

百方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.6  
第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征 ..... 张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)

北京城郊 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价 ..... 徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘水桥, 赵清 (2501)

上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响 ..... 高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)

天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析 ..... 徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)

典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征 ..... 赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)

垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征 ..... 余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)

天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析 ..... 马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)

霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测 ..... 杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)

宁东能源化工基地大气 PM<sub>2.5</sub> 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险 ..... 刘攀亮, 剧媛丽, 毛满萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)

2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 污染的健康效益评估 ..... 韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)

1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型 ..... 刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)

北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析 ..... 王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)

江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征 ..... 徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)

亚热带稻区大气 NO<sub>2</sub>、HNO<sub>3</sub> 及硝态氮污染特征及干湿沉降 ..... 欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)

长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源 ..... 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)

基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建 ..... 梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)

青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征 ..... 罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)

鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征 ..... 刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)

三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析 ..... 江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)

水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响 ..... 范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪啟容 (2657)

水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示 ..... 张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)

崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价 ..... 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)

云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析 ..... 张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)

鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征 ..... 陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)

合流制面源污染传输过程与污染源解析 ..... 房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)

强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果 ..... 段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)

水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响 ..... 邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)

巢湖十五里河沉积物磷吸附潜力及对外源碳的响应 ..... 李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈志 (2730)

金盆水库沉积物磷的来源及分布特征 ..... 毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)

水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征 ..... 王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)

不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系 ..... 王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)

表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律 ..... 朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)

针铁矿改性生物炭对砷吸附性能 ..... 朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)

改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制 ..... 史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)

厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性 ..... 闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)

污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除 ..... 王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)

碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响 ..... 王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)

活性污泥物理结构对呼吸过程的影响 ..... 郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)

好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性 ..... 廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)

快速城市化区河流温室气体排放的时空特征及驱动因素 ..... 刘婷婷, 王晓锋, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)

生物炭对潜流人工湿地污染物去除及NO<sub>x</sub>排放影响 ..... 邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田N<sub>2</sub>O排放的影响及其微生物机制 ..... 吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)

不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响 ..... 胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)

典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价 ..... 何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)

西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征 ..... 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)

基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析 ..... 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)

喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价 ..... 汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)

黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征 ..... 瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓁 (2904)

秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响 ..... 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)

生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响 ..... 阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)

稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氮氧化过程 ..... 刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)

纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氮氧化速率的影响 ..... 伍玲丽, 张旭, 舒昆慧, 张丽, 司友斌 (2939)

农田沟道土壤中锰氨氧化(Mn-ANAMMOX)过程的探究 ..... 陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮琛, 陈志浩 (2948)

污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响 ..... 吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)

《环境科学》征订启事(2929) 《环境科学》征稿简则(2947) 信息(2646, 2656, 2857)

## 长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源

汪少勇<sup>1,2,3</sup>, 王巧丽<sup>4</sup>, 吴锦奎<sup>1,2</sup>, 何晓波<sup>1,2\*</sup>, 丁永建<sup>2,3</sup>, 王利辉<sup>1,2,3</sup>, 胡召富<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 长江水利委员会水文局, 武汉 430010)

**摘要:** 基于长江源区冬克玛底流域 2014 年 5 ~ 10 月连续采集的 73 个降水同位素数据, 结合相关气象资料, 分析了降水中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  及氘盈余 ( $d$ -excess) 变化特征, 讨论了  $\delta^{18}O$  与气温、降水量的关系, 利用 HYSPLIT 模型追踪流域降水的水汽来源并估算不同水汽来源对降水量的贡献比例。结果表明: 研究区降水中  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  变化范围分别为  $-26.5\text{‰}$  ~  $1.9\text{‰}$  和  $-195.2\text{‰}$  ~  $34.0\text{‰}$ , 且  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  值随时间变化波动较大, 与不同来源水汽输送有直接的关系; 区域降水线的斜率和截距均大于全球大气降水线, 与青藏高原北侧地区的降水线相近; 不同降水类型中的  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  的关系差异显著, 主要与水汽来源和形成降水时的气象条件有关; 由于受局地蒸发水汽及水汽输送过程影响, 流域大气降水  $d$ -excess 值整体上相对偏大; 研究区的降水同位素存在显著的降水量效应, 但不存在温度效应, 表明降水量对大气降水中稳定同位素含量的控制作用更强; 水汽来源轨迹表明, 研究区大气降水水汽来源主要有西南季风携带的海洋性水汽、局地蒸发水汽及西风输送水汽, 对降水量的贡献比例分别为 43%、36% 和 21%。该研究结果有助于进一步了解长江源区冬克玛底流域的大气环流特征及水循环过程。

**关键词:** 青藏高原; 长江源区; 大气降水; 稳定同位素; 水汽来源

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2615-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811140

## Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River

WANG Shao-yong<sup>1,2,3</sup>, WANG Qiao-li<sup>4</sup>, WU Jin-kui<sup>1,2</sup>, HE Xiao-bo<sup>1,2\*</sup>, DING Yong-jian<sup>2,3</sup>, WANG Li-hui<sup>1,2,3</sup>, HU Zhao-fu<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Hydrological Bureau of Yangtze River Water Resources Commission, Wuhan 430010 China)

**Abstract:** Based on the stable isotopes of 73 precipitation samples continuously collected from May to October 2014 and related meteorological statistics in the Dongkemaldi Basin, the characteristics of  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ , and  $d$ -excess of precipitation, as well as the correlations between  $\delta^{18}O$  and the rainfall amount and air temperature were analyzed. The moisture sources were tracked by the HYSPLIT model to further estimate the contribution of different water vapor sources to the rainfall amount. The results showed that the range of  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$  values varied from  $-26.5\text{‰}$  to  $1.9\text{‰}$  and  $-195.2\text{‰}$  to  $34.0\text{‰}$ , respectively; meanwhile, the  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$  values in precipitation fluctuated greatly with time in response to water vapor transport from different moisture sources of the Qinghai-Tibet Plateau. The slope and intercept of the Local Meteoric Water Line (LMWL) were both higher than those of the Global Meteoric Water Line (GMWL) and close to the LMWL in the northern area of the Qinghai-Tibet Plateau. The relationship between  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$  in different precipitation types showed significant differences, which were mainly related to the source of water vapor and meteorological conditions during the process of precipitation formation. Because of the influence of local evaporation and the transport process of water vapor, the  $d$ -excess values of atmospheric precipitation were relatively large; the  $\delta^{18}O$  in precipitation had a significant amount effect, but had no temperature effect, thus indicating that the rainfall amount was more effective in controlling the stable isotope content of atmospheric precipitation than temperature. The modeled trajectory of vapor sources showed that water vapor of precipitation was mainly derived from the marine vapor carried by the southwest monsoon, local moisture, and the westerly water vapor, and their contributions to the rainfall amount were 43%, 36%, and 21%, respectively. The results of this study can contribute to further understanding of the atmospheric circulation characteristics and water cycle process of the Dongkemaldi basin in the headwaters of the Yangtze River.

**Key words:** Qinghai-Tibet Plateau; headwaters of the Yangtze River; precipitation; stable isotopes; moisture sources

大气降水是水循环过程中的一个重要环节, 其稳定同位素含量受水汽来源地的同位素组成、温湿

收稿日期: 2018-11-19; 修订日期: 2019-01-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405704, 2017YFC0405706); 国家自然科学基金重点项目(41730751); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CKSF2017045); 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题项目(SKLCSS-ZZ-2018)

作者简介: 汪少勇(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为寒区水文, E-mail: wangshaoyong17@mails.ucas.ac.cn

\* 通信作者, E-mail: hxb@lzb.ac.cn

状况、水汽输送过程及输送路径等影响<sup>[1]</sup>。其机制是:在水循环过程中,不同质量数的水分子反应速率不同,发生相变时,会以不同的比例分配于不同的水体之中,也就是所谓的同位素分馏效应<sup>[2]</sup>。稳定同位素敏感地响应环境的变化,因而可以反映大气水汽循环特征、追踪水汽来源,反演大气循环,也能为古气候的定量重建提供理论基础<sup>[3]</sup>。目前,稳定同位素技术已被广泛应用于我国区域水循环过程和机制的研究中,如青藏高原区、西北地区、西南和东部季风区、长江流域及东北地区等<sup>[4]</sup>。

其中,青藏高原区是我国重要的生态安全屏障,利用同位素技术研究青藏高原的水文水资源对于青藏高原生态屏障区的保护与可持续发展具有重要作用。目前,我国学者已在青藏高原地区开展了大量降水氢氧稳定同位素的研究。早在1991年,姚檀栋等<sup>[5]</sup>发现不同水汽来源影响降水同位素含量;许多研究发现,在青藏高原地区由海洋性水汽形成的降水贫化重同位素,局地水汽来源于内陆湖泊、河流的蒸发,其同位素含量较高,形成的水汽往往富集重同位素<sup>[6,7]</sup>;田立德<sup>[8-10]</sup>等研究了青藏高原从南至北降水同位素的变化特征;Yao等<sup>[11,12]</sup>根据高原南北降水的不同水汽来源,将青藏高原分为3个区域:西风区、季风区和过渡区。Yu等<sup>[13]</sup>和Zhang等<sup>[14]</sup>也对青藏高原降水同位素的环境效应进行了研究<sup>[15]</sup>。余武生等<sup>[16]</sup>依据降水中的同位素的空间变化提出青藏高原北部的西昆仑山和唐古拉山是一条重要的气候分界线。虽然,目前对青藏高原降水同位素的研究已较为完善,但是对过渡区这一独特地域的降水稳定同位素组成、时间变化规律和机理的研究相对缺乏。由于长江源区海拔高、环境条件恶劣、交通不便,导致观测非常困难和对数据获取十分不易,使得与长江源头冰川区的降水稳定同位素相关的研究更是少见。所以,本研究将有效弥补青藏高原季风区与非季风区过渡区降水氢氧稳定同位素数据的不足,有助于进一步为青藏高原长江源头冰川区的大气环流和水循环过程的研究提供科学依据。

## 1 研究区概况

青藏高原腹地的唐古拉山是长江发源地,是西南季风进入我国大陆内部的第二道屏障,是一条重要的气候分界线<sup>[17]</sup>。冬克玛底河流域(91°58'~92°06'E, 33°00'~33°06'N)位于青藏高原腹地唐古拉山中段,属长江上游通天河水系布曲河流域(图1),平均海拔在5 000 m以上,是长江源区典型的高寒山区流域。流域面积为50.96 km<sup>2</sup>,在流域源头

发育着面积为16.40 km<sup>2</sup>的冬克玛底冰川,该冰川是由两条朝向不同的冰川汇流而成的复式山谷冰川。流域河谷为多年冻土区,地势平坦开阔,主要植被为高寒草甸。流域多年平均气温为-6.0℃,气温年较差为24.9℃;多年平均降水量约为443 mm,以固态降水为主,降水主要集中在每年的5~9月,占全年降水的90%以上;年平均相对湿度为65%<sup>[18]</sup>。从气候上可分为冷、暖两季,冷季长达8个月(10月至翌年5月),气候寒冷干燥;暖季仅4个月(6至9月),气候温凉湿润。

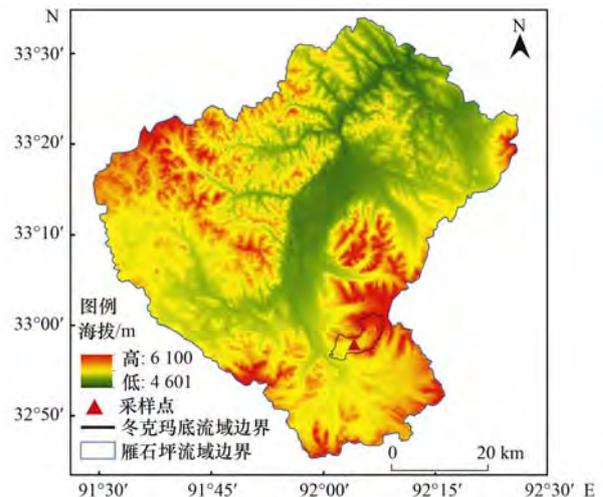


图1 研究区及采样点位置示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling site

## 2 材料与方法

本研究的降水样品采集地点为冬克玛底流域海拔为5 170 m的大本营气象观测场(图1),采集时间为2014年5~10月,共收集降水样品73个,其中液态样品23个,固态样品50个,所有的样品均按照气象观测规定的降水事件定义进行采集,即当日20:00到次日20:00的所有降水定义为一个降水事件。液态降水由标准口径集雨器收集,降水结束后迅速将样品装入高密度聚乙烯塑料瓶;雪、霰等固态降水由集雨器采集后转移至干净的塑料袋密封并放置在室内自然融化,待完全融化后再把样品收集到高密度聚乙烯塑料瓶中,其中霰是高空中水蒸气遇到冷空气凝结成的小冰粒,由白色不透明的近似球状和雪状结构的冰相粒子组成直径为2~5 mm的固态降水<sup>[19]</sup>,在青藏高原地区较为常见。为了防止降水样品被污染,所用的采样设备在采样前作洁净化清洗处理。为防止蒸发,水样采集完成后,立即用封口膜封住瓶口,而后把所有样品放置于冰箱中低温存储,同时记录降水事件发生的起止时间及降水量。在中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室进行降水同位素比率的测定。测定仪器为液态氢氧同

位素分析仪(LGR, DLT-100 LWIA, USA), 实验室测定所使用的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 标准有5组, 分别是:  $(-19.57\text{‰}, -154.10\text{‰})$ 、 $(-15.55\text{‰}, -117.00\text{‰})$ 、 $(-11.54\text{‰}, -79.00\text{‰})$ 、 $(-7.14\text{‰}, -43.60\text{‰})$ 和 $(-2.96\text{‰}, -9.80\text{‰})$ . 为了降低仪器的记忆效应带来的误差, 每个样品均测6次, 取后4次测定的平均值.  $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta\text{D}$ 平均测定误差范围分别是 $\pm 0.2\text{‰}$ 和 $\pm 0.6\text{‰}$ . 测定结果以相对于维也纳标准平均海洋水(vienna standard mean oceanic water, V-SMOW)的千分差形式表示:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{or } \delta\text{D}) = \left( \frac{R_{\text{Sample}}}{R_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中,  $R_{\text{Sample}}$ 和 $R_{\text{V-SMOW}}$ 分别代表降水和维也纳标准平均海洋水 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 、 $\text{D}/\text{H}$ 值.

南风指数(south wind index, SWI)可以用来评价水汽来源对降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 的影响<sup>[10]</sup>, 其计算公式为:

$$\text{SWI} = 3W_s \times \cos(W_d - \pi) \quad (2)$$

式中,  $W_s$ 为风速,  $W_d$ 为风向. SWI表示气团从南向北输送的强度, SWI越大, 这种输送越强烈. SWI为负值时, 反映了气团从北方输送的强度.

降水同位素中 $\delta\text{D}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的线性关系称为大气降水线, 全球大气降水线方程<sup>[20]</sup>(global meteoric water line, GMWL)为:

$$\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10 \quad (3)$$

在降水过程中, 由于氢氧稳定同位素之间分馏速率不同, 使得降水中的 $\delta\text{D}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系会出现一个差值( $d$ ), Dansgaard<sup>[3]</sup>称之为氘盈余( $d\text{-excess}$ ), 全球降水中 $d\text{-excess}$ 平均值为 $10\text{‰}$ , 其被定义为:

$$d\text{-excess} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O} \quad (4)$$

HYSPLIT (hybrid single particle lagrangian integrated trajectory)是一种计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业气象模型<sup>[21]</sup>. 本研究利用美国国家环境预测中心(national centers for environmental prediction, NCEP)和国家大气研究中心(national center for atmospheric research, NCAR)全球再分析资料, 其格式为GDAS, 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , 垂直共17层<sup>[22]</sup>, 结合HYSPLIT模型的后向轨迹法对水汽来源轨迹进行模拟: 以唐古拉站为轨迹终点, 经纬度坐标为 $92^\circ 00' \text{E}$ 、 $33^\circ 04' \text{N}$ , 初始高度2000 m(地面以上2000 m左右是水汽输送最大的高度带<sup>[23]</sup>), 运行时间120 h. 对2014年5~10月所有降水事件做逐日分析; 利用ArcGIS10.5以月为单位进行综合分析, 再结合研究区整个观测期内 $\delta^{18}\text{O}$ 及氘盈余变化, 以此来揭示长江源区冬克玛底流域降水水汽来源.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 的时间变化特征

在观测期内, 冬克玛底流域大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 的变化范围分别为 $-26.5\text{‰} \sim 1.9\text{‰}$ 和 $-195.2\text{‰} \sim 34.0\text{‰}$ (图2), 平均值分别为 $-13.0\text{‰}$ 和 $-89.1\text{‰}$ , 而全球大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 值的变化范围分别是 $-50\text{‰} \sim 10\text{‰}$ 和 $-350\text{‰} \sim 50\text{‰}$ <sup>[24]</sup>, 中国大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 的变化范围分别为 $-24\text{‰} \sim 2\text{‰}$ ,  $-210\text{‰} \sim 20\text{‰}$ <sup>[25]</sup>, 可以看出研究区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 的变化范围均落在全球变化范围之内, 与中国降水同位素变化范围十分接近.

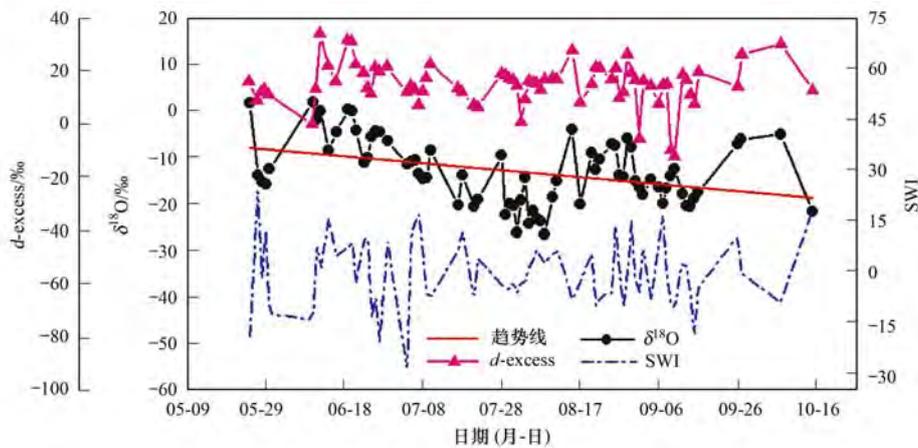


图2  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $d\text{-excess}$ 和SWI的时间变化

Fig. 2 Variations of  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $d\text{-excess}$ , and SWI in the study area

研究区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值在日尺度上的变化呈递减的趋势( $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 的变化十分一致, 这里以 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化为例进行说明), 且表现出一定的波动

(图2). 在月尺度上,  $\delta^{18}\text{O}$ 值虽然没有呈明显的递减变化, 但各月的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值差异明显(表1). 7、8和9月的 $\delta^{18}\text{O}$ 相对贫化, 分别为 $-15.4\text{‰}$ 、 $-15.5\text{‰}$

表1 研究区各月 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 及 $d$ -excess的算术平均值Table 1 Monthly arithmetic mean values of  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ , and  $d$ -excess of precipitation in the study area

项目	5月	6月	7月	8月	9月	10月
$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	-11.2	-4.2	-15.4	-15.5	-15.8	-13.4
$\delta\text{D}/\text{‰}$	-77.0	-13.9	-109.0	-107.9	-116.3	-85.6
$d$ -excess/ $\text{‰}$	12.2	19.9	14.0	16.0	10.4	21.4

和 $-15.8\text{‰}$ ,而5、6和10月的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对较高,其中6月的 $\delta^{18}\text{O}$ 值最高( $-4.2\text{‰}$ ),表现出一定的重同位素富集。

大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 波动变化与水汽来源变化有很大的关系。有研究表明,青藏高原地区由季风携带的海洋性水汽形成的降水贫化重同位素,而局地水汽形成的水汽往往富集重同位素<sup>[6,7]</sup>。为了验证季风对降水同位素的影响,利用公式(2)计算出采样期间研究区的南风指数(SWI),并对比 $\delta^{18}\text{O}$ 与SWI的变化(图2),结果显示,SWI极高值与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的极低值具有很好的对应关系,如5月27日、6月14日、7月9日、8月1日、9月7日和10月15日等。同时,许多小的SWI极高值也与 $\delta^{18}\text{O}$ 的极低值相对应。此外,SWI低值与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的高值也有一定的对应关系,尤其是在季风开始和结束前后。由此可以推断,降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 的低值可能是西南季风携带的海洋性水汽导致的,而在季风活动较弱期间,其高值受西风环流、大陆性气团水汽输送及局地水汽影响,在不同水汽来源交替的作用下,使得降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 在逐日尺度上产生大的波动以及产生月尺度上的差异性。这与Tian等<sup>[26]</sup>在青藏高原东部玉树的研究结果相似,其研究表明,玉树大气降水稳定同位素的季节变化特征与高原南部的西南季风区和北部地区有显著差异,其水汽来源受夏季西南季风水汽以及北部内陆水汽与青藏高原局地蒸发水汽的共同影响。

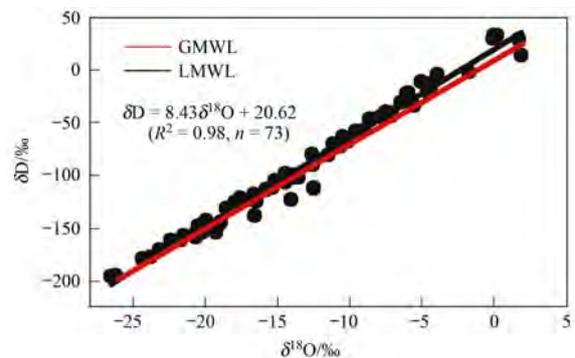
### 3.2 降水线特征

长江源区冬克玛底流域大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 之间存在着显著的线性关系(图3),回归得到区域大气降水线方程为(local meteoric water line, LMWL):

$$\delta\text{D} = 8.43 \delta^{18}\text{O} + 20.62 \quad (R^2 = 0.98, n = 73) \quad (5)$$

该区域降水线与全球大气降水线(GMWL): $\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ <sup>[20]</sup>和中国降水线<sup>[25]</sup>: $\delta\text{D} = 7.9 \delta^{18}\text{O} + 8.2$ 相比,其斜率和截距均较大。大气降水线斜率反映了 $\delta\text{D}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的不同分馏程度差异<sup>[27]</sup>,与降水形成时的温湿度及外部条件(如水汽来源等)有关。而截距则表示 $\delta\text{D}$ 相对于平衡状态的偏离程度<sup>[27]</sup>,与同位素分馏作用相关,且与温度的关系大。流域

降水线的斜率较高,一定程度上反映了研究区夏季湿润多雨,相对湿度较高,气温低,降水过程受云下二次蒸发的作用较弱的气候特点。降水线截距较大,表明在水汽到达流域的过程中经历了多次蒸发的作用,使得剩余水汽形成的降水中 $\delta\text{D}$ 相对富集而偏离平衡状态。

图3 研究区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 关系Fig. 3 Relationship between  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  of precipitation in the study area

将研究区大气降水线方程同德令哈、北麓河、沱沱河和拉萨等4个地区对比(表2)<sup>[28,29]</sup>,可以看出,在采样期内,研究区的降水线与唐古拉山北侧地区(德令哈、北麓河和沱沱河)较为接近,却与唐古拉山南侧的拉萨地区差异较大。Tian等<sup>[28]</sup>的研究发现,青藏高原大气降水线斜率和截距由南向北逐渐升高。然而,研究区大气降水线的斜率(8.43)和截距(22.78)均高于藏北的沱沱河和北麓河地区,这并不符合斜率和截距由南向北逐渐升高的规律,可能的原因:一是唐古拉山作为一条重要的气候分界线,气候条件复杂、水汽来源多元,其中来自局地蒸发水汽和北部大陆气团形成降水的降水线斜率和截距往往较高<sup>[28,30]</sup>;二是在观测期内长江源区冬克玛底流域降水量较丰富且以固体降水为主,空气湿度高,使得云下二次蒸发效应弱,因而,大气水线的斜率也会相对于以北地区偏大。研究区降水线与北部明显受西风控制的德令哈较为接近,可能原因是研究区和德令哈都受局地蒸发水汽和西风的影响,并且到达研究区的海洋性水汽在输送过程中与局地蒸发的水汽相结合,产生了混合效应,弱化了海洋性水汽对研究区降水线低斜率和截距的影响,从而使得二者降水线趋于相似。

表 2 青藏高原不同地区的大气降水线方程<sup>1)</sup>

Table 2 Local meteoric water line for different areas in the Qinghai-Tibet Plateau

地区	大气降水线方程	文献
德令哈	$\delta D = 8.47 \delta^{18}O + 15.20$ ( $R^2 = 0.98$ )	[28]
北麓河	$\delta D = 8.28 \delta^{18}O + 19.57$ ( $R^2 = 0.99$ )	[29]
沱沱河	$\delta D = 8.21 \delta^{18}O + 17.46$ ( $R^2 = 0.98$ )	[28]
拉萨	$\delta D = 7.90 \delta^{18}O + 6.29$ ( $R^2 = 0.97$ )	[28]
唐古拉	$\delta D = 8.43 \delta^{18}O + 20.62$ ( $R^2 = 0.98$ )	本研究

1) 北麓河采样期为 6~9 月, 德令哈、沱沱河和拉萨地区采样时间集中在 5~8 月<sup>[29]</sup>, 均与研究区的采样时间相近

为了探讨研究区不同降水类型对降水中稳定同位素变化的影响, 本研究根据降水类型的不同将样品分为 3 组, 分别为雪、霰和雨, 并分别计算出  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  之间的回归方程(表 3)。由表 3 可以看出, 不同降水类型的  $\delta^{18}O$  与  $\delta D$  的关系存在一定的差异, 其斜率大小为: 雪 > 雨 > 霰, 截距大小为: 雨 > 雪 > 霰, 其中雪和雨的斜率和截距较为接近, 而霰与雪和雨相比, 其截距和斜率明显偏小。这与水汽来源和降水形成的气象条件有很大关系, 通过分析发现, 观测期内的霰主要形成于 6 月, 该时段属于西风与季风的过渡时期, 降水水汽干燥, 云下二次蒸发相对强烈, 因而使得截距和斜率相对偏小。

表 3 不同降水类型中  $\delta^{18}O$  与  $\delta D$  的关系Table 3 Relationship between  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$  in different precipitation types

降水类型	样品数量	斜率	截距/%	$R^2$
雪	38	8.59	21.70	0.98
霰	12	8.12	18.12	0.97
雨	23	8.43	21.98	0.99

### 3.3 氘盈余特征

降水中的  $d$ -excess 值反映局地降水同位素偏离 GMWL 的程度, 主要受水汽源地的温度和空气相对湿度影响, 是判断水汽来源的一个重要参数<sup>[31]</sup>。根据研究区大气降水  $d$ -excess 值逐日变化情况(图 2), 发现研究区大气降水中  $d$ -excess 值偏正, 其变化范围介于  $-12.0\%$  和  $34.2\%$  之间, 平均值为  $15.1\%$ , 大于全球降水  $d$ -excess 的平均值 ( $10\%$ ), 并且在 73 个样品中有 60 个样品的  $d$ -excess 值大于全球平均值, 说明研究区的  $d$ -excess 值总体偏大。在月尺度上, 研究区  $d$ -excess 值差异明显, 且各月的均值较高(表 1), 其中 6 月 ( $19.9\%$ ) 和 10 月 ( $21.4\%$ ) 的  $d$ -excess 值远远高于全球降水的平均值 ( $10\%$ ), 9 月的  $d$ -excess 最低, 也达到了  $10.4\%$ 。局地蒸发水汽加入水汽循环往往会使降水中  $d$ -excess 值偏大<sup>[30, 32, 33]</sup>, 而季风带来的海洋水汽经在输送过程中不断分馏,  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  值会降低, 若水汽

凝结过程不剧烈且不加入局地蒸发的水汽,  $d$ -excess 值较为稳定, 且降水线斜率保持在 8 左右<sup>[34]</sup>。研究区的  $d$ -excess 值总体偏大, 一方面可以说明有局地水汽的加入, 另一方面可能是因为海洋性水汽在输送过程中与局地蒸发水汽结合形成了较为强烈的对流。

### 3.4 降水量效应和温度效应

#### 3.4.1 降水量效应

降水量在一定程度上会影响降水中的同位素含量<sup>[35]</sup>。降水中稳定同位素比率与降水量之间存在负相关关系, 即为降水量效应<sup>[36]</sup>。通过对研究区的降水量与  $\delta^{18}O$  进行相关分析[图 4(a)], 得到二者的关系为:

$$\delta^{18}O = -0.51p - 10.45$$

$$(r = -0.36, P < 0.01) \quad (6)$$

由式(6)可知, 研究区大气降水中的  $\delta^{18}O$  存在一定的降水量效应。青藏高原南部在西南季风影响下降水中  $\delta^{18}O$  表现出降水量效应<sup>[14]</sup>。但与唐古拉山南部地区相比, 研究区降水量效应相对较弱。这是由于研究区在不同时间段有多种水汽来源, 降水量差异显著, 形成的降水中  $\delta^{18}O$  含量也表现出差异性, 一定程度上削弱了长江源区的降水量效应。其次, 不同的降水类型对同位素的降水量效应也有影响, 通过分析不同降水类型样品的降水量效应(表 4), 可以发现, 霰、雪样体现了显著的降水量效应, 而雨水样却不存在降水量效应, 其主要与不同降水类型形成时的气象条件有关。因为液态降水发生时, 温度普遍相对较高, 温度效应(正效应)和降水量效应(负效应)抵消的可能性要远大于固态降水发生时的情况, 因此造成降水量效应没有固态降水发生时显著。所以, 一定程度上雨水样减弱了整体上的降水量效应。另外, 本研究的数据是基于历次降水事件所得, 降水中的  $\delta^{18}O$  和降水量更容易受到风速、空气湿度等气象因素影响, 导致  $\delta^{18}O$  离散程度较大, 也会削弱  $\delta^{18}O$  与降水量的关系。

表 4 不同降水类型的同位素降水量效应<sup>1)</sup>Table 4 Relationship between  $\delta^{18}O$  and the rainfall amount in different precipitation types

降水类型	样品数量	$P$	$r$
雪	38	<b>0.001</b>	-0.49
霰	12	<b>0.050</b>	-0.50
雨	23	0.156	-0.22

1)  $P$  为显著性, 黑体字表示通过了 0.05 的显著性检验,  $r$  为皮尔逊相关系数

#### 3.4.2 温度效应

温度效应指降水中同位素比率与温度呈正相

关. 其产生机制是相变过程中稳定同位素的分馏与温度密切相关<sup>[37]</sup>, 即温度越低, 同位素的分馏系数  $\alpha$  越大, 导致降水中重同位素越贫化. 研究区日平均气温与降水  $\delta^{18}\text{O}$  的关系为[图 4(b)]:

$$\delta^{18}\text{O} = -0.90t - 10.40$$

$$(r = -0.34, P < 0.01) \quad (7)$$

由式(7)可知, 研究区大气降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  与该地区的日均气温呈负相关关系, 即反温度效应. 通常来说, 温度效应主要存在于中高纬度地区, 而对于低纬度及部分中纬度地区, 由于受到季风气候影响, 降水的氢氧同位素的温度效应可能被抑制和掩

盖<sup>[38]</sup>. 长江源区冬克玛底流域处于中低纬的交界区, 同时是季风区与非季风区的过渡区, 在观测期内受西南季风影响较为强烈, 温度与降水量的变化较为一致, 并且流域的云下二次蒸发较弱, 其对高降水量事件稳定同位素的富集作用减弱, 因而研究区降水同位素的温度效应在一定程度上受到了抑制和掩盖. 然而, 在唐古拉山以北地区, 温度效应却比较明显, 并且随着纬度的增加,  $\delta^{18}\text{O}$  与温度之间的正相关关系越显著<sup>[14]</sup>. 但研究区的这种反温度效应与青藏高原南部的拉萨、那曲地区<sup>[15]</sup> 及大部分东部季风区的很多研究结果相似<sup>[39-41]</sup>.

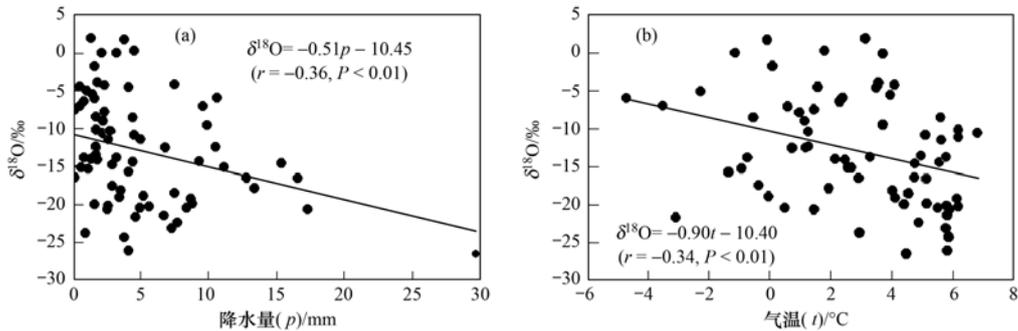


图 4 研究区大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量、气温的关系

Fig. 4 Correlations between  $\delta^{18}\text{O}$  and the rainfall amount, air temperature in the study area

### 3.5 水汽来源分析

由 HYSPLIT 模型模拟的水汽来源轨迹(图 5)可以发现, 在观测期内, 研究区的大气降水水汽来

源主要是西南季风携带的海洋性水汽、局地蒸发水汽和西风带输送水汽, 其中来自喜马拉雅山南侧的季风输送的水汽占有较大的比例. 结合观测期内降

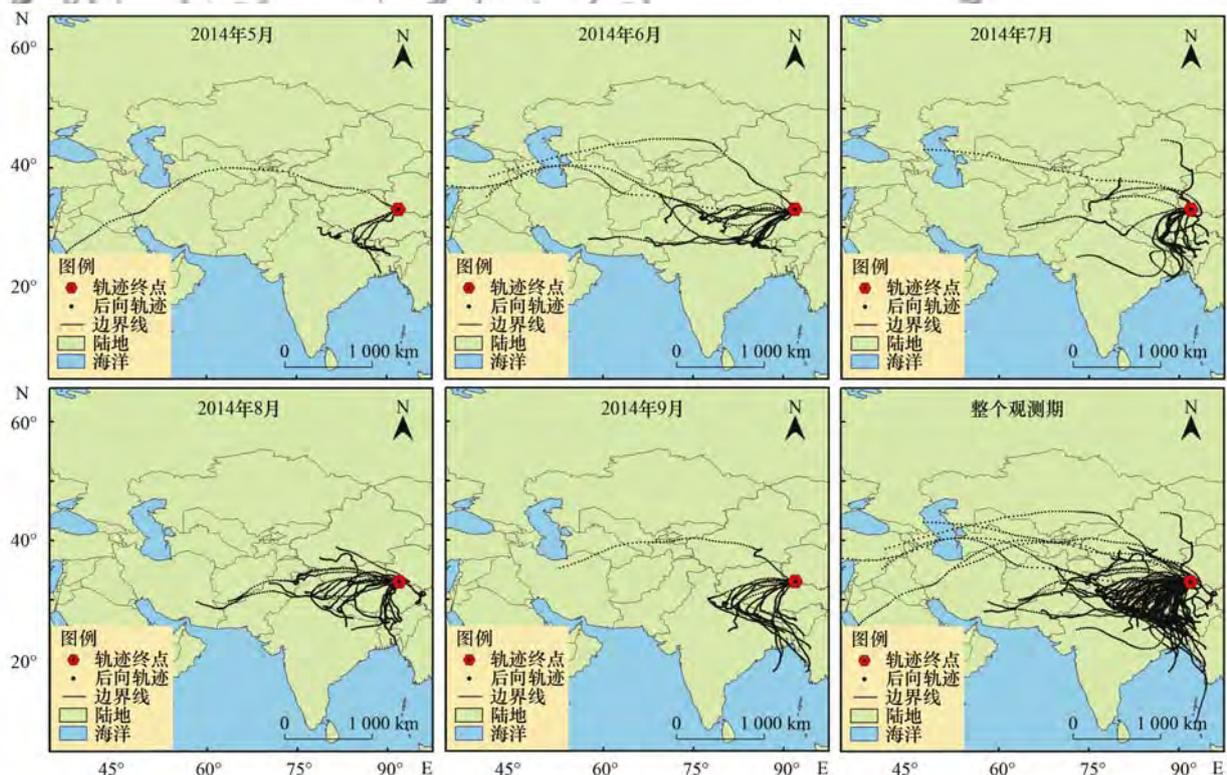


图 5 HYSPLIT 输出研究区逐次降水的水汽来源轨迹

Fig. 5 Tracking the water vapor path of each precipitation in the study area by using HYSPLIT model

水中的氢氧同位素特征, 可以具体推断: 由于 5、6 月为季风与非季风的过渡期, 降水事件逐渐增多, 其中 6 月水汽来源以局地蒸发和西风输送水汽为主, 仅一小部分是来自喜马拉雅山南侧的印度恒河流域, 导致 6 月的  $\delta^{18}\text{O}$  达到各月中月均的最高值 ( $-4.2\text{‰}$ ); 7 月降水的水汽主要来自印度次大陆和孟加拉湾的海洋性水汽, 因而该月降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $d\text{-excess}$  值有所下降; 8 月来自孟加拉湾和印度次大陆的水汽有所减少, 而来自局地蒸发水汽占大部分, 这使得在观测期内降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的逐日变化在 8 月出现一个明显的波动. 而 9 月的水汽绝大部分来自孟加拉湾及印度次大陆, 这直接导致了 9 月  $\delta^{18}\text{O}$  ( $-15.8\text{‰}$ ) 和  $d\text{-excess}$  ( $10.4\text{‰}$ ) 的平均值为各月的最低值. 由于季风减弱, 西风逐渐加强, 使得 10 月的降水次数明显减少 (仅 2 次), 分别来源于局地蒸发及海洋性水汽. 以上分析表明, HYSPLIT 模拟的水汽源地与降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $d\text{-excess}$  值的变化相一致.

根据 HYSPLIT 模拟的水汽来源轨迹估算不同水汽来源对研究区大气降水的贡献比例. 本研究规定把来自印度恒河流域及孟加拉湾的水汽为西南季风携带的海洋性水汽, 把来自北方大陆气团、青藏高原及毗邻地区的水汽划分为局地蒸发水汽, 而把来自地中海附近及青藏高原以西的远距离输送水汽

划分为西风输送水汽. 经过统计得如下结果 (表 5): 海洋气团的直接输送形成的降水量占总降水量的 43% (156.3 mm), 而局地蒸发水汽为 36% (134 mm), 21% (77.7 mm) 为西风输送水汽. 研究区处于季风区与西风区的过渡区, 而由模型所计算出的西风水汽比例低于海洋性水汽. 虽然在全年尺度上, 流域受西风影响较大, 但是在季节尺度上, 流域冷季 (10 月 ~ 次年 5 月) 由西风主导, 而暖季 (6 ~ 9 月) 由于西风北移, 且西南季风此时盛行, 一定程度上西风环流对流域暖季降水的影响有所减弱, 由此可判断在暖季 21% 的水汽来自西风环流的输送是比较符合流域暖季降水的特点. 研究区 43% 的降水源自季风输送的海洋性水汽与 Chahine<sup>[42]</sup> 提出的陆地 35% 的降水来自海上蒸发和杨梅学<sup>[43]</sup> 提出高原中部 (安多附近) 1998 年 6 ~ 9 月 32.06% 的降水来自海洋性气团的结论相比存在一定差异, 其可能原因是利用后向轨迹的方法可能会高估其对降水量的贡献. 因为在海洋性水汽输送过程中可能与局地蒸发的水汽相结合, 而在轨迹模拟中, 这一部分水汽来源成为了海洋水汽轨迹中的一部分, 从而一定程度上 HYSPLIT 模型高估了海洋水汽对研究区降水量的贡献. 由此也可以说明, 季风携带的海洋性水汽对研究区降水量的贡献最多不会超过 43%.

表 5 不同水汽来源所形成降水量及其所占的百分比

Table 5 Rainfall amounts from different water vapor sources and their percentages in the study area

水汽来源	降水事件数	降水量/mm	占总降水量质量分数/%
海洋性(季风)	34	156.3	43
局地蒸发	22	134	36
西风输送	17	77.7	21
总和	73	368	100

#### 4 结论

(1) 在观测时段内, 可以看出研究区降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  的变化范围均落在全球变化范围之内, 与中国降水同位素变化范围十分接近. 在日尺度上, 降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与  $\delta\text{D}$  值的变化呈递减的趋势, 同时表现出一定的波动, 这种波动与 SWI 具有很好的对应关系, 表明与不同来源的水汽输送有直接的关系.

(2) 研究区的大气降水线方程为 (LMWL):  $\delta\text{D} = 8.43 \delta^{18}\text{O} + 20.62$  ( $R^2 = 0.98$ ,  $n = 73$ ), 其斜率和截距均大于全球大气降水线. 该降水线与唐古拉山以北地区的大气降水线方程较为接近, 与南侧的拉萨地区的大气降水线差别较大. 不同降水类型中的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  的关系差异显著, 主要与水汽来源和形成降水时的气象条件有关.

(3) 流域大气降水  $d\text{-excess}$  值偏正, 其值介于

$-12.0\text{‰}$  和  $34.2\text{‰}$  之间, 平均值为  $15.1\text{‰}$ , 大于全球降水  $d\text{-excess}$  的平均值 ( $10\text{‰}$ ). 氘盈余值整体上偏大, 可能是因为海洋性水汽在输送过程中与局地蒸发水汽结合形成了较为强烈的对流.

(4) 研究区大气降水同位素存在显著的降水量效应:  $\delta^{18}\text{O} = -0.43p - 10.75$  ( $r = -0.36$ ,  $P < 0.01$ ), 但不存在温度效应, 表明降水量对大气降水中稳定同位素含量的控制作用更强.

(5) HYSPLIT 模拟的水汽源地与降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $d\text{-excess}$  值的变化相一致. 通过统计模拟的水汽来源轨迹, 流域水汽来源主要为西南季风携带的海洋性水汽、局地蒸发水汽及西风输送水汽, 对降水量的贡献比例分别为 43%、36% 和 21%.

#### 参考文献:

- [1] 唐雁英. 水汽源区变化及其对过程对我国典型东亚季风区降水稳定同位素的影响[D]. 南京: 南京大学, 2015. 1-50.  
Tang Y Y. Effects of changes in moisture source and the

- upstream rainout on stable isotopes in summer precipitation in the typical East Asian monsoon regions [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015. 1-50.
- [ 2 ] 宋春林, 孙向阳, 王根绪. 贡嘎山亚高山降水稳定同位素特征及水汽来源研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(11): 1860-1869.  
Song C L, Sun X Y, Wang G X. A study on precipitation stable isotopes characteristics and vapor sources of the subalpine Gongga Mountain, China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, **24**(11): 1860-1869.
- [ 3 ] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, **16**(4): 436-468.
- [ 4 ] 刘君, 郭华良, 刘福亮, 等. 包头地区大气降水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  变化特征浅析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, **27**(5): 157-162.  
Liu J, Guo H L, Liu F L, *et al.* The variations of stable isotopes ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ) in the precipitation in Baotou area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, **27**(5): 157-162.
- [ 5 ] 姚檀栋, 丁良福, 蒲建辰, 等. 青藏高原唐古拉山地区降雪中  $\delta^{18}O$  特征及其与水汽来源的关系[J]. 科学通报, 1991, **36**(20): 1570-1573.
- [ 6 ] 史晓宜, 蒲焱, 何元庆, 等. 典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1685-1691.  
Shi X Y, Pu T, He Y Q, *et al.* Spatial distribution of stable isotope from the lakes in typical temperate glacier region [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1685-1691.
- [ 7 ] 章新平, 姚檀栋. 青藏高原东北地区现代降水中  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  的关系研究[J]. 冰川冻土, 1996, **18**(4): 360-365.  
Zhang X P, Yao T D. Relations between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in precipitation at present in the northeast Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, **18**(4): 360-365.
- [ 8 ] Tian L D, Yao T D, MacClune K, *et al.* Stable isotopic variations in west China: A consideration of moisture sources [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, **112**(D10): D10112.
- [ 9 ] 田立德, 姚檀栋, Numaguti A, 等. 青藏高原南部季风降水中稳定同位素波动与水汽输送过程[J]. 中国科学(D辑), 2001, **31**(S1): 215-220.
- [ 10 ] 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 青藏高原中部降水稳定同位素变化与季风活动[J]. 地球化学, 2001, **30**(3): 217-222.  
Tian L D, Yao T D, Sun W Z, *et al.* Stable isotope variation of precipitation in the middle of Qinghai-Xizang Plateau and monsoon activity[J]. Geochimica, 2001, **30**(3): 217-222.
- [ 11 ] Yao T D, Zhou H, Yang X X. Indian monsoon influences altitude effect of  $\delta^{18}O$  in precipitation/river water on the Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, **54**(16): 2724-2731.
- [ 12 ] Yao T D, Masson-Delmotte V, Gao J, *et al.* A review of climatic controls on  $\delta^{18}O$  in precipitation over the Tibetan Plateau: observations and simulations[J]. Reviews of Geophysics, 2013, **51**(4): 525-548.
- [ 13 ] Yu W S, Yao T D, Tian L D, *et al.* Stable isotope variations in precipitation and moisture trajectories on the western Tibetan Plateau, China[J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2007, **39**(4): 688-693.
- [ 14 ] Zhang X P, Nakawo M, Yao T D, *et al.* Variations of stable isotopic compositions in precipitation on the Tibetan Plateau and its adjacent regions [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2002, **45**(6): 481-493.
- [ 15 ] Yu W S, Yao T D, Tian L D, *et al.* Relationships between  $\delta^{18}O$  in precipitation and air temperature and moisture origin on a south-north transect of the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Research, 2008, **87**(2): 158-169.
- [ 16 ] 余武生, 马耀明, 孙维贞, 等. 青藏高原西部降水中  $\delta^{18}O$  变化特征及其气候意义[J]. 科学通报, 2009, **54**(15): 2131-2139.  
Yu W S, Ma Y M, Sun W Z, *et al.* Climatic significance of  $\delta^{18}O$  records from precipitation on the western Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, **54**(16): 2732-2741.
- [ 17 ] 姚檀栋, 张寅生, 蒲健辰, 等. 青藏高原唐古拉山口冰川、水文和气候学观测 20a: 意义与贡献[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(6): 1152-1161.  
Yao T D, Zhang Y S, Pu J C, *et al.* Twenty-year observations of glacier, hydrology and meteorology at the Tanggula Pass of the Tibetan Plateau: significance and achievements[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(6): 1152-1161.
- [ 18 ] 张寅生, 姚檀栋, 蒲健辰, 等. 青藏高原唐古拉山冬克玛底河流域水文过程特征分析[J]. 冰川冻土, 1997, **19**(3): 214-222.  
Zhang Y S, Yao T D, Pu J C, *et al.* The features of hydrological processes in the Dongkemadi River Basin, Tanggula Pass, Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, **19**(3): 214-222.
- [ 19 ] 王倩茹, 范广洲, 赖欣, 等. 西藏那曲地区一次霰过程的大气边界层特征分析[J]. 气象, 2018, **44**(3): 396-407.  
Wang Q R, Fan G Z, Lai X, *et al.* Analysis of atmospheric boundary layer characteristics of a graupel process in Nagqu region[J]. Meteorological Monthly, 2018, **44**(3): 396-407.
- [ 20 ] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [ 21 ] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT\_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition [J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, **47**(4): 295-308.
- [ 22 ] Wang Y Q, Stein A F, Draxler R R, *et al.* Global sand and dust storms in 2008: observation and HYSPLIT model verification [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(35): 6368-6381.
- [ 23 ] 张学文. 气流对物质和能量输送量的垂直分布[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, **3**(2): 1-5.  
Zhang X W. Vertical distribution of the transported quantity of material and energy by airflow [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2009, **3**(2): 1-5.
- [ 24 ] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture [J]. Hydrological Processes, 2000, **14**(8): 1341-1355.
- [ 25 ] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, **28**(13): 801-806.
- [ 26 ] Tian L D, Ma L L, Yu W S, *et al.* Seasonal variations of stable isotope in precipitation and moisture transport at Yushu, eastern Tibetan Plateau[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, **51**(8): 1121-1128.
- [ 27 ] 章新平, 孙维贞, 刘晶森. 西南水汽通道上昆明站降水中的稳定同位素[J]. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(5): 665-669.  
Zhang X P, Sun W Z, Liu J M. Stable isotopes in precipitation in the vapor transport path in Kunming of southwest China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, **14**(5): 665-669.
- [ 28 ] Tian L D, Yao T D, Sun W Z, *et al.* Relationship between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in precipitation on north and south of the Tibetan

- Plateau and moisture recycling[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2001, **44**(9): 789-796.
- [29] 杨玉忠, 吴青柏, 俞汉伯. 北麓河多年冻土区降水及河水稳定同位素特征分析[J]. 水科学进展, 2013, **24**(6): 778-785.
- Yang Y Z, Wu Q B, Yun H B. Characteristic analysis of stable isotope variation in precipitation and rivers in Beilu River permafrost region[J]. Advances in Water Science, 2013, **24**(6): 778-785.
- [30] 李永格, 李宗省, 冯起, 等. 托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2661-2672.
- Li Y G, Li Z X, Feng Q, *et al.* Environmental significance of the stable isotopes in precipitation at different altitudes in the Tuolai River Basin[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2661-2672.
- [31] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 黄河流域大气降水氢、氧稳定同位素时空特征及其环境意义[J]. 地质学报, 2013, **87**(2): 269-277.
- Li X F, Zhang M J, Wang S J, *et al.* Spatial and temporal variations of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the Yellow River Basin and its environmental significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, **87**(2): 269-277.
- [32] Hughes C E, Crawford J. Spatial and temporal variation in precipitation isotopes in the Sydney Basin, Australia[J]. Journal of Hydrology, 2013, **489**: 42-55.
- [33] 马潜, 张明军, 王圣杰, 等. 基于氢氧同位素的东南中国降水局地蒸发水汽贡献率[J]. 地理科学进展, 2013, **32**(11): 1712-1720.
- Ma Q, Zhang M J, Wang S J, *et al.* Contributions of moisture from local evaporation to precipitations in southeast China based on hydrogen and oxygen isotopes[J]. Progress in Geography, 2013, **32**(11): 1712-1720.
- [34] 徐振, 刘玉虹, 王中生, 等. 卧龙降水稳定同位素与季风活动的关系[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1007-1013.
- Xu Z, Liu Y H, Wang Z S, *et al.* Relationships between stable isotopes in precipitation in Wolong and monsoon activity[J]. Environmental Science, 2008, **29**(4): 1007-1013.
- [35] 吴锦奎, 杨淇越, 丁永建, 等. 黑河流域大气降水稳定同位素变化及模拟[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 1857-1866.
- Wu J K, Yang Q Y, Ding Y J, *et al.* Variations and simulation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River basin[J]. Environmental Science, 2011, **32**(7): 1857-1866.
- [36] Johnson K R, Ingram B L. Spatial and temporal variability in the stable isotope systematics of modern precipitation in China: implications for paleoclimate reconstructions[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, **220**(3-4): 365-377.
- [37] Zhang X P, Yao T D, Liu J M, *et al.* Simulations of stable isotopic fractionation in mixed cloud in middle latitudes-taking the precipitation at ürümqi as an example[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, **20**(2): 261-268.
- [38] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. 地球化学, 1994, **23**(1): 32-41.
- Wei K Q, Lin R F. The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China[J]. Geochimica, 1994, **23**(1): 32-41.
- [39] 董小芳, 邓黄月, 张峦, 等. 上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1817-1827.
- Dong X F, Deng H Y, Zhang L, *et al.* Characteristics of stable isotope in precipitation and its relationship with ENSO in Shanghai[J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1817-1827.
- [40] 李广, 章新平, 张立峰, 等. 长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2094-2101.
- Li G, Zhang X P, Zhang L F, *et al.* Stable isotope characteristics in different water bodies in Changsha and implications for the water cycle[J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 2094-2101.
- [41] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国东部季风区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J]. 科学通报, 2009, **54**(22): 3521-3531.
- Liu J R, Song X F, Yuan G F, *et al.* Characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation over eastern monsoon China and the water vapor sources[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, **55**(2): 200-211.
- [42] Chahine M T. The hydrological cycle and its influence on climate[J]. Nature, 1992, **359**(6394): 373-380.
- [43] 杨梅学, 姚檀栋, 田立德, 等. 藏北高原夏季降水的水汽来源分析[J]. 地理科学, 2004, **24**(4): 426-431.
- Yang M X, Yao T D, Tian L D, *et al.* Analysis of precipitation from different water vapor sources in Tibetan Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2004, **24**(4): 426-431.

## CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing .....	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing .....	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction .....	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin .....	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes .....	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant .....	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method .....	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather .....	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China .....	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016 .....	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017 .....	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring .....	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province .....	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China .....	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River .....	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments .....	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches .....	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands .....	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir .....	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China .....	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City .....	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo .....	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province .....	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area .....	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems .....	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHOU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer .....	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir .....	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin .....	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jimpen Reservoir .....	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir .....	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures .....	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation .....	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution .....	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar .....	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater .....	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant .....	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor .....	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes .....	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm .....	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area .....	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland .....	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N <sub>2</sub> O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field .....	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland .....	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area .....	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China .....	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model .....	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region .....	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China .....	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland .....	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil .....	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the <sup>15</sup> N-DNA-SIP Method .....	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonification .....	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches .....	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting .....	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)