

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



2020

Vol.41 No.1
第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM _{2.5} 污染演变的时空过程	时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)
2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析	郑庆峰, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)
夏季大气PM _{2.5} 中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例	刘威杰, 石明明, 程敏, 黎莹, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)
呼包鄂地区冬季、夏季PM _{2.5} 污染特征	李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)
2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM _{2.5} 污染特征及来源解析	周静博, 段青春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)
基于模型模拟的成都市PM _{2.5} 污染来源解析	许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)
北京市PM _{2.5} 中砷污染特征	石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段青春, 谭吉华, 陈荣志 (57)
夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析	易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)
安阳市大气PM _{2.5} 中水溶性离子季节特征及来源解析	孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)
新乡市夏冬季节PM _{2.5} 稳定碳同位素特征分析	闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)
基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估	梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)
超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征	王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)
京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨	余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)
安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析	杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)
长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响	王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)
华东典型城市非道路移动机械排气烟度	鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昀, 黄成 (133)
国内外储油库VOCs排放现状与标准分析	胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)
四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响	庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)
乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比	徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张显, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)
长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素	汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)
巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征	沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)
城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例	田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)
典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估	陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)
长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估	李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)
白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析	汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)
松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评价	王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟丰, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)
鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系	李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)
臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响	刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒峰, 潘杨 (253)
兰州市西固区儿童饮水重金属暴露与健康风险精细化评估	陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)
镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制	吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)
一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制	廖丹雪, 单慧媚, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)
酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能	谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)
脱氮菌剂在低溶解性黑臭水体中氮代谢特征	赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)
宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及抗性基因	陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)
淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析	赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)
基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控	陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)
基于间歇饥饿的SNAD工艺运行	李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)
反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液	陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)
硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现	刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)
高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响	张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)
中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评价	向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖偲, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)
某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征	孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)
北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征	张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征	杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)
亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征	宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)
宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化	陈志浩, 覃云斌, 丁帮琛, 胡优优, 陈湜, 李正魁 (412)
秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响	王晶, 马丽娟, 刘泽华, 陆伟, 侯振安 (420)
基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析	黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)
塔里木盆地东南缘绿洲区土壤砷空间分布及农作物砷富集特征	陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)
广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征	马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)
不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响	张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)
不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响	栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪艺凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)
黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应	周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)
炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响	蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)
《环境科学》征订启事(89)	
《环境科学》征稿简则(97)	
信息(303, 329, 344)	

乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比

徐秀婷¹, 贾文雄^{1*}, 朱国锋^{1,2}, 马兴刚¹, 张昱¹, 袁瑞丰¹, 张志远¹, 石阳¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态资源环境研究院冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 为了揭示季风边缘区降水中稳定同位素特征及水汽来源, 利用2016年10月至2017年10月采集的97个降水样品, 采用相关分析和HYSPLIT模型, 对乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素的特征、大气水线方程、温度和降水量效应、水汽来源进行了对比分析。结果表明, 南坡大气降水线的斜率与截距低于全球大气水线(GMWL)和北坡大气降水线; 南、北坡的同位素温度效应和季节效应明显, 但北坡的温度效应比南坡更为明显; 除北坡夏季和南坡降水量小于5 mm时降水稳定同位素表现出微弱的降水量效应, 南、北坡其它季节或其它降水量级均无明显的降水量效应; 来自西北和北方的水汽占90%以上, 北坡受季风水汽影响极少, 南坡夏季会受到东南季风影响, 局地水汽再循环对乌鞘岭南、北坡水汽也有贡献。本研究可提高对高寒山区降水同位素演化的认知, 为寒旱区同位素水文学的进一步研究奠定基础。

关键词: 乌鞘岭; 南北坡; 降水; 氢氧同位素; 水汽来源

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0155-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201904201

Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain

XU Xiu-ting¹, JIA Wen-xiong^{1*}, ZHU Guo-feng^{1,2}, MA Xing-gang¹, ZHANG Yu¹, YUAN Rui-feng¹, ZHANG Zhi-yuan¹, SHI Yang¹

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: We analyze the stable isotope characteristics and vapor source of precipitation in a monsoon marginal area in the southern and northern slopes of Wushaoling Mountain, northwestern China, using 97 precipitation samples collected from October 2016 to October 2017. Correlation analysis and HYSPLIT model are used to study the characteristics of stable isotopes in precipitation, local meteoric water line equation, temperature and precipitation effects, and vapor source. The study found the following results. ① The slope and intercept of the southern slope local meteoric water line were lower than of those of the northern slope and global averages. ② Although the isotope temperature effects and seasonal effects of both slopes were obvious, the temperature effect of the northern slope was more obvious than of that of the southern slope. ③ The stable isotopes of precipitation during the summer on the northern slope and the precipitation on the southern slope < 5 mm revealed that the precipitation effect was weak. There was no obvious precipitation effect in other seasons or in other precipitation levels on both slopes. ④ Vapor from the northwest and north accounted for >90% of the total. The northern slope was rarely affected by monsoon vapor, but the southern slope was affected by the southeast monsoon during the summer. Local water vapor recycling contributed to water vapor in the southern and northern slopes of Wushaoling Mountain. This study could improve the cognition of precipitation isotopic evolution in alpine regions, and lays a foundation for further research on isotope hydrology in cold and arid regions.

Key words: Wushaoling Mountain; northern and southern slope; precipitation; hydrogen and oxygen isotope; vapor source

稳定同位素在自然界含量很低, 却是水体的重要组成部分, 对环境变化敏感, 能完整地记载水循环信息, 已经被广泛应用于水文学、气候学、生态学等领域的研究^[1~3]。降水是水循环的主要输入因子, 伴随降水同位素的变化, 由蒸发、凝聚、降落和径流等过程形成。各种水体介质氢氧同位素在时空上发生敏感变化^[4~6]。研究降水稳定同位素组成是认识区域大气水汽来源、地表水径流组分和地下水补给及循环的前提^[7,8]。受纬度效应、海拔效应、降水量效应、温度效应、水汽来源等因素作用, 大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 组成特征能有效指示地区气候^[9~12]。有研

究表明, 我国季风区大气降水同位素的降水量效应非常明显, 并且存在着一定的季节性变化^[13~16]。西北干旱区地处于亚欧大陆腹地, 远离海洋, 夏季来自东部海洋的暖湿气团对其影响有限, 而冬季在盛行西北风影响下降水较少, 造成了西北干旱区降水线的斜率以及截距要低于全球大气降水线^[17~20]。处于中高纬度

收稿日期: 2019-04-22; 修订日期: 2019-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41661005); 中国博士后科学基金项目(2016T90961, 2015M570864); 中国科学院西部之光西部博士项目(201303); 中国博士后国际交流计划项目(20140043)

作者简介: 徐秀婷(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为气候变化与水文生态, E-mail: xxtais@163.com

* 通信作者, E-mail: wxjiaxy@163.com

的干旱区降水同位素随着温度的增高而发生富集,存在显著的温度效应^[19, 21, 22],而西北干旱区的绝大多数地区降水量效应并不明显^[17, 22],但也有研究发现无论是冬季还是夏季,在降水事件尺度上,还是存在一定的降水量效应^[23].

乌鞘岭地处我国季风边缘区,是半干旱和干旱气候的分界线,在西风环流、季风环流和青藏高原季风环流的共同影响下,降水稳定同位素特征不完全同于西部内陆干旱区,也不完全同于受季风影响大的区域.在祁连山周边地区开展了诸多降水同位素方面的研究,如黑河流域^[18, 24~26]、疏勒河流域^[27]、石羊河流域^[17, 28~30]、河西走廊^[30]和托来河流域^[31],涉及降水同位素的组成、变化特征、与环境因子的关系和水汽来源特征等方面.乌鞘岭大致呈东西走向,对季风有阻挡作用,因此山体南、北坡降水有较明显差异,关于气候分界处山体不同气候区的对比必不可少.通过降水稳定同位素的研究,对比分析乌鞘岭南、北坡降水中稳定同位素的变化特征、温度和降水量效应及其水汽来源,以期对祁连山东部同位素水文过程的进一步研究提供理论依据,也为其它气候分界区域降水同位素对比研究提供参考.

1 研究区概况

祁连山脉自西北向东南延伸 850 km,南北延伸 200~300 km,约 30% 的山脉海拔高度超过 4 000 m,最高峰海拔 5 827 m.气温随海拔高度而变化,年降

水量从南坡约 700 mm 减少到北坡约 400 mm.乌鞘岭山位于祁连山东端,河西走廊东部、武威市的南部,东西长 17 km,南北宽 10 km,海拔高度约为 2 400~3 600 m,主峰海拔 3 562 m 以上.乌鞘岭年平均气温为 0℃ 左右,极端最低气温达 -30.6℃,极端最高气温只有 28.1℃,属温带半干旱气候.乌鞘岭的植被垂直地带性明显,海拔从低到高依次为干草原、草原和灌丛草甸,土壤类型也依次为棕钙土、栗钙土和草甸土.

2 材料与方法

本文选取了乌鞘岭南坡的抓喜秀龙和北坡的下杨家庄两个采集点(图 1 和表 1),采集了 2016 年 10 月至 2017 年 10 月一个完整水文年的降水样品.利用自动气象观测仪记录了气温、降水、相对湿度等气象要素.用雨量筒收集降水,在每次降水过程结束后立即将其装入 50 mL 的聚乙烯采样瓶中,密封瓶口并冷藏保存,共收集大气降水样品 97 个.

大气降水样品测试在西北师范大学地理与环境科学学院稳定同位素实验室进行,测试仪器为 LGR-DLT-100 液态水同位素分析仪.为避免样品蒸发引起的同位素分馏,本次测试环境温度为 25℃ 左右.样品分析结果用相对于维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)的千分差表示:

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

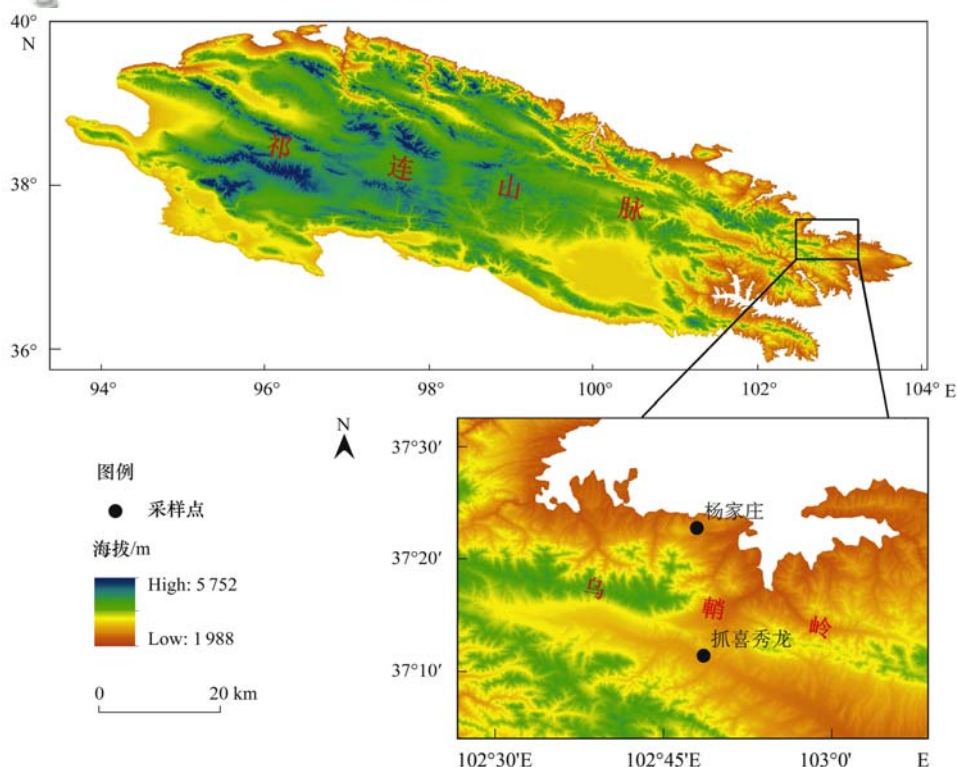


图 1 乌鞘岭位置及采样点示意

Fig. 1 Location of Wushaoling Mountain and distribution of sampling points

式中, R_s 为水样中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比率, $R_{\text{V-SMOW}}$ 为维也纳标准平均海洋水中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比率.

研究区大气降水的 δD 大部分位于 $-97.3\text{‰} \sim -9.2\text{‰}$ 区间, 因此选择 LGR3C、LGR4C 和 LGR5C 作为参比标样, 测试的 3 个标样分别为: LGR3C ($\delta^{18}\text{O} = -13.39\text{‰}$, $\delta\text{D} = -97.3\text{‰}$)、LGR4C ($\delta^{18}\text{O} = -7.94\text{‰}$, $\delta\text{D} = -51.6\text{‰}$)、LGR5C ($\delta^{18}\text{O} = -2.69\text{‰}$, $\delta\text{D} = -9.2\text{‰}$). 测量精度 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $\pm 0.2\text{‰}$, δD 为 $\pm 0.5\text{‰}$, 依据张自超等^[32]对 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值的有效位数保留方法, 同位素测试结果均保留一位小数.

同位素降水量加权平均计算公式:

$$\delta_w = \frac{\sum \delta_i \times p_i}{\sum p_i}$$

(2)

式中, δ_i 为同位素值, p_i 为相对应降水量.

Dansgaard^[33]将全球降水中氢氧同位素比率出现的差值定义为过量氘($d\text{-excess}$), 计算公式:

$$d\text{-excess} = \delta\text{D} - 8 \delta^{18}\text{O}$$

(3)

此外, 利用 SPSS 24.0 软件分析氢氧同位素之间及其与气象要素的相关关系. 为了追踪水汽来源, 运用后向气团轨迹追踪了采样点上空海拔 1 500 m 处 240 h 大气气团后向传输轨迹.

表 1 乌鞘岭南北坡采样点基本信息

Table 1 Basic information of sampling points on the northern and southern slopes of Wushaoling Mountain							
采样点	纬度	经度	高程 /m	样品数量 /个	年平均气温 /℃	年降水量 /mm	相对湿度 /%
杨家庄	37.42°N	102.80°E	2 356	41	8.32	360.9	64.8
抓喜秀龙	37.19°N	102.81°E	2 858	56	5.47	417.1	78.4

3 结果与分析

3.1 大气降水线

大气降水线可以较好地反映一个地区的自然地理和气象条件, 有助于分析历史气候变迁及水汽来源等问题^[34]. 降水线方程受水汽凝结温度、水汽来源和输送方式、降水的季节变化以及降水期间的空气状况等诸多因素的影响, 导致了地区大气降水线与全球大气降水线在斜率和截距上均有不同程度的偏移.

乌鞘岭北坡大气降水线(LMWL, 图 2) 为:

$$\delta\text{D} = 7.77 \delta^{18}\text{O} + 16.73 \quad (R^2 = 0.97, P < 0.01)$$

南坡大气降水线为:

$$\delta\text{D} = 7.91 \delta^{18}\text{O} + 13.28 \quad (R^2 = 0.98, P < 0.01)$$

乌鞘岭局地大气降水线斜率低于全球大气降水线(GMWL)的平均斜率 8, 这可能与乌鞘岭地处西北内陆干旱地区干燥的气候环境有关, 降水过程中受比较强烈的二次蒸发作用, 相对全球大气降水线较低的斜率正好反映了干旱气候背景下稳定同位素不平衡分馏效应的存在. 受海洋性水汽的影响, 我国东部季风区大部分地区大气降水线的斜率和截距都偏高, 纬度较高地区和西北内陆干旱区局地大气降水线斜率偏低(表 2). 随季风的深入程度不同, 我国不同区域局地大气降水线斜率也表现出差异, 大致是自南向北、自东向西、沿海向内陆斜率减小. 南、北坡的局地大气降水线方程 R^2 值很高, 表明乌鞘岭南、北坡大气降水的氢氧同位素之间的相关性很好. 南坡大气降水线斜率略高于北坡, 这可能是南坡受东南季风影响较大, 大气湿度相对较大造成的, 而

北坡海拔更低, 年均温高于南坡, 氢氧稳定同位素动力分馏作用强烈, 故其降水线斜率较小.

表 2 部分研究区域局地大气降水线比较

Table 2 Comparison of local meteoric water line in other studies		
研究区	局地大气降水线	文献
广东	$\delta\text{D} = 8.46 \delta^{18}\text{O} + 15$	[35]
南京	$\delta\text{D} = 8.47 \delta^{18}\text{O} + 17.52$	[36]
长沙	$\delta\text{D} = 8.5 \delta^{18}\text{O} + 18.37$	[37]
腾冲	$\delta\text{D} = 8.18 \delta^{18}\text{O} + 11.72$	[38]
海河流域	$\delta\text{D} = 7.839 \delta^{18}\text{O} + 5.11$	[39]
西安	$\delta\text{D} = 7.49 \delta^{18}\text{O} + 6.13$	[40]
河西走廊中部	$\delta\text{D} = 6.76 \delta^{18}\text{O} - 4.54$	[30]

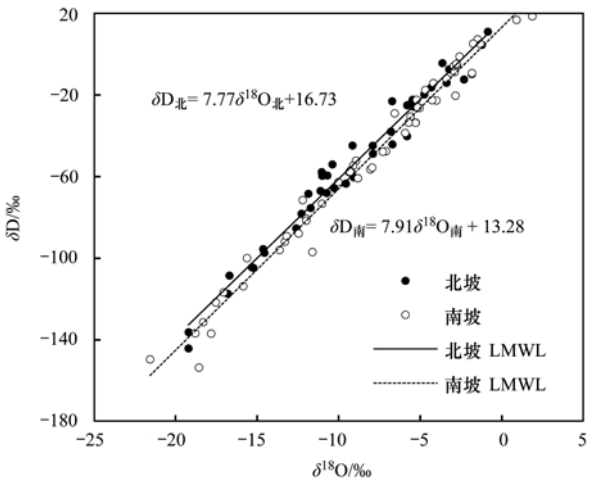


图 2 南北坡大气降水线

Fig. 2 Local meteoric water line on the northern and southern slopes

3.2 氢氧同位素特征

采样期间所有降水事件稳定同位素值随时间变化较大(图 3), $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围在 $-21.6\text{‰} \sim 0.9\text{‰}$, 平均值 -8.6‰ , 降水量加权平均值 -7.9‰ ; δD 变化

范围为 $-153.5\text{‰} \sim 18.6\text{‰}$, 平均值 -52.8‰ , 降水量加权平均值 -46.8‰ ; $d\text{-excess}$ 变化范围为 $-5.0\text{‰} \sim 30.9\text{‰}$, 平均值 16.0‰ , 降水量加权平均值 16.1‰ . $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 和 $d\text{-excess}$ 平均值在冬季分别为 -17.2‰ 、 -126.5‰ 和 10.9‰ , 降水量加权平均值分别为 -17.3‰ 、 -125.3‰ 和 13.3‰ . 夏季分别为 -5.2‰ 、 -28.0‰ 和 13.5‰ , 降水量加权平均值为 -6‰ 、 -34.3‰ 和 14‰ . $\delta^{18}\text{O}$ 在 8 月至翌年 2 月呈逐步下降趋势, 2 ~ 8 月呈波动上升趋势, 降水中稳定同位素变化表现出显著的夏秋高、冬春低的季节性变化特征, 类似的变化还存在于黑河流域^[18]和天山地区^[41]等其它中国干旱地区. 乌鞘岭南、北坡的同位素值变化趋势基本一致, 但南坡的波动性明显强于北坡, 北坡 $\delta^{18}\text{O}$ 最高和最低值分别为 -8.1‰ (9 月 13 日) 和 -19.2‰ (2 月 7 日), 南坡 $\delta^{18}\text{O}$ 最高和最低值分别为 0.9‰ (7 月 29 日) 和 -21.6‰ (2 月 25 日).

3.3 过量氘

降水中过量氘含量是局地水汽来源示踪的可靠指标^[18,42]. 降水 $d\text{-excess}$ 值大小受控于降水水汽来源地的相对湿度、风速、水体表面温度和雨滴下落过程中的二次蒸发作用^[43,44]. $d\text{-excess}$ 值在 10 月至翌年 2 月逐渐下降, 之后急剧上升, 3 ~ 6 月波动下降, 之后又逐渐上升, $d\text{-excess}$ 高值主要出现在春秋季节, 低值主要出现在冬季和 6 月 (图 4). $d\text{-excess}$ 值与温度之间存在着负相关关系, 形成这一现象的主要原因是: 夏季较高的温度会增强雨水在下落过程中的二次蒸发, 导致了 $d\text{-excess}$ 值的显著降低; 冬季虽蒸发较弱, 但空气干燥且降水量极少, 在降水过

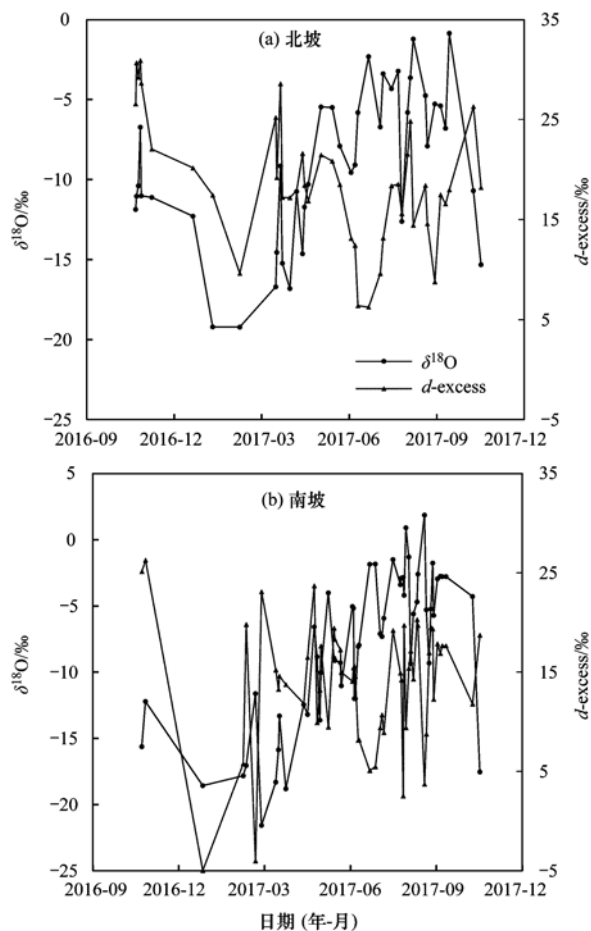


图 3 南北坡 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $d\text{-excess}$ 变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ and $d\text{-excess}$ on the northern and southern slopes

程中雨滴下落经过干燥空气会发生同位素的蒸发浓缩, 进而导致低 $d\text{-excess}$ 值的发生. 进入 8 月, 随着大气相对湿度的不断增加, $d\text{-excess}$ 值也随之增高.

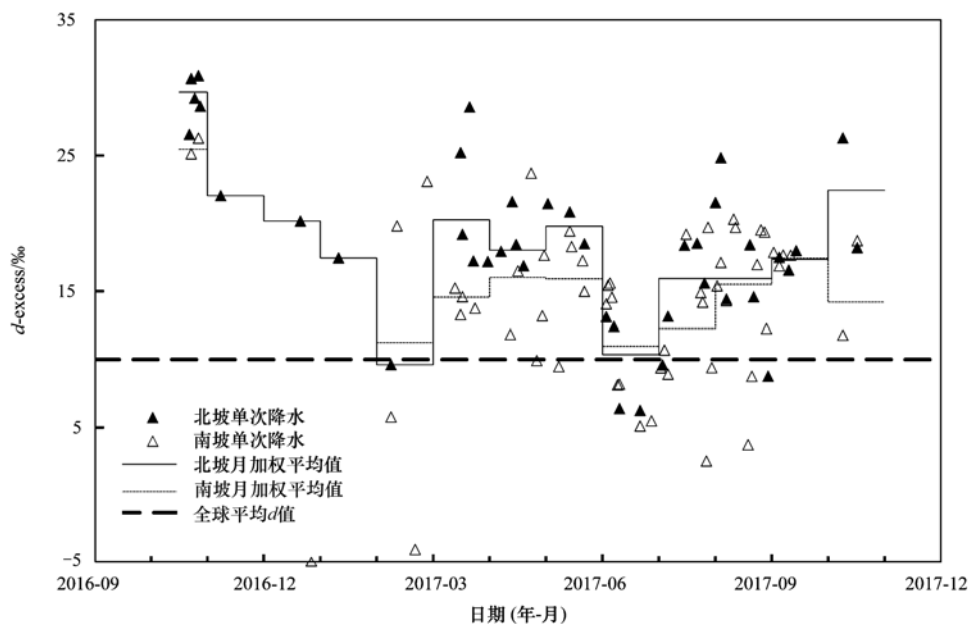


图 4 南北坡过量氘变化

Fig. 4 Comparison of $d\text{-excess}$ in the northern and southern slopes

夏季部分降水表现出偏负 $\delta^{18}\text{O}$ 值伴随较高 d -excess 值的变化趋势,这可能是受强烈的蒸发形成的局地水汽再循环或季风水汽的影响。

北坡 d -excess 平均值为 18.8‰,降水量加权平均值 17.9‰,最大值 30.9‰,最小值 6.3‰,南坡 d -excess 平均值为 14.0‰,降水量加权平均值 14.5‰,最大值 26.3‰,最小值 -5.0‰,总体上北坡过量氘高于南坡。由于北坡海拔较南坡低,因而水滴在降落过程中经历时间较长,蒸发越明显,导致 d -excess 值总体比南坡高^[42]。南、北坡绝大部分 d -excess 值大于全球淡水平均 d -excess 值(10‰),且北坡 d -excess 值高于全球淡水平均 d -excess 值的降水次数比南坡多。南、北坡过量氘低于全球淡水平均值主要出现在夏季(6~8月),表明这些降水过程与其它季节有所不同,可能受到季风水汽气团的影响,北坡 d -excess 值均大于 0,南坡 d -excess 值也绝大部分大于 0,但也有两次降水事件的 d -excess 值小于 0(2016 年 12 月 26 日 d -excess 值为 -5.0‰,2017 年 2 月 19 日 d -excess 值为 -4.0‰),这些较低的 d -excess 值出现在降水形态为固态的降水事件中,较低的气温造成 d -excess 值偏负。

4 讨论

4.1 同次降水过程中南、北坡稳定同位素的差异

抓喜秀龙与杨家庄相隔不远(约 26 km),但分别位于乌鞘岭南、北侧,且海拔相差约 500 m,因此降水事件并不每次都同时发生。在整个采样期间,共有 18 次降水事件同时发生(表 3)。对于大部分降水过程来说,北坡的 $\delta^{18}\text{O}$ 值高于南坡,这主要是温度差异而造成的,因为北坡采样点海拔较低,气温也相对较高,进而导致稳定同位素的值也较高。部分降水事件中,南坡同位素值大于北坡,这可能与降水量、相对湿度、水汽源地等有关。2017 年的 2 月 7 日、3 月 15 日和 3 月 16 日,南坡的 $\delta^{18}\text{O}$ 值比北坡高,但南坡气温低于北坡,且南北坡的气温皆低于或接近 0℃,降水形式为降雪,可能南坡降水量相对较少导致 $\delta^{18}\text{O}$ 值略高。2017 年的 6 月 2 日、9 月 4 日和 10 月 8 日,北坡的 $\delta^{18}\text{O}$ 值比南坡低,虽然北坡气温高于南坡,但北坡降水量大于南坡,可能降水量效应引起同位素值贫化。

4.2 南北坡降水稳定同位素效应的差异

4.2.1 温度效应

在全球尺度下,大气降水的同位素组成与温度之间的相关关系为正,但是不同地区和尺度上气温与 $\delta^{18}\text{O}$ 的线性关系存在一定差别^[45~47]。南、北坡 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温皆呈正相关(表 4),相关性显著($P <$

表 3 北坡与南坡的 $\delta^{18}\text{O}$ 、气温和降水量比较

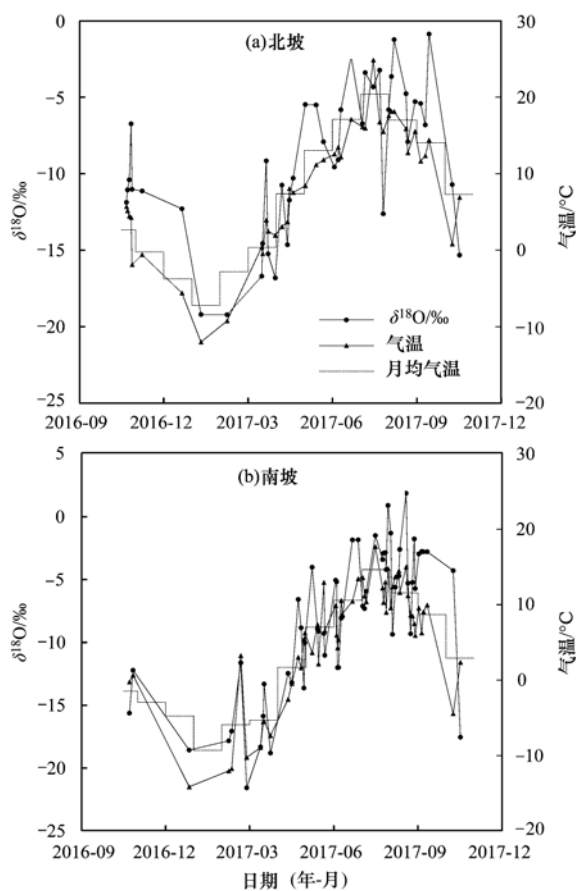
Table 3 Comparison of $\delta^{18}\text{O}$, temperature, and precipitation between the northern and southern slopes

降水日期 (年-月-日)	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$		气温/℃		降水量/mm	
	北坡	南坡	北坡	南坡	北坡	南坡
2016-10-22	-11.1	-15.6	5.2	-0.24	7.8	13.4
2016-10-26	-6.7	-12.2	4.3	0.66	5.1	5.3
2017-02-07	-19.2	-17.8	-9.2	-12.04	2.3	2.0
2017-03-15	-16.7	-15.9	0.4	-5.54	2.5	1.9
2017-03-16	-14.6	-13.3	-0.5	-5.44	7.3	4.4
2017-03-23	-15.2	-18.8	2.5	-7.34	9.1	2.9
2017-05-13	-5.5	-9.0	11.2	7.36	9.5	4.9
2017-05-21	-7.9	-11.0	11.8	6.56	16.8	14.4
2017-06-02	-9.6	-5.1	12.5	9.86	14.6	3.2
2017-06-09	-5.8	-8.0	12.2	8.76	5.8	8.2
2017-07-02	-6.7	-7.1	16.1	13.61	19.5	10.3
2017-07-05	-3.4	-5.9	15.9	10.40	3.3	6.3
2017-08-03	-3.7	-9.4	18.1	12.36	10.0	15.9
2017-08-06	-1.2	-5.6	18.1	13.70	2.6	4.8
2017-08-20	-4.8	-5.3	15.9	11.20	10.2	13.0
2017-09-04	-5.4	-2.8	11.6	6.26	12.5	5.6
2017-10-08	-10.7	-4.3	0.8	-4.44	17.5	12.6
2017-10-16	-15.3	-17.5	6.9	2.36	16.0	6.7

0.01),表现出明显的温度效应。南北坡 $\delta^{18}\text{O}$ 值与气温的变化是一致的,2月至7月 $\delta^{18}\text{O}$ 值随气温的升高而增大,8月至翌年2月 $\delta^{18}\text{O}$ 值随气温的降低而减小(图 5)。相比较而言,南坡的降水同位素值波动性比北坡更强,说明南坡受气温以外的因素影响比北坡更多。

地球上任何一个地区的大气降水的同位素值都存在季节性变化,但每个地区的季节性差异程度不尽相同^[45]。整体来看,南、北坡稳定同位素低值多出现在冬季,这是由于水汽经过长距离的输送已经贫化,同位素明显降低。进入 3 月,随着气温升高,蒸发作用增强,同位素值也随之升高。同位素高值多出现在夏季,由于气温较高,二次蒸发强烈,同位素的值较高。进入 9 月,气温有所降低,蒸发作用减弱,同位素值随之降低。

为进一步探讨温度对同位素值的影响,将降水样品划分为 3 组,第一组是温度 $<0^\circ\text{C}$ 的降水样品,第二组是温度介于 0°C 和 8°C 的降水样品,第三组为温度 $>8^\circ\text{C}$ 的降水样品(图 6)。3 组的降水样品 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度均正相关,但没有通过显著性检验,不过北坡温度 $<0^\circ\text{C}$ 和 $>8^\circ\text{C}$ 的情况通过 0.05 置信度检验(表 4),表明北坡降水稳定同位素的温度效应更为明显。已有研究表明,在低温状态下降水稳定同位素变化主要受到平衡分馏作用的影响^[48]。第二、三组稳定同位素值的变化较第一组更为平缓,且与温度的相关性降低,这可能是因为温度效应引起的稳定同位素值的富集与水汽再循环导致的稳定同位素值贫化,两个因素促使内循环呈相对稳定状态^[45]。南北

图5 南北坡气温与 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化Fig. 5 Relationship between temperature and $\delta^{18}\text{O}$ in different months

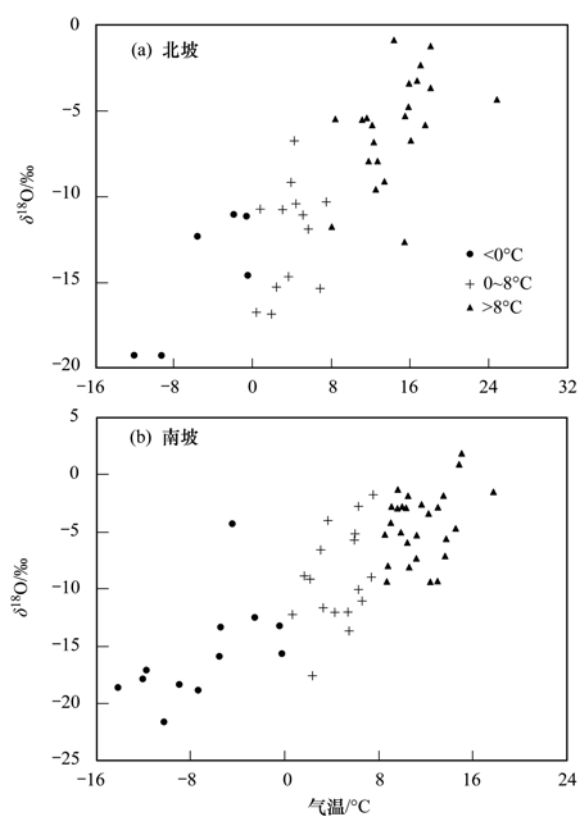
坡降水形态为固态的降水事件共有 18 次,发生在冬春季节,此时段气温较低,二次蒸发作用弱,同位素变化主要受平衡分馏作用,同位素保持了其在云下形成时的特征;液态的降水事件 79 次,发生在春末和夏秋季节,期间温度开始升高或是高温状态,二次蒸发强烈.因此固态降水同位素与温度相关显著性比液态降水同位素与温度相关显著性更高.

表4 南北坡不同温度标准下 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度相关性Table 4 Correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and temperature under different temperature standards on the northern and southern slopes

位置	$R^2(P)$			全部
	$<0^\circ\text{C}$	$0\sim 8^\circ\text{C}$	$>8^\circ\text{C}$	
北坡	0.70 (0.05)	0.11	0.21 (0.05)	0.67 (0.01)
南坡	0.32	0.16	0.10	0.66 (0.01)

4.2.2 降水量效应

降水同位素会表现出降水量效应,可能与强烈的对流现象有关,也受雨滴降落过程中与环境间的水气交换作用以及蒸发效应等的影响^[49].我国东部季风区气候相对湿热,降水过程中雨滴蒸发浓缩作用不明显,同位素值与降水量表现出较显著负相关关系;而在西北内陆干旱区温度升高

图6 南北坡 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度关系Fig. 6 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and temperature on the northern and southern slopes

后,降水过程中雨滴再蒸发引起重同位素浓缩,降水量效应表现不明显.雨滴在下落过程中再蒸发过程会随着降水持续进行,云下空气逐渐饱和而逐渐减弱直至停止,因而降水强度大、水汽来源受更多海洋性气团影响的西北内陆干旱区降水量效应也能被体现^[10]. Zhao 等^[18]认为中国西北内陆降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同位素存在微弱的降水量效应,在内陆干旱区,降水量并不是降水同位素值高低的决定性因素.

由图7和表5可见,乌鞘岭南、北坡在全年尺度上降水量与同位素相关性皆未通过显著性检验,未表现出明显降水量效应,可能因为该地降水量较小,且雨热同期温度效应较明显,从而没有表现出降水量效应.但按照不同季节划分,北坡在冬季和夏季降水稳定同位素与降水负相关,而南坡在春、夏、秋和冬季降水稳定同位素与降水均为负相关,表明降水量对稳定同位素有一定影响.北坡夏季降水量与同位素相关性通过显著性检验($P < 0.05$),表明夏季降水稳定同位素具有一定的降水量效应,这可能是北坡在夏季降水较为集中,稳定同位素的淋溶作用较为强烈,因而降水量效应较为明显.有研究表明,黄河小浪底库区4~10月降水同位素表现出较明显的降水量效应^[8].

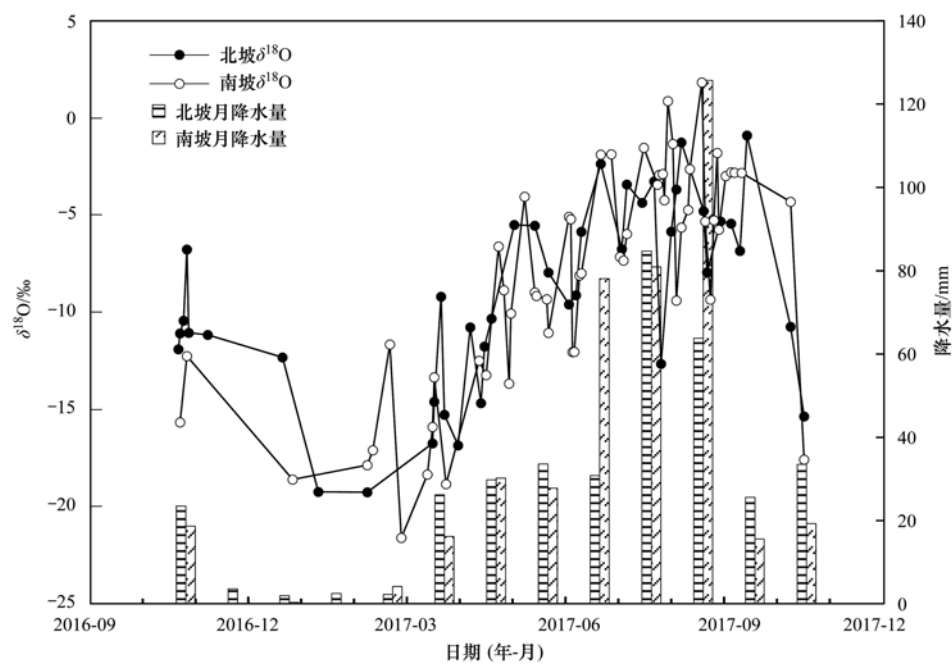


图7 南北坡降水量与 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化

Fig. 7 Relationship between precipitation and $\delta^{18}\text{O}$ in different months

表5 南北坡不同季节 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量相关性

Table 5 Correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation in different seasons on the northern and southern slopes

位置	$R^2(P)$					
	全年	秋季	冬季	春季	夏季	秋季
北坡	0.02	0.04	1	0.24	0.41 (0.05)	0.02
南坡	0.09	1	0.01	0.01	0.07	0.04

乌鞘岭气候较干旱,处于季风区边缘,同位素降水量效应体现不明显,但在不同降水量级下,南北坡 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量呈现出不同的关系.将同位素值按照降水量级($p < 5\text{ mm}$ 、 $5\text{ mm} < p < 10\text{ mm}$ 、 $10\text{ mm} < p < 20\text{ mm}$ 和 $p > 20\text{ mm}$)分为4级,得出表6和图8.从中可知,在 p 为 $5\sim 20\text{ mm}$ 的降水事件中, $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量呈负相关,但均未通过置信度检验, $p < 5\text{ mm}$ 和 $p > 20\text{ mm}$ 的降水事件中, $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量呈现正相关,仅有南坡 $p < 5\text{ mm}$ 的事件通过置信度检验.可见,在不同降水量级上,仅有南坡 $p < 5\text{ mm}$ 的降水量级下,降水稳定同位素表现出降水量效应.南坡 $p < 5\text{ mm}$ 的降水事件,多发生在春、夏和秋季,雨滴受到较强烈的二次蒸发.降水强度对同位素值有一定影响,这与乌鲁木齐^[10]对降水量与同位素值关系研究的部分结论一致.

表6 南北坡不同降水量标准下 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量相关性

Table 6 Correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation under different precipitation standards on the northern and southern slopes

位置	$R^2(P)$				
	$< 5\text{ mm}$	$5\sim 10\text{ mm}$	$10\sim 20\text{ mm}$	$> 20\text{ mm}$	全部
北坡	0.05	0.12	0.28	1	0.02
南坡	0.19 (0.05)	0.01	0.19	1	0.09

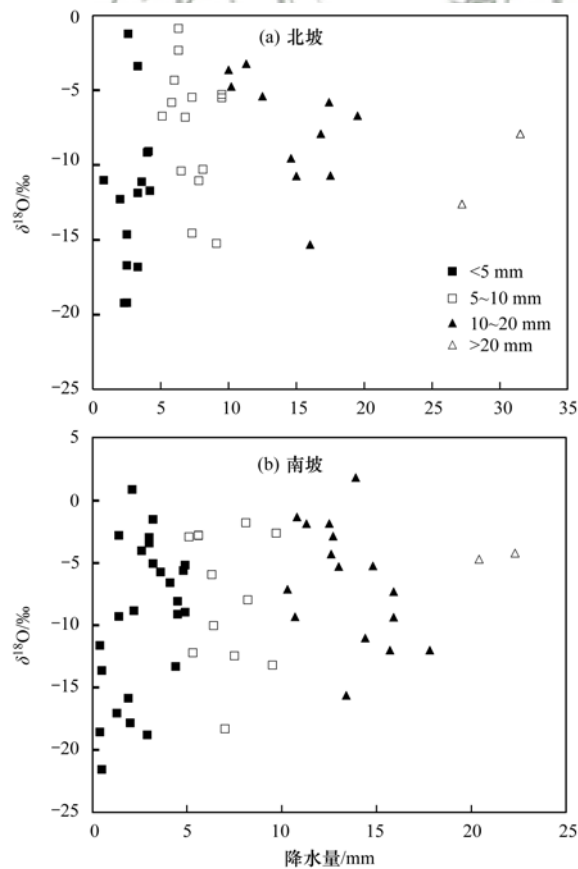


图8 南北坡 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量关系

Fig. 8 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation on the northern and southern slopes

4.3 南北坡水汽来源的差异

大区域的降水同位素特征能反映大尺度区域气候背景以及水汽输送方式,因此可以通过对大气降

水中氢氧稳定同位素丰度的涨落来反映大气水循环的信息,并追踪水汽的来源^[4]. 研究区 *d-excess* 变化范围为 $-5.0‰ \sim 30.9‰$, 降水量加权平均值 $16.1‰$,说明降水水汽来源以西风带大陆性局地水汽团为主,并且水源区气候干燥.

部分冬季降水事件具有较高的 *d-excess* 值和较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值(例如:南坡2017年2月10日、2017年2月25日,北坡2016年2月22日、2017年1月10日),当相对干燥的西风气团向我国西北地区输送过程中,经过相对温暖水体(黑海、里海和咸海),将携带快速蒸发的大量水汽,因此来自远源输送的大陆再循环水汽可能造成这样的现象^[48]. 也有部分冬季降水事件具有极低的 $\delta^{18}\text{O}$ 和*d-excess*(例如:南坡2016年12月26日、2017年2月7日、2017年2月19日,北坡2017年2月7日)这是受到极地气团水汽的影响的结果. 在夏季的降水中,研究区内水体和植被蒸发蒸腾作用加强,局地再循环水汽也具有一定的贡献.

利用 NOAA 大气再分析资料和 HYSPLIT 模型对南、北坡降水的水汽来源进行示踪,表 7 为采样点 1 500 m 高度逐次降水水汽来源后向轨迹模拟图追踪所得水汽来源方向百分比表. 图 9 (a) ~ 9 (c) 分别为北坡 2017 年的 3 月 15 日 (西北方向)、9 月 4 日 (西南方向) 和 10 月 8 日 (北方) HYSPLITL 水

汽来源模拟结果,图 9 (d) ~ 9 (f) 分别为南坡 2017 年的 3 月 15 日 (西北方向)、5 月 7 日 (北方) 和 7 月 24 日 (东南方向) HYSPLITL 水汽来源模拟结果. 从全年来看,南、北坡水汽来源中西北方向占主要部分,北坡全年西北方向来的水汽占 78. 05%,南坡占 66. 07%,此方向水汽来自于西风带,经新疆地区向河西走廊地区输送,这与国内其他一些学者的研究结论一致^[23,27,50];北方来的水汽对南、北坡的影响仅次于西北方向水汽,南坡比北坡受北方水汽影响较多,主要表现在暖季;西南方向来的水汽主要在暖季影响北坡,该水汽主要绕过喜马拉雅山脉,从喀喇昆仑山口径昆仑山脉向河西走廊输送;东南方向来的水汽主要在暖季影响南坡,该水汽主要来自于太平洋,以夏季风向西北地区输送. 从冷暖季来看,西北方向来的水汽也是主导.

水汽源地比较难区分,主要因为存在直接水源

表 7 水汽来源百分比统计

Table 7 Water vapor source percentage statistics					
项目		西北/%	北方/%	西南/%	东南/%
北坡	暖季	39.02	9.76	2.44	0.00
	冷季	39.02	9.76	0.00	0.00
	全年	78.05	19.51	2.44	0.00
南坡	暖季	39.29	19.64	0.00	7.14
	冷季	26.79	7.14	0.00	0.00
	全年	66.07	26.79	0.00	7.14

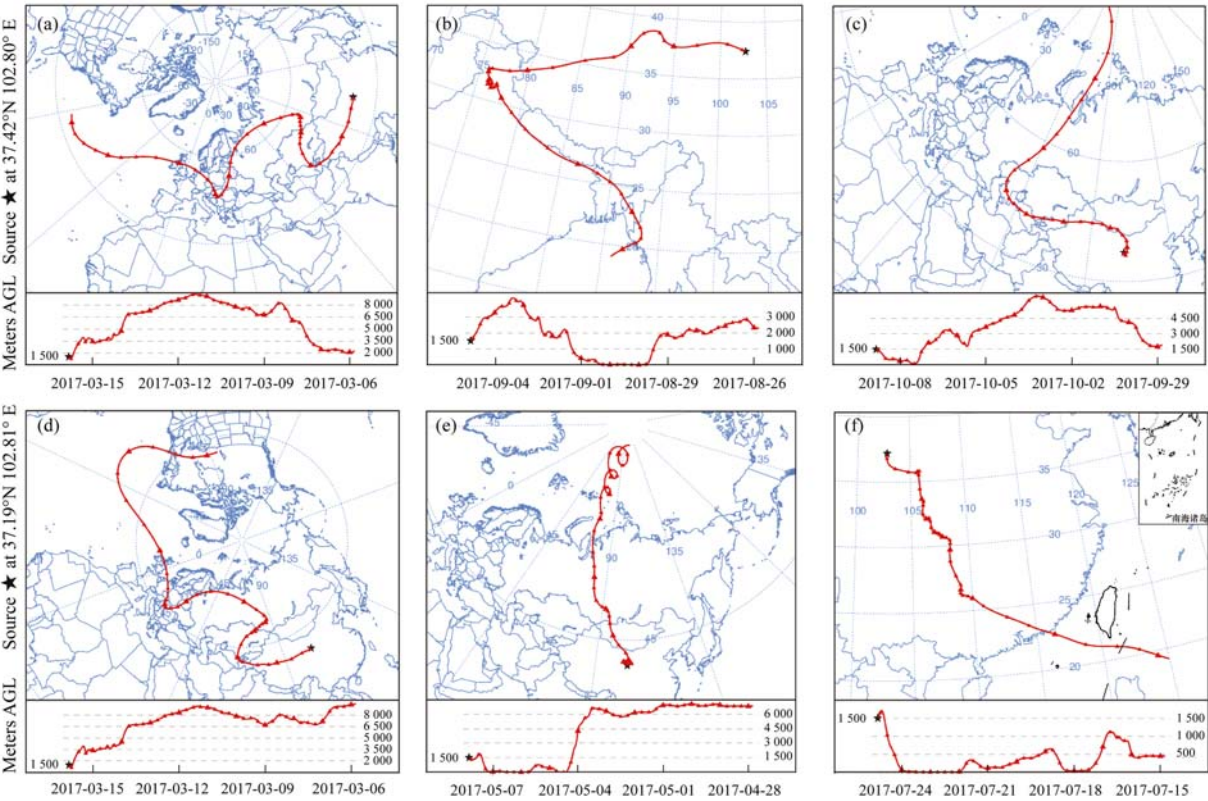


图 9 南北坡水汽来源方向模拟

Fig. 9 Vapor source direction of northern and southern slopes simulation diagram

地和间接水源地,通常水汽源地可能是大气环流上游距离较近的海洋、大型湖泊或内海^[23,27,51,52]。由西北进入乌鞘岭的大部分水汽主要来自北大西洋海域、欧洲大陆高纬地区或中亚地区的陆地蒸发水汽以及内海可能也是西风带的主要水汽源地;北部水汽源地主要来自北冰洋海域和西伯利亚大陆蒸发水汽;西南和东南方向来的水汽来自于印度洋和太平洋,主要在暖季输送海洋上的水汽。

5 结论

(1) 计算得出乌鞘岭北坡大气降水线为: $\delta D = 7.77 \delta^{18}O + 16.73$ ($R^2 = 0.97$); 南坡为: $\delta D = 7.91 \delta^{18}O + 13.28$ ($R^2 = 0.98$)。南、北坡大气降水线斜率略低于 GMWL 斜率; 南坡大气降水线斜率略高于北坡, 这与南坡受东南方向来的水汽影响更大、相对湿润较大相关。

(2) 南、北坡降水稳定同位素值皆呈现夏高冬低特征, 南坡同位素值年内波动性比北坡大。南、北坡降水稳定同位素温度效应明显, 季节效应明显, 降水量效应在全年尺度上未被体现, 但北坡夏季有降水量效应, 南坡低于 5 mm 降水量级下有降水量效应。

(3) 乌鞘岭水汽来自西北和北方的占 90% 以上。北坡受西风控制的比率比南坡高, 南坡在夏季受东南季风的影响比北坡强烈。北大西洋海域、欧洲大陆高纬地区或中亚地区的陆地蒸发水汽以及内海是自西北方向来的水汽主要源地; 北部水汽源地主要来自北冰洋海域和西伯利亚大陆蒸发水汽; 西南和东南方向来的水汽来自于印度洋和太平洋, 主要在 4~10 月向乌鞘岭输送。

参考文献:

- [1] Cai M Y, Wang L X, Parkes S D, *et al.* Stable water isotope and surface heat flux simulation using ISOLSM: evaluation against *in-situ* measurements[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **523**: 67-78.
- [2] 丁丹, 贾文雄, 马兴刚, 等. 祁连山亚高山灌丛优势植物水分来源[J]. *生态学报*, 2018, **38**(4): 1348-1356.
Ding D, Jia W X, Ma X G, *et al.* Water source of dominant plants of the subalpine shrubland in the Qilian Mountains, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(4): 1348-1356.
- [3] Zhu G F, Li J F, Shi P J, *et al.* Relationship between sub-cloud secondary evaporation and stable isotope in precipitation in different regions of China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(10): 876.
- [4] 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.
Zhang H A, Wang N A, Li Z L, *et al.* Features of hydrogen and oxygen isotopes in lakes and groundwater in Southeast Badain Jaran Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, **31**(6): 1623-1629.
- [5] Kohn M J, Welker J M. On the temperature correlation of $\delta^{18}O$ in modern precipitation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **231**(1-2): 87-96.
- [6] 陈曦, 李志, 程立平, 等. 黄土塬区大气降水的氢氧稳定同位素特征及水汽来源[J]. *生态学报*, 2016, **36**(1): 98-106.
Chen X, Li Z, Cheng L P, *et al.* Analysis of stable isotopic composition and vapor source of precipitation at the Changwu Loess Tableland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(1): 98-106.
- [7] 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 等. 厦门地区大气降水氢氧同位素组成特征及水汽来源探讨[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(2): 667-674.
Chen Y T, Du W J, Chen J S, *et al.* Composition of hydrogen and oxygen isotopic of precipitation and source apportionment of water vapor in Xiamen Area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(2): 667-674.
- [8] 田超, 孟平, 张劲松, 等. 黄河小浪底库区降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 季节变化特征及水汽来源[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(12): 3579-3587.
Tian C, Meng P, Zhang J S, *et al.* Seasonal characteristics of δD and $\delta^{18}O$ in precipitation and its water vapor sources in the Xiaolangdi Reservoir area of Yellow River, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(12): 3579-3587.
- [9] 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.
- [10] 郑新军, 李彦, 徐利岗. 乌鲁木齐降水中 $\delta^{18}O$ 的温度和降水强度效应的季节转换[J]. *中国沙漠*, 2016, **36**(2): 491-498.
Zheng X J, Li Y, Xu L G. Seasonal transition between temperature and precipitation intensity effect on precipitation $\delta^{18}O$ in Urumqi, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, **36**(2): 491-498.
- [11] 李嘉竹, 刘贤赵. 氢氧稳定同位素在 SPAC 水分循环中的应用研究进展[J]. *中国沙漠*, 2008, **28**(4): 787-794.
Li J Z, Liu X Z. Advances of stable hydrogen and Oxygen isotope applied in SPAC water cycle[J]. *Journal of Desert Research*, 2008, **28**(4): 787-794.
- [12] 李广, 章新平, 吴华武, 等. 云南大气降水中 $\delta^{18}O$ 与气象要素及水汽来源之间的关系[J]. *自然资源学报*, 2014, **29**(6): 1043-1052.
Li G, Zhang X P, Wu H W, *et al.* Stable oxygen isotope in precipitation in relation to the meteorological factors and the moisture sources in Yunnan[J]. *Journal of Natural Resource*, 2014, **29**(6): 1043-1052.
- [13] 蔡明刚, 黄奕普, 陈敏, 等. 厦门大气降水的氢氧同位素研究[J]. *台湾海峡*, 2000, **19**(4): 446-453.
Cai M G, Huang Y P, Chen M, *et al.* A study on hydrogen and oxygen isotopes composition of precipitation in Xiamen[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2000, **19**(4): 446-453.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 郑琰明, 钟巍, 彭晓莹, 等. 粤西云浮市大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽来源的关系[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 637-643.
- Zheng Y M, Zhong W, Peng X Y, *et al.* Correlation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and moisture sources at Yunfu, Western Guangdong Province, China [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(3): 637-643.
- [17] Ma J Z, Zhang P, Zhu G F, *et al.* The composition and distribution of chemicals and isotopes in precipitation in the Shiyang River system, northwestern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **436-437**: 92-101.
- [18] Zhao L J, Yin L, Xiao H L, *et al.* Isotopic evidence for the moisture origin and composition of surface runoff in the headwaters of the Heihe River basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(4-5): 406-415.
- [19] Zhao W, Ma J Z, Gu C J, *et al.* Distribution of isotopes and chemicals in precipitation in Shule River Basin, northwestern China: an implication for water cycle and groundwater recharge [J]. *Journal of Arid Land*, 2016, **8**(6): 973-985.
- [20] 郭江勇, 李耀辉. 中国西北地区夏季降水的气候特征[J]. *干旱区研究*, 2006, **23**(3): 489-494.
- Guo J Y, Li Y H. Climatic characteristics of summer precipitation in Northwestern China [J]. *Arid Zone Research*, 2006, **23**(3): 489-494.
- [21] 章新平, 刘晶淼, 姚檀栋, 等. 中纬度地区混合云中稳定同位素分馏的数学模拟——以乌鲁木齐降水为例[J]. *气象学报*, 2003, **61**(1): 95-105.
- Zhang X P, Liu J M, Yao T D, *et al.* Simulations of stable isotopic fractionation in mixed cloud in middle latitudes—A case of the precipitation at Urumqi [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, **61**(1): 95-105.
- [22] 袁瑞丰, 李宗省, 蔡玉琴, 等. 干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2122-2131.
- Yuan R F, Li Z X, Cai Y Q, *et al.* Space-time characteristics and environmental significance of stable isotopes in precipitation at an arid inland river basin [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2122-2131.
- [23] 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.
- [24] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域中上游地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征[J]. *冰川冻土*, 2007, **29**(3): 440-445.
- Zhang Y H, Wu Y Q. Characteristics of the $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in the upper and middle reaches of Heihe River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(3): 440-445.
- [25] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域中上游地区降水中氢氧同位素研究[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(1): 34-39.
- Zhang Y H, Wu Y Q. Oxygen and hydrogen isotopes in precipitation in Heihe River Basin, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(1): 34-39.
- [26] 王宁练, 张世彪, 蒲健辰, 等. 黑河上游河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 季节变化特征及其影响因素研究[J]. *冰川冻土*, 2008, **30**(6): 914-920.
- Wang N L, Zhang S B, Pu J C, *et al.* Seasonal variation of $\delta^{18}\text{O}$ in river water in the upper reaches of Heihe River Basin and its influence factors [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, **30**(6): 914-920.
- [27] 赵玮. 疏勒河流域大气降水同位素特征及水汽来源研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- Zhao W. Study on the isotopes and moisture source in precipitation in the Shule River Basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [28] 王利书, 唐泽军. 石羊河流域地下水循环的同位素和地球化学演化特征[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(6): 1748-1755.
- Wang L S, Tang Z J. Isotopic and geochemical evolution characteristics of groundwater circulation in the Shiyang River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(6): 1748-1755.
- [29] Ma X G, Jia W X, Zhu G F, *et al.* Stable isotope composition of precipitation at different elevations in the monsoon marginal zone [J]. *Quaternary International*, 2018, **493**: 86-95.
- [30] 李佳芳, 石培基, 朱国锋, 等. 河西走廊中部大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及水汽输送[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(4): 947-955.
- Li J F, Shi P J, Zhu G F, *et al.* Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and moisture transports in the central Hexi Corridor [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(4): 947-955.
- [31] 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.
- [32] 张自超, 丁梯平. 关于同位素地质测试数据的数据处理及结果表示[J]. *岩矿测试*, 2000, **19**(1): 77-79.
- Zhang Z C, Ding T P. Data processing and expression for analytical results in isotope geology [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2000, **19**(1): 77-79.
- [33] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [34] Price R M, Swart P K, Willoughby H E. Seasonal and spatial variation in the stable isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of precipitation in south Florida [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **358**(3-4): 193-205.
- [35] Xie L H, Wei G J, Deng W F, *et al.* Daily $\delta^{18}\text{O}$ and δD of precipitations from 2007 to 2009 in Guangzhou, South China: implications for changes of moisture sources [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, **400**(3-4): 477-489.
- [36] 王涛, 张洁茹, 刘笑, 等. 南京大气降水氧同位素变化及水汽来源分析[J]. *水文*, 2013, **33**(4): 25-31.
- Wang T, Zhang J R, Liu X, *et al.* Variations of stable isotopes in precipitation and water vapor sources in Nanjing Area [J]. *Journal of China Hydrology*, 2013, **33**(4): 25-31.
- [37] 黄一民, 章新平, 唐方雨, 等. 长沙大气降水中稳定同位素变化及过量氘指示水汽来源[J]. *自然资源学报*, 2013, **28**(11): 1945-1954.
- Huang Y M, Zhang X P, Tang F Y, *et al.* Variations of precipitation stable isotope and vapor origins revealed by deuterium excess in Changsha [J]. *Journal of Natural Resource*, 2013, **28**(11): 1945-1954.
- [38] 李广, 章新平, 张新主, 等. 云南腾冲地区大气降水中氢氧稳定同位素特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, **22**(11): 1458-1465.
- Li G, Zhang X P, Zhang X Z, *et al.* Stable hydrogen and oxygen isotopes characteristics of atmospheric precipitation from Tengchong, Yunnan [J]. *Resources and Environment in the*

- Yangtze Basin, 2013, **22**(11): 1458-1465.
- [39] 王昕卉. 海河流域降水稳定同位素研究[D]. 天津: 天津师范大学, 2014.
- Wang X H. The research of stable isotopes in precipitate in Haihe River Basin[D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2014.
- [40] 刘筱, 张福平, 雷声剑, 等. 西安大气降水稳定同位素变化规律及影响因素分析[J]. 江西农业学报, 2016, **28**(6): 71-75.
- Liu X, Zhang F P, Lei S J, *et al.* Analysis of variation rules of stable isotopes in atmospheric precipitation and its influencing factors in Xi'an[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2016, **28**(6): 71-75.
- [41] Wang X Y, Li Z Q, Ross E, *et al.* Characteristics of water isotopes and hydrograph separation during the spring flood period in Yushugou River Basin, Eastern Tianshans, China[J]. Journal of Earth System Science, 2015, **124**(1): 115-124.
- [42] Pang H X, He Y Q, Zhang Z L, *et al.* The origin of summer monsoon rainfall at New Delhi by deuterium excess [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2004, **8**(1): 115-118.
- [43] Jouzel J, Merlivat L, Federer B. Isotopic study of hail: the δd - $\delta^{18}O$ relationship and the growth history of large hailstones[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, **111**(468): 495-516.
- [44] Fritz P, Drimmie R J, Frape S K, *et al.* The isotopic composition of precipitation and groundwater in Canada[A]. In: International Atomic Energy Agency (Ed.). Isotope Techniques in Water Resources Development [M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1987. 539-550.
- [45] 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.
- [46] Stewart M K. Stable isotope fractionation due to evaporation and isotopic exchange of falling waterdrops: applications to atmospheric processes and evaporation of lakes[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1975, **80**(9): 1133-1146.
- [47] Pang Z H, Kong Y L, Froehlich K, *et al.* Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region [J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2011, **63**(3): 352-359.
- [48] Li Z X, Feng Q, Yong S, *et al.* Stable isotope composition of precipitation in the south and north slopes of Wushaoling Mountain, Northwestern China [J]. Atmospheric Research, 2016, **182**: 87-101.
- [49] Schotterer U, Fröhlich K, Gäggeler H W, *et al.* Isotope records from mongolian and alpine ice cores as climate indicators[J]. Climatic Change, 1997, **36**(3-4): 519-530.
- [50] 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.
- [51] 张强, 俞亚勋, 张杰. 祁连山与河西内陆河流域绿洲的大气水循环特征研究[J]. 冰川冻土, 2008, **30**(6): 907-913.
- Zhang Q, Yu Y X, Zhang J. Characteristics of water cycle in the Qilian Mountains and the oases in Hexi inland river basins[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, **30**(6): 907-913.
- [52] 贾文雄, 李宗省. 祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3322-3332.
- Jia W X, Li Z X. Hydrochemical characteristics and sources of ions in precipitation at the East Qilian Mountains [J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3322-3332.

CONTENTS

Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years	SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i> (1)
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016	ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i> (14)
Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China	LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (23)
PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China	LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i> (31)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019	ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i> (39)
Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China	XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo (50)
Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing	SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (57)
Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City	YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i> (65)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City	SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (75)
Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xinxian City	YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i> (82)
Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species	LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i> (90)
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant	WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i> (98)
Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018	YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i> (106)
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City	YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (115)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols	WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i> (125)
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China	LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i> (133)
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals	HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (139)
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaicol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration	ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (146)
Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain	XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (155)
Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i> (166)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, JILILI Abuduwali, <i>et al.</i> (173)
Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years	TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i> (183)
Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea	CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (194)
Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River	LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (205)
Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (213)
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake	WANG Jing-zhong, LIU Zhao, WEI Hao, <i>et al.</i> (224)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River	WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (232)
Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River	LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i> (242)
Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent	LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (253)
Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou	CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i> (262)
Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments	WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (273)
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i> (284)
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II)	XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i> (293)
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water	ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i> (304)
Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant	CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i> (313)
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch	ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i> (321)
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR	CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (330)
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (337)
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter	CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i> (345)
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function	LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (353)
Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge	ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (360)
Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China	XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i> (368)
Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant	MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i> (377)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils	ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i> (385)
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation	DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Tian-hui, <i>et al.</i> (394)
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils	SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (403)
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshang Lake	CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i> (412)
Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field	WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i> (420)
Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Jiulong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin	CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (438)
Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China	MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i> (449)
Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel	ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i> (460)
Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes	LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (469)
Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region	ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i> (479)
Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain	LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i> (489)