

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

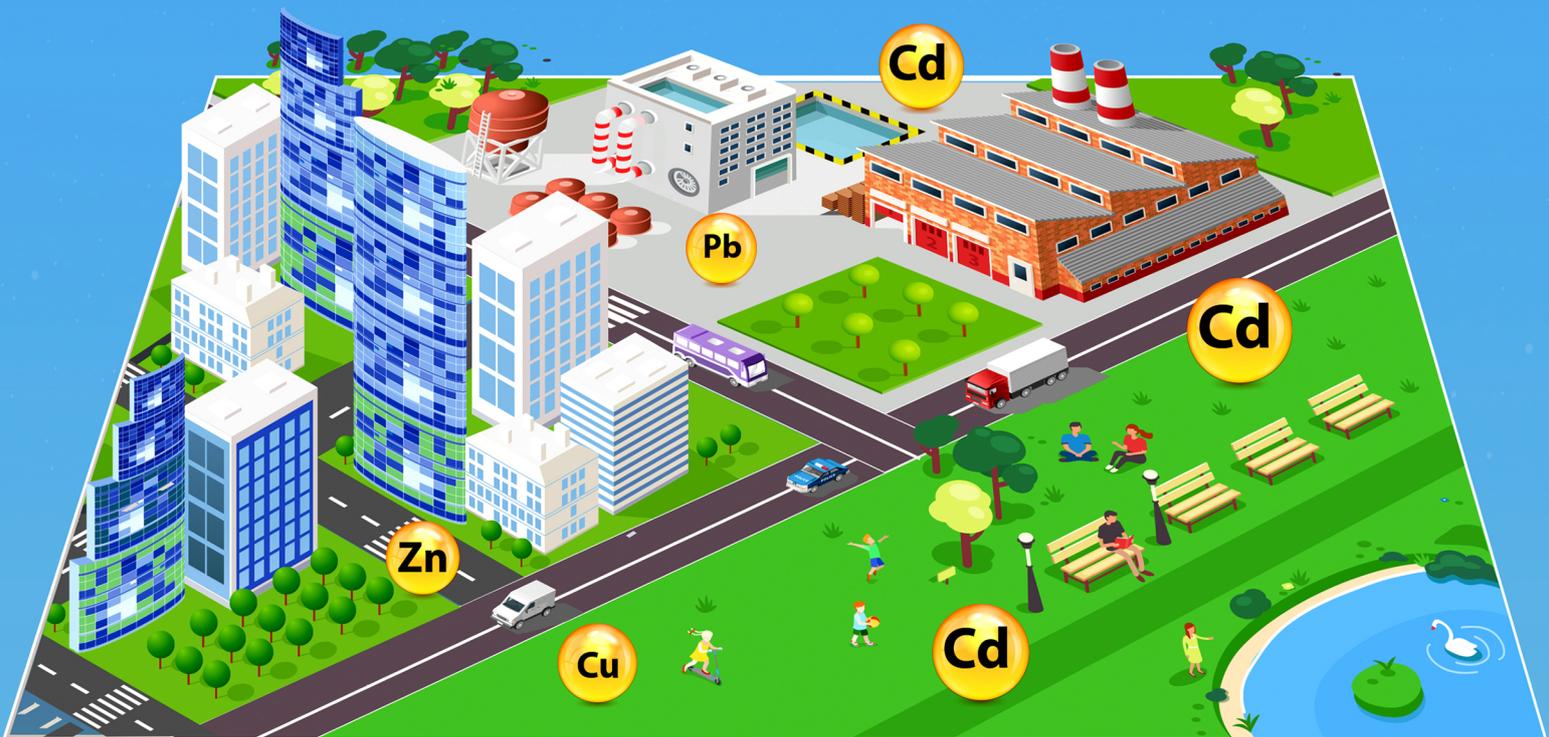
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期

Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价 ..... 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 ( 1 )

植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述 ..... 陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 ( 11 )

基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展 ..... 曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 ( 26 )

不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析 ..... 阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 ( 37 )

北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析 ..... 赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 ( 46 )

武汉冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析 ..... 蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 ( 61 )

运城市 PM<sub>2.5</sub> 时空分布特征和潜在源区季节分析 ..... 王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 ( 74 )

中国东部冷锋推进中的 PM<sub>2.5</sub> 三维结构变化特征 ..... 牟南南, 朱彬, 卢文 ( 85 )

粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 ..... 李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 ( 93 )

西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估 ..... 李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 ( 102 )

拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析 ..... 余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 ( 113 )

杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征 ..... 林旭, 严仁嫦, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 ( 123 )

上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用 ..... 金丹 ( 132 )

铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O<sub>3</sub> 和 SOA 形成势分析 ..... 易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 ( 140 )

电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子 ..... 谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 ( 150 )

不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系 ..... 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 ( 160 )

淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析 ..... 王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 ( 170 )

昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险 ..... 庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 ( 180 )

城市路面积尘微塑料污染特征 ..... 方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 ( 189 )

塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源 ..... 宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 ( 199 )

赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估 ..... 吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 ( 210 )

无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素 ..... 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 ( 220 )

白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估 ..... 陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪杰 ( 230 )

九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系 ..... 刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 ( 239 )

北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价 ..... 胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 ( 247 )

城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析 ..... 刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 ( 256 )

苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析 ..... 李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 ( 267 )

苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征 ..... 叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 ( 277 )

信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放 ..... 徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 ( 285 )

三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响 ..... 田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 ( 295 )

李家河水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析 ..... 梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 ( 306 )

岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征 ..... 张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 ( 314 )

宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估 ..... 王晓东, 田伟, 张雪艳 ( 329 )

快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例 ..... 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 ( 339 )

长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估 ..... 张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 ( 349 )

洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估 ..... 黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 ( 363 )

基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算 ..... 李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴锴彬, 戴之舟, 陈丁江 ( 369 )

三峡库区万州段河流水-气界面 CO<sub>2</sub> 通量支干流对比及影响机制初探 ..... 秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 ( 377 )

功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb<sup>2+</sup> 的吸附行为 ..... 廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱延省, 任嗣利 ( 387 )

铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价 ..... 吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 ( 398 )

沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性 ..... 邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 ( 409 )

温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析 ..... 吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 ( 416 )

填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征 ..... 罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 ( 424 )

基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析 ..... 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 ( 432 )

浙中典型硫铁矿田土壤重金属含量特征及健康风险 ..... 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 ( 442 )

农产品视角的城郊黑土地田土壤重金属风险分区 ..... 吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 ( 454 )

基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素 ..... 宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 ( 463 )

调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应 ..... 李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 ( 472 )

设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估 ..... 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 ( 481 )

电子垃圾拆解固废渣-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估 ..... 张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张晗, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 ( 490 )

雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估 ..... 梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 ( 500 )

重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响 ..... 郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 ( 510 )

长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响 ..... 吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 ( 521 )

土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性 ..... 姜霓雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 ( 530 )

化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响 ..... 杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 ( 540 )

秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征 ..... 薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 ( 550 )

全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响 ..... 闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 ( 560 )

秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响 ..... 万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 ( 569 )

# 塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源

宋洋<sup>1,2</sup>, 王圣杰<sup>1,2\*</sup>, 张明军<sup>1,2</sup>, 石玉东<sup>1,2</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室, 兰州 730070)

**摘要:** 大气降水中的氢氧稳定同位素比率( $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ )的定位监测有助于理解水体相变、混合和输送的过程, 南疆塔里木河流域东部气候干旱, 水资源是影响可持续发展的关键资源, 然而目前对其大气降水中的氢氧稳定同位素的认识仍十分有限。基于塔里木河流域东部4个采样点2019年6月~2020年9月采集的103个降水样品, 分析了大气降水中的氢氧稳定同位素的时空特征, 探讨了氢氧稳定同位素与水汽来源的联系, 从而为环境同位素示踪技术在干旱区的应用提供参考。结果表明: ①塔里木河流域东部4个采样点降水中的氢氧稳定同位素值整体呈现南高北低的趋势, 在季节变化上表现为夏高冬低的特点, 氘盈余比全国平均值小, 局地大气水线斜率呈现出显著的干旱气候特征。②研究区内大气降水中的氢氧稳定同位素值与气温呈现正相关关系, 而氘盈余与气温表现出较弱的负相关关系。 $\delta^{18}\text{O}$ 与相对湿度负相关, 氘盈余则与之呈正相关关系。③后向轨迹表明, 塔里木河流域东部主要受到西方路径控制, 中短距离传输路径比例较大。利用浓度权重轨迹法得到, 距离降水采样点越远的气团中的氘盈余越趋于一个稳定状态, 离采样点越近则浓度变化越频繁, 说明氘盈余在研究区内受局地水汽再循环影响较大。

**关键词:** 塔里木河流域东部; 降水; 氢氧稳定同位素; 氘盈余; 浓度权重轨迹

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0199-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202104210

## Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources

SONG Yang<sup>1,2</sup>, WANG Sheng-jie<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Ming-jun<sup>1,2</sup>, SHI Yu-dong<sup>1,2</sup>

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The in-situ monitoring of stable hydrogen and oxygen isotopes ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$ ) in precipitation is helpful to understand the processes of water phase change, mixing, and transportation. Due to the arid climate in the eastern Tarim River basin, water resources are the key factor affecting the regional sustainable development. However, the understanding of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation is still limited for this region. Based on the isotope data of 103 precipitation samples collected at four stations in the eastern Tarim River basin from June 2019 to September 2020, the spatial and temporal characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation were analyzed, and the connections between stable isotopes and moisture sources were discussed. The findings provide a reference for the application of environmental isotope tracers in arid areas. The results show that, ① the four sampling stations generally presented an increasing trend in precipitation stable isotopic values from north to south, and the isotopic values were higher in summer and lower in winter. The  $d$ -excess value in the study region was smaller than the national average, and the slope of the local meteoric water line exhibited a significant arid characteristic. ② There was a positive correlation between precipitation stable isotopes and air temperature in the study region, whereas a weak negative relationship was seen between  $d$ -excess and air temperature. The negative correlation occurred between  $\delta^{18}\text{O}$  and relative humidity, and the  $d$ -excess value exhibited a positive correlation with relative humidity. ③ The backward trajectory showed that the eastern Tarim River basin is mainly controlled by the westerlies paths. The proportion of air mass that comes from the middle and short distance is relatively large. The concentration weighted trajectory method showed that the farther from the precipitation sampling site, the more stable the  $d$ -excess value was. The closer to the sampling site, the more frequently the concentration changed, indicating that the  $d$ -excess value was greatly affected by the local water vapor recycling.

**Key words:** eastern Tarim River basin; precipitation; stable hydrogen and oxygen isotopes;  $d$ -excess; concentration weighted trajectory

氢氧稳定同位素( $^2\text{H}$ 和 $^{18}\text{O}$ )作为水体的组成部分,是地表环境中物质和能量传输的重要媒介,密切参与着自然界化学循环,因而成为环境示踪领域的重要技术手段<sup>[1,2]</sup>。在西北干旱区,水资源是区域可持续发展的重要条件,对大气降水等环境水体中氢氧稳定同位素的定位监测也越来越受到重视<sup>[3-7]</sup>。通过解析不同气候条件下大气降水氢氧稳定同位素环境影响因素可以促进同位素示踪技术在环境研究中的应用<sup>[8-10]</sup>。然而,西北干旱区沙漠和高山广布,目前已开展的降水氢氧稳定同位素监测研究的空间分布不均<sup>[11-14]</sup>,对不同区域同位素控制因素差异的理解仍有待深化。特别是南疆降水同位素监测记录

比较有限,在需要当地降水同位素作为基准值时可能不得不参考较远观测站点的数据<sup>[15]</sup>,这显然会带来不小的误差。因此,加强南疆地区大气降水氢氧稳定同位素的实地监测十分必要,探究其变化规律及影响因素不仅是认识区域大气水汽来源、地表径流组分和地下水补给和循环的前提<sup>[16,17]</sup>,也可以为当地水资源的合理利用提供必要的技术支持<sup>[18,19]</sup>。

收稿日期: 2021-04-20; 修订日期: 2021-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971034, 41701028); 甘肃省杰出青年基金项目(20JR10RA112); 西北师范大学重大科研项目培育计划项目(NWNU-LKZD2021-04)

作者简介: 宋洋(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境水同位素, E-mail: sy5030.student@sina.com

\* 通信作者, E-mail: geowang@126.com

本文以南疆塔里木河流域东部作为研究区,自天山腹地南下经塔克拉玛干沙漠延伸至昆仑山-阿尔金山北麓选取大气降水氢氧稳定同位素监测点(巴音布鲁克、库尔勒、铁干里克和且末),涉及不同的气候类型,具有较好地区代表性.本研究通过深入了解南疆塔里木河流域东部大气降水氢氧稳定同位素的时空分布特征,探讨氢氧稳定同位素与水汽来源的联系,旨在为环境同位素示踪技术在塔里木盆地的应用提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与分析

塔里木河流域东部深居欧亚大陆腹地(图1),属于典型大陆性干旱气候.本文的4个监测站点均分布于新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州内,由北至南分别为巴音布鲁克(87°42'N, 38°09'E,海拔2 458 m)、库尔勒(86°08'N, 41°15'E,海拔932 m)、铁干里克(85°33'N, 43°02'E,海拔846 m)和且末(84°09'N, 40°38'E,海拔1 247 m).其中,北部的巴音布鲁克位于中天山山间盆地,在西风气团影响下,雨量相对充沛;库尔勒、铁干里克、且末分别位于天山南麓、塔克拉玛干沙漠东部与南部边缘,降水稀少.研究区域内主要河流均为内陆河,除塔里木河干流外,还有开都河、孔雀河和车尔臣河等<sup>[20]</sup>.

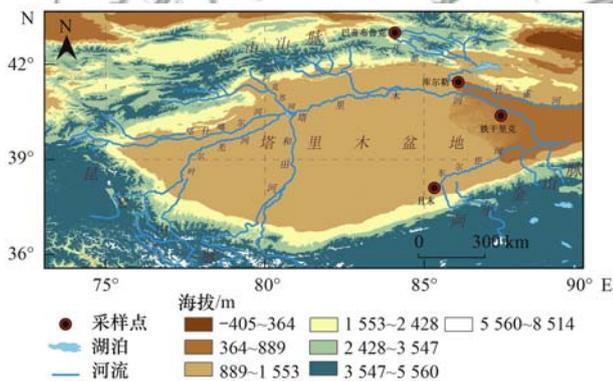


图1 研究区概况示意

Fig. 1 Map of the study region

本研究于2019年6月至2020年9月在巴音布鲁克、库尔勒、铁干里克和且末同步进行事件尺度的大气降水采集,共获得样品103个,其中巴音布鲁克降水样品73个,库尔勒样品13个,铁干里克样品9个,且末样品8个.当每次降水结束时,若为液态样品则立即将降水样品进行封存收集在50 mL的HDPE(高密度聚乙烯)瓶中,同时用防水胶带进行密封处理,以最大程度避免蒸发对样品的影响;若为固态样品或混合态样品则先放置在密封的LDPE

(低密度聚乙烯)袋中,等在室温下完全融化后再装瓶封存.每次封存时将该次采样的时间、地点、降水量等相关指标标注在对应的瓶身,存放在4℃左右的冷藏环境中,随后运输至西北师范大学地理与环境科学学院冷藏保存直至实验室分析.与降水样品同步采集的数据还包括气温、相对湿度、露点温度和水汽压等气象参数.

本研究中获取的降水样品均在西北师范大学地理与环境科学学院稳定同位素实验室利用T-LWIA-45-EP型液态水同位素分析仪(加拿大ABB-LoS Gatos Research公司)进行分析测定.分析前先确认实验室处于干燥阴凉的状态,尽量确保样品不受室温和空气流动的影响而发生蒸发.将样品瓶从冰柜中取出静置直到与室温相当,而后将水样放入实验仪器中.设定利用微升注射器将每个样品依次注射6次,前2次考虑仪器记忆效应舍弃,将最后4次注射的算术平均值作为最终结果.同位素测试标样为仪器生产商提供的工作标样(LGR Working Standard) #3E ( $\delta^2\text{H} = -79.6\text{‰} \pm 0.5\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -11.04\text{‰} \pm 0.15\text{‰}$ )、#4E ( $\delta^2\text{H} = -49.2\text{‰} \pm 0.5\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -7.81\text{‰} \pm 0.15\text{‰}$ )、#5E ( $\delta^2\text{H} = -9.9\text{‰} \pm 0.5\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -2.99\text{‰} \pm 0.15\text{‰}$ ).

分析结果最终表示为相对于维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)的 $\delta$ 值,即<sup>[21]</sup>:

$$\delta = \left( \frac{R_{\text{样品}}}{R_{\text{标准}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, $R$ 表示重同位素与轻同位素绝对丰度之比,即同位素比率. $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测量精度分别为 $\pm 1\text{‰}$ 和 $\pm 0.3\text{‰}$ .

### 1.2 后向轨迹模型

本研究利用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)与澳大利亚气象署(BOM)研发的混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型(hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory model,即HYSPLIT模型)进行后向轨迹模拟<sup>[22,23]</sup>.该模型模拟采用的气象数据是由美国国家环境预报中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)提供的GDAS(global data assimilation system)数据(<ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1>),其空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ .采用Meteoinfo结合TrajStat插件将GDAS数据运用到HYSPLIT模式中,追踪各站点降水日的后向轨迹,以采样点为轨迹终点,以1 000 m为起算高度,起算时间设定为世界协调时00:00.考虑到平流层水汽平均停留时间为10 d左右<sup>[24,25]</sup>,因此回溯时间设定为10 d来进行后向轨迹分析.

### 1.3 浓度权重轨迹法

浓度权重轨迹法 (concentration weighted trajectory, CWT) 是一种通过气流轨迹识别潜在来源的方法, 可将研究结果可视化在网格上来判断源地. 基本思路是根据大气降水中的氘盈余日值, 结合对应的后向轨迹, 计算每条轨迹上氘盈余的权重, 从而分析塔里木河流域东部各采样点降水水汽团的潜在源地, 每个网格中均包含了一个加权的水汽氘盈余. 其运算公式如下:

$$c_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (c_k T_{ijk})}{\sum_{k=1}^m T_{ijk}} \quad (2)$$

式中,  $c_{ij}$  表示网格上加权水汽氘盈余,  $k$  为轨迹数,  $c_k$  为轨迹  $k$  经过网格  $(i, j)$  时对应的研究站点水汽氘盈余的大小,  $T_{ijk}$  是轨迹  $k$  在网格  $(i, j)$  上的停留时间, 计算过程中用落在网格内的轨迹  $k$  的端点数来替代.

## 2 结果与讨论

### 2.1 降水稳定同位素的时空分布

塔里木河流域东部降水氢氧稳定同位素时空分

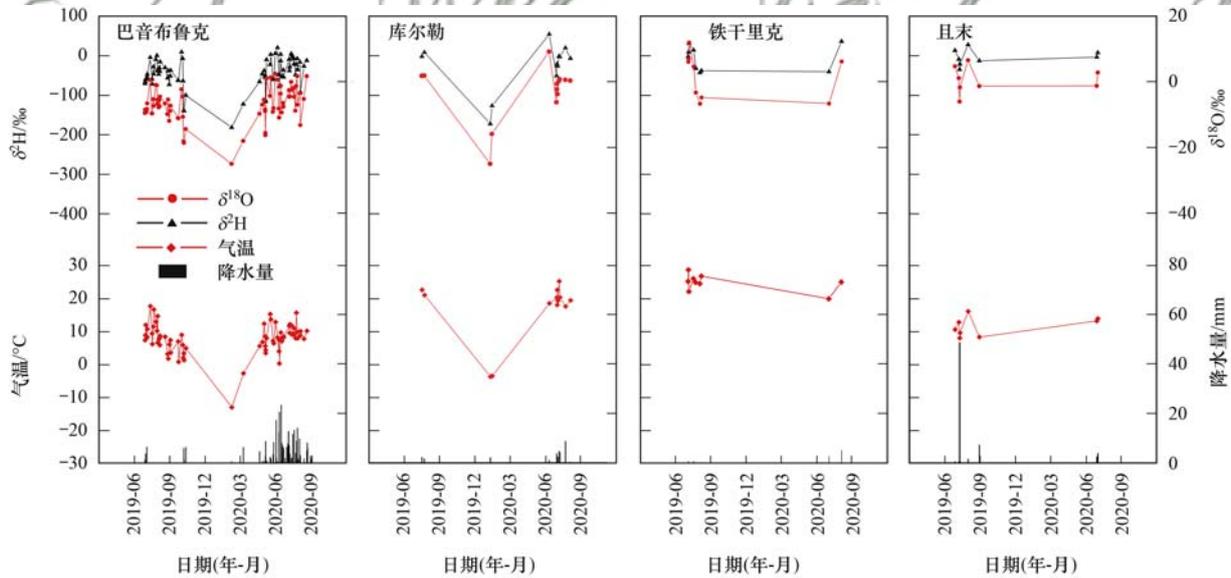


图2 塔里木河流域东部各站点降水氢氧稳定同位素值的时间变化

Fig. 2 Temporal variations in stable hydrogen and oxygen isotopic values in precipitation for each station of the eastern Tarim River basin

布的总体特征表现为南高北低和夏高冬低(表1和图2). 各采样点夏冬温差较大, 降水集中于夏季, 雨热同期(且末与铁干里克采样期内冬季无降水), 降水中的  $\delta^2\text{H}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  值在时间变化上具有同步性. 将研究区内4个采样点大致分为南北两组, 处于北部山区的巴音布鲁克与库尔勒两地降水氢氧稳定同位素值的波动范围更广泛, 并且无论是算术平均值还是加权平均值都更低, 其中  $\delta^2\text{H}$  的最低值均小于  $-200\text{‰}$ . 相比之下, 处于南部地区的铁干里克与且末两地降水氢氧稳定同位素值则偏高. 北部的两个采样点中, 库尔勒降水同位素的极值大于巴音布鲁克, 虽然算术平均值近似, 但降水加权后的平均值明

表1 塔里木河流域东部各站点降水氢氧稳定同位素值的平均值/‰

站点名称	$\delta^2\text{H}$		$\delta^{18}\text{O}$	
	算术平均值	加权平均值	算术平均值	加权平均值
巴音布鲁克	-46	-53	-6.8	-8.2
库尔勒	-44	-23	-5.3	-3.2
铁干里克	-8	-8	1.5	1.7
且末	-4	-27	0.6	4.4

显升高. 南部的两个采样点中, 且末降水同位素值的算术平均值大于铁干里克, 但加权平均值却更低.

塔里木河流域东部降水氘盈余 [即  $d$ -excess ( $d$ );  $d = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$ ] 从季节上看总体表现出夏低冬高的趋势. 降水量较多的北部采样点氘盈余平均值较大, 降水量较少的南部采样点氘盈余平均值较小. 其中巴音布鲁克氘盈余平均值为  $10.11\text{‰}$ , 库尔勒平均值为  $-3.8\text{‰}$ , 铁干里克平均值为  $-20.37\text{‰}$ , 且末平均值为  $-8.78\text{‰}$ . 铁干里克氘盈余变化范围最大, 最低值与最高值分别出现在2019年6月与

2020年6月. 塔里木河流域东部的氘盈余较全国氘盈余<sup>[26]</sup>偏小, 这可能是由于雨滴在降水过程中受云下二次蒸发的强烈影响.

### 2.2 局地大气水线

依据降水样本中  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^2\text{H}$ , 利用普通最小二乘法进行线性拟合, 可以得到地区大气水线:

$$\delta^2\text{H} = 6.19\delta^{18}\text{O} - 4.79$$

$$(r^2 = 0.92, P < 0.01, n = 103) \quad (3)$$

相对于全国大气水线的斜率(7.48)来看<sup>[11]</sup>, 本研究区域的斜率(6.19)偏低. 区域内不同采样点的

大气水线存在较大差异(图3). 其中, 大气水线如下.

巴音布鲁克为:

$$\delta^2\text{H} = 7.01\delta^{18}\text{O} + 3.39$$

$$(r^2 = 0.93, P < 0.01, n = 73) \quad (4)$$

库尔勒为:

$$\delta^2\text{H} = 6.89\delta^{18}\text{O} - 7.11$$

$$(r^2 = 0.98, P < 0.01, n = 13) \quad (5)$$

铁干里克为:

$$\delta^2\text{H} = 4.29\delta^{18}\text{O} - 14.68$$

$$(r^2 = 0.88, P < 0.01, n = 9) \quad (6)$$

且末为:

$$\delta^2\text{H} = 4.76\delta^{18}\text{O} - 6.87$$

$$(r^2 = 0.93, P < 0.01, n = 8) \quad (7)$$

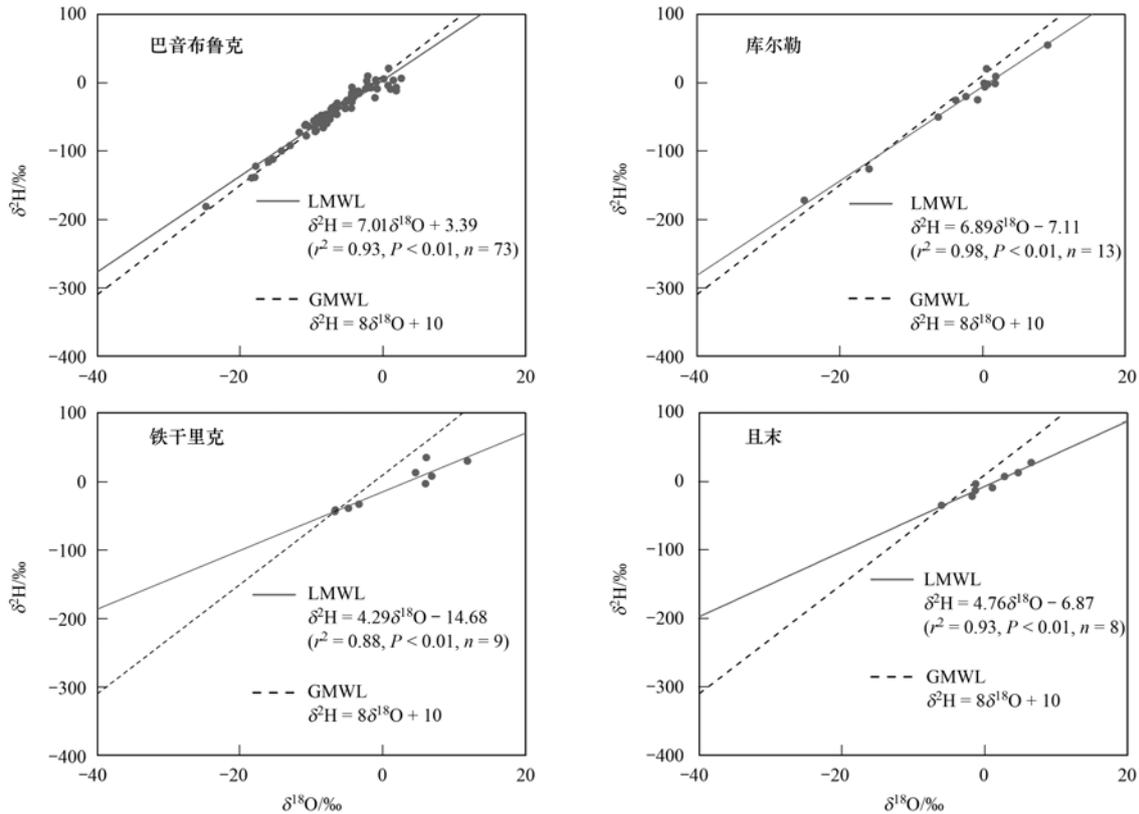


图3 塔里木河流域东部各站点的大气水线

Fig. 3 Local meteoric water lines for each station in the eastern Tarim River basin

斜率反映了 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 分馏速率,截距则表示 $\delta^2\text{H}$ 对平衡状态的偏离程度<sup>[27]</sup>.将塔里木河流域东部4个站点的大气水线与全球大气水线( $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ )相比,均呈现显著的干旱气候特征,其斜率与截距较小,表明该地区降水受到蒸发影响较大.其中巴音布鲁克大气水线的斜率(7.01)与截距(3.39)为4个站点中最高,该地地处中天山山间盆地,受西风的影响其降水量远大于其他站点,故该地的蒸发作用对降水中稳定同位素分馏影响较弱.铁干里克大气水线的斜率(4.29)与截距(-14.68)为该4个站点中最低,虽然该地年均降水量略大于偏南的且末,但更低的截距说明该采样点采样期内受到局地蒸发影响可能更大,降水中稳定同位素更多地偏离了平衡状态.从标准差来看也存在南北差异,北部巴音布鲁克与库尔勒的大气水线斜率标准差不大于0.3,铁干里克与且末则超过了0.5.

### 2.3 降水稳定同位素与气象条件的关系

在塔里木河流域东部,大气降水中的 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 对气温变化极为敏感,当气温升高蒸发加强时,降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随之变大;气温下降时, $\delta^{18}\text{O}$ 值随之变小.各站点降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温均呈现正相关关系(图4),这与前人研究得到的我国西北地区降水氢氧稳定同位素与气温呈正相关关系的结论相似<sup>[28-33]</sup>,但其回归系数在不同地区存在一定程度的空间差异.

利用塔里木河流域东部所有降水样品,得出区域尺度上 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温的回归方程为:

$$\delta^{18}\text{O} = 0.63T - 12.27$$

$$(r^2 = 0.59, P < 0.01, n = 103) \quad (8)$$

式中, $T$ 表示气温.研究区内 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温相关系数 $r$ 为0.77,除了铁干里克外其余采样点相关系数均大于0.7,且通过了0.05水平的显著性检验.各站点中,且末降水 $\delta^{18}\text{O}$ 受气温影响最为显著,相关系数

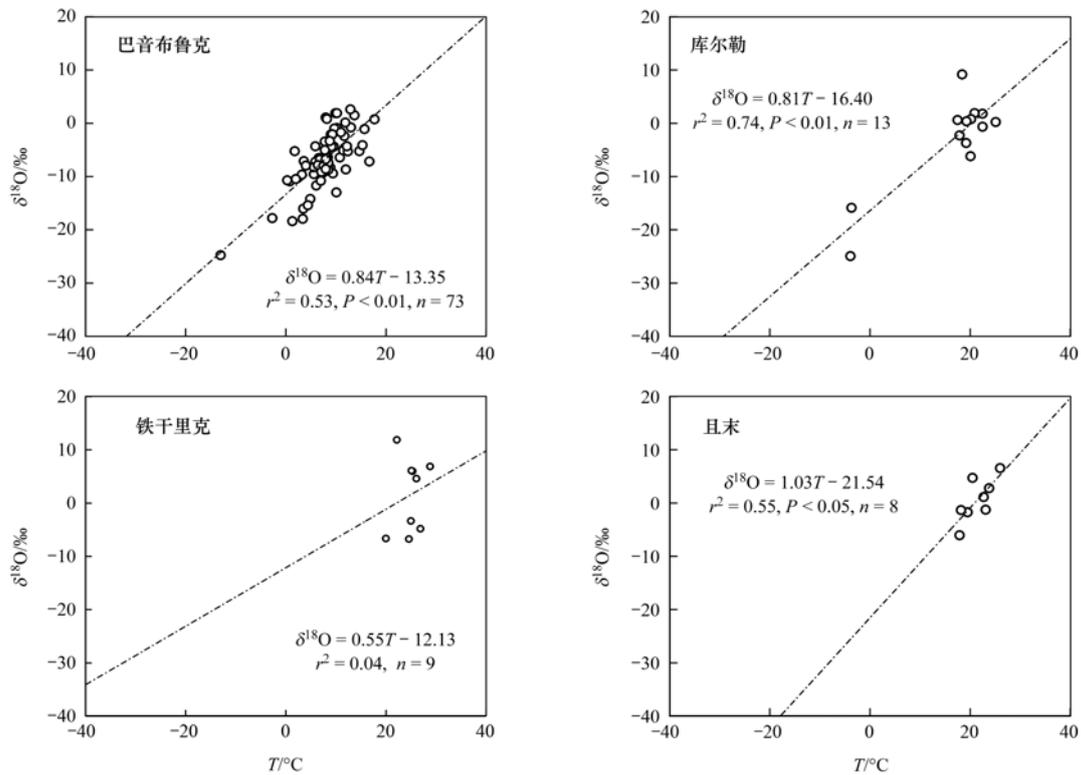


图4 塔里木河流域东部各站点降水  $\delta^{18}\text{O}$  和气温的关系

Fig. 4 Relationship between  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and air temperature for each station in the eastern Tarim River basin

为 0.86, 其斜率也最大(1.03).

研究区内各站点气温与氕盈余均表现出较弱的负相关关系, 即氕盈余随气温升高而下降. 各采样点氕盈余与气温的回归方程如下.

巴音布鲁克:

$$d = -0.98T + 17.86$$

$$(r^2 = 0.17, P < 0.01, n = 73) \quad (9)$$

库尔勒:

$$d = -0.87T + 10.69$$

$$(r^2 = 0.37, P < 0.05, n = 13) \quad (10)$$

铁干里克:

$$d = -2.37T + 38.50$$

$$(r^2 = 0.05, P = 0.58, n = 9) \quad (11)$$

且末:

$$d = -2.73T + 49.91$$

$$(r^2 = 0.31, P = 0.15, n = 8) \quad (12)$$

库尔勒气温和氕盈余的负相关关系最强, 铁干里克相关关系最弱. 同时还发现当气温高于  $20^\circ\text{C}$

时, 负相关关系较明显; 当气温处于  $0^\circ\text{C}$  左右时, 氕盈余均值在  $20\%$  左右浮动, 趋于稳定, 这可能与低温时蒸发影响较弱有关<sup>[31,34]</sup>.

将所有样品考虑在内, 研究区内降水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量关系并不显著(图5),  $r^2$  为 0.04, 其中巴音布鲁克  $r^2$  为 0.06, 库尔勒  $r^2$  为 0.02, 铁干里克  $r^2$  为 0.005; 相比之下, 且末降水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量的负相关关系较强,  $r^2$  为 0.48. 这可能是由于在夏季出现一次近 50 mm 的强降水导致降水量效应凸显(图2), 增强了该地降水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量的负相关关系.

表2中列出的是塔里木河流域东部降水量与氕盈余的相关性. 与  $\delta^{18}\text{O}$  不同, 从整体与区域上都能看出降水量与氕盈余有较弱的正相关关系. 相对于其他站点, 降水量与氕盈余的相关系数在且末地区得到了加强( $r = 0.69$ ). 在亚洲中部干旱地区, 由于降水量少, 较强的单个事件对同位素特征常存在较大的影响.

表2 塔里木河流域东部各站点降水量与氕盈余的回归系数与相关系数<sup>1)</sup>

Table 2 Slopes and correlation coefficients between precipitation amount and  $d$ -excess value for each station in the eastern Tarim River basin

项目	所有采样点	巴音布鲁克	库尔勒	铁干里克	且末
$S$	$0.69 \pm 0.25$	$0.47 \pm 0.27$	$2.47 \pm 1.49$	$4.24 \pm 6.1$	$0.59 \pm 0.25$
$r$	0.26**	0.2	0.44	0.25	0.69
$n$	109	73	13	9	8

1)  $S$  表示回归系数; \*\* 表示通过 0.01 水平的显著性检验

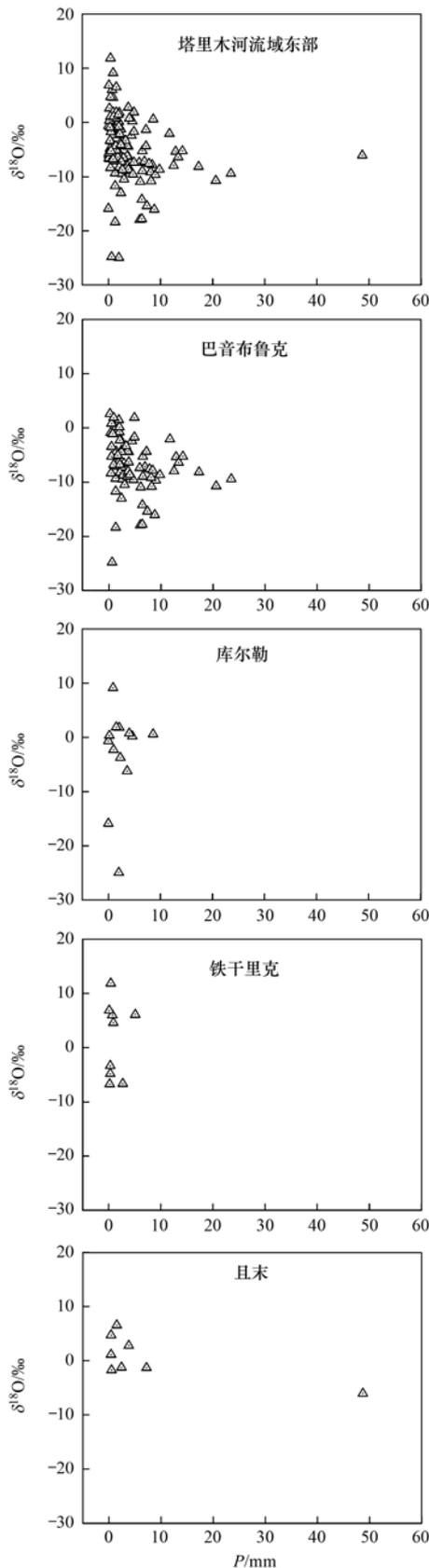


图5 塔里木河流域东部降水  $\delta^{18}\text{O}$  和降水量的关系

Fig. 5 Relationship between  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and precipitation amount for each station in the eastern Tarim River basin

表3中依次列出了各采样点相对湿度和水汽压与降水中  $\delta^{18}\text{O}$  和氡盈余的相关性,降水  $\delta^{18}\text{O}$  与相对

湿度之间存在明显的负相关关系,氡盈余则随着相对湿度的升高而增大,表现出正相关关系,这也验证了前人在亚洲中部干旱地区的研究<sup>[35~37]</sup>. 通过所有降水样本计算得到  $\delta^{18}\text{O}$  与相关系数的回归方程为:

$$\delta^{18}\text{O} = -0.24h_r + 13.14 \quad (r^2 = 0.35, P < 0.01, n = 103) \quad (13)$$

式中,  $h_r$  表示相对湿度.

氡盈余与相关系数的回归方程:

$$d = 0.73h_r - 50.36 \quad (r^2 = 0.47, P < 0.01, n = 103) \quad (14)$$

从式(13)和式(14)中可看出  $\delta^{18}\text{O}$  与氡盈余同相对湿度的相关性都较强,但与气温的相关性相比偏弱. 表3也可以看出,铁干里克的  $\delta^{18}\text{O}$  和氡盈余与大气相对湿度关系最弱,均未通过显著性检验. 在各站点降水  $\delta^{18}\text{O}$  与相对湿度的关系中,且末的相关性最强( $r = -0.93$ ),这可能与采样期内一次强降水事件发生时的大气相对湿度较大有关. 在湿润的大气中,雨滴表面的空气可能已达到饱和或接近饱和,此时雨滴的蒸发富集作用较轻,雨滴中稳定同位素变化受到周围大气水汽的影响. 当雨滴表面水汽中的稳定同位素比率高于周围大气水汽中的稳定同位素比率时,稳定同位素组成的净物质迁移由雨滴指向大气,雨滴中稳定同位素比率减小;反之,若净物质迁移由大气指向雨滴,则雨滴中稳定同位素比率增大<sup>[38]</sup>.

根据采样期内大气降水样品对应的气象要素记录,各站中巴音布鲁克的平均水汽压最低(8.14 hPa),其样品对全年时段的覆盖相对完整,而其他站点则多集中在夏季,样品对应的水汽压相对较高,库尔勒为14.57 hPa,铁干里克为16 hPa,且末为13.71 hPa. 从各站点降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与水汽压的关系来看(表3),且末呈负相关关系,其他站点则呈正相关关系,仅在铁干里克未通过0.05水平的显著性检验. 相比之下,水汽压与降水中氡盈余的相关性则普遍没有通过0.05水平的显著性检验.

## 2.4 水汽来源分析

### 2.4.1 后向轨迹模型对水汽来源的指示

利用 HYSPLIT 模型可以辅助判断气团的运动情况,图6展示了采样期内有降水的月份各站点后向轨迹模拟结果. 总体来说,塔里木河流域东部的后向轨迹可以分为西方路径、北方路径和南方路径,尤其以西方路径占主导. 青藏高原海拔高,显著地阻隔了北上的季风水汽,只有少数夏季的水汽团来自印度洋方向. 在西方路径上,大西洋、地中海以及亚欧大陆上的里海与黑海作为较大的水域都有可能成为水汽的补给来源,但限于水汽传输距离,相对较近

表 3 塔里木河流域东部各站点降水  $\delta^{18}\text{O}$  和氘盈余与相对湿度 ( $h_r$ ) 和水汽压 ( $e$ ) 的回归系数和相关系数<sup>1)</sup>

Table 3 Slopes and correlation coefficients between  $\delta^{18}\text{O}$  or  $d$ -excess in precipitation and meteorological parameters (relative humidity and water vapor pressure) for each station in the eastern Tarim River basin

采样点	$\delta^{18}\text{O}-h_r$		$d-h_r$		$\delta^{18}\text{O}-e$		$d-e$	
	S	r	S	r	S	r	S	r
巴音布鲁克	$-0.18 \pm 0.04$	$-0.45^{**}$	$0.51 \pm 0.08$	$0.61^{**}$	$1.43 \pm 0.28$	$0.52^{**}$	$0.37 \pm 0.68$	0.06
库尔勒	$-0.46 \pm 0.16$	$-0.66^*$	$0.87 \pm 0.19$	$0.81^{**}$	$1.20 \pm 0.37$	$0.70^{**}$	$-1.00 \pm 0.73$	$-0.38$
铁干里克	$-0.005 \pm 0.20$	$-0.008$	$0.45 \pm 0.82$	0.20	$0.45 \pm 1.51$	0.11	$2.09 \pm 6.08$	0.13
且末	$-0.25 \pm 0.04$	$-0.93^{**}$	$0.73 \pm 0.25$	$0.77^*$	$-1.03 \pm 0.32$	$-0.79^*$	$2.75 \pm 1.47$	0.61

1) S 表示回归系数; \* 表示通过 0.05 水平的显著性检验, \*\* 表示通过 0.01 水平的显著性检验

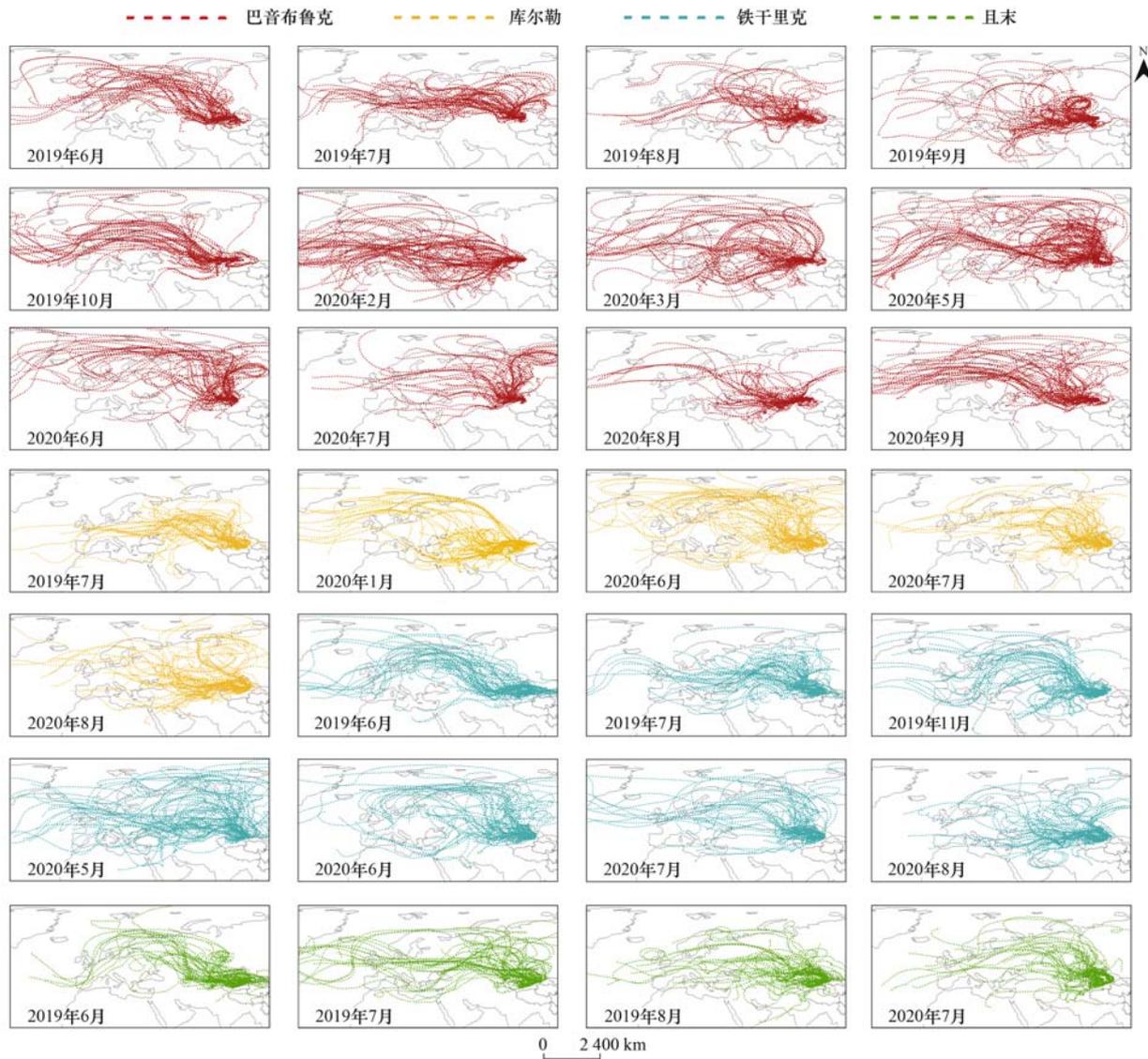


图 6 2019 ~ 2020 年塔里木河流域东部各站点降水月份水汽后向轨迹

Fig. 6 Backward trajectory of water vapor for each station in the eastern Tarim River basin during 2019-2020

的水域更有可能成为重要的水汽来源。如果将回溯日数减少, 则距离较近的潜在水源可能更为明显<sup>[35,39]</sup>。

对上述各站点后向轨迹进一步进行聚类分析可以发现(表 4), 在 5 ~ 10 月巴音布鲁克的西方路径占比约为 90%, 其中由西方路径长距离输送抵达的水汽约占 18%, 中距离和短距离占比分别约

为 35% 和 38%, 该时段气温较高, 地表蒸发旺盛, 局地再循环水汽的贡献较大, 短距离轨迹和北方路径占比都高于气温较低的其他月份。库尔勒、铁干里克与且末的降水水汽路径比例规律与巴音布鲁克相似, 西方路径占主导地位, 明显高于北方路径和南方路径, 在西方路径上的中短距离比例较高。

表 4 塔里木河流域东部各站点大气水汽路径占比/%

Table 4 Proportion of atmospheric water vapor paths for each station in the eastern Tarim River basin/%

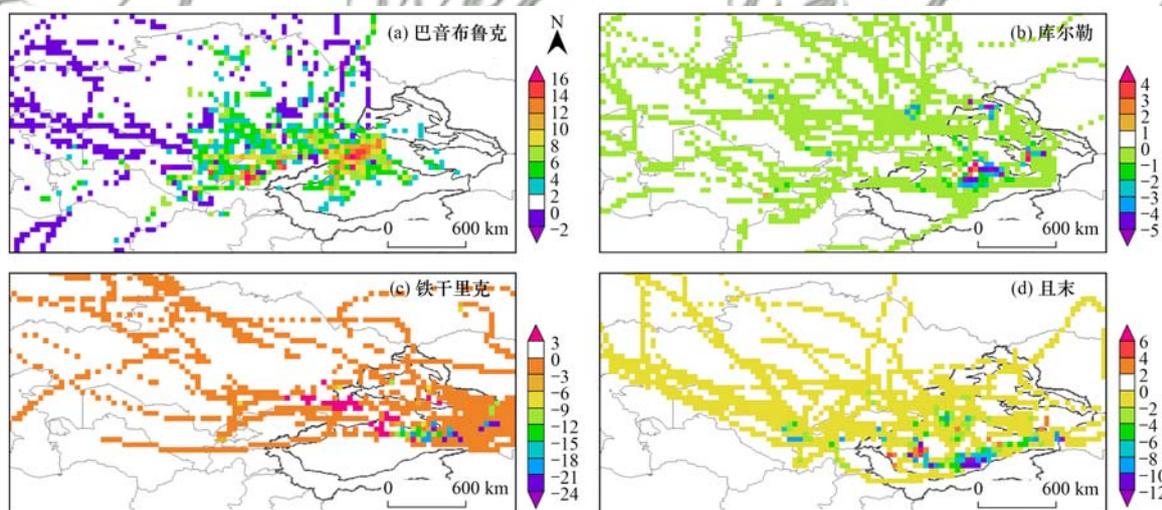
采样站点	月份	西方 <sup>1)</sup>			北方
		L	M	S	
巴音布鲁克	5~10月	17.69	34.88	37.80	9.63
	11月~次年4月	35.99	43.35	0.00	0.00
库尔勒	5~10月	11.86	39.10	39.23	9.81
	11月~次年4月	14.13	56.52	29.35	0.00
铁干里克	5~10月	7.74	37.07	55.26	0.00
	11月~次年4月	29.55	47.73	22.73	0.00
且末	5~10月	15.43	36.07	46.67	0.00
	11月~次年4月	0.00	0.00	0.00	0.00

1) L表示长距离路径占比(大西洋水汽团), M表示中距离路径占比(地中海、里海、黑海和陆地蒸发水汽), S表示短距离路径占比; 南方路径比例未展示

#### 2.4.2 浓度权重轨迹法对水汽来源的指示

浓度权重轨迹法需将所研究的站点及轨迹覆盖到的周边区域格网化,若轨迹太少则会影响研究结果,因此图7展示了降水较多的6~9月塔里木河流域东部各采样点水汽浓度权重轨迹.与后向轨迹模拟的结果大致类似,研究区内各站点降水气团均主要来源于中纬度西风带,距离降水采样点越远的气

团中的氡盈余越趋于稳定状态,这使得利用氡盈余结合浓度权重轨迹法追踪水汽源成为可能.离采样点越近,氡盈余变化越频繁,也说明氡盈余受局地水汽再循环影响较大.研究区面积较广,北部的巴音布鲁克与库尔勒采样点的水汽团源地偏西,而位于研究区南部的采样点铁干里克和且末的水汽团源地更偏向西北方.



色块数值表示氡盈余,单位: $\% \cdot \text{m}^{-3}$

图 7 2019~2020年的6~9月塔里木河流域东部各站点水汽浓度权重轨迹分析

Fig. 7 CWT analysis of water vapor for each station in the eastern Tarim River basin from June to September during 2019-2020

图8是研究区内各采样点回溯48h的后向轨迹模拟的降水水汽来源,可以看出巴音布鲁克6月偏北路径相对较多,7月和8月则更多地来自于西方路径.对照图7(a)中的水汽浓度权重轨迹,巴音布鲁克附近氡盈余偏高,向周围逐渐递变,而从西部传输而来的水汽氡盈余偏低.巴音布鲁克位于天山中部的山间盆地,西风带来的水汽形成相对丰富的降水,湿度较大,氡盈余在此处较高.

在库尔勒和铁干里克(图8),受到局地地形的影响,局地短距离路径十分明显,此时气温较高水体

蒸发强烈,局地水汽循环对该地降水贡献较大.与图7(b)对比来看,库尔勒氡盈余偏低,其西侧的少数格点则略高,这种变化有可能是受到了库尔勒附近的博斯腾湖等地表水体的影响;图7(c)中铁干里克西侧氡盈余较高,空气较铁干里克更湿润,而东侧地区则水汽含量更少,有零星的氡盈余低值.在且末(图8),水汽更多地受到南疆东南部的影响,外来水汽的影响可能进一步降低.图7(d)中,且末地处沙漠边缘,气温较高,湿度低,对应的氡盈余也低.

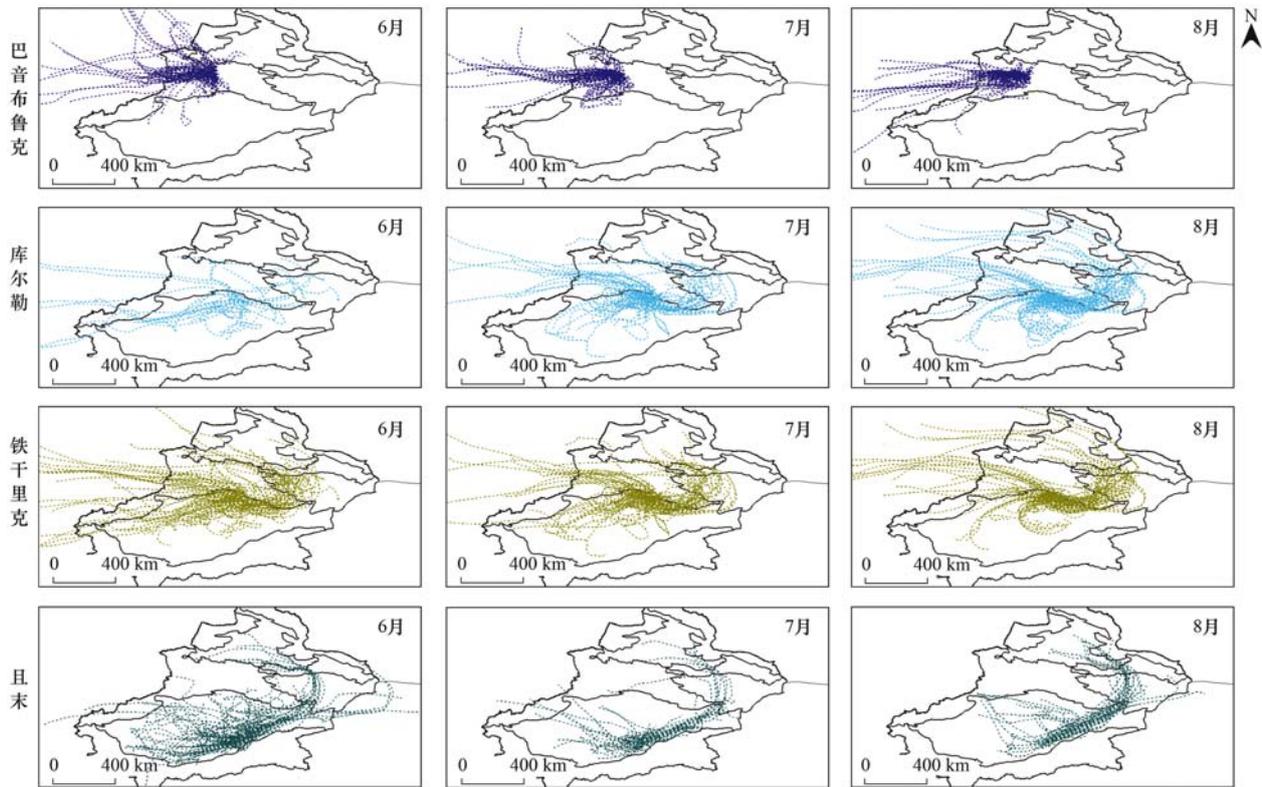


图8 2020年6~8月各采样点水汽后向轨迹分析

Fig. 8 Backward trajectory of water vapor for each station in the eastern Tarim River basin during June to August in 2020

### 3 结论

(1)塔里木河流域东部各采样点降水中氢氧稳定同位素值在空间上整体呈现南高北低的趋势,在季节变化上表现为夏高冬低的特点.研究区降水中氘盈余比全国氘盈余均值小,局地大气水线斜率呈现显著的干旱气候特征,各采样点大气水线的斜率与截距均较小.

(2)塔里木河流域东部大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温呈现正相关关系,但在不同采样点存在相关系数和同位素温度梯度的差异,而氘盈余与气温表现出较弱的负相关关系. $\delta^{18}\text{O}$ 与相对湿度有较明显的负相关关系,氘盈余则与相对湿度的正相关关系较强.

(3)研究区大气降水受到西方水汽路径控制,中短距离传输路径比例较大.通过浓度权重轨迹法发现,距离降水采样点越远的气团中的氘盈余越趋于一个稳定状态,离采样点越近则浓度变化越频繁,说明氘盈余受局地水汽再循环影响较大.

致谢:感谢新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州气象局业务科以及库尔勒市气象局、且末县气象局、和静县巴音布鲁克气象站和尉犁县铁干里克气象站对本项目采样工作的大力支持.

#### 参考文献:

[1] 马文娟,刘丹妮,杨芳,等.水环境中污染物同位素溯源的

研究进展[J].环境工程技术学报,2020,10(2):242-250.

Ma W J, Liu D N, Yang F, *et al.* Research progress in isotope methods for tracing contaminants in water environment [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10 (2): 242-250.

[2] 汤显辉,陈永乐,李芳,等.水同位素分析与生态系统过程示踪:技术、应用以及未来挑战[J].植物生态学报,2020,44(4):350-359.

Tang X H, Chen Y L, Li F, *et al.* Water isotope analysis for tracing ecosystem processes: measurement techniques, ecological applications, and future challenges [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(4): 350-359.

[3] 曾帝,吴锦奎,李洪源,等.西北干旱区降水中氢氧同位素研究进展[J].干旱区研究,2020,37(4):857-869.

Zeng D, Wu J K, Li H Y, *et al.* Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the arid regions of northwest China: a review [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 857-869.

[4] 王圣杰,张明军.新疆天山降水稳定同位素的时空特征与影响因素[J].第四纪研究,2017,37(5):1119-1130.

Wang S J, Zhang M J. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of stable isotopes in precipitation across the Chinese Tianshan mountains [J]. Quaternary Sciences, 2017, 37 (5): 1119-1130.

[5] 李宗省,冯起,李宗杰,等.祁连山北坡稳定同位素生态水文学研究的初步进展与成果应用[J].冰川冻土,2019,41(5):1044-1052.

Li Z X, Feng Q, Li Z J, *et al.* Ecohydrology based on stable isotope tracing in the northern Qilian Mountains: preliminary progress and its applications [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1044-1052.

[6] Yao J Q, Liu X C, Hu W F. Stable isotope compositions of precipitation over Central Asia [J]. PeerJ, 2021, 9, doi: 10.

- 7717/peerj.11312.
- [ 7 ] Wang S J, Zhang M J, Hughes C E, *et al.* Factors controlling stable isotope composition of precipitation in arid conditions: an observation network in the Tianshan Mountains, central Asia[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2016, **68**(1), doi: 10.3402/tellusb.v68.26206.
- [ 8 ] 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 等. 长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2615-2623.  
Wang S Y, Wang Q L, Wu J K, *et al.* Characteristics of stable isotopes in precipitation and moisture sources in the headwaters of the Yangtze river[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2615-2623.
- [ 9 ] 徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 等. 乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 155-165.  
Xu X T, Jia W X, Zhu G F, *et al.* Stable isotope characteristics and vapor source of precipitation in the south and north slopes of Wushaoling Mountain [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 155-165.
- [ 10 ] 胡月, 刘国东, 孟玉川, 等. 成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1179-1187.  
Hu Y, Liu G D, Meng Y C, *et al.* Analysis of stable hydrogen and oxygen isotope characteristics and vapor sources of event-based precipitation in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1179-1187.
- [ 11 ] Liu J R, Song X F, Yuan G F, *et al.* Stable isotopic compositions of precipitation in China[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2014, **66**(1), doi: 10.3402/tellusb.v66.22567.
- [ 12 ] Zhang M J, Wang S J. A review of precipitation isotope studies in China: basic pattern and hydrological process [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, **26**(7): 921-938.
- [ 13 ] Zhao P, Guo Z S, She D L, *et al.* Spatial distribution of the oxygen-18 in precipitation in China based on a new empirical model[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, **16**(11): 2605-2614.
- [ 14 ] Kong Y L, Wang K, Li J, *et al.* Stable isotopes of precipitation in China: a consideration of moisture sources[J]. *Water*, 2019, **11**(6), doi: 10.3390/w11061239.
- [ 15 ] 王旭东, 李升, 郭新, 等. 基于同位素技术的且末车尔臣河流域地下水补给来源分析[J]. *中国农村水利水电*, 2020, (2): 23-28, 33.  
Wang X D, Li S, Guo X, *et al.* An analysis of the groundwater recharge source of Cherchen River Basin in Qianma county[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020, (2): 23-28, 33.
- [ 16 ] Tian L D, Yao T D, MacClune K, *et al.* Stable isotopic variations in west China: a consideration of moisture sources[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**(D10), doi: 10.1029/2006JD007718.
- [ 17 ] Yao T D, Masson-Delmotte V, Gao J, *et al.* A review of climatic controls on  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation over the Tibetan Plateau: observations and simulations[J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, **51**(4): 525-548.
- [ 18 ] Li Z X, Gui J, Wang X F, *et al.* Water resources in inland regions of central Asia: evidence from stable isotope tracing[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **570**: 1-16.
- [ 19 ] Wang S J, Zhang M J, Bowen G J, *et al.* Water source signatures in the spatial and seasonal isotope variation of Chinese tap waters[J]. *Water Resources Research*, 2018, **54**(11): 9131-9143.
- [ 20 ] 陈曦. 中国干旱区自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
Chen X. *Physical geography of arid land in China*[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [ 21 ] McKinney C R, McCrea J M, Epstein S, *et al.* Improvements in mass spectrometers for the measurement of small differences in isotope abundance ratios[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1950, **21**(8): 724-730.
- [ 22 ] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**(8): 938-939.
- [ 23 ] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT\_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition[J]. *Australian Meteorological Magazine*, 1998, **47**(4): 295-308.
- [ 24 ] Trenberth K E. Atmospheric moisture residence times and cycling: implications for rainfall rates and climate change [J]. *Climatic Change*, 1998, **39**(4): 667-694.
- [ 25 ] Gat J R. Atmospheric water balance—the isotopic perspective [J]. *Hydrological Processes*, 2000, **14**(8): 1357-1369.
- [ 26 ] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
Gu W Z. *Isotope hydrology*[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [ 27 ] Bershaw J, Lechler A R. The isotopic composition of meteoric water along altitudinal transects in the Tian Shan of Central Asia [J]. *Chemical Geology*, 2019, **516**: 68-78.
- [ 28 ] 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.
- [ 29 ] 袁瑞丰, 李宗省, 蔡玉琴, 等. 干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2122-2131.  
Yuan R F, Li Z X, Cai Y Q, *et al.* Space-time characteristics and environmental significance of stable isotopes in precipitation at an arid inland river basin[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2122-2131.
- [ 30 ] Yao T D, Masson V, Jouzel J, *et al.* Relationships between  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and surface air temperature in the Urumqi River Basin, east Tianshan Mountains, China [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, **26**(23): 3473-3476.
- [ 31 ] Pang Z H, Kong Y L, Froehlich K, *et al.* Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2011, **63**(3): 352-359.
- [ 32 ] Feng F, Li Z Q, Zhang M J, *et al.* Deuterium and oxygen 18 in precipitation and atmospheric moisture in the upper Urumqi River Basin, eastern Tianshan Mountains [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **68**(4): 1199-1209.
- [ 33 ] Zhang M J, Wang S J. Precipitation isotopes in the Tianshan Mountains as a key to water cycle in arid central Asia [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2018, **10**(1): 27-37.
- [ 34 ] 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.
- [ 35 ] Wang S J, Zhang M J, Crawford J, *et al.* The effect of moisture source and synoptic conditions on precipitation isotopes in arid central Asia[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, **122**(5): 2667-2682.

- [36] 潘素敏, 张明军, 王圣杰. 新疆夏季云下二次蒸发对雨滴稳定同位素影响的定量研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(3): 488-498.  
Pan S M, Zhang M J, Wang S J. Quantitative study of sub-cloud secondary evaporation effect on stable isotopes in raindrops during summer in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(3): 488-498.
- [37] 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.
- [38] 章新平, 姚檀栋, 田立德, 等. 湿度效应及其对降水中  $\delta^{18}\text{O}$  季节分布的影响[J]. 冰川冻土, 2004, 26(4): 420-425.  
Zhang X P, Yao T D, Tian L D, et al. Humidity effect and its influence on seasonal distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(4): 420-425.
- [39] Wang S J, Du M X, Zhang M J, et al. Precipitation isotopes associated with the duration and distance of moisture trajectory in a westerly-dominant setting[J]. Water, 2019, 11(12), doi: 10.3390/w11122434.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjxx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

**期刊:**作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

**图书:**作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

**会议文集:**作者.论文名[A].见(In);编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

**学位论文:**作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

**报告:**作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

**专利:**专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjxx@rcees.ac.cn;网址:www.hjxx.ac.cn

## CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China .....	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i>	( 1 )
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil; A Review .....	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i>	( 11 )
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge .....	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i>	( 26 )
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China .....	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i>	( 37 )
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China .....	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i>	( 46 )
Real-time Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan .....	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	( 61 )
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM <sub>2.5</sub> in Yuncheng City .....	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i>	( 74 )
Three-dimensional Structure Variation of PM <sub>2.5</sub> During Cold Front Advance in Eastern China .....	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen	( 85 )
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i>	( 93 )
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China .....	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i>	( 102 )
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa .....	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i>	( 113 )
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period .....	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	( 123 )
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb .....	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i>	( 132 )
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O <sub>3</sub> and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China .....	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i>	( 140 )
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes .....	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i>	( 150 )
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels .....	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i>	( 160 )
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo .....	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i>	( 170 )
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City .....	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i>	( 180 )
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust .....	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i>	( 189 )
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources .....	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i>	( 199 )
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China .....	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i>	( 210 )
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin .....	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i>	( 220 )
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake .....	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i>	( 230 )
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals .....	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i>	( 239 )
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macroenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing .....	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i>	( 247 )
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water .....	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i>	( 256 )
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course .....	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i>	( 267 )
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City .....	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i>	( 277 )
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules .....	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i>	( 285 )
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries .....	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i>	( 295 )
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification .....	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i>	( 306 )
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangan Reservoir .....	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	( 314 )
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China .....	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan	( 329 )
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta .....	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	( 339 )
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area .....	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i>	( 349 )
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers .....	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i>	( 363 )
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration .....	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i>	( 369 )
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO <sub>2</sub> Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area .....	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i>	( 377 )
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red .....	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i>	( 387 )
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter .....	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	( 398 )
Nitritation Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment .....	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	( 409 )
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors; Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community .....	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i>	( 416 )
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics .....	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i>	( 424 )
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model .....	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i>	( 432 )
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China .....	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i>	( 442 )
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products .....	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i>	( 454 )
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique .....	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i>	( 463 )
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice .....	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i>	( 472 )
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse .....	DONG Jun-wen, GAO Pei-pei, SUN Hong-xin, <i>et al.</i>	( 481 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable .....	ZHANG Ya-ping, LU Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i>	( 490 )
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula .....	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	( 500 )
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil .....	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i>	( 510 )
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau .....	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i>	( 521 )
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion .....	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i>	( 530 )
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community .....	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	( 540 )
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China .....	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i>	( 550 )
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation .....	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i>	( 560 )
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain .....	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i>	( 569 )