

环境科学

(HUANJING KEXUE)

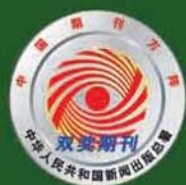
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015 年北京市两次红色预警期间 PM _{2.5} 浓度特征	
..... 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)	
北京市冬季雾霾天人体呼吸高度 PM _{2.5} 变化特征对气象因素的响应	张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)
兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析	李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)
南京北郊冬季 PM _{2.5} 中芳香酸的测定及来源解析	张亚飞, 马嫣, 仝鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)
海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响	孔亚文, 盛立芳, 刘骞, 李秀镇 (2443)
新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价	杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)
重庆地区大气场降水氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系	温艳茹, 王建力 (2462)
湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析	
..... 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)	
河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍山为例	
..... 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)	
亚热带典型岩溶流水气界面 CO ₂ 交换通量变化过程及其环境影响	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱	
..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)	
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 荧光光谱	
..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)	
华东地区某水源水中 13 种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价	
..... 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)	
北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平	张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)
输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险	昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)
卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征	何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)
岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)
哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性	孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)
降水对泃河水质和水体微生物的影响	卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)
不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对砷酸盐的响应	王振红, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)
布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究	景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邵义萍, 樊静静 (2577)
化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响	蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)
活性炭负载 Co ₃ O ₄ 活化过一硫酸盐降解金橙 G	王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)
碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙 G 过程及动力学	张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)
碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素	邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)
铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中 AOX、色度和 TOC 的去除效果研究	
..... 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)	
Fenton 氧化去除制药企业活性污泥中 AOX 的效果研究	陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑伟 (2625)
中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估	刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)
基于 CANON 工艺的新型 HABR 反应器生物脱氮性能研究	鲍林林, 陈婉秋 (2639)
异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究	李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)
基于高通量测序的 ABR 厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析	
..... 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)	
NUA-DAS 生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究	汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)
葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合	程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)
拉乌尔菌 sari01 的分离及其异养硝化好氧反硝化特性	颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)
海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌 SLWX ₂ 的筛选及脱氮特性	成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)
焦化废水活性污泥中降解硫化物细菌种群多样性分析	徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)
浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应	戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)
磷脂脂肪酸 (PLFA) 法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构	左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)
半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应	赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)
三峡库区消落带 N ₂ O 排放及其影响因素	李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)
不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与 N ₂ O 排放研究	高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)
冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征	易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀兰, 木志坚 (2738)
藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析	罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)
基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析	宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)
水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响	丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)
减磷施肥有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)
水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律	
..... 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)	
组配改良剂对污染稻田中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 钝化效果持续性比较	
..... 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)	
生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制	商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)
热处理天然褐铁矿制备 γ-Fe ₂ O ₃ 及其 NH ₃ -SCR 活性探究	徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)
《环境科学》征订启事 (2569) 《环境科学》征稿简则 (2576) 信息 (2744, 2769, 2790)	

湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因子分析

徐敬争¹, 肖薇^{1,2*}, 肖启涛¹, 王伟¹, 温学发³, 胡诚¹, 刘诚¹, 刘寿东^{1,2}, 李旭辉¹

(1. 南京信息工程大学 Yale-NUIST 大气环境中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 湖水氢氧稳定同位素组分对于水文学、气象学和古气候学研究都有重要的意义. 本研究在太湖对湖水 HDO 和 H₂¹⁸O 组分 (δD_L 和 $\delta^{18}O_L$) 开展了长期连续地观测, 计算了过量氘 (d_L), 分析了它们的时间变化规律, 并研究其主要控制因素. 结果表明: ① 湖水氢氧同位素组分存在明显的时间变化, δD_L 的变化范围 $-59.8‰ \sim -24.2‰$, $\delta^{18}O_L$ 的变化范围 $-8.6‰ \sim -2.6‰$, d_L 的变化范围为 $-7.9‰ \sim 12.9‰$; 暖季 δD_L 和 $\delta^{18}O_L$ 较高, d_L 较低; 冷季反之. ② 在月尺度上, 湖水蒸发量及其占湖泊入水量的比重是湖水氢氧稳定同位素富集的主要控制因素, 湖水蒸发量或者蒸发量占湖泊入湖水量比重增加, δD_L 和 $\delta^{18}O_L$ 升高, d_L 降低. ③ 对于太湖而言, 降水氢氧稳定同位素组分和水温并非湖水稳定同位素变化的控制因素. 本文的研究结果可以为稳定同位素水文学研究以及与湖水稳定同位素富集相关的气象学和古气候学研究提供科学参考.

关键词: 湖泊; HDO; H₂¹⁸O; 时间变化特征; 控制因子

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2470-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.008

Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors

XU Jing-zheng¹, XIAO Wei^{1,2*}, XIAO Qi-tao¹, WANG Wei¹, WEN Xue-fa³, HU Cheng¹, LIU Cheng¹, LIU Shou-dong^{1,2}, LI Xu-hui¹

(1. Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The composition of hydrogen and oxygen stable isotopes in lake water is important to the researches in hydrology, meteorology and paleoclimatology. In this study, long-term and continuous measurement on the compositions of HDO and H₂¹⁸O in lake water (δD_L and $\delta^{18}O_L$) was conducted over Lake Taihu, the deuterium excess (d_L) was calculated, and the temporal variability and controlling factors were analyzed. The results indicated that ① the variation of isotopic enrichment in lake water was significant, ranging from $-59.8‰$ to $-24.2‰$ for δD_L , from $-8.6‰$ to $-2.6‰$ for $\delta^{18}O_L$, and from $-7.9‰$ to $12.9‰$ for d_L , respectively. In comparison to cold season, δD_L and $\delta^{18}O_L$ were higher and d_L was lower during warm season. ② On monthly time-scale, lake evaporation and the ratio of total water inputs lost by evaporation controlled the isotopic enrichment in lake water. When lake evaporation or the ratio increased, δD_L and $\delta^{18}O_L$ increased, but d_L decreased. ③ Over Lake Taihu, the isotopic composition in precipitation and water temperature did not control the isotopic enrichment. The results provide scientific reference for isotope hydrology and the researches related to the isotopic enrichment in lake water in meteorology and paleoclimate.

Key words: lake; HDO; H₂¹⁸O; temporal variability; controlling factors

水中 HDO 和 H₂¹⁸O 的组分能为水文学、气象学和古气候学研究提供重要的信息^[1-5]. 湖水在蒸发的过程中, 相对于较重水分子 (HDO 和 H₂¹⁸O) 而言, 较轻水分子 (H₂¹⁶O) 的扩散率较大、饱和水汽压较高, 从而会优先从水中逸出, 较重水分子会在水中累积, 因此, 湖水氢氧同位素是决定湖泊蒸发同位素组分的关键因子之一^[6]. 在水文学研究中, 很多学者利用稳定同位素质量守恒模型计算湖泊蒸发量^[7-10]; 利用稳定同位素方法计算湖泊蒸发占总入湖水量的比例 (throughflow index, 通流系数) 和湖水

停留时间等^[2,11,12]. 在气象学研究中, 大型湖泊蒸发会向经过湖面的气团贡献水汽, 从而影响大气的湿度特征, 研究者们采用稳定同位素方法计算湖泊蒸发对大气水汽的贡献量^[1,13-15]. 而在古气候学研究中, 湖水氢氧稳定同位素组分直接影响湖泊沉积

收稿日期: 2015-10-29; 修订日期: 2016-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41475141, 41505005, 41575147); 江苏省高校优势学科建设工程项目 (PAPD); 教育部长江学者和创新团队发展计划项目 (PCSIRT)

作者简介: 徐敬争 (1989 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为稳定同位素水文学, E-mail: xjz1015@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wei.xiao@nuist.edu.cn

物中的同位素组分,从而影响古气候重建的精度^[16,17]。由此可见,湖水氢氧稳定同位素是上述研究中的关键因子,对其准确量化会影响相关研究的准确性和可靠性。

尽管研究者们已经认识到湖水氢氧稳定同位素观测的重要性,但是对湖水同位素长期连续的观测尚未见报道。国内外学者对湖水稳定同位素的采样多是几年内采集一次的水样^[18],每年取几次样^[19,20],或者某个月内连续采集几次水样^[10,21]。这是因为湖水采样费时费力,而且样品分析成本较高。但是没有长期连续的湖水氢氧稳定同位素数据,就无法揭示短时间尺度上湖水的时间变化特征,无法诊断不连续采样为相关计算带来的误差,也无法确定湖水同位素富集的控制因子。

本文以太湖为研究对象,长期连续监测湖水氢氧同位素组分的变化特征。太湖能为此项研究提供优良的试验条件,这是因为:①太湖位于亚热带季风区,四季分明,有利于观测湖泊氢氧同位素组分的季节变化,并研究降水、温度等气象因子的影响;②太湖是典型的大型浅水湖泊,蒸发量有明显的季节变化^[22],而湖泊蒸发及其占入湖水量的比重(通流系数)是引起 δD_L 和 $\delta^{18}O_L$ 富集和 d_L 改变的重要因素^[23],因此在太湖的研究能为人们判断蒸发过程的影响提供契机;③太湖中尺度涡度通量网对湖泊上东西南北中5个位置的气象要素和水热通量有长期的连续观测^[24],能为本研究提供数据支持。

本研究基于2012年5月11日至2014年12月31日2年多时间每天对太湖湖水氢氧同位素的观测结果,目标是分析湖水稳定同位素的时间变化特征,探讨湖面蒸发、通流系数、降水和水温等因子对湖水稳定同位素组分的影响。

1 材料与方法

1.1 试验站点

太湖是中国第三大淡水湖泊,位于长江三角洲的南缘,地理范围为北纬 $30^{\circ}5'40'' \sim 31^{\circ}32'58''$,东经 $119^{\circ}52'32'' \sim 120^{\circ}36'10''$,水域属于江浙两省。太湖是典型的大型浅水湖泊,湖面面积 2400 km^2 ,平均水深 1.9 m ,蓄水总量达到 $47.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[25]。根据无锡地面气象站1981~2010年的观测资料,该站年平均气温为 16.2°C ,平均风速为 $2.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,露点温度为 14.1°C ,年降水量约为 1100 mm ^[24]。

1.2 湖水采样和同位素组分测量方法

自2012年5月11日开始至2014年12月31

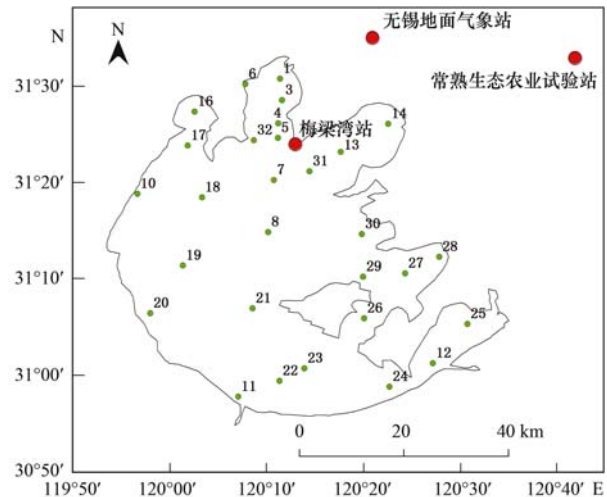


图1 观测站点位置示意

Fig. 1 Location of the observation sites

日,每天13:00定点采取太湖湖水水样。采样站点是位于太湖北部梅梁湾湾口的中国科学院太湖湖泊生态系统试验站($31^{\circ}25'11''\text{N}$, $120^{\circ}12'50''\text{E}$,图1)。湖水采样点位于太湖湖泊生态系统试验站内湖上栈桥的远端,距离湖岸为250 m。另外,每个季度(2、5或6、8和11月)在全湖29个点采集水样。采样时,用300 mL的玻璃瓶采取水面以下20 cm深度处的水样,封口后放在 4°C 的冰箱中保存。水样定期送往中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟实验室采用液态水同位素分析仪(型号DLT-100,美国Los Gatos Research公司)测定HDO和 H_2^{18}O 的组分,观测精度分别为 $\pm 0.3\text{‰}$ 和 $\pm 0.1\text{‰}$ 。

本研究采用 δ 值来表示稳定同位素的组分:

$$\delta = \left[\left(\frac{R_{\text{样品水}}}{R_{\text{标准水}}} \right) - 1 \right] \times 1000 (\text{‰})$$

式中, R 为较重水分子(HDO和 H_2^{18}O)与较轻水分子(H_2^{16}O)的摩尔比,标准水采用维也纳标准平均海水^[26](vienna standard mean ocean water, V-SMOW),对于HDO, $R_{\text{V-SMOW}} = (155.95 \pm 0.08) \times 10^{-6}$ ^[27];对于 H_2^{18}O , $R_{\text{V-SMOW}} = (2005.20 \pm 0.45) \times 10^{-6}$ ^[28]。液态水同位素分析仪对HDO和 H_2^{18}O 的分析精度分别为 $\pm 0.3\text{‰}$ 和 $\pm 0.1\text{‰}$ 。另外,本研究采用过量氘(deuterium excess, d)衡量水中HDO和 H_2^{18}O 的相对富集程度: $d = \delta D - 8 \delta^{18}O (\text{‰})$ ^[29]。

1.3 湖面蒸发量和通流系数的计算方法

本研究用Priestley-Taylor公式计算湖面的月蒸发水量^[30]:

$$E = \alpha \frac{s}{s + \gamma} \frac{R_n - \Delta Q}{\lambda \rho_w} \times 86.4 \times 10^6 \quad (1)$$

式中, α 是 Priestley-Taylor 常数, 取 1.26; s 表示温度饱和水汽曲线中 $T = T_a$ 时的斜率 ($\text{Pa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n 为净辐射通量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); Q 为水体储热量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)^[31]; γ 为干湿温度表湿度常数 ($\text{Pa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); λ 为潜热通量与蒸发转化系数 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$). 其中 R_n 和水温的观测资料来源于太湖中尺度涡度通量网^[24].

通流系数是指湖水蒸发量与入湖总水量之比: $x = E/(I + P)$, 表征湖泊总收入水量中由蒸发散失的比重. 其中 x 、 E 、 I 和 P 分别表示通流系数、湖水蒸发量、入湖河水量和降水量.

1.4 降水同位素组分的计算方法

由于缺少对降水同位素组分的直接观测, 本研究采用 Liu 等^[32] 在中国科学院常熟农业生态试验站 ($31^\circ 32' 56''\text{N}$, $120^\circ 41' 53''\text{E}$) 观测得到的经验公式计算每月降水 δD_p 和 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的月平均值:

$$\delta^{18}\text{O}_p = -7.654 - 0.006T^2 + 0.023S \quad (2)$$

$$\delta D_p = 8.77 \delta^{18}\text{O}_p + 13.96 \quad (3)$$

式中, T 为月平均气温 ($^\circ\text{C}$), S 为月总日照时数 (h). 本研究采用无锡气象站观测的 T 和 S 计算太湖降水的同位素组分. 该站距离太湖湖泊生态系统试验站

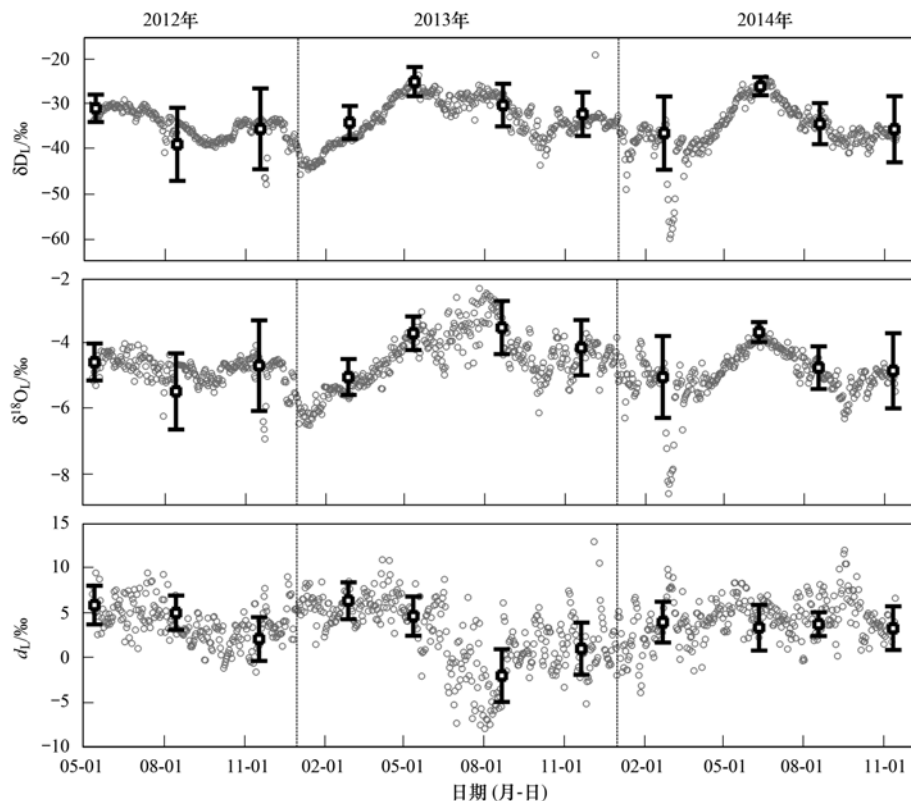
43.6 km.

2 结果与分析

2.1 湖水氢氧同位素组分的时间变化

湖水氢氧同位素组分的时间变化序列如图 2 所示. 从 2012 年 5 月至 2014 年底, 湖水同位素组分有明显的变化. 其中 2013 年 7 月 1 日湖水氧同位素组分 ($\delta^{18}\text{O}_L$) 达到该研究时段内的最大值为 -2.6‰ , 2014 年 4 月 28 日, $\delta^{18}\text{O}_L$ 为最小值为 -8.6‰ , 在这两年多的时间内, 湖水氧同位素的变化幅度为 6.0‰ . 而湖水氢同位素组分 (δD_L), 最大值与最小值分别为 -24.2‰ (2013 年 7 月 3 日) 和 -59.8‰ (2014 年 2 月 28 日), 变化幅度为 35.6‰ . 对于 d_L , 最大值与最小值分别为 12.9‰ 和 -7.9‰ , 其对应的时间分别在 2013 年 12 月 5 日和 2013 年 8 月 2 日, 变化幅度为 20.8‰ . $\delta^{18}\text{O}_L$ 和 δD_L 的变化趋势一致, 同时升高或降低, 而 d_L 的变化趋势不同.

全湖平均湖水同位素的时间变化趋势如图 2 所示. 此研究时段内, 共有 11 次全湖采样, 与同期梅梁湾站湖水同位素组分的差异 (梅梁湾站 - 全湖平均) 范围为: $\delta^{18}\text{O}_L$ 相差 $-0.7\text{‰} \sim 0.8\text{‰}$, δD_L 相差



圆点: 梅梁湾站每日观测值; 方块: 每个季度全湖平均值

图 2 湖水同位素组分的时间序列

Fig. 2 Time series of the isotopic components of lake water

-3.1‰~4.2‰, d_L 相差 -2.4‰~3.1‰. 全湖 $\delta^{18}O_L$ 和 δD_L 的空间变化范围在 2014 年 6 月最小, 为 0.3‰和 2.0‰; 空间差异最大值发生在 2012 年 11 月, 为 1.4‰和 8.9‰. 与全湖平均湖水氢氧同位素组分相比, 梅梁湾站湖水同位素组分的数值和变化趋势都比较一致.

湖水同位素组分的月平均值如表 1 所示. 总体看来, 冬季 $\delta^{18}O_L$ 和 δD_L 较低, d_L 较高; 夏季 $\delta^{18}O_L$ 和 δD_L 较高, d_L 相对较低. 2013 年度, $\delta^{18}O_L$ 的最大值出现在 8 月, δD_L 的最大值出现在 5 月, 分别为 -3.3‰和 -26.7‰; 二者的最小值均出现在 1 月,

分别为 -6.1‰和 -42.9‰; 全年 $\delta^{18}O_L$ 和 δD_L 的变化幅度分别为 2.8‰和 16.2‰; d_L 在 4 月最大, 为 6.6‰, 8 月最小, 为 -2.8‰. 2014 年度, $\delta^{18}O_L$ 和 δD_L 的最大值均出现在 6 月, 分别为 -3.9‰和 -26.6‰; 最小值均出现在 3 月, 分别为 -5.8‰和 -42.9‰; 全年变化幅度分别为 1.9‰和 16.3‰; d_L 在 9 月最大, 为 6.3‰, 8 月最小, 为 2.8‰. 就月平均值而言, 2013 和 2014 年度 $\delta^{18}O_L$ 和 δD_L 的变化幅度相当. 而湖水 $\delta^{18}O_L$ 和 δD_L 年平均值分别为: 2013 年 -4.5‰和 -34.4‰、2014 年 -4.8‰和 -33.6‰.

表 1 湖水同位素组分月平均值(±1 倍标准差)/‰

Table 1 Monthly mean value (±1 standard deviation) of the isotopic components of lake water/‰									
月份	2012 年			2013 年			2014 年		
	$\delta^{18}O_L$	δD_L	d_L	$\delta^{18}O_L$	δD_L	d_L	$\delta^{18}O_L$	δD_L	d_L
1				-6.1±0.3	-42.9±1.2	5.9±1.5	-5.0±0.5	-38.6±3.4	2.5±2.9
2				-5.5±0.1	-38.5±0.8	5.3±1.5	-5.4±1.0	-39.3±6.4	3.6±2.2
3				-5.1±0.2	-35.5±1.7	5.6±1.3	-5.8±1.1	-42.9±6.6	3.8±2.6
4				-4.6±0.4	-30.0±2.3	6.6±1.9	-5.2±0.3	-37.3±2.3	4.5±1.6
5	-4.6±0.3	-32.7±2.1	5.1±1.9	-3.8±0.3	-26.7±1.1	4.1±2.1	-4.4±0.2	-30.0±2.5	5.5±1.9
6	-4.5±0.3	-31.1±1.0	5.2±1.8	-4.0±0.5	-29.7±2.0	2.4±3.8	-4.0±0.1	-26.6±1.3	5.0±1.2
7	-4.8±0.4	-32.7±2.1	5.5±2.0	-3.4±1.6	-28.7±0.6	-1.2±3.7	-4.4±0.3	31.4±1.9	3.8±1.7
8	-4.9±0.3	-35.5±1.4	3.8±1.6	-3.3±0.6	-29.1±2.1	-2.8±3.7	-4.8±0.2	-34.0±1.4	4.6±2.3
9	-5.1±0.2	-38.2±0.8	2.6±1.4	-4.4±0.4	-34.0±2.3	0.9±1.6	-5.5±0.4	-38.0±1.3	6.3±2.8
10	-4.8±0.2	-36.3±1.8	2.0±1.5	-4.7±0.6	-36.3±3.0	1.3±2.2	-5.1±0.3	-37.2±0.3	3.9±1.8
11	-4.9±0.7	-36.0±4.0	3.1±2.4	-4.4±0.5	-34.5±0.5	1.1±3.2	-5.0±0.3	-36.9±2.2	3.5±1.3
12	-5.1±0.5	-36.5±2.5	4.1±1.9	-4.4±0.3	-33.3±2.8	2.0±3.2	-4.9±0.4	-36.1±1.7	3.4±2.1

2.2 局地降水蒸发线

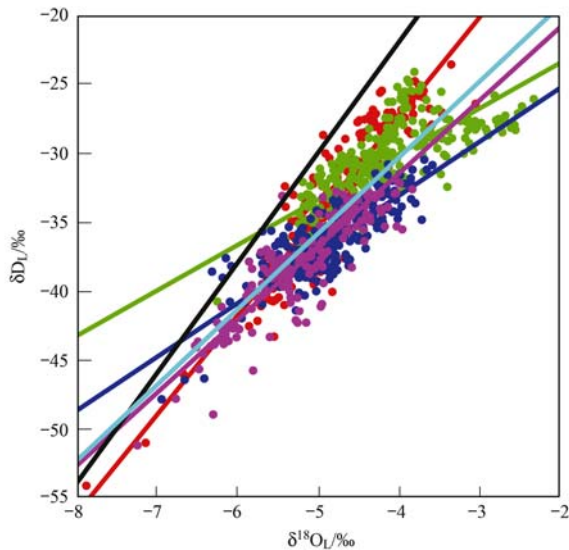
图 3 为每个季节湖水 δD_L 与 $\delta^{18}O_L$ 的关系, 二者的线性回归线为湖水当地蒸发线 (local evaporation line, LEL). 其中对季节按照气象划分的方法, 以 3~5 月为春季, 6~8 月为夏季, 9~11 月为秋季, 12 月~次年 2 月划分为冬季. 太湖全年 LEL 的斜率为 5.50, 对比 4 个季节, 春季 LEL 斜率最大, 为 7.24; 夏季和秋季斜率较低, 为 3.32 和 3.86; 而冬季 LEL 的斜率与全年斜率相近, 为 5.32. 对于亚洲高纬度湖泊, 当地蒸发线的斜率为 5~8 之间^[33], 梅梁湾地区 LEL 的斜率为 5.5, 低于 GMWL 斜率 8.0, 这表明研究区域的湖水稳定同位素组分的富集主要受控于湖水蒸发的影响. 就斜率而言春季的斜率要明显高于其他 3 个季节, 说明在春季湖水中稳定同位素组分的富集主要受平衡分馏影响^[34], 夏秋截距要高于其他两个季节说明在这两个季节动力分馏系数对其影响较大. 湖水稳定同位素组分偏离全球大气降水线的主要影响因素是湖水的蒸发, 由图 3 可知, 在

夏、秋季湖水同位素与 GMWL 偏离程度要大于春、冬季, 说明在夏秋季节湖水蒸发对湖水氢氧同位素富集的影响要大于冬春季节.

3 讨论

3.1 梅梁湾湖水稳定同位素组分对全湖的代表性

通过对比梅梁湾站和全湖采样测得的湖水氢氧同位素组分的时间变化 (图 2), 梅梁湾站湖水同位素组分的数值和变化特征对整个太湖湖水同位素组分的平均值具有一定的代表性. 根据 Li 等^[35] 在 2011 年采用三维数值模型对太湖的水分传输的模拟结果, 夏季偏南风有助于梅梁湾内水体的交换, 而“引江济太”工程从望虞河引水时, 梅梁湾口的水龄 (water age) 有很大的梯度, 这说明本研究观测站点所处的梅梁湾口与太湖水体有频繁的水体交换. 另外, 值得注意的是对湖水同位素组分每日进行监测, 能够反映出季度监测无法捕捉短时间尺度上的同位素组分变化特征.



红色圆点和虚线: 春季 $\delta D_L = 7.24 \delta^{18}O_L + 1.37$; 绿色圆点和虚线: 夏季 $\delta D_L = 3.32 \delta^{18}O_L - 16.86$; 蓝色圆点和虚线: 秋季 $\delta D_L = 3.86 \delta^{18}O_L - 17.50$; 粉色圆点和虚线: 冬季 $\delta D_L = 5.32 \delta^{18}O_L - 10.28$; 淡蓝色实线: 全年蒸发线 $\delta D_L = 5.50 \delta^{18}O_L - 8.34$; 黑色实线: 全球大气降水线 $\delta D_L = 8 \delta^{18}O_L + 10$

图3 全年和四季湖水当地蒸发线对比

Fig. 3 Comparison of the local evaporation lines of the whole year and of each season

3.2 通流系数和湖水蒸发量对湖水稳定同位素组分的影响

很多研究表明通流系数是控制湖水同位素富集程度的重要因素^[23,36,37]. 太湖湖水 δD_L 、 $\delta^{18}O_L$ 和 d_L 月平均值与通流系数的相关关系如图4所示. 湖水 δD_L 和 $\delta^{18}O_L$ 组分与通流系数 x 存在显著正相关关系, 而 d_L 与之呈显著负相关关系. 其对应线性回归公式为: $\delta^{18}O_L = 5.36x - 5.84$ ($r = 0.53, P < 0.01$); $\delta D_L = 35.75x - 41.85$ ($r = 0.52, P < 0.01$); $d_L = 17.95x - 0.15$ ($r = 0.25, P < 0.05$). 因此可知太湖总入水量(降水 + 入湖河水)通过蒸发散失掉的比例是影响湖水同位素富集的重要因子.

3.3 湖水蒸发量对湖水稳定同位素组分的影响

湖水月蒸发量与湖水氢氧稳定同位素月平均值的相关关系如图5所示. 湖水 $\delta^{18}O_L$ 、 δD_L 和 d_L 的月平均值与每月湖水蒸发量 E 均有显著的正相关关系(对于 $\delta^{18}O_L, r = 0.64, P < 0.01$; 对于 $\delta D_L, r = 0.62, P < 0.01$; 对 $d_L, r = 0.32, P < 0.05$). 在研究时段内, 6~8月梅梁湾湖区湖水的蒸发量达到494 mm, 占年均蒸发总量的46%, $\delta^{18}O_L$ 和 δD_L 的月平均值也达到最大, 分别为 $-4.2‰$ 和 $-31.0‰$ (表1).

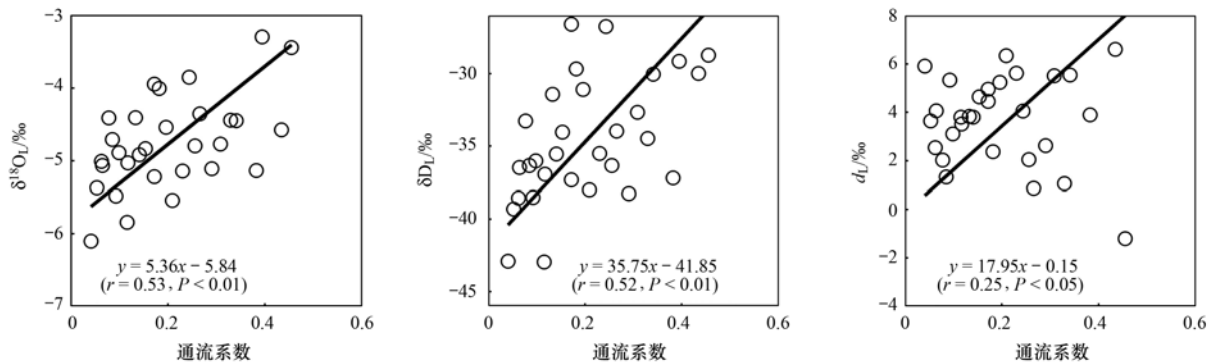


图4 湖水同位素组分与通流系数之间的关系

Fig. 4 Correlation between the isotopic composition of lake water and throughflow index

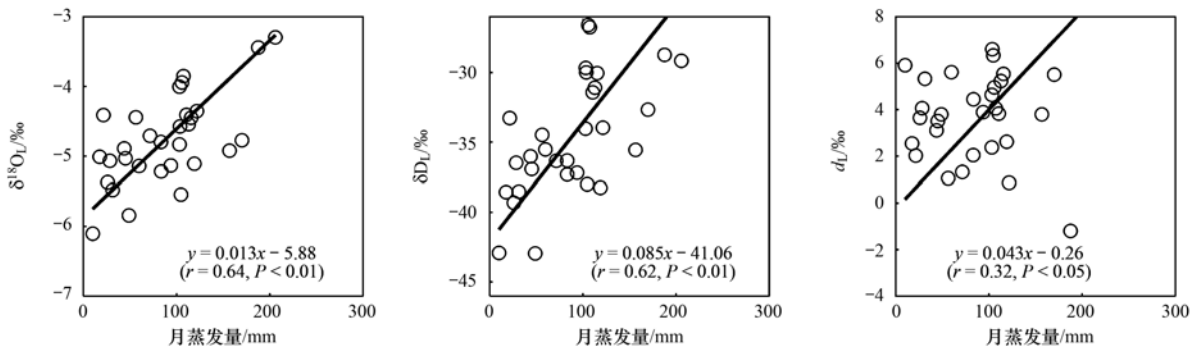


图5 湖泊湖水同位素组分月平均值与湖水蒸发量月总量之间的关系

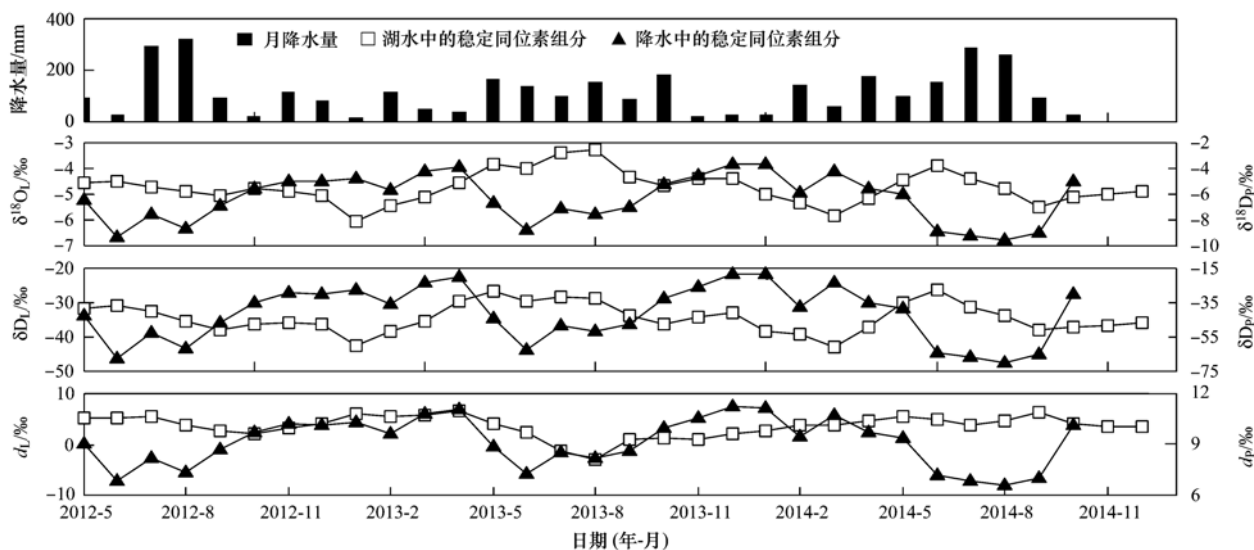
Fig. 5 Correlation between the monthly mean value of the isotopic components of lake water and the monthly total lake evaporation

3.4 降水对湖水稳定同位素富集的影响

太湖降水量、降水和湖水同位素组分月平均值的时间变化序列如图 6 所示。太湖位于亚热带季风区, 45% 的降水量集中在 6 ~ 8 月。一年之中, 降水中 $\delta^{18}\text{O}_p$ 比湖水中氧同位素值低 1.7‰, 降水中 δD_p 比湖水中氢同位素值低 7.8‰。通过对比降水和湖水同位素组分的时间序列发现, 二者变化趋势并不一致。降水氢氧同位素组分呈暖季低、冷季高的趋势。而湖水氢氧同位素组分在暖季较高, 冷季较低。以 2013 年为例, 在暖季降水中 δD_p 、 $\delta^{18}\text{O}_p$ 比湖水中氢氧同位素值低 22.0‰和 3.7‰, 而在冷季降水中

氢氧稳定同位素的组分比湖水稳定同位素组分仅仅高出 9.3‰和 0.03‰。

在年尺度上, 降水应对湖水的稳定同位素富集起到贫化作用, 尤其在暖季。Henderson 等^[38]通过调查发现美国西部山区 100 个湖泊的同位素组分能与降水同位素组分的年权重值相关。但是由图 6 可知, 湖水中稳定同位素的组分值在暖季并没有明显的降低, 表明湖水稳定同位素组分值的变化反映湖水多年水文循环的结果^[21], 其富集机制为多重影响因素控制, 太湖湖水氢氧稳定同位素组分并不完全受控于降水氢氧稳定同位素组分的影响。



柱状图: 月降水量; 方块: 湖水中的稳定同位素组分; 三角号: 降水中的稳定同位素组分

图 6 月降水量、降水和湖水同位素组分的时间序列图

Fig. 6 Time series of precipitation and isotopic components of rain water and lake water

3.5 水温与湖水稳定同位素组分的关系

在日尺度上, 湖水氢氧同位素组分与水温的相关关系如图 7 所示。从中可知, 湖水 $\delta^{18}\text{O}_L$ 和 δD_L 与水温 (T_w) 有显著的正相关关系, 湖水 d_L 与水温存

在显著的负相关关系。对于 $\delta^{18}\text{O}_L$: $\delta^{18}\text{O}_L = 0.039 \times T_w - 5.5$ ($r = 0.47$, $P < 0.01$), 对于 δD_L : $\delta\text{D}_L = 0.26T_w - 40$ ($r = 0.51$, $P < 0.01$), 对于 d_L : $d_L = -0.058T_w + 4.6$ ($r = 0.17$, $P < 0.01$)。由图 7 中水

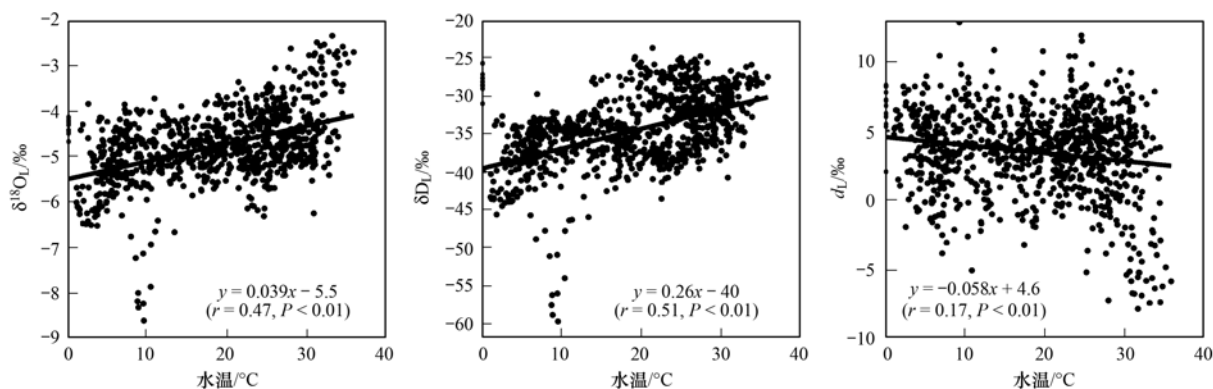


图 7 湖水同位素组分与水温之间的关系

Fig. 7 Correlation between the isotopic components of lake water and water temperature

温与 $\delta^{18}\text{O}_\text{L}$ 分布情况可知, $\delta^{18}\text{O}_\text{L}$ 与水温的变化趋势较为一致.在夏季湖水温度与 $\delta^{18}\text{O}_\text{L}$ 都达到极大值,冬季达到极小值,湖水温度的升高有利于氢氧稳定同位素的富集.

水温与湖水稳定同位素的相关关系与水体同位素富集理论相反.根据同位素富集理论,在蒸发过程中,平衡分馏过程和动力学分馏过程会引起湖水同位素分馏,它们是分别由轻重同位素的饱和水汽压和扩散率的差异引起的.其中,平衡分馏过程受温度的控制,而动力学分馏系数与温度无关.目前,平衡分馏系数的计算方法已经是被很多试验所验证,其中最常用的是 Majoube^[39]的计算公式,即对于 H_2^{18}O , $\ln\alpha = 1\,137T^{-2} - 0.415\,6T^{-1} - 0.002\,07$;对于 HDO , $\ln\alpha = 24\,844T^{-2} - 76.248T^{-1} + 0.052\,61$.根据该公式,温度越高,平衡分馏系数越低,即蒸发过程引起的湖水同位素富集程度越低.另外,根据开发水面蒸发同位素富集模型(Craig-Gordon模型),Dixit等^[17]计算不同温度条件下湖水 $\delta^{18}\text{O}$ 值,结果也表明温度越高,湖水 $\delta^{18}\text{O}$ 值越低.因此,水温与湖水稳定同位素组分的相关关系并不能说明水温是湖水同位素富集的控制因子.

为了诊断水温是否控制湖水同位素富集,笔者做了低通滤波处理,将湖水稳定同位素组分值观测值减去其10 d滑动平均值,从而判断湖水稳定同位素组分的高频变化是否与水温相关.相关性检验结果表明湖水稳定同位素组分的高频变化与水温无关(对于 $\delta^{18}\text{O}_\text{L}$, $r = 0.71$, $P > 0.05$;对于 δD_L , $r = 0.46$, $P > 0.05$;对 d_L , $r = 0.25$, $P > 0.05$),所以水温并非湖水稳定同位素富集的直接控制因子.而水温与湖水氢氧同位素的相关关系只能说明二者有相同的季节变化.

4 结论

本文自2012年5月11日至2014年12月31日长期连续观测太湖湖水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$,分析湖水稳定同位素的时间变化特征和控制因素,结果表明:
① 太湖湖水同位素组分有明显的季节变化特征,夏季湖水氢氧同位素组分最高,冬季湖水氢氧同位素组分最低,而春季同位素组分变化范围最大.
② 湖水蒸发量及其占入湖水量的比重是控制湖水中稳定同位素富集的主要因子.
③ 降水同位素组分与湖水同位素组分的时间变化特征不一致,表明湖水同位素富集并非受降水同位素组分的控制.
④ 温度也不是湖水同位素富集的控制因子,二者的相关性

只是因为季节变化规律一致.本文的结果可以为研究湖水同位素富集过程及与此相关的水文学、气象学和古气候学的研究提供参考.

参考文献:

- [1] Gat J R, Bowser C J, Kendall C. The contribution of evaporation from the Great Lakes to the continental atmosphere: estimate based on stable isotope data[J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, **21**(7): 557-560.
- [2] Gibson J J, Edwards T W D. Regional water balance trends and evaporation-transpiration partitioning from a stable isotope survey of lakes in northern Canada[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**(2): 10-1-10-14.
- [3] Henderson A K, Shuman B N. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of lake water in the western United States[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2009, **121**(7-8): 1179-1189.
- [4] Jouzel J, Delaygue G, Landais A, *et al.* Water isotopes as tools to document oceanic sources of precipitation[J]. *Water Resources Research*, 2013, **49**(11): 7469-7486.
- [5] 靳晓刚, 张明军, 王圣杰, 等. 基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1241-1248.
- [6] Craig H, Gordon L I. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere[A]. In: Tongiorgi E (Ed.). *Proceedings of Conference on Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*[C]. Pisa, Italy: Laboratory of Geology and Nuclear Science, 1965. 9-130.
- [7] Allison G B, Brown R M, Fritz P. Estimation of the isotopic composition of lake evaporate[J]. *Journal of Hydrology*, 1979, **42**(1-2): 109-127.
- [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] Jasechko S, Gibson J J, Edwards T W D. Stable isotope mass balance of the Laurentian Great Lakes[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(2): 336-346.
- [10] Skrzypek G, Mydlowski A, Dogramaci S, *et al.* Estimation of evaporative loss based on the stable isotope composition of water using *Hydrocalculator*[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **523**: 781-789.
- [11] Gibson J J, Reid R. Stable isotope fingerprint of open-water evaporation losses and effective drainage area fluctuations in a subarctic shield watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, **381**(1-2): 142-150.
- [12] Brooks J R, Gibson J J, Birks S J, *et al.* Stable isotope estimates of evaporation: inflow and water residence time for lakes across the United States as a tool for national lake water quality assessments[J]. *Limnology and Oceanography*, 2014, **59**(6): 2150-2165.
- [13] Machavaram M V, Krishnamurthy R V. Earth surface evaporative process: a case study from the Great Lakes region of the United States based on deuterium excess in precipitation[J].

- Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, **59**(20): 4279-4283.
- [14] Bowen G J, Kennedy C D, Henne P D, *et al.* Footprint of recycled water subsidies downwind of Lake Michigan [J]. Ecosphere, 2012, **3**(6): 1-16.
- [15] Bryan A M, Steiner A L, Posselt D J. Regional modeling of surface-atmosphere interactions and their impact on Great Lakes hydroclimate [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, **120**(3): 1044-1064.
- [16] Yadav D N. Oxygen isotope study of evaporating brines in Sambhar Lake, Rajasthan (India) [J]. Chemical Geology, 1997, **138**(1-2): 109-118.
- [17] Dixit Y, Hodell D A, Sinha R, *et al.* Oxygen isotope analysis of multiple, single ostracod valves as a proxy for combined variability in seasonal temperature and lake water oxygen isotopes [J]. Journal of Paleolimnology, 2015, **53**(1): 35-45.
- [18] Timsic S, Patterson W P. Spatial variability in stable isotope values of surface waters of Eastern Canada and New England [J]. Journal of Hydrology, 2014, **511**: 594-604.
- [19] 肖可, 沈立成, 王鹏. 藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 2952-2958.
- [20] Xiao W, Wen X F, Wang W, *et al.* Spatial distribution and temporal variability of stable water isotopes in a large and shallow lake [J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2015, doi: 10.1080/10256016.2016.1147442.
- [21] 巩同梁, 田立德, 刘东年, 等. 羊卓雍湖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.
- [22] Wang W, Xiao W, Cao C, *et al.* Temporal and spatial variations in radiation and energy balance across a large freshwater lake in China [J]. Journal of Hydrology, 2014, **511**: 811-824.
- [23] 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]. Journal of Hydrology, 2002, **262**(1-4): 128-144.
- [24] Lee X, Liu S D, Xiao W, *et al.* The Taihu eddy flux network: an observational program on energy, water, and greenhouse gas fluxes of a large freshwater lake [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, **95**(10): 1583-1594.
- [25] 金相灿, 叶春, 颜昌宙, 等. 太湖重点污染控制区综合治理方案研究[J]. 环境科学研究, 1999, **12**(5): 1-5.
- [26] Coplen T B. New guidelines for reporting stable hydrogen, carbon, and oxygen isotope-ratio data [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, **60**(17): 3359-3360.
- [27] de Wit J C, van der Straaten C M, Mook W G. Determination of the absolute hydrogen isotopic ratio of V-SMOW and SLAP [J]. Geostandards Newsletter, 1980, **4**(1): 33-36.
- [28] Baertschi P. Absolute ^{18}O content of standard mean ocean water [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1976, **31**(3): 341-344.
- [29] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. Tellus, 1964, **16**(4): 436-468.
- [30] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters [J]. Monthly Weather Review, 1972, **100**(2): 81-92.
- [31] Henderson-Sellers B. Calculating the surface energy balance for lake and reservoir modeling; a review [J]. Reviews of Geophysics, 1986, **24**(3): 625-649.
- [32] Liu J R, Song X F, Yuan G F, *et al.* Stable isotopic compositions of precipitation in China [J]. Tellus B, 2014, **66**: 22567.
- [33] Gibson J J, Birks S J, Edwards T W D. Global prediction of δ_A and $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ evaporation slopes for lakes and soil water accounting for seasonality [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2008, **22**(2): GB2031.
- [34] 王永森, 马振民, 徐征和. 基于瑞利分馏模式的水体蒸发线斜率模型 [J]. 水科学进展, 2011, **22**(6): 795-800.
- [35] Li Y P, Acharya K, Yu Z B. Modeling impacts of Yangtze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China [J]. Ecological Engineering, 2011, **37**(2): 325-334.
- [36] Dinçer T. The use of oxygen 18 and deuterium concentrations in the water balance of lakes [J]. Water Resources Research, 1968, **4**(6): 1289-1306.
- [37] Biggs T W, Lai C T, Chandan P, *et al.* Evaporative fractions and elevation effects on stable isotopes of high elevation lakes and streams in arid western Himalaya [J]. Journal of Hydrology, 2015, **522**: 239-249.
- [38] Henderson A K, Shuman B N. Differing controls on river-and lake-water hydrogen and oxygen isotopic values in the western United States [J]. Hydrological Processes, 2010, **24**(26): 3894-3906.
- [39] Majoube M. Oxygen-18 and deuterium fractionation between water and steam [J]. Journal de Chimie Physique et de Physico-Chimie Biologique, 1971, **68**(10): 1423-1436.

CONTENTS

Concentration Characteristics of PM _{2.5} in Beijing During Two Red Alert Periods	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM _{2.5} Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollutional Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM _{2.5} from the Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang	YANG Chun, Tashpolat Tiyp, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO ₂ Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co ₃ O ₄ Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrochemical Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sarI01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX ₂ from Sea Water	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA)	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N ₂ O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N ₂ O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of γ -Fe ₂ O ₃ Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行