

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*

刘晓旭^{1,2}, 李畅游^{1**}, 李文宝¹, 赵胜男¹, 甄志磊¹, 刘志娇¹, 于瑞雪¹

(1: 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

(2: 内蒙古水务投资(集团)有限公司, 呼和浩特 010020)

摘要: 以内蒙古高原的达里诺尔湖为研究对象, 对其在冰封期湖水不同相态下总氮(TN)、总磷(TP)浓度以及氢、氧同位素比值的分布特征和定量关系进行初步研究。结果表明: 1) 在冰封期, 达里诺尔湖水体中营养盐的平均浓度相对较高, 已远超过国家V类水质标准。水体中TN、TP浓度均大于其在对应冰体中的浓度, 均值分别是对应冰体中的9.91、3.11倍, 说明低温冷冻过程对达里诺尔湖水体中的氮、磷具有浓缩效应。而通过与非冰封期的对比发现, 湖冰的排氮效应强于磷。2) 冰封期由于结冰过程中同位素热力学分馏明显, 加之贡格尔河的人流补给, 使得达里诺尔湖冰体中的氢、氧同位素比值远高于水体中的比值, 同时, 随冰层的加深, 同位素逐渐偏重。3) 冰封期达里诺尔湖水体及冰体中, 同位素比值与营养盐浓度均呈显著负相关, 水体的相关性较冰体要好, 在冰层中, 随着冰层的加深相关性越明显。利用SPSS统计软件分析发现同位素比值与营养盐浓度的相关关系显著, 水体中最大相关系数达到0.991, 冰体中达到0.988; 氢同位素(D)与TN、TP浓度的关系式分别为: $TN = -0.2825 \delta D - 6.0083$ 和 $TP = -0.0805 \delta D - 1.2395$, 这为研究湖泊营养盐的时空变化规律提供新的手段和理论。

关键词: 氢、氧同位素; 氮、磷; 冰封期; 相关关系; 达里诺尔湖

The distribution and relationship of isotope and nutrient during freeze-up period in the Lake Dalinuoer: A quantitative approach

LIU Xiaoxu^{1,2}, LI Changyou¹, LI Wenbao¹, ZHAO Shengnan¹, ZHEN Zhilei¹, LIU Zhijiao¹ & YU Ruixue¹

(1: College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, P. R. China)

(2: Inner Mongolia Water Industry Investment (GHroup) Limited Company, Hohhot 010020, P. R. China)

Abstract: This study aims at understanding the distribution characteristic and the correlativity of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), hydrogen isotope (D) and oxygen isotope (^{18}O) in ice layer and water during the freeze-up period in Lake Dalinuoer of Inner Mongolia. The results show that: 1) The Lake Dalinuoer water with high content of nutrient is even worse than the fifth level of water quality (Chinese standard) during freeze-up period. The concentrations of TN and TP in water are higher than those of in ice layer above the water during the freeze-up period. They are 9.91 times and 3.11 times in water higher than those of the ice layer, respectively. It is caused by the process of concentration effect on nitrogen and phosphorus when the lake water freezes up. It can be found that the interception content of nitrogen is relatively higher than phosphorus in the ice layer, comparing with the unfrozen period. 2) The effect of thermodynamic isotope fractionation and the inflow supplies of Gongger River together make that isotope content in ice much larger in water during freeze-up period. The isotope content is increasing from the top ice to the bottom one. 3) The content of isotopic and nutrient appears significantly negative correlation during the freeze-up period. The correlation relationship in water is stronger than that in ice, and bottom ice stronger than the top one. It was found that the closest correlation coefficients is 0.991 in lake water, and 0.988 in ice, calculated by SPSS software. The quantitative relationship between the content of isotope and nutrient (eg. the relationship function: $TN = -0.2825 \delta D - 6.0083$ and $TP = -0.0805 \delta D - 1.2395$) will

* 国家自然科学基金重点项(51339002)、国家自然科学基金项目(51469025)、内蒙古自治区重大科技项目(20091408)、内蒙古自然科学基金项目(2012MS0615)和西部地区博士后人才资助计划项目(2014M562495XB)联合资助。2014-09-26 收稿; 2015-03-09 收修改稿。刘晓旭(1991~), 女, 硕士研究生; E-mail: 15848130960@163.com.

** 通信作者; E-mail: nmdlichangyou@163.com.

provide a new method for studying temporal and spatial variation of nutrient content in the lake.

Keywords: Hydrogen and oxygen isotope; nitrogen; phosphorus; freeze-up period; correlation relationship; Lake Dalinuoer

中国寒旱区的湖泊,不仅是历史气候变迁的重要指示器和环境变化研究的切入点,而且是寒旱区水循环的重要环节和不可缺失的构成部分.加之气候和环境等因素,北方的寒旱区湖泊具有明显的地域特性.认识和研究寒旱区湖泊,不仅是服务国计民生的急需,而且是丰富湖泊学科内容、拓宽学科领域之必需^[1].近年来,人类活动推动了流域氮、磷营养盐输移的快速发展,使浮游藻类异常繁殖,很多淡水湖泊由草型湖泊快速转变为藻型湖泊,湖泊生态平衡遭到破坏.因此,研究氮、磷营养盐对改善湖泊生态具有重要的意义^[2].目前为止,对水体氮(N)、磷(P)、碳(C)、有机物等研究都是在非冰冻条件下进行的,如东湖、巢湖、太湖等湖泊水体富营养化及有机物污染的研究^[3-5],而冰封期湖泊研究也仅集中在湖泊水位与面积变化的气候因素分析上^[6],进一步对冰封条件下冰体-水体间营养盐的分布特征及相互关系的研究则更加少见^[7].随着对稳定同位素分馏效应认识的深入以及同位素分析技术的发展,氢、氧同位素作为理想的天然示踪剂能有效应用于湖泊研究中.目前,湖泊氢、氧稳定同位素的研究多集中在讨论补给关系^[8-10]及同位素质量平衡的应用上^[11-13].湖泊中同位素分馏效应有较多体现^[14-16],而湖泊结冰过程中的分馏效应却涉及的很少.虽然,已有研究利用碳、氮稳定同位素技术指示出外源输入对生态系统影响的可行性^[17-20],建立湖水盐度与同位素的定量关系式^[21],并探究夏季同位素与各离子的相关关系^[22-23],但是对冰封期湖泊同位素水-冰分布特征以及与营养盐浓度变化之间相互关系、湖泊水-冰中营养盐浓度分布特点的研究却很少.

达里诺尔湖(简称达里湖),位于内蒙古自治区赤峰市克什克腾旗境内.本文以内蒙古达里湖为研究对象,通过研究湖泊冰封期总氮(TN)、总磷(TP)以及氢同位素(D)、氧同位素(¹⁸O)在冰层和水体中的分布特征,并对冰封期的TN、TP浓度与 δD 、 $\delta^{18}O$ 的关系进行相关分析.将首次通过湖泊冰封期 δD 、 $\delta^{18}O$ 的分布特征指示湖泊水-冰中营养盐的分布特点,这将为今后研究湖泊冰封期营养盐分布的变化规律提供基础理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

达里湖(43°12'~43°24'N,116°24'~116°56'E)位于内蒙古自治区赤峰市克什克腾旗西部,南临浩瀚的浑善达克沙地,是我国北方典型的寒旱区湖泊之一.受季风性气候影响,降水主要集中在夏季6~8月,多年平均降雨量为400~500 mm,蒸发量为1500~1600 mm.现有水域面积约190 km²,且湖水由西向东逐渐变浅,从约12 m逐渐减少为1~2 m.湖水偏碱性,年平均pH值为8.52,部分河段有时高达9.82^[24].在矿化程度方面,其水体中主要含有Na⁺与K⁺等.受湖水pH值等因素影响,湖泊中鱼类种群简单,主要有瓦氏雅罗鱼(*Leuciscus waleckii*)和鲫鱼(*Carassius auratus*).克什克腾旗境内的贡格尔河、亮子河、沙里河、浩来河4条河流流入达里湖,河流流量小,泥沙少,达里湖的水系构成比较简单,便于开展各项科学研究.

1.2 样品的采集

根据达里湖的面积、水深及入湖河口位置的分布特征,结合研究目的,本文采用全球定位系统定位,在湖区布设10个采样点(图1),并于2012年12月在冰冻的湖面上破冰钻孔采集冰样和冰下水样,测量湖水深和冰的厚度.采集冰样时,在破冰的过程中尽量保持冰块完整,收集15、35、65 cm处的冰块到样品瓶中,采样前样品瓶均事先用原水反复润洗多次.用深水采样器采集冰面下和湖底处水样,并立即用封口膜密封在500 ml的聚乙烯瓶中,避免因蒸发而引起同位素分馏.同位素样品在测定之前经0.45 μm的滤膜过滤.

1.3 样品的分析方法

稳定氢、氧同位素比值 δD 、 $\delta^{18}O$ 采用美国LGR公司LMIA-V2(DLT-100)液态水同位素分析仪测定(DZ/T 0184.19-1997),精确度(1 σ):¹⁸O/¹⁶O优于0.1‰,D/H优于0.3‰.总氮(TN)、总磷(TP)浓度分别用碱性过硫酸钾和钼酸铵消解后,用U-2001紫外可见分光光度计测定(GB 11894-1989)^[25].

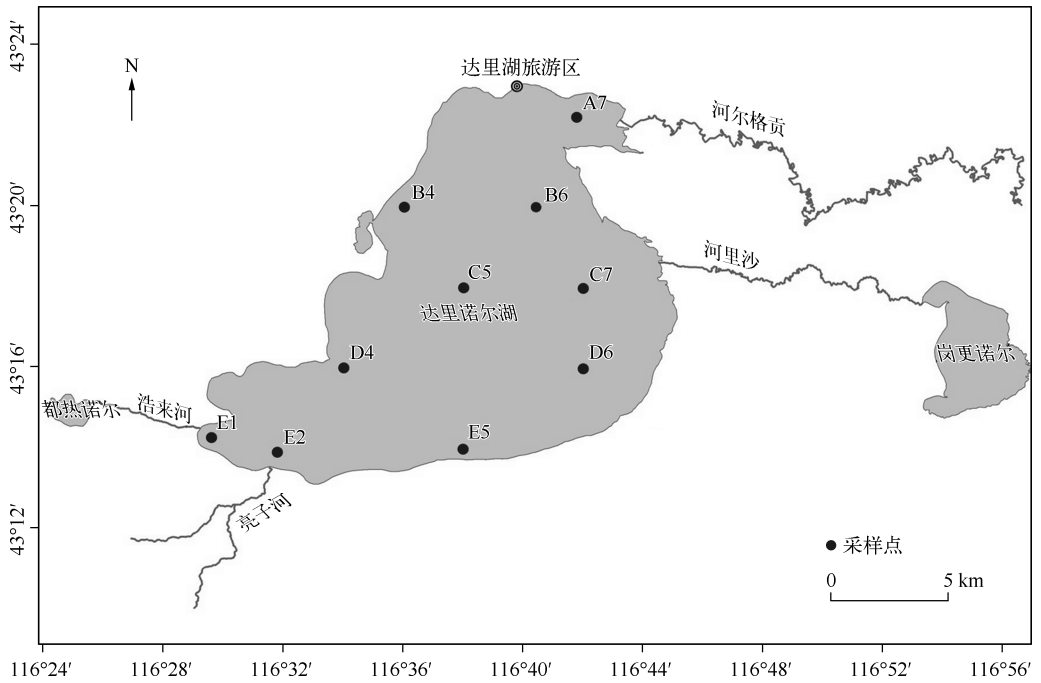


图 1 达里湖采样点位置

Fig. 1 The location of water sampling sites in Lake Dalinuoer

2 结果

2.1 营养盐在不同相态水中浓度的分布

N、P 的形态、浓度、空间分布及季节性变化规律主要受湖泊水体输入和其转化过程的影响,因此湖泊水体中 N、P 形态和浓度存在着有迹可循的时空变化特征^[26-27]. 通过对水体及不同冰层冰体中的营养盐浓度(冰体中营养盐浓度取 3 个冰层的平均值)进行测定,发现 TN 或 TP 浓度在达里湖水的 2 种相态中变化规律相似,并且 2 种营养盐在冰中的浓度明显低于对应其在水中的浓度, TN 浓度在冰体-水体 2 相中的差异尤为明显(图 2). 在水的同一相态角度观察, TN 和 TP 浓度的空间变化趋势基本一致,其浓度出现的极值点也一致.

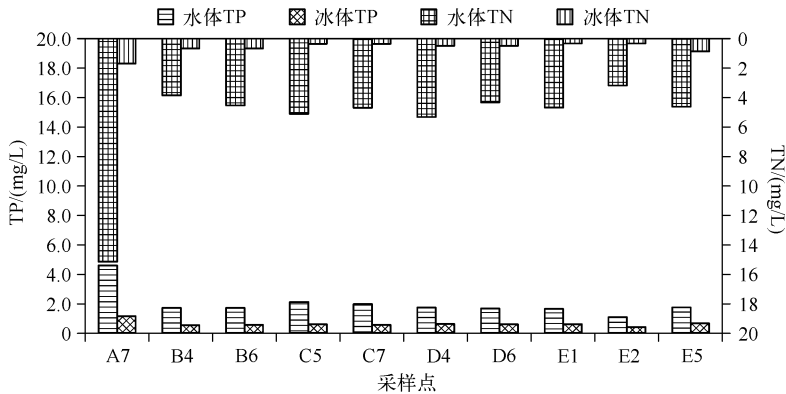


图 2 达里湖内营养盐在水的不同相态中的浓度对比

Fig. 2 The comparison of nutrient concentrations within ice and water in Lake Dalinuoer

在水体中, TN 浓度范围为 3.14 ~ 15.14 mg/L, 各点浓度均值为 5.51 mg/L; TP 浓度范围为 1.10 ~ 4.66 mg/L, 各点浓度均值为 2.02 mg/L. 在冰体中, TN 浓度范围为 0.25 ~ 1.69 mg/L, 各点浓度均值为 0.57 mg/L; TP 浓度范围为 0.45 ~ 1.15 mg/L, 各点浓度均值为 0.65 mg/L. 在冰体与水体中, 位于达里湖北部的 A7 点 TN、TP 浓度均最高, 与其他点相差较大.

2.2 同位素在不同相态水中比值的分布

由蒸发、凝聚、降落和径流等过程所形成的水体, 因形成条件不同而具有不同的同位素特征^[28]. 通过对达里湖不同冰层和水体中的 δD 、 $\delta^{18}O$ 进行测定(图 3)发现, δD 或 $\delta^{18}O$ 在水的 2 种相态中变化规律相似, 并且 2 种同位素在水体中的比值明显低于对应其在冰体中的比值. 在湖水的同一相态角度观察, δD 和 $\delta^{18}O$ 的空间变化趋势也基本一致, 其比值出现的极值点也一致.

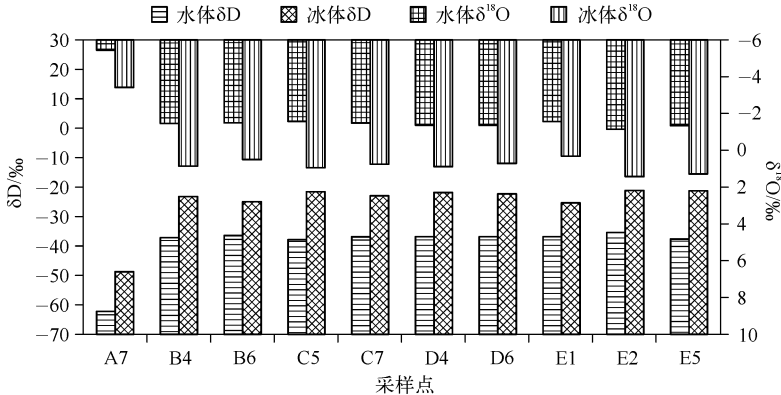


图 3 达里湖内同位素在水的不同相态中的比值对比

Fig. 3 The comparison of isotope content within ice and water in Lake Dalinuer

在水体中, δD 变化范围为 $-62.19\text{‰} \sim -34.99\text{‰}$, 各点均值为 -39.04‰ ; $\delta^{18}O$ 变化范围为 $-5.52\text{‰} \sim -1.21\text{‰}$, 各点均值为 -1.89‰ . 在冰体中, δD 变化范围为 $-48.49\text{‰} \sim -20.90\text{‰}$, 各点均值为 -24.98‰ ; $\delta^{18}O$ 变化范围为 $-3.50\text{‰} \sim 1.35\text{‰}$, 各点均值为 0.36‰ . 位于达里湖北部的 A7 点的 δD 、 $\delta^{18}O$ 均最小, 且与其他点相差较大, 这一规律与营养盐恰好相反.

3 讨论

3.1 水体与冰体中营养盐浓度与同位素比值的分布特征

达里湖湖泊水体中, TN 与 TP 浓度的空间分布规律基本相同, δD 与 $\delta^{18}O$ 的空间分布规律也一致, 而营养盐浓度与同位素比值之间呈现相反的分布规律. 位于达里湖北部的 A7 点, 营养盐浓度与同位素比值相对其他点均出现明显差异(图 2, 图 3). A7 点 TN、TP 浓度分别为其余采样点的 3.14、2.69 倍, δD 、 $\delta^{18}O$ 分别比其余点小 1.71、5.43 倍. A7 点靠近北岸旅游景区, 受人为因素影响比较大, 污染较重; 此处生长有很多水草, 冬季水草死亡腐烂释放 N、P^[29], 冰封期过低的水温直接影响到微生物的降解作用, 加之表面有冰层的覆盖, 使自然曝气形成的复氧过程几乎完全停止, 溶解氧浓度处于最低值; 该点冰厚 0.92 m, 水深只有 2.08 m (表 1), 与湖区其他区域相比, 冰厚相差不大而水深较浅, 该点湖水的冷冻浓缩效应较大. 因此 A7 点营养盐浓度明显高于其他点. 同时, 通过水样同位素测试发现 A7 点的 δD 和 $\delta^{18}O$ 非常低, 此处为达里湖的淡水补给河流——贡格尔河的入湖口, 该河流对达里湖的补给量占河流补给总量的 75%, 较低的贡格尔河水同位素比值是 A7 点同位素比值较其他采样点小的主要原因(河水进入湖泊后长期蒸发浓缩, 湖水 δD 、 $\delta^{18}O$ 会明显高于河水).

达里湖冰体中营养盐浓度及同位素比值的分布规律不仅与水体中的变化规律相似, 而且出现的极值点也吻合, 这说明结冰时水体并没有受到太大的扰动.

表1 达里湖各采样点冰厚及水深

Tab.1 The depth of water and the thickness of ice at each sampling site in Lake Dalinuoer

	A7 点	B4 点	C5 点	C7 点	D6 点	E1 点	E2 点	E5 点
冰厚/m	0.92	1.01	0.93	1.01	1.21	0.90	1.06	1.10
水深/m	2.08	5.79	7.57	6.29	5.79	7.20	8.44	6.70

营养盐在水体和冰体中的浓度表现出明显差异(图4). 水体中 TN、TP 浓度均值分别为 5.51、2.02 mg/L, 冰体中 TN、TP 浓度均值分别为 0.57、0.65 mg/L, 水体中 TN、TP 浓度均大于其在对应冰体中的浓度, 分别是其对应冰体中的 9.91、3.11 倍. 这表明营养盐浓度水体高于冰体, 湖水中的营养盐在结冰过程中由冰体向水体迁移^[30]. 结晶学理论认为, 在过冷过程中, 水体表层温度聚冷, 使该层的营养盐溶解度降低, 随着温度下降, 部分营养盐快速析出, 增大形成临界尺寸冰核的可能性, 促使水体异相成核并加快冰层的形成^[31-33]. 水分子浓度远低于整个液相中的水分子浓度, 营养盐的分子浓度则远高于整个液相中的营养盐分子浓度. 在浓度差的推动下, 液相中的水分子向固液界面处扩散, 固液界面处的营养盐分子向液相扩散^[34]. 张岩等^[35]运用固-液相平衡理论、结晶学理论和热力学理论对呼伦湖冰封期污染特性进行过分析, 本研究发现, 这种低温冷冻过程对水体污染物的浓缩效应在达里湖也有明显体现. 通过与呼伦湖的对比发现, 呼伦湖水体中的 TN、TP 浓度均值分别是其对应冰体中的 3.14、2.20 倍, 而达里湖水体与冰体的 TN、TP 浓度差值远大于呼伦湖, 表明春季达里湖比呼伦湖更容易暴发藻类水华. 此外, 达里湖的 TN 浓度最高为 15.14 mg/L, TP 浓度最高为 4.66 mg/L, 已经远超过国家 V 类水标准^[36], 达里湖的水生态治理亟待关注.

TN 在水体中的浓度是其对应冰体中的 9.91 倍, 比 TP 浓度水体-冰体倍数高 3 倍. 表现为结冰过程中, 冰体对 N 的影响要高于 P. 为证明此现象, 对非冰封期的 TN、TP 浓度进行测定, 发现达里湖冰封期水体中的 TN 浓度要大于非冰封期, 而 TP 浓度基本与夏季保持一致, 说明结冰过程中, 湖水的排 N 效应强于 P.

相似的, 达里湖同位素比值在冰体-水体中也呈显著差异(图4). 水体中各点 δD 的平均值为 -39.03‰ , $\delta^{18}O$ 的平均值为 -1.89‰ ; 冰体中各点 δD 的平均值为 -24.98‰ , $\delta^{18}O$ 的平均值为 0.36‰ . 水体中 δD 、 $\delta^{18}O$ 均小于其在冰体中的比值, 这一现象恰好与营养盐冰体-水体中的浓度特征相反. 对 15、35、65 cm 不同厚度冰层的同位素比值进行分析, 表明 3 层冰体中的 δD 平均值分别为 -26.20‰ 、 -24.60‰ 、 -24.13‰ , $\delta^{18}O$ 平均值分别为 0.13‰ 、 0.37‰ 、 0.59‰ . 其中, A7 点的 δD 垂向分布分别为 -50.22‰ 、 -47.72‰ 、 -47.53‰ , $\delta^{18}O$ 分别为 -3.84‰ 、 -3.42‰ 、 -3.23‰ . 由于 A7 点同位素比值的特殊性, 剔除 A7 点, 各点冰层中垂向 δD 平均值分别为 -23.53‰ 、 -22.03‰ 、 -21.53‰ , $\delta^{18}O$ 平均值分别为 0.57‰ 、 0.79‰ 、 1.01‰ . 分析显示, 随着冰层深度的增加同位素逐渐偏重. 进入冬季, 由于湖水表面的热量损失, 当湖水温度下降至结冰点时, 进一步冷却会导致湖水过冷却形成冰晶并形成薄冰层. 随着固体冰盖表面热量交换, 在冰盖空隙中的水, 将会从水表面向下结冰, 这种热力生长将会超过冰盖的起始厚度而继续向下发展^[37]. 这个过程同位素热力学分馏, 导致较轻的同位素不断运移到冰下水体中, 中重同位素富集在冰中, 随着冰的生长, 冰层加厚, 同位素分馏继续, 越深层冰中富集的同位素越重. 其中, 分馏系数的大小与结冰速度、冰体结构以及平衡点有关. 进一步, 在冰封期, 贡格尔河仍以小流量流入达里湖, 为湖泊水体带入了较轻的同位素. 同时, 在冬季存在着直接来自湖面的微弱蒸发, 也对冰体-水体中同位素比值有一定影响. 这些作用使得冰封期冰体中的同位素比值高于水体, 且在冰层中随着冰厚加大, 富集的同位素越重.

3.2 同位素比值与营养盐浓度的相关性分析

对达里湖水体和冰体的测定结果分析发现, 水体和冰体中营养盐浓度和同位素比值在湖泊不同位置都有显著差异, 且同一位置同位素比值与营养盐浓度呈显著负相关. 由于受到河水输入的影响, A7 点冰体和冰体中的 δD 、 $\delta^{18}O$ 较其余采样点明显偏负, 其余采样点之间 δD 、 $\delta^{18}O$ 变化范围都比较小. 因此, 剔除 A7 点对营养盐浓度与同位素比值的相关关系进行分析(表2).

对冰封期达里湖的水体及冰体的同位素比值与营养盐浓度用 SPSS 统计软件做相关分析和显著性分析, 发现在冰体中, 同位素比值与营养盐浓度呈一定的负相关关系, 且随着冰层加深相关性增强. 在 65 cm 的冰层中相关系数达到 0.988, 剔除 A7 点后达到 0.769. 在水体中, 同位素比值与营养盐浓度的相关性较冰体

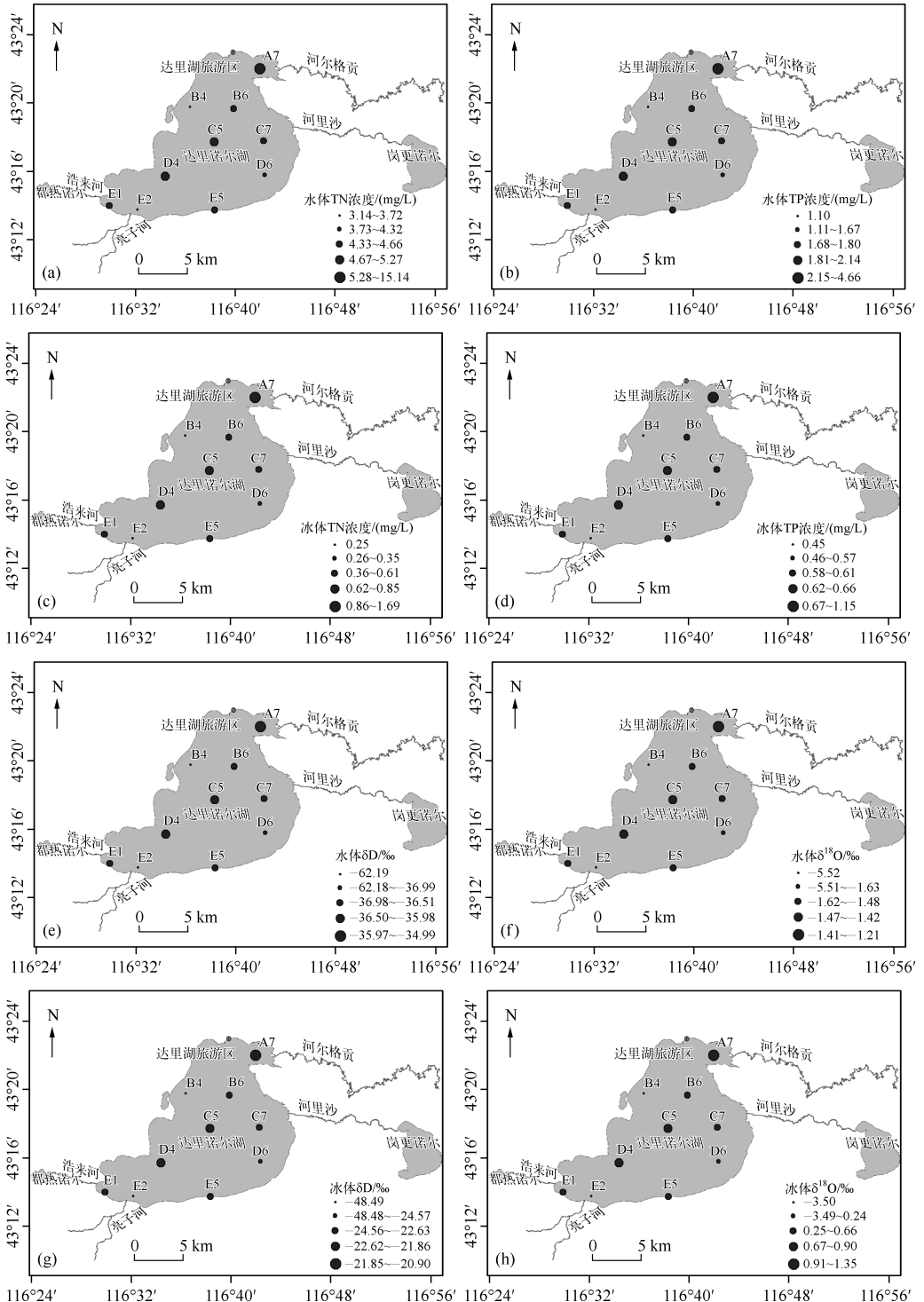


图4 达里湖水体与冰体中营养盐浓度及同位素比值分布示意

Fig. 4 The distribution characteristics of nutrient concentrations and isotope content within water and ice in Lake Dalinuoer

更好,均在 0.01 水平(双侧检验)上显著相关,相关系数均达到 0.97 以上,剔除 A7 点后,相关系数基本达到 0.7 以上.对水体与冰体的数据共同作相关分析发现,营养盐浓度与同位素比值呈显著负相关,相关系数均达到 0.8 以上,剔除 A7 点后相关系数均达到 0.9 以上.通过比较发现 δD 与营养盐浓度的相关关系比 $\delta^{18}O$ 要好,可以得到 δD 与 TN、TP 浓度的关系分别为 $TN = -0.2825 \delta D - 6.0083$ 和 $TP = -0.0805 \delta D - 1.2395$.

已有研究发现,夏季内蒙古河套平原湖泊的氢、氧同位素组成与离子浓度、矿化度等水化学指标存在显著相关性^[22],由于夏季湖泊蒸发过程中存在明显的同位素分馏^[38],相应的离子浓度也浓缩增大,使得水体水化学指标与同位素比值呈正相关关系.在塔吉克斯坦湖泊水体中也发现了相似的相关性^[23].冰封期的达里湖,由于冰体的冷冻浓缩效应导致冰下水体中营养盐浓度升高,同时,结冰过程的同位素热力学分馏使得中重同位素富集在冰中.因此,在湖水静止且分布均匀条件下,结冰厚度越大的区域,冰下水体中的同位素比值越负,营养盐浓度越大,冰下水体的氢、氧同位素比值与营养盐浓度存在负相关关系,且相较冰体来说相关性更好.在冰生长过程中,由于同位素分馏作用,随着冰厚增加同位素越来越富集,由于冰生长速率与能量梯度作用下营养盐在冰体内部迁移,导致营养盐随冰厚增加浓度越来越小^[39],因此冰体中也存在负相关关系,且结冰厚度越深相关关系越明显.利用同位素比值与营养盐浓度在冰-水以及冰体中的反相关关系,

不仅可以尝试以环境同位素来指示 N、P 的变化趋势及分布情况,同时拓展了氢、氧同位素比值作为水体示踪剂的用途^[40],对预测水质变化、进行水质评价及达里湖的生态治理具有重要意义.

4 结论

通过对达里湖内营养盐浓度和氢、氧同位素比值在水的不同相态中的变化规律进行研究,利用统计学方法,得到冰封期达里湖水的不同相态中营养盐浓度和氢、氧同位素比值的变化特征以及它们之间的定量关系,具体结论如下:

1) 冰封条件下,达里湖水体中 TN、TP 浓度均值分别为 5.51、2.02 mg/L,分别是其对应冰体中 TN(0.57 mg/L)和 TP(0.65 mg/L)浓度均值的 9.91、3.11 倍,湖水中污染物在结冰过程中由冰体向水体迁移,表明低温冷冻过程对达里湖水体中的 N、P 有浓缩效应.通过与非冰封期对比分析可知,达里湖冰封期水体中的 N 浓度要大于非冰封期,而 P 浓度基本与夏季保持一致,说明结冰过程中,冰体的排 N 效应强于 P.

2) 在与呼伦湖的对比后发现,达里湖营养盐的平均浓度远高于呼伦湖,且湖内营养盐浓度已远超过国家 V 类水质标准.贡格尔河的入湖口处受人为影响严重,加之工业污水与生活废水的排入造成污染,严重影响整个湖泊的水质.达里湖地区的水环境不应只靠夏季湖水的自净能力,水生态治理亟待解决.

3) 冰封条件下,达里湖冰体中 δD 、 $\delta^{18}O$ 均值分别为 -24.98‰ 、 0.36‰ ,高于其在水体中的对应均值(分

表 2 冰封期达里湖 δD 、 $\delta^{18}O$ 与 TN、TP 浓度的相关性分析

Tab. 2 The correlation analysis between δD , $\delta^{18}O$ and TN, TP concentrations during the freeze-up period in Lake Dalinuoer

水相	指标		相关系数	相关系数 (剔除 A7 点)	
	x/ ‰	y/ (mg/L)			
水体	δD	TN	-0.989 **	-0.568	
		TP	-0.977 **	-0.866 **	
	$\delta^{18}O$	TN	-0.991 **	-0.710 *	
		TP	-0.978 **	-0.809 **	
冰体	15 cm	δD	TN	-0.181	-0.398
		TP	-0.640 *	-0.325	
	$\delta^{18}O$	TN	-0.083	-0.114	
		TP	-0.591	-0.325	
	35 cm	δD	TN	-0.571	-0.558
		TP	-0.783 **	-0.446	
	$\delta^{18}O$	TN	-0.585	-0.315	
		TP	-0.787 **	-0.422	
	65 cm	δD	TN	-0.988 **	-0.370
		TP	-0.976 **	-0.421	
	$\delta^{18}O$	TN	-0.949 **	-0.769 **	
		TP	-0.961 **	-0.642 *	
水体及冰体	δD	TN	-0.876 **	-0.969 **	
		TP	-0.892 **	-0.953 **	
	$\delta^{18}O$	TN	-0.865 **	-0.962 **	
		TP	-0.883 **	-0.948 **	

* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关.

别为 -39.03‰ 和 -1.89‰), 结冰过程中的同位素热力学分馏导致中重同位素富集在冰中, 同时, 贡格尔河的入流补给和冬季冰面微弱的蒸发影响使得达里湖冰体中的同位素比值高于水体。

4) 在冰封期, 由于冰体冷冻浓缩效应与同位素热力学分馏效应, 使得湖水同位素比值与营养盐浓度呈现明显的负相关关系; 在冰生长速率与能量梯度导致营养盐在冰体内部迁移的共同作用下伴随同位素分馏效应, 使得冰体中存在负相关关系, 且随着冰层加深, 相关关系越显著。水体中的相关关系较冰体更好, 冰体中相关系数最大达到 0.988, 水体中达到 0.991, 冰体与水体相关关系均达 0.8 以上。得到 δD 与 TN、TP 浓度的关系, 分别为 $TN = -0.2825 \delta D - 6.0083$ 和 $TP = -0.0805 \delta D - 1.2395$ 。利用这个关系, 同位素示踪剂可以成为一种证明和预测营养盐在冰-水、冰体中变化趋势的评价手段, 对水质监测和评价都具有重要的应用价值。

致谢: 感谢达里诺尔国家级自然保护区生态旅游有限公司在采样过程中给予的大力帮助。

5 参考文献

- [1] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊等. 论中国干旱区湖泊研究的重要意义. 干旱区研究, 2007, 24(2): 137-140.
- [2] 吴丰昌, 金相灿, 张润宇等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性. 湖泊科学, 2010, 22(1): 1-7. DOI 10.18307/2010.0101.
- [3] 甘义群, 郭永龙. 武汉东湖富营养化现状分析及治理对策. 长江流域资源与环境, 2004, 13(3): 277-281.
- [4] 张蕊. 基于藻类增长生物学评价试验的巢湖水华预警研究[学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2013: 6.
- [5] 成刚. 太湖氮营养盐的分布特征及区域差异性研究[学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [6] 丁永建, 刘时银, 叶柏生等. 近 50a 中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析. 冰川冻土, 2006, 28(5): 623-632.
- [7] 彭祥捷. 中国北方湖泊营养盐的迁移转化及富营养化风险分析——以长春南湖为例[学位论文]. 长春: 吉林大学, 2011: 12.
- [8] 陈建生, 季弼宸, 刘震等. 内蒙古高原岱海接受远程深循环地下水补给的环境同位素及水化学证据. 湖泊科学, 2013, 25(4): 521-530. DOI 10.18307/2013.0409.
- [9] 张华安, 王乃昂, 李卓仑等. 巴丹吉林沙漠东南部湖泊和地下水的氢氧同位素特征. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1623-1629.
- [10] 黄一民. 洞庭湖流域水循环中稳定同位素的变化特征及其影响机制研究[学位论文]. 长沙: 湖南师范大学, 2013: 12.
- [11] 刘忠方, 田立德, 姚檀栋等. 基于 $\delta^{18}O$ 的青藏高原中部错那湖湖水蒸发研究. 自然资源学报, 2009, 24(11): 2014-2023.
- [12] 巩同梁, 田立德, 刘东年. 羊卓雍湖流域湖水稳定同位素循环过程研究. 冰川冻土, 2007, 29(6): 914-920.
- [13] 高晶, 田立德, 刘勇勤等. 青藏高原南部羊卓雍错流域稳定同位素水文循环研究. 科学通报, 2009, 54(15): 2153-2159.
- [14] 包为民, 胡海英, 王涛等. 蒸发皿中水面蒸发氢氧同位素分馏的实验研究. 水科学进展, 2008, 19(6): 780-785.
- [15] 臧娅琳. 羊卓雍错流域水体氢氧稳定同位素时空变化特征研究[学位论文]. 重庆: 西南大学, 2014: 5.
- [16] 王杰, 王文科, 田华等. 环境同位素在三水转化研究中的应用. 工程勘察, 2007, (3): 31-39.
- [17] 曾庆飞, 孔繁翔, 毛志刚等. 稳定性氮同位素技术研究太湖梅梁湾区域营养盐差异. 农业环境科学学报, 2012, 31(4): 813-818.
- [18] 王伟伟. 长江口滩涂营养动态与稳定同位素指示研究[学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2011: 4.
- [19] 梁越. 鄱阳湖区蚌湖重金属及氮的生物地球化学与同位素示踪[学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2014: 6.
- [20] 林琳, 吴敬禄, 曾海鳌等. 人类活动对太湖水环境影响的稳定氮同位素示踪. 湖泊科学, 2012, 24(4): 546-552. DOI 10.18307/2012.0407.
- [21] 沈吉, 曹建廷. 岱海湖水盐度与氧同位素定量关系的建立. 第四纪研究, 2000, 20(2): 211.
- [22] 汪敬忠, 吴敬禄, 曾海鳌等. 内蒙古河套平原水体同位素及水化学特征. 地球科学与环境学报, 2013, 35(4): 104-112.
- [23] 曾海鳌, 吴敬禄. 塔吉克斯坦水体同位素和水化学特征及成因. 水科学进展, 2013, 24(2): 272-279.
- [24] 张玉, 王洪滨, 何江等. 内蒙古达里诺尔湖水水质现状调查. 水产科学, 2008, 27(12): 671-673.
- [25] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社

社,2002.

- [26] Martin TL, Kaushik NK, Trevors JT *et al.* Review: denitrification in temperate climate riparian zones. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1999, **111**(1):171-186.
- [27] Meyer A, Combroux I, Tremolieres M. Dynamics of nutrient contents (phosphorus, nitrogen) in water, sediment and plants after restoration of connectivity in side-channels of the river rhine. *Restoration Ecology*, 2013, **21**(2):232-241.
- [28] 马妮娜,杨小平. 巴丹吉林沙漠及其东南边缘地区水化学和环境同位素特征及其水文学意义. *第四纪研究*, 2008, **28**(4):702-711.
- [29] 张智,刘亚丽,龙腾锐. 重庆双龙湖水草对营养盐的吸附与释放试验研究. *资源环境与工程*, 2005, **19**(4):305-310.
- [30] Fellman JB, D'Amore DV, Hood E. An evaluation of freezing as a preservation technique for analyzing dissolved organic C, N and P in surface water samples. *Science of the Total Environment*, 2008, **392**(2/3):305-312.
- [31] 宋攻峰,刘道平,邬志敏. 雪晶成核和生长机理研究. *制冷学报*, 2004, (3):46-50.
- [32] Gao W, Smith DW, Sego DC. Ice nucleation in industrial wastewater. *Cold Regions Science and Technology*, 1999, **29**(2):121-133.
- [33] William RC. Thermodynamics and microphysics of clouds. Fort Collins; Colorado State University, 2000:21-30.
- [34] 姜远光. 溴氨酸废水太阳光催化降解与冷冻处理技术研究[学位论文]. 天津:天津大学, 2009:67-69.
- [35] 张岩,李畅游,张生等. 呼伦湖冰封期污染特征分析及对水处理的意. *生态环境学报*, 2011, **20**(8/9):1289-1294.
- [36] 张生,李畅游,梁喜珍等. 基于模糊综合评价法的内蒙古达里诺尔湖水环境质量评价. *中国工程科学*, 2010, **12**(6):28-31.
- [37] Shen HT. Research on river ice processes: Progress and missing links. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2003, **17**(4):135-142.
- [38] Jonsson CE, Leng MJ, Rosqvist GC *et al.* Stable oxygen and hydrogen isotopes in sub-Arctic lake waters from northern Sweden. *Journal of Hydrology*, 2009, **376**(1/2):143-151.
- [39] 张岩. 乌梁素海结冰过程中污染物迁移机理及其应用研究[学位论文]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2012:4.
- [40] 曾海鳌,吴敬禄,刘文等. 哈萨克斯坦东部水体氢、氧同位素和水化学特征. *干旱区地理*, 2013, **36**(4):662-668.