

doi:10.3799/dqkx.2015.184

# 达里诺尔湖水体稳定氢、氧同位素组成变化对结冰过程的响应

李文宝<sup>1</sup>, 李畅游<sup>1\*</sup>, 刘晓旭<sup>1</sup>, 甄志磊<sup>1</sup>, 胡其图<sup>2</sup>, 刘志娇<sup>1</sup>

1. 内蒙古农业大学水资源保护与利用自治区重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010018

2. 内蒙古赤峰市克什克腾旗达里诺尔湖国家级自然保护区生态旅游有限公司, 内蒙古赤峰 025373

**摘要:** 利用自然界中广泛分布的环境同位素进行湖泊水体演化过程分析已经成为现代湖泊科学的重要研究方向。通过采集内蒙古达里诺尔湖(简称“达里湖”)2013年1月份的湖冰、湖水,2012年夏季湖水与湖区大气降水等,共分析了77个样品中稳定氢(H)、氧(O)同位素值的变化情况,在此基础上对达里湖水体稳定H、O同位素组成变化及其对结冰过程的响应进行了详细分析,结果显示:(1)伴随结冰过程的完成,各站点深层冰体(厚度~65 cm)中 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值比表层冰体(厚度~15 cm)中的值出现不同幅度的偏重。而冰下水体中 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 平均值则比冰体中的平均值分别偏轻约13.85‰、2.23‰。在冰层形成的快速与稳定阶段, $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值的变化幅度也存在差异。同时,冬季外源水体的输入对各站点间同位素值差异的影响比夏季更明显;(2)夏季湖水、冬季湖水与湖冰的同位素值均落在全球大气降水线与湖区大气降水线之外,显示湖泊冰封之前,蒸发对湖泊水体同位素偏移存在一定程度的影响;而冬季湖水与湖冰的同位素值基本位于同一斜率区间,且全部落在夏季湖水同位素值的右侧,显示两者之间并不存在明显的蒸发分馏作用,造成上述现象的因素只能归结于结冰过程。

**关键词:** 氢同位素;氧同位素;结冰过程;达里诺尔湖;寒旱区;地球化学。

**中图分类号:** P592

**文章编号:** 1000-2383(2015)12-2081-10

**收稿日期:** 2015-04-03

## Changes of Stable Oxygen and Hydrogen Isotopes and Their Responses to Freezing Process in Dali-Nor Lake in Cold-Arid Areas of China

Li Wenbao<sup>1</sup>, Li Changyou<sup>1\*</sup>, Liu Xiaoxu<sup>1</sup>, Zhen Zhilei<sup>1</sup>, Hu Qitu<sup>2</sup>, Liu Zhijiao<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

2. National Nature Reserve Ecological Tourism Co., Ltd. of Keshenketeng Dali-Nor Lake, Chifeng 025373, China

**Abstract:** Utilizing the environmental isotopes, which exist widely as one proxy of lake water evolution process, has become one important direction in lake sciences. In this paper, a total of 77 samples of lake water, ice and precipitation water were collected in Dali-Nor Lake, which locates in cold-arid areas of Inner Mongolia; and changes of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  and their responses to freezing process in Dali-Nor Lake are analyzed. The comparison of the changes of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  among lake ice, lake water and precipitate water shows that: (1) Following the freezing process, the values of  $\Delta\delta D$ ,  $\Delta\delta^{18}O$  between bottom (65 cm) and surface (15 cm) ice layers are both above zero. But in fast stage and stable stage during lake ice forming, the change range of water stable isotopes is different. Meanwhile, the values of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in water under the ice are about 13.85‰ and 2.23‰ lighter than those in lake ice. In addition, the river inflows have more obvious influence on value changes of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  among different sites in winter than in summer. (2) The  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values of water (both summer and winter) and ice are both in right side of the global meteoric water line (GMWL) and local meteoric water line (LMWL), which shows that the evaporation

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(No.51339002);国家自然科学基金项目(Nos.51269013,51469025);中国博士后科学基金资助项目(No.2014M562495XB);内蒙古自治区自然基金项目(No.2012MS0615)。

**作者简介:** 李文宝(1980-),男,副教授,博士,主要从事环境地球化学、第四纪地质学等研究工作。E-mail: tianshitd@126.com

**\* 通讯作者:** 李畅游, E-mail: nndlichangyou@163.com

**引用格式:** 李文宝,李畅游,刘晓旭,等,2015.达里诺尔湖水体稳定氢、氧同位素组成变化对结冰过程的响应.地球科学——中国地质大学学报,40(12):2081-2090.

process has certain influence on the fractional distillation of water stable isotopes before the lake ice formed. On the other hand, the values of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in lake ice and winter lake water have the same slope range and both in right side of the values of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in summer lake water, which shows that the freezing process has obvious influence on the fractional distillation of water stable isotopes during the lake ice forming process.

**Key words:** hydrogen isotope; oxygen isotope; freezing process; Dali-Nor Lake; cold-arid area; geochemistry.

## 0 引言

稳定同位素广泛存在于自然环境中,如水体中氢(H)、氧(O)等环境同位素.由于同位素的分馏效应会导致不同水体具有特殊的 H、O 同位素含量,因此水体稳定同位素变化在大气降水、地表径流、地下水等“三水”转化等过程的分析研究中起到积极作用(章新平和姚檀栋,1997;包为民等,2007;胡海英等,2007;Mayr *et al.*,2007;Stichler *et al.*,2008;Jonsson *et al.*,2009;余婷婷等,2010;梁越等,2014).利用自然界中广泛存在的稳定 H、O 同位素,进行湖泊水体等演化过程研究,分析湖泊的水量、水质及水体环境变化等问题已经成为现代湖泊科学研究的重要方向之一(璞培民等,1989;张应华等,2006;Gibson and Reid,2014;Hepp *et al.*,2014).就多数湖泊而言,其水体稳定 H、O 同位素的组成及变化主要受到湖泊流域大气降水同位素组成、流域水文状况及湖水的滞留时间等因素的影响(Ohba *et al.*,2000;章新平等,2003).而对位于中国寒旱地区的湖泊来讲,除受到上述因素影响外,夏季强烈的蒸发、冬季漫长的结冰期也往往成为湖泊水体稳定 H、O 同位素变化的主要因素之一(巩同梁等,2007;马金珠等,2007;张华安等,2011;甄志磊等,2014).

目前为止,针对寒旱区湖泊开展的水体稳定同

位素研究工作却不多见,特别是关系到冻融过程中同位素的分馏过程变化规律的分析就更加少见.因此,本文将利用 2013 年 1 月在达里诺尔湖(以下简称“达里湖”)采集的湖冰与湖水样品,结合 2012 年 7—9 月采集的湖水及大气降水样品进行 H、O 同位素分析,在详细了解结冰过程对达里湖水体稳定 H、O 同位素分馏过程影响的基础上,进一步通过冬、夏季湖泊水体及区域大气降水等样品之间的同位素组成情况的比较,将综合分析达里湖水体 H、O 同位素值在结冰过程中的分馏特征以及影响因素,为深入探讨冻融过程中水体稳定 H、O 同位素的分馏规律提供理论依据.

## 1 研究区概况

达里湖位于内蒙古自治区克什克腾旗境内(N43°12′~N43°24′,E116°24′~E116°56′),是中国北方寒旱区典型湖泊之一(图 1).湖区昼夜温差较大,夏季时短,冬季时长且寒冷,全年气候干燥,日照时间长.年均降水量约 400~500 mm/a,蒸发量约 1 500~1 600 mm/a;年均气温只有 1~2 °C,其中 7 月份最热,平均气温为 16~18 °C;1 月份最冷,平均气温为-17~-24 °C(Xiao *et al.*,2008).达里湖不仅具有调节区域气候,为鸟类提供栖息地,为人类提

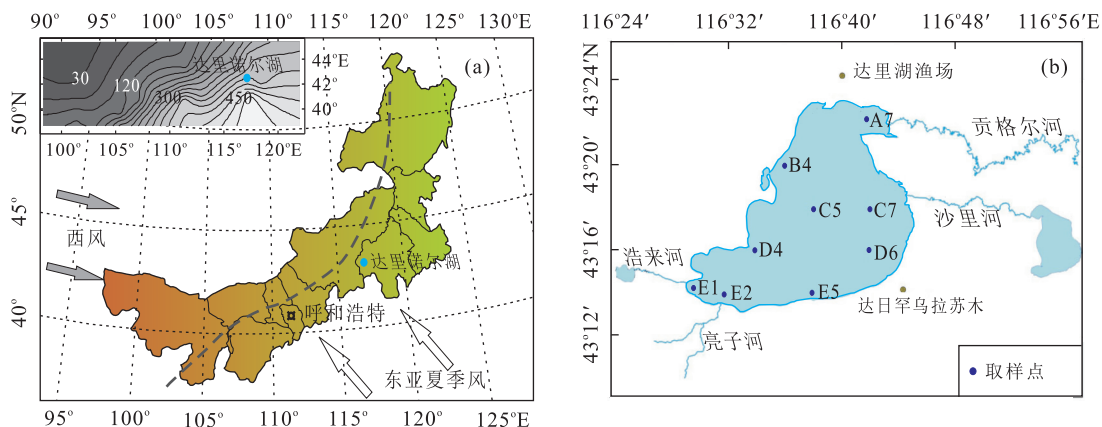


图 1 内蒙古地区气候特征及达里湖取样点分布

Fig.1 Characteristic of local climate in Inner Mongolia and sample sites in Dali-Nor Lake

a.内蒙古地区现代年均降水分布,左上小图中单位为 mm/a;b.达里湖流域及取样点分布

供丰富渔业、旅游资源等多种功能,而且是区域水循环中各个要素相互影响的重要节点(Williams, 1991;李亚威和韩天成,2000;姜加虎和黄群,2004;胡汝骥等,2007;杨桂山等,2010)。

目前,达里湖面积约为 190 km<sup>2</sup>,湖水由西向东逐渐变浅,最深处约为 13 m(Xiao *et al.*, 2008;孙园园等,2013;甄志磊等,2013),湖水补给来源主要为大气降水与河流输入等。现在共有 4 条河流流入达里湖,分别为:亮子河、沙里河、浩来河与贡格尔河(图 1),其中亮子河与贡格尔河为主要入流河,沙里河与浩来河受季节变换影响明显,冬季往往出现断流。由于年份差异,4 条河流每年输入湖泊的水量也存在较大差异。在地理学意义上,达里湖位置关键,既位于东亚夏季风的北部边缘,区域大气降水变化主要受到东亚夏季风影响(秦伯强,1999;Xiao *et al.*, 2008;安成邦和陈发虎,2009);又是中国寒旱区典型的高原内陆湖泊,年均冰封期可长达 4~5 个月。因此,大气降水、蒸发及冰封等过程可能是影响湖泊水体稳定同位素值偏移的重要因素。

## 2 样品及实验方法

根据达里湖水深变化等现代水文地质条件及入湖河流的河口位置,共在湖内布设 9 个取样站点:A7、B4、C5、C7、D4、D6、E1、E2、E5(图 1,表 1),其中 A7、C7、E1、E2 依据河口位置布设,其他站点依据达里湖水深变化及湖区年均风向等因素布设。本文实验样品为 2013 年 1 月所取达里湖湖冰、湖水样品以及 2012 年 7—9 月所采集的湖泊水体及湖区大气降水样品。冬季样品采集过程如下:在冰封湖面上的每个站点,首先利用专门的破冰工具进行破冰钻孔作业,在此过程中,进行湖冰样品的采集(在破冰

的过程中,尽量保持采集冰块的完整),将深度约 15 cm、35 cm、65 cm 处的冰体样品收集到聚乙烯采样瓶中,并立即密封,9 个站点共采集湖冰样品 27 个。待冰孔钻取成功后(冰下湖水涌出),测量每个站点的水深与冰层厚度,随后利用水样采集器采集冰下湖泊表层水样一次,同样密封在聚乙烯采样瓶中,共采集冬季湖水样品 9 个。夏季湖泊水体及大气降水采集工作相对简单:湖泊水样利用船舶直接在采样点进行样品采集工作,7—9 月每月每个站点采集湖水样一次,约 100 mL;大气降水采用标准集雨器于空旷的室外,在每次降水过程中采集雨水样一次,根据实际降水量采集约 50~100 mL。同样需要注意的是采集完成后需立即密封保存,并尽快完成测试工作。笔者共采集夏季湖泊水样 27 个,大气降水样品 14 个。

湖泊冰、水以及大气降水样品的稳定 H、O 同位素值采用美国 Los Gatos Research(LGR)公司生产的液态水同位素分析仪进行测定。样品在分析测试之前需要经过 0.45 μm 的滤膜过滤 2~3 次,每一样品测试 6 次,取后 4 次的平均值。样品测试结果均经过国际原子能机构(IAEA)的 VSMOW 标准样品进行校正,测试精确度为:δ<sup>18</sup>O 误差小于 0.1 ‰,δD 误差小于 0.3 ‰。所有测试分析工作均在内蒙古农业大学水资源保护与利用自治区重点实验室完成。

## 3 结果与讨论

### 3.1 达里湖冬季不同厚度冰层中稳定 H、O 同位素值变化对比

达里湖是中国北方寒旱区典型的高原内陆湖泊,每年拥有长达 4~5 个月冰封期(根据近几年的实际观察结果,每年的 11 月上旬达里湖即可完全

表 1 2013 年 1 月达里湖湖水(冰)取样站点位置

Table 1 Sample locations of lake ice and water in the Dali-Nor Lake during January 2013

序号	站点名称	经度(°)	纬度(°)	水深(m)	冰厚(m)
1	A7	116.695 9	43.370 8	3.0	0.92
2	B4	116.598 7	43.332 6	6.8	1.01
3	C5	116.632 9	43.300 5	8.5	0.93
4	C7	116.722 3	43.300 0	7.3	1.01
5	D4	116.603 6	43.267 7	1.7	1.12
6	D6	116.666 9	43.266 7	7.0	1.21
7	E1	116.501 2	43.233 6	8.1	0.90
8	E2	116.516 9	43.216 9	9.5	1.06
9	E5	116.633 9	43.233 4	7.8	1.10

冰封,第 2 年的 4 月下旬才能开始解冻).虽然年均结冰厚度受到湖泊地形、湖水深度以及冬季温度等因素的影响,但是近几年的测量结果显示各取样点处冬季冰层平均厚度超过 0.8 m.而在 2013 年 1 月,达里湖各取样点湖冰最厚处可以达到 1.21 m(D6 点,表 1),最薄处也有 0.9 m(E1 点,表 1),这为分析达里湖冬季冰体中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值分布及变化特征提供了理想材料.

由于湖泊结冰是由表层水体开始,逐渐向下冰冻,最终形成具有一定厚度的湖冰(Duguay *et al.*, 2003; Ashton, 2011; 滕晖等, 2011),因此通过表层(15 cm)、中层(35 cm)与深层(65 cm)冰体中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值的对比,将在一定意义上揭示结冰过程中水体稳定 H、O 同位素值的变化情况.而通过对比不同厚度冰层中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值的变化及分布特征,可以发现结冰过程的确会对湖泊水体稳定 H、O 同位素值分馏过程产生影响.同时,取样点的位置差异也会导致水体稳定 H、O 同位素值出现变化.首先,在中层冰体(35 cm)与表层冰体(15 cm)间,多数站点间的  $\Delta\delta D$  为正值,初步显示结冰过程主要导致  $\delta D$  值出现偏重(图 2,表 2).当然,需要注意的是,B4 与 C5 点出现相反变化趋势,分别偏轻约 0.46、0.43;同样,多数站点间的  $\Delta\delta^{18}O$  值也表现为正值,虽然 D6、E5 与 B4 点偏轻,但是 D6、E5 点的  $\Delta\delta^{18}O$  值仅仅出现

约 0.03‰ 的轻微偏移,鉴于分析测试过程中的误差,该偏移可以忽略不计.只有 B4 点出现较为明显的变化,相对偏轻约 0.23‰(图 2,表 2).因此,可以说在表层冰体到中层冰体过程中,多数站点的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值均出现不同程度的偏重.

其次,在深层冰体(65 cm)与中层冰体(35 cm)之间,虽然  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值随着结冰过程的进行又发生不同程度的改变,但是多数站点间的  $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$  值同样趋于偏重,只有个别站点出现偏轻.例如,在这一过程中,D6 点的  $\delta D$  值出现约 0.07‰ 的偏轻,C5、D4 的  $\delta^{18}O$  值分别偏轻约 0.05‰、0.08‰(鉴于仪器分析误差,上述偏移同样可以忽略不计).只有 C7 点的  $\delta^{18}O$  值出现明显偏轻,约 0.37‰(图 2,表 2).

整体看来,虽然不同冰层间  $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$  值的偏移情况存在差异,但是深层冰体与表层冰体间的  $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$  全部为正值,即相对于表层冰体,深层冰体中的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值均出现不同程度的偏重(表 2).同时,这也说明由于结冰过程的存在,最终导致湖泊冰体中稳定  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值逐渐出现不同程度的偏重.当然,值得注意的是, $\delta^{18}O$  与  $\delta D$  的变化对结冰过程的响应并不完全一致:相对于  $\delta D$  的变化而言,结冰过程中湖泊水体  $\delta^{18}O$  的变化过程可能要相对复杂一些(图 2,表 2).

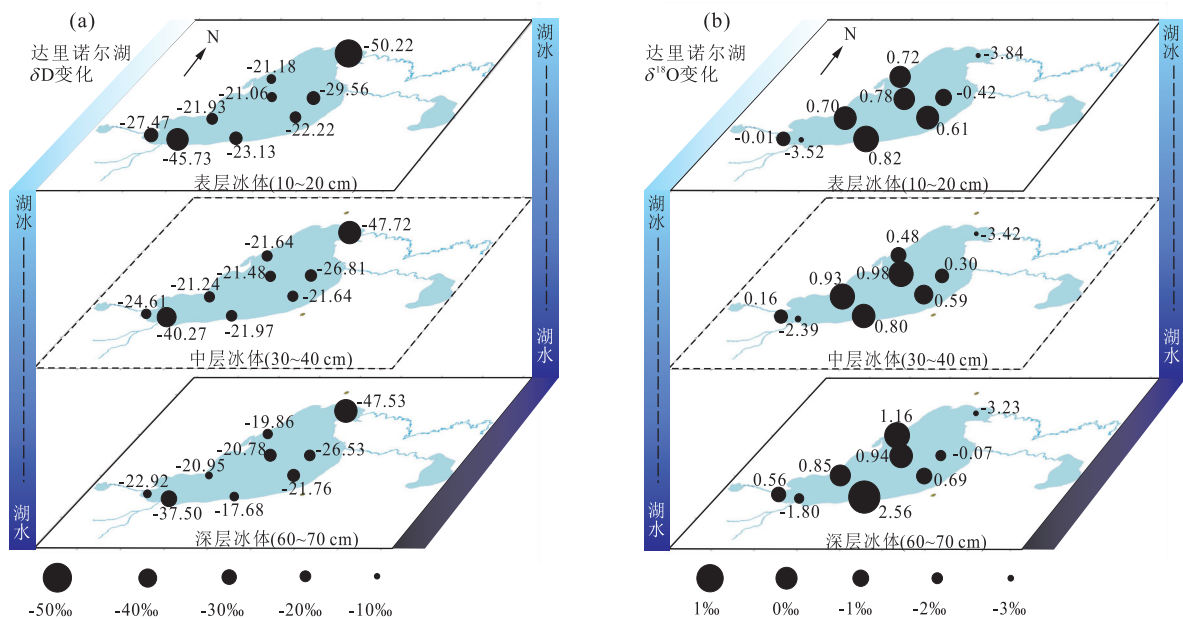


图 2 不同厚度冰层中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  同位素值分布特征

Fig.2 Distribution of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in different layers of lake ice

a.达里湖不同厚度冰层中  $\delta D$  的分布特征;b.为达里湖不同厚度冰层中  $\delta^{18}O$  的分布特征;图中黑色圆点为 H、O 同位素值变化示意,各站样品中 H、O 同位素的具体数值以图中给出的大小为准则



表 2 达里湖不同厚度冰层间  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  同位素差值变化Table 2 The change of  $\Delta\delta D$  and  $\Delta\delta^{18}O$  between different layers of lake ice

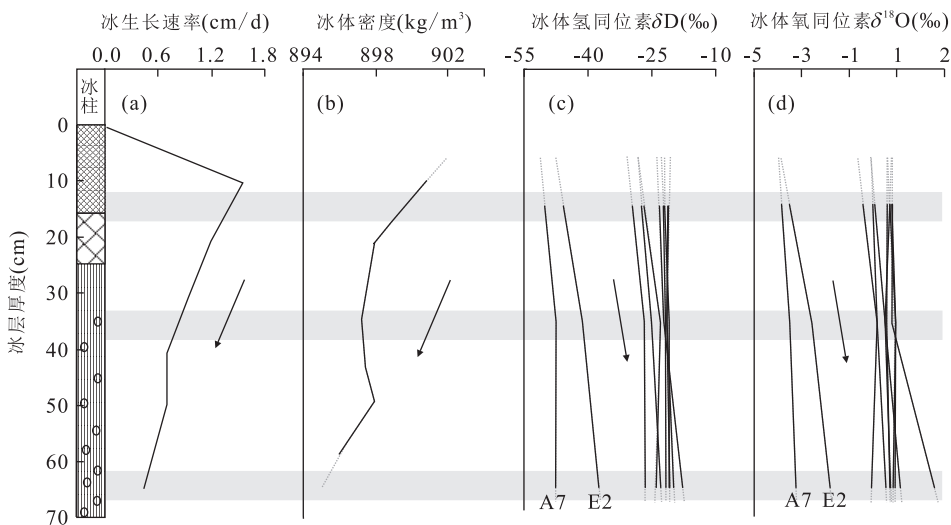
	厚度	取样点								
		A7	B4	C5	C7	D4	D6	E1	E2	E5
$\Delta\delta D(\text{‰})$	35~15 cm	2.50	-0.46	-0.43	2.75	0.69	0.58	2.86	5.46	1.15
	65~15 cm	2.69	1.32	0.28	3.03	0.97	0.51	4.55	8.23	5.45
$\Delta\delta^{18}O(\text{‰})$	35~15 cm	0.44	-0.23	0.20	0.72	0.23	-0.03	0.17	1.13	-0.03
	65~15 cm	0.62	0.44	0.15	0.35	0.15	0.08	0.57	1.72	1.77

而通过对相对稳定水体(如湖泊、水库等)的结冰过程的实际观测分析结果显示:结冰过程可以分为快速结冰和稳定结冰两个阶段;其中表层冰体主要形成于快速结冰阶段;中层及以下冰体则主要形成于稳定结冰阶段(图 3a, 3b)(李志军等, 2009; Scott *et al.*, 2011; Aslamova *et al.*, 2014). 具体来讲,在冰体生长过程中,冰体密度会出现一定幅度下降,冰体的结构与构造也随之出现一定程度的变化,下层冰体中的气泡明显增加.而伴随冰体结构的改变,不同深度冰体中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值的组成也发生改变.在达里湖,各个站点冰体中的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值则基本呈现出偏重的变化趋势(图 3c, 3d, 表 2).由图 3 可以看出,冰体中稳定同位素值的变化主要发生在表层冰体与中层冰体之间,这可能和冰体生长速率及冰体密度的改变存在一定的联系(在后续的研究工作中,需要进一步分析不同冰层厚度中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值的变化情况).整体上,结冰过程的阶段性差异显然会对湖泊水体稳定同位素的分馏过程产生影响,导致

深层冰体中的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值都要比表层冰体偏重.而伴随结冰过程进入稳定阶段,冰体中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值的变化幅度也出现了一定程度的下降.

另一方面,外部水体的输入对湖泊冰体中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值的变化也产生了一定的影响.例如,入湖河流河口区域附近的 A7、E2 站点的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值比其他站点的同位素值明显偏轻(图 2).以 7~9 月为例,达里湖入湖河流的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  同位素平均值( $-87.78\text{‰}$ 、 $-13.55\text{‰}$ ),都远轻于湖水水体  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  同位素平均值( $-37.66\text{‰}$ 、 $-3.38\text{‰}$ )(甄志磊等, 2014).这也说明在缺少有效降水的冬季,外部水体的输入将对湖泊水体稳定同位素值变化产生一定程度的影响.不过,在整个结冰过程中, A7、E2 点与其他站点的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值的变化趋势基本一致(图 2, 3)(Craig, 1961; 章新平等, 2003; 马金珠等, 2007; Mugler *et al.*, 2008).

总之,伴随结冰过程的进行,各站点冰体中的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值均出现一定程度的偏重.而结冰过程中冰

图 3 结冰过程中湖冰生长速率、冰体密度及冰体  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值变化Fig. 3 Changes of ice grown rate, ice density and  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  value during the freezing process

a. 湖泊结冰过程中冰体的生长速率(张岩等, 2012); b. 湖泊结冰过程中冰体密度变化(李志军等, 2009); c. 湖泊不同厚度冰层中  $\delta D$  变化; d. 湖泊不同厚度冰层中  $\delta^{18}O$  变化. 图中阴影条带代表本文湖泊冰体样品采集深度范围, 图 b~d 中黑色实线为实验数据范围, 虚线代表各个参数的可能趋势外延趋势, 不代表实际变化情况, 仅供参考; A7、E2 为采样点

体结构的阶段性变化,对冰体中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值的分馏过程也产生了差异影响:在快速结冰阶段, $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值变化幅度较大;在稳定结冰阶段, $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值的变化幅度则相对下降。同时,在冰体的形成过程中, $\delta^{18}O$  值的变化比  $\delta D$  值的变化可能要复杂一些。此外,虽然冬季外源水体的输入对相关站点的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值大小产生一定程度的影响,但是对结冰过程导致的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值出现整体偏重趋势的干扰却并不明显。

### 3.2 达里湖冬、夏季湖冰(水)中 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值变化差异

在地理位置上,达里湖位于东亚夏季风的北部边缘(安成邦和陈发虎,2009),区域降水量主要受到东亚夏季风的影响,这也导致夏季成为该区域的主要降水期,多年降水资料显示该区域 6~9 月的降水量占到年均降水量的 70% 以上(吕妍等,2009)。为了进一步了解结冰过程对水体稳定 H、O 同位素分馏作用的影响,本文选取夏季大气降水样品与湖泊水体样品(主要集中在 7~9 月)作为参考,通过达里湖夏、冬季湖水之间同位素值变化的比较,结合大气降水同位素值的变化,对冬季达里湖稳定 H、O 同位素分馏过程的影响因素进行了深入分析。

伴随湖泊冰层的逐渐形成,达里湖冰下水体中的

$\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值与冰体中的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值出现明显差异:冰下水体中  $\delta D$  平均值比上覆冰体中的平均值偏轻了约 13.85‰,而冰下水体中  $\delta^{18}O$  平均值则比冰体中的平均值偏轻约 2.23‰。另外,冰下水体与湖冰之间  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  值的明显差异显示了结冰过程的确会对湖泊水体稳定 H、O 同位素的分馏产生明显影响(图 4a,表 3);而通过冬季湖泊冰下水体与夏季湖水的比较,可以发现多数站位冬季水体样品中的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  平均值比夏季湖水中的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  平均值偏重(图 4b),特别是  $\delta^{18}O$  值偏重明显。如果不考虑近河口的 A7 与 E2 两个站位,那么各站位冬季湖泊水体中  $\delta^{18}O$  平均值要比夏季湖泊水体中的  $\delta^{18}O$  平均值偏重约 1.89‰;  $\delta D$  平均值要比夏季水体中的  $\delta D$  平均值偏重约 1.11‰;当然,如果考虑 A7 与 E2 两个站位,那么各站位冬季水体中  $\delta^{18}O$  平均值同样比夏季水体中的  $\delta^{18}O$  平均值偏重约 1.14‰;相反地, $\delta D$  平均值则比夏季水体中的  $\delta D$  平均值偏轻约 3.49‰(表 3)。

由此可见,相对于夏季湖水而言,虽然冬季外源水体的输入确实可以对近河口区域的湖泊水体稳定同位素值变化产生一定的影响,导致相关站点(A7, E2)的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值大幅度偏轻,但是对结冰过程中湖泊水体 H、O 同位素值变化趋势的影响并不明显。伴随结冰过程的进行,湖泊冰体逐渐富集较重的

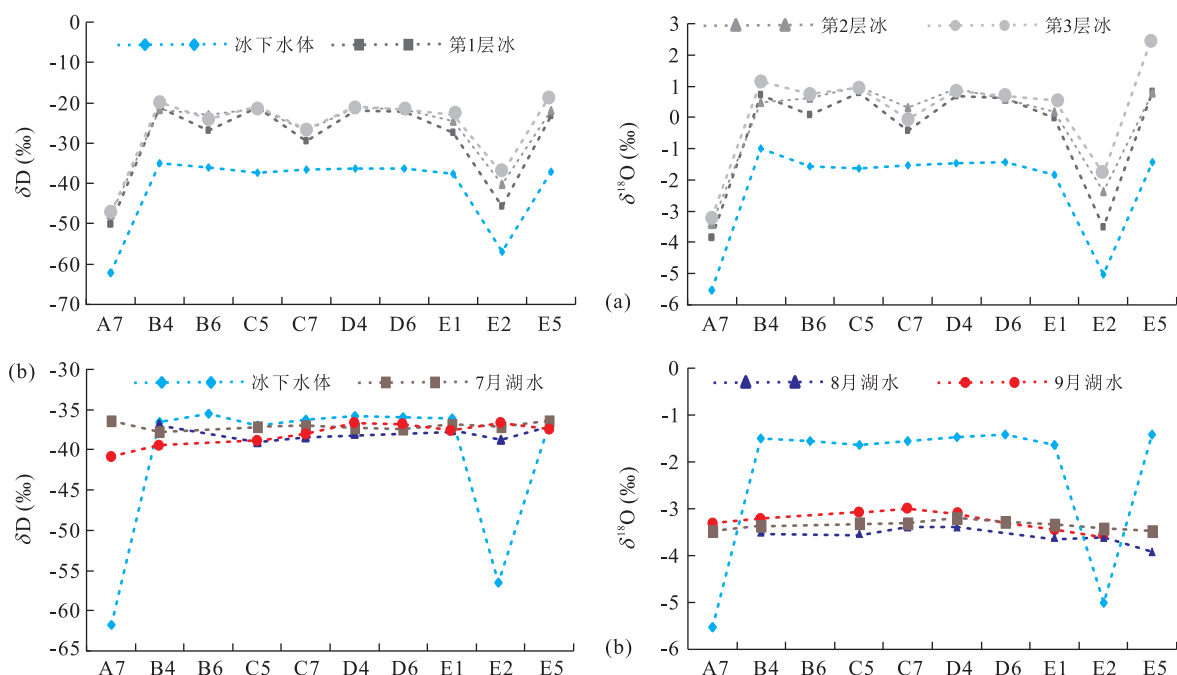


图 4 达里湖冬季湖水与冬季湖冰及夏季湖水中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值变化对比

Fig.4 Comparison of  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  values of lake water between winter and summer

a.达里湖冬季湖冰与冰下水体中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值对比;b.达里湖冬季冰下水体与夏季湖水中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值对比。图中实验结果间的连接虚线不代表各点间具体的变化趋势

表 3 达里湖区域降水及湖水中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  平均值Table 3 The average value of  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  in precipitation, lake water and ice

	夏季降水	夏季湖水	冬季湖水	冬季湖冰	冬季平均(湖冰+湖水)
$\delta D$	-64.23	-37.66	-41.15(-36.55)*	-27.30	-34.23
$\delta^{18}O$	-8.33	-3.38	-2.24(-1.49)*	-0.009	-1.123

注:带“\*”的表示括号内数值为去掉 A7、E2 两点以后的冬季湖泊水体各站点的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  的平均值。

H、O 同位素,进而导致冰下水体中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值出现不同程度的偏轻。

同时,相对于冬季外源水体输入导致达里湖相关站点  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值出现差异,夏季各站点湖水中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值表现出了明显的稳定性。就 7、8、9 三个月而言,相对冬季湖水,不同月份中达里湖水体的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值的差异并不大,而同一时间不同区域取样点(即使是河流入湖口处的 A7、E2 点)之间的同位素差值也很小(图 4)。因此,可以说这一结果显示了夏季的蒸发过程与降水过程对湖泊水体 H、O 同位素值变化的影响可能产生了相互抵消的作用,导致夏季湖泊水体的 H、O 同位素值没有出现大幅度变化。而在冬季,由于冰封作用的影响,入湖河流等外源水体由冰下直接进入湖中,进而导致河口附近区域的站点  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值出现明显变化。

通过对达里湖湖水、湖冰及区域大气降水同位素组成情况的综合分析,结果显示:(1)无论夏季还是冬季,达里湖湖水、湖冰的同位素值均落在全球大气降水线和达里湖区域降水线之外,这显示自夏季到冬季,蒸发对湖泊水体同位素偏移存在一定程度的影响(图 5,表 3)(郑淑蕙等,1983;Schefuss *et al.*,2005;徐彦伟等,2011);(2)达里湖冬季湖水、湖冰同位素值全部落在了夏季湖水同位素值的右侧,而由于冬季冰封作用的影响,显然这一阶段内蒸发对同位素值分馏作用的影响会被大幅度削弱,因此造成这种偏移的因素只能归结于结冰过程。同时,达里湖冬季湖水与湖冰的同位素值基本位于同一斜率区间,显示两者之间并不存在明显的蒸发分异作用(Craig,1961;Mugler *et al.*,2008;徐彦伟等,2011),这进一步表明冬季冰封期间,蒸发对同位素值的分馏作用影响很弱,湖泊水体的同位素分馏主要依靠结冰过程完成,这也解释了冬季河口区域站点与其他站点间同位素值的明显差异现象。

整体上,寒旱区湖泊水体中的 H、O 同位素的分馏作用受到多种因素的影响,如蒸发、大气降水输入以及河流水体输入等多种因素(张华安等,2011;甄志磊等,2014;Hepp *et al.*,2014)。而在达里湖,冰封过程造成的水体稳定同位素的分馏程度可能要比

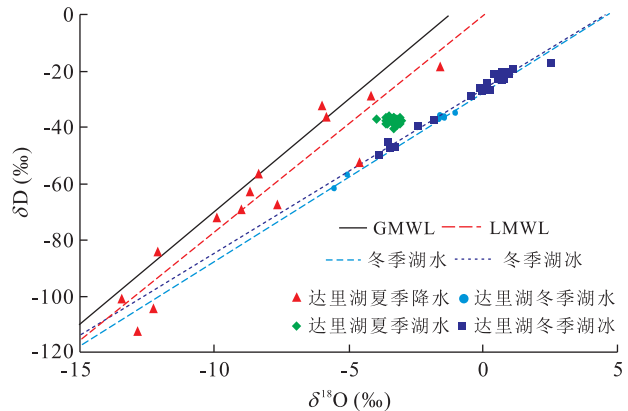


图 5 达里湖湖水(冬季、夏季)、湖冰及湖区大气降水等的同位素组成

Fig.5  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  relation of waters (winter and summer), ice and precipitation in Dali-Nor Lake

GMWL 为全球降水曲线(Craig,1961);LMWL 为达里湖区域夏季降水曲线,根据 2012 年 7—9 月份达里湖区域大气降水样品的稳定同位素值计算,其公式为: $\delta D=7.71\delta^{18}O-0.06$ , $R^2=0.8975$

蒸发造成的分馏程度强烈,以水体 H 同位素为例,夏季湖水中  $\delta D$  平均值与冬季湖(水+冰)中  $\delta D$  平均值相差约 5.74 ‰,远远小于冬季湖泊水体与冰体之间约 9.25‰的差值。同时,由于冬季冰封过程的存在,蒸发对湖泊水体同位素分馏过程几乎不存在影响,这一阶段的同位素分馏过程主要受到结冰过程的影响。

## 4 结论

(1)伴随达里湖结冰过程的进行,各站点冰体中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值逐渐出现不同程度的偏重。结冰过程中冰体结构的阶段性变化,对冰体中稳定 H、O 同位素分馏过程也产生了差异影响:在快速结冰阶段, $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值变化幅度较大;在稳定结冰阶段, $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值的变化幅度则相对下降。

(2)冰下水体中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值比冰体分别偏轻约 13.85‰、2.23‰,显示了结冰过程对湖泊水体稳定 H、O 同位素分馏作用的影响明显。此外,虽然位于河口区域的 A7、E2 点的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值比其他站点明

显偏轻,可能受到冬季外源水体的输入的影响,但是外源水体的输入对相关站点水体  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值在结冰过程中的整体变化趋势并没有明显干扰。

(3)在达里湖,无论夏季湖水还是冬季湖水、湖冰的同位素值均落在全球大气降水线与湖区大气降水线之外,显示自夏季到冬季,蒸发对湖泊水体同位素偏移存在一定程度的影响;而在冬季,达里湖冬季湖水与湖冰的同位素值基本位于同一斜率区间,显示两者之间并不存在明显的蒸发分异作用,同时两者的同位素值又全部落在夏季湖水同位素值的右侧,由于冬季冰封作用的影响,显然这一阶段里蒸发对水体同位素值变化的影响作用会被大幅度削弱,造成这种偏移的因素只能归结到结冰过程。因此,在冬季冰封期,蒸发对达里湖水体同位素分馏过程几乎不存在影响,这一时期的水体同位素分馏过程主要受到结冰过程的影响。

致谢:感谢两位匿名审稿专家提出的宝贵意见!感谢内蒙古自治区达里诺尔湖国家级自然保护区生态旅游有限公司工作人员在采样过程中给予的大力帮助。

## References

- An, C. B., Chen, F. H., 2009. The Pattern of Holocene Climate Change in the Arid Central Asia: A Case Study Based on Lakes. *Journal of Lake Sciences*, 21(3): 329–334 (in Chinese with English abstract).
- Ashton, G. D., 2011. River and Lake Ice Thickening, Thinning, and Snow Ice Formation. *Cold Regions Science and Technology*, 68(1–2): 3–19. doi: 10.1016/j.coldregions.2011.05.004
- Aslamova, I. A., Kozlovb, V. V., Kirillinc, G. B., et al., 2014. Ice-Water Heat Exchange during Ice Growth in Lake Baikal. *Journal of Great Lakes Research*, 40(3): 599–607. doi 10.1016/j.jglr.2014.06.004
- Bao, W. M., Hu, H. Y., Qu, S. M., et al., 2007. Application of Stable Isotope Method to the Water Balance of Lakes. *Yellow River*, 29(8): 29–30 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1000–1379.2007.08.014
- Craig, H., 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133(3465): 1702–1703. doi: 10.1126/science.133.3465.1702
- Duguay, C. R., Flato, G. M., Jeffries, M. O., et al., 2003. Ice-Cover Variability on Shallow Lakes at High Latitudes: Model Simulations and Observations. *Hydrological Processes*, 17(17): 3465–3483. doi: 10.1002/hyp.1394
- Gibson, J. J., Reid, R., 2014. Water Balance along a Chain of Tundra Lakes: A 20-Year Isotopic Perspective. *Journal of Hydrology*, 519: 2148–2164. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.011
- Gong, T. L., Tian, L. D., Liu, D. N., et al., 2007. A Preliminary Study of Stable Isotope Cycle Processes in Lake Water in the Yamzho Lake Basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 29(6): 914–920 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1000–0240.2007.06.010
- Hepp, J., Tuthorn, M., Zech, R., et al., 2014. Reconstructing Lake Evaporation History and the Isotopic Composition of Precipitation by a Coupled  $\delta^{18}O$ - $\delta^2H$  Biomarker Approach. *Journal of Hydrology*, 519: 2164–2173. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.012
- Hu, H. Y., Bao, W. M., Qu, S. M., et al., 2007. Fractionation Mechanism of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope in Water Body Evaporating. *Journal of China Hydrology*, 27(3): 1–5 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1000–0852.2007.03.001
- Hu, R. J., Jiang, F. Q., Wang, Y. J., et al., 2007. On the Importance of Research on the Lakes in Arid Land of China. *Arid Zone Research*, 24(2): 137–140 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, J. H., Huang, Q., 2004. Analysis on Utilization of the Lacustrine Water Resources and the Salinization of Lacustrine in West China. *Arid Land Geography*, 27(3): 300–304 (in Chinese with English abstract).
- Jonsson, C. E., Leng, M. J., Rosqvist, G. C., et al., 2009. Stable Oxygen and Hydrogen Isotopes in Sub-Arctic Lake Waters from Northern Sweden. *Journal of Hydrology*, 376: 143–151. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.07.021
- Li, Y. W., Han, T. C., 2000. Situation of Lakes Water Resources and Major Environmental Problems in Inner Mongolia. *Inner Mongolia Environmental Protection*, 12(2): 17–21 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. J., Yang, Y., Peng, X. M., et al., 2009. The Analysis of the Field Observation Data of Fresh Ice Growing Process in Hongqipao Reservoir of Heilongjiang. *Journal of Xi'an University of Technology*, 25(3): 270–274 (in Chinese with English abstract).
- Liang, Y., Xiao, H. Y., Liu, X. Z., et al., 2014. Identifying Provenance of Inorganic Nitrogen and Organic Matter in Different Ecotype Lakes Using  $\delta^{13}C$  and  $\delta^{15}N$ . *Journal of Lake Sciences*, 26(5): 691–697 (in Chinese with English abstract).
- Lü, Y., Wang, R. H., Cai, Z. Y., 2009. Climatic Change and Influence in Arid And Semi-Arid Area of China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 23(11): 65–71 (in Chinese with English abstract).



- Ma, J. Z., Huang, T. M., Ding, Z. Y., et al., 2007. Environmental Isotopes as the Indicators of the Groundwater Recharge in the South Bada in Jaran Desert. *Advances in Earth Science*, 22(9): 922–930 (in Chinese with English abstract).
- Mayr, C., Lucke, A., Stichler, W., et al., 2007. Precipitation Origin and Evaporation of Lakes in Semi-Arid Patagonia (Argentina) Inferred from Stable Isotopes ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ). *Journal of Hydrology*, 334: 53–63. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.09.025
- Mugler, I., Sachse, D., Werner, M., et al., 2008. Effect of Lake Evaporation on  $\delta\text{D}$  Values of Lacustrine *n*-Alkanes: A Comparison of Nam Co (Tibetan Plateau) and Holzmaar (Germany). *Organic Geochemistry*, 39: 711–729. doi: 10.1016/j.orggeochem.2008.02.008
- Ohba, T., Hirabayashi, J., Nogami, K., 2000. D/H and  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  Ratios of Water in the Crater Lake at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97: 329–346.
- Pu, P. M., Tu, Q. Y., Wang, S. M., 1989. Research Progress of Limnology in China. *Journal of Lake Science*, 1(1): 1–11 (in Chinese).
- Qin, B. Q., 1999. A Preliminary Investigation of Lake Evolution in 20-Century in Inland Mainland Asia with Relation to the Global Warming. *Journal of Lake Sciences*, 11(1): 11–19 (in Chinese with English abstract).
- Schefuss, E., Schouten, S., Schneider, R. R., 2005. Climatic Controls on Central African Hydrology during the Past 20 000 Years. *Nature*, 437(7061): 1003–1006. doi: 10.1038/nature03945
- Scott, J., Rosen, M. R., Saito, L., et al., 2011. The Influence of Irrigation Water on the Hydrology and Lake Water Budgets of Two Small Arid-Climate Lakes in Khorezm, Uzbekistan. *Journal of Hydrology*, 410: 114–125.
- Stichler, W., Maloszewski, P., Bertleff, B., et al., 2008. Use of Environmental Isotopes to Define the Capture Zone of a Drinking Water Supply Situated near a Dredge Lake. *Journal of Hydrology*, 362: 220–233. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.08.024
- Sun, Y. Y., He, J., Lü, C. W., et al., 2013. Forms Composition of Inorganic Carbon in Sediments from Dali Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 33(2): 610–618 (in Chinese with English abstract).
- Teng, H., Deng, Y., Huang, F. B., et al., 2011. Experimental Study on the Simulation of Freezing Processes in Calm Waters and Thermal Changes on Reservoir Ice Cover. *Advances in Water Science*, 22(5): 720–726 (in Chinese with English abstract).
- Williams, W. D., 1991. Chinese and Mongolian Saline Lakes: A Limnological Overview. *Hydrobiologia*, 210(1–2): 39–66. doi: 10.1007/bf00014322
- Xiao, J. L., Si, B., Zhai, D. Y., et al., 2008. Hydrology of Dali Lake in Central-Eastern Inner Mongolia and Holocene East Asian Monsoon Variability. *Journal of Paleolimnology*, 40(1): 519–528.
- Xu, Y. W., Kang, S. C., Zhang, Y. L., et al., 2011. A Method for Estimating the Contribution of Evaporative Vapor from the Lake Nam Co to Local Atmospheric Vapor Based on Stable Isotopes of Water Bodies. *Chinese Science Bulletin*, 56(13): 1042–1049 (in Chinese). doi: 10.1007/s11434-011-4467-2
- Yang, G. S., Ma, R. H., Zhang, L., et al., 2010. Lake Status, Major Problems and Protection Strategy in China. *Journal of Lake Sciences*, 22(6): 799–810 (in Chinese with English abstract).
- Yu, T. T., Gan, Y. Q., Zhou, A. G., et al., 2010. Characteristics of Oxygen and Hydrogen Isotope Distribution of Surface Runoff in the Lhasa River Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 873–878 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. A., Wang, N. A., Li, Z. L., et al., 2011. Features of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Lakes and Groundwater in Southeast Badain Jaran Desert. *Journal of Desert Research*, 31(6): 1623–1629 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. P., Yao, T. D., 1997. Estimation of Lake Evaporation by Stable Isotopic Ratio. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 19(2): 62–66 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. P., Yao, T. D., Tian, L. D., 2003. Study on the Fractionation Mechanism of Stable Isotope in Evaporating Water Body. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25(1): 65–71 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1000-0240.2003.01.010
- Zhang, Y., Li, C. Y., Pei, G. X., et al., 2012. Field Observation of Ice Growing Process in Wuliangshuai Lake. *Yellow River*, 36(8): 8–20 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. H., Wu, Y. Q., Wen, X. H., et al., 2006. Application of Environmental Isotopes in Water Cycle. *Advances in Water Science*, 17(5): 738–747 (in Chinese with English abstract).
- Zhen, Z. L., Li, C. Y., Li, W. B., et al., 2014. Characteristics of Environmental Isotopes of Surface Water and Groundwater and Their Recharge Relationship in Lake Dali Basin. *Journal of Lake Sciences*, 26(6): 916–922 (in Chinese with English abstract).

Zhen, Z.L., Zhang, S., Shi, X.H., et al., 2013. Research on the Evolution of Dali Lake Area Based on the Remote Sensing Technology. *China Rural Water and Hydropower*, (7): 6–9 (in Chinese with English abstract).

Zheng, S.H., Hou, F.G., Ni, B.L., 1983. The Study of Hydrogen and Oxygen Isotope of Precipitation in China. *Chinese Science Bulletin*, 28(13): 801–806 (in Chinese).

## 附中文参考文献

安成邦, 陈发虎, 2009. 中东亚干旱区全新世气候变化的西风模式——以湖泊研究为例. *湖泊科学*, 21(3): 329–334.

包为民, 胡海英, 瞿思敏, 等, 2007. 稳定同位素方法在湖泊水量平衡研究中的应用. *人民黄河*, 29(8): 29–30.

巩同梁, 田立德, 刘东年, 等, 2007. 羊卓雍湖流域湖水稳定同位素循环过程研究. *冰川冻土*, 29(6): 914–920.

胡海英, 包为民, 瞿思敏, 等, 2007. 稳定性氢氧同位素在水体蒸发中的研究进展. *水文*, 27(3): 1–5.

胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等, 2007. 论中国干旱区湖泊研究的重要意义. *干旱区研究*, 24(2): 137–140.

姜加虎, 黄群, 2004. 我国西部地区湖泊水资源利用与湖水咸化状况分析. *干旱区地理*, 27(3): 300–304.

李亚威, 韩天成, 2000. 内蒙古湖泊水资源及主要环境问题. *内蒙古环境保护*, 12(2): 17–21.

李志军, 杨宇, 彭旭明, 等, 2009. 黑龙江红旗泡水库冰生长过程现场观测数据的剖析. *西安理工大学学报*, 25(3): 270–274.

梁越, 肖化云, 刘小真, 等, 2014.  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  指示不同生态类型湖泊无机氮及有机质来源. *湖泊科学*, 26(5): 691–697.

吕妍, 王让会, 蔡子颖, 2009. 我国干旱半干旱地区气候变化及其影响. *干旱区资源与环境*, 23(11): 65–71.

马金珠, 黄天明, 丁贞玉, 等, 2007. 同位素指示的巴丹吉林沙漠南缘地下水补给来源. *地球科学进展*, 22(9): 922–930.

璞培民, 屠清瑛, 王苏民, 1989. 中国湖泊学研究进展. *湖泊科学*, 1(1): 1–11.

秦伯强, 1999. 近百年来亚洲中部内陆湖泊演变及其原因分析. *湖泊科学*, 11(1): 11–19.

孙园园, 何江, 吕昌伟, 等, 2013. 达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成. *生态学报*, 33(2): 610–618.

滕晖, 邓云, 黄奉斌, 等, 2011. 水库静水结冰过程及冰盖热力变化的模拟试验研究. *水科学进展*, 22(5): 720–726.

徐彦伟, 康世昌, 张玉兰, 等, 2011. 夏季纳木错湖水蒸发对当地大气水汽贡献的方法探讨: 基于水体稳定同位素的估算. *科学通报*, 56(13): 1042–1049.

杨桂山, 马荣华, 张路, 等, 2010. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. *湖泊科学*, 22(6): 799–810.

余婷婷, 甘义群, 周爱国, 等, 2010. 拉萨河流域地表径流氢氧同位素空间分布特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(5): 873–878.

张华安, 王乃昂, 李卓仑, 等, 2011. 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*, 31(6): 1623–1629.

章新平, 姚檀栋, 1997. 利用稳定同位素比率估计湖泊的蒸发. *冰川冻土*, 19(2): 62–66.

章新平, 姚檀栋, 田立德, 2003. 水体蒸发过程中稳定同位素分馏的模拟. *冰川冻土*, 25(1): 65–71.

张岩, 李畅游, 裴国霞, 等, 2012. 乌梁素海湖泊冰生长过程的现场观测. *人民黄河*, 36(8): 18–20.

张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等, 2006. 环境同位素在水循环研究中的应用. *水科学进展*, 17(5): 738–747.

甄志磊, 李畅游, 李文宝, 等, 2014. 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. *湖泊科学*, 26(6): 916–922.

甄志磊, 张生, 史小红, 等, 2013. 基于遥感技术的达里诺尔湖面演化研究. *中国农村水利水电*, (7): 6–9.

郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄, 1983. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究. *科学通报*, 28(13): 801–806.