ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第37卷 第5期
2016年5月15日

目 次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 …… 薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐珺,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京APEC期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源 …… 周雪明,亓雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓朗,贺克斌,马永亮(1602)
利用SPAMS分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布 …… 刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气$PM_{2.5}$污染特征及来源解析 …… 王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气$PM_{2.5}$的污染水平及来源解析 …… 林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征 …… 刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立 …… 陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 …… 胡月琪,邬晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价 …… 王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
$CoCuMnO_x$光催化氧化多组分VOCs特性及其动力学 …… 孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 …… 张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征 …… 史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用δ^{15}N-NO_3^-和δ^{18}O-NO_3^-示踪北京城区河流硝酸盐来源 …… 赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析 …… 王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响 …… 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究 …… 王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究 …… 冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例 …… 张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素 …… 任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价 …… 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价 …… 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险 …… 陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素 …… 黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水TOC输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例 …… 王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素 …… 黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于PCR-DGGE和拟杆菌(*Bacteroides*)16S rRNA的岩溶地下水粪便污染来源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例 …… 张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征 …… 梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成 …… 刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究 …… 丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素 …… 董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析 …… 程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学 …… 郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选 …… 李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米Fe_3O_4磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究 …… 钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气SBR处理养猪沼液的短程脱氮性能 …… 宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤CO_2和N_2O排放通量的影响 …… 郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解CH_4与N_2O浓度特征 …… 侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克氏针茅草原N_2O排放的影响 …… 杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制 …… 曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局 …… 高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 …… 史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险 …… 赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析 …… 刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米TiO_2对土壤重金属释放及形态变化的影响 …… 张金洋,王定勇,梁丽,李楚娴,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中Cr(Ⅵ)的还原动力学 …… 马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响 …… 宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响 …… 黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析 …… 王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响 …… 郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旸,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程的交互特征 …… 林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)

典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征

史晓宜[1,2],蒲焘[2],何元庆[1,2],陆浩[1],牛贺文[2],夏敦胜[1]

(1. 兰州大学资源环境学院,西部环境教育部重点实验室,兰州 730000; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室,兰州 730000)

摘要: 2014 年 8 月对拉市海表层及不同深度湖水进行采样,分析拉市海湖水的氢氧稳定同位素的空间变化及其影响因素,探讨典型温冰川区域湖泊的水文补给特征. 结果表明,拉市海表层湖水的$\delta^{18}O$、δD 值分别在 $-12.98‰ \sim 8.16‰$和 $-99.42‰ \sim -73.78‰$之间波动,平均值分别为 $-9.75‰$和 $-82.23‰$; 表层湖水的$\delta^{18}O$及过量氘表现出相反的空间变化特征,有河水注入的区域$\delta^{18}O$值较低而过量氘值较高; 垂直方向上过量氘随深度变化较小,表明湖水在垂直方向上混合较充分,不同深度层上过量氘表现出自东向西先增大后减小的变化趋势,这可能与入湖河流的分布、湖泊所处的地理位置及自然条件等密切相关; 同位素对比研究发现,拉市海的主要补给源为大气降水及河水,冰雪融水可能间接补给拉市海; 对拉市海与青藏高原地区典型湖泊和非冰川区湖泊的氧同位素组成对比发现,冰川区湖泊中稳定同位素表现出明显的高程效应(拉市海除外),$\delta^{18}O$随海拔升高而降低. 非冰川区湖泊蒸发效应较为明显,同位素值明显偏正.

关键词: 氢氧稳定同位素; 过量氘; 空间分布; 拉市海; 玉龙雪山

中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2016)05-1685-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2016.05.012

Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region

SHI Xiao-yi[1,2], PU Tao[2], HE Yuan-qing[1,2], LU Hao[1], NIU He-wen[2], XIA Dun-sheng[1]

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: We focused mainly on the spatial variation and influencing factors of hydrogen and oxygen stable isotopes between water samples collected at the surface and different depths in the Lashi Lake in August, 2014. Hydrological supply characteristics of the lake in typical temperate glacier region were discussed. The results showed that the values of $\delta^{18}O$ and δD in the Lashi Lake ranged from $-12.98‰$ to $-8.16‰$ with the mean of $-9.75‰$ and from $-99.42‰$ to $-73.78‰$ with the mean of $-82.23‰$, respectively. There was a reversed spatial variation between $\delta^{18}O$ and d. Relatively low values of $\delta^{18}O$ with high values of d were found at the edge of the lake where the rivers drained into. Meanwhile, the values of d in the vertical profile varied little with depth, suggesting that the waters mixed sufficiently in the vertical direction. The d values increased at first and then decreased from east to west at different layers, but both increase and decrease exhibited different velocities, which were related to the river distribution, the locality of the lake and environmental conditions etc. River water and atmospheric precipitation were the main recharge sources of the Lashi Lake, and the melt-water of snow and ice might also be the supply resource. The $\delta^{18}O$ values of lake water in glacier region decreased along the elevation (except for Lashi Lake), generally, this phenomenon was called "altitude effect". Moreover, high isotopic values of the lake water from non-glacier region were due to the evaporation effect.

Key words: hydrogen and oxygen stable isotope; deuterium excess; spatial variation; Lashi Lake; Mt. Yulong

氢氧同位素作为自然界水体的主要组成部分,对于研究区域水体的水文平衡和水文循环具有重要意义[1~3]. 湖泊水体$\delta^{18}O$主要反映了流域的降水同位素特征、湖泊蒸发强度、流域水文状况及湖水的滞留时间等. 因此,利用稳定同位素示踪湖泊水体的演化过程,为解决湖泊水量、水质和水文循环过程提供一种重要的方法. 目前国外关于同位素技术在湖泊水文学中的应用研究较多: Gibson 等[4]利用稳定同位素模型模拟了高纬度地区湖泊的蒸发过程; Biggs 等[5]运用同位素质量平衡方法模拟高海拔区湖水的蒸发和流入比率,研究了湖泊的现代水文过程. 就国内研究而言,氢氧稳定同位素质量平衡方法已经被广泛运用于评估湖泊的水量平衡、长期和短期蒸发过程等方面: 吴敬禄等[6]通

收稿日期: 2015-11-10; **修订日期**: 2015-12-27
基金项目: 国家自然科学基金项目(41401083, 41273010); 中国博士后科学基金项目(2014M552517); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所人才基金项目(Y451181001, Y551C11001); 中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-G03-04); 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题项目(SKLCS-ZZ-2015-01-03)
作者简介: 史晓宜(1990 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为水文与水资源,E-mail: xyshi14@lzu.edu.cn

过对长江中下游 45 个湖泊不同季节水体δ^{18}O分析,研究了湖泊水体的演化过程; Tian 等[7]、巩同梁等[8]对羊卓雍错流域稳定同位素水文循环进行了相关研究; 高晶等[9]、臧娅琳等[10]通过深入研究青藏高原典型湖泊区多种水体的稳定同位素时空分布特征,揭示了高原湖泊的水文过程; Bao 等[11]利用稳定同位素物质平衡方法估算了青海湖的蒸发量,发现计算结果与同时期实测蒸发量数据相当.

云贵高原是我国淡水湖泊分布较多的地区之一,主要分布在滇中和滇西北地区,该区域湖泊一般海拔较高,湖盆较深,且均在石灰岩、砂岩地区,故其湖泊特色与长江中下游浅水湖泊迥异,与分布我国西北、东北者更不相同. 丽江-玉龙雪山地区是我国典型的温冰川分布区,区内分布有数十个高原湖泊,如拉市海、程海、泸沽湖和九子海溶蚀高原洼地雨季形成的小湖泊等,不仅是重要的区域水资源和旅游资源,而且在区域水循环和环境研究中具有特殊的意义. 玉龙雪山冰川是该区域重要的水资源之一,近年来,丽江地区气温上升,玉龙雪山冰川发生显著变化,冰川面积不断缩减的同时,冰川末端海拔明显上升. 气候变化和玉龙雪山地区冰川的快速消融和退缩,势必对湖泊蓄水量和水文平衡等造成影响,因此,需开展湖泊在区域水资源和水循环过程中的重要性研究.

玉龙雪山地区水体同位素的研究较多, He 等[12~14]对玉龙雪山冰川区积雪及其融水径流中稳定同位素进行了一系列研究,揭示了冰川区水体δ^{18}O的时空变化及其气候效应; 庞洪喜等[15,16]就冬夏季玉龙雪山冰川不同水体稳定同位素的分馏开展了对比研究,并对丽江市大气降水的影响因子进行了深入探究; Pu 等[17,18]利用同位素示踪了丽江-玉龙雪山地区的水文过程. 然而,该地区尚无湖水稳定同位素时空变化方面的研究和详细报道,因此,有必要展开对该区域湖泊的同位素组成及水文补给、蒸发等水文过程的研究.

本文选择丽江-玉龙雪山地区典型湖泊拉市海为研究对象,分析湖泊水体中δ^{18}O以及过量氘的空间变化特征及影响因素,探讨典型温冰川区湖泊的水文补给状况,通过揭示典型温冰川区湖泊的现代水文循环特征,以期为该区域湖相沉积中稳定同位素记录研究提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

玉龙雪山(27°10′~27°40′N,100°9′~100°20′E)位于青藏高原东南缘、横断山脉的南端,是我国典型的温冰川分布区. 其冰川分属于四个流域,即大具沟流域、白水河流域、漾弓江流域和仁河流域. 雪山东麓从北向南依次为大具盆地、甘海子盆地和丽江盆地. 该地区受到季风及多种环流系统的影响,表现出干湿季分明、降水主要集中在季风期的南亚季风气候特征.

拉市海位于丽江盆地西部 8 km 处,一个封闭型的季节性宽浅湖泊(如图 1),湖面海拔2 437 m,水深2.5~4.5 m,蓄水量达4 150万 m^3[19]. 湖泊受到位于北侧的美泉河及南侧的清水河等的补给,湖水由指云寺暗河入口排泄,与金沙江支流相连[20].

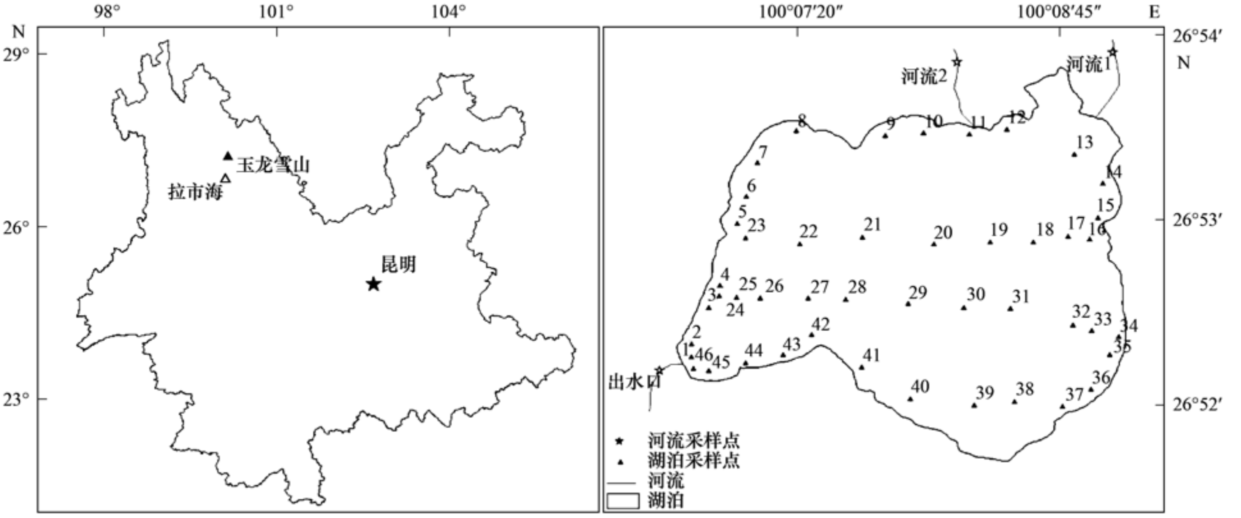

图 1 拉市海湖水采样点分布示意

Fig. 1 Location of research area and sampling sites

1.2　样品采集与分析

2014 年 8 月在拉市海进行水样采集，采集路线如图 1 所示. 首先沿湖周边进行表层水样采集，样品数共计 46 个；其次沿两条平行断面（偏北断面：标号 16 ~ 23；偏南断面：标号 25 ~ 33）在湖中进行采样，在每个采样点自表层向下以 1 m 为间隔采集水样，样品数共计 56 个. 同期，采集两条入湖河流（河水 1 和河水 2）水样，具体位置如图 1 所示.

取样过程中，用采集的水样清洗聚乙烯样品瓶 3 次后再装样，并在每个样品瓶上编号，用 GPS 记录采样点地理位置，同时记录详细信息. 样品密封后放入玉龙雪山冰川与环境观测研究站内 −15℃ 的冰箱低温保存. 之后以冷冻方式运回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. 利用液态水同位素分析仪 Picarro L2130-i 进行测定，测量结果以相对于维也纳标准平均海水（Vienna Standard Mean Oceanic Water, V-SMOW）千分差的形式表示，$\delta^{18}O$ 和 δD 的测量误差分别为 ±0.025‰ 和 ±0.1‰.

2　结果与分析

2.1　拉市海表层湖水氢氧同位素组成及关系

同位素测试结果表明，表层湖水的 $\delta^{18}O$ 值在 −12.98‰ ~ −8.16‰ 之间波动，平均值为 −9.75‰；δD 值在 −99.42‰ ~ −73.78‰ 之间波动，平均值为 −82.23‰. 根据标准偏差，湖水的 $\delta^{18}O$ 值变化幅度较小，标准差为 1.36，δD 值变化明显，波动幅度为 25.64‰. 入湖河水的 $\delta^{18}O$ 值分别为 −13.90‰（河水 1）和 −13.59‰（河水 2）. 对比发现，湖水的 $\delta^{18}O$ 值普遍高于入湖河水及降水（平均值为 −14.57‰）[21] 的 $\delta^{18}O$ 值，这主要与湖水的蒸发有关.

研究表明，全球降水中氢和氧同位素存在一种线性关系. Craig[22] 把这种关系定义为全球大气降水线（global meteoric water line, GMWL），表达式为：$\delta D = 8\ \delta^{18}O + 10$. 对拉市海表层 46 个湖水样品分析表明，δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系为：$\delta D = 5.53\ \delta^{18}O - 28.36$（$R^2 = 0.99$），其斜率高于全球大气降水线 8（$\delta D = 8\ \delta^{18}O + 10$）. Zeng 等[23] 根据在丽江采集的降水资料，得出当地降水线为：$\delta D = 7.59\ \delta^{18}O + 1.35$　（$R^2 = 0.99$）. 入湖河水的 $\delta^{18}O$ 值分别为 −13.90‰ 和 −13.59‰，明显低于降水及湖水的同位素值. 由图 2 可知，拉市海湖水采样点均位于我国大气降水线及当地降水线的下方，说明湖水经历了明显的蒸发.

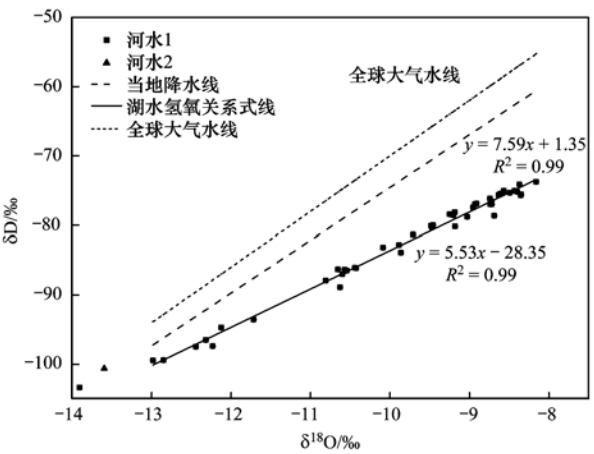

图 2　拉市海湖水、当地降水、入湖河水的氢氧同位素关系

Fig. 2　The $\delta^{18}O$ and δD values of lake water, rainwater, and river water in the study area

2.2　拉市海表层湖水 $\delta^{18}O$ 和过量氘的空间变化

利用 Arcgis 对拉市海表层湖水 $\delta^{18}O$ 进行插值，得出 $\delta^{18}O$ 的空间分布（如图 3）. 由图 3 可知，表层湖水 $\delta^{18}O$ 存在一定的空间变化，有河水注入的区域为低值区，这是由于拉市海的补给河流主要分布在东北岸，入湖河水的 $\delta^{18}O$ 值分别为 −13.90‰ 和 −13.59‰，明显低于湖水 $\delta^{18}O$ 的平均值，故在河水汇入处受到稀释作用的影响，导致该区域 $\delta^{18}O$ 值较低. 而湖泊东西岸的 $\delta^{18}O$ 值相对较高，主要是由于河水缓慢汇入湖泊的过程中，与湖泊边缘（北岸）的水体相互混合，使其同位素值显著降低，同等蒸发的条件下，无河水注入的区域 $\delta^{18}O$ 值相对较高.

水在蒸发过程中的动力分馏作用使氢和氧稳定同位素的平衡分馏被破坏，在降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间的关系出现一个差值，Dansgaard[24] 把它定义为过量氘：$d = \delta D - 8\ \delta^{18}O$. 另外，$d$ 值不仅仅反映水体非平衡程度，而且能反映蒸发速率的快慢. 由表 1 所示，过量氘值在 −9.14‰ ~ 4.43‰ 之间波动，平均值为 −4.23‰. 而全球降水中过量氘值为 10‰，说明拉市海湖水的蒸发效应比较显著. 以克里金插值法得到过量氘的空间变化图（如图 4）. 由图 3、4 可知，$\delta^{18}O$ 与过量氘表现出相反的空间分布特征.

2.3　拉市海深水剖面过量氘的空间变化

图 5 为 8 个深水剖面中过量氘随深度变化. 本研究选取 8 个深水剖面（采样点序号分别为偏北断面中 19、20、21、22；偏南断面中 28、29、30、31）共 40 个水样作出过量氘随水深变化的曲线. 从中可知，8 个剖面的过量氘值随深度变化较小，偏北断面中变化幅度最大的是 22 号采样点，变化范围为 −5.69‰ ~ −4.23‰，相差 1.45‰；偏南断面中过

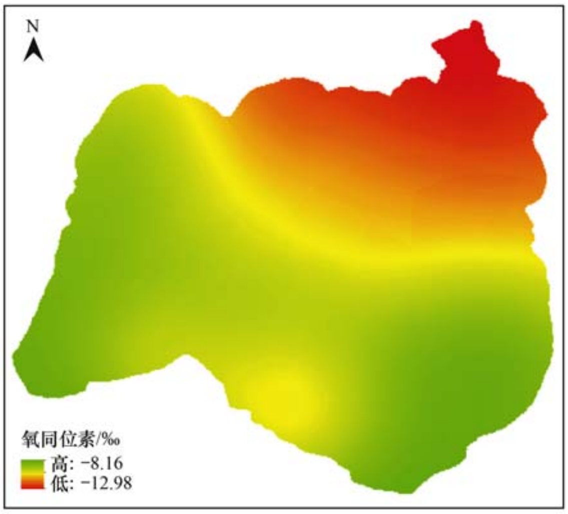

图 3 拉市海表层水样δ18O 的空间变化

Fig. 3 Spatial variation of surface water $\delta^{18}O$ values in Lashi Lake

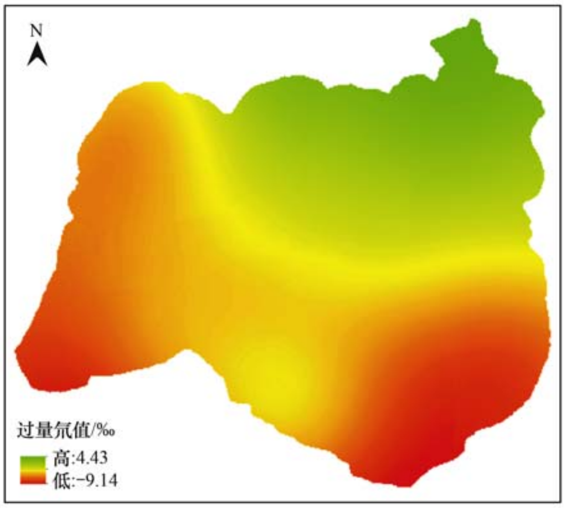

图 4 拉市海表层水样过量氘的空间变化

Fig. 4 Spatial variation of surface water deuterium excess in Lashi Lake

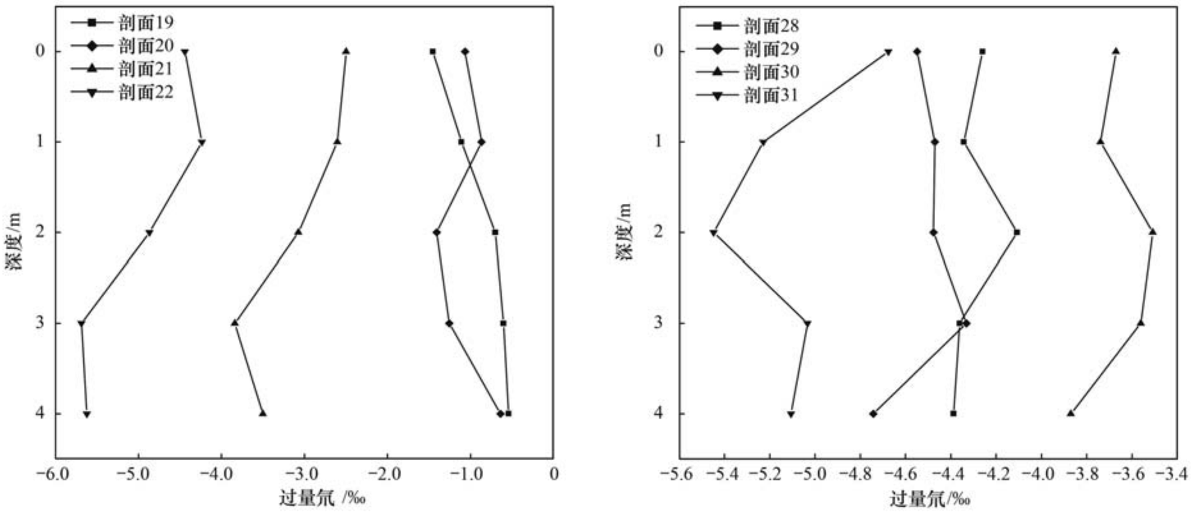

图 5 拉市海湖水过量氘随深度变化

Fig. 5 Variations of deuterium excess values with depth for the lake water

量氘值随深度变化相差最大的是 31 号采样点,最大值为 -4.68‰,最小值为 -5.45‰,相差 0.77‰,表明湖水在垂直方向上混合比较充分. 由图 6 可知,偏北断面和偏南断面的采样点在不同深度层上自东向西表现出先增大后减小的变化趋势,但增减速率表现出相反特性,这可能与入湖河流的分布有关[9].

3 讨论

3.1 拉市海水文补给特征

通常情况下,湖水的补给主要来自于大气降水、河水、地下水等,位于冰川区的湖泊,还可能受到冰雪融水的补给. 本研究区水资源包括地表水和地下水,主要赋存于冰川、积雪、河流、湖泊和地下岩层中. 该区域夏季受西南季风的影响,降水较为充沛,降水量约为 800 mm[25,26],大量的降水为拉市海提供了重要的水源补给. 根据实地考察和资料记载[20],拉市海受到入湖河流美泉河及清水河等的补给. 由表 1 可知,湖水的$\delta^{18}O$值 -9.75‰,入湖河水(河水 1、河水 2)的 $\delta^{18}O$ 值分别为 -13.90‰、-13.59‰,湖水的$\delta^{18}O$值明显高于河水的$\delta^{18}O$值,表明湖水的稳定同位素组成受到蒸发效应的影响. 此外,本研究选取白水河流域的泉水双胞泉和丽江最大的泉眼群黑龙潭作为地下水代表,其$\delta^{18}O$值分别为 -14.50‰和 -14.72‰(如表 1),与入湖河水的 $\delta^{18}O$ 值相比,差值不大,在 -0.60‰ ~ -1.13‰之间

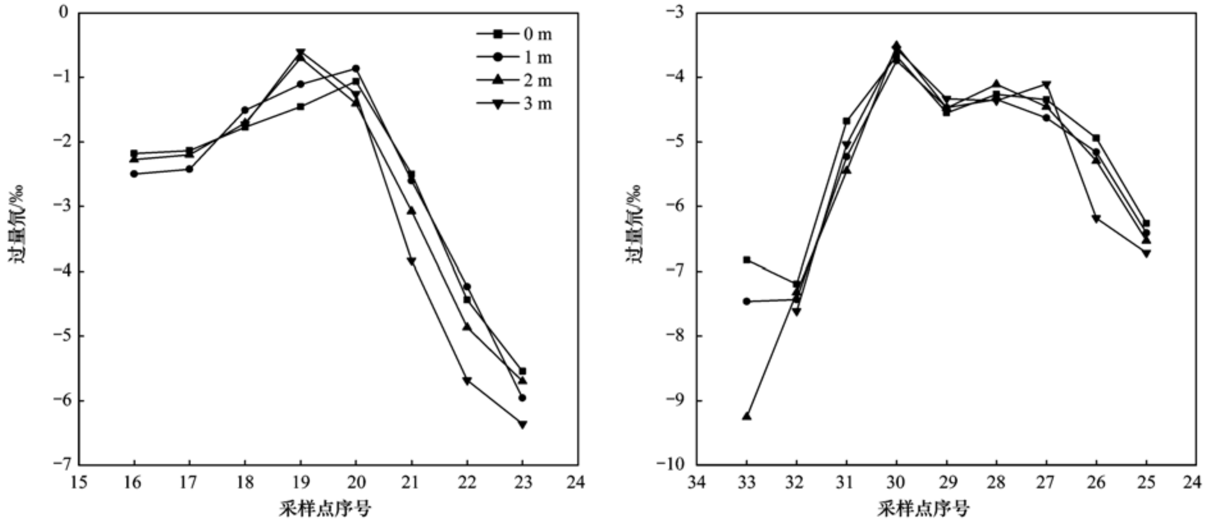

图 6　拉市海不同深度过量氘自东向西变化曲线

Fig. 6　Variations of deuterium excess in different depth from east to west in Lashi Lake

表 1　玉龙雪山周边不同水体δ¹⁸O 的平均值1)

Table 1　Average $\delta^{18}O$ values of different water bodies in Mt. Yulong region

采样类型	采样时间	$\delta^{18}O$/‰			文献
		最小值	最大值	平均值	
河水 1	2004 年 9 月	—	—	-13.90	本研究
河水 2	2004 年 9 月	—	—	-13.59	本研究
湖水	2014 年 8 月	-12.98	-8.16	-9.75	本研究
双胞泉	2009 年 5～10 月	-15.06	-14.17	-14.50	[17]
黑龙潭泉水	2009 年 5～10 月	-15.13	-14.21	-14.72	[17]
冰雪融水	2009 年 5～9 月	-13.41	-11.65	-12.59	[17]
丽江市降水	2008 年 6～9 月	—	—	-14.57	[21]

1) "—"表示未测

波动. 已有研究表明[27]，由于该区域特殊的地貌条件，地表水与地下水相互补给的速度较快，转换过程中$\delta^{18}O$含量变化较小. 因此，地下水也可能补给拉市海.

位于丽江盆地北部的玉龙雪山是盆地内水系的主要发源地，由于冰雪融水和丰沛的降水补给，玉龙雪山周边发育有大量的小河流，总体上由北向南注入丽江盆地[28,29]. 因此，冰雪融水可能通过补给地下水及河水，间接补给拉市海. 范弢[20]通过遥感资料指出玉龙雪山南侧的融水径流，首先进入文海湖，随后于湖南部附近岩溶地带的落水洞泄通过地下暗河车门举大泉补给拉市海，说明拉市海可能受到冰雪融水的补给.

在全球气候变暖的背景下，冰川变化对以冰雪融水为主要补给的高原湖泊变化有重要的影响[30]. 研究表明，玉龙雪山地区冰川持续退缩，1957～2009 年，消失冰川共计 6 条，现仅存 13 条，其面积为 4.42 km^2，相比 1957 年总面积减少了 7.18 km^2；冰川表面形态破碎严重，冰川积累区已出现冰面河和冰面湖等[31,32]. 同时，玉龙雪山作为丽江盆地内重要的水源发源地，冰川面积的明显减小，势必会引起本区水资源的动态变化，这可能对拉市海湖泊的水量及水文补给状况产生一定影响.

3.2　拉市海湖水与其他地区湖水的$\delta^{18}O$值比较

通过对湖泊进行稳定同位素研究，一方面可以揭示湖泊的现代水文循环过程，另一方面也为湖相沉积中稳定同位素记录提供参考. 表 2 综合了本研究及夏季期间其他地区不同类型湖泊水体的$\delta^{18}O$平均值. 臧娅琳等[10]对羊卓雍错湖泊表层$\delta^{18}O$值及过量氘的空间变化进行研究，对比发现，羊卓雍错湖和拉市海表现出一致的同位素分布特征：有河水注入的边缘区$\delta^{18}O$值较低，表层湖水的$\delta^{18}O$值空间变化幅度不大，但羊卓雍错湖中心区$\delta^{18}O$值较高，拉市海湖水的高值区主要分布在无河水注入的边缘区. 这种空间分布的差异，可能受到湖泊形状、地理位置及入湖河流的分布等的影

响[9,10].

对青藏高原区典型高原湖泊(如羊卓雍错、纳木错和普莫雍错)的氧同位素组成进行对比研究,发现青藏高原区湖泊的$\delta^{18}O$ 值随着海拔高度的增加而减小,呈现明显的"高程效应". 但拉市海的$\delta^{18}O$值并不符合高程效应,可能是因为该区域在夏季受季风活动影响较大,降水中重同位素值较贫化,导致拉市海水体的$\delta^{18}O$值相对较低. 同时,对于非冰川区湖泊(巴丹吉林沙漠湖泊和青海湖),水体的$\delta^{18}O$值明显较高,蒸发作用影响极为显著,这些差异表明湖水的同位素组成主要与其补给类型和地理位置、自然条件等因素密切相关[35].

表 2 拉市海湖水与其他地区湖水的 $\delta^{18}O$值比较

Table 2 Comparison of $\delta^{18}O$ values for different lakes

湖泊	经度	纬度	采样日期	样品数/个	$\delta^{18}O$/‰	海拔/m	文献
拉市海	100°06′~100°09′	26°51′~26°53′	2014 年 8 月	46	-9.75	2 437	本研究
羊卓雍错	90°08′~91°45′	28°27′~29°12′	2006 年 8 月	30	-5.4	4 440	[9]
纳木错	90°16′~91°03′	30°30′~30°55′	2005~2008 年的 6~9 月	—	-6.7	4 718	[33]
普莫雍错	90°13′~90°33′	28°29′~28°38′	2006 年 8~9 月	21	-7.2	5 030	[9]
巴丹吉林沙漠湖泊	99°23′~104°34′	39°04′~42°12′	2012 年 8~9 月	38	5.9	—	[34]
青海湖	97°50′~101°20	36°15′~38°20′	—	—	2.0	4 500	[11]

4 结论

(1)拉市海表层湖水的$\delta^{18}O$、δD 值分别在 -12.98‰~ -8.16‰和 -99.42‰~ -73.78‰之间波动,平均值分别为 -9.75‰和 -82.23‰,δD 和$\delta^{18}O$的关系为:$\delta D = 5.53\ \delta^{18}O - 28.36$,其斜率高于地降水线斜率 7.59,表明湖水经历了明显的蒸发效应.

(2)拉市海表层湖水的$\delta^{18}O$及过量氘值的空间变化相反,有河水注入的区域,湖水的$\delta^{18}O$值较低而过量氘值较高,无河水补给的东西岸$\delta^{18}O$值较高而过量氘较低.

(3)垂直剖面上湖水的过量氘值随深度变化较小,表明拉市海湖水在垂直方向上充分混合; 过量氘值在不同深度层上表现出自东向西先增大后减小的变化趋势,但增减速率呈现出相反特性. 蒸发效应和不同补给源的同位素组成是影响湖水同位素空间分布的主要因素.

(4)青藏高原冰川区湖泊水体中$\delta^{18}O$值随海拔升高而减小,表现出明显的高程效应,因拉市海受季风影响较大,湖水同位素值并不符合高程效应. 非冰川区湖泊蒸发效应较为显著,同位素值明显偏正.

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]. Journal of Hydrology, 2002, **262**(1-4): 128-144.

[2] Gibson J J. Short-term evaporation and water budget comparisons in shallow Arctic lakes using non-steady isotope mass balance [J]. Journal of Hydrology, 2002, **264**(1-4): 242-261.

[3] 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]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, **72**(19): 4661-4674.

[4] Gibson J J, Prowse T D, Peters D L. Hydroclimatic controls on water balance and water level variability in Great Slave Lake[J]. Hydrological Processes, 2006, **20**(19): 4155-4172.

[5] 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.

[6] 吴敬禄, 林琳, 曾海鳌, 等. 长江中下游湖泊水体氧同位素组成[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, **26**(3): 53-56.

[7] Tian L D, Liu Z F, Gong T L, *et al*. Isotopic variation in the lake water balance at the Yamdruk-tso basin, southern Tibetan Plateau[J]. Hydrological Processes, 2008, **22**(17): 3386-3392.

[8] 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.

[9] 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): 338-343.

[10] 臧娅琳, 王建力, 田立德, 等. 羊卓雍错湖水稳定同位素空间变化特征研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, **36**(4): 127-132.

[11] Bao W M, Hu H Y, Wang T, *et al*. Application of stable isotope method in water mass balance of Qinghai lake[A]. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering[C]. Shanghai, China: IEEE, 2008: 2974-2977.

[12] He Y Q, Theakstone W H, Yao T D, *et al*. The isotopic record at an alpine glacier and its implications for local climatic changes and isotopic homogenization processes[J]. Journal of Glaciology, 2001, **47**(156): 147-151.

[13] He Y Q, Yao T D, Theakstone W H, *et al*. Recent climatic significance of chemical signals in a shallow firn core from an

alpine glacier in the South-Asia monsoon region[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, **20**(3): 289-296.

[14] He Y Q, Pang H X, Theakstone W H, *et al*. Spatial and temporal variations of oxygen isotopes in snowpacks and glacial runoff in different types of glacial area in western China[J]. Annals of Glaciology, 2006, **43**(1): 269-274.

[15] 庞洪喜, 何元庆, 张忠林, 等. 季风降水中$\delta^{18}O$与季风水汽来源[J]. 科学通报, 2005, **50**(20): 2263-2266.

[16] 庞洪喜, 何元庆, 卢爱刚, 等. 玉龙雪山冰川稳定同位素分馏冬夏对比[J]. 地理学报, 2006, **61**(5): 501-509.

[17] Pu T, He Y Q, Zhang T, *et al*. Isotopic and geochemical evolution of ground and river waters in a karst dominated geological setting: a case study from Lijiang basin, South-Asia monsoon region[J]. Applied Geochemistry, 2013, **33**: 199-212.

[18] Pu T, He Y Q, Zhu G F, *et al*. Characteristics of water stable isotopes and hydrograph separation in Baishui catchment during the wet season in Mt. Yulong region, south western China[J]. Hydrological Processes, 2013, **27**(25): 3641-3648.

[19] 李艳娟. 拉市海高原湿地观光农业资源开发利用研究[A]. 见: 现代节水高效农业与生态灌区建设(下)[C]. 昆明: 云南大学出版社,2010.

[20] 范弢. 云南丽江生态地质环境演化过程与趋势研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.

[21] 王春凤. 丽江-玉龙雪山地区大气降水和气溶胶化学特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.

[22] Craig H. Isotopic variations in meteoric water[J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.

[23] Zeng C, Liu Z H, Yang J W, *et al*. A groundwater conceptual model and karst-related carbon sink for a glacierized alpine karst aquifer, Southwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2015, **529**: 120-133.

[24] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, **16**(4): 436-468.

[25] 李宗省, 何元庆, 贾文雄, 等. 丽江市夏季降水化学组成分析[J]. 环境科学, 2009, **30**(2): 362-367.

[26] 王春凤, 何元庆, 张宁宁, 等. 丽江-玉龙雪山不同区域大气降水化学特征[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(1): 18-23.

[27] 蒲焘. 基于水化学与同位素的典型海洋型冰川流域水文过程研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.

[28] 蒲焘, 何元庆, 朱国锋, 等. 玉龙雪山周边典型河流雨季水化学特征分析[J]. 地理科学, 2011, **31**(6): 734-740.

[29] 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.

[30] 鲁安新, 姚檀栋, 王丽红, 等. 青藏高原典型冰川和湖泊变化遥感研究[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(6): 783-792.

[31] 杜建括, 辛惠娟, 何元庆, 等. 玉龙雪山现代季风温冰川对气候变化的响应[J]. 地理科学, 2013, **33**(7): 890-896.

[32] 辛惠娟, 何元庆, 张涛, 等. 青藏高原东南缘丽江玉龙雪山气候变化特征及其对冰川变化的影响[J]. 地球科学进展, 2013, **28**(11): 1257-1268.

[33] 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.

[34] 欧阳波罗. 巴丹吉林沙漠湖水和地下水氢氧同位素研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.

[35] Gonfiantini R. Environmental isotopes in lake studies[A]. In: Fritz P, Fontes J C (Eds.). Handbook of Environmental Isotope Geochemistry[C]. Amsterdam: Elsevier, 1986. 113-168.

HUANJING KEXUE Vol. 37 No. 5
Environmental Science (monthly) May 15, 2016

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015: Pollution Process and Emissions Variation ······ XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, *et al.* (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC ······ ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, *et al.* (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry ······ LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, *et al.* (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Lanzhou City ······ WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, *et al.* (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles $PM_{2.5}$ in Southwest Suburb of Chengdu in Spring ······ LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, *et al.* (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region ······ LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, *et al.* (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources ······ CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing ······ HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, *et al.* (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing ······ WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, *et al.* (1662)
$CoCuMnO_x$ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis ······ MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, *et al.* (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication ······ ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, *et al.* (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region ······ SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, *et al.* (1685)
$\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$ and $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers ······ ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, *et al.* (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin ······ WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, *et al.* (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region ······ CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, *et al.* (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China ······ WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, *et al.* (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network ······ FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake ······ ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, *et al.* (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors ······ REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, *et al.* (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province ······ WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, *et al.* (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China ······ CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, *et al.* (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou ······ CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, *et al.* (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River ······ HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, *et al.* (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors: An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing ······ WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province ······ HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, *et al.* (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on *Bacteroides* 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater: Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example ······ ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, *et al.* (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River ······ LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, *et al.* (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co^{2+} Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process ······ LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, *et al.* (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile ······ DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, *et al.* (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process ······ DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System ······ CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, *et al.* (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters ······ GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment ······ LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, *et al.* (1858)
Magnetic Fe_3O_4 Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge ······ QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor ······ SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, *et al.* (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO_2 and N_2O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain ······ GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, *et al.* (1880)
Characteristics of Dissolved CH_4 and N_2O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring ······ HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, *et al.* (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N_2O Emission from a *Stipa krylovii* Steppe in Inner Mongolia, China ······ YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, *et al.* (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism ······ CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, *et al.* (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China ······ GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, *et al.* (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates ······ SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, *et al.* (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing ······ ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, *et al.* (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang ······ LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, *et al.* (1938)
Effect of Nano-TiO_2 on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil ······ ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, *et al.* (1946)
Reduction Kinetics of Cr(Ⅵ) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic ······ MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of *Acidithiobacillus* Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil ······ SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, *et al.* (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom *Skeletonema costatum* ······ HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, *et al.* (1968)
Rhizospheric Mechanisms of *Hemerocallis middendorfii* Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems ······ WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source ······ ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, *et al.* (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting ······ LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, *et al.* (1993)

环境科学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2016 年 5 月 15 日　第 37 卷　第 5 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 37　No. 5　May 15, 2016

主　管	中国科学院
主　办	中国科学院生态环境研究中心
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
主　编	欧阳自远
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
出　版	科学出版社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717
印刷装订	北京北林印刷厂
发　行	科学出版社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订购处	全国各地邮电局
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京 399 信箱）

Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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
Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
Distributed	by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
Domestic		All Local Post Offices in China
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