

 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.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM_{2.5}成因分析及效果评估..... 吕喆,魏巍,周颖,程水源,王晓琦(1)

长三角地区重点源减排对PM_{2.5}浓度的影响..... 于燕,王泽华,崔雪东,陈锋,徐宏辉(11)

上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析..... 戴海夏,安静宇,李莉,黄成,严茹莎,朱书慧,马英歌,宋伟民,阚海东(24)

京津冀及周边地区PM_{2.5}时空变化特征遥感监测分析..... 陈辉,厉青,李莹,张连华,毛慧琴,周伟,刘伟汉(33)

MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性..... 王海林,刘琼,陈勇航,孙冉,李霞,张华,魏刚,胡俊,刘统强(44)

气象因素对香港地区臭氧污染的影响..... 赵伟,高博,刘明,卢清,马社霞,孙家仁,陈米国,范绍佳(55)

天津夏季边界层低层大气中PAN和O₃的输送特征分析..... 姚青,马志强,林伟立,刘敬乐,王晓佳,蔡子颖,韩素芹(67)

成都冬季PM_{2.5}化学组分污染特征及来源解析..... 吴明,吴丹,夏俊荣,赵天良,杨清健(76)

郑州市冬季天气PM_{2.5}传输路径和潜在源分析..... 段时光,姜楠,杨留明,张瑞芹(86)

常州春季PM_{2.5}中WSOC和WSON的污染特征与来源解析..... 李清,黄雯倩,马帅帅,黄红缨,叶招莲,陈敏东(94)

天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子..... 孙露娜,刘妍,赵静波,孙世达,宋从波,张静,李悦宁,林应超,王婷,毛洪钧(104)

机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征..... 梅德清,朱宗宁,孙天硕,王向丽,梅丛蔚,肖政臻(114)

超低排放路线下燃煤烟气可凝结颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性..... 杨柳,张斌,王康慧,麻丁仁,盛文(121)

超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性..... 阮仁晖,谭厚章,段钰锋,杜勇乐,刘鹤欣,萧嘉繁,杨富鑫,张朋(126)

北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放..... 张立坤,李令军,姜磊,赵文慧,鹿海峰,王新辉,邱昀(135)

SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除..... 任美慧,樊芸,王胜,许亮,张宁,张雪萍,陈吉平,张海军(143)

古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义..... 桂娟,李宗省,冯起,卫伟,李永格,吕越敏,袁瑞丰,张百娟(149)

夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征..... 程琼,庄婉娥,王辉,陈菁,杨丽阳(157)

亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析..... 朱爱菊,孙东耀,谭季,黄佳芳,罗敏(164)

基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源..... 周石磊,张艺冉,黄廷林,刘艳芳,张磊,李贵霞,岳琳,罗晓(172)

分层型水源水库溶解性有机物质及其膜污染特性..... 李凯,王晓东,黄廷林,李舒,刘双(185)

重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO₂交换通量及其影响因素..... 罗佳宸,倪茂飞,李思悦(192)

基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用..... 李渊,李云梅,郭宇龙,张运林,张毅博,胡耀霖,夏忠(200)

巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征..... 李如忠,阙凤翔,熊鸿斌,王莉(211)

特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例..... 丁瑶,欧阳莉莉,石清,高平川,赖承钺,陈舒平,贾滨洋,姚刚(219)

黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量..... 李琦路,程相会,赵祯,郭萌然,袁梦,华夏,方祥光,孙红文(228)

重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源..... 苗迎,孔祥胜,李成展(239)

沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价..... 张士超,姚宏,向鑫鑫,刘殷佐,刘明利,鲁根涛,于晓华(248)

多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险..... 付璐婧,李一兵,乔梦,赵旭(256)

原水性质对新型含Ca²⁺复合混凝剂混凝过程的影响..... 曲江东,徐慧,徐建坤,段晋明,门彬,王东升(263)

水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用..... 李聪鹤,车潇炜,白莹,石晓勇,苏荣国(273)

MoS₂/BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能..... 张亮,赵朝成,高先瑶,闫青云,王帅军,董培,侯亚璐(281)

纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星..... 倪永炯,程永清,徐梦苑,邱春根,马晓雁,李军,邓靖(293)

不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能..... 张翔凌,邓礼楚,方晨佳,雷雨,何春艳,高晨光,赵双杰,向洋(300)

单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能..... 邢明超,谢强,陈守慧,吴德意(310)

新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化..... 唐立朋,魏群山,吕强,张弛,刘亚男,柳建设(318)

不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应..... 胡佳萍,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(327)

碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响..... 崔有为,金常林,王好韩,李晶(336)

进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响..... 甄建园,于德爽,王晓霞,陈光辉,都叶奇,袁梦飞,杜世明(343)

不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响..... 王晓霞,甄建园,赵骥,于德爽,都叶奇,杜世明,袁梦飞,张帆(352)

后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷..... 巩秀珍,于德爽,袁梦飞,王晓霞,陈光辉,王钧,毕春雪,都叶奇(360)

缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行..... 李冬,郭跃洲,劳会妹,曹美忠,张杰(369)

低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式..... 李冬,崔雅倩,赵世勋,刘志诚,张杰(376)

不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性..... 严俊霞,孙琦,李君剑,李洪建(383)

轮作方式对冬水田温室气体排放的影响..... 冯夕,江长胜,彭小乐,李彦沛,郝庆菊(392)

紫色土N₂O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应..... 黄容,高明,王蕊燕,黎嘉成,徐国鑫,罗梅,徐畅(401)

岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征..... 张双双,靳振江,贾远航,李强(412)

丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析..... 孙峰,田伟,张菲,陈彦,任学敏,庞发虎,李玉英,姚伦广,陈兆进(421)

硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化..... 贾欠欠,李伟,王亚男,段晋明,刘玉灿(430)

铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估..... 王洋洋,李方方,王笑阳,杨志辉,韩科,阮心玲(437)

新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响..... 杨伟光,王美娥,陈卫平(445)

九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价..... 林承奇,黄华斌,胡恭任,于瑞莲,郝春莉,林颖(453)

草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征..... 许议元,何天容(461)

Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响..... 郭俊梅,杨俊兴,杨军,陈同斌,李厚恩,徐铁兵,周小勇,叶勇,于豹(470)

不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响..... 王起凡,郭伟,常青,潘亮,周昕南,杨亮,李娥(480)

广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析..... 王俊能,赵学敏,胡国成,钟松雄,姚玲爱,马千里,许振成(488)

6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响..... 邹亚丹,徐擎擎,张智,李富云,李锋民(496)

一种负载功能型微生物的营养缓释填料的制备及性能评价..... 冯克,徐丹华,成卓韦,於建明,陈建孟(504)

《环境科学》征订启事(113) 《环境科学》征稿简则(238) 信息(93, 262, 342)

古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义

桂娟^{1,2}, 李宗省^{1*}, 冯起¹, 卫伟³, 李永格^{1,2}, 吕越敏^{1,2}, 袁瑞丰¹, 张百娟¹

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院(筹), 内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃省水文水资源工程技术中心, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 依据古浪河流域古浪站(海拔2 085 m)和安远站(海拔2 700 m)所采集的降水样品和相关气象数据, 分析了降水稳定同位素的时空变化、局地大气水线, 讨论了温度、降水量和相对湿度与降水稳定同位素的关系。结果表明: ① 两站 $\delta^{18}\text{O}$ 均呈现出夏秋季高、冬春季低的特征; ② 从古浪到安远站, $\delta^{18}\text{O}$ 的月均值随海拔升高呈下降趋势, 相反地, d -excess 随海拔升高呈增加趋势, 反映了当气团沿着山坡不断抬升时, 水汽再循环过程加强; ③ 稳定同位素特征表明该区除了受干燥的环境和较强的蒸发影响外, 可能还受到局地水汽再循环影响; ④ 处于低海拔地区的古浪站的温度效应比安远站更显著, 古浪河流域整体上并没有呈现出降水量效应。该研究结果有助于进一步深入了解古浪河流域的水循环过程。

关键词: 稳定同位素; 古浪河流域; 大气降水; 环境意义; 干旱区

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0149-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201804040

Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin

GUI Juan^{1,2}, LI Zong-xing^{1*}, FENG Qi¹, WEI Wei³, LI Yong-ge^{1,2}, LÜ Yue-min^{1,2}, YUAN Rui-feng¹, ZHANG Bai-juan¹

(1. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Gansu Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Based on the precipitation samples and meteorological data simultaneously collected during individual precipitation events at the Gulang (2 085 m a. s. l.) and Anyuan stations (2 700 m a. s. l.) in Gulang, this article analyzes the temporal variation and local meteoric water lines and discusses the relationship between precipitation stable isotopes and temperature and precipitation and relative humidity. The results show that: ① Gulang and Anyuan have higher $\delta^{18}\text{O}$ values in summer and autumn and lower $\delta^{18}\text{O}$ values in spring and winter, respectively; ② The value of $\delta^{18}\text{O}$ decreases with increasing altitude, while the value of the d -excess increases, reflecting the gradual depletion of stable isotopes of precipitation when the air mass is rising along the slope; ③ The slope and intercept of the local meteoric water lines deviate from that of the global meteoric water lines, showing that they may also be affected by local water vapor recirculation, except for the dry environment and strong evaporation effect; and ④ The temperature effect of Gulang in the low-altitude area is more significant than that of the Anyuan station and the Gulang River Basin does not show a precipitation effect. It has been proven that precipitation is not the fundamental factor determining the $\delta^{18}\text{O}$ of the precipitation in arid areas. The results of this study are helpful to further understand the water circulation mechanism in the Gulang River Basin.

Key words: stable isotopes; Gulang River Basin; precipitation; Environmental significance; arid region

大气降水是水循环的关键环节, 降水中稳定同位素除会受地方性因素如气温、降水量、相对湿度、海拔等影响, 大气环流过程中的水汽输送对同位素浓度的影响也很大^[1, 2], 与传统水文研究方法相比, 稳定同位素方法更能清晰地阐释关键的水循环过程。目前, 降水同位素方法已被广泛应用到了我国西北地区的水文水资源研究中, 研究区集中在祁连山地区^[3, 4]、新疆地区^[5]、乌鲁木齐河流域^[6~8]、黑河流域^[9~11]、石羊河流域^[12], 内容主要包括降水稳定同位素的组成特征、时空分布特征、变化规律、模拟、水汽来源示踪以及各气象要素

(温度, 降水量, 相对湿度, 平均水汽压)与降水的关系方面, 这些研究分析了降水中同位素的各种环境效应, 为探讨水循环特征提供了相应的理论依据^[13]。但目前对古浪河流域的相关研究还很少, 所以本文希望通过对古浪河流域降水同位素进一步地

收稿日期: 2018-04-05; 修订日期: 2018-07-09

基金项目: 中国科学院青年创新促进会优秀会员人才计划项目(2013274); 中国科学院大学生科技创新实践计划项目; 城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目(SKLURE2018-2-6); 国家自然科学基金项目(91547102); 甘肃省杰出青年基金项目(1506RJDA282)

作者简介: 桂娟(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高寒山区同位素水文过程, E-mail: guijuan6894@163.com

* 通信作者, E-mail: lizhhs@163.com

研究,深入了解该区域的水循环过程,以期为该区域合理利用水资源提供科学的依据。

1 研究区概况

古浪河流域发源于祁连山支脉毛毛山、乌鞘岭、雷公山北麓(图1),位于河西走廊东段,是石羊河流域的重要组成部分,北部属古浪县,人类活动剧烈,南部则是开发相对较少的天然林地,位于天祝藏族自治县以内。流域面积 882 km²,海拔 1 550 ~ 3 469 m,地貌类型复杂多样,垂直地带性现象明显,自南向北依次分布着干旱半干旱中高山地、低山丘陵沟壑区、倾斜平原绿洲农业区植被稀少。古浪河共有萱麻河、黄羊川河等 7 条支流,全部通过红水河汇入石羊河干流,进入民勤盆地^[14, 15]。该流域地处西北干旱区,蒸发强烈,年平均降水量仅为 361.3 mm,蒸发量却高达 1 783.8 mm,水资源十分短缺,森林覆盖率仅为 14.9%,生态环境脆弱,如何合理利用水资源成为该区域当前面临的严峻问题,深入了解当地水循环过程是解决该问题最关键的突破口^[16]。

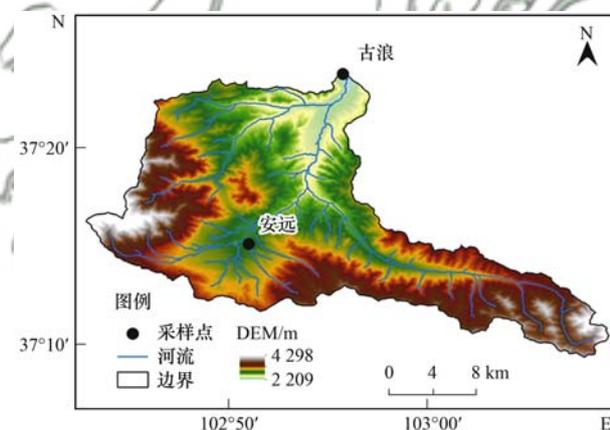


图1 古浪河流域位置及降水采样点分布示意

Fig. 1 Source region of the Gulang River and precipitation sampling points

2 材料与方法

本文选取了古浪河流域下游的古浪站(37.45° N, 102.88° E, 海拔 2 085 m)和上游的安远站(37.25° N, 102.85° E, 海拔 2 700)作为降水采集点(图1),2013年7月到2014年7月期间,委托当地气象观测人员完成一个水文年降水样品的采集,共采集到 198 个样品,古浪站和安远站分别采集了 96 和 102 个,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,并采集一个样品。为避免样品污染,样品采集用降水收集器完成,收集器放在屋顶(离地面 8 m)。每次降水事件之后,收集到的雨水

或降雪被存入提前净化好的聚乙烯样品瓶中。采集后瓶口立即用封口膜封住,以防蒸发影响。所有样品收集后以冷冻状态运回实验室测试分析。采样期间,同时记录降水量、风速和湿度等气象参数。降水氢氧稳定同位素的测试分析在中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室室内完成。用稳定同位素红外光谱技术的液态水稳定同位素分析仪(Model DLT-100, Los Gatos Research, Inc, Mountain View, CA)测定降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 和 D/H 的测试精度分别为 0.2‰和 0.5‰,符合张自超等对稳定同位素分析结果的有效位数规则^[17]。测定结果用 VSMOW 和实验室工作标准进行校准,最终结果以相对于维也纳标准平均海洋水(vienna standard oceanic water, V-SMOW)的千分差形式表示:

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

式中, R_{sample} 和 $R_{\text{V-SMOW}}$ 分别代表降水样与维也纳标准平均海洋水中的氧或氢稳定同位素比率 $R[(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})/\text{D}/\text{H}$ 或 $R(\text{D}/\text{H})]$ 。

3 结果与分析

3.1 降水稳定同位素的时间变化

如图2所示,古浪河流域降水 $\delta^{18}\text{O}$ (δD)和 $d\text{-excess}$ 值的变化范围为 $-23.74\text{‰} \sim 7.1\text{‰}$ ($-175.91\text{‰} \sim 37.07\text{‰}$)和 $-20.45\text{‰} \sim 33.83\text{‰}$,加权均值分别为 -5.8‰ (-32.4‰)和 13.8‰ 。 $\delta^{18}\text{O}$ 冬夏相差高达 30‰之多, $d\text{-excess}$ 值相差超过 50‰。因为冬、春季降水水汽主要由西风输送,水汽在长距离输送过程中, $\delta^{18}\text{O}$ 不断受淋洗作用而持续偏负^[18],而夏秋季 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受云下蒸发的影响,导致 $\delta^{18}\text{O}$ 不断富集而偏正,该过程对降水量较小的降水事件影响更为显著,如古浪站7月4日降水量为 0.4 mm、 $\delta^{18}\text{O}$ 是 2.2‰,安远站8月1日降水量为 1.2 mm、 $\delta^{18}\text{O}$ 是 1.3‰。两站 $\delta^{18}\text{O}$ 季节变化呈现出明显的夏秋季较高、冬春季较低的特征,其中古浪站最小值为 -23.7‰ (2014年2月17日),最大值为 5.1‰(2013年7月18日)。2013年4~9月 $\delta^{18}\text{O}$ 值较为稳定,从10月开始大幅度波动下降,到次年2月达到最小值,然后波动上升,4月开始趋于稳定(图2);安远站 $\delta^{18}\text{O}$ 最小值为 -20‰ (2013年10月31日),最大值为 1.9‰(2013年9月1日);可以看出 $\delta^{18}\text{O}$ 值从2013年5月开始波动上升,直到8月达到最大值,然后波动下降,在10月和次年2月出现了两个谷值,从次年3月开始大幅度上升(图2)。

$d\text{-excess}$ 同样呈现出季节变化特征,两站 $\delta^{18}\text{O}$ 和

d -excess 值在一些降水事件表现出反向变化趋势，与安远站相比，古浪站这种趋势更明显。对于夏秋季降水事件，偏负的 $\delta^{18}\text{O}$ 伴随高 d -excess，这种特征出现在以下降水事件：古浪站 2013 年 7 月 14、26 日，8 月 21、23 日，9 月 18、22 日；安远站则出现在同年 7 月 3、9 日，8 月 27、29 日，9 月 24、30 日；

Dansgaard^[19]在前人基础上首次定义了过量氘： $d\text{-excess} = \delta\text{D} - 8 \delta^{18}\text{O}$ ，有研究表明降水中的 d -excess 主要受水汽来源地水体蒸发时周围环境空气相对湿度影响^[20]，夏秋季温度高、湿度小，强烈的蒸发形成的局地水汽再循环，致使该区降水中出现极高的 d -excess 值。

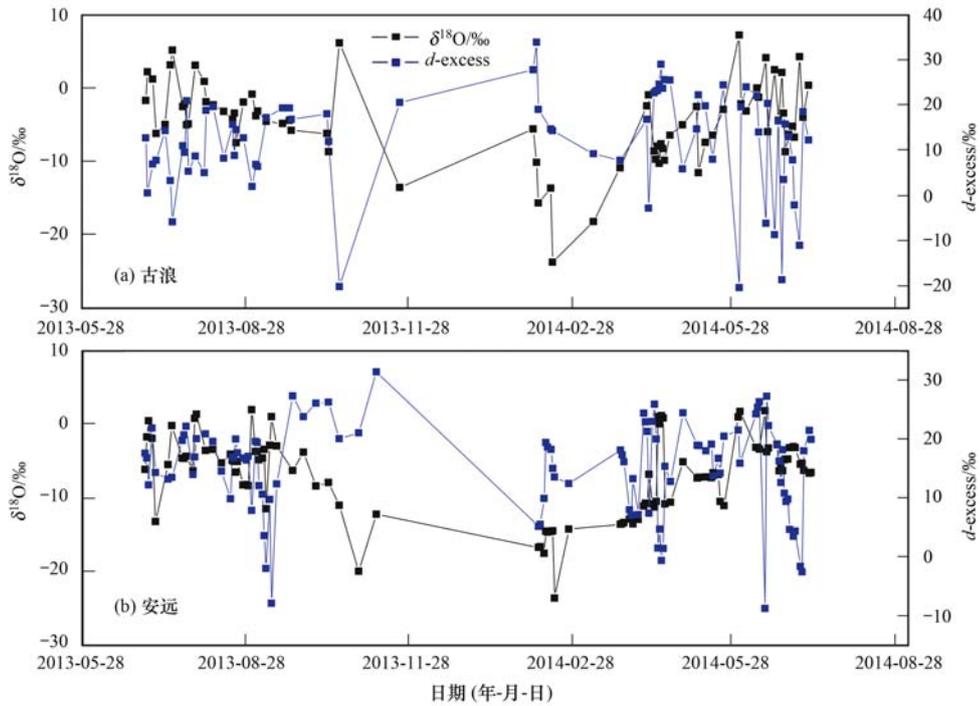


图 2 古浪站和安远站 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d -excess 随时间变化

Fig. 2 Daily variation of $\delta^{18}\text{O}$ and d -excess in precipitation samples from Gulang and Anyuan

3.2 降水稳定同位素的空间变化

当气团沿着山坡爬升时，水汽再循环过程会加强^[21]，如图 3 所示，从古浪到安远站， $\delta^{18}\text{O}$ 的加权月均值随海拔升高呈下降趋势，相反地， d -excess 随海拔上升呈升高趋势，因为低海拔的古浪站与高海拔的安远站相比，气温更高、饱和水汽压更低，使得云

下蒸发主导降水稳定同位素演化，进而使 $\delta^{18}\text{O}$ 趋于正值， d -excess 趋于负值^[22]；高海拔地区温度较低、降水量较大，使得降水中的稳定同位素演化主要受水汽再循环影响，微弱的云下蒸发和水汽再循环影响使 $\delta^{18}\text{O}$ 趋于负值而使 d -excess 趋于正值。从古浪站到安远站温度降低了 4.6℃，古浪站 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 和 d -excess 的均值分别为 -4.43‰、-22.80‰ 和 12.61‰，安远站分别为 -6.92‰、-40.49‰ 和 14.87‰，这种差异反映了云下蒸发的影响会导致 d -excess 月均值偏低，这可解释古浪站 d -excess 月均值较低。这一结论与祁连山地区的研究结果相符^[23]；也与托来河流域的研究结果相一致^[24]。

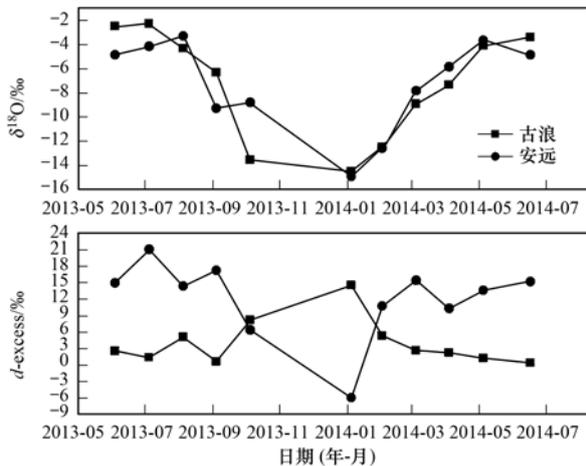


图 3 古浪河流域不同站点月 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d -excess 的变化

Fig. 3 Comparison of the monthly $\delta^{18}\text{O}$ and d -excess at difference altitudes in the Gulang River Basin

3.3 局地降水线

根据古浪站和安远站实测降水氢氧稳定同位素数据计算得到两地局地大气降水线分别为： $\delta\text{D} = 7.38 \delta^{18}\text{O} + 6.84$ ($R^2 = 0.94$) 和 $\delta\text{D} = 7.74 \delta^{18}\text{O} + 13.05$ ($R^2 = 0.96$)，如图 4 所示，两站大气降水线的斜率均略小于 8，古浪与安远站相比，斜率更偏离 8，反映出古浪河流域海拔较低、气候干燥，蒸发作用强烈且位于低海拔地区的古浪站受蒸发作

用影响更大;另外,两站大气降水线的斜率均略低于我国(7.9)和我国北方地区(7.88)大气降水线的斜率,但略高于我国西北地区大气水线斜率(7.05),这一现象表明该区除了受较强的蒸发影响外,可能还受到局地水汽再循环影响。

进一步计算了冬半年和夏半年的大气降水线,得到古浪和安远夏半年降水的 δD - $\delta^{18}O$ 关系方程分别为 $\delta D = 6.49 \delta^{18}O + 7.19$ ($R^2 = 0.92$)和 $\delta D = 7.61 \delta^{18}O + 13.95$ ($R^2 = 0.94$),冬半年分别为: $\delta D = 8.08 \delta^{18}O + 20.08$ ($R^2 = 0.96$)和 $\delta D = 7.43 \delta^{18}O + 7.15$ ($R^2 = 0.97$);

显然,古浪夏半年降水的大气水线方程斜率(6.49)低于全球大气水线(表1)和古浪年降水线,而冬半年则略高于全球大气水线(表1)和古浪年降水线,主要反映了降水过程中动力分馏差异很大^[25],夏季,温度较高,受云下蒸发的影响较大,使得降水中的重同位素不断富集而偏正,冬季温度偏低,受再循环水汽和云下蒸发的影响均较小,可以忽略不计;与古浪站相比,安远站大气水线呈现出不同的特征即冬半年和夏半年大气水线的斜率和截距相差不大,稳定在安远站年降水线附近。

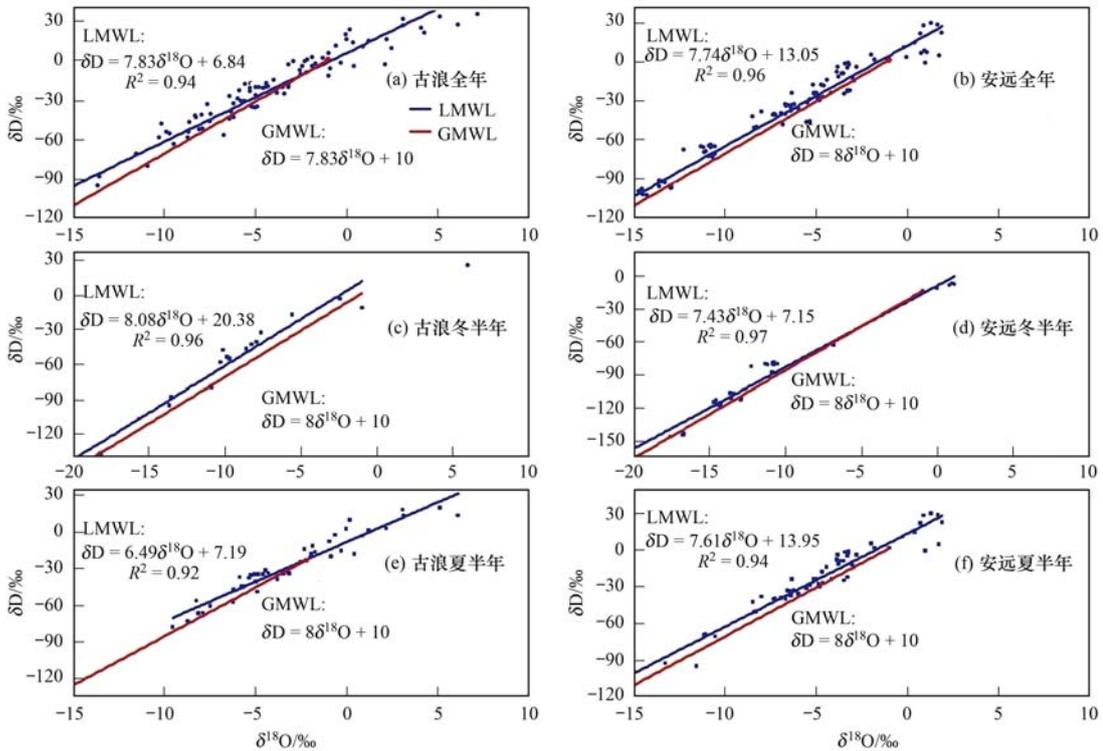


图4 古浪河流域大气降水线

Fig. 4 Local meteoric water line of the Gulang River Basin

表1 部分研究区域局地大气降水线比较

Table 1 Comparison of the local meteoric water line of different regions in China

研究区	局地大气水线(LMWL)	文献
我国	$\delta D = 7.9 \delta^{18}O + 8.2$	[26]
中国北方地区	$\delta D = 7.88 \delta^{18}O + 9.42$	[27]
中国西北地区	$\delta D = 7.05 \delta^{18}O - 2.17$	[28]
古浪	$\delta D = 7.38 \delta^{18}O + 6.84$	本研究
安远	$\delta D = 7.74 \delta^{18}O + 13.05$	本研究

4 讨论

4.1 降水稳定同位素与温度的关系

如图5所示,在不同温度区间内 $\delta^{18}O$ 和 d -excess的组合形式差异很大,基于此,依据温度将所有数据分成3组.第1组数据温度在 $0^{\circ}C$ 以下,主要是发生在冬、春季节的降雪事件,由表2可以看出 $\delta^{18}O$ 与温度的相关系数显著高于第2组(温度 $0 \sim$

$10^{\circ}C$)即呈现明显的温度效应,加之冬春季温度较低,受云下蒸发和水汽再循环的影响很小,稳定同位素浓度主要受平衡分馏的影响;第2组数据对应的温度范围在 $0 \sim 10^{\circ}C$ 之间,随温度变化 $\delta^{18}O$ 和 d -excess呈稳定状态,稳定同位素与温度不相关,表明云下蒸发引起的 $\delta^{18}O$ 富集被局地水汽再循环过程引起的贫化效应所抵消;第3组数据温度大于 $10^{\circ}C$,主要为夏、秋季的降水事件,此时温度较高而湿度较低,导致强烈的云下蒸发使得 d -excess降低和 $\delta^{18}O$ 增加^[29, 30], $\delta^{18}O$ 值随温度的升高而降低,即表现出温度效应,与 $\delta^{18}O$ 不同的是, d -excess随气温的升高而降低,表明强烈的云下蒸发抵消并超越了水汽再循环对稳定同位素的贫化效应.由表2可以看出古浪站 $\delta^{18}O$ 与气温呈显著正相关,而安远 $\delta^{18}O$ 与气温之间则没有明显的相关关系,这是因为

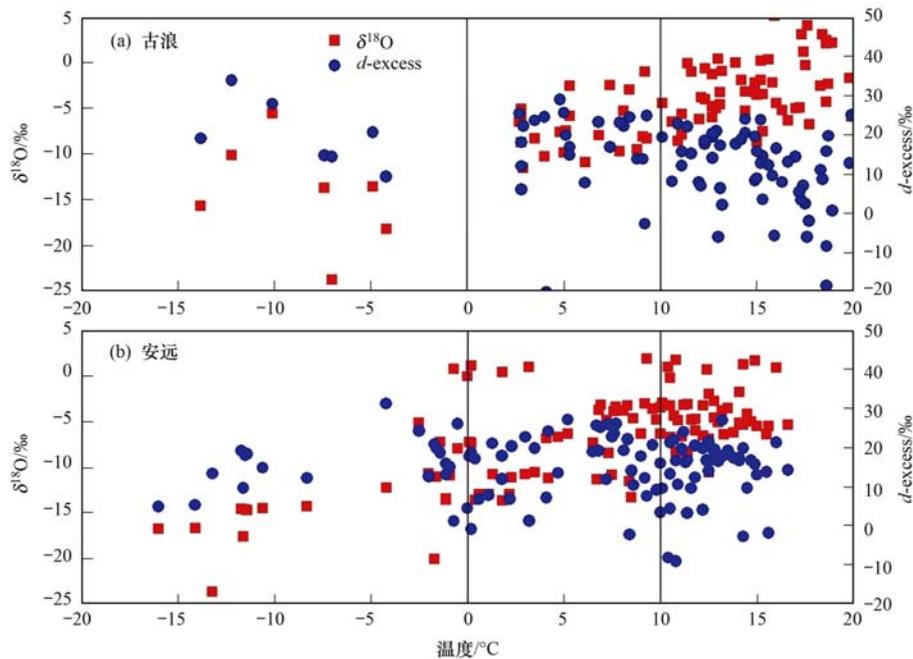


图 5 古浪站和安远站的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $d\text{-excess}$ 随气温的分布变化

Fig. 5 Plot of the temperature versus $\delta^{18}\text{O}$ and $d\text{-excess}$ at Gulang and Anyuan for different temperature ranges

安远海拔相对较高,受云下蒸发的影响小,使得同位素富集作用减弱,另一方面,高降水量事件也会减弱云下蒸发对稳定同位素的富集作用。

第 1 组数据(温度低于 0°C) $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的相关

系数显著高于第二组(温度 0 ~ 10°C)。当降水事件发生在低于 0°C 时,遵从瑞利模型原理,另外,位于低海拔的古浪站温度效应比安远站更显著(表 2),反映了温度效应的局地差异性。

表 2 古浪站和安远站 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $d\text{-excess}$ 在不同温度范围内的温度效应

Table 2 Temperature effect of the $\delta^{18}\text{O}$ and $d\text{-excess}$ at different temperature ranges at Anyuan and Gulang

站名	$\delta^{18}\text{O}$ 温度效应/ $\text{‰}\cdot\text{°C}^{-1}$			所有降水事件
	0°C 以下	0 ~ 10°C	10°C 以上	
安远	0.606 ($R^2 = 0.395$)	0.353 ($R^2 = 0.070$)	0.043 ($R^2 = 0.069$)	0.457 ($R^2 = 0.462$)
古浪	-0.625 ($R^2 = 0.155$)	0.119 ($R^2 = 0.005$)	0.598 ($R^2 = 0.229$)	0.471 ($R^2 = 0.480$)
站名	$d\text{-excess}$ 温度效应/ $\text{‰}\cdot\text{°C}^{-1}$			所有降水事件
	0°C 以下	0 ~ 10°C	10°C 以上	
安远	0.462 ($R^2 = 0.125$)	0.331 ($R^2 = 0.020$)	0.538 ($R^2 = 0.013$)	0.0008 ($R^2 = 6\text{e} - 07$)
古浪	-1.478 ($R^2 = 0.401$)	0.038 ($R^2 = 7\text{e} - 05$)	-1.689 ($R^2 = 0.221$)	-0.601 ($R^2 = 0.176$)

1) 黑体字表示通过显著性检验的相关系数 ($P < 0.05$), 下同

4.2 降水稳定同位素与降水量和相对湿度的关系

两站点全年降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 并没有随降水量的增大而贫化 ($y = 0.056x + 5.82, R^2 = 0.002$), 这一现象证明了降水量效应在内陆地区通常不显著^[31, 32]。雨滴在下降过程中可能经历了二次蒸发或雨滴凝结时混入了一定量的局地再循环的水汽, 这种现象在干旱区夏秋季更常见, 因此本文进一步分析夏季(6 ~ 8 月)同位素与降水量的关系, 发现 2013 年 6 ~ 8 月, 安远站没有表现出降水量效应, 古浪站 7 月的降水事件没有呈现出明显的温度效应, 但 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 却呈现出微弱的降水量效应, 可能是受季风影响造成的, 因为天气尺度下, 受季风水汽的影响, 在一定程度上引起了降水量与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的微弱负相关^[33], 进一

步证实了在内陆干旱区, 降水量并不是影响降水同位素的根本因素(表 3)。

另外, 无论是夏半年还是冬半年持续降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值会逐渐偏负^[34], 如表 4 所示, 夏半年古浪站 6 月 17 ~ 20 日连续降水事件中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 分别从 0.0‰和 17.6‰下降至 -5.6‰和 -29.5‰, 安远站 8 月 20 ~ 22 日连续降水中, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 分别从 -4.16‰和 -23.63‰下降至 -5.11‰和 -24.35‰; 冬半年连续降水中, 古浪站 2 月 8 ~ 9 日 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 从 -10.1‰和 -47.3‰下降至 -15.7‰和 -106.4‰, 安远站 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 分别从 2 月 17 日的 -14.5‰和 -101.5‰下降至 2 月 18 日的 -23.7‰和 -175.9‰; 其原因是降水开始时水汽云团中相对富含重同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD , 但在形成降

水的过程中,富含 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的水汽优先凝结降落,汽云团中的重同位素越来越贫化,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 导致降水初期同位素值较高,随着降水的持续,水值也越来越偏负(表4).

表3 古浪站和安远站夏季降水稳定同位素的温度和降水量效应

Table 3 Isotopic temperature and amount effects at Gulang and Anyuan in summer

站点	日期(年-月)	$\delta^{18}\text{O}$ 降水量效应 /‰·°C ⁻¹	$\delta^{18}\text{O}$ 温度效应 /‰·°C ⁻¹	δD 降水量效应 /‰·mm ⁻¹	δD 温度效应 /‰·mm ⁻¹	降水次数
古浪	2013-06	-0.33 ($R^2=0.02$)	0.27 ($R^2=0.08$)	-0.23 ($R^2=0.05$)	3.06 ($R^2=0.14$)	9
	2013-07	-0.31 ($R^2=0.18$)	0.28 ($R^2=0.21$)	-3.03 ($R^2=0.11$)	5.62 ($R^2=0.24$)	12
	2013-08	1.32 ($R^2=0.05$)	0.46 ($R^2=0.20$)	0.56 ($R^2=0.16$)	3.11 ($R^2=0.18$)	8
安远	2014-06	-0.38 ($R^2=0.09$)	0.14 ($R^2=0.04$)	-0.9 ($R^2=0.02$)	2.82 ($R^2=0.11$)	16
	2013-07	0.15 ($R^2=0.03$)	-0.17 ($R^2=0.03$)	2.18 ($R^2=0.05$)	-1.21 ($R^2=0.02$)	12
	2013-08	0.28 ($R^2=0.01$)	0.3 ($R^2=0.16$)	0.433 ($R^2=0.02$)	7.37 ($R^2=0.11$)	12

表4 古浪站和安远站连续降水事件的天气状况及稳定同位素浓度变化

Table 4 Variation of the isotopic composition and weather conditions for continuous precipitation events at Gulang and Anyuan

站点	日期(年-月-日)	降水类型	降水量/mm	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta\text{D}/\text{‰}$	$d\text{-excess}/\text{‰}$	$t/^\circ\text{C}$
古浪	2013-06-17	雨	2.8	0.0	-17.6	17.6	13.9
	2013-06-18	雨	2.6	-0.6	-12.6	17.6	12.3
	2013-06-19	雨	4.3	-1.0	-7.4	15.1	11.6
	2013-06-20	雨	8.6	-5.6	-29.5	15.6	11.1
	2014-02-08	雪	1.5	-10.1	-47.3	33.8	-12.2
	2014-02-09	雪	1.2	-15.7	-106.4	19.0	-13.8
安远	2013-08-20	雨	5.7	-4.16	-23.63	9.7	16.6
	2013-08-21	雨	1.1	-5.00	-23.36	16.7	14.5
	2013-08-22	雨	4.9	-5.11	-24.35	16.5	14.7
	2014-02-17	雪	5.7	-14.5	-101.5	14.8	-10.6
	2014-02-18	雪	4	-23.7	-175.9	13.4	-13.2

如图6,随平均相对湿度的增大,两站的 $d\text{-excess}$ 值均成增大趋势,就 $\delta^{18}\text{O}$ 而言,古浪站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 随着形成降水时大气的平均相对湿度的增大而减小,安远则呈现增大的趋势;具体为:古浪站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与形成降水时大气的平均相对湿度呈不显著

负相关($y = -0.11x + 3.29, R^2 = 0.08$),安远站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与平均相对湿度呈不显著正相关($y = 0.003x - 7.243, R^2 = 0.1$);就 $d\text{-excess}$ 而言,古浪站降水 $d\text{-excess}$ 与形成降水时大气的平均相对湿度成显著正相关($y = 0.34x - 10.55, R^2 = 0.17$)而安远站则

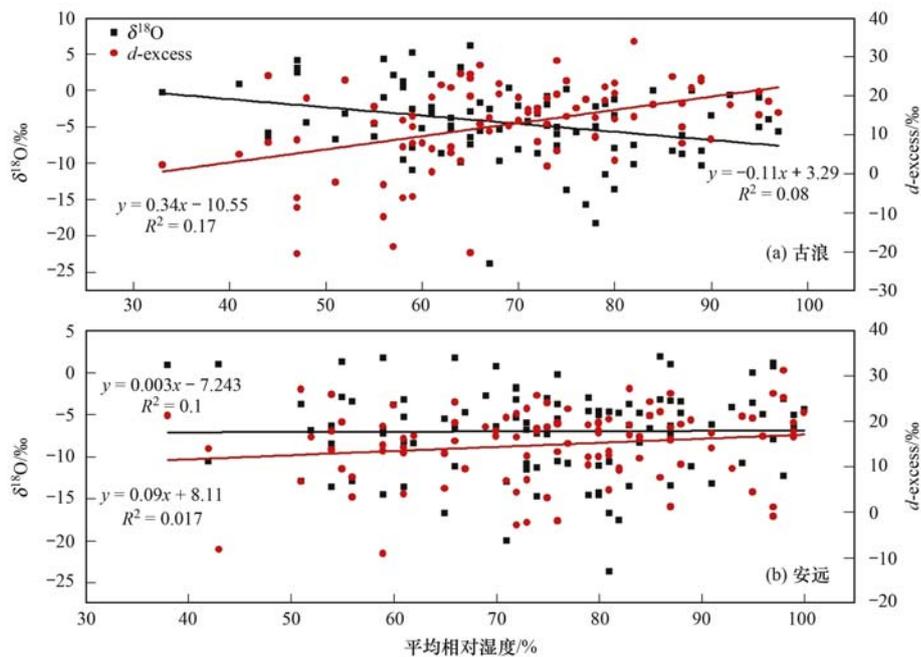


图6 古浪站和安远站 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $d\text{-excess}$ 与相对湿度的关系

Fig. 6 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$, $d\text{-excess}$, and relative humidity at Gulang and Anyuan

成微弱正相关($y = 0.09x + 8.11$, $R^2 = 0.017$); d -excess 的变化主要与气温和相对湿度有关, 古浪流域降水 d -excess 随气温的上升逐渐降低, 随湿度的增加而增加, 原因可能是雨滴在高温低湿的天气条件下从云层降落到地面的过程中二次蒸发明显增强, 导致 d -excess 显著降低。

5 结论

(1) 两站 $\delta^{18}\text{O}$ 都呈现明显的夏秋高、冬春低的特征, 由于冬、春季水汽源自西风环流且长距离输送, 不断受淋洗作用而持续偏负, 而夏、秋季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的值则主要受云下蒸发的影响而偏正; 两站 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d -excess 在一些降水事件上表现出反向变化趋势。

(2) 从古浪到安远站, $\delta^{18}\text{O}$ 的月均值随海拔升高整体呈下降趋势, 相反地, d -excess 随海拔升高呈增加趋势。

(3) 古浪和安远的大气水线分别为: $\delta\text{D} = 7.38 \delta^{18}\text{O} + 6.84$ ($R^2 = 0.94$) 和 $\delta\text{D} = 7.74 \delta^{18}\text{O} + 13.05$ ($R^2 = 0.96$), 斜率均略低于我国(7.9)和我国北方地区(7.88)的斜率, 但略高于我国西北地区大气水线斜率(7.05), 表明该区除受较强的蒸发影响外, 可能还受局地水汽再循环影响。

(4) 位于低海拔地区的古浪站温度效应比安远更显著, 且温度效应在不同的温度范围内并不是一成不变的; 古浪河流域无论是全年还是夏半年均没有表现出明显的降水量效应。

参考文献:

- [1] 彭靖, 陈建生, 杨光亮, 等. 银川地区降水氢氧同位素变化规律分析[J]. 河南科学, 2014, **32**(10): 2094-2098.
Peng J, Chen J S, Yang G L, et al. Hydrogen and oxygen isotope changing trend analysis of precipitation in Yinchuan area [J]. Henan Science, 2014, **32**(10): 2094-2098.
- [2] 田立德, 姚檀栋, Stievenard M, et al. 中国西部降水中 δD 的初步研究[J]. 冰川冻土, 1988, **20**(2): 175-179.
Tian L D, Yao T D, Stievenard M, et al. A study of hydrogen isotope in precipitation in west China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, **20**(2): 175-179.
- [3] 冯芳, 冯起, 刘贤德, 等. 祁连山排露流域降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 特征及水汽来源[J]. 中国沙漠, 2017, **37**(5): 1997-1005.
Feng F, Feng Q, Liu X D, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation and moisture sources of Pailugou catchment in the Qilian mountains [J]. Journal of Desert Research, 2017, **37**(5): 1997-1005.
- [4] 王宁练, 张世彪, 贺建桥, 等. 祁连山中段黑河上游山区地表径流水资源主要形成区域的同位素示踪研究[J]. 科学通报, 2009, **54**(15): 2148-2152.
Wang N L, Zhang S B, He J Q, et al. Tracing the major source area of the mountainous runoff generation of the Heihe River in northwest China using stable isotope technique [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, **54**(16): 2751-2757.
- [5] 刘小康, 饶志国, 张肖剑, 等. 天山地区大气降水氧同位素的影响因素及其对西风环流变化的指示意义[J]. 地理学报, 2015, **70**(1): 97-109.
Liu X K, Rao Z G, Zhang X J, et al. Variations in the oxygen isotopic composition of precipitation in the Tianshan Mountains region and their significance for the Westerly circulation [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(1): 97-109.
- [6] 姚檀栋, 孙维贞, 蒲健辰, 等. 内陆河流域系统降水中的稳定同位素—乌鲁木齐河流域降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度关系研究[J]. 冰川冻土, 2000, **22**(1): 15-22.
Yao T D, Sun W Z, Pu J C, et al. Characteristics of stable isotope in precipitation in the inland area—a case study of the relation between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and temperature in Ürümqi River, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, **22**(1): 15-22.
- [7] 李小飞, 张明军, 李亚举, 等. 西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 711-719.
Li X F, Zhang M J, Li Y J, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and moisture transports over the arid region in Northwest China [J]. Environmental Science, 2012, **33**(3): 711-719.
- [8] 侯典炯, 秦翔, 吴锦奎, 等. 乌鲁木齐大气降水稳定同位素与水汽来源关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, **25**(10): 136-142.
Hou D J, Qin X, Wu J K, et al. Characteristics of stable isotopes in precipitation and the water vapor sources in Ürümqi [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, **25**(10): 136-142.
- [9] 张应华, 许彦卿. 黑河流域大气降水水汽来源分析[J]. 干旱区地理, 2008, **31**(3): 403-408.
Zhang Y H, Xu Y Q. Precipitation from different water vapor sources in the Heihe River Basin, China [J]. Arid Land Geography, 2008, **31**(3): 403-408.
- [10] 张应华, 许彦卿. 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.
- [11] 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.
- [12] 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, 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.
- [13] 刘君, 郭华良, 刘福亮, 等. 包头地区大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 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 L F, et al. The variations of stable isotopes (δD and $\delta^{18}\text{O}$) in the precipitation in Baotou area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, **27**(5): 157-162.
- [14] 露露, 刘明春, 胡正华, 等. 石羊河流域气候变化及对作物生育期的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, **31**(5): 19-27.
Sheng L, Liu M C, Hu Z H, et al. Characteristics of climate change and its influence on growth period of crops in Shiyang River basin [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, **31**(5): 19-27.

- [15] 张兰影, 庞博, 徐宗学, 等. 古浪河流域气候变化与土地利用变化的水文效应[J]. 南水北调与水利科技, 2014, **12**(1): 42-46.
Zhang L Y, Pang B, Xu Z X, *et al.* Impacts of climate change and LUCC on hydrological processes in the Gulang River Basin [J]. South-to-North water Transfers and Water Science & Technology, 2014, **12**(1): 42-46.
- [16] 宋献方, 柳鉴容, 孙晓敏, 等. 基于 CERN 的中国大气降水同位素观测网络[J]. 地球科学进展, 2007, **22**(7): 738-747.
Song X F, Liu J R, Sun X M, *et al.* Establishment of Chinese network of isotopes in precipitation (CHNIP) based on CERN [J]. Advances in Earth Science, 2007, **22**(7): 738-747.
- [17] 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.
- [18] Li Z X, Gao Y, Wang Y M, *et al.* Can monsoon moisture arrive in the Qilian Mountains in summer? [J]. Quaternary International, 2015, **358**: 113-125.
- [19] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. Tellus B, 1964, **16**(4): 436-468.
- [20] Merlivat L, Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1979, **84**(C8): 5029-5033.
- [21] Pang Z H, Kong Y L, Froehlich K, *et al.* Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region [J]. Tellus, 2011, **63**(3): 352-359.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Froehlich K, Gibson J J, Aggarwal P. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance [A]. In: Proceedings of Study of Environmental Change Using Isotope Techniques [C]. Vienna, Austria: IAEA, 2002. 54-66.
- [26] 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, (13): 801-806.
Zheng S H, Hou F G, Ni B L. The studies of hydrogen and oxygen stable isotopes in atmospheric precipitation in China [J]. Chinese Science Bulletin, 1983, **28**(13): 801-806.
- [27] 刘进达, 赵迎昌, 刘恩凯, 等. 中国大气降水稳定同位素时空分布规律探讨[J]. 勘察科学技术, 1997, (3): 34-39.
Liu J D, Zhao Y C, Liu E K, *et al.* Discussion on the stable isotope time-space distribution law of China atmospheric precipitation [J]. Site Investigation Science and Technology, 1997, (3): 34-39.
- [28] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J]. 地理学报, 2000, **63**(1): 12-22.
Liu J R, Song X F, Yuan G F, *et al.* Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over northwest China and its water vapor sources [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, **63**(1): 12-22.
- [29] Zhou S Q, Nakawo M, Sakai A, *et al.* Water isotope variations in the snow pack and summer precipitation at July 1 Glacier, Qilian Mountains in northwest China [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, **52**(21): 2963-2972.
- [30] Li Z X, Feng Q, Wang Q J, *et al.* Contributions of local terrestrial evaporation and transpiration to precipitation using $\delta^{18}\text{O}$ and D-excess as a proxy in Shiyang inland river basin in China [J]. Global and Planetary Change, 2016, **146**: 140-151.
- [31] Wu J K, Ding Y, Ye B, *et al.* Spatio-temporal variation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River Basin, northwestern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, **61**(6): 1123-1134.
- [32] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点[J]. 地理学报, 1998, **53**(4): 356-364.
Zhang X P, Yao T D. Distributional features of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in China [J]. Acta Geographica Sinica, 1998, **53**(4): 356-364.
- [33] 章新平, 姚檀栋. 全球降水中氧同位素比率的分布特点[J]. 冰川冻土, 1994, **16**(3): 202-210.
Zhang X P, Yao T D. World spatial characteristics of oxygen isotope ratio in precipitation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, **16**(3): 202-210.
- [34] 郭小燕, 冯起, 李宗省, 等. 敦煌盆地降水稳定同位素特征及水汽来源[J]. 中国沙漠, 2015, **35**(3): 715-723.
Guo X Y, Feng Q, Li Z X, *et al.* Variation of stable isotopes and moisture sources in precipitation at the Dunhuang basin in Northwest China [J]. Journal of Desert Research, 2015, **35**(3): 715-723.

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i>	(1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i>	(11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i>	(24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i>	(33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i>	(44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i>	(55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i>	(67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i>	(76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i>	(86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i>	(104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i>	(114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i>	(121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i>	(126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i>	(143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i>	(149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i>	(157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i>	(164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue	(192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i>	(200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i>	(211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i>	(219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i>	(228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan	(239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i>	(248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i>	(256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i>	(263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i>	(273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i>	(281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i>	(293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i>	(300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i>	(310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i>	(318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i>	(327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i>	(336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i>	(343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i>	(360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i>	(369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i>	(376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i>	(383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i>	(392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i>	(401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i>	(412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i>	(421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i>	(430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i>	(437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping	(445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i>	(453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong	(461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i>	(480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i>	(488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i>	(496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i>	(504)