

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 ..... 刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)

太原冬季 PM<sub>2.5</sub> 影响霾污染的关键尺度谱特征 ..... 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)

盘锦市冬季 PM<sub>2.5</sub> 水溶性离子特征及来源分析 ..... 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)

广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)

热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征 ..... 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 ..... 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬勇 (2548)

亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 ..... 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)

京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 ..... 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)

北京北运河河流生态系统健康评价 ..... 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)

长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 ..... 董磊, 汤显强, 林莉, 邴超, 黎睿, 吴敏 (2588)

福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 ..... 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴 (2600)

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 ..... 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 ..... 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 ..... 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 ..... 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧贇 (2632)

重庆雪玉洞洞穴滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义 ..... 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)

岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 ..... 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九程, 王正雄, 段世辉 (2651)

托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 ..... 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 ..... 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)

西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 ..... 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)

四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 ..... 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验 ..... 王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 ..... 刘森, 陈开宁 (2706)

江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 ..... 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪霞 (2715)

冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 ..... 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)

臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 ..... 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)

中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 ..... 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)

海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 ..... 曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 ..... 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试 ..... 杨宏, 胡银龙 (2763)

不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 ..... 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)

高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 ..... 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化 ..... 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 ..... 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 ..... 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)

四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 ..... 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响 ..... 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)

菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 ..... 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)

<sup>13</sup>C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 ..... 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 ..... 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)

江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 ..... 吕建树, 何华春 (2853)

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 ..... 于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)

典型小城市土壤重金属空间异质性及风险评价: 以临安市为例 ..... 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林子也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)

西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 ..... 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)

典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及风险评价 ..... 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 ..... 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)

厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 ..... 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)

矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 ..... 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 ..... 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)

吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 ..... 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)

喷施锌肥对油菜镉生物可给性的影响 ..... 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征 ..... 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)

废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 ..... 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 ..... 孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)

颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响 ..... 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)

防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 ..... 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)

《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)

# 托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义

李永格<sup>1,2</sup>, 李宗省<sup>1\*</sup>, 冯起<sup>1</sup>, 肖莲桂<sup>3</sup>, 吕越敏<sup>1,2</sup>, 桂娟<sup>4</sup>, 袁瑞丰<sup>4</sup>, 张百娟<sup>5</sup>

(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. 青海省天峻县气象局, 天峻 817200; 4. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 5. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050)

**摘要:** 为了探讨祁连山中段托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义, 依据该流域托勒站(3 367 m)和嘉峪关站(1 658 m)的降水样品和气象数据, 分析了降水稳定同位素的时间变化、局地大气水线、海拔变化, 讨论了降水稳定同位素与温度、降水量、平均水汽压和相对湿度的关系. 结果表明, 研究时段内托勒站和嘉峪关站降水稳定同位素具有一定的季节变化特征, 托勒站表现为夏秋较高值, 冬春季为较低值, 与托勒不同的是, 嘉峪关站春季较高, 其他季节较低. 嘉峪关站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和  $d$ -excess 值展现出显著的反向变化趋势, 托勒站则不显著, 随海拔升高对应的相关系数呈下降趋势, 反映了内陆河流域低海拔地区存在较强的云下蒸发, 同时高海拔地区受局地水汽再循环的强烈影响; 从嘉峪关到托勒站大气降水线的斜率和截距都明显升高, 表现出从低海拔到高海拔的增加趋势; 处于高海拔地区托勒站的温度效应比低海拔地区的嘉峪关站更显著, 对于气温在  $10^\circ\text{C}$  以上的降水事件而言, 托勒站 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温呈显著正相关, 嘉峪关站则表现出相反的变化趋势, 可能是嘉峪关站云下蒸发对高降水量事件稳定同位素的富集作用减弱, 使得呈现降水量效应; 从托勒站到嘉峪关站,  $\delta^{18}\text{O}$ 和  $d$ -excess 与平均水汽压的正相关关系减弱, 变化幅度也明显减小, 原因可能是从高海拔到低海拔地区, 水汽压升高, 饱和水汽压升高, 降水难以形成, 降水量较小, 降水稳定同位素受云下蒸发影响作用明显,  $\delta^{18}\text{O}$ 和  $\delta\text{D}$  偏正, 高海拔地区受局地水汽再循环的作用明显,  $\delta^{18}\text{O}$ 和  $\delta\text{D}$  偏负; 嘉峪关站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与平均相对湿度呈不显著正相关, 托勒站则相反. 研究结果为托来河流域同位素水文过程研究提供了理论依据.

**关键词:** 大气降水; 稳定同位素; 海拔; 托来河流域;  $\delta^{18}\text{O}$ ;  $\delta\text{D}$

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2661-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.201708087

## Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin

LI Yong-ge<sup>1,2</sup>, LI Zong-xing<sup>1\*</sup>, FENG Qi<sup>1</sup>, XIAO Lian-gui<sup>3</sup>, LÜ Yue-min<sup>1,2</sup>, GUI Juan<sup>4</sup>, YUAN Rui-feng<sup>4</sup>, ZHANG Bai-juan<sup>5</sup>

(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. Meteorological Administration of Tianjun, Tianjun 817200, China; 4. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 5. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Precipitation samples and meteorological data were collected simultaneously during individual precipitation events at Tuole station (3 367 m a. s. l.) and Jiayuguan station (1 658 m a. s. l.) in the Tuolai River Basin. A study of temporal variation, Local Meteoric Water Lines, and altitude change on precipitation stable isotopes was conducted. The relationships between precipitation stable isotopes and temperature, precipitation, average vapor pressure, and relative humidity were determined in order to explore the environmental significance of the stable isotopes at different altitudes in the middle reaches of the Qilian Mountains. The analysis indicated that the stable isotopes of the precipitation in Tuole and Jiayuguan station were characterized by pronounced seasonal variation, with Tuole having higher  $\delta^{18}\text{O}$  values in summer and autumn and lower  $\delta^{18}\text{O}$  values in spring and winter, while Jiayuguan displays higher  $\delta^{18}\text{O}$  values in spring and lower in other seasons. The  $d$ -excess was correlated negatively with  $\delta^{18}\text{O}$ , and the correlation coefficients between  $\delta^{18}\text{O}$  and  $d$ -excess decreased with increasing altitude due to weakening sub-cloud evaporation. The slope and intercept of the Local Meteoric Water Lines from Jiayuguan to Tuole rose significantly, showing an increasing trend from low altitude to high altitude. For the precipitation events above  $10^\circ\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  of Tuole was positively correlated with the temperature, but the Jiayuguan results indicated the opposite. Sub-cloud evaporation weakened with high precipitation events in Jiayuguan.  $\delta^{18}\text{O}$  and  $d$ -excess were

收稿日期: 2017-08-11; 修订日期: 2017-11-28

基金项目: 甘肃省杰出青年基金项目(1506RJDA282); 中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(2013274); 中国科学院大学生科技创新实践计划项目

作者简介: 李永格(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境过程和可持续发展, E-mail: 18354950235@163.com

\* 通信作者, E-mail: lizxhhs@163.com

positively correlated with the average vapor pressure, which declined from Tuole to Jiayuguan. Since the water vapor pressure and saturated water vapor pressure increased, it was difficult to form precipitation with decreasing altitude. The local strong sub-cloud evaporation caused  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  was positive at low altitude, while the effect of moisture recycling is obvious, such that  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  are negative in high altitude areas. There is no significant positive correlation between the  $\delta^{18}\text{O}$  and the relative humidity of the precipitation in Jiayuguan, while Tuole displays an opposite pattern. The results of the study will provide a scientific basis for further study of precipitation isotopes in the Tuolai River basin.

**Key words:** precipitation; stable isotopes; altitude; Tuolai River Basin;  $\delta^{18}\text{O}$ ;  $\delta\text{D}$

大气降水是水循环的重要组成部分,也是水资源的根本来源<sup>[1]</sup>. 降水中氢氧稳定同位素非常敏感地响应环境的变化,同时作为水循环的重要示踪元素,记载着水循环演化的重要历史信息<sup>[2~5]</sup>. 我国西北地区较干旱的气候条件和人类活动强度逐年加快,致使水资源短缺和如何合理利用水资源成为亟待解决的严峻问题. 大气降水氢氧同位素组成和时空分布规律为研究水汽来源、大气环流模式及深入认识水循环过程提供了重要的依据,进而有利于合理利用水资源<sup>[6,7]</sup>. 目前,环境同位素技术及其在水循环研究中的优越性已广泛被应用到西北地区的水文水资源研究<sup>[8,9]</sup>,针对各流域的研究已经取得明显进展,在降水稳定同位素方面,以乌鲁木齐河流域<sup>[10~12]</sup>、黑河流域<sup>[13~17]</sup>、石羊河流域<sup>[18,19]</sup>、河西走廊<sup>[20]</sup>为主,也包括党河<sup>[21]</sup>、葫芦沟<sup>[22]</sup>、托来河<sup>[23]</sup>等小流域和单一站点及周边地区,如张掖、兰州、乌鲁木齐等<sup>[24~26]</sup>,研究主要集中在降水稳定同位素的组分、时空分布特征、变化趋势、模拟、水汽来源以及和各气象要素的关系等方面. 但对于托来(讨赖)河流域的研究,目前主要是极端气候变化、潜在蒸发量、气温、降水和径流变化等方面<sup>[27~30]</sup>,具体针对该流域降水稳定同位素的研究较少,本文分析不同海拔地区嘉峪关和托勒站的降水氢氧稳定同位素的时间变化、局地大气降水线、海拔变化,并讨论降水稳定同位素与气象要素(降水、气温、平均水汽压、相对湿度)的关系,通过探讨该流域不同海拔地区降水稳定同位素的环境意义,以期对托来河流域同位素水文过程的进一步研究提供理论依据.

## 1 研究区概况

托来河(又名讨赖河)流域位于我国西北干旱地区、河西走廊中西部,发源于青海省祁连山中段、托来南山的托来掌,是黑河西支北大河的主要支流及源区<sup>[23]</sup>,流域东起马营河,西以嘉峪关境内黑山为界,南与疏勒河流域毗邻,北至金塔盆地的马鬃山,地理位置介于 $97^{\circ}16' \sim 99^{\circ}12' \text{E}$ ,  $38^{\circ}24' \sim$

$39^{\circ}36' \text{N}$ 之间(图1),海拔为2 000 ~ 5 300 m左右,出山口以上面积为7 095  $\text{km}^2$ . 气候为高寒半干旱气候,年均气温为 $0.5^{\circ}\text{C}$ ,降水多集中于夏季,年降水量从低山带的150 mm增加到高山区的450 mm,降水随海拔升高100 m而增加15.5 ~ 16.4  $\text{mm}$ <sup>[31]</sup>. 依据1960 ~ 2010年的观测数据,年均径流量为 $6.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,且主要集中在夏、秋季. 植被类型以灌木林和草原植被为主,土壤类型主要有高寒荒漠土、高寒草甸土和山地栗钙土<sup>[28]</sup>. 与黑河东支相似,流域内植被和土壤表现出明显的垂直地带性. 依据最新的黑河冰川变化研究结果,2010年托来河流域内共有435条冰川,其面积为153.95  $\text{km}^2$ <sup>[32]</sup>.

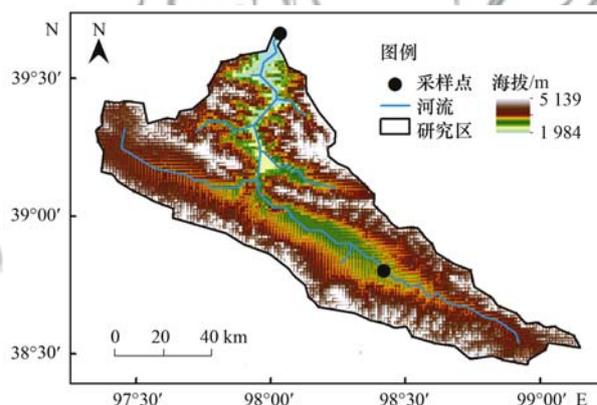


图1 托来河流域位置及降水采样点分布示意

Fig. 1 Source of the Tuolai River and sampling of precipitation

## 2 材料与方法

本文选取了位于托来河流域上游的托勒站(国家气象站,  $38.80^{\circ}\text{N}$ ,  $98.42^{\circ}\text{E}$ , 海拔3 367 m)和中游出山口的嘉峪关站(国家级水文站,  $39.75^{\circ}\text{N}$ ,  $98.27^{\circ}\text{E}$ , 海拔1 658 m)为降水样品采集点(图1). 虽然该流域只有2个采样站点,但托勒站分布在流域上游的产流区,嘉峪关站分布在中游区,能够代表整个流域的降水稳定同位素变化情况. 采样时间为2013年11月到2014年12月,委托气象观测人员完成降水样品的采集,期间共采集降水样品78个,托勒和嘉峪关站分别采集53和25个.

所有降水样品的采集,按照气象观测规定的降

水事件定义进行, 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. 样品的采集用降水收集器完成, 降水收集器被放在屋顶(离地面 8 m), 这样可以远离地面土壤和任何具体的污染源. 降水收集器配有 5L 聚乙烯收集瓶(底部)和直径为 26 cm 聚乙烯漏斗. 每次降水事件之后, 收集到的雨水或者降雪被存入提前净化好的聚乙烯样品瓶中. 为了避免降水样品可能的污染, 所有的采样设备在采样之前均作了洁净化清洗处理. 样品采集完成后, 采样瓶口立即用封口膜封住, 以防蒸发影响. 所有样品收集后立即存放在冰箱中, 然后以冷冻状态运回实验室开展测试分析. 在样品采集期间, 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科院内陆河流域生态水文重点实验室内完成. 采用基于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) 对降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  进行测试, 测试精度分别为  $0.2\text{‰}$  ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) 和  $0.5\text{‰}$  (D/H). 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, VSMOW) 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,  $R_{\text{sample}}$  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  $R$  ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 、D/H).

Dansgaard<sup>[2]</sup> 将全球降水中氢氧同位素比率出现的差值, 定义为过量氘 ( $d$ -excess 或  $d$ ), 其计算方程为  $d = \delta\text{D} - 8 \delta^{18}\text{O}$ , 降水中过量氘主要受制于水汽源区的温度、相对湿度和风速等气象条件,  $d$ -excess 值反映形成降水过程的气团同位素, 含有形成暖湿气团源区蒸发过程性质的重要信息, 包括蒸发过程的平衡或不平衡状态和蒸发速率等<sup>[33]</sup>, 过量氘是示踪水汽源区的一个重要参数.

### 3 结果与分析

#### 3.1 降水稳定同位素的时间变化

依据托勒和嘉峪关站的次降水稳定同位素数据 (图 2), 采样期间降水  $\delta^{18}\text{O}$  ( $\delta\text{D}$ ) 值的变化范围从  $-23.40\text{‰}$  ~  $5.48\text{‰}$  (从  $-196.18\text{‰}$  ~  $33.13\text{‰}$ ), 均值分别为  $-7.18\text{‰}$ 、 $-48.60\text{‰}$ ,  $d$ -excess 的均值为

$8.91\text{‰}$ , 变化范围从  $-40.33\text{‰}$  ~  $35.06\text{‰}$ .  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  和  $d$ -excess 的 6 ~ 8 月的均值分别为  $-4.79\text{‰}$ 、 $-30.97\text{‰}$ 、 $7.34\text{‰}$ , 9 ~ 12 月的均值分别为  $-10.58\text{‰}$ 、 $-71.90\text{‰}$ 、 $12.74\text{‰}$ . 明显 6 ~ 8 月  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值偏正, 9 月以后偏负,  $d$ -excess 变化则相反. 由于同一气团在输送、凝结过程中  $d$ -excess 保持不变<sup>[34]</sup>,  $d$ -excess 的变化表明流域内 6 ~ 8 月与 9 月以后形成降水的水汽来源存在差异. 已有研究表明: 在托来河流域, 6 ~ 8 月以西风水汽为主, 夏季强烈的蒸散发过程, 使水汽再循环影响大, 在天气尺度下, 季风水汽可以到达研究区, 9 月以后, 全部以西风水汽为主<sup>[35~37]</sup>. 较高的  $d$ -excess 值反映了干燥的西风气团沿途经过温暖水体时会携带的蒸发水汽或干旱气候条件下强烈的蒸散发所导致的局地再循环水汽<sup>[38]</sup>.

托勒站降水稳定同位素具有显著的季节性变化, 夏秋较高值, 冬春为较低值. 就其日变化而言, 托勒站降水稳定同位素  $\delta^{18}\text{O}$  值在 6 ~ 9 月较高, 其他月份其值较低. 例如: 较高的  $\delta^{18}\text{O}$  值出现在 2014 年 7 月 9 日、8 月的 19、22、28、29 日. 从 2013 年 11 月逐渐升高, 到次年 5 月略有降低, 然后从 6 ~ 7 月波动上升, 直到 8 月末达到最大值, 之后波动下降, 最低值出现在 10 月, 这些极值可能与 8 月强烈的蒸发和 10 月的低温降雪有关, 但也不排除其他气候条件和地形条件的影响.  $d$ -excess 在 2013 年 11 月逐渐下降, 到次年 5 月略有上升, 然后从 6 ~ 7 月波动下降, 之后波动上升, 直到 10 月达到最大值 (图 2). 托勒站  $\delta^{18}\text{O}$  和  $d$ -excess 值在一些降水事件或季节尺度上表现出反向变化趋势. 对于一些夏秋季降水事件, 偏负的  $\delta^{18}\text{O}$  伴随高  $d$ -excess, 托勒站的这些情况出现在 2014 年 6 月 20 日、7 月 7 日、8 月 10 日、9 月 16 ~ 17 日. 嘉峪关站则出现在同年的 6 月 27 日、7 月 20 日、10 月 3 日、12 月 20 日. 这可能是受来自海洋暖湿气团或局地水汽再循环的影响. 已有研究表明降水中的  $d$ -excess 主要受水汽源地水体蒸发时周围环境空气相对湿度的影响, 干旱地区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<sup>[39]</sup>.

嘉峪关站降水稳定同位素也表现出一定的季节性变化, 与托勒站不同, 春季较高, 其他季节较低. 4 ~ 6 月中旬  $\delta^{18}\text{O}$  值较高, 其他月份较低.  $\delta^{18}\text{O}$  值在 2014 年 2 月逐渐升高, 到 6 月达到最大值, 之后波动下降, 在 7 ~ 9 月保持相对稳定状态, 然后 10 月开始波动下降, 但最低值出现在 2 月. 嘉峪关站

$\delta^{18}\text{O}$ 和  $d$ -excess 值在降水事件上展现出比托勒站更明显地随时间变化的反向变化趋势,且在所有降水事件中嘉峪关站的 $\delta^{18}\text{O}$ 和  $d$ -excess 的变化趋势相反(图2)。类似的降水稳定同位素时间变化不仅在托来河流域,在其他地区表现得更为明显,例如,在黑河流域的张掖站(1 483 m)<sup>[24]</sup>、乌鞘岭北坡地区

(2 368 m)<sup>[40]</sup>、乌鲁木齐地区(平均海拔 800 m)<sup>[41]</sup>,而与黑河流域的葫芦沟站(3 260 m)、野牛沟(3 320 m)和俄堡站(3 452 m)的变化特征不一致<sup>[22, 42]</sup>,这反映了内陆河流域低海拔地区存在较强的云下蒸发,同时高海拔地区受局地水汽再循环的强烈影响<sup>[43, 44]</sup>。

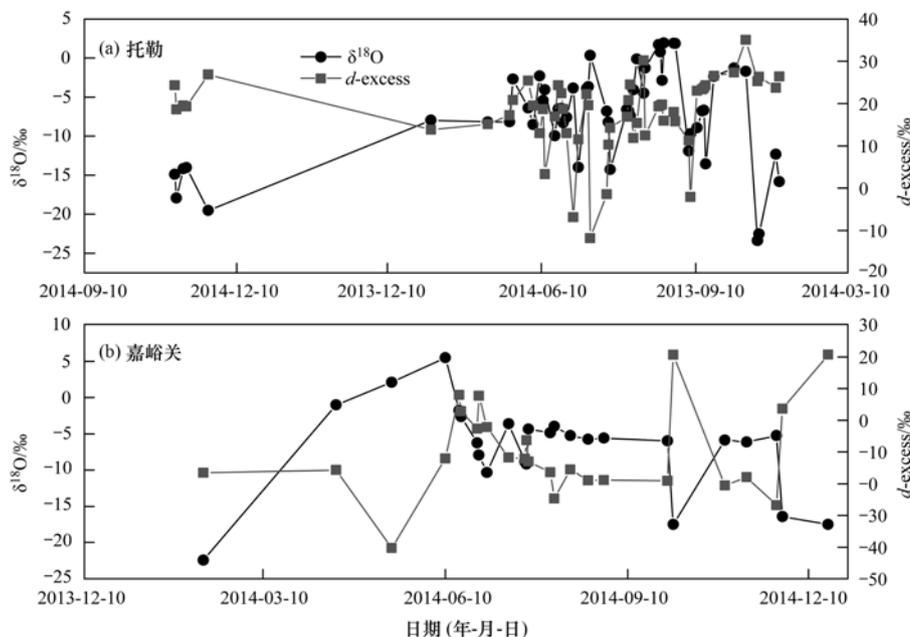


图2 托勒和嘉峪关站 $\delta^{18}\text{O}$ 和  $d$ -excess 的时间变化

Fig. 2 Daily variation of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $d$ -excess in precipitation at Tuole and Jiayuguan

### 3.2 局地大气降水线

由所有站点次降水稳定同位素数据计算得到托来河流域、上游(托勒站)、中游(嘉峪关站)局地大气水线,如图3所示, $R^2$ 值较高, $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 有较好的相关性,由托勒和嘉峪关站得到托来河流域局地大气水线的斜率(7.34)和截距(4.16)明显低于石羊河流域、黑河流域、乌鲁木齐河流域、我国北方地区、全球大气降水线(GMWL; $\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ )<sup>[3]</sup>[图3(a)和表1],表明该地区的降水过程可能受到了强烈的蒸发影响。已有研究表明较低的斜率在干旱区十分普遍,主要是较为干燥的大气环境和较强的蒸发过程所导致<sup>[46-48]</sup>。但略高于我国西北地区大气水线( $\delta\text{D} = 7.05 \delta^{18}\text{O} - 2.17$ )<sup>[49]</sup>,表明除受干燥的环境和较强的蒸发外,这一现象可能还与强烈的局地再循环水汽有关,已有研究表明局地再循环水汽将引起大气水线斜率和截距的升高,而且局地再循环水汽被认为是区域大气水汽和水循环的重要组成部分<sup>[50-52]</sup>。

参考 GMWL, 结合次降水稳定同位素数据在局地大气水线的分布状况,托勒站降水稳定同位素数

表1 部分研究区域局地大气降水线比较

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

研究区	局地大气水线(LMWL)	文献
中国北方地区	$\delta\text{D} = 7.88 \delta^{18}\text{O} + 9.42$	[45]
中国西北地区	$\delta\text{D} = 7.05 \delta^{18}\text{O} - 2.17$	[49]
黑河流域	$\delta\text{D} = 7.82 \delta^{18}\text{O} + 7.63$	[12]
石羊河流域	$\delta\text{D} = 7.80 \delta^{18}\text{O} + 5.00$	[17]
乌鲁木齐流域	$\delta\text{D} = 7.43 \delta^{18}\text{O} + 9.68$	[8]
托来河流域	$\delta\text{D} = 7.34 \delta^{18}\text{O} + 4.16$	本研究
托来河上游	$\delta\text{D} = 7.69 \delta^{18}\text{O} + 15.53$	本研究
托来河中游	$\delta\text{D} = 6.86 \delta^{18}\text{O} - 17.7$	本研究

据可分为3组(图3),3组数据大多位于全球大气降水线之上, $d$ -excess 大于10‰。第1组数据具有偏正的 $\delta^{18}\text{O}$ ,并位于该图的右上角,这些点位于局地大气水线之下,其  $d$ -excess 小于16‰,多是发生在夏秋季节温度较高的降水事件。第2组数据 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负,位于左下角,这些点位于局地大气水线之上,其  $d$ -excess 大于16‰,主要代表的是温度低或空气的水含量比较充裕时的冬、春降水事件。第3组数据位于第1组和第2组之间,正好在局地大气

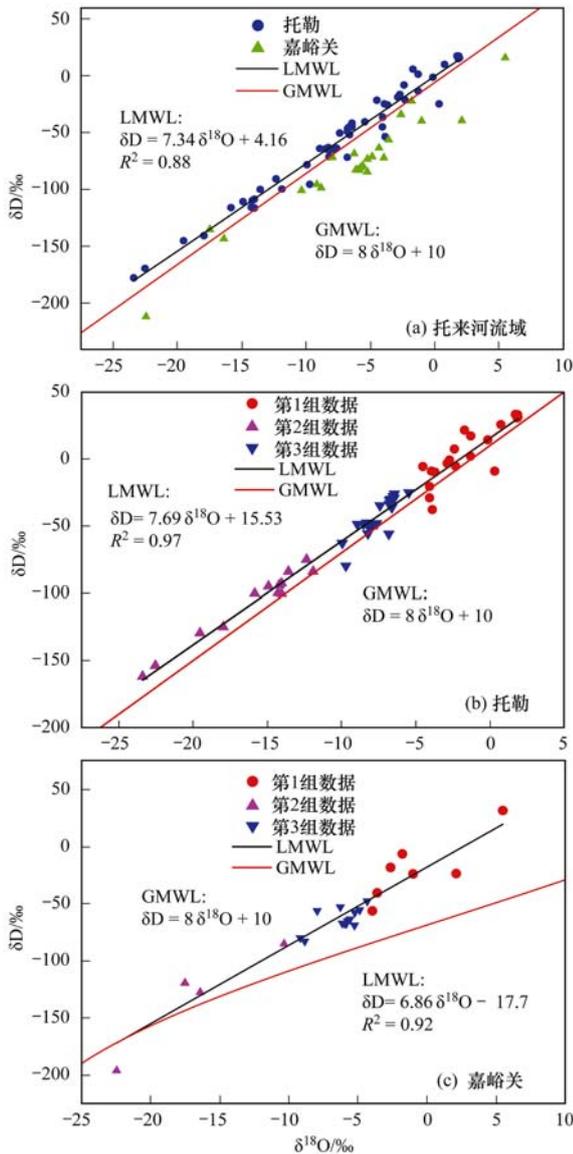


图3 托来河流域大气降水线

Fig. 3 Local meteoric water line for the Tuolai River basin based on the data from individual samples from November 2013 to December 2014

水线上, 这些点的 $\delta^{18}\text{O}$ 值居中, 反映了主要受平衡分馏的影响. 嘉峪关站位于托来河中游, 它的降水稳定同位素数据也可分为3组(图3), 与托勒站相比, 3组数据大多位于全球大气降水线的下方,  $d$ -excess 小于 $10\text{‰}$ . 第1组 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高, 位于局地大气降水线之下, 其 $d$ -excess 小于 $-18\text{‰}$ ; 第2组 $\delta^{18}\text{O}$ 均为低值, 位于局地大气水线之上, 其 $d$ -excess 大于 $-18\text{‰}$ , 第3组数据位于局地大气水线上, 其值主要受平衡分馏的影响. 托来河流域的局地大气降水线存在明显的差异(图3), 托勒站和嘉峪关站的局地大气水线分别为:  $\delta\text{D} = 7.69 \delta^{18}\text{O} + 15.53$ ,  $R^2 = 0.97$  ( $P < 0.05$ )、 $\delta\text{D} = 6.86 \delta^{18}\text{O} - 17.7$ ,  $R^2 = 0.92$  ( $P < 0.05$ ), 这两个采样站点的大气水线的斜率都

低于全球大气水线, 同时从托勒到嘉峪关站大气降水线的斜率和截距都明显降低, 表现出从低海拔到高海拔的增加趋势, 这与前人研究的乌鲁木齐河流域从河源区到下游地区大气降水线截距和斜率呈逐渐减小趋势相一致<sup>[10]</sup>. 托来河流域为高寒半干旱气候, 其发源于祁连山中段, 年降水量随海拔升高在一定范围内呈增加趋势<sup>[31]</sup>, 受祁连山海拔抬升作用影响, 流域具有自然条件垂直分带性, 导致流域内两站点降水过程不同, 也导致两站点局地大气降水线存在差异.

### 3.3 降水稳定同位素的海拔变化

当气团沿着山坡不断抬升时, 降水稳定同位素逐渐贫化<sup>[53]</sup>. 如图4所示, 除8月以外, 从嘉峪关到托勒站,  $\delta^{18}\text{O}$ 的月均值随海拔升高基本呈下降趋势, 相反地,  $d$ -excess 随海拔升高呈增加趋势. 采样期间, 相应的温度从低海拔站到高海拔站降低了 $7.3^\circ\text{C}$ . 由于不同的海拔和局地气候, 托勒站和嘉峪关站的稳定同位素组成存在显著差异. 嘉峪关站 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 和 $d$ -excess的均值分别为 $-6.83\text{‰}$ 、 $-64.60\text{‰}$ 和 $-9.93\text{‰}$ , 托勒站分别为 $-7.36\text{‰}$ 、 $-41.06\text{‰}$ 和 $17.80\text{‰}$ . 这表明低海拔地区强烈动力分馏的不平衡性将对降水稳定同位素浓度产生影响; 对于 $d$ -excess而言, 在4~10月, 托勒站和嘉峪关站的 $d$ -excess月均值相差很大(图4), 表明研究时段内两个站点的降水具有不同的水汽来源. 已有研究确定自海洋水汽所形成的降水中 $d$ -excess接近 $10\text{‰}$ , 而在干旱条件下, 蒸发使动力分馏系数增加,  $d$ -excess值会增高, 甚至大于 $10\text{‰}$ <sup>[2, 3, 20]</sup>. 除7月份外, 托勒站远大于全球降雨过量氘( $10\text{‰}$ ), 可能是干燥气候背景下, 局地再循环水汽造成较高的 $d$ -excess值. 在7月, 托勒站降水的 $d$ -excess值接近 $10\text{‰}$ , 可能是受来自温暖海洋蒸发水汽的影响; 嘉峪关站的 $d$ -excess月均值偏低, 表明该地水汽来源于较湿润环境的水汽蒸发或受降水过程中云下蒸发的影响<sup>[13]</sup>. 总之, 托勒站比嘉峪关站具有更高的 $d$ -excess月均值. 观测结果与过去研究得到的祁连山 $d$ -excess值比河西走廊平原地区更高相一致<sup>[16]</sup>, 与张应华等<sup>[15]</sup>指出的黑河流域中上游地区降水中 $d$ -excess的空间分布呈现山区高平原低的趋势相一致, 也与大多湿润地区 $d$ -excess随海拔升高增加相似<sup>[44]</sup>. 托勒站和嘉峪关站的 $d$ -excess与 $\delta^{18}\text{O}$ 变化趋势相反(图5): 托勒( $3367\text{ m}$ )和嘉峪关( $1658\text{ m}$ )的 $d$ -excess与 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关系数为 $-0.21$ (在 $0.05$ 水平上不显著)、 $-0.49$ (在 $0.05$ 水平上显著). 研究

结果表明从低海拔到高海拔地区，相应的相关系数呈下降趋势。

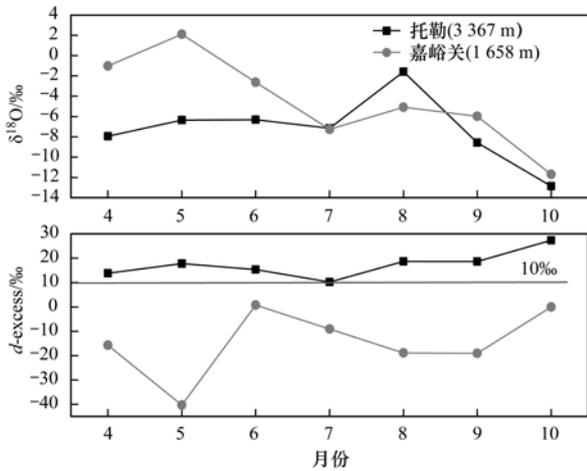


图4 托来河流域不同海拔台站月 $\delta^{18}\text{O}$ 和  $d\text{-excess}$  的变化

Fig. 4 Comparison of monthly  $\delta^{18}\text{O}$  and  $d\text{-excess}$  at different altitudes in the Tuolai River basin

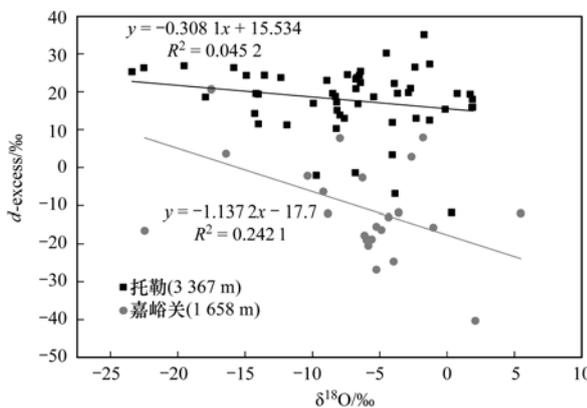


图5 托勒和嘉峪关站 $\delta^{18}\text{O}$ 和  $d\text{-excess}$  的变化

Fig. 5  $\delta^{18}\text{O}$  and  $d\text{-excess}$  variation at Tuole and Jiayuguan

### 4 讨论

#### 4.1 降水稳定同位素与温度的关系

图6是托勒和嘉峪关站的次降水稳定同位素数据基于气温变化的分布模式，据此可将所有数据分为3组。第一组数据为温度在10℃以上，通常具有高 $\delta^{18}\text{O}$ 和低  $d\text{-excess}$ ， $\delta^{18}\text{O}$ 表现出温度效应，而  $d\text{-excess}$  则随着气温的升高而降低，反映了云下蒸发对稳定同位素富集的强烈影响，而且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，进一步分析发现，托勒站 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温呈显著正相关(表2)，因为这些降水事件主要发生在高温和低湿度的情况下，集中发生在夏秋季节，此时当雨滴从云底降落时，较低的饱和水汽压差和较高的气温，导致强烈的云下蒸发使得  $d\text{-excess}$  降低和 $\delta^{18}\text{O}$

增加<sup>[54, 55]</sup>。但是，嘉峪关站却表现出相反的变化趋势， $\delta^{18}\text{O}$ 与气温呈负相关， $d\text{-excess}$ 与气温呈显著正相关，这可能是降水水汽来源不同、受降水量效应、降水形成机制等因素的影响，但对于气温在10℃以上的降水事件而言，主要发生在夏季，在嘉峪关站由于云下蒸发对高降水量事件稳定同位素的富集作用减弱，使得呈现降水量效应；第二组数据对应的温度范围在0℃~10℃之间(图6)，如果去掉这两个站点的异常值， $\delta^{18}\text{O}$ 和  $d\text{-excess}$  随温度变化呈稳定状态，稳定同位素与温度不相关，表明水汽再循环的贫化效应抵消了云下蒸发的影响，这被认为是水汽再循环起主导作用的标志<sup>[43, 44]</sup>。第3组数据对应的温度范围为0℃以下， $\delta^{18}\text{O}$ 、 $d\text{-excess}$ 与温度的相关性非常好(表2和图6)，托勒站展现出显著的温度效应，这表明降雪形成过程中降水稳定同位素浓度受绝热冷却的平衡分馏影响，当温度低于0℃时，稳定同位素动力分馏的影响极小<sup>[40, 43]</sup>，研究结果表明气温较低时，降水稳定同位素浓度主要受平衡分馏影响。

如表2所示，第3组(温度低于0℃)的 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的相关系数显著高于第2组(温度0℃~10℃)。当降水事件发生在低于0℃时，对于平衡稳定同位素分馏，遵从瑞利模型原理。这些特征表明，干旱区降水稳定同位素浓度的温度效应随温度变化而波动。Rozanski等<sup>[56]</sup>认为中高纬度地区，降水稳定同位素变化主要由局地气温的变化所影响。此外，处于高海拔地区托勒站的温度效应比低海拔地区的嘉峪关站更显著(表2)，反映了温度效应的局地差异性。因此，研究区温度是降水稳定同位素演化的关键决定性因素。

综上，处于高海拔地区的托勒站降水稳定同位

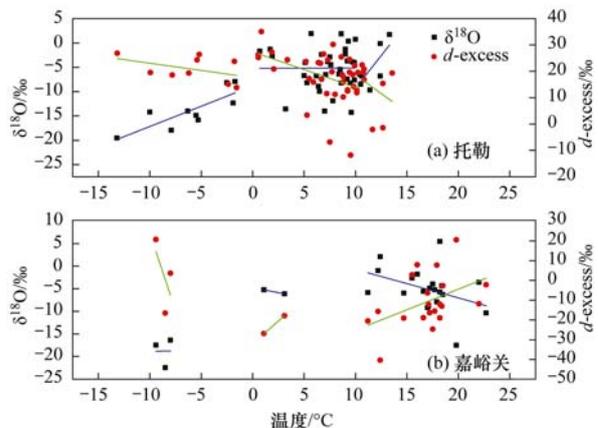


图6 托勒和嘉峪关的 $\delta^{18}\text{O}$ 和  $d\text{-excess}$  随气温的分布变化

Fig. 6 Plot of temperature versus  $\delta^{18}\text{O}$  and  $d\text{-excess}$  at Tuole and Jiayuguan in different temperature ranges

素的温度效应高于低海拔地区的嘉峪关, 这与姚檀栋等<sup>[11]</sup>认为乌鲁木齐河流域的 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的关系从下游到源头具有减弱的特征相一致; 同时也与张应华等<sup>[8]</sup>认为处于中纬度干旱半干旱内陆地区的黑河流域, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与平均温度的相关性表现出从山

区到山前或山前盆地明显降低的变化相一致; 也与 Li 等<sup>[40]</sup>认为祁连山乌鞘岭地区降水稳定同位素与温度的变化相一致, 这反映了温度效应的局地差异性, 也表明作用于降水稳定同位素温度效应因子的复杂性。

表 2 两个站点的 $\delta^{18}\text{O}$ 和  $d$ -excess 在不同温度范围内的温度效应<sup>1)</sup>

Table 2 Temperature effect for  $\delta^{18}\text{O}$  and  $d$ -excess at different temperature ranges at Tuole and Jiayuguan

站名	$\delta^{18}\text{O}$ 温度效应	$\delta^{18}\text{O}$ 温度效应	$\delta^{18}\text{O}$ 温度效应	$\delta^{18}\text{O}$ 温度效应
	$/\text{‰}\cdot\text{°C}^{-1} (R^2)$	$/\text{‰}\cdot\text{°C}^{-1} (R^2)$	$/\text{‰}\cdot\text{°C}^{-1} (R^2)$	$/\text{‰}\cdot\text{°C}^{-1} (R^2)$
	0°C 以下	0 ~ 10°C	10°C 以上	所有降水事件
托勒	0.83(0.67)	0.01(0.00)	2.68(0.55)	0.60(0.36)
嘉峪关	0.04(0.00)	-0.44(1.00)	-0.63(0.15)	0.37(0.31)
站名	$d$ -excess 温度效应	$d$ -excess 温度效应	$d$ -excess 温度效应	$d$ -excess 温度效应
	$/\text{‰}\cdot\text{°C}^{-1} (R^2)$	$/\text{‰}\cdot\text{°C}^{-1} (R^2)$	$/\text{‰}\cdot\text{°C}^{-1} (R^2)$	$/\text{‰}\cdot\text{°C}^{-1} (R^2)$
	0°C 以下	0 ~ 10°C	10°C 以上	所有降水事件
托勒	-0.55(0.21)	-1.07(0.23)	-2.86(0.10)	-0.50(0.12)
嘉峪关	-15.66(0.36)	4.48(1.00)	2.08(0.2)	-0.13(0.01)

1) 粗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、饱和水压及湿度的关系

### 4.2.1 降水稳定同位素与降水量的关系

研究区所有次降水事件的稳定同位素与降水量的关系不明显( $y = 0.09x - 7.86, R^2 = 0.01$ ), 托来河流域的降水主要集中在 5 ~ 9 月, 因此本文分析了夏季降水事件的降水稳定同位素变化。

如表 3 所示, 在 2014 年 6 ~ 8 月, 嘉峪关的降水量效应不显著, 托勒站在 8 月的降水事件不存在明显的温度效应, 但 $\delta^{18}\text{O}$ 和  $\delta\text{D}$  与降水量呈显著负相关, 反映出降水量效应的特征。同时, 托勒站的降水量与  $d$ -excess 之间呈现显著的正相关( $y = 0.66x + 14.39, R^2 = 0.47, P < 0.05$ ), 除个别降水事件外, 8 月的  $d$ -excess 值远大于全球降水过量气( $d$ -excess = 10‰), 这一特征与受干燥气候背景下蒸发形成的局地水汽再循环有关。在 2014 年 6 月, 降水稳定同位素浓度既没有展现出温度效应也尚未呈现出降水量效应, 但在 7 月时展现出微弱的降水量效应。而对于纬度相差一度, 低海拔地区的嘉峪关站而言, 夏季降水事件不存在明显的温度效应和

降水量效应, 反映了研究区降水水汽来源、海拔高度以及降水稳定同位素演化过程的复杂性。综上, 在整个夏季降水事件中, 嘉峪关站的 $\delta^{18}\text{O}$ 尚未表现出降水量效应, 与 Zhao 等<sup>[17]</sup>认为中国西北内陆降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和  $\delta\text{D}$  同位素存在微弱的降水量效应相似, 证实了在内陆干旱区, 降水量并不是决定降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的根本性因素<sup>[41]</sup>。托勒站在夏季天气尺度下的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 展现出一定的降水量效应。与王宁练等<sup>[16]</sup>研究发现祁连站夏季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的降水量效应相一致。在葫芦沟流域,  $\delta^{18}\text{O}$ 和  $\delta\text{D}$  随着连续降水事件的发生, 降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和  $\delta\text{D}$  变得更加偏负<sup>[22]</sup>。例如, 在托勒站, 2014 年 7 月 19 ~ 21 日, 伴随连续降水事件, 降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和  $\delta\text{D}$  逐渐变得更加偏负, 达到最低时 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -14.27‰、 $\delta\text{D}$  为 -99.92‰ (表 4), 这表明降水期间水汽来源于同一个气团 (表 4)。虽然 7 月 19 日 (21.6 mm) 降水量较大,  $\delta^{18}\text{O}$ 和  $\delta\text{D}$  相对偏负, 但 8 月 21 日降水相对较小 (2.8 mm), 但 $\delta^{18}\text{O}$ 和  $\delta\text{D}$  明显偏负。在研究时段内, 类似的现象也发生在 2014 年 7 月 7 ~ 9 日, 8 月 10 ~ 11 日、19 ~ 21 日、9 月 6 ~ 7 日。同年 7 月 20 ~ 21 日, 嘉峪关也出

表 3 两站点夏季降水稳定同位素的温度和降水量效应

Table 3 Isotopic temperature and amount effect at Tuole and Jiayuguan in summer

采样点	日期(年-月)	$\delta^{18}\text{O}$ 温度效应	$\delta\text{D}$ 温度效应	$\delta^{18}\text{O}$ 降水量效应	$\delta\text{D}$ 降水量效应	降水事件次数
		$/\text{‰}\cdot\text{°C}^{-1} (R^2)$	$/\text{‰}\cdot\text{°C}^{-1} (R^2)$	$/\text{‰}\cdot\text{mm}^{-1} (R^2)$	$/\text{‰}\cdot\text{mm}^{-1} (R^2)$	
托勒站	2014-06	-0.32(0.06)	0.14(0.0002)	-0.36(0.33)	-2.53(0.31)	11
	2014-07	1.02(0.10)	6.62(0.07)	0.12(0.03)	0.57(0.01)	8
	2014-08	0.03(0.0003)	-0.09(0.00005)	-0.41(0.40)	-2.62(0.30)	12
嘉峪关站	2014-06	-0.18(0.002)	-4.71(0.03)	-0.22(0.06)	-1.42(0.05)	5
	2014-07	0.16(0.02)	1.92(0.06)	0.19(0.02)	-2.47(0.08)	5
	2014-08	-0.07(0.004)	-0.71(0.009)	-0.03(0.003)	-1.26(0.14)	5

表 4 两站点 7、8 月连续降水事件的天气状况及稳定同位素浓度变化

站点	日期 (年-月-日)	降水量 /mm	平均气温 /℃	平均相对湿度 /%	平均水汽压 /hPa	$\delta^{18}\text{O}$ /‰	$\delta\text{D}$ /‰	$d\text{-excess}$ /‰
托勒	2014-07-19	21.6	12.4	71	101	-6.81	-55.85	-1.38
	2014-07-20	16.7	8.6	85	95	-8.22	-55.47	10.27
	2014-07-21	2.8	9.6	85	101	-14.27	-99.92	14.25
	2014-08-19	10.5	13.3	55	80	1.72	33.13	19.35
	2014-08-20	3.2	10	71	84	0.76	25.64	19.54
	2014-08-21	9.9	7.5	69	70	-2.87	-3.21	19.77
嘉峪关	2014-07-20	6.4	17.1	76	146	-8.84	-82.84	-12.10
	2014-07-21	1	17	90	174	-9.18	-79.79	-6.37
	2014-07-22	1.2	18.4	88	184	-4.33	-47.68	-13.04

现此类现象. 原因可能是随着降水事件持续, 淋洗作用导致降水稳定同位素浓度更加偏负; 另外也可能是降水事件水汽主要源自季风环流.

4.2.2 降水稳定同位素与平均水汽压的关系

所有降水事件中托勒站和嘉峪关站的平均水汽压的均值分别为 63.55 hPa 和 104.76 hPa. 托勒站的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $d\text{-excess}$  与平均水汽压的相关关系分别为显著正相关 ( $y = 0.13x - 15.39, R^2 = 0.22, P < 0.05$ ) 和显著负相关 ( $y = -0.12x + 25.57, R^2 = 0.10, P < 0.05$ ), 随着平均水汽压升高,  $\delta^{18}\text{O}$  会增大,  $d\text{-excess}$  则会减小. 嘉峪关站的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $d\text{-excess}$  与平均水汽压的关系都表现为微弱正相关 ( $\delta^{18}\text{O}$ :

$y = 0.05x - 11.86, R^2 = 0.15$ ;  $d\text{-excess}: y = 0.03x - 12.70, R^2 = 0.01$ ) [图 7 (a) 和 7 (b)]. 从托勒站到嘉峪关站, 平均水汽压升高,  $\delta^{18}\text{O}$  和  $d\text{-excess}$  与平均水汽压的正相关关系减弱, 变化幅度也明显减小. 这与河西走廊中部地区研究的水汽压效应相一致<sup>[20]</sup>. 原因可能是从高海拔到低海拔地区, 水汽压升高, 饱和水汽压升高, 降水难以形成, 降水量较小, 降水稳定同位素受云下蒸发影响作用明显,  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  偏正, 高海拔地区受局地水汽再循环的作用明显,  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  偏负.

4.2.3 降水稳定同位素与相对湿度的关系

托勒站降水的  $\delta^{18}\text{O}$  与形成降水时大气的平均相

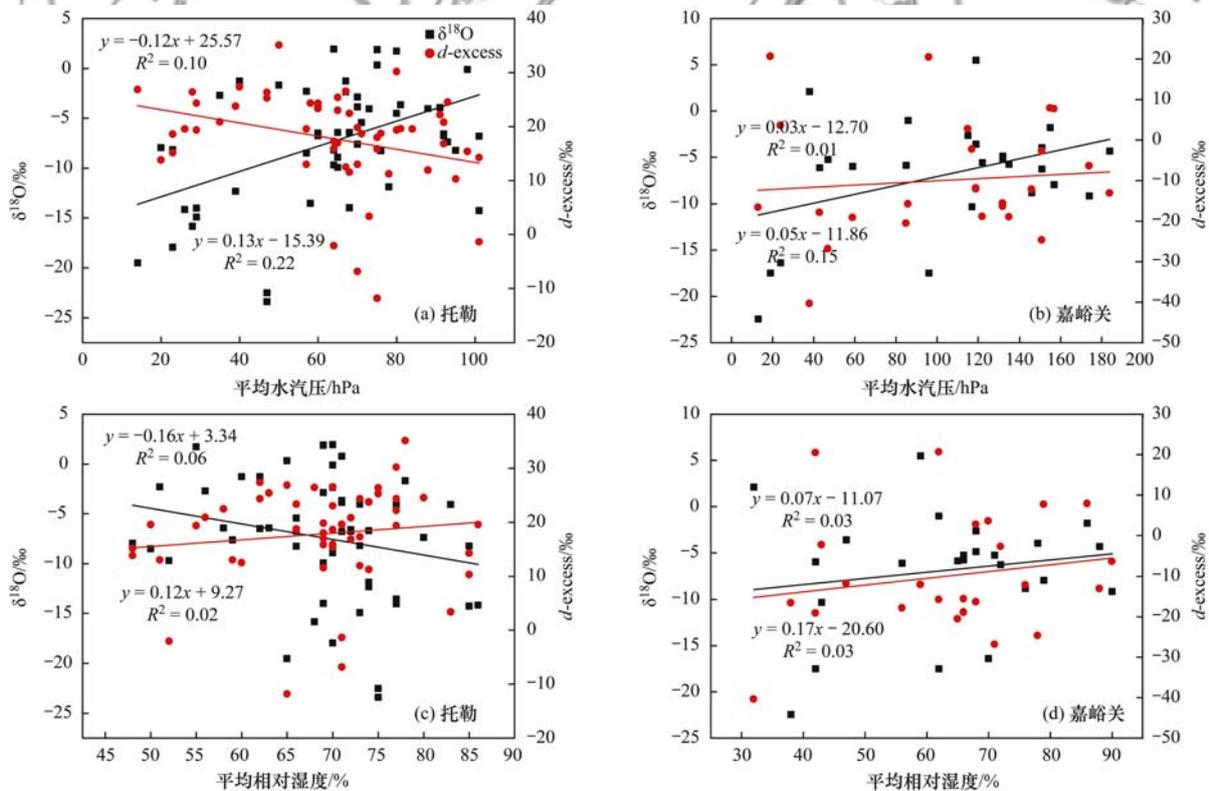


图 7 托勒和嘉峪关  $\delta^{18}\text{O}$  和  $d\text{-excess}$  与平均水汽压、相对湿度的关系

Fig. 7 Relationship between  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $d\text{-excess}$ , average vapor pressure and relative humidity at Tuole and Jiayuguan

对湿度呈不显著负相关( $y = -0.16x + 3.34$ ,  $R^2 = 0.06$ ,  $P < 0.05$ ),  $d$ -excess 则表现出相反的变化趋势, 与平均相对湿度呈不显著正相关( $y = 0.12x + 9.27$ ,  $R^2 = 0.02$ ) [图 7 (c) 和 7 (d)]. 托勒站降水形成时大气的相对湿度升高,  $\delta^{18}\text{O}$  值减少, 降水  $d$ -excess 值增大. 嘉峪关站降水的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $d$ -excess 与平均相对湿度都呈正相关( $\delta^{18}\text{O}: y = 0.07x - 11.07$ ,  $R^2 = 0.03$ ;  $d$ -excess:  $y = 0.17x - 20.60$ ,  $R^2 = 0.03$ ), 且  $d$ -excess 与相对湿度的变化趋势表现的更为明显一些. 其原因可能为当海拔升高时, 气温降低, 托勒站相对湿度增加, 云下蒸发对于降水作用会减弱, 托勒站地区雨滴受到蒸发程度比相对湿度低的气候条件下要弱, 降水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $d$ -excess 的值相对保持不变. 综上所述, 嘉峪关站降水的  $\delta^{18}\text{O}$  与平均相对湿度呈不显著正相关, 托勒站则相反. 这与  $\delta^{18}\text{O}$  和平均水汽压的关系所对应, 反映了它们之间相互影响的关系. 两站点的  $d$ -excess 随平均相对湿度增加而升高, 这与郭小燕等<sup>[57]</sup> 研究敦煌盆地的  $d$ -excess 与相对湿度的变化相一致.

## 5 结论

(1) 研究时段内托勒站降水稳定同位素具有显著的季节性变化, 夏秋季较高值, 冬春季为较低值. 嘉峪关站与托勒站不同, 春季较高, 其他季节较低. 嘉峪关站  $\delta^{18}\text{O}$  和  $d$ -excess 值在降水事件上展现出比托勒站更明显地随时间变化的反向变化趋势, 反映了内陆河流域低海拔地区存在较强的云下蒸发, 同时高海拔地区受局地水汽再循环的强烈影响.

(2) 对观测点氢氧稳定同位素的分析, 建立了托来河流域局地大气降水线方程为  $\delta\text{D} = 7.34 \delta^{18}\text{O} + 4.16$ , 它的斜率和截距明显低于全球大气降水线, 表明该地区的降水过程可能受到了强烈蒸发影响. 托勒站和嘉峪关站的局地大气水线分别为  $\delta\text{D} = 7.69 \delta^{18}\text{O} + 15.53$ ,  $R^2 = 0.97$  ( $P < 0.05$ )、 $\delta\text{D} = 6.86 \delta^{18}\text{O} - 17.7$ ,  $R^2 = 0.92$  ( $P < 0.05$ ), 这两个采样站点的斜率都低于全球大气水线, 从嘉峪关站到托勒站大气降水线的斜率和截距都明显升高, 表现出从低海拔到高海拔的增加趋势.

(3) 除 8 月以外, 嘉峪关站到托勒站,  $\delta^{18}\text{O}$  的月均值随海拔升高基本呈下降趋势,  $d$ -excess 则相反. 在 4~10 月, 托勒站和嘉峪关站的  $d$ -excess 月均值相差很大, 除 7 月份, 托勒站远大于全球降雨过量氘(10‰); 嘉峪关站的  $d$ -excess 月均值则相反, 表

明研究时段内两个站点的降水具有不同的水汽来源. 托勒站到嘉峪关站的  $d$ -excess 与  $\delta^{18}\text{O}$  呈负相关减弱, 随海拔升高对应的相关系数呈下降趋势.

(4) 处于高海拔地区托勒站的温度效应比低海拔地区的嘉峪关站更显著, 反映了温度效应的局地差异性. 对于气温在 10℃ 以上的降水事件而言, 托勒站  $\delta^{18}\text{O}$  与气温呈显著正相关, 嘉峪关站却表现出相反的变化趋势. 此时, 这些降水事件主要发生在夏季, 嘉峪关站由于云下蒸发对高降水量事件稳定同位素的富集作用减弱, 而呈现降水量效应. 托勒站在 2014 年 8 月的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  与降水量呈显著负相关, 在夏季天气尺度下的降水  $\delta^{18}\text{O}$  展现出一定的降水量效应. 总体来看, 研究区所有次降水事件的稳定同位素降水量效应不显著.

(5) 从托勒站到嘉峪关站, 平均水汽压升高,  $\delta^{18}\text{O}$  和  $d$ -excess 与平均水汽压的正相关关系减弱, 变化幅度也明显减小. 原因可能是从高海拔到低海拔地区, 水汽压升高, 饱和水汽压升高, 降水难以形成, 降水量较小, 降水稳定同位素受云下蒸发影响作用明显,  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  偏正, 高海拔地区受局地水汽再循环的作用明显,  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  偏负. 嘉峪关站降水的  $\delta^{18}\text{O}$  与平均相对湿度呈不显著正相关, 托勒站则相反. 这与  $\delta^{18}\text{O}$  和平均水汽压的关系所对应, 反映了它们之间相互影响的关系.

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.
- [3] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [4] 董小芳, 邓黄月, 张雷, 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.
- [5] 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.
- [6] 李亚举, 张明军, 王圣杰, 等. 我国大气降水中稳定同位素

- 研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(3): 624-633.
- LI Y J, Zhang M J, Wang S J, *et al.* Progress of the research of stable isotope in precipitation in China: A review[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(3): 624-633.
- [7] 孟玉川, 刘国东. 长江流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J]. 水科学进展, 2010, **21**(3): 327-334.
- Meng Y C, Liu G D. Effect of below-cloud secondary evaporation on the stable isotopes in precipitation over the Yangtze River basin[J]. Advances in Water Science, 2010, **21**(3): 327-334.
- [8] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域中上游地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 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.
- [9] 余武生, 姚檀栋, 田立德, 等. 青藏高原西部降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(2): 146-152.
- Yu W S, Yao T D, Tian L D, *et al.* Variation of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation in the western Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, **26**(2): 146-152.
- [10] 冯芳, 李忠勤, 金爽, 等. 天山乌鲁木齐河流域山区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 特征及水汽来源分析[J]. 水科学进展, 2013, **24**(5): 634-641.
- Feng F, Li Z Q, Jin S, *et al.* Characteristics of the  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  in precipitation and its water vapor sources in the upper Urumqi River basin, Eastern Tianshan[J]. Advances in Water Science, 2013, **24**(5): 634-641.
- [11] 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 Urumqi River, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, **22**(1): 15-22.
- [12] 章新平, 姚檀栋, 田立德, 等. 乌鲁木齐河流域不同水体中的氧稳定同位素[J]. 水科学进展, 2003, **14**(1): 50-56.
- Zhang X P, Yao T D, Tian L D, *et al.* Stable oxygen isotope in water mediums in Urumqi River basin[J]. Advances in Water Science, 2003, **14**(1): 50-56.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域中上游地区降水中氢氧同位素与温度关系研究[J]. 干旱区地理, 2007, **30**(1): 16-21.
- Zhang Y H, Wu Y Q. Relation between oxygen and hydrogen isotopes in precipitation and temperature in Heihe River basin, China[J]. Arid Land Geography, 2007, **30**(1): 16-21.
- [16] 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.
- [17] 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): 406-416.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 赵玮, 马金珠, 何建华. 党河流域敦煌盆地地下水补给与演化研究[J]. 干旱区地理, 2015, **38**(6): 1133-1141.
- Zhao W, Ma J Z, He J H. Groundwater recharge and geochemical evolution in the Dunhuang basin of Danghe River, northwest China [J]. Arid Land Geography, 2015, **38**(6): 1133-1141.
- [22] 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.
- [23] Li Z X, Feng Q, Wang Q J, *et al.* Quantitative evaluation on the influence from cryosphere meltwater on runoff in an inland river basin of China[J]. Global and Planetary Change, 2016, **143**: 189-195.
- [24] 吴军年, 王红. 张掖大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及水汽来源[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(3): 1601-1604.
- Wu J N, Wang H. Characteristics of the  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and water vapor source in Zhangye[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, **39**(3): 1601-1604.
- [25] 陈粉丽, 张明军, 马潜, 等. 兰州及其周边区域大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及其水汽来源[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3755-3763.
- Chen F L, Zhang M J, Ma Q, *et al.* Characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and water vapor sources in Lanzhou City and its surrounding area[J]. Environmental Science, 2013, **34**(10): 3755-3763.
- [26] 李晖, 周宏飞. 乌鲁木齐地区大气降水中 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2007, **21**(9): 46-50.
- Li H, Zhou H F. Variation characteristics of  $\delta\text{D}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  stable isotopes in the precipitation of Urumqi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, **21**(9): 46-50.
- [27] 高妍, 冯起, 李宗省, 等. 祁连山讨赖河流域1957—2012年极端气候变化[J]. 中国沙漠, 2014, **34**(3): 814-826.
- Gao Y, Feng Q, Li Z X, *et al.* The variation of climate extremes

- in the Taolaihe River basin in the Qilian Mountains of China during 1957-2012 [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, **34**(3): 814-826.
- [28] 高妍, 冯起, 李宗省, 等. 1957—2012年讨赖河流域潜在蒸发量变化[J]. *中国沙漠*, 2014, **34**(4): 1125-1132.  
Gao Y, Feng Q, Li Z X, *et al.* Potential evaporation in the Taolaihe River basin during 1957-2012 [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, **34**(4): 1125-1132.
- [29] 高妍, 冯起, 李宗省, 等. 1957—2012年讨赖河流域降水变化特征[J]. *干旱区研究*, 2016, **33**(2): 275-282.  
Gao Y, Feng Q, Li Z X, *et al.* Change of precipitation in the Taolaihe River basin for the period of 1957-2012 [J]. *Arid Zone Research*, 2016, **33**(2): 275-282.
- [30] 徐浩杰, 杨太保, 柴绍豪. 1961—2010年讨赖河山区径流变化特征及其驱动因素[J]. *中国沙漠*, 2014, **34**(3): 878-884.  
Xu H J, Yang T B, Chai S H. Variation characteristics of the mountainous runoff and its driving forces in the upper reaches of the Taolaihe River during 1961-2010 [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, **34**(3): 878-884.
- [31] Li Z L, Xu Z X, Shao Q X, *et al.* Parameter estimation and uncertainty analysis of SWAT model in upper reaches of the Heihe River basin [J]. *Hydrological Processes*, 2009, **23**(19): 2744-2753.
- [32] 怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. 近50年黑河流域的冰川变化遥感分析[J]. *地理学报*, 2014, **69**(3): 365-377.  
Huai B J, Li Z Q, Sun M P, *et al.* RS analysis of glaciers change in the Heihe River basin in the last 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **69**(3): 365-377.
- [33] 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): 33-41.  
Wei K Q, Lin R F. The influence of the monsoon climate on the isotope composition of precipitation in China [J]. *Geochemica*, 1994, **23**(1): 33-41.
- [34] 陈中笑, 程军, 郭品文, 等. 中国降水稳定同位素的分布特点及其影响因素[J]. *大气科学学报*, 2010, **33**(6): 667-679.  
Chen Z X, Cheng J, Guo P W, *et al.* Distribution characters and its control factors of stable isotope in precipitation over China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010, **33**(6): 667-679.
- [35] 刘浏, 刘丽丽, 索滢. 近53a黑河流域水文气象要素时空演变特征[J]. *干旱区研究*, 2017, **34**(3): 465-478.  
Liu L, Liu L L, Suo Y. Spatiotemporal evolution of hydro-meteorological variables in the Heihe River basin in recent 53 years [J]. *Arid Zone Research*, 2017, **34**(3): 465-478.
- [36] 张强, 张杰, 孙国武, 等. 祁连山山区空中水汽分布特征研究[J]. *气象学报*, 2007, **65**(4): 633-643.  
Zhang Q, Zhang J, Sun G W, *et al.* Research on atmospheric water-vapor distribution over Qilianshan Mountains [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, **65**(4): 633-643.
- [37] 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.
- [38] Kreutz K J, Wake C P, Aizen V B, *et al.* Seasonal deuterium excess in a Tien Shan ice core: Influence of moisture transport and recycling in Central Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(18): 1-4.
- [39] Merlivat L, Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, **84**(C8): 5029-5033.
- [40] 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.
- [41] 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 Urumqi [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, **25**(10): 136-142.
- [42] Li Z X, Feng Q, Wang Q J, *et al.* The influence from the shrinking cryosphere and strengthening evapotranspiration on hydrologic process in a cold basin, Qilian Mountains [J]. *Global and Planetary Change*, 2016, **144**: 119-128.
- [43] Pang Z H, Kong Y L, Froehlich K, *et al.* Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region [J]. *Tellus B*, 2011, **63**(3): 352-359.
- [44] Froehlich K, Kralik M, Papesch W, *et al.* Deuterium excess in precipitation of alpine regions—moisture recycling [J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2008, **44**(1): 61-70.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 张贵玲, 角媛梅, 何礼平, 等. 中国西南地区降水氢氧同位素研究进展与展望[J]. *冰川冻土*, 2015, **37**(4): 1094-1103.  
Zhang G L, Jiao Y M, He L P, *et al.* Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in Southwest China: progress and prospects [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, **37**(4): 1094-1103.
- [48] 李广, 章新平, 许有鹏, 等. 滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1313-1320.  
Li G, Zhang X P, Xu Y P, *et al.* Characteristics of stable isotopes in Precipitation and their moisture sources in Mengzi Region, Southern Yunnan [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1313-1320.
- [49] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 西北地区大气降水 $\delta^{18}O$ 的特征及水汽来源[J]. *地理学报*, 2008, **63**(1): 12-22.  
Liu J R, Song X F, Yuan G F, *et al.* Characteristics of  $\delta^{18}O$  in precipitation over northwest China and its water vapor sources [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, **63**(1): 12-22.

- [50] Trenberth K E, Dai A, Rasmussen R M, *et al.* The changing character of precipitation [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, **84**(9): 1205-1217.
- [51] Bisselink B, Dolman A J. Recycling of moisture in Europe: contribution of evaporation to variability in very wet and dry years [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, **13**(9): 1685-1697.
- [52] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, *et al.* Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, **99**(3-4): 125-161.
- [53] Gonfiantini R, Roche M A, Olivry J C, *et al.* The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains [J]. *Chemical Geology*, 2001, **181**(1-4): 147-167.
- [54] Wu J K, Ding Y, Ye B. Spatio-temporal variation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River basin, Northwestern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, **61**(6): 1123-1134.
- [55] 陈少勇,董安祥,韩通. 祁连山东、西部夏季降水量时空分布的差异及其成因研究[J]. *南京气象学院学报*, 2007, **30**(5): 715-719.  
Chen S Y, Dong A X, Han T. Differences in summer precipitation between the east and west of the Qilian Mountains and its contributing factors [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2007, **30**(5): 715-719.
- [56] Rozanski K, Aragués-Aragués L, Gonfiantini R. Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate [J]. *Science*, 1992, **258**(5084): 981-985.
- [57] 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.

环 境 科 学

## CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing .....	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM <sub>2.5</sub> Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan .....	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Panjin .....	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City .....	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning .....	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin .....	CAI Zi-ying, HAN Su-jin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China .....	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region .....	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China .....	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China .....	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province .....	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China .....	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m .....	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes .....	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China .....	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research .....	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain .....	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin .....	LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir .....	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area .....	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir .....	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysochloris ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment .....	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios .....	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain .....	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China .....	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling .....	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR) .....	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly( <i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network .....	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater .....	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization .....	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies .....	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion .....	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere .....	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria .....	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate .....	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession .....	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain .....	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil .....	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via <sup>13</sup> C Pulse-labeling .....	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China .....	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast .....	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River .....	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation .....	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China .....	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area .....	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands .....	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils .....	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas .....	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil .....	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province .....	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi .....	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province .....	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires .....	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO <sub>2</sub> Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level .....	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles .....	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments .....	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)