

# 羊卓雍错湖水稳定同位素空间变化特征研究<sup>①</sup>

臧娅琳<sup>1,2</sup>, 王建力<sup>1</sup>, 田立德<sup>2,3</sup>,  
翁永标<sup>2</sup>, 文蓉<sup>2</sup>, 宗继彪<sup>2</sup>

1. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715;
2. 中国科学院 青藏高原研究所环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101;
3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈国家重点实验室, 兰州 730000

**摘要:** 通过分析西藏南部羊卓雍错湖水表面及垂直剖面氢氧同位素的空间变化以及氢氧稳定同位素的关系, 讨论了羊卓雍错湖水蒸发过程中稳定同位素的空间分布特征以及湖水的内循环过程. 根据取得的 587 个水样的同位素分析结果, 发现羊卓雍错湖水中稳定同位素存在有规律的空间变化, 虽然变化的幅度不大, 但反应了湖水的内循环过程. 羊卓雍错湖水中的  $\delta^{18}\text{O}$  及过量氙表现出一致的空间变化, 有河流注入的周边区域  $\delta^{18}\text{O}$  低, 而中部偏东侧湖水中的  $\delta^{18}\text{O}$  最高而过量氙最低. 这种空间差异表明湖水在循环过程中存在从河流入湖口到湖泊中部的缓慢流动, 并最终完全在湖中心蒸发掉. 湖水西北部的同位素较低值与来自冰川融水的卡鲁雄曲河水的注入有关, 而西南部的低值表明普莫雍错的湖水流入了羊卓雍错. 湖水垂直剖面  $\delta^{18}\text{O}$  的变化很小, 接近仪器测量精度, 说明湖水的垂直混合较充分.

**关键词:** 湖水; 氢氧稳定同位素; 空间变化; 羊卓雍错; 湖水循环

**中图分类号:** P333; P339

**文献标志码:** A

稳定同位素作为自然界水体的组成部分, 是水文循环和水量平衡过程中最常用的示踪剂. 湖泊水体  $\delta^{18}\text{O}$  值可以反映流域降水、湖泊蒸发强度、流域水文状况及其湖水的滞留时间等特性. 稳定同位素方法是研究湖泊水文平衡以及区域水文循环过程的可行手段<sup>[1-3]</sup>, Gibson JJ<sup>[4]</sup> 等成功运用稳定同位素模型来评估高纬度地区湖泊的长期和短期蒸发过程, 这些研究表明  $\delta^{18}\text{O}$  可以有效指示湖水的循环过程.

青藏高原是我国最大的湖泊分布区之一<sup>[5]</sup>, 其湖水同位素在流域水文研究中具有特殊的意义. 通过对湖泊中稳定同位素变化的研究, 可以为解释青藏高原湖泊中稳定同位素的平衡过程提供可靠的依据<sup>[6-7]</sup>. 此外稳定同位素还被用来估算湖泊的蒸发强度, 并发现不同水体中稳定同位素变化对湖泊蒸发量有不同程度的响应<sup>[8]</sup>. 而针对羊卓雍错流域的  $\delta^{18}\text{O}$  研究已取得了不少成果, 利用现代降水与地表水  $\delta^{18}\text{O}$  并结合现代气象条件可以较好地模拟出现代湖水的  $\delta^{18}\text{O}$  变化<sup>[9-12]</sup>. 由于近些年羊卓雍错湖水水位下降显著, 羊卓雍错湖水水位以及湖泊面积的变化也受到了广泛关注, 不少学者对湖水水位与气象条件的关系<sup>[13-15]</sup> 及该湖水水位变化的原因<sup>[16-17]</sup> 进行了分析与讨论.

稳定同位素方法为研究湖水的内循环过程提供了一条新的途径, 特别是对于湖泊的水循环过程. 这里我们采集了羊卓雍错表面与不同深度的湖水样品, 特别是通过  $\delta^{18}\text{O}$  与  $\delta\text{D}$ , 以及过量氙的空间变化, 分析

① 收稿日期: 2013-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41025002); 全球变化研究国家重大科学研究计划(2010CB951702); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB03030100).

作者简介: 臧娅琳(1988-), 女, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要从事青藏高原湖水稳定同位素水文循环研究.

通信作者: 王建力, 教授, 博士生导师.

与讨论了羊卓雍错的内循环水文特征.

## 1 研究区域概况

羊卓雍错(N28°16′-29°11′, E90°21′-91°05′)是青藏高原南部最大的封闭性内陆湖泊,位于浪卡子县境内,北距雅鲁藏布江 8.0~10.0 km,其间以甘巴拉山相隔,与其周围的沉错、巴纠措、哲古错和普莫雍错等组成了藏南最大的内陆湖群.羊卓雍错是一个构造为基础的堰塞湖.水位 4 441.00 m,长 74.0 km,最大宽 33.0 km,平均宽 8.62 km,面积 638.0 km<sup>2</sup>,流域面积 6 100 km<sup>2</sup>,水深 20.0~40.0 m,最大水深 59.0 m,蓄水量 151×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>.羊湖形状呈树枝状,岸线曲折多湖汊、岬湾,岸线长 410.0 km,发育系数 4.35.湖区属藏南山地灌丛草原半干旱气候,年均气温 2.4 °C,多年平均降水量 373.0 mm,6 月至 9 月份约占年降水量的 92%,年蒸发量 2 074.0 mm.湖水主要由降水和冰雪融水补给,冰雪融水补给量约占总补给量的 30%.主要的入湖河流 6 条,包括南岸入湖的卡洞加曲;东岸入湖的嘎马林河;西、南岸入湖的卡鲁雄曲、蒲宗曲、香达曲、曲清河<sup>[18-19]</sup>.

## 2 样品的采集与分析

2011 年 10 月 10 日至 2011 年 10 月 19 日,我们利用游船与橡皮船在羊卓雍错在湖内部不同部分进行表面样品与垂直剖面水样采样,记录采集深度.湖水深层的水样利用定制的湖水采样器采集.同时,用手持 GPS 标注了采样点的位置.采集的表层湖水样和深层湖水样共计 587 个,其中表层水样 68 个,深层剖面水样 519 个.另外采集了 2 个注入湖水的河水样.具体的水样采样点分布情况如图 1 所示:

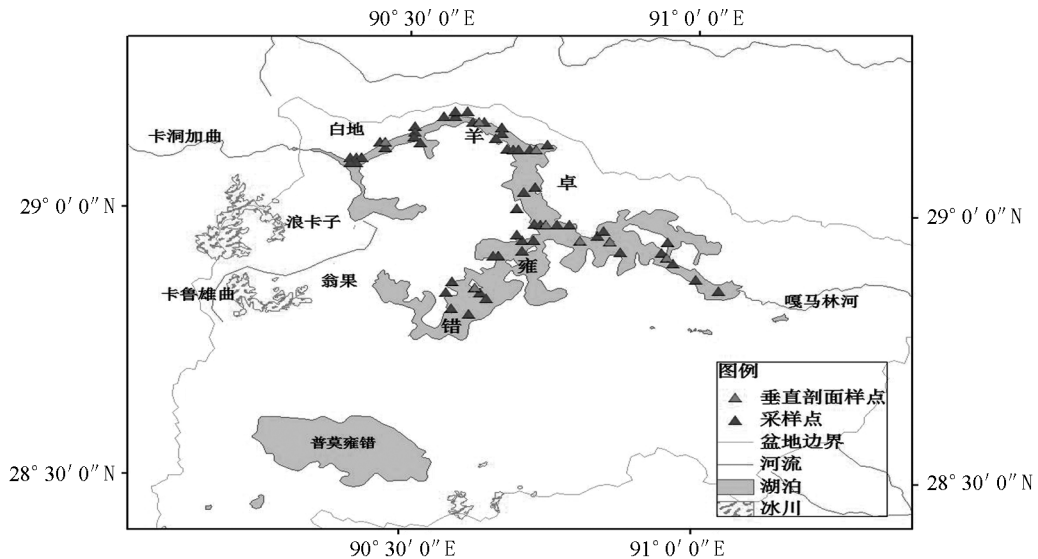


图 1 羊卓雍错采样点分布图

用采集的水样将水样瓶冲洗 3 次,然后再将水样密封在 15 mL 塑料水样瓶中密封,并在每个水样瓶上编号.用手持 GPS 记录采样点地理位置,同时记录详细信息.密封的水样被运回北京,在中国科学院青藏高原研究所环境与地表过程重点实验室用 Picarro 液体水同位素波长扫描光腔衰荡光谱仪(Wave Scan-Cavity Ring Down Spectrometer)进行测定.测量  $\delta^{18}\text{O}$  的精度控制在 0.15‰ 之内,测得的  $\delta\text{D}$  的精度为  $\pm 0.6\text{‰}$ .

## 3 结果与讨论

同位素测试结果显示,所采湖水样中, $\delta^{18}\text{O}$  的变化范围为  $-5.4\text{‰} \sim -3.8\text{‰}$ ,算术平均值为  $-4.7\text{‰}$  ( $n=65$ ),变化幅度为 1.6‰;  $\delta\text{D}$  的变化范围为  $-68.2\text{‰} \sim -61.3\text{‰}$ ,算术平均值为  $-65.2\text{‰}$  ( $n=65$ ),变化幅度为 6.9‰.其中  $\delta^{18}\text{O}$  高值出现在湖泊的中部地区,低值大部分出现在湖泊四周有河流注入的地方.

### 3.1 羊卓雍错湖水氢氧同位素关系

通常情况下,湖泊等水体主要来源于大气降水的补给,而通过研究大气降水中氢氧同位素与河流湖泊中

的氢氧同位素关系可以很好地示踪水循环. Craig 把大气降水中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  之间的关系定义为大气水线 (MWL). 在全球尺度下, 存在如下的关系:  $\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$ <sup>[20]</sup>. 该关系式反映在平均状况下, 水汽在其源地非平衡蒸发过程中稳定同位素的分馏程度. 然而, 气候、地区降水、水汽来源、地形地貌等因素会导致不同地区的大气降水线有很大的差别, 郑淑慧等<sup>[21]</sup>给出了我国的大气降水线:  $\delta D = 7.9 \times \delta^{18}O + 8.2$ .

图 2 为羊卓雍错湖水氢氧同位素关系, 根据表层 68 个水样的氢氧同位素值, 我们可以发现,  $\delta D = 4.18 \times \delta^{18}O - 45.53$ , 其中  $R^2 = 0.96$ , 其斜率 4.18 明显低于中国大气降水线斜率 7.9 ( $\delta D = 7.9 \times \delta^{18}O + 8.2$ ).

从图 2 还可以看出羊卓雍错采样点的同位素值位于中国大气水线的右下方, 说明湖水经历了强烈的蒸发.

在蒸发过程中, 较轻的稳定同位素成分易于离开水面进入大气, 其结果使自然界水中稳定同位素成分在时空分布上产生差异. 因此, 在研究水循环过程中的稳定性同位素变化时, 蒸发过程和凝结过程一样重要<sup>[22-24]</sup>. 蒸发湖水中稳定性同位素的变化趋势常常被称为当地蒸发曲线 (LEL)<sup>[8, 25-26]</sup>. 根据当地气象数据、降水与河水同位素值可以模拟出羊卓雍错湖水蒸发过程中氢氧稳定同位素<sup>[27]</sup>变化的蒸发曲线:  $\delta D = 3.67 \times \delta^{18}O - 50.1$ . 从图 2 也可以看出, 所采湖水样的同位素值与我们模拟出的蒸发曲线较一致, 且湖水的蒸发曲线明显偏离了降水线, 这说明湖水的强烈蒸发导致了湖泊水体中现代的稳定同位素值.

### 3.2 羊卓雍错深水剖面过量氘的变化

我们同时测量了羊卓雍错垂直剖面过量氘的变化. Dansgaard<sup>[28]</sup>把氢氧同位素关系的差值定义为过量氘, 用  $d$  表示, 即  $d = \delta D - 8 \times \delta^{18}O$ . 降水中过量的氘通常被用作水汽来源、源地大气湿度和水汽蒸发时同位素非平衡分馏的指标<sup>[29-31]</sup>. 理论上, 对于过量氘的变化机理已有比较清楚的认识. 过量氘的大小与水蒸发时的动力分馏过程有关<sup>[32-33]</sup>. 图 3 为羊卓雍错 8 个 (在图 1 采样点分布图中已经标出, 垂直剖面样点) 深水剖面 (35, 30, 35, 35, 25, 40, 30, 25 m) 83 个水样过量氘随深度变化. 从图 3 可以看出, 8 个剖面的湖水过量氘值都比较低, 且每个剖面都有略微波动. 图中显示 8 个剖面中湖水过量氘相差最大的是 GPS225 剖面, 最大值  $-26.9\%$  与最小值  $-29.1\%$ , 相差  $2.2\%$ , 其余 7 个剖面 (35, 35, 35, 25, 40, 30, 25 m) 分别相差  $1.3\%$ ,  $0.9\%$ ,  $1.0\%$ ,  $1.9\%$ ,  $1.3\%$ ,  $1.2\%$ ,  $0.9\%$ , 所以湖水的过量氘值变化较小. 垂直方向上湖水同位素值变化较小, 表明羊卓雍错湖水在垂直方向上的混合较充分. 高晶等<sup>[13]</sup>的研究也发现湖水剖面  $\delta^{18}O$  的变化较小, 与我们的研究结果较一致.

### 3.3 羊卓雍错表层水样 $\delta^{18}O$ 和过量氘的空间变化

根据表 1 的测量结果, 采用 Arcgis 进行插值计算作出了羊卓雍错表面湖水  $\delta^{18}O$  的空间变化图 (图 4). 从图中可以看出, 表层湖水  $\delta^{18}O$  存在空间变化, 虽然其变化的幅度不大. 这是因为羊卓雍湖不仅面积大, 而且形状复杂, 是由一系列相互连接的湖泊组成的. 其湖体呈树枝状分布, 沿岸多湖汊、岬湾, 不利于不同部位湖水的充分混合. 从稳定性同位素的空间变化来看, 中心湖区  $\delta^{18}O$  的值较高. 有河水注入的边缘地区为低值, 如表层湖水同位素  $\delta^{18}O$  西北面和西南面为低值区. 这是由于河水的  $\delta^{18}O$  值明显低于湖水的  $\delta^{18}O$  值, 采集的 2 个河水样的  $\delta^{18}O$  值分别为  $-18.0\%$  和  $-16.8\%$ . 高晶等<sup>[12-13]</sup>的研究成果中也给出了羊卓雍错流域河水的  $\delta^{18}O$  值, 翁果站河水在 2004 年和 2007 年观测期间, 河水的  $\delta^{18}O$  平均值分别为  $-18.3\%$  和  $-17.4\%$ .

由氢氧同位素值计算出过量氘的值, 从而作出过量氘的变化图 (图 5). 从图 5 上可以看出, 过量氘的变化范围为  $-25.1\%$  ~  $-32.0\%$ . 而全球降水中过量氘值为  $10\%$ , 羊卓雍错湖水过量氘值较低, 这反映出羊卓雍错湖水蒸发强烈. 羊卓雍错湖水过量氘和  $\delta^{18}O$  空间变化一致.

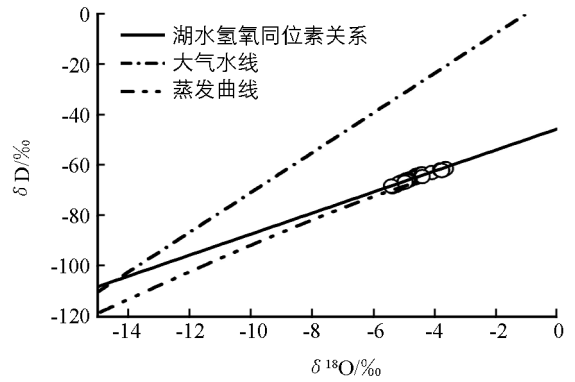


图 2 羊卓雍错湖水氢氧同位素关系图 ( $\delta D = 4.18 \times \delta^{18}O - 45.53$ ), 中国大气水线 ( $\delta D = 7.9 \times \delta^{18}O + 8.2$ ), 当地蒸发曲线 ( $\delta D = 3.67 \times \delta^{18}O - 50.1$ )

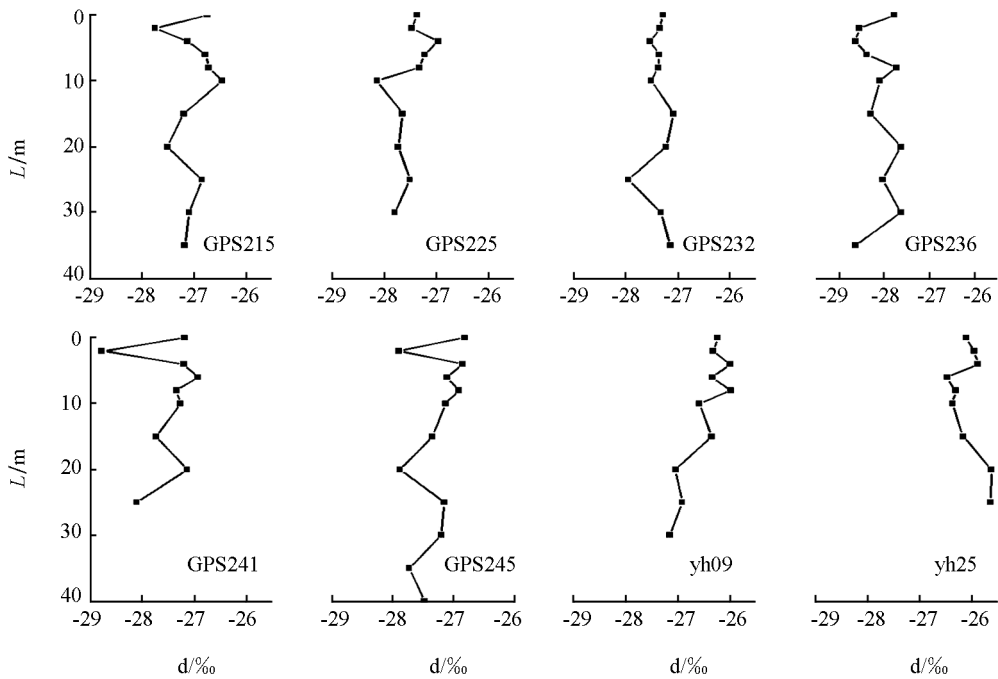


图 3 羊卓雍错湖水过量气随深度的变化

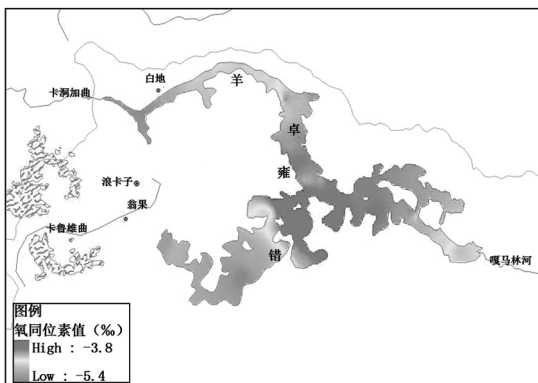
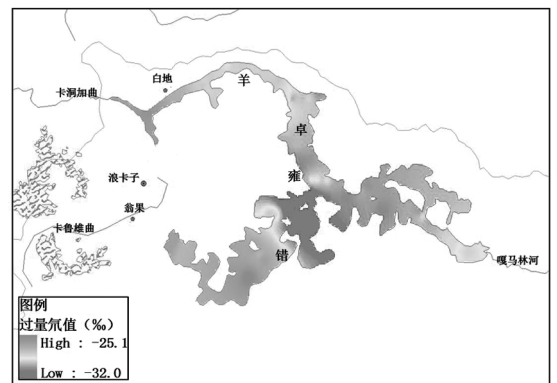
图 4 羊卓雍错表层水样  $\delta^{18}\text{O}$  的变化

图 5 羊卓雍错湖水过量气的空间变化

湖水同位素值的空间变化反映了湖水的内循环过程, 湖中中部偏东侧水中的  $\delta^{18}\text{O}$  最高而过量气最低。这种空间差异表明湖水在蒸发过程中存在从河流入湖口到湖泊中部的缓慢流动, 并最终完全在湖中心蒸发掉。入湖河流的分布及径流的大小影响了湖水中同位素的空间分布。湖水西北部的同位素低值与冰川融水的注入有关, 而西南部的低值表明普莫雍错的湖水流入了羊卓雍错。

## 4 结 论

1) 建立了羊卓雍错表层湖水氢氧同位素关系式:  $\delta\text{D}=4.18\times\delta^{18}\text{O}-45.53$ 。模拟得到的湖水中氢氧同位素关系线与观测结果一致。其斜率 4.18 明显低于中国大气降水线斜率 7.9, 且羊卓雍错采样点的同位素值全部在大气水线的右下方。表明湖水强烈蒸发控制了湖水中氢氧稳定同位素的关系。

2) 羊卓雍错表层湖水的  $\delta^{18}\text{O}$  和过量气存在空间变异,  $\delta^{18}\text{O}$  的变化范围为  $-5.4\text{‰}\sim-3.8\text{‰}$ , 而过量气的变化范围为  $-25.1\text{‰}\sim-32.0\text{‰}$ 。湖中中部偏东侧水中的  $\delta^{18}\text{O}$  最高, 而过量气最低。有河水注入的区域水中湖水  $\delta^{18}\text{O}$  低而过量气偏高。西北部的  $\delta^{18}\text{O}$  低值与冰川融水的注入有关, 而西南部的低值表明普莫雍错的湖水流入了羊卓雍错。此外, 也跟注入水量的大小有关系。这种空间差异表明湖水在蒸发过程中存在从河流入湖口到湖泊中部的缓慢流动, 并最终完全在湖中心蒸发。

3) 研究发现垂直方向湖水的同位素值变化很小, 表明羊卓雍错湖水在垂直方向上充分混合。

## 参考文献:

- [1] GIBSON J J, PREPAS E E, MCEACHERN P. Quantitative Comparison of Lake Throughflow, Residency, and Catchment Runoff Using Stable Isotopes: Modelling and Results from a Regional Survey of Boreal lakes [J]. *J Hydrol*, 2002, 262: 128-144.
- [2] VALLET-COULOMB C, GASSE F, SONZOGNI C. Seasonal Evolution of the Isotopic Composition of Atmospheric Water Vapour Above a Tropical Lake; Deuterium Excess and Implication for Water Recycling [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2008, 72: 4661-4674.
- [3] GIBSON J J. Short-Term Evaporation and Water Budget Comparisons in Shallow Arctic Lakes Using Non-Steady Isotope Mass Balance [J]. *J Hydrol*, 2002, 264: 242-261.
- [4] GIBSON J J, PROWSE T D, PETERS D L. Hydroclimatic Controls on Water Balance and Water Level Variability in Great Slave Lake [J]. *Hydrol Process*, 2006, 20: 4155-4172.
- [5] 李炳元. 青藏高原大湖期 [J]. *地理学报*, 2000, 55(2): 174-182.
- [6] 曾承, 余俊清. 湖水同位素平衡研究中分馏系数和富集系数计算形式的组合选择 [J]. *盐湖研究*, 2005, 13(1): 7-11.
- [7] 刘忠芳, 田立德, 姚檀栋, 等. 基于  $\delta^{18}\text{O}$  的青藏高原中部措那湖湖水蒸发研究 [J]. *自然资源学报*, 2009, 24(11): 2014-2023.
- [8] 章新平, 姚檀栋. 利用稳定同位素比率估计湖泊的蒸发 [J]. *冰川冻土*, 1997, 19(2): 161-166.
- [9] 尹常亮, 田立德, 余武生, 等. 羊卓雍错流域降水中稳定氧同位素变化特征 [J]. *冰川冻土*, 2006, 28(6): 918-924.
- [10] 巩同梁, 田立德, 等. 羊卓雍错流域湖水稳定同位素循环过程研究 [J]. *冰川冻土*, 2007, 29(6): 914-920.
- [11] 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 [J]. *科学通报*, 2009, 54(15): 2153-2159.
- [12] 高晶, 姚檀栋, 田立德, 等. 羊卓雍错流域湖水氧稳定同位素空间分布特征 [J]. *冰川冻土*, 2008, 30(2): 338-342.
- [13] 除多, 旺堆, 普穷, 等. 西藏羊卓雍错湖面遥感监测模型及近期变化 [J]. *冰川冻土*, 2012, 34(3): 530-537.
- [14] 除多, 普穷, 等. 近40 a 西藏羊卓雍错湖泊面积变化遥感分析 [J]. *湖泊科学*, 2012, 24(3): 494-502.
- [15] 拉巴, 德吉央宗, 等. 基于 MODIS 影像的西藏羊卓雍错湖面面积变化与成因分析 [J]. *高原山地气象研究*, 2011, 31(1): 66-68.
- [16] 刘天仇. 羊卓雍错水位变化趋势 [J]. *西藏大学学报*, 1994, 9(2): 9-14.
- [17] 刘天仇. 西藏羊卓雍错水位动态研究 [J]. *地理科学*, 1995, 15(1): 55-62.
- [18] 陈西平. 西藏羊卓雍错湖水环境变化探索研究 [J]. *海洋与湖沼*, 1990, 21(3): 285-293.
- [19] 王苏民, 窦鸿身, 陈克造, 等. *中国湖泊志* [M]. 北京: 科学出版社, 1998(9).
- [20] CRAIG H. Isotopic Variations in Meteoric Waters [J]. *Scienc*, 1961, 133: 1702-1703.
- [21] 郑淑慧, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究 [J]. *科学通报*, 1982(13): 801-806.
- [22] MAJOURE M. Fractionnement en Oxygène-18 et en Deutrium Entre L'eau et sa Vapeur [J]. *J Chem Phys*, 1978(10): 1423-1436.
- [23] CLARK I, FRITZ P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology* [M]. Boca Raton: Lewis Publisher, 1997: 328.
- [24] 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, NUMAGUTI Atusi. 青藏高原中部水蒸发过程中的氧稳定同位素变化 [J]. *冰川冻土*, 2000, 22(2): 159-164.
- [25] GIBSON J J, EDWARDS T W D, BURSEY G G. Estimating Evaporation Using Stable Isotopes: Quantitative Results and Sensitivity Analysis for Two Catchments in Northern Canada [J]. *Nordic Hydrology*, 1993, 24: 79-94.
- [26] 徐彦伟, 康世昌, 张玉兰, 等. 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 [J]. *科学通报*, 2011, 56(13): 1042-1049.
- [27] 田立德, 马凌龙, 余武生, 等. 青藏高原东部玉树降水中稳定同位素季节变化与水汽输送 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(8): 986-992.
- [28] DANSGAARD W. Stable Isotopes in Precipitation [J]. *Tellus*, 1964(16): 436-468.
- [29] JOUZEL J, MERLIVAT L, LORIUS C. Deuterium Excess in an East Antarctic Ice Core Suggests High Relative Humidity at the Oceanic Surface During the Last Glacial Maximum [J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 688-691.
- [30] ARMENGAUD A, KOSTER R D, JOUZEL J, et al. Deuterium Excess in Greenland Snow: Analysis with Simple and

Complex Model [J]. *J Geophys Res*, 1998, 103(D8): 8947–8953.

- [31] MERLIVAT L, JOUZEL J. Global Climate Interpretation of the Deuterium-Oxygen 18 Relationship for Precipitation [J]. *J Geophys Res*, 1979, 84: 5029–5033.
- [32] JOUZEL J, MERLIVAT L. Deuterium and Oxygen-18 in Precipitation: Modeling of the Isotope Effects During Snow Formation [J]. *J Geoph Res*, 1984, 89(D7): 11749–11757.
- [33] JOUZEL J, FROEHKICH K, SCHOTTERER U. Deuterium and Oxygen-18 in Present-Day Precipitation: Data and Modeling [J]. *Hydrological Sciences*, 1997, 42(5): 747–763.

## The Spatial Distribution of Stable Isotopes in YamzhoYumco Lake

ZANG Ya-lin<sup>1</sup>, WANG Jian-li<sup>1</sup>, TIAN Li-de<sup>2,3</sup>,  
WENG Yong-biao<sup>2</sup>, WEN Rong<sup>2</sup>, ZONG Ji-biao<sup>2</sup>

1. School of Geography Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100101, China;
3. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China

**Abstract:** In a study made of Yamdrok Lake (Yamzho Yumco) in western Tibetan Plateau, the spatial variation of hydrogen and oxygen stable isotopes at the lake surface and along the vertical profile of the lake water were investigated, and the characteristics of spatial variation of the stable isotopes and the inner circulation process of the lake water were discussed. A total of 587 water samples were analyzed in terms of stable isotopes. This analysis showed that the spatial variation of the stable isotopes of the lake water varied with small amplitude. However, the inner circulation process of the lake water was clearly demonstrated by the stable isotope distribution. The  $\delta^{18}\text{O}$  and  $d$ -excess values of the lake water showed consistent spatial variations. Low  $\delta^{18}\text{O}$  values were observed in the area with river inflow into the lake, while the highest  $\delta^{18}\text{O}$  and lowest  $d$ -excess values were recorded in the mid-eastern part of the lake. Such a spatial difference indicated that in the water circulation process the lake water smoothly flowed from the river entrance to the middle part of the lake and was ultimately evaporated there. Furthermore, a spatial difference was also observed in the northwestern and southwestern part of the lake. The lower  $\delta^{18}\text{O}$  value in the northwestern part of the lake was supposed to be closely related to the inflow of the glacial-melted water from the Karuxung River while the lower value of the southwestern part indicated the water inflow from Pumo Yongcuo Lake (Pumo Yum Tso Lake). The vertical difference in  $\delta^{18}\text{O}$  value of the lake water was limited, which suggested that the lake water was well-mixed vertically.

**Key words:** lake water; hydrogen and oxygen stable isotope; spatial variation; water circulation; Yamdrok Lake (Yamzho Yumco)

