

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2015.10.2015050202

甄志磊, 李畅游, 张生, 等. 冰封期达里诺尔湖主要离子特征[J]. 环境化学, 2015, 34(10): 1901-1910
ZHEN Zhilei, LI Changyou, ZHANG Sheng, et al. Major ions in Dali Lake during the icebound season[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(10): 1901-1910

冰封期达里诺尔湖主要离子特征*

甄志磊¹ 李畅游^{1**} 张 生¹ 李文宝¹ 孙 标¹
朱永华^{1,2} 郝世祺¹ 杨久辉³

(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. 内蒙古自治区锡林郭勒盟水文勘测局, 锡林浩特, 026000;
3. 赤峰市克什克腾旗达里诺尔国家级自然保护区管理处, 赤峰, 025373)

摘 要 通过对内蒙古达里诺尔湖冰封期湖冰与湖水进行取样, 分析总磷(TP)、总溶解性固体(TDS)、Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻和HCO₃⁻离子在冰体及水体中的分布特征及迁移过程. 结果表明, 在冰体和水体阳离子中, Ca²⁺、Mg²⁺相对贫乏, 在冰体中平均浓度分别为 1.37 mg·L⁻¹和 7.0 mg·L⁻¹, 水体中平均浓度分别为 4.01 mg·L⁻¹和 24.53 mg·L⁻¹, Na⁺所占比例最高, 冰体与水体中平均浓度均达到 92%. CO₃²⁻、HCO₃⁻和 Cl⁻是冰体和水体中阴离子的主要组成部分, 冰体中平均浓度分别为 435.86、543.20、539.97 mg·L⁻¹, 水体中平均浓度分别为 1773.90、2556.49、1890.08 mg·L⁻¹. Piper 图表明达里诺尔湖水化学类型以 Na⁺-CO₃²⁻-Cl⁻-HCO₃⁻型为主. Gibbs 图显示岩石风化与蒸发浓缩作用对达里诺尔湖的离子含量影响显著. 通过对 TP、TDS、Mg²⁺、Ca²⁺和 Cl⁻之间的关系分析可知, 在水体中, Mg²⁺和 Ca²⁺的组成随着深度的变化基本保持不变, 而在冰体中呈现无规律的变化, 在水中表现为基本不变; TP 和 Cl⁻在水体中没有相关性, 在冰中相关性不明显. 无论在水体中还是在冰体中, TP 和 TDS 具有较好的相关性(水体: r=0.94; 冰体: r=0.90), 说明 TDS 可以在冰封期较好地示踪 TP 的迁移过程.

关键词 达里诺尔湖, 冰封期, 水化学类型, 迁移.

Major ions in Dali Lake during the icebound season

ZHEN Zhilei¹ LI Changyou^{1**} ZHANG Sheng¹ LI Wenbao¹
SUN Biao¹ ZHU Yonghua^{1,2} HAO Shiqi¹ YANG Jiuwei³

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, 010018, China;
2. Hydrological Survey of Inner Mongolia's Xilingol League, Xilinhot, 026000, China; 3. National Nature Reserve
Ecological Tourism Management Office of Hexigten Banner Dalinor, Chifeng, 025373, China)

Abstract: Dali Lake as the research object in this present work is sampled in water and ice during the icebound season. Total phosphorus (TP), total dissolved solids (TDS) and major ions (Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻ and HCO₃⁻) were measured and analyzed. The results showed that the concentration of Ca²⁺ and Mg²⁺ in lake water and ice cations is relatively low, which were 1.37 and 7.0 mg·L⁻¹ in ice and 4.01 and 24.53 mg·L⁻¹ in water, respectively. The dominated cation was Na⁺ and its concentration took the proportion of 92% whether in water or in ice of cations. CO₃²⁻, HCO₃⁻ and Cl⁻ were the dominated ions in ice body and water body of anions. Their average concentrations are 435.86, 543.20 and 539.97 mg·L⁻¹ in ice body and 1773.90, 2556.49 and

2015 年 5 月 2 日收稿.

* 国家自然科学基金(51339002, 51409288, 51269016, 51269017, 51169011, 51169017, 51469025); 高等学校博士学科点专项科研基金(20131515120005); 内蒙古农业大学优秀青年科学基金(2014XYQ-10)资助.

** 通讯联系人: Tel: 15247128358; E-mail: nndlichangyou@163.com

1890.08 mg·L⁻¹ in water body, respectively. Piper figure indicated that the hydro-chemical type of the lake water quality belonged to Na⁺-CO₃²⁻-Cl⁻-HCO₃⁻. Gibbs figure showed the ions composition was controlled by evaporation-concentration and rock weathering. By analyzing the correlations among TP, TDS, Mg²⁺, Ca²⁺ and Cl⁻, the compositions of Mg²⁺ and Ca²⁺ in water body displayed no change with depth, but in ice body the variation was irregular. And also, there was no correlation between TP and Cl⁻ in the water body and their correlation in the ice body was not obvious. However, TP and TDS had a stronger correlation, which $r=0.94$ in water and $r=0.90$ in ice, respectively. It indicated that TDS can trace the process of TP migration with the increase of ice thickness and water depth during the icebound season.

Keywords: Dali Lake, ice bound season, hydro-chemical type, migration.

位于高纬度、高海拔地区的湖泊,每年都会经历一个冻融的过程.以我国蒙新高原湖区为例,每年大约 12 月左右进入湖泊结冰期,翌年 1 月、2 月达到稳定冰封状态.随着结冰过程的进行,污染物会逐渐排入水体,待完全进入冰封状态后,冰下水层的浓度比冰层中高出很多.冻融作用引起湖泊冰、水双介质相互转化,其机理是水分子中氢键的缔合与断裂^[1],在此过程中伴随着能量转化,能量又是推动物质运动的唯一驱动因素,因此冻融作用造成的能量梯度必然引起物质迁移运动.新形成的冰含有 10‰—15‰ 的盐,1—2 m 厚的冰含有 5‰—8‰ 的盐,多年形成的冰仅含有 0.1‰—3.0‰ 的盐分^[2].冰生长过程中总氮由冰体向冰下水体迁移,水体的总氮含量随着冰厚的增加而升高,冰厚为 59 cm 时其含量为冰体的 2.85 倍^[3].对冰封期达里诺尔湖的研究表明,冰下水体中总磷平均含量是冰体的 3.6 倍^[4].因此,结冰的过程对水体中水化学类型和主离子与营养物质的分布特征也会有一定的影响.水体离子组成是水化学性质的重要方面,研究水体化学离子特征对于正确理解流域内地表水与地下水的补给关系^[5]、湖水的离子组成和判断来源^[6-9]具有重要意义.对冰封期湖泊冰体和水体中离子的分布特征的研究,不仅可以了解水体中的水化学类型,还可以了解离子随着冰厚和水深的增加的迁移过程.

达里诺尔湖地处半湿润到半干旱的转变区域,属于中国的中温带,流域的气候受东亚季风和西风影响,其特殊的地理位置,成为重要的科学研究场所.以往对达里诺尔湖的研究主要集中在沉积物^[10-12]方面,对系统地研究达里诺尔湖不同冰厚和水深的主离子分布特征及水化学类型尚未见报道.

本文以冰封期达里诺尔湖为研究对象,分析湖水及湖冰的水化学特征,判断离子来源,并分析主离子、总溶解性固体(TDS)和总磷(TP)等在结冰过程中的迁移过程,为冰封期物质在湖泊中不同界面的迁移规律提供理论支持,同时,为冰封期湖泊污染治理提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

达里诺尔湖(43°13′—23°N, 116°29′—45°E)位于东西走向的浑善达克沙地北缘,湖的东侧是湖积平原,湖盆的西北部则分布着大面积的玄武岩熔岩盆地.有 4 条河水汇入达里诺尔湖,其中贡格尔河和沙里河是永久性河流,亮子河与耗来河是间断性河流.达里诺尔湖的补给来源为河水、大气降水和地下水^[13].2010 年,达里湖湖面面积为 188.48 km²,比 1999 年缩小将近 25.06 km²^[14],水资源日益紧张.从实地考察来看,没有水从湖中流出,因此,达里诺尔湖可以看成是一个岩溶堵塞湖,见图 1.达里诺尔湖流域多年平均降水量 396.1 mm,多年平均蒸发量为 1425.3 mm,受季风影响降水量年内时空分布不均,降水主要集中在 6—8 月份,其降雨量占全年的 79.2%.从 11 月至第二年 4 月湖覆盖大约 80 cm 的冰.

1.2 取样与分析方法

达里诺尔湖水深由东北至西南逐渐增加,从 1—2 m 增加到 12 m^[14],因此,依据湖泊水深的变化特征及河水入湖位置,对湖泊进行了采样点布置.2015 年 1 月,在取样点 A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8 点进行取样,冰体用自制取冰器钻取,并用锯锯开,装入 500 mL 广口聚乙烯瓶;水样用自制取水器(专利号:ZL 2010 Z 0670375.6)采集,装入 500 mL 细口聚乙烯瓶中,及时运回实验室测定.其中,A1、A2、A4 和

A5 用于分析水化学类型;A3、A4、A6 和 A8 用于冰体中离子纵向特征分析;A3、A4 和 A8 用于分析水体中离子纵向分布特征.每个取样点冰体取两根冰柱,每根分 4 层,即:0—5 cm、15—20 cm、35—40 cm 和 55—60 cm,以 A4 为例,样品编号为 A4(0—5),A4(15—20),A4(35—40),A4(55—60);水体分 8 层,由于取水器密封较好,每层取一次水样,即 0、1、2、3、4、5、6、7 m,以 A1 为例,样品编号为 A1—1、A1—2、A1—3、A1—4、A1—5、A1—6、A1—7;A5 点用于详细研究离子迁移过程,其中冰体剖面每隔 5 cm 进行取样,水体剖面每隔 50 cm 取样.

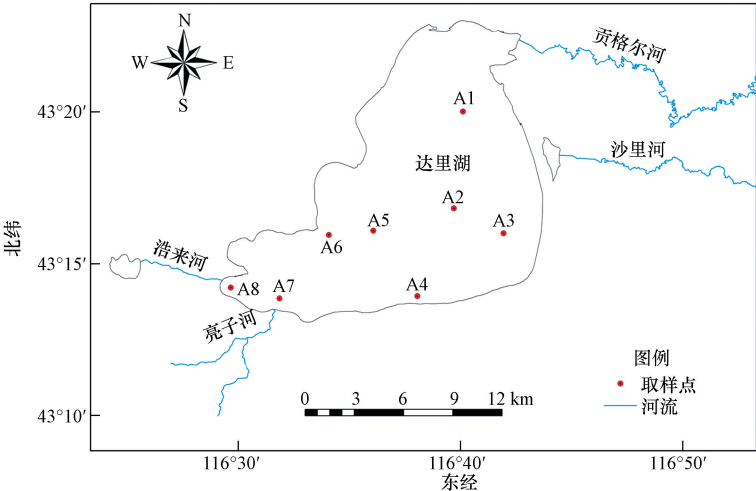


图 1 达里诺尔湖流域及采样点位置
Fig.1 Study area and sampling sites

Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻ 和 TP 在内蒙古自治区水资源重点实验室完成.Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺、Na⁺、Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 测试仪器采用美国戴安公司 ICS-90 离子色谱仪测定,测试前,原水样和融化的冰样过 0.45 μm 滤膜^[15].CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 采用双指示剂滴定法测定^[16].TDS 和 pH 采用梅特勒-托利多公司生产的便携式电导率笔(型号:S30KIS30)和 pH 笔(型号:SG8-B)测定,其中,水样当场测定,将校准好的仪器探头放入取好的水样中,探头感应部分完全浸没,待测定稳定后记下读数;冰在恒温实验室融化后测定,方法与测水样相似.TP 采用钼酸铵分光光度法(GB11893-89)测定.

2 结果与讨论

2.1 达里诺尔湖水化学特征与水化学类型

从表 1 可知,2015 年 1 月(冰封期)达里诺尔湖水整体呈碱性,pH 值分布范围为 9.99—10.22,TDS 浓度的变化范围为 4.08—6.5 g·L⁻¹.依据湖泊类型划分原则^[17],达里诺尔湖处于 1—35 g·L⁻¹之间,矿化度较高,属于微咸水湖,并且达里诺尔湖不同深度的 pH 和 TDS 的值没有随着深度的变化而变化,说明达里诺尔湖由上至下混合均匀,不存在盐度跃变层;达里诺尔湖冰中亦具有较高的 pH 值,主要分布在 10.04—10.50 之间,TDS 含量相对于水中较小,主要变化范围为 0.1—2.25 g·L⁻¹.

水化学 Piper 三线图能够较好地揭示水体和冰体中主离子组成变化,从而辨别其控制端元^[18].由图 2 可知,冰样和水样都落在 Piper 三线图三角形右侧一边,湖水和湖冰的水化学类型主要以 Na⁺-CO₃²⁻-Cl⁻-HCO₃⁻型为主.Ca²⁺、Mg²⁺ 在冰体和水体阳离子中相对贫乏,冰体中平均浓度分别为 1.37 mg·L⁻¹和 7.0 mg·L⁻¹,水体中平均浓度分别为 4.01 mg·L⁻¹和 24.53 mg·L⁻¹,Na⁺ 所占比例最高,冰体与水体中平均浓度均达到 92%.CO₃²⁻、HCO₃⁻ 和 Cl⁻ 是阴离子的主要组成部分,冰体中平均浓度分别为 435.86、543.20、539.97 mg·L⁻¹,水体中平均浓度分别为 1773.90、2556.49、1890.08 mg·L⁻¹.其中,Ca²⁺ 的主要来源是达里诺尔湖流域碳酸盐的风化,因此推断达里诺尔湖流域碳酸盐贫乏.

表 1 湖冰和湖水中主要离子、pH 和 TP 的浓度
Table 1 The major ions, pH and TP concentrations in ice and water

样品	TP/ (mg·L ⁻¹)	Cl ⁻ / (mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	Na ⁺ / (mg·L ⁻¹)	K ⁺ / (mg·L ⁻¹)	Mg ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	Ca ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ / (mg·L ⁻¹)	CO ₃ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	TDS / (g·L ⁻¹)	pH
水样品											
A1—1	0.72	1652.33	389.39	2132.70	160.99	17.85	2.23	2196.02	1451.17	6.50	10.21
A1—2	1.26	2074.13	447.96	2828.70	225.23	24.43	3.93	3069.89	2333.04	5.47	10.19
A1—3	1.18	2036.44	434.88	2796.10	221.19	24.26	4.00	2644.30	1786.06	5.92	10.22
A1—4	1.08	2237.81	484.61	2960.50	220.85	23.75	2.49	2857.09	1858.62	6.28	10.17
A1—5	0.97	2008.64	446.48	2818.90	211.11	25.05	4.39	2545.00	1847.46	5.89	10.22
A1—6	1.08	1924.52	410.60	2676.30	201.30	21.72	2.25	2513.79	1786.06	5.84	10.22
A1—7	0.40	2243.12	512.62	3001.10	228.41	26.52	5.15	2712.39	1875.36	5.73	10.21
A2—1	1.65	1305.00	306.28	2025.80	147.68	16.85	2.77	2624.44	1897.69	5.57	10.17
A2—2	1.62	1269.80	279.40	2399.90	178.64	19.98	2.68	2516.63	1813.97	5.01	10.08
A2—3	1.70	2043.70	370.65	2311.30	170.95	19.30	3.29	2647.14	1724.67	4.96	10.16
A2—4	1.70	955.22	189.44	1479.10	108.31	12.70	2.27	2581.88	1853.04	5.49	10.20
A2—5	1.68	1847.90	406.13	2963.40	223.48	25.83	4.30	2695.37	1841.88	5.68	10.20
A2—6	1.68	554.11	106.01	1959.90	145.09	16.89	3.27	2530.81	1802.81	4.80	10.07
A2—9	1.65	2296.21	508.73	3226.30	242.88	27.03	4.80	2567.70	1713.50	5.08	10.00
A3—0	1.72	2189.98	514.78	3034.80	223.77	25.40	5.07	—	—	4.91	10.06
A3—1	1.69	2008.46	457.36	3184.70	238.50	27.74	5.02	—	—	5.51	10.17
A3—2	1.71	2200.09	480.22	3127.20	236.73	26.47	4.66	—	—	5.44	10.16
A3—3	1.52	2242.51	496.06	3235.90	244.66	27.44	4.81	—	—	5.20	10.06
A3—4	1.58	1519.34	340.95	3209.20	243.42	27.11	4.58	—	—	5.16	10.02
A3—5	1.16	1325.95	312.32	1903.90	138.26	16.28	3.26	—	—	5.61	10.15
A3—6	1.71	2279.33	500.25	3232.60	244.96	27.48	4.78	—	—	5.02	10.03
A4—0	1.65	748.31	214.73	2793.00	211.85	24.34	4.54	—	—	4.08	10.09
A4—1	1.38	1980.08	430.37	3048.50	230.16	25.89	4.85	2462.72	1769.32	5.36	10.17
A4—2	1.65	2275.70	503.45	3220.20	243.97	27.36	4.95	2525.14	1702.34	5.13	10.04
A4—3	1.66	2310.08	509.91	3256.90	249.48	28.76	5.25	2496.76	1730.25	5.77	10.17
A4—4	1.69	2020.85	449.27	3136.50	235.06	25.70	4.29	2451.37	1746.99	5.18	10.04
A4—5	1.75	2155.93	473.61	2998.40	231.87	26.50	4.38	2667.00	1702.34	5.42	10.17
A4—6	1.66	1992.92	417.06	2616.60	194.59	23.05	4.60	2474.07	1774.90	5.10	10.05
A4—7	1.78	1394.00	315.55	3206.60	241.81	27.21	4.64	2539.32	1730.25	4.97	10.06

续表1

样品	TP/ (mg·L ⁻¹)	Cl ⁻ / (mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	Na ⁺ / (mg·L ⁻¹)	K ⁺ / (mg·L ⁻¹)	Mg ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	Ca ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ / (mg·L ⁻¹)	CO ₃ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	TDS/ (g·L ⁻¹)	pH
A4—8	1.72	699.89	201.27	1516.60	115.55	12.72	1.85	2584.72	1808.39	5.60	10.17
A4—9	1.75	1738.60	323.86	3054.40	228.85	26.61	3.27	2505.28	1786.06	5.45	10.16
A5—1	1.50	2045.53	459.12	2718.60	204.19	22.76	3.55	2386.11	1529.32	4.70	9.99
A5—1.5	1.62	2077.50	465.16	3110.70	234.20	26.14	3.36	2354.90	1730.25	5.05	10.00
A5—2	—	2070.60	459.50	3039.10	227.29	25.98	3.80	2405.97	1897.69	—	10.01
A5—2.5	1.79	989.92	207.01	1480.90	112.96	11.75	1.74	2465.55	1780.48	5.46	10.02
A5—3	1.72	2186.73	484.77	3049.10	228.70	26.60	4.39	2638.63	1674.43	5.23	10.01
A5—3.5	1.72	2239.20	423.60	3186.90	258.57	29.76	4.22	2428.67	1713.50	5.16	10.00
A5—4	1.73	1880.70	408.89	3070.90	230.33	26.85	3.90	2655.65	1696.76	5.13	10.01
A5—4.5	1.68	1666.90	393.16	3108.30	233.68	27.21	4.36	2675.51	1841.88	5.13	10.02
A5—5	1.67	2090.80	464.97	2987.90	225.07	25.25	3.84	2403.14	1825.13	5.07	10.02
A5—5.5	1.82	—	—	—	—	—	—	2851.42	1780.48	5.50	10.00
A5—6	1.73	1968.50	436.07	3067.80	232.24	25.83	3.68	2615.93	1758.15	5.19	10.01
A5—6.5	1.74	2151.20	482.73	3173.80	240.66	26.81	3.54	2763.46	1719.08	5.18	10.00
A5—7	1.76	1789.90	402.47	3049.90	227.79	27.00	4.27	2383.28	1970.25	5.19	10.02
A5—7.5	1.74	1769.10	396.60	2999.90	222.76	25.47	2.87	2437.18	1802.81	5.30	10.02
A5—8	1.72	1860.42	418.52	2549.20	181.88	26.33	6.84	2445.69	1618.62	5.17	10.02
A5—8.5	0.83	2000.60	446.18	2902.20	217.13	24.60	3.54	2383.27	1506.99	4.92	10.01
A8—0	1.75	2273.30	508.22	3177.80	233.70	26.26	3.18	—	—	4.98	10.03
A8—1	1.66	2208.88	497.19	3274.80	245.52	27.75	4.51	—	—	5.54	10.14
A8—2	1.84	2335.21	516.36	3284.60	248.17	28.66	4.88	—	—	5.65	10.18
A8—3	1.63	2283.59	504.02	3275.10	247.52	28.02	5.17	—	—	5.44	10.16
A8—4	1.64	2312.04	510.48	3341.00	253.38	28.47	4.88	—	—	5.59	10.17
A8—5	1.65	2170.42	476.92	3113.30	234.57	26.42	4.65	—	—	5.48	10.18
A8—6	1.69	2272.21	510.64	3284.90	247.97	28.03	4.88	—	—	5.52	10.16
冰样品											
A1(0—20)	0.60	269.33	76.38	466.43	30.77	4.52	0.79	740.52	502.33	0.83	10.44
A1(20—40)	0.98	253.47	76.41	566.15	36.31	5.89	0.77	198.61	407.45	1.47	10.37
A1(40—60)	0.81	313.30	84.31	526.43	34.81	5.30	1.12	323.44	457.68	1.39	10.35
A2(0—5)	0.39	167.96	53.59	317.68	22.05	3.57	1.29	275.21	184.19	0.62	10.12
A2(15—20)	0.43	367.47	99.68	636.69	36.69	6.56	1.39	629.87	379.54	1.19	10.29

续表1

样品	TP/ (mg·L ⁻¹)	Cl ⁻ / (mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	Na ⁺ / (mg·L ⁻¹)	K ⁺ / (mg·L ⁻¹)	Mg ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	Ca ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ / (mg·L ⁻¹)	CO ₃ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	TDS/ (g·L ⁻¹)	pH
A2(35—40)	0.41	399.57	112.38	722.38	45.52	7.88	1.22	661.08	413.03	1.29	10.26
A2(55—60)	0.21	354.77	99.92	616.57	39.98	6.21	1.06	541.91	401.86	1.15	10.26
A3(0—5)	0.37	280.94	74.41	477.67	32.98	5.83	0.91	357.49	295.82	0.89	10.35
A3(15—20)	0.48	364.19	97.67	665.32	46.26	6.82	0.92	632.70	491.17	1.36	10.20
A3(35—40)	0.35	318.46	79.69	568.00	38.93	5.45	0.71	470.98	346.05	1.04	10.22
A3(55—60)	0.26	314.98	79.48	512.37	34.39	5.21	0.69	449.70	295.82	1.00	10.22
A4(0—5)	0.79	1858.90	408.48	1235.40	90.55	15.93	2.50	879.54	937.68	—	—
A4(15—20)	—	431.16	120.93	745.14	48.27	7.83	1.51	578.80	541.40	2.24	10.44
A4(35—40)	—	397.71	107.60	699.47	45.76	7.58	1.32	539.07	502.33	1.50	10.10
A4(55—60)	0.48	527.16	134.98	842.82	54.19	9.06	1.69	768.89	519.07	1.55	10.20
A4(65—70)	0.36	421.87	102.69	634.53	39.17	5.98	1.28	459.63	357.21	1.26	10.22
A5(0—5)	0.87	496.41	124.05	818.65	51.63	8.18	1.26	831.31	1015.82	2.25	10.50
A5(5—10)	0.46	416.58	106.62	690.98	46.90	6.89	1.31	604.33	373.96	1.30	10.25
A5(10—15)	0.63	538.55	152.91	951.50	63.01	9.38	1.62	981.68	273.49	1.70	10.24
A5(15—20)	0.62	544.51	154.84	926.09	62.23	9.19	1.59	754.70	653.03	1.69	10.23
A5(20—25)	0.60	523.80	144.45	901.32	59.40	9.48	1.79	760.38	546.98	1.63	10.23
A5(30—35)	0.48	445.84	125.52	729.44	47.93	7.09	0.68	672.42	452.10	1.40	10.25
A5(35—40)	0.40	404.81	109.63	664.89	44.38	6.77	1.20	567.45	362.79	1.18	10.23
A5(40—45)	0.41	428.82	118.70	737.45	48.10	7.61	1.43	632.70	480.00	1.38	10.25
A5(50—55)	0.43	368.06	97.76	632.68	42.12	6.29	0.94	439.77	446.52	1.14	10.26
A5(55—60)	0.24	412.19	111.84	716.90	47.23	7.45	1.28	578.80	507.91	1.33	10.25
A6(0—5)	0.89	598.20	141.93	1001.60	74.38	8.93	1.72	624.19	820.47	1.78	10.45
A6(15—20)	0.33	347.03	82.52	545.35	39.50	4.84	3.96	405.72	379.54	1.09	10.22
A6(35—40)	0.43	456.96	112.09	727.88	50.55	7.50	0.88	470.98	346.05	1.34	10.21
A6(55—60)	0.51	495.98	120.60	838.44	58.10	8.45	1.22	455.38	295.82	1.56	10.18
A8(0—5)	0.15	2273.30	508.22	—	—	—	—	79.44	0.00	0.10	10.04
A8(15—20)	0.23	98.68	37.89	204.93	12.41	2.15	3.17	133.35	122.79	0.35	10.18
A8(35—40)	—	2230.31	506.29	662.90	42.41	6.74	1.02	—	—	—	—
A8(55—60)	0.25	237.78	70.06	399.42	25.29	4.38	1.01	425.58	273.49	0.88	10.21

“—”表示数据缺失。

从阳离子组成来看,与赣南小流域河水的化学组成相似,反映了硅酸盐岩化学风化作用对河水化学组成控制的典型特征^[19].水体中 Na^+ 和 K^+ 一般来自火成岩或者变质岩,如钠长石、正长石和云母等硅酸盐矿物,这两种离子在湖泊中的高比例同样是与湖水的蒸发浓缩有关^[20].从实地考察发现,湖盆西部的熔岩台地上附有玄武岩砾石,湖盆的北部及湖中的部分地段,见有火山岩砾石、变质岩的基岩露头,所以流域硅酸盐的输入对达里诺尔湖湖水 Na^+ 和 K^+ 的含量有很大影响.

对冰和水不同深度的水化学类型分析可知,水化学类型没有因为相态和深度的不同而发生较大的变化.原因之一为冰封期湖水被冰盖所覆盖,湖水的动力循环以及与外界交换减弱或停止,水岩相互作用和蒸发浓缩作用也随之减小,使得水中离子含量基本不发生变化;原因之二为即使冰中的离子含量小于冰下水中的含量,但在冰中离子之间的比例与水中的相似.

2.2 湖水水化学离子来源验证

Gibbs 图划分出了地表水化学组分趋于“降水控制类型”、“岩石风化类型”或“蒸发-浓缩类型”^[21],是判断湖水主要受哪些因素影响的一种重要手段.由于 Ca^{2+} 含量非常少(见表 1), $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 值约为 1,湖水只受一种控制因素显然与达里诺尔湖实际情况是不符的,所以横坐标选用 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$,即 $\text{TDS}-\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 图.从图 3 可知,无论湖水还是湖冰, $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 值大部分小于 0.5,湖水处于蒸发-浓缩和岩石风化的控制范围,湖冰处于岩石风化和大气降水的范围内,说明达里诺尔湖离子的含量受大气降水、岩石风化和蒸发-浓缩作用的共同影响,但岩石风化与蒸发-浓缩作用对达里诺尔湖的离子含量影响较显著.湖水和湖冰中 $\text{Cl}^- / \text{Na}^+$ 值在 0.5—0.8 之间变化,远小于世界平均海水比值 1.15,说明降水对湖水的贡献较小^[6].虽然本次分析的是冰封期的湖水和湖冰,河水冻住不会注入湖中,但河水亦是湖水离子含量的贡献者.

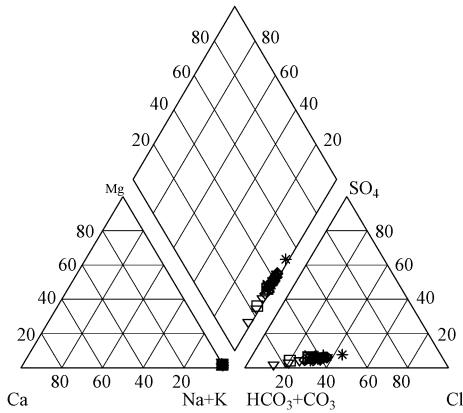


图 2 达里诺尔湖湖水与湖冰 Piper 三线图
Fig.2 Piper figures of lake ice and water in Dali Lake

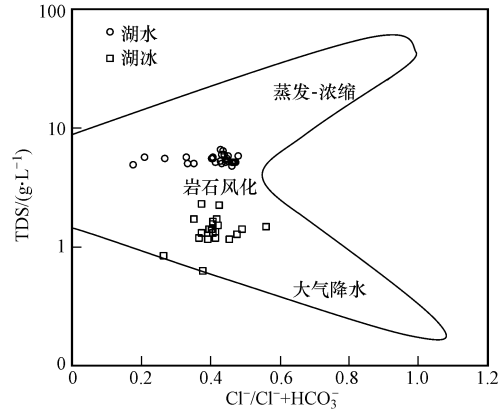


图 3 达里诺尔湖水化学的 Gibbs 图
Fig.3 Hydrochemical Gibbs cliagram of Dali Lake

2.3 水化学指标在结冰过程中迁移

Gurrieri J T 等在评价高山湖泊与地下水交换时,运用 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 进行化学元素示踪,取得较好的效果^[22].Zhen 在研究结冰过程中冰中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的分布情况时发现, Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的含量表现为先减小后增大^[15].为了详细地阐明离子在冰体和水体中的分布特征,本研究选取 A3、A4、A6 和 A8 点 0—5 cm、15—20 cm、35—40 cm 和 55—60 cm 的冰样和 A3、A4 和 A8 深度为 0—7 m 之间的水样,其中 A3 和 A4 在 7 m 处水样的数据缺失,所以另加 A7 点水深 7 m 处的数据作为对照.从达里诺尔湖稳封期不同冰层与冰下不同水深的 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 分布情况可知(图 4),冰体中和水体中的 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的含量有较大的区别,表现为水中含量大于冰中含量,与前期研究一致^[15].A4 点 0—5 cm 的冰中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的组成与其它点相比有较大的差异,主要原因为表层冰受到了风沙的污染.图 4 中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的分布并没有表现出随着冰厚和水深的增加发生连续性变化,而是在冰中表现出无规律的变化,在水中表现为基本不变,可能原因为冰界面发生了多种化学、生物和环境变化过程^[23].为了清晰分析离子的纵向的分布特征,选取 A5 点剖面为研究对象,冰体每隔 5 cm 进行取样,其中 25—30 cm 样品丢失;水体每隔 50 cm 进行取样,分析指标为 TP、TDS、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Cl^- ,见图 5.

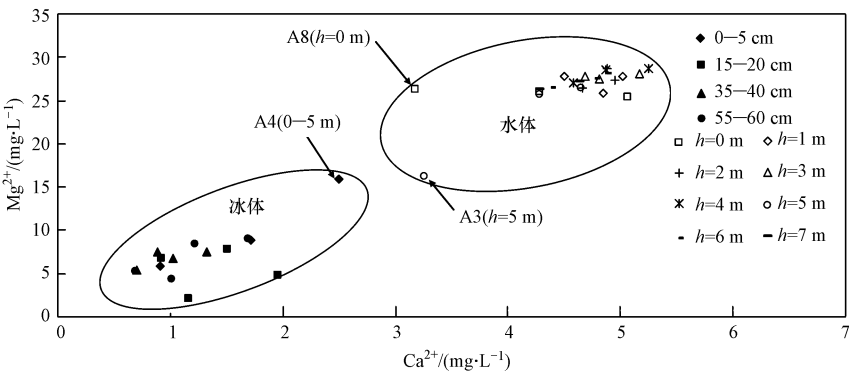


图 4 垂向剖面 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的分布关系图

Fig.4 The relationship between Ca^{2+} and Mg^{2+} in the vertical profile

在降雨量少蒸发大,径流补给不足的地区,浓度较高的 TDS 是重要的污染特征之一^[24].TDS 反映的是水体中总固体性离子的浓度,在一定程度上也反映了水循环过程中停留时间的长短. Cl^- 在研究地下水水化学变化规律时可作为首要的示踪离子, Cl^- 在水动力滞缓带中富集^[25].因此,分析剖面 TDS 和 Cl^- 的变化趋势,对理解物质在冰体和水体中的迁移有很大的帮助.

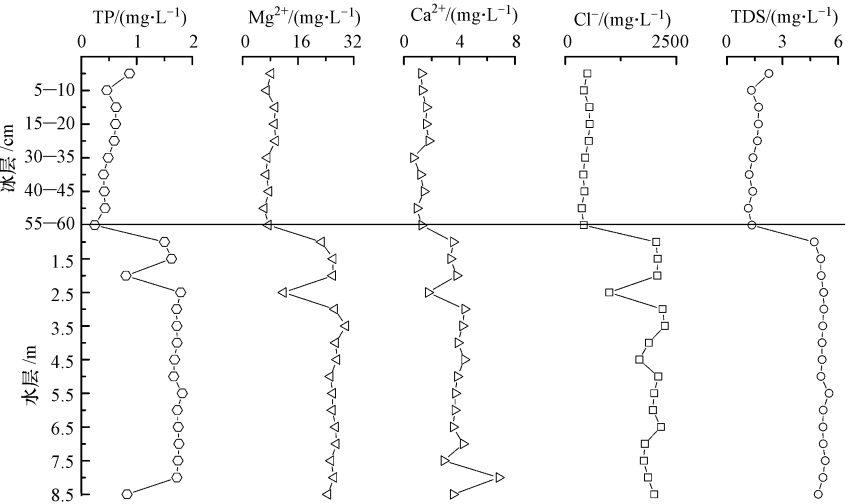


图 5 A5 点冰层到水层 TP、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 TDS 随深度的分布

Fig.5 Vertical distribution of TP, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- and TDS concentrations in ice body and water body under the ice at A5 sampling point

从图 5 可以看出,在冰层,除表层 0—5 cm 外,随着冰层厚度的增加,TP、TDS、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 呈现先增加后减小的趋势,即 5—25 cm 之间随着冰厚度增加而增加,25—60 cm 之间,随着冰厚的增加而减小,其中,TP 和 Ca^{2+} 的变化最为明显.这种现象与张岩等^[26] 在乌梁素海以 TDS 为对象的研究大致相似.在水体,TDS 随着水深的增加基本保持不变,而 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 在水深 2.5 m 处突然变小,随后又回到之前的值,TP 在水深 2 m 处突然减小,随后又变化到之前的值,参照 A2 剖面 and A4 剖面(表 1),都没有发生类似情况,具体原因还需深入研究.在结冰的过程中,冰体中的 TP、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 等指标向下迁移至水中的,而冰体稳定后,物质停止向下迁移.在冰-水界面处,物质的浓度在浓度差的作用下向整个水体扩散,以达到水体的浓度平衡.所以,物质在冰盖下的水体中不会随着水深的增加而发生较大的变化.同时,也验证了冰盖下水体中不同深度的水化学类型相似的结论.

通过对 A5 点剖面冰体和水体中的 TP 和 TDS、TP 和 Cl^- 的关系分析可知(见图 6),无论在水体中还是在冰体中(深度 $h=2$ m 没有被考虑),TP 和 TDS 具有较好的相关性,相关系数分别为 $r=0.94$ 和 $r=0.90$,说明 TDS 可以指示 TP 的迁移过程;而 TP 和 Cl^- 在水体中没有相关性,在冰中相关性不显著,因

此,Cl⁻不能指示 TP 的迁移过程.结合 Mg²⁺和 Ca²⁺的分布特征可知,主离子在冰体和水体中受到了物理、化学和生物的综合作用的影响,所以行为特征并不一致.

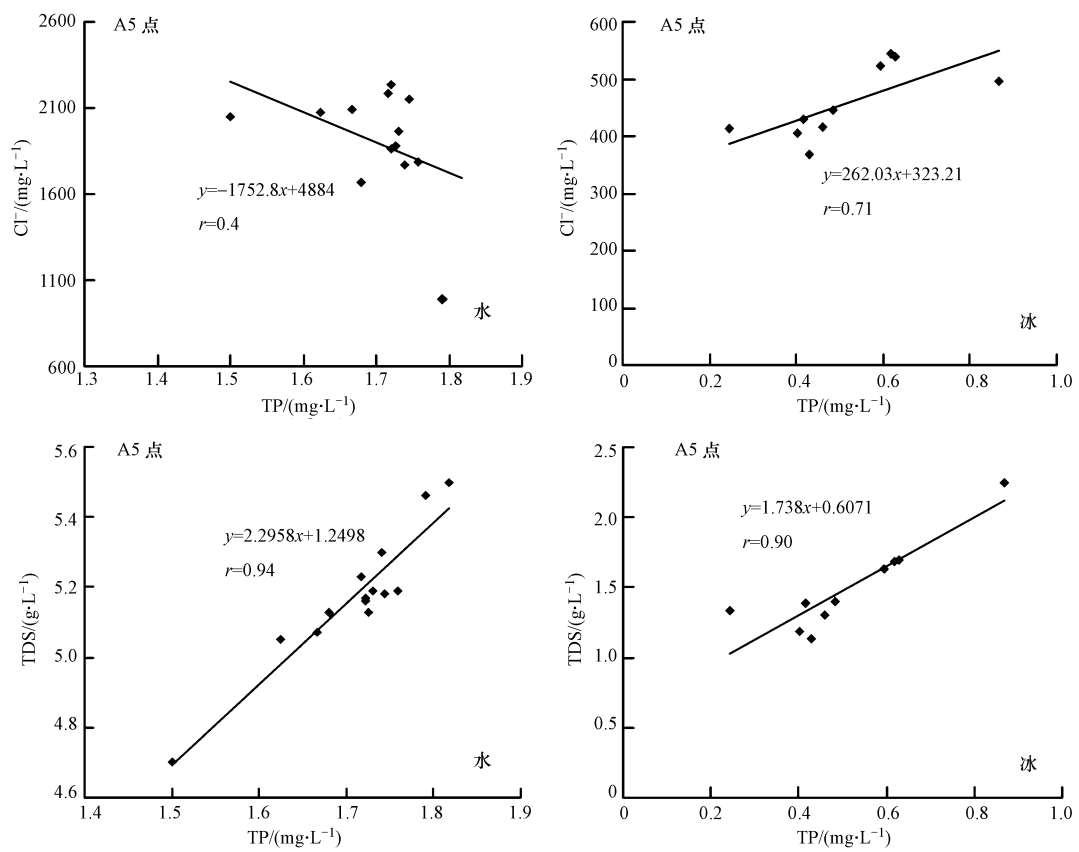


图6 A5点剖面 TDS、Cl⁻与 TP 的关系图
Fig.6 The relationship of TDS and Cl⁻ with TP at A5 profile

3 结论

(1)达里诺尔湖水整体呈碱性,属微咸水湖.不同深度的湖水 pH 和 TDS 的值没有随着深度的变化而变化,由上至下混合均匀,不存在盐度跃变层.湖水和湖冰的水化学类型主要以 Na⁺-CO₃²⁻-Cl⁻-HCO₃⁻型为主,岩石风化与蒸发-浓缩作用对湖水的离子含量影响较显著.

(2)Mg²⁺和 Ca²⁺的组成不随着冰厚和水深的增加发生连续性变化,而是在冰中表现出无规律的变化,在水中表现为基本不变;TP 和 TDS 具有较好的相关性,在水中相关系数为 $r = 0.94$,在冰中相关系数为 $r = 0.90$;TP 和 Cl⁻在水体中没有相关性,在冰中相关性不明显.由于受到物理、化学和生物的综合作用的影响,单一的离子用来指示营养物质的迁移效果较差,而 TDS 可以较好地指示营养物质在冰体和水体的迁移过程.

参 考 文 献

[1] 张英.冰及氨基酸水合中氢键的中子散射及第一性原理研究[D]. 山东大学博士学位论文,2006

[2] Weeks W. Sea ice:the potential of remote sensing [J]. Oceanus,1981,24:39-48

[3] 张岩,李畅游,SHEN H. T.,等.乌梁素海湖冰生长过程中总氮的迁移规律 [J].水科学进展,2013,24(5):728-735

[4] 王利明,甄志磊,于瑞雪,等.冰封期和非冰封期达里诺尔湖营养盐分布特征分析[J].节水灌溉,2015,(2):37-39

[5] 蒲焘,何元庆,朱国锋,等.丽江盆地地表水-地下水的水化学特征及其控制因素[J].环境科学,2012,33(1):48-54

[6] 王鹏,尚英男,沈立成,等.青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化[J]. 环境科学,2013,34(3):874-881

[7] 叶宏萌,袁旭音,葛敏霞,等.太湖北部流域水化学特征及其控制因素[J].生态环境学报,2010,19(1):23-27

[8] 侯昭华,徐海,安芷生.青海湖流域水化学主离子特征及控制因素初探[J].地球与环境,2009,37(1):11-19

- [9] 胡春华,周文斌,夏思奇.鄱阳湖流域水化学主离子特征及其来源分析[J].环境化学,2011,30(9):1620-1626
- [10] 孙圆圆,何江,吕昌伟,等.达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成[J].生态学报,2013,33(2):0610-0618
- [11] Xiao J L, Chang Z G, Si B, et al. Partitioning of the grain-size components of Dali Lake core sediments: evidence for lake-level changes during the Holocene[J].Journal of Paleolimnology,2009,42:249-260
- [12] Xiao J L, Si B,Zhai D Y, et al. Hydrology of Dali Lake in central-eastern Inner Mongolia and Holocene East Asian monsoon variability [J]. Journal of Paleolimnology,2008,40:519-528
- [13] 甄志磊,李畅游,李文宝,等.内蒙古达里诺尔湖流域地表水和地下水环境同位素特征及补给关系[J].湖泊科学,2014,26(6):916-922
- [14] 甄志磊,张生,史小红,等.基于遥感技术的达里诺尔湖湖面演化研究[J].中国农村水利水电,2013,(7):6-9
- [15] Zhen Z L, Li C Y, Zhang S, et al. Characteristics and indications of hydrogen and oxygen isotopes distribution in lake ice body [J].Water Science and Technology,2015:1065-1072
- [16] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,1989,57
- [17] 郑喜玉,张明刚,徐旭,等.中国盐湖志[M].北京:科学出版社,2002:3-42
- [18] 唐玺雯,吴锦奎,薛丽洋,等.锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素[J].环境科学,2014,35(1):131-142
- [19] 孙媛媛,季宏兵,罗建美,等.赣南小流域的水文地球化学特征和主要风化过程[J].环境化学,2006,25(5):550-557
- [20] 鞠建廷,朱立平,汪勇,等.藏南普莫雍错流域水体离子组成与空间分布及其环境意义[J].湖泊科学,2008,20(5):591-599
- [21] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J].Science,1970,170 (3962):1088-1090
- [22] Gurrieri J T, Furniss G. Estimation of groundwater exchange in alpine lakes using non-steady mass-balance methods [J].Journal of Hydrology,2004,297:187-208
- [23] Robinson C, Boxe C S, Guzman M I, et al. Acidity of frozen electrolyte solutions [J]. Journal of Physical Chemistry B.2006,110(15), 7613-7616
- [24] Wang Y J, Sun Z D. Lakes in the arid areas in China [J]. Arid Zone Research,2007,24(4):422-427
- [25] 王利书,唐泽军.石羊河流域地下水循环的同位素和地球化学演化特征[J].环境科学学报,2013,33(6):1748-1755
- [26] Zhang Y, Li C Y, Shi X H, et al. Total dissolved solids migration in Ulansuhai Lake in natural freezing process [J].Journal of arid land, 2012,4 (1):85-94