

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析	刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)
杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征	陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)
气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响	杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)
龙凤山本底站大气 CO ₂ 数据筛分及浓度特征研究	栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)
区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响	苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)
天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究	张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)
铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征	梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈洁, 宋丽娜, 刘杰 (2883)
KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究	沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)
污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)
基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究	白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)
1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应	张柏发, 陈丁江 (2911)
南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究	蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)
三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)
岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)
亚热带典型岩溶区地表溪流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究	张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)
藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究	肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)
广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究	刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)
铜陵相思河流域重金属分布特征研究	陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)
不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究	王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)
酸性条件下Ti(IV)催化 O ₃ /H ₂ O ₂ 降解邻苯二甲酸二甲酯	高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)
无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响	施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)
羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究	方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)
不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀	鲍国栋, 左剑恶, 王雅娟, 千里里 (3002)
微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究	王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)
不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究	张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)
SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究	刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)
SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究	张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)
曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响	陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)
限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究	刘文如, 阴芳芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)
UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究	李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)
开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用	陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)
北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险	段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)
珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险	朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娟 (3066)
温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应	齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)
不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响	刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)
低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响	黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)
EDTA 与柠檬酸复配洗涤修复多重金属污染土壤效果研究	尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)
不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N ₂ O 排放的关系	陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)
黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N ₂ O 产生的不同过程及贡献	孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)
猪粪化肥配施对双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放及其全球增温潜势的影响	王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)
我国北方两地区环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响	袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)
丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应	王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)
丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响	李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)
含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响	雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)
重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准	王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)
维生素 B ₁₂ 对脱氮功能蓝藻降解 2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究	刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)
己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性	徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)
多溴联苯醚在市場鲫鱼体内分布和食鱼暴露量	王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)
稀有鮐鲫 HMGR 基因全长克隆及雄鱼经五氯酚暴露基因表达的分析	邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)
藻细胞和高岭土的存在对病毒 MS2 存活的影响	何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)
多胺功能化介孔炭对 Pb(II) 的吸附动力学与机制	李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)
生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响	崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)
经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例	李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)
中国铅流改变原因分析	马兰, 毛建素 (3219)
放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨	汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)
中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展	徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)
《环境科学》征稿简则 (2936) 《环境科学》征订启事 (3051) 信息 (2882, 2927, 3059, 3218)	

藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究

肖可¹, 沈立成^{1*}, 王鹏²

(1. 西南大学地理科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275)

摘要: 青藏高原水循环过程情况复杂, 水体氢氧同位素包含了其重要信息。选取西藏南部干旱区淡水湖、咸水湖及地热水水体为研究对象, 分析研究区内不同水体氢氧同位素组成、变化特征、影响因素及水循环过程。结果表明, 3 种水体均表现出了高海拔地区氢氧同位素组成偏负的特点, 淡水湖打加芒错 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -17.0‰ , δD 平均值为 -138.6‰ , 咸水湖朗措 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -6.4‰ , δD 平均值为 -87.4‰ , 搭格架地热区热水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -19.2‰ , δD 平均值为 -158.2‰ ; 受内陆干旱区强烈的蒸发作用影响, 湖泊及地热水蒸发线斜率均小于 8, 氦过量 d 值均为负值; 搭格架地热区热储温度较高, 氢氧同位素关系存在氧漂移现象。

关键词: 湖泊; 地热水; 氢氧同位素; 氦盈余; 青藏高原

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-2952-07 DOI: 10.13227/j. hjkx. 2014. 08. 016

Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet

XIAO Ke¹, SHEN Li-cheng¹, WANG Peng²

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The condition of water cycles in Tibet Plateau is a complex process, and the hydrogen and oxygen isotopes contain important information of this process. Based on the analysis of isotopic composition of freshwater lake, saltwater lake and geothermal water in the southern Tibetan Plateau, this study investigated water cycling, composition and variation of hydrogen and oxygen isotopes and the influencing factors in the study area. The study found that the mean values of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in Daggyaima lake water (-17.0‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -138.6‰ for δD), Langcuo lake water (-6.4‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -87.4‰ for δD) and Dagejia geothermal water (-19.2‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -158.2‰ for δD) all showed negative $\delta^{18}\text{O}$ and δD values in Tibetan Plateau by the influence of altitude effects. Lake water and geothermal water were influenced by evaporation effects in inland arid area, and the slope of evaporation line was less than 8. Deuterium excess parameters of lake water and geothermal water were all negative. The temperature of geothermal reservoirs in Dagejia geothermal field was high, and oxygen shift existed in the relationship of hydrogen and oxygen isotopes.

Key words: lakes; geothermal water; hydrogen and oxygen isotopes; deuterium excess; Tibet Plateau

氢氧同位素是一种广泛存在于水体中的环境同位素, 是进行水循环研究的重要手段。湖泊及地热水是地球水循环过程中的重要组成部分, 将湖泊及地热水中的氢氧同位素作为天然的示踪剂, 利用水体中同位素变化来探讨湖泊水文循环及补给来源是一种重要的研究方法^[1]。在湖泊及地热泉研究中氢氧同位素的运用主要为水汽来源分析, 水体转化关系研究等。Gat 等^[2]对北美五大湖降水及地表径流的氢氧同位素组成进行分析, 指出该地区地表水的水蒸气中混合了大气水; Mizutani^[3]分析了 Otake 地区地热水的稳定同位素组成, 证明该地区的地热水来源于当地大气降水, 并通过溶解性硫酸盐和水之间的氧同位素分馏估算了同位素平衡温度; Portugal 等^[4]探讨了墨西哥 Las 地热区水体同位素特征, 并

建立了水文地质概念模型, 指出该地区地热流体主要补给来源为全新世或者更新世的大气降水; 田立德等^[5]通过分析青藏高原那曲河流域降水及河流水体氧同位素发现河水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化受降水、降水量及蒸发作用共同调节; 庞洪喜等^[6]探讨了玉龙雪山冰川稳定同位素的分馏过程, 指出在从固态降雪向补给河流的河水转化过程中水体同位素分馏程度逐渐

收稿日期: 2013-12-30; 修订日期: 2014-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072192); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2010B006); 高等学校博士学科点专项科研项目(20100182120029); 岩溶动力学重点实验室开放课题项目(KDL2011-04)

作者简介: 肖可(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水文地球化学、水文地质与地质碳循环, E-mail: xiaokecumt@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: xqimei@swu.edu.cn; xqimei@126.com

增强,表明沉积后过程对于海洋型冰川区同位素记录的影响具有空间差异性。

青藏高原作为世界的第三极,其能量与水循环过程研究对于解释区域气候变化有重要意义。湖水和地热水是青藏高原最重要的水体,也是研究区内自然水循环过程的最重要的组成部分。青藏高原地区水体稳定同位素组成受到高程效应、大陆效应及蒸发效应等的影响,表现出很强的特殊性。研究涉及的藏南干旱区区域广阔且资料有限,本文选取同属藏南雅鲁藏布江流域半干旱区的高海拔淡水湖打加芒错、蒸发作用强烈的咸水湖朗错及水热活动强烈的搭格架间歇喷泉群作为详细研究对象,探讨区内不同水体同位素组成特征及影响因素,初步揭示了藏南干旱区内陆湖及地热水水文循环过程及演化机制。

1 研究区概况

青藏高原分布着世界上海拔最高,数量最多及面积最大的湖泊群,包含 1 000 多个水域面积超过 1 km² 的湖泊,其中以咸水湖为主,淡水湖分布较少。在青藏高原的水循环过程中这些数量众多的湖泊起着非常重要的作用^[7]。西藏湖泊矿化度由大到小依次为:藏北内陆湖区>藏南外流-内陆湖区>藏东南外流湖区,研究区所在藏南地区主要分布淡水湖及矿化度较低的咸水湖^[8]。喜马拉雅碰撞带是世界上最著名的地热活动带,区内水热活动强烈,温泉众多,地热水积极参与了区内水循环过程。

朗错(87°23'25"E, 29°12'15"N)位于冈底斯山南坡断陷盆地内,是雅鲁藏布江水系的外流湖,属藏南山地灌丛草原半干旱气候,年均降水量 350 mm,年均气温 6.0℃,湖泊面积 12 km²,海拔 4 310 m±10 m,长轴呈东西向延伸。流域北侧与布马河存在水力联系;流域西侧为一片高原湿地;流域南侧与雅鲁藏布江仅一山之隔;流域东侧湖水汇入拔嘎浦曲注入雅鲁藏布江^[9]。区内出露地层单元有:第四纪(Q)冲积物;晚侏罗世至早白垩世破姆弄混杂岩(J₃K₁P^m)硅泥质板岩及黏土质粉砂岩;三叠系穷果群(T₂₋₃Q)灰泥岩夹粉砂岩与页岩;二叠系朗错岩块(P₂l)灰色厚层层状生物碎屑灰岩夹玄武层^[10]。

打加芒错(85°44'45"E, 29°38'00"N)是古搭格架热泉沉积叠加在古冰川与冰水沉积物上形成的冰川-热泉堰塞湖。湖泊面积 8 km²,湖面海拔 5 080 m±10 m,年均降水量 250 mm,年均气温 4.5℃,呈南北状展布。流域北部连接高原湿地;流域东侧与淡水湖蓬错湖相通;流域北西侧紧邻小型冰川发育的山脉;流域南侧为搭格架间歇喷泉,外流湖水与搭格架地热水混合后汇入长马曲,经由多雄藏布最终注入雅鲁藏布江^[11]。搭格架水热区位于冈底斯陆缘岩浆弧的南缘,区域内发育一系列张性正断层,搭格架地热区位于一南北向小型地堑盆地边缘^[12]。区内出露:第四纪(Q)冲积物;古近系大竹卡组(E₃N₁d)中细粒长石岩屑砂岩夹钙质粉砂岩与页岩;古近系典中组二段(E₁₋₂d²)流纹质火山岩夹凝灰质砂岩、流纹岩;白垩系昂仁组一段(K₁₋₂a¹)深灰色、灰黑色砂岩、粉砂岩页岩韵律层。出露岩浆岩主要为白垩纪侵入的(KZπBiq_r)中粒似斑状黑云二长花岗岩^[10]。

打加芒错位于朗错北部,平均海拔高于朗错约 700 m,温度较低,蒸发强度略低于朗错,为碳酸盐型淡水湖,而朗错为碳酸盐亚型咸水湖。

2 样品采集与测试

为探讨青藏高原湖泊及地热水稳定同位素特征及水文循环过程,选取藏南干旱区海拔不同的淡水湖打加芒错与咸水湖朗错,及位于打加芒错南部的搭格架间歇地热温泉,于 2011 年 8 月及 2012 年 7 月两次对研究区进行系统的野外考察与取样,采样点的分布情况如图 1。共采集湖水水样 40 个,朗错湖水样 14 个,打加芒错湖水样 26 个;搭格架地热区热水水样 28 个(表 1)。水样经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后,使用洁净聚氟乙烯瓶蜡封。样品测试采用的仪器设备为 Gas Bench 连接 Delta V Plus 气体稳定同位素质谱仪,氧同位素测试,是将水样与标准 CO₂ 参考气(高纯 He+0.2% 高纯 CO₂)在室温下平衡 18~20 h;氢同位素则在室温下将水样与标准 H₂ 参考气(高纯 He+0.2% 高纯 H₂)平衡 40 min 后测试。样品的同位素值由同批次测量的标准样所得

表 1 青藏高原打加芒错及朗错水样采集

Table 1 Sampling of water in Daggyaima Co and Lang Co basin

采样点	经度	纬度	海拔/m	日期	水样个数
朗错	87°22'~87°25'	29°11'~29°12'	4 304	2011 年 8 月	14 个
打加芒错	85°43'~87°44'	29°35'~29°42'	5 079	2011 年 8 月	26 个
搭格架	85°44'	29°36'	5 073	2011 年 8 月	3 个
				2012 年 8 月	25 个

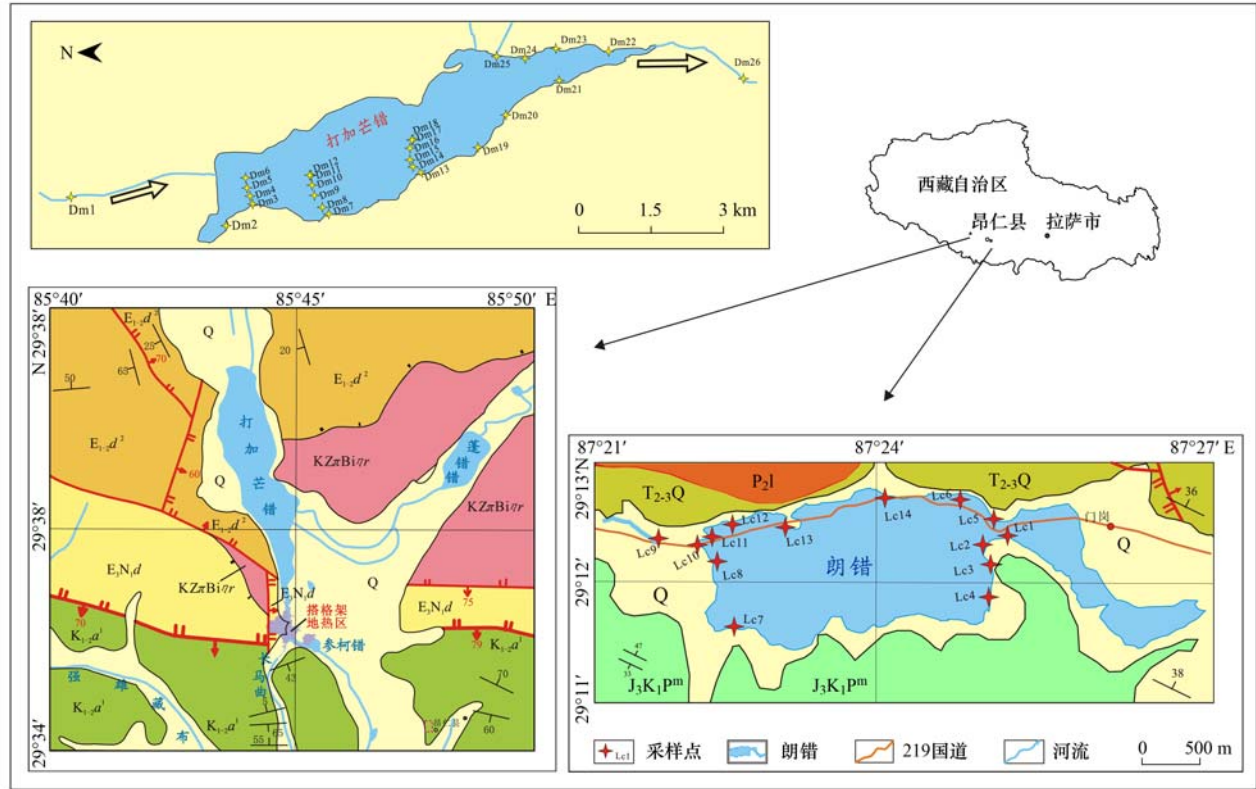


图1 青藏高原打加芒错及朗错采样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Daggyaima Co and Lang Co basin

的工作曲线计算获得相对于 V-SMOW 标准. 所有实验均在西南大学地理科学学院地球化学与同位素实验室完成.

3 结果与讨论

3.1 打加芒错及朗错湖水同位素特征及空间变化

选取朗错 14 个表水样及打加芒错 26 个水样进行 $\delta^{18}\text{O}$ 值及 δD 值的比较. 样品氢氧同位素组成如图 2 所示, 研究发现朗错水样 LC1、LC7、LC10、LC11 这 4 个河水汇入处表水样氧同位素的值分别为 -13.4‰ 、 -17.7‰ 、 -17.9‰ 、 -18.2‰ , 明显低于其他采样点. 因为河水 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于湖水, 故在湖泊的河水汇入处受到稀释作用的影响, 导致河流入湖口处采样点水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于其他采样点. 排除河水汇入处表层水样后, 得出朗错湖泊表水样 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布为 $-7.5\text{‰} \sim -5.9\text{‰}$, 平均值 -6.4‰ , δD 值分布为 $-92.9\text{‰} \sim -84.2\text{‰}$, 平均值 -87.45‰ , 打加芒错湖泊表水样 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布为 $-20.5\text{‰} \sim -14.4\text{‰}$, 平均值 -17.0‰ , δD 分布为 $-156.9\text{‰} \sim -120.6\text{‰}$, 平均值 -138.6‰ , 因为经历多年的水文循环加之湖盆形状规则, 湖水能够充分混合, 故表层湖水氧同位素组成变化不大.

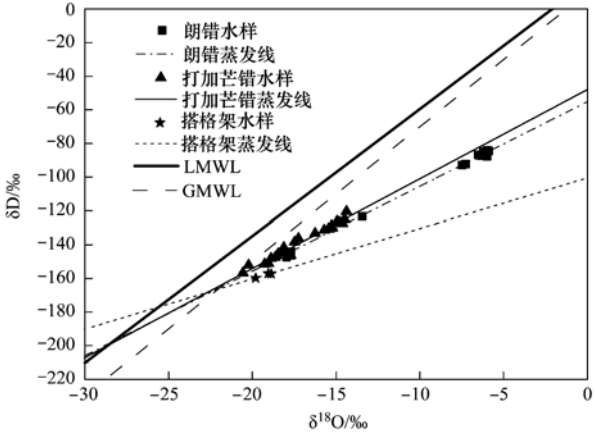


图2 湖水及地热水的氢氧同位素组成

Fig. 2 Isotope compositions of lake water and geothermal water

选取打加芒错 3 个湖泊断面, 剖面 1 至剖面 3 分别为 DJMC3 至 DJMC6, DJMC7 至 DJMC11, DJMC13 至 DJMC18. 采样点均由湖岸向湖心分布, 分析其 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化特征(图 3), 结果表明湖水同位素组成存在一定的变化规律, 整体表现为由湖岸向湖心 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐增大, 这可能是因为湖岸水浅, 湖水受湖岸低温岩石的影响导致湖心水温高于湖岸, 从而水体受温度效应影响而导致湖心同位素组成偏重. 从 DJMC3 ~ DJMC6, $\delta^{18}\text{O}$ 值表现为增大之后降

低,这与 DJMC5 及 DJMC6 取样点位置存在北部高原湿地汇入的河水有关,河水样 DJMC1 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -18.1‰ ,由于河水的稀释作用导致靠近河流的湖泊表层水氢氧同位素值较其他水样偏负。

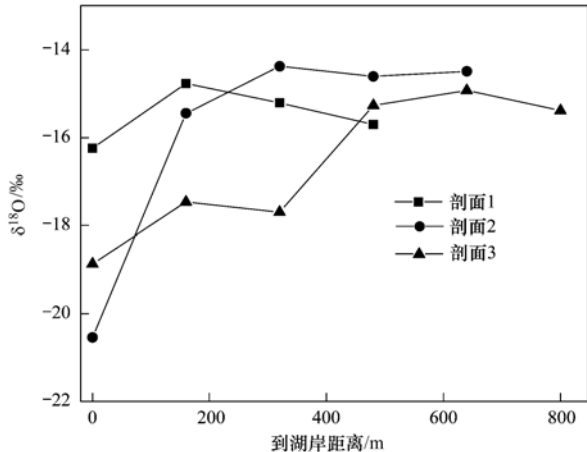


图3 打加芒错湖水同位素变化

Fig. 3 Variation of isotopes in Daggyaima Co basin

3.2 蒸发线特征分析

为得出研究区内朗错、打加芒错湖水及搭格架地热水的蒸发趋势线,对湖泊水及地热水的氢氧同位素组成进行回归拟合,得出蒸发趋势方程:

朗错湖水:

$$\delta\text{D} = 5.04 \delta^{18}\text{O} - 55.17\text{‰}$$

$$(n = 14, R^2 = 0.9972)$$

打加芒错湖水:

$$\delta\text{D} = 5.3 \delta^{18}\text{O} - 47.94\text{‰}$$

$$(n = 25, R^2 = 0.9622)$$

搭格架地热水:

$$\delta\text{D} = 3.0 \delta^{18}\text{O} - 100.62\text{‰}$$

$$(n = 3, R^2 = 0.9415)$$

将王军等^[13]对西藏雅鲁藏布江中下游大气降水分析得出的降水方程 $\delta\text{D} = 7.54 \delta^{18}\text{O} + 15.92$ 作为当地大气降水线 (LMWL) 与全球大气降水线^[14] (GMWL) 绘入图中,得出水体蒸发趋势线见图2。

所有湖泊水及地热水的蒸发线均偏离大气降水线并位于其右下方,偏离程度不等,这是因为在大水文循环的尺度下,水汽运移及降水的过程中的同位素分馏作用导致高海拔地区重同位素贫化。研究区属于内陆高海拔地区,故其区内水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 及 δD 值较之中国其它地区明显偏负,表现出明显的大陆效应。

湖水及地热水都存在着不同程度的同位素分馏,受蒸发效应的影响其氢氧同位素组成与当地大

气降水相比明显偏重^[15]。一般情况下,随着蒸发作用的加强,水体蒸发线的斜率会逐步减小,研究区域内水体蒸发线斜率均小于8,表现出了降水少而蒸发作用强的干旱区特征^[16]。通过比较三者蒸发线的斜率,可以发现蒸发强烈程度为:搭格架地热水 > 朗错湖水 > 打加芒错湖水。朗错及打加芒错均属于雅鲁藏布江流域,但表现出较大的氢氧同位素差异,首先是因为青藏高原是世界海拔最高的高原,打加芒错平均海拔约5 000 m,比朗错高出约700 m,温度较低,水体同位素特征存在着高程效应的影响,再者朗错是比打加芒错蒸发作用强烈得多的咸水湖,蒸发效应的作用使得朗错表层湖泊水比打加芒错更富集重同位素。

朗错与打加芒错的蒸发线偏差较小,这样的蒸发线特征表明这两个湖泊具有相同的水源特征^[17]。打加芒错采样点位于降水线附近,说明其补给来源应该主要是降水^[18],而朗错湖水受蒸发作用影响富集重同位素,位于蒸发线右上方,打加芒错相对前者比较贫重同位素而位于蒸发线左下方。

通过地下水蒸发线在当地大气降水线上的截距,可以估计初始补给源的同位素组分,即有效补给地下水的大气降水的加权平均值^[17]。搭格架地热水在当地大气降水线上的截距 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -25.67‰ ,据文献^[13]可以得知研究区域附近的拉孜县大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -24.50‰ ,与估算结果较为接近。

3.3 湖水及地热水的氕过量参数特征

氕过量参数又称氕盈余,是 Dansgaard^[19] 提出的新概念,定义为: $d = \delta\text{D} - 8 \delta^{18}\text{O}$ 。d 值的大小,相当于某地区的大气降水斜率为8时的截距值,是区域水岩氧同位素交换程度的总体反映。在任一地区,其当地大气降水线一旦决定,则大气降水氕过量参数 d 也随之确定,且该区域内的 d 值不受其他因素影响,在理论上维持恒定值不变,而当大气降水进入含水层之后由于水与岩石发生同位素交换会导致 d 值发生变化^[20]。

为便于研究区域氕过量参数特征的讨论,将全球大气降水方程 $\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ ($d = 10\text{‰}$) 及当 d 值为 30‰ 、 20‰ 、 0‰ 、 -10‰ 、 -20‰ 、 -30‰ 、 -40‰ 时的特征绘出(图4),得到朗错、打加芒错湖水及搭格架地热水的 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系图,通过水样的氢氧同位素组成可以得出以下结论。

(1) 打加芒错湖水 d 值为 $-10.6\text{‰} \sim 9.4\text{‰}$,平均值为 -2.27‰ ,朗错湖水除河水汇入处的湖水表样外 d 值为 $-39.9\text{‰} \sim -33.2\text{‰}$,平均值为

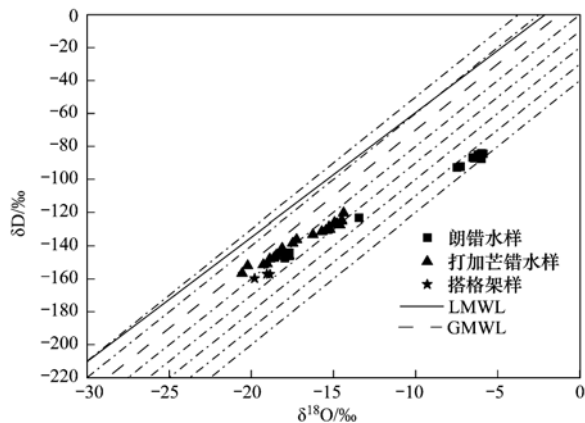


图 4 湖水及地热水的 d 值分布

Fig. 4 The d value distribution of lake water and geothermal water

-36.1‰,两者均不同程度的偏离了当地大气降水线,主要是受到湖泊蒸发作用影响。

(2)搭格架地热水 d 值为 -6.6‰ ~ -1.7‰,平均值为 -4.39‰。因为一般岩石或地层中氢的化学组成含量低,所以对地下水的 δD 值难以通过水岩同位素交换产生变化,而 $\delta^{18}O$ 值则会随着水岩交换作用的进行而逐渐升高,一般在低温 ($<60^{\circ}C$) 地下水与围岩接触时,水岩之间的氢氧同位素交换反

应速度非常缓慢,难以达到交换平衡,而当温度高 ($>80^{\circ}C$) 时,水吸收的能量可以破坏水分子内部氢氧原子键,同位素交换反应加快,通过同位素交换作用,使 $\delta^{18}O$ 值升高,这种现象称之为氧漂移。图 4 中搭格架地热水表现出的氧漂移也主要是同位素交换作用导致的。一般情况下地热水热储温度越高,氧漂移现象越明显,基于区域地质背景选取相应公式^[21,22]计算搭格架热储温度:

$$T_{Na/K} = \frac{855.6}{\lg(Na/K) + 0.8573} - 273.15(^{\circ}C)$$

$$T_{SiO_2} = \frac{1309}{5.19 - \lg(SiO_2)} - 273.15(^{\circ}C)$$

根据搭格架温泉水水化学组成,采用上述公式计算搭格架热储温度见表 2。其中 Na/K 地热温标热储平衡温度范围为 $196.4 \sim 241.5^{\circ}C$,平均温度 $210.5^{\circ}C$, SiO_2 地热温标热储平衡温度范围为 $142.9 \sim 196.6^{\circ}C$,平均温度 $181.1^{\circ}C$ 。 T_{SiO_2} 低于 $T_{Na/K}$ $30^{\circ}C$ 左右,这是因为 $T_{Na/K}$ 计算出的温度代表的是热储深部水岩反映的平衡温度,而 T_{SiO_2} 代表的是含水层中的热水温度^[23]。两者均反应了搭格架地热温泉较高的热储温度,有利于促进水岩同位素交换作用的进行。

表 2 搭格架地热温标计算温度

Table 2 Calculated results of geothermometers in Dagejia

编号	$T/^{\circ}C$	$SiO_2/mg \cdot L^{-1}$	$K^{+}/mg \cdot L^{-1}$	$Na^{+}/mg \cdot L^{-1}$	$T_{SiO_2}/^{\circ}C$	$T_{Na/K}/^{\circ}C$
DGJ1	77.6	149.45	43.70	322.05	160.9	222.9
DGJ2	76.5	134.15	46.58	297.45	154.3	241.5
DGJ3	73.8	110.65	42.00	331.70	142.9	214.4
DGJ4	79.3	234.64	38.06	312.49	191.1	209.8
DGJ5	67.0	225.67	36.25	309.43	188.3	205.2
DGJ6	81.1	216.10	39.43	313.08	185.3	213.8
DGJ7	81.0	237.76	40.25	328.62	192.0	210.5
DGJ8	74.1	245.77	39.45	325.51	194.4	209.2
DGJ9	79.4	186.13	38.95	316.99	175.1	210.8
DGJ10	77.9	253.41	39.16	322.83	196.7	209.3
DGJ11	80.0	251.11	40.88	336.23	196.0	209.6
DGJ12	82.1	226.04	38.38	312.59	188.4	210.7
DGJ13	63.9	190.21	37.75	304.82	176.5	211.8
DGJ14	80.8	169.36	35.08	294.75	168.9	207.0
DGJ15	66.3	192.14	33.86	312.27	177.2	196.4
DGJ16	70.9	187.24	31.66	271.65	175.5	204.6
DGJ17	77.7	220.85	37.79	330.98	186.8	202.3
DGJ18	76.9	212.25	36.10	309.70	184.0	204.6
DGJ19	83.1	231.41	35.57	304.82	190.1	204.8
DGJ20	81.4	160.61	29.03	260.88	165.5	199.3
DGJ21	79.1	207.59	38.4	316.88	182.5	209.2
DGJ22	80.2	217.73	43.63	346.03	185.8	213.9
DGJ23	78.8	234.12	42.93	338.05	190.9	214.8
DGJ24	86.5	241.63	42.11	337.89	193.2	212.5
DGJ25	79.2	215.25	41.64	333.17	185.0	212.9

3.4 搭格架地热水补给来源分析及高程估计

搭格架地热水的 δD 为 -159.9‰ ~

-157.2‰, $\delta^{18}O$ 为 -19.8‰ ~ -18.8‰,均低于打加芒错湖水平均值,若搭格架地热区热水的主要补

给来源是打加芒错湖水, 则其 δD 及 $\delta^{18}O$ 值只可能因为蒸发及同位素交换作用而比补给水源富集重同位素, 而非偏轻^[24], 可见其补给来源与打加芒错湖水并无密切关系. 而岩浆水的 δD 值为 $-80‰ \sim -50‰$, $\delta^{18}O$ 值为 $+7.0‰ \sim +9.5‰$ ^[16], 同上也不可能作为主要补给源. 综上根据搭格架地热水的氢氧同位素组成特征可以推断搭格架间歇地热喷泉的地热水是大气降水形成的冰川融水从地表沿断裂入渗到地层之后, 与地热交换升温并与围岩发生溶滤作用, 经过一系列的深部循环, 最后出露地表形成的.

地热水的补给区往往来自于距地热水位置较远的区域, 因为降水中的氢氧同位素组成会表现出高程效应: 随着海拔上升, 水汽分馏加剧, 大气降水会逐渐贫重同位素, δD 值和 $\delta^{18}O$ 值均会降低^[25], 由此地下水补给区高层可由下列式子^[26]估算:

$$H = \frac{\delta_G - \delta_P}{K} + h$$

式中, H 为地下水补给区高层(m); h 为取样点高层(m); δ_G 为地下水的 $\delta^{18}O$ 值或 δD 值; δ_P 为取样点附近大气降水的 $\delta^{18}O$ 值或 δD 值; K 为大气降水 $\delta^{18}O$ 值或 δD 值的高度梯度($‰/100\text{ m}$)

2005 年, 刘忠方等^[27]在雅鲁藏布江流域收集降水水样 259 个, 通过降水氢氧同位素组成, 给出了雅鲁藏布江流域 $\delta^{18}O$ 随海拔高度(H) 垂直递减

率为 $0.034‰/100\text{ m}$. 按式计算得搭格架地热水的补给区高程约为 $5\,213 \sim 5\,239\text{ m}$, 平均高程为 $5\,228\text{ m}$. 根据研究区域地貌特征表明搭格架地热水的补给区很可能是间歇泉区两侧海拔高于湖面的山谷冰川.

3.5 稳定同位素循环概念模式

研究区域为青藏高原高海拔地区, 湖泊水体分为咸水湖与淡水湖, 湖泊水与地热水的同位素循环过程存在差异. 在水汽运移过程中, 由于高程效应的影响, 随着海拔的上升, 降水的氢氧同位素组成会逐渐贫重同位素, δD 及 $\delta^{18}O$ 的富集程度由轻到重为: 冰川融雪 < 打加芒错流域降水 < 朗错流域降水. 由于湖泊均存在不同程度的蒸发作用, 含轻同位素的水分子优先脱离液相形成蒸汽相上升, 而含重同位素的水分子残留下来, 导致湖泊水比当地降水富重同位素, 而咸水湖朗错蒸发作用强烈, 加之海拔低于打加芒错, 具有较高的气温, 同位素动力分馏作用强烈, 使得湖水氢氧同位素组成偏正.

冰川融水沿着断裂下渗形成地下水, 并通过地下管道到达搭格架地热区, 在高温环境下, 地下水与围岩水岩同位素交换反应速度加快, 地下水开始富集 $\delta^{18}O$, 最终出露地表形成的地热水稳定同位素组成富集重同位素. 通过上述分析讨论建立湖泊及地热水稳定同位素循环概念模型(图 5).

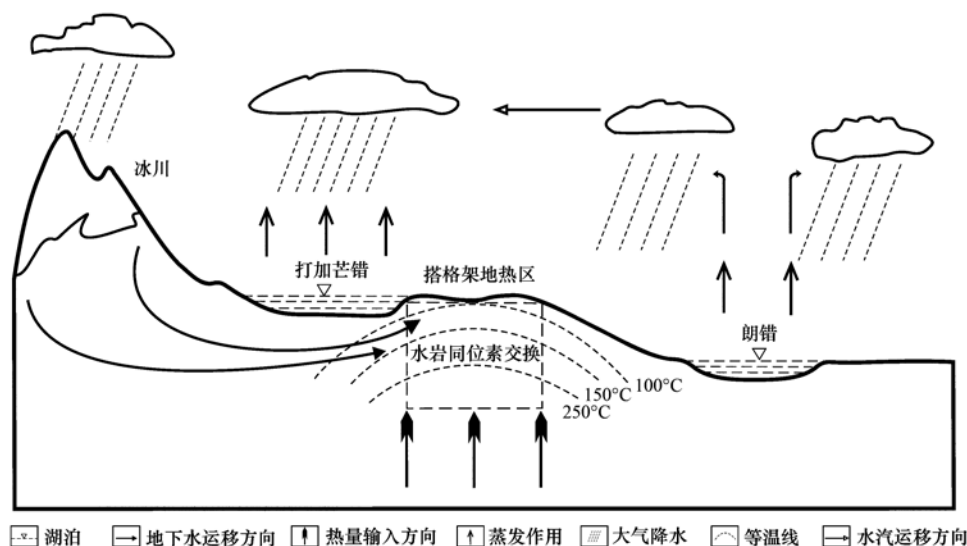


图 5 氢氧同位素循环概念模式

Fig. 5 Conception model of Hydrogen and Oxygen isotope cycling

4 结论

(1) 同一湖泊不同位置水样氢氧同位素组成变化不大, 主要是因为研究选取的湖泊形状规则, 通过

多年水文循环湖水混合充分. 受到来自高原湿地河水汇入而产生的稀释作用影响, 在河流入湖口处氢氧同位素值比湖水总体水平偏轻. 打加芒错湖水表现出从湖岸到湖心同位素值逐渐增大, 表明湖水的

同位素组成受到温度效应及稀释作用的影响。

(2)对研究区水体氢氧同位素组成进行回归拟合,得到蒸发趋势线方程,通过分析水体 δD - $\delta^{18}O$ 的关系,发现研究区域湖水表现出明显的大陆效应,氢氧同位素组成由重到轻为:朗错湖水 > 打加芒错湖水 > 搭格架地热水。

(3)湖泊及地热水样氘过量 d 值均小于全球 $d = 10\text{‰}$ 的平均水平,表现出青藏高原高海拔地区由于存在高程效应及大陆效应而造成的轻同位素富集的现象,朗错湖水 d 值极为偏负,表现出蒸发强烈的咸水湖水体特征。搭格架地热水存在氧漂移现象,主要是较高的热储温度环境下,水岩同位素交换作用导致。通过分析氢氧同位素特征,推断搭格架地区热水的主要补给来源并非打加芒错湖水或岩浆水,而是来自大气降水及冰川融水下渗。

参考文献:

- [1] 刘焱光,付云霞,吴世迎. 即墨温泉地热水的氢氧同位素特征及其地质意义[J]. 海岸工程, 2009, **28**(2): 52-60.
- [2] 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.
- [3] Mizutani Y. Isotopic composition and underground temperature of the Otake geothermal water, Kyushu, Japan[J]. Geochemical Journal, 1972, **6**(2): 67-73.
- [4] Portugal E, Birkle P, Barragón R R M, et al. Hydrochemical-isotopic and hydrogeological conceptual model of the Las Tres Virgenes geothermal field, Baja California Sur, México[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2000, **101**(3): 223-244.
- [5] 田立德,姚檀栋,沈永平,等. 青藏高原那曲河流域降水及河流水体中氧稳定同位素研究[J]. 水科学进展, 2002, **13**(2): 206-210.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏河流与湖泊[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 134-144.
- [9] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 468.
- [10] 湖北省地质调查院. 西藏自治区拉孜县区域地质调查报告(1: 250000)[R]. 2003. 49-69.
- [11] 王鹏,尚英男,沈立成,等. 青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 874-881.
- [12] 沈立成,伍坤宇,肖琼,等. 西藏地热异常区 CO_2 脱气研究: 以朗久和搭格架地热区为例[J]. 科学通报, 2011, **56**(26): 2198-2208.
- [13] 王军,刘天仇,尹观. 西藏雅鲁藏布江中下游地区大气降水同位素分布特征[J]. 地质地球化学, 2000, **28**(1): 63-67.
- [14] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [15] 丁梯平,高建飞,石国钰,等. 长江水氢氧同位素组成的时空变化及其环境意义[J]. 地质学报, 2013, **87**(5): 661-676.
- [16] 王恒纯. 同位素水文地质概论[M]. 北京: 地质出版社, 1991. 37-57.
- [17] 张华安,王乃昂,李卓仑,等. 巴丹吉林沙漠东南部湖泊和地下水的氢氧同位素特征[J]. 中国沙漠, 2011, **31**(6): 1623-1629.
- [18] 王文祥,王瑞久,李文鹏,等. 塔里木盆地河水氢氧同位素与水化学特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2013, **40**(4): 29-35.
- [19] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, **16**(4): 436-468.
- [20] 尹观,倪师军,张其春. 氘过量参数及其水文地质学意义——以四川九寨沟和冶勒水文地质研究为例[J]. 成都理工大学学报, 2001, **28**(3): 251-254.
- [21] Fournier R O, Rowe J J. Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells[J]. American Journal of Science, 1966, **264**(9): 685-697.
- [22] Truesdell A H. Summary of section III geochemical techniques in exploration[A]. In: Proceedings of the 2nd UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources[C]. San Francisco, 1976. 1iii-1xiii.
- [23] 伍坤宇,沈立成,王香桂,等. 西藏朗久地热田及其温泉水化学特征研究[J]. 中国岩溶, 2011, **30**(1): 1-8.
- [24] 郑淑蕙,张知非,倪葆龄,等. 西藏地热水的氢氧稳定同位素研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1982, **10**(1): 99-106.
- [25] 刘永涛. 云南省龙陵县邦腊掌温泉水文地球化学与间歇喷泉研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- [26] 张应华,作彦卿,温小虎,等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. 水科学进展, 2006, **17**(5): 738-747.
- [27] 刘忠方,田立德,姚檀栋,等. 雅鲁藏布江流域降水中 ^{18}O 的时空变化[J]. 地理学报, 2007, **62**(5): 510-517.

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM ₁₀) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO ₂ Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O ₃ /H ₂ O ₂ Under Acidic Conditions	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zeolite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPC Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N ₂ O Emission	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yang (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N ₂ O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH ₄ and N ₂ O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI)	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B ₁₂ on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp.	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment	CUI Yan-rui, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH ₄ Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2014年8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 15, 2014

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行