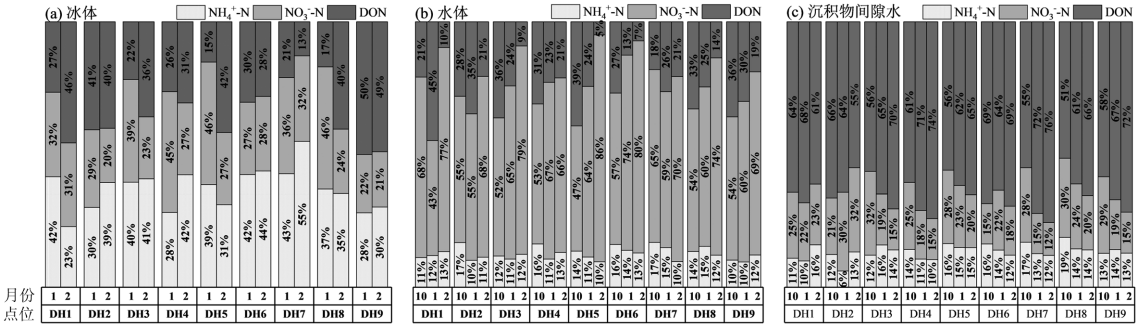


图 3　岱海各点位不同介质中氮营养盐赋存形态占比

Fig.3　Proportional distribution of nitrogen speciation in different media at sampling sites in Lake Daihai

2.2　多介质间氮源汇特征

2.2.1　冰-水界面氮源汇特征　如图 4 所示,冰封期总氮交换通量平均值排序为 2 月(9.06mg/(m^2·d))<1 月(21.39mg/(m^2·d)).从空间差异来看,1 月总氮、氨氮及硝酸盐氮通量的变异系数为 0.12、0.90 和 0.25,2 月总氮、氨氮及硝酸盐氮通量的变异系数为 0.43、3.82 和 0.42.冰封期冰-水界面中氨氮和硝酸盐氮通量全部为正,即氨氮和硝酸盐氮均由冰体汇入水体,其中 2 月各点位氨氮和硝酸盐氮平均交换通量分别为 0.20mg/(m^2·d)和 7.67mg/(m^2·d),较 1 分别降低 80.6%和46.3%.1 月和2 月氨氮通量分别占总氮通量的 4.8%和 2.2%,硝酸盐氮通量占总氮通量远高于氨氮,分别为 66.7%和 84.6%,表明硝酸盐氮是冰-水界面总氮迁移的主要成分.

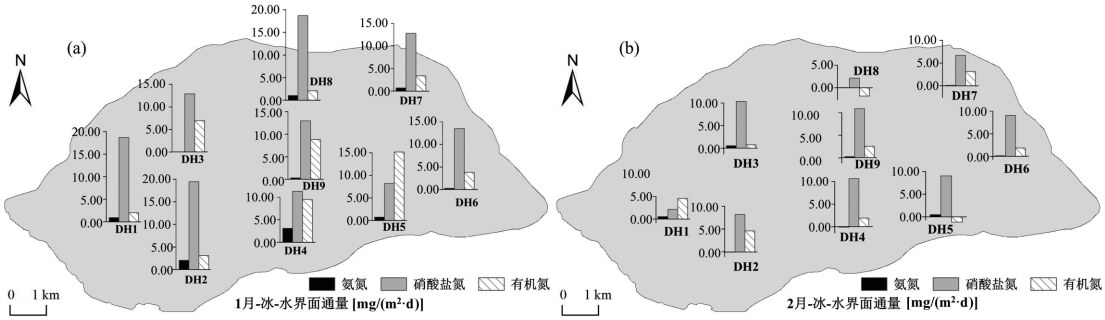


图 4　岱海冰封期冰-水界面氮营养盐通量

Fig.4　Nutrient fluxes at ice-water interface during ice-covered period in Lake Daihai

2.2.2　沉积物-水界面氮源汇特征　如图 5 和表 2 所示,冰封初期总氮和氨氮释放量较高,不同时间各点位总氮平均交换通量为 10 月 1.61mg/(m^2·d)<2 月(1.97mg/(m^2·d))<1 月(2.22mg/(m^2·d)),氨氮平均交换通量为 10 月(0.29mg/(m^2·d))<1 月(0.31mg/(m^2·d))<2 月(0.33mg/ (m^2·d)).表明总氮和氨氮存在由沉积物界面向上覆水界面迁移的趋势,呈现“源”的特征.从空间分布来看,总氮通量的变异系数为 10 月(0.32)<1 月(0.43)<2 月(0.67),氨氮通量的变异系数为 2 月(0.42)<10 月(0.50)<1 月(0.59),表明冰封期沉积物-水界面中总氮和氨氮通量空间差异性较小.

此外,10 月和 1 月沉积物-水界面氨氮通量均为正值,表明氨氮由沉积物向水体中转移,而 1 月相比 10 月水体中氨氮浓度仍然有所降低,推测冰封初期(1 月)硝化反应可能比矿化反应更加剧烈.在冰封中后期(2 月)水体中溶解氧无法得到补充

而浓度降低,硝化反应逐渐减弱,而矿化反应仍可以持续进行,同时,有机氮在 1~2 月水体中的占比逐渐走低,因此,2 月水体中氨氮浓度转为增长趋势.不同时间各点位硝酸盐氮交换通量排序为 2 月(-0.80mg/(m^2·d))<10 月 (-0.51mg/(m^2·d))<1 月(-0.17mg/(m^2·d)).硝酸盐氮从 10~1 月交换通量平均增长 67.0%,而到 2 月降低 380.0%.与氨氮不同,硝酸盐氮在各月份交换通量基本为负,表明沉积物成为了水中硝酸盐氮的“汇”,在冰封中后期,该趋势进一步加强.

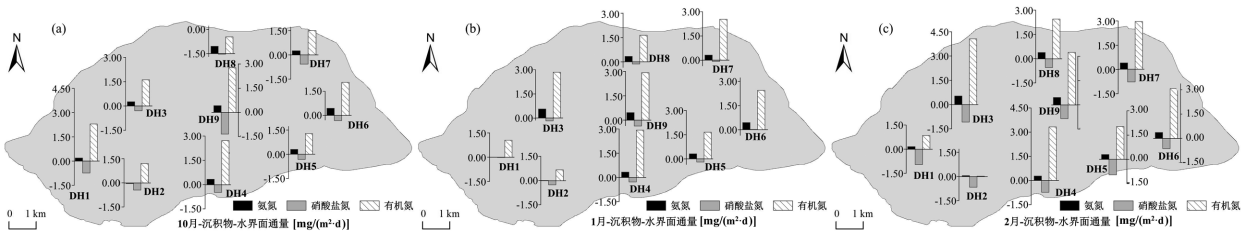


图 5 沉积物-水界面氮营养盐通量

Fig.5 Nitrogen nutrient fluxes at sediment-water interface

表 2 沉积物-水界面转化态氮营养盐通量

Table 2 Fluxes of reactive nitrogen species at sediment-water interface

月份	点位	水深 (m)	拟合曲线 (氨氮)	D_s ($\times10^{-6}$cm^2/s)	交换通量 (mg/(m^2·d))	dc/dz	拟合曲线 (硝酸盐氮)	D_s ($\times10^{-6}$cm^2/s)	交换通量 (mg/(m^2·d))	dc/dz
10 月	DH1	2.80	y=0.59e$^{0.042x}$	9.43	0.19	0.02	y=2.3e$^{-0.043x}$	9.05	−0.74	−0.10
	DH2	2.10	y=0.93e$^{-0.0076x}$	7.57	−0.04	−0.01	y=1.9e$^{-0.043x}$	7.27	−0.44	−0.08
	DH3	5.00	y=0.67e$^{0.049x}$	9.59	0.26	0.03	y=2.3e$^{-0.017x}$	9.20	−0.30	−0.04
	DH4	4.00	y=0.94e$^{0.051x}$	8.97	0.34	0.05	y=2.3e$^{-0.03x}$	8.61	−0.47	−0.07
	DH5	2.90	y=0.85e$^{0.06x}$	7.79	0.30	0.05	y=2.3e$^{-0.026x}$	7.48	−0.33	−0.06
	DH6	2.95	y=0.84e$^{0.077x}$	9.78	0.44	0.06	y=1.5e$^{-0.033x}$	9.39	−0.32	−0.05
	DH7	2.10	y=0.84e$^{0.05x}$	7.88	0.25	0.04	y=2.3e$^{-0.044x}$	7.56	−0.57	−0.10
	DH8	4.60	y=0.87e$^{0.079x}$	8.43	0.45	0.07	y=2e$^{-0.003x}$	8.09	−0.04	−0.01
	DH9	5.50	y=0.63e$^{0.087x}$	9.4	0.42	0.05	y=2.7e$^{-0.067x}$	9.02	−1.34	−0.18
1 月	DH1	2.51	y=0.74e$^{0.001x}$	6.26	0.00	0.00	y=0.097e$^{-0.045x}$	6.01	−0.02	0.00
	DH2	2.10	y=0.39e$^{0.009x}$	5.03	0.01	0.00	y=2.4e$^{-0.029x}$	4.83	−0.25	−0.07
	DH3	4.85	y=1e$^{0.1x}$	6.36	0.56	0.11	y=2.6e$^{-0.014x}$	6.11	−0.18	−0.04
	DH4	3.60	y=0.68e$^{0.1x}$	5.96	0.33	0.07	y=2.6e$^{-0.024x}$	5.72	−0.28	−0.06
	DH5	2.48	y=0.79e$^{0.1x}$	5.17	0.31	0.08	y=2.7e$^{-0.02x}$	4.96	−0.20	−0.05
	DH6	3.20	y=0.86e$^{0.11x}$	6.49	0.44	0.10	y=2.8e$^{0.001x}$	6.23	0.01	0.00
	DH7	2.50	y=1.1e$^{0.071x}$	5.23	0.31	0.08	y=2.2e$^{-0.0092x}$	5.02	−0.08	−0.02
	DH8	4.30	y=0.96e$^{0.08x}$	5.6	0.33	0.08	y=2.8e$^{-0.012x}$	5.37	−0.14	−0.03
	DH9	5.10	y=0.96e$^{0.095x}$	6.24	0.47	0.09	y=2.6e$^{-0.028x}$	5.99	−0.36	−0.07
2 月	DH1	2.51	y=0.82e$^{0.038x}$	6.26	0.16	0.03	y=2.4e$^{-0.079x}$	6.01	−0.95	−0.19
	DH2	2.10	y=0.67e$^{0.024x}$	5.03	0.06	0.02	y=2.7e$^{-0.069x}$	4.83	−0.67	−0.19
	DH3	4.85	y=1.1e$^{0.094x}$	6.36	0.53	0.10	y=3.2e$^{-0.066x}$	6.11	−1.08	−0.21
	DH4	3.60	y=0.9e$^{0.064x}$	5.96	0.27	0.06	y=2.8e$^{-0.058x}$	5.72	−0.73	−0.16
	DH5	2.48	y=0.93e$^{0.083x}$	5.17	0.30	0.08	y=3.4e$^{-0.077x}$	4.96	−0.96	−0.26
	DH6	3.20	y=0.99e$^{0.082x}$	6.49	0.37	0.08	y=3.3e$^{-0.044x}$	6.23	−0.63	−0.15
	DH7	2.50	y=0.88e$^{0.11x}$	5.23	0.39	0.10	y=2.9e$^{-0.073x}$	5.02	−0.79	−0.21
	DH8	4.30	y=0.68e$^{0.13x}$	5.6	0.39	0.09	y=3e$^{-0.043x}$	5.37	−0.54	−0.13
	DH9	5.10	y=0.92e$^{0.099x}$	6.24	0.46	0.09	y=2.8e$^{-0.061x}$	5.99	−0.85	−0.17

2.3 冰封期营养盐分布驱动因素

2.3.1 岱海环境因子变化规律 岱海冰封前后水环境因子变化如图 6 所示.2 月在 38.50~59.50cm 之间,较 1 月平均增长 40.0%.冰封中后期平均气温逐步回升,1~2 月冰厚虽持续增加,相应的冰增长率实际为降低趋势,降低了 41.7%,预示冻结浓缩作用逐渐减弱.随冰封期冰厚增长,盐度和悬浮物随之持续增加,盐度介于 17.58~18.90g/L,其冰点介于−0.96~−1.03℃之间[24],接近实测冰下水温冰封期水体.悬浮物和叶绿素 a 均在 2 月有最高的空间变异性.溶解氧、水温和 pH 值浓

度差异较小.其中溶解氧浓度介于 8.83~12.20mg/L 之间,远高于 10 月,是受低温下溶解氧饱和度增大和生物代谢速率减弱[23]共同影响.冰封初期叶绿素 a 浓度增加,表明产氧速率一定程度上未被抑制.

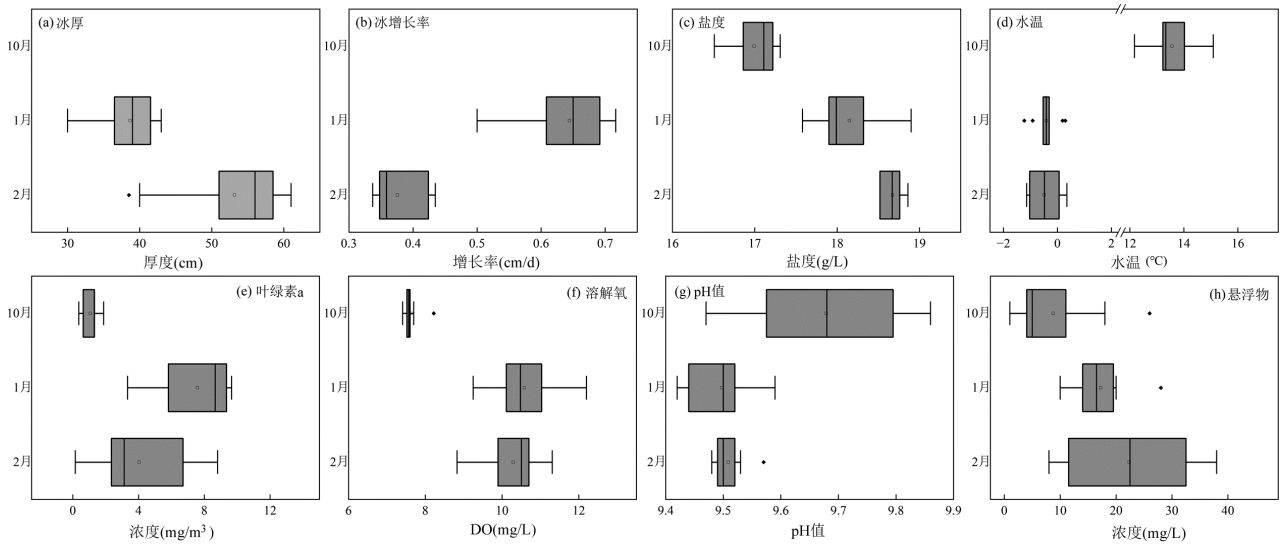


图 6　岱海环境因子浓度变化

Fig.6　Concentration changes of environmental factors in Lake Daihai

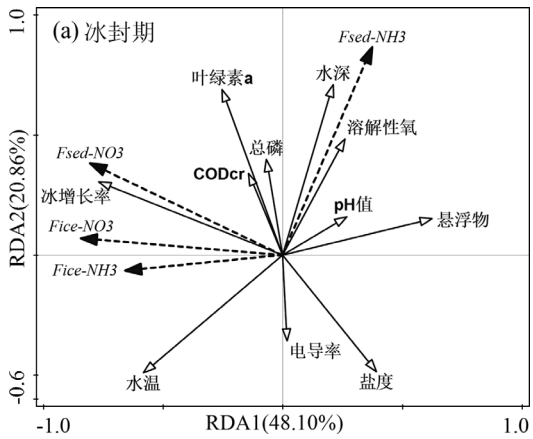
表 3　冰封期和冰封前环境因子解释的重要性排序和显著性检验结果

Table 3　Importance ranking of environmental factors and significance test results during freezing period and pre−freezing

冰封期				冰封期前			
环境因子	解释率(%)	pseudo−F	P	环境因子	解释率(%)	pseudo−F	P
冰增长率	26.7	12.0	0.002	溶解氧	35.7	3.8	0.042
盐度	14.3	4.0	0.010	盐度	28.3	4.8	0.038
水温	10.4	3.2	0.032	水温	7.7	1.4	0.262
悬浮物	7.0	4.9	0.012	COD_{Cr}	7.5	1.5	0.33
叶绿素 a	5.9	3.1	0.024	悬浮物	6.8	1.6	0.288
水深	5.6	2.7	0.026	叶绿素 a	5.5	1.0	0.386

2.3.2　冰封期营养盐分布驱动因素　基于冗余分析,以氨氮和硝酸盐氮通量为响应变量,环境因子为解释变量,进一步分析环境因子对营养盐交换通量重要性,分析前需对环境因子进行多重共线性诊断[25],本研究以环境因子为自变量,交换通量为因变量,使用 VIF(方差膨胀因子)检验有较高 VIF 值的因子(VIF>10).冰封期筛除 ORP 和冰厚后,其余因变量 VIF 值降至 10 以下;冰封前因子筛除 pH 值和 ORP 后,其余因变量 VIF 值降至 5 以下,满足共线性控制标准.对剩余因子进行标准归一化处理后前向选择(Forward Selection),并采用蒙特卡洛置换检验评估各因子的显著性.

RDA 分析结果如表 3 和图 7 所示.冰封期 RDA1 和 RDA2 两轴解释率分别为 48.1%和 20.9%,能较好地反映出水环境因子与氮通量的相关关系.其中,冰封期冰增长率对氮盐通量有最高解释率(26.7%),其次为盐度(14.3%)和水温(10.4%).冰增长率和 F_{ice}−NH_3、F_{ice}−NO_3 夹角很小且方向一致,呈极显著正相关性(P<0.05).F_{sed}−NH_3 受水深和水温影响较大,分别呈极显著正相关和极显著负相关(P<0.01).冰封期前 RDA1 和 RDA2 两轴解释率分别为 50.3%和 41.4%.其中,溶解氧对氮盐通量有最高解释率(35.7%).其次为盐度(28.3%)和水温(7.7%).冰封期前 pH 值分别与 F_{sed}−NH_3 和 F_{sed}−NO_3 呈正相关和显著正相关(P<0.05),水深与 F_{sed}−NH_3 和 F_{sed}−NO_3 显著负相关(P<0.05).



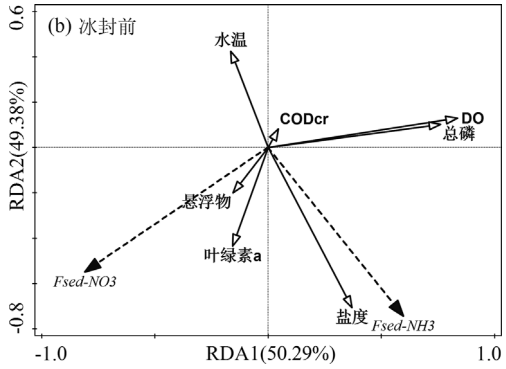


图 7 冰封期和冰封前氮通量与环境因子的 RDA 排序

Fig.7 RDA ordination diagram of nitrogen fluxes and environmental factors during ice-covered and pre-freezing periods

冰-水界面氨氮和硝酸盐氮通量分别用 F_{ice}-NH_3 和 F_{ice}-NO_3 表示,沉积物-水界面氨氮和硝酸盐氮通量分别用 F_{sed}-NH_3 和 F_{sed}-NO_3 表示.

3 讨论

3.1 冰-水-沉积物界面氮时空分布规律

上层冰体直接受大气和光照影响而热交换作用显著,在光照下易融化和升华,持续发生冻结-融化循环,使得冰体内卤水泡密度减少,而盐分将继续保留在冰体内,进而导致冰体上层营养盐浓度较中层更高.岱海水体盐度远高于近纬度寒区湖泊乌梁素海(2.40g/L)、南海(1.68g/L)和呼伦湖(2.50g/L),能产生更多的卤水通道[26],使其冰盖呈现不透明乳白色.卤水通道间接增大了营养盐从水体到冰体的通量.在冰封后期形成的下层冰将比前中期形成的冰体更加疏松.同时,随着冰下水体营养盐浓度的升高,冰体的析出作用逐渐减弱[27-28],因此在冰封中后期,下层冰内营养盐浓度高于冰封中期[29].硝酸盐氮分离系数远低于总氮和氨氮,其冻结浓缩作用更强.冰体内硝酸盐氮的显著迁移及排出过程,使其在总氮冻结浓缩过程中占据主导地位.因此一定程度增长水体内 10~1 月再到 2 月硝酸盐氮占比升高的贡献率,硝酸盐氮被排除冰体的过程变相增大了有机氮在冰体所占的比例.

岱海湖心处有最大水深,冰层覆盖下水体受扰动影响小且易形成厌氧环境,使湖心区内源释放强度大于浅水区,湖心区沉积物 TN 含量高达 2.79g/kg.一般而言,上层冰体不随冰下水体接触,营养盐浓度随时间变化差异较小,而 1 月和 2 月冰下水体浓度不同,导致冰与水界面的浓度梯度也发生改变,直接影响下层冰的冻结浓缩效应,因此冰体的平均浓度变化更多受下层冰浓度控制.10 月氮营养盐浓度平面分布相对平衡,太阳对表层水体的直射则促进了布朗运动,同时风浪扰动对水体混合作用较强,溶质扩散比较均匀.1 月和 2 月的下层水相对于上层和中层水呈现较大的空间异质性.10 月份冰封期临近,入湖水量减少,流速减缓,水体中大量植物枯萎,动植物残体沉积在湖底被逐步分解,沉积物中有机质输入较高.硝酸盐氮更易被沉积物吸附或通过反硝化作用转化为气态氮(N_2 或 N_2O)逸散到大气中[30].非冰封期(10 月)水温较高,河流中的浮游植物和微生物活性较强,对硝酸盐氮的吸收和利用速率较高,部分硝酸盐氮转化为有机氮,导致其占比降低.

3.2 冰-水-沉积物界面氮源汇特征

冰封期湖泊表面结冰,体下水体受表面风浪扰动作用显著减少,水体混合程度降低,相比非冰封期水体中水温、溶解氧、盐度等更容易出现垂直分层现象[23],紊流造成的水平迁移影响较低,沉积物-水界面的静态扩散作用成为主导机制.一般将沉积物向上覆水中释放污染物称为“源”,反之为“汇”.

10 月和 1 月氨氮由沉积物向水体中转移,而 1 月相比 10 月水体中氨氮浓度仍然有所降低,推测冰封初期硝化反应可能比矿化反应更加剧烈.冰封中后期水体中溶解氧无法得到补充而浓度降低,硝化反应逐渐减弱,而矿化反应仍可以持续进行,同时,有机氮在 1 月~2 月水体中的占比逐渐走低,因此,2 月水体中氨氮浓度转为增长趋势.岱海、查干湖和乌梁素海属于北方寒区湖泊,与岱海不同,冰封期查干湖中氨氮和硝酸盐氮呈现从上覆水到沉积物“汇”的趋势.乌梁素海属于草藻型淡水湖泊,其冰封期沉积物间隙水中氨氮含量远高于上覆水[17],与岱海类似,氨氮有内源向上扩散的趋势,乌梁素海和岱海均为同一纬度,均存在不同程度的内源污染和富营养化的问题.当不考虑有效态氮盐间转化作用,从 fick 扩散定律来看,10 月、1 月和 2 月水体中硝酸盐氮平均浓度均高于间隙水,而随着冰生长期冰厚增加,硝酸盐氮有更高的分离系数,共同造成了硝酸盐氮由冰-水和水-沉积物的转移趋势.

为比较冰-水通量和沉积物-水通量对营养盐浓度的影响,计算各营养盐冰-水通量与沉积物-水通量绝对值之比.1 月和 2 月总氮冰-水通量是对应

沉积物-水通量的 9.65 倍和 4.60 倍;1 月和 2 月氨氮冰-水通量是对应沉积物-水通量的 3.34 倍和 0.61 倍;1 月和 2 月硝酸盐氮冰-水通量是对应沉积物-水通量的 85.60 倍和 9.57 倍.可以看出,仅 2 月氨氮通量比<1,其余时间氮通量之比均>1,特别是 1 月硝酸盐氮冰-水通量远高于沉积物-水通量.氨氮通量仅在冰封中后期受沉积物的影响更大.总体而言,总氮、氨氮在冰-水交换通量对营养盐浓度的影响高于沉积物-水交换通量的影响,且 1 月的影响高于 2 月.岱海平均水深约为 4.0m,远高于乌梁素海(1.6m)[23],且最大冰厚与乌梁素海接近,则单位面积冰下水体的冻结浓缩效应相对更弱,拉低了冰-水通量对水体中营养盐含量的贡献率.

3.3　冰封期氮交换通量的影响因素探究

冰增长率是影响冰-水界面氨氮和硝酸盐氮通量的重要因素,在持续低温作用下岱海冰盖厚度增加,同时盐分被浓缩于水体中.在结冰速率等同等条件下,这一浓缩迁移速率受营养盐种类而产生一定差异,直接表现为冰-水通量及分离系数的不同.冰增长率与冰-水通量呈线性正相关性,可直接用于冰-水通量的计算.在冻结排盐作用下岱海盐度从冰封前的16.8g/L 大幅升高到冰封中后期的18.9g/L,并向下层水体沉降,上覆水和沉积物间隙水间盐分浓度差扩大而存在“汇”的趋势.硝化菌受盐度影响而呈现不同的代谢机理,其在中等盐度(10.0~20.0g/L)下代谢最佳,盐度超过20.0g/L 表现为抑制作用[31].进而对氮营养盐内源扩散产生影响.异化硝酸盐还原在高盐环境中更受青睐[32],岱海盐度远高于乌梁素海,其水体所冻结形成的冰体所含卤水泡数量更多,随冰盖厚度增加其透光率逐渐降低,必然抑制浮游植物和水生植物的光合作用,导致初级生产力下降和水体溶解氧浓度降低,减少氨氮向硝酸盐氮的硝化作用.在实测中岱海 1 月冰下水体中溶解氧平均含量为(10.2±1.2)mg/L,冰封初期水体中接收到更多 PAR(光合有效辐射),光合作用产氧强烈,硝化反应并未受到限制甚至可达过饱和态,这也使氮营养盐通量对溶解氧并不敏感.温度直接调控微生物的代谢速率、酶活性、扩散过程和氧气溶解度.岱海冰下水温介于(-2~4°C)之间,低于 10°C 可使微生物活性受到抑制.沉积物间隙水中有机氮随时间累积,表明矿化作用不受限制,同时促进 F_{sed}-NH_3 增加,这一过程消耗溶解氧,而低温下溶解氧浓度和饱和度升高,促使水温对于沉积物-水间氨氮通量均呈负相关.乌梁素海底层沉积物呼吸作用强烈,呼吸作用释放大量热,在冰封后期使得底层水温维持在 4 °C 以上的较高水平,由于水位相对更浅,同期波动和回暖速度高于岱海(0~3 °C)[23],综合影响下岱海硝化速率小于乌梁素海,岱海沉积物-水界面硝酸盐氮通量更易往“汇”的趋势进行.

4　结论

4.1　冰、水和沉积物内转化态氮分别以氨氮、硝酸盐氮和有机氮为主,空间分布总体呈中高东低的特点.1~2 月水体中总氮、氨氮和硝酸盐氮浓度分别上升 18.89%、17.71%和 49.72%,硝酸盐氮占总氮比例升高.

4.2　冰封期分离系数排序为硝酸盐氮<总氮<氨氮,硝酸盐氮也是冰-水界面总氮迁移的主要成分.沉积物是水中总氮和氨氮重要的“源”,对硝酸盐氮浓度主要起“汇”的作用.相较于沉积物-水界面的内源释放,冰-水界面冻结排盐对岱海水体营养盐浓度影响更大.

4.3　冰封前氮营养盐通量主要受沉积物-水界面溶解氧(35.7%)和盐度(28.3%)调控,冰封期氮营养盐通量主要受冰增长率(26.7%)直接驱动及盐度(14.3%)、水温(10.4%)等因素间接影响.

参考文献:

[1] Grant L, Vanderkelen I, Gudmundsson L, et al. Attribution of global lake systems change to anthropogenic forcing [J]. Nature Geoscience, 2021,14(11):849-854.

[2] Li F, Jiang X, Cui C. Thermal structure and response on local climate and hydrological changes in a reservoir with an icebound season [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2020,31:48-61.

[3] Kalinowska K, Napiórkowska-Krzebietke A, Bogacka-Kapusta E, et al. Comparison of ice-on and ice-off abiotic and biotic parameters in three eutrophic lakes [J]. Ecological Research, 2019,34(5):687-698.

[4] Huang W, Zhang Z, Li Z, et al. Under-ice dissolved oxygen and metabolism dynamics in a shallow lake: The critical role of ice and snow [J]. Water Resources Research, 2021,57(5):e2020WR027990.

[5] Caldwell T J, Chandra S, Feher K, et al. Ecosystem response to earlier ice break-up date: Climate-driven changes to water temperature, lake-habitat-specific production, and trout habitat and resource use [J]. Global Change Biology, 2020,26(10):5475-5491.

[6] Salt D E, Pickering I J, Prince R C, et al. Metal accumulation by aquacultured seedlings of indian mustard [J]. Environmental Science & Technology, 1997,31(6):1636-1644.

[7] Pieters R, Lawrence G A. Effect of salt exclusion from lake ice on

seasonal circulation [J]. Limnology and Oceanography, 2009,54(2): 401−412.

[8] 张 岩,李畅游,Tao S H,等.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, 2013,24(5):728−735.
Zhang Y, Li C Y, Tao S H, et al. Total nitrogen migration in Wuliangsuhai Lake during ice growth process [J]. Advances in Water Science, 2013,24(5):728−735.

[9] Zhang X F, Mei X Y. Effects of benthic algae on release of soluble reactive phosphorus from sediments: a radioisotope tracing study [J]. Water Science and Engineering, 2015,8(2):127−131.

[10] 李乾岗,田 颖,刘 玲,等.水体中沉积物氮和磷的释放机制及其影响因素研究进展 [J]. 湿地科学, 2022,20(1):94−103.
Li Q G, Tian Y, Liu L, et al. Research progress on release mechanisms of nitrogen and phosphorus of sediments in water bodies and their influencing factors [J]. Wetland Science, 2022,20(1):94−103.

[11] Prowse T D. River−ice ecology. i: hydrologic, geomorphic, and water−quality aspects [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2001,15(1):1−16.

[12] Callender E, Hammond D E. Nutrient exchange across the sediment−water interface in the Potomac River estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1982,15(4):395−413.

[13] 范中亚,王文才,蒋锦刚,等.华阳河湖群沉积物内源磷释放风险及控制策略 [J]. 环境科学研究, 2020,33(5):1170−1178.
Fan Z Y, Wang W C, Jiang J G, et al. Risk and control strategy of internal phosphorus release from sediments in Huayang Lakes [J]. Research of Environmental Sciences, 2020,33(5):1170−1178.

[14] 王洪伟,王少明,张 敏,等.春季潘家口水库沉积物−水界面氮磷赋存特征及迁移通量 [J]. 中国环境科学, 2021,41(9):4284−4293.
Wang H W, Wang S M, Zhang M, et al. Occurrence characteristics and transport fluxes of nitrogen and phosphorus at sediment−water interface of Panjiakou Reservoir in spring [J]. China Environmental Science, 2021,41(9):4284−4293.

[15] 谭立贤,康得军,刘 成,等.丘陵山区水库沉积物−水界面磷源汇转换机制 [J]. 中国环境科学, 2024,44(4):2137−2147.
Tan L X, Kang DJ, Liu C, et al. Mechanisms of phosphorus source−sink transformation across the sediment−water interface of a hilly and mountainous reservoir [J]. China Environmental Science, 2024,44(4):2137−2147.

[16] 朱胤泽,赵 可,董向前,等.冰封期湖泊沉积物−水界面氮磷迁移及源汇特征 [J]. 中国环境科学, 2023,43(7):3616−3624.
Zhu Y Z, Zhao K, Dong X Q, et al. Characterizing nitrogen and phosphorus transport and source−sink interactions at the lake sediment−water interface during the freezing period [J]. China Environmental Science, 2023,43(7):3616−3624.

[17] 姜 涛,张 生,赵胜男,等.冰封期乌梁素海沉积物−水界面氨氮的交换特征 [J]. 湖泊科学, 2019,31(1):81−87.
Jiang T, Zhang S, Zhao S N, et al. Exchange characteristics of ammonia nitrogen at the water and sediment interface during the ice−sealing period in Lake Ulansuhai [J]. Journal of Lake Sciences, 2019,31(1):81−87.

[18] Yang F, Cen R, Feng W, et al. Dynamic simulation of nutrient distribution in lakes during ice cover growth and ablation [J]. Chemosphere, 2021,281:130781.

[19] Hu S, Wang T, Xu S, et al. Accumulation characteristic of nitrogen in reservoirs during the ice−covered period under superimposed influence of ice and sediments: A case study of Biliuhe reservoir [J]. Environmental Pollution, 2022,312:120025.

[20] Krogseth I S, Whelan M J, Christensen G N, et al. Understanding of cyclic volatile methyl siloxane fate in a high latitude lake is constrained by uncertainty in organic carbon−water partitioning [J]. Environmental Science & Technology, 2017,51(1):401−409.

[21] He Y, Zhang Q, Wang W, et al. The multi−media environmental behavior of heavy metals around tailings under the influence of precipitation [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2023, 266:115541.

[22] 杨文焕,张晓学,姚 植,等.岱海沉积物营养盐时空分布特征及污染评价 [J]. 环境科学与技术, 2022,45(9):153−159.
Yang W H, Zhang X X, Yao Z, et al. Temporal and spatial distribution characteristics and pollution assessment of nutrients in sediments of Daihai Lake [J]. Environmental Science & Technology, 2022,45(9): 153−159.

[23] 李明亮,张明宇,姚 植,等.寒区典型湖泊冰封期溶解氧变化趋势及影响因素 [J]. 湖泊科学, 2024,36(6):1806−1820.
Li M L, Zhang M Y, Yao Z, et al. The trend of dissolved oxygen change and influencing factors of typical lakes in cold area during icecoverd period [J]. Journal of Lake Sciences, 2024,36(6):1806−1820.

[24] 周 靓,李维浩,石雅楠,等.船舶飞沫结冰研究综述 [J]. 舰船科学技术, 2022,44(10):1−5.
Zhou L, Li W H, Shi Y N, et al. Overview of foreign research on ship spray icing [J]. Ship Science and Technology, 2022,44(10):1−5.

[25] 孔祥志,李 巧,陈 婷,等.新疆奎屯河流域地下水中砷代谢相关微生物代谢特征及影响因素 [J]. 湖泊科学, 2025,37(5):1647−1660.
Kong X Z, Li Q, Chen T, et al. Metabolic characteristics and influencing factors of arsenic−metabolizing microorganisms in groundwater of the Kuytun River Basin, Xinjiang [J]. Journal of Lake Sciences, 2025,37(5):1647−1660.

[26] Timco G W, Weeks W F. A review of the engineering properties of sea ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010,60(2):107−129.

[27] Henley S F, Cozzi S, Fripiat F, et al. Macronutrient biogeochemistry in Antarctic land−fast sea ice: Insights from a circumpolar data compilation [J]. Marine Chemistry, 2023,257:104324.

[28] Granskog M A, Kaartokallio H, Shirasawa K. Nutrient status of Baltic Sea ice: Evidence for control by snow−ice formation, ice permeability, and ice algae [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2003,108 (C8).

[29] 高 宁,乔玲敏,张 岩,等.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, 2017,155(2):48−52.
Gao N, Qiao L M, Zhang Y, et al. Total phosphorus migration in Wuliangsuhai Lake during ice growth process [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2017,155(2):48−52.

[30] Ping X, Xian Y, Jin M. Effect of particulate organic carbon deposition on nitrate reduction in the hyporheic zone [J]. Water Resources Research, 2023,59(7):e2022WR034253.

[31] Zhou M, Butterbach−Bahl K, Vereecken H, et al. A meta−analysis of soil salinization effects on nitrogen pools, cycles and fluxes in coastal ecosystems [J]. Glob. Chang Biol., 2017,23(3):1338−1352.

[32] Giblin A E, Tobias C R, Song B, et al. The importance of dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA) in the nitrogen cycle of coastal ecosystems [J]. Oceanography, 2013,26:124−131.

作者介绍：侯晨丽(1992−),女,山西大同人,讲师,博士,主要从事水土环境污染控制与生态修复研究.发表论文 10 余篇.ndhcl202060030@163.com.