

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 ..... 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 ..... 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 ..... 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 ..... 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 ..... 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 ..... 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 ..... 吴雪萍 (1926)

中国城市PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>时空分布特征和影响因素分析 ..... 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>时空变化特征及影响因素 ..... 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>污染特征及成因分析 ..... 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM<sub>2.5</sub>化学组成特征和空间差异 ..... 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM<sub>2.5</sub>来源 ..... 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM<sub>2.5</sub>改善的溢出效益 ..... 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM<sub>2.5</sub>载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 ..... 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 ..... 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 ..... 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 ..... 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 ..... 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 ..... 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 ..... 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 ..... 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 ..... 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 ..... 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 ..... 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴呈, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 ..... 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橦橦 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 ..... 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 ..... 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 ..... 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 ..... 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 ..... 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 ..... 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 ..... 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 ..... 郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 ..... 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 ..... 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 ..... 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 ..... 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 ..... 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 ..... 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 ..... 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 ..... 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N<sub>2</sub>O排放影响:基于Meta分析 ..... 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 ..... 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 ..... 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 ..... 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 ..... 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 ..... 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 ..... 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 ..... 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 ..... 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 ..... 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 ..... 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 ..... 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 ..... 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 ..... 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 ..... 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 ..... 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 ..... 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

# 西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源

张炎炎<sup>1,2</sup>, 辛存林<sup>1\*</sup>, 郭小燕<sup>2</sup>, 张博<sup>1</sup>, 陈宁<sup>1</sup>, 史延飞<sup>1</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000)

**摘要:** 综合分析西北内陆区 97 个研究站点的降水稳定同位素数据, 并结合相关气象资料, 揭示了西北内陆区降水稳定同位素  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  和  $d\text{-excess}$  时空分布特征, 明确了海拔、经纬度、温度和降雨量对降水  $\delta^{18}\text{O}$  的影响; 利用水汽通量和 HYSPLIT 模型追踪了大气降水的水汽来源. 同时, 根据关键自然地理要素的空间差异将西北内陆区划分为 4 个子区域, 对上述内容分区域进行系统分析和对比. 结果表明: ①西北内陆区降水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  的变化范围分别为  $-21.20\text{‰} \sim 1.70\text{‰}$  和  $-144.20\text{‰} \sim 5.21\text{‰}$ ,  $d\text{-excess}$  波动范围为  $-20.37\text{‰} \sim 46.48\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  和  $d\text{-excess}$  均存在显著的空间变化和季节变化特征, 河西内陆区和塔里木地区  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值相对偏正, 柴达木-青海湖区和准噶尔-吐哈地区  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  偏负. ②西北内陆区大气降水线方程的斜率和截距均小于中国和全球大气降水线, 4 个子区域亦低于全球水线, 其中塔里木地区斜率最低. ③西北内陆区海拔效应为  $-0.04\text{‰} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ , 其中河西内陆区和塔里木地区呈显著负相关; 降水  $\delta^{18}\text{O}$  与经度呈显著正相关, 而与纬度呈不显著负相关. ④西北内陆区普遍存在显著的温度效应, 呈西北高东南低的空间特征; 受气温和地形影响, 降雨量效应较微弱. ⑤西北内陆区水汽来源全年主要为西风水汽输送, 冬季受到极地气团影响, 夏季受季风水汽的入侵, 部分区域会出现极端降水事件; 过量氘夏季贫化、冬季富集, 与相对湿度呈正相关, 表明西北内陆区降水还受局地水汽再循环影响.

**关键词:** 西北内陆区; 大气降水; 稳定同位素; 水汽来源; 过量氘

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2080-16 DOI: 10.13227/j.hjxx.202304089

## Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China

ZHANG Yan-yan<sup>1,2</sup>, XIN Cun-lin<sup>1\*</sup>, GUO Xiao-yan<sup>2</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, CHEN Ning<sup>1</sup>, SHI Yan-fei<sup>1</sup>

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

**Abstract:** To understand the variability of stable isotope composition in precipitation and the water vapor sources, we compared and summarized the stable isotope data from 97 studies in the inland regions of northwestern China. The whole region is divided into four subregions (the Hexi inland region, the Tarim Region, the Qaidam-Qinghai Lake Region, and Junggar-Tuha Region) based on natural geographical elements. The results of the present study were as follows: ① the stable isotopes in precipitation exhibited significant spatial and seasonal variations in the inland region of Northwest China, with  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ , and  $d\text{-excess}$  ranging from  $-21.20\text{‰} \sim 1.70\text{‰}$ ,  $-144.20\text{‰} \sim 5.21\text{‰}$ , and  $-20.37\text{‰} \sim 46.48\text{‰}$ . The  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  values were relatively positive in the Hexi Inland and the Tarim Region, and the opposite was true in the Qaidam-Qinghai Lake and Junggar-Tuha Region. ② The slope and intercept of the Local Meteoric Water Line was lower than that of the China Meteoric Water Line and Global Meteoric Water Line. The four subregions were also lower than the Global Meteoric Water Line, especially the Tarim Region. ③ The altitude effect of the  $\delta^{18}\text{O}$  value in the inland regions of northwestern China was  $-0.04\text{‰} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ , showing a significant negative correlation with altitude in the Hexi inland region and the Tarim Region. The longitude effect of the  $\delta^{18}\text{O}$  value showed an increase, whereas the latitude effect showed the opposite trend. ④ The temperature effect was observed as an increasing trend from the southeast to northwest in the inland region of Northwest China. Due to the influence of temperature and topography, the effect of rainfall was weak. ⑤ The water vapor sources were complex in the inland region of Northwest China. The summer season was dominated by the intrusion of monsoonal vapor compared to extreme precipitation events that also occurred in some areas. The winter season was dominated by polar air vapor. The findings demonstrated the westerly vapor transport throughout the year. The results also showed the  $d\text{-excess}$  value depletion in the summer season and enrichment in the winter season, which was influenced by the local water vapor recirculation. It was also positively correlated with relative humidity.

**Key words:** inland region of Northwest China; precipitation; stable isotopes; water vapor sources;  $d\text{-excess}$

降水是全球水文循环的重要组成部分, 是陆地生态系统水文过程的输入端. 全球变暖已导致全球的水文循环发了显著改变<sup>[1,2]</sup>, 最为显著的是降水变率随气候变暖而增强, 大气极端降水随之增加<sup>[3]</sup>. 氢氧(D和O<sup>18</sup>)是降水稳定同位素的关键成分, 由于其能敏感地响应环境变化<sup>[4]</sup>, 可作为研究气候和环境变化的重要示踪剂<sup>[5]</sup>. 随着水体稳定同位素技术<sup>[6,7]</sup>在生态、水文、气象和地质等领域的广泛应用, 降

水同位素的研究受到越来越多研究人员的关注<sup>[8,9]</sup>.

在我国的西北内陆区, 目前已有大量研究针对降水同位素与气候因子的关系等进行了空间<sup>[10]</sup>和时间<sup>[11,12]</sup>上的分析; 例如柳鉴容等<sup>[13]</sup>对西北地区大气

收稿日期: 2023-04-12; 修订日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177073); 内蒙古自治区科技重大专项(zdxx2018057)

作者简介: 张炎炎(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为同位素水文, E-mail: 2021212885@nwnu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: xincunling@163.com

降水  $\delta^{18}\text{O}$  进行时空特征分析, 得出西北地区存在显著温度效应, 但降水量效应仅在 6~7 月存在, 反映西北地区的大气环流背景; 吴锦奎等<sup>[14]</sup>对黑河流域的大气降水稳定同位素时空变化进行研究, 结果表明降水中同位素的变化和气温之间呈现出非常明显的正相关关系, 但降水量效应仅在降水尺度上存在; 黄天明等<sup>[15]</sup>研究了西部降水氢氧稳定同位素温度及地理效应, 确定了降水中  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^2\text{H}$  与月平均气温、降水量、海拔高度和纬度的相关关系; 朱建佳等<sup>[16]</sup>对柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源进行分析研究, 得出降水稳定同位素特征受气温和降水影响, 且水汽来源亦具有差异性. 也有部分研究学者对西北内陆区流域降水同位素特征进行研究, 例如袁瑞丰等<sup>[17]</sup>在石羊河流域研究荒漠区、绿洲和山区之间降水稳定同位素差异, 表明该流域地区间具有显著海拔效应, 且在天气尺度下具有降雨量效应; 桂娟等<sup>[18]</sup>得出古浪河流域降水同位素低海拔地区温度效应更显著; 李永格等<sup>[19]</sup>对托来河流域的不同海拔降水稳定同位素进行研究, 表明低海拔地区有较强的云下蒸发, 高海拔地区有显著的局地水汽循环. Zhang 等<sup>[20]</sup>亦对中国西北高寒区水文同位素进行综述, 表明高寒地区存在温度和降水效应. 虽然目前对西北内陆区降水稳定同位素的研究较多, 但大部分学者仅停留在部分小区域(如乌鲁木齐<sup>[21]</sup>、敦煌<sup>[22]</sup>和天山<sup>[23]</sup>)的点尺度研究且研究时段较短, 缺少对区域的分类及整体性的解析. 然而, 我国西北内陆区地形复杂, 具有多地貌特征, 且气候差异性显著, 降水对当地水资源安全和生态系统稳定极其重要, 迫切需要对西北内陆区降水氢氧稳定同位素时空分布特征及水汽来源开展综合研究和整体分析, 这亦是进行当地水资源可持续利用和脆弱生态系统保护的基础.

本文根据西北内陆区不同流域内的气候、水文和地形地貌的空间差异, 将其划分为 4 个子区域. 通过综合文献资料中西北内陆区 97 个研究站点的降水同位素数据, 分析了整个西北内陆区及其 4 个子区域降水稳定同位素的时空分布规律, 揭示了温度、降雨、海拔和经纬度对降水稳定同位素的影响, 并结合西北内陆区水汽通量及其极端降水 HYSPLIT 后向轨迹模拟方法, 对西北内陆区的水汽来源进行追踪. 本研究结果可作为厘清西北内陆区植物水分利用、探究地表水及地下水来源、明晰降水水汽输送过程和开展古气候代用指标正确解释的重要依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

西北内陆区 ( $73.1^\circ \sim 105.9^\circ \text{E}$ ,  $32.87^\circ \sim 47.2^\circ \text{N}$ ) 地处亚欧大陆腹地 (图 1), 地形复杂多样, 广泛分布高原、沙漠和盆地, 日照时间长, 气候干燥, 蒸发强烈<sup>[24]</sup>; 年降雨量不足 200 mm<sup>[25]</sup>, 海洋水汽难以到达, 大陆性气候明显; 水资源主要来源于冰川融水<sup>[26]</sup>和山地降水<sup>[27]</sup>. 根据水文、地形、地貌和气候的差异, 结合水资源三级区划(根据《中华人民共和国水资源》对全国水资源进行分级划分<sup>[28]</sup>), 将西北内陆区划分为 4 个子区域: 将以祁连山发源的疏勒河、黑河、石羊河所连接的河西地区及阿拉善盟划分为河西内陆区 ( $94.20^\circ \sim 105.9^\circ \text{E}$ ,  $37.19^\circ \sim 38.56^\circ \text{N}$ ), 平均海拔 2 111 m, 年均气温  $8.7^\circ \text{C}$ , 年均降水量 268 mm, 大部分地区属于山前倾斜平原, 气候为大陆性干旱气候, 昼夜温差大; 柴达木-青海湖地区 ( $95.09^\circ \sim 100.76^\circ \text{E}$ ,  $36.34^\circ \sim 37.58^\circ \text{N}$ ) 被祁连山、阿尔金山和青藏高原东北部所围, 地势西北高东南低, 四周广泛分布冰川, 是冬季西风带、东南亚季风和热带季风的交汇地带, 平均海拔 3 234 m, 年均气温  $2.73^\circ \text{C}$ , 年均降水量 218 mm, 属于半干旱大陆性气候; 塔里木地区 ( $75.01^\circ \sim 87.70^\circ \text{E}$ ,  $37.13^\circ \sim 43.03^\circ \text{N}$ ) 处于天山、昆仑山和阿尔金山之间, 地势西高东低, 是典型的封闭性山间盆地, 四周环状分布, 边缘为山地戈壁, 中心是中国最大沙漠——塔克拉玛干沙漠, 平均海拔 1 497 m, 年均气温  $6^\circ \text{C}$ , 年均降雨量 177 mm, 属于暖温带大陆性气候; 将准噶尔盆地、吐鲁番盆地和哈密盆地所包围的地区统称为准噶尔-吐哈地区 ( $80.23^\circ \sim 94.70^\circ \text{E}$ ,  $41.17^\circ \sim 47.28^\circ \text{N}$ , 含乌鲁木齐), 三盆夹一山, 地势呈中间高两边低, 呈不规则平行四边形, 平均海拔 1 243 m, 年均气温  $7.25^\circ \text{C}$ , 夏季气温高, 冬季气温低, 降雨稀少, 属于温带大陆性气候.

### 1.2 数据与方法

为综合分析西北内陆区降水稳定同位素的时空分布特征及其水汽来源, 本文选取了来自全球大气降水同位素观测网 (Global Network of Isotopes in Precipitation)、中国大气降水同位素监测网络 (CHNIP) 野外站点的观测数据<sup>[29]</sup>, 同时通过相关文献资料, 共收集到西北内陆区 97 个研究点不同时段内的降水同位素数据. 气象数据选取来自中国气象数据网 (<https://data.cma.cn>) 和野外观测站实测数据, 根据西北内陆区降水和气温的变化规律, 将一年中的 4~9 月称为夏半年, 10 月至次年 3 月为冬半年. 本文所采用的同位素数据, 其分析测定可概括

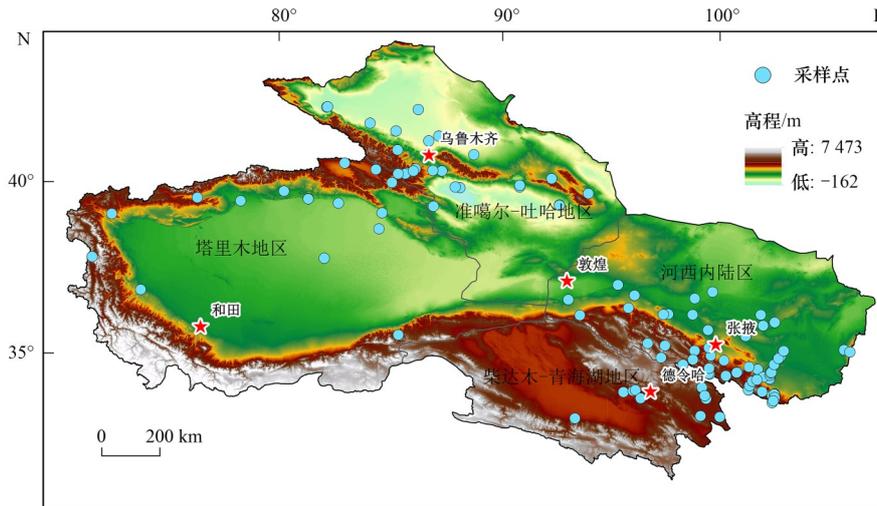


图1 西北内陆区地理位置、子区域边界和降水采样点分布示意

Fig. 1 Geographical location, sub-regional boundaries, and distribution of precipitation sampling sites in the inland region of Northwest China

为两类：一为利用光腔振荡技术采用 Picarro 或 LGR 液态水同位素分析仪进行测定，二是使用气体稳定

同位素质谱仪如 MAT-252/253. 不同气体质谱仪和同位素分析仪  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  测量精度分别为如表 1 所示.

表1 同位素测量仪及其精度  
Table 1 Isotope measuring instrument and accuracy

测量仪器及方法	$\delta D$ 精度/ $\text{‰}$	$\delta^{18}O$ 精度/ $\text{‰}$	文献
Finnigan MAT-253 气体同位素质谱仪	$\pm 1$	$\pm 0.1$	[30]
Picarro L2130-i 液态水同位素分析仪	$\pm 1$	$\pm 0.1$	[31]
MAT-252 气体质谱仪	$\pm 1$	$\pm 0.2$	[32]
LGR 液态水同位素分析仪	$\pm 0.5$	$\pm 0.2$	[22]
MM-903 质谱仪	$\pm 2$	$\pm 0.3$	[33]
DLT-100 液态水同位素分析仪	$\pm 0.6$	$\pm 0.2$	[34]

测定结果以维也纳标准平均海水 V-SMOW (vienna standard mean ocean water) 标准表示:

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

Dansgaard<sup>[7]</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*), 其反映了降水过程中稳定同位素受蒸发的强度, 过量氘在降水中受气温、相对湿度等气象条件影响, 在追踪大气降水稳定同位素来源中具有重要作用, 计算方程为<sup>[17]</sup>:

$$d\text{-excess} = \delta D - 8\delta^{18}O \quad (2)$$

本文采用 EXCEL 和 SPSS 处理数据, 使用 ArcGIS 和 Origin 制图. 利用线性回归模型<sup>[35]</sup>计算西北内陆区降水稳定同位素的大气降水线方程及其与气象因素之间的相关关系; 利用欧洲中期天气预报中心 (<https://cds.climate.copernicus.eu>) 的逐日平均水汽含量和美国国家环境预报中心/国家大气研究 (NCEP/NCAR, <http://www.esrl.noaa.gov>) 提供的平均经、纬向风分量以及地面气压资料, 所选取的站点采集数据的时间基本分布在 2006~2016 年, 因此选取 2006~2016 年的水汽资料, 计算了西北内陆区

冬半年和夏半年在 500 hPa 和 700 hPa 上空的水汽通量. 利用拉格朗日 HYSPLIT 气团轨迹模型, 对夏半年极端降水事件的水汽来源进行追踪.

## 2 结果与分析

### 2.1 大气降水稳定同位素时空变化特征

西北内陆区大气降水  $\delta^{18}O$  值的变化范围为  $-21.20\text{‰} \sim 1.70\text{‰}$ , 均值为  $-7.99\text{‰}$ ;  $\delta D$  值的范围为  $-144.20\text{‰} \sim -5.21\text{‰}$ , 均值为  $-58.86\text{‰}$  [图 2(a) 和 2(b)]. 而中国降水稳定同位素  $\delta^{18}O$  介于  $-24\text{‰} \sim 2.0\text{‰}$  之间, 均值为  $-7.95\text{‰}$ ,  $\delta D$  介于  $-190\text{‰} \sim 20\text{‰}$  之间, 均值为  $-54.82\text{‰}$ . 西北内陆区大气降水氢氧稳定同位素波动范围均在中国大气降水的变化范围内, 但西北内陆区降水稳定同位素均值小于中国, 对其进行差异性显著分析得出  $P = 0.985$ , 表明西北内陆区降水稳定同位素均值与中国无明显差异, 这是由于西北内陆区采样数据含括在中国内, 导致两者的降水稳定同位素均值差异不显著. 西北内陆区降水  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  值的波动范围比东南季风区和西南季风区大 [图 2(a) 和 2(b)], 对三者进行差异性显著分析得出

$P = 0.016 < 0.05$ , 表明西北内陆区与季风区降水稳定同位素亦具有显著差异, 这主要是由于西北内陆区分布范围广, 地貌类型多样, 海拔跨度大, 使得降水的形成过程比东南季风区和西南季风区复杂所致. 但西北内陆区大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  组成的均值却显著低于西南<sup>[36]</sup> ( $\delta^{18}\text{O}$  年均值为  $-6.49\text{‰}$ ,  $\delta\text{D}$  年均值为  $-48.60\text{‰}$ ) 和东部地区<sup>[11]</sup> ( $\delta^{18}\text{O}$  年均值为  $-6.25\text{‰}$ ,

$\delta\text{D}$  年均值为  $-43.77\text{‰}$ ), 体现了由于沿海向内陆降水重同位素逐渐贫化的变化规律, 主要原因是由于西北内陆区距海较远, 来自海洋上的大气水汽通过长途输送以后, 到达西北内陆的水汽形成的降水同位素值贫化显著; 另外, 西北内陆区降水稀少, 蒸发强烈, 同时地势纬度较高, 典型的大陆性气候特征导致降水稳定同位素年内变化显著.

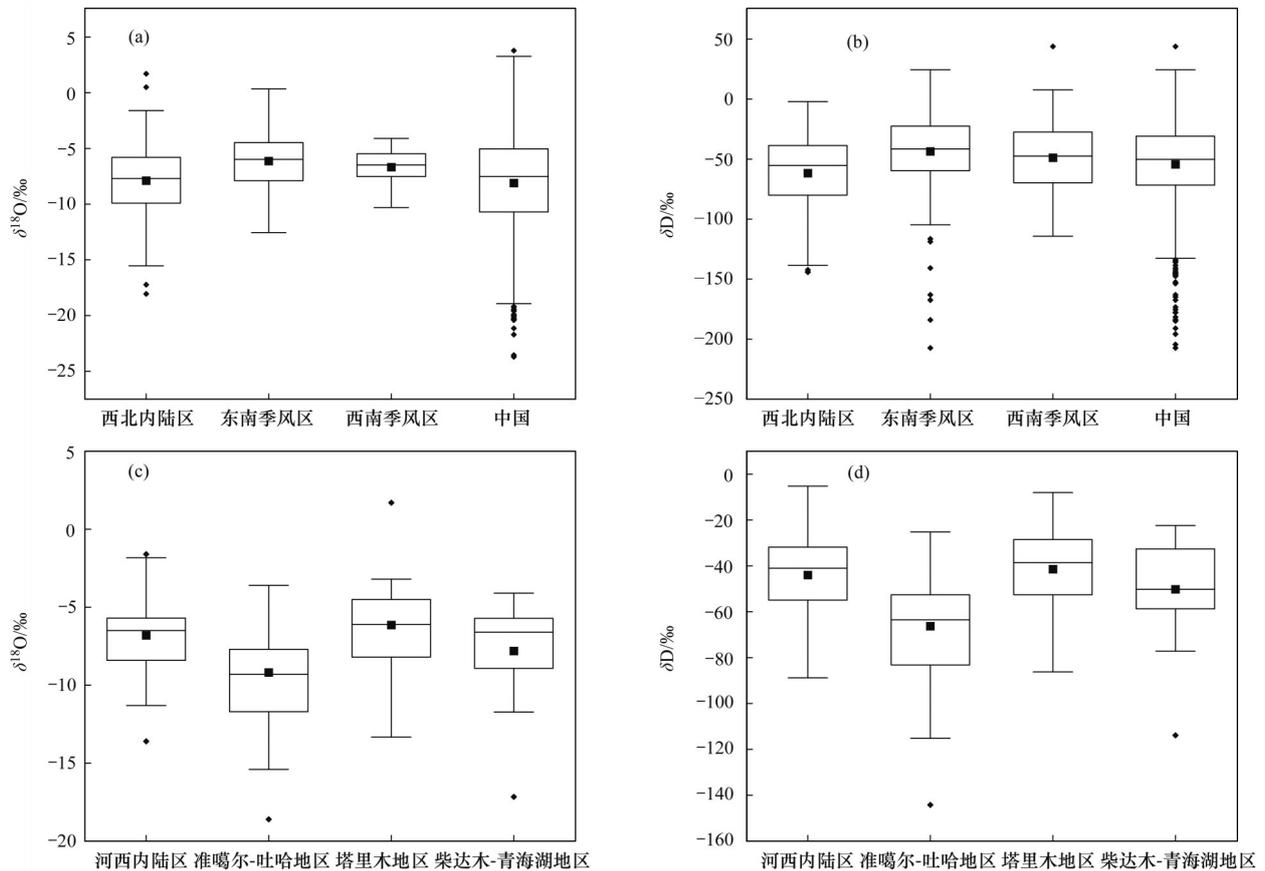


图2 西北内陆区  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值变化范围及其与其他地区的差异

Fig. 2 Range of changes in the values of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  in the inland region of Northwest China and their differences from those in other regions

西北内陆区4个子区域降水稳定同位素变化幅度并不相同[表(2), 图2(c)和2(d)], 具体而言, 河西内陆区  $\delta^{18}\text{O}$  值范围在  $-13.60\text{‰} \sim 1.60\text{‰}$ , 均值为  $-7.99\text{‰}$ ;  $\delta\text{D}$  值范围为  $-88.80\text{‰} \sim -5.21\text{‰}$ , 均值为  $-58.86\text{‰}$ , 与李佳芳等<sup>[37]</sup>、郭小燕等<sup>[22]</sup>、李永格等<sup>[19]</sup>的研究结果一致, 表明河西内陆区夏季  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值偏正, 冬季偏负的变化特征. 在准噶尔-哈密盆地地区则  $\delta^{18}\text{O}$  值范围在  $-18.60\text{‰} \sim -3.60\text{‰}$ , 均值为  $-9.07\text{‰}$ ;  $\delta\text{D}$  值范围为  $-144.20\text{‰} \sim -25.20\text{‰}$ , 均值为  $-66.29\text{‰}$ , 与郑新军等<sup>[35]</sup>在研究准噶尔东南部的降水中  $\delta^{18}\text{O}$  值为  $-36.6\text{‰} \sim 1.7\text{‰}$  和  $\delta\text{D}$  值为  $-269.3\text{‰} \sim 8.0\text{‰}$  相比, 后者冬季降水稳定同位素更贫化, 夏季更富集. 而在塔里木盆地及周边地区  $\delta^{18}\text{O}$  值范围在  $-13.33\text{‰} \sim 1.70\text{‰}$ , 均值为  $-6.21\text{‰}$ ;  $\delta\text{D}$  值范围为  $-86.20\text{‰} \sim -8\text{‰}$ , 均值为  $-41.42\text{‰}$ , 与宋洋等<sup>[38]</sup>、

吐尔逊江·艾莎等<sup>[39]</sup>和郭新等<sup>[40]</sup>得出和田等地区降水稳定同位素具有明显的季节差异结论一致. 柴达木盆地-青海湖流域地区  $\delta^{18}\text{O}$  值范围在  $-21.20\text{‰} \sim -4.10\text{‰}$ , 均值为  $-8.68\text{‰}$ ;  $\delta\text{D}$  值范围为  $-113.84\text{‰} \sim -22.40\text{‰}$ , 均值为  $-50.18\text{‰}$ , 吴华武等<sup>[41]</sup>得出青海湖地区降水中同位素值存在两个明显的变化阶段, 在8月中旬之前降水中稳定同位素值较低, 而之后明显偏高, 这与受夏季风和局地再循环水汽的影响有关; 与尹常亮等<sup>[36]</sup>和朱建佳等<sup>[16]</sup>在德令哈地区大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  季节变化显著, 夏季值高于冬季值相似. 总体而言, 河西内陆区和塔里木盆地降水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值偏正, 而准噶尔-哈密盆地和柴达木-青海湖盆地其值相对偏负. 其原因可能是由于河西内陆区和塔里木盆地是我国沙漠的主要分布区, 其气候与准噶尔-哈密盆地及柴达木-青海湖盆地相比更

为干旱, 雨滴在降落过程中容易受到二次蒸发的影响, 导致其同位素值相对偏正.

西北内陆区降水稳定同位素  $\delta^{18}\text{O}$  值在时间尺度上均表现为夏秋季富集、冬春季贫化的季节变化特征(图3). 降水  $\delta^{18}\text{O}$  值表现出在 1~7 月不断富集, 8~12 月逐渐贫化的变化规律. 而西北内陆区  $\delta^{18}\text{O}$  的月变化与东南季风区的香港<sup>[42]</sup>和西南季风区的昆明<sup>[43]</sup>[图3(a)]完全相反. 降水  $\delta^{18}\text{O}$  在西北内陆区表现为夏高冬低的变化特征, 而东南季风区(香港)和西南季风区(昆明)降水  $\delta^{18}\text{O}$  的变化特点是夏低冬高. 西北内陆区与东南季风区和西南季风区的这一显著差异可能是由于中国各地降水的季节变化明显导致, 沿海

地区降水量和温度年际变化小, 西北内陆区则变化大, 各地区水汽来源也有较大差异. 西北内陆区 4 个子区域降水稳定同位素月变化趋势基本一致[图3(b)], 只是在夏半年不同的子区域之间, 降水  $\delta^{18}\text{O}$  值差异较大. 如图3(b)所示, 准噶尔-吐哈地区和柴达木-青海湖地区是夏半年  $\delta^{18}\text{O}$  值的低值区, 而河西内陆区和塔里木地区是 high 值区,  $\delta^{18}\text{O}$  的最大值出现在 7~8 月, 最小值出现在 2 月; 塔里木盆地地区在冬季  $\delta^{18}\text{O}$  值低于其他 3 区, 在夏季高于其他区, 这可能是由于夏季蒸发强烈导致, 冬季则是受降雪影响; 准噶尔-吐哈地区在全年中除 3~5 月均比其他 3 区低, 说明其全年受气象等因素制约较强.

表 2 西北内陆区及区域降水稳定同位素特征

Table 2 Stable isotopic characteristics of precipitation in the inland region of Northwest China

研究区	海拔/m	年均温/ $^{\circ}\text{C}$	年均降水量/mm	相对湿度/%	$\delta^{18}\text{O}$ 年均值/ $\text{‰}$	$\delta\text{D}$ 年均值/ $\text{‰}$	$d$ -excess 年均值/ $\text{‰}$	站点/个
西北内陆区	1 896.25	7.71	221.12	54.17	-7.99	-58.86	10.00	97
柴达木-青海湖区	3 234.18	2.73	218.31	37.08	-8.68	-50.18	13.16	9
河西内陆区	2 111.18	8.70	264.07	57.04	-6.86	-43.38	10.81	48
准噶尔-吐哈地区	1 243.06	7.25	179.15	51.59	-9.07	-66.29	7.62	26
塔里木地区	1 497.01	5.95	177.00	53.71	-6.21	-41.42	7.08	14

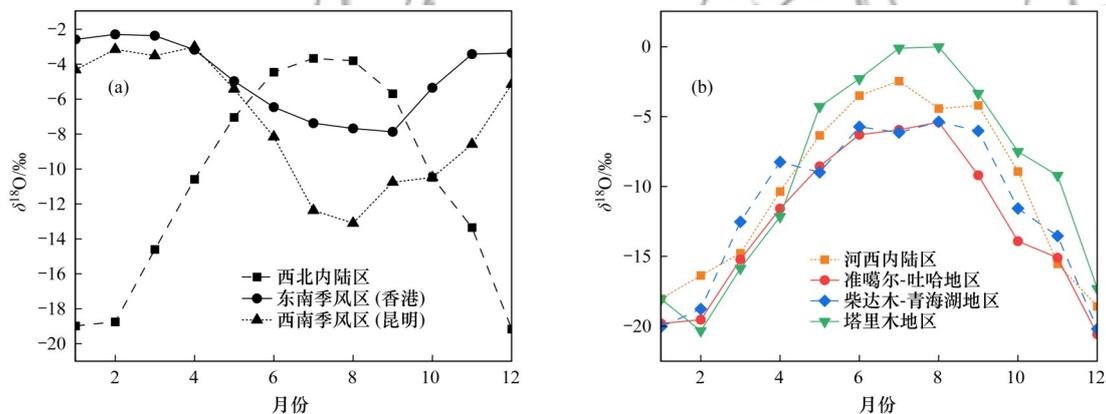


图 3 西北内陆区  $\delta^{18}\text{O}$  季节变化特征及其与其他区域的差异

Fig. 3 Seasonal variation characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  in the inland region of Northwest China and its differences from those in other regions

## 2.2 $d$ -excess 的变化特征

西北内陆区过量氘存在显著的季节变化[图4(a)], 波动范围为  $-20.37\text{‰} \sim 46.48\text{‰}$ , 均值为  $10.0\text{‰}$ , 与全球降水  $d$ -excess 值 ( $10\text{‰}$ ) 一致, 最低值出现在 6 月, 最高值出现在 12 月, 表现为夏半年贫化, 冬半年富集, 这是由于夏季气温高, 蒸发强烈, 雨滴在降落过程中受到的二次蒸发较为强烈, 导致降落到地面的雨水中  $d$ -excess 值偏负. 然而东南季风区(香港)  $d$ -excess 的变化趋势为冬高夏低, 且全年变化幅度低, 是由于夏季香港降水有台风等影响, 但其全年受到的水汽来源一致, 仍受海洋气团的影响, 但西南季风区的昆明<sup>[43]</sup>  $d$ -excess 变化规律与之相反, 其变化趋势为夏高冬低, 这表明昆明的

水汽来源与东部和西北内陆区均不一致<sup>[44]</sup>, 其显著的降雨量效应和高原的局地蒸发可能是导致其夏高冬低的原因.

$d$ -excess 值既反映了海水蒸发形成云气团时的热力条件和水汽平衡条件, 同时又反映降水形成时地理环境和气候条件. 分析西北内陆区  $d$ -excess 值的变化规律, 对研究区 4 个子区域  $d$ -excess 的月变化进行分析[图4(b)], 其中柴达木-青海湖地区  $d$ -excess 值为  $1.87 \sim 23.44\text{‰}$ , 月均值为  $14.62\text{‰}$ ; 准噶尔盆地地区  $d$ -excess 值为  $-8.6\text{‰} \sim 16.60\text{‰}$ , 月均值为  $13.53\text{‰}$ ; 河西内陆区  $d$ -excess 值为  $-3.40\text{‰} \sim 25.60\text{‰}$ , 月均值为  $7.99\text{‰}$ ; 塔里木盆地地区  $d$ -excess 值为  $-25.51\text{‰} \sim 13.07\text{‰}$ , 月均值为  $-4.33\text{‰}$ . 柴达木盆地-

青海湖地区  $d$ -excess 值在西北内陆 4 个区域中最高，比西北内陆区的降水  $d$ -excess 值高 4.6‰；塔里木盆地  $d$ -excess 值最低，比西北内陆区低 14.33‰。夏季，西北内陆区气温高蒸发强，存在较强的雨滴二次蒸发，导致  $d$ -excess 值偏负，塔里木地区在夏季  $d$ -excess 值最低，柴达木-青海湖地区最高[图 4(b)]。冬季，西北内陆区干旱少雨，气温寒冷导致蒸发减少，水汽来源受西风影响，导致  $d$ -excess 值偏正，河西内陆区和准噶尔-吐哈地区  $d$ -excess 值在冬季最高，塔里木地区较弱。柴达木-青海湖地区  $d$ -excess 值在夏季较为富集，是由于该地区的平均海拔是 4 个子区域里面最高的，约为 3 234.18 m，且年平均气温仅为 2.73℃，是 4 个子区域中最低的，当地较为高寒的气候环境，使得雨滴云下二次蒸发同其他

3 个区域相比被减弱了；同时该地区包含了中国最大的咸水湖——青海湖，湖内含盐量大，使得湖水表面蒸发减少，导致  $d$ -excess 值偏正。而塔里木地区  $d$ -excess 值在夏季较为贫化，该地区包含我国最大沙漠——塔克拉玛干沙漠，地处沙漠腹地，塔里木盆地夏季气温高，蒸发强烈，雨滴发生二次蒸发，同时受副热带高压下的西风急流导致部分地区有极端降水，局地水汽循环强烈，与其他地区相比  $d$ -excess 值在夏季偏负。河西内陆区在夏季受季风水汽影响，伴随极端降水出现， $d$ -excess 值季节差异显著；准噶尔-吐哈地区  $d$ -excess 值亦表现为冬高夏低变化特征，该地区冬季受极地气团和西风影响<sup>[34]</sup>，降水稀少，同时由于纬度较高，二次蒸发较强，引起  $d$ -excess 值较高。

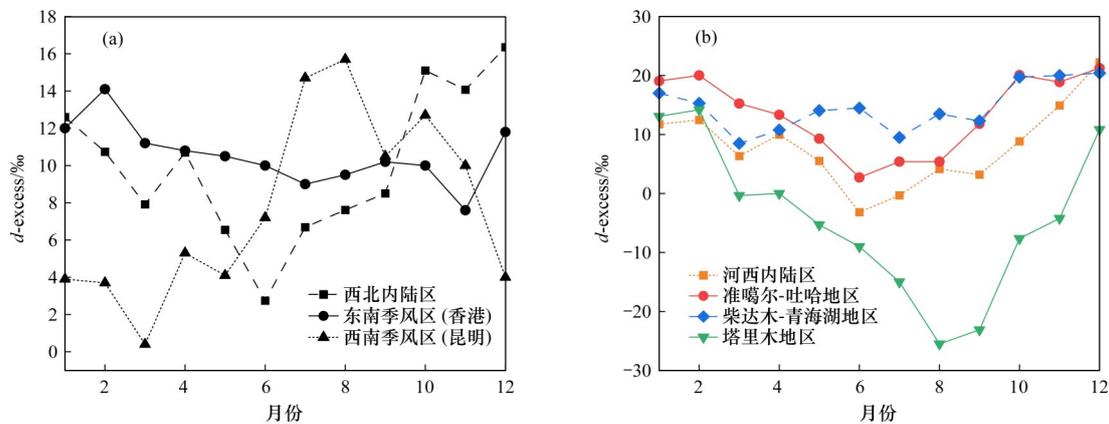


图 4 西北内陆区降水  $d$ -excess 值的季节变化特征及其与其他区域的差异

Fig. 4 Seasonal variation characteristics of precipitation  $d$ -excess values in the inland region of Northwest China and their differences from those in other regions

### 2.3 西北内陆区大气降水线方程

大气降水中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  之间的关系对于研究水循环过程中稳定同位素的变化具有重要意义。根据 97 个站点的降水  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  值，利用一元线性回归分析获得西北内陆区的大气降水线方程为：

$$\delta D = 7.45\delta^{18}O + 5.25 \quad (R^2 = 0.92) \quad (3)$$

该方程  $R^2$  值为 0.92，表明  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  的相关性较高。西北内陆区大气降水方程与中国大气降水线方程<sup>[8]</sup>： $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 8.2$  和全球大气降水方程<sup>[45]</sup>： $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$  相比，斜率和截距均小于中国和全球大气降水线，说明西北内陆区气候干燥且蒸发强烈，而有部分站点的斜率和截距高于中国大气水线，其原因是高海拔地区降水或降雪时导致的相对湿度较大，且温度低更利于重同位素富集<sup>[46]</sup>。对西北内陆区高海拔地区(2 500 m

以上)大气水线进行分析发现： $\delta D = 7.44\delta^{18}O + 8.58$  ( $R^2 = 0.96$ ,  $P = 0.001$ )，其斜率略低于西北内陆区，说明在高海拔地区存在大量的局地水汽循环，二次蒸发较强<sup>[5]</sup>；而低海拔地区(2 500 m 以下)大气方程为： $\delta D = 7.46\delta^{18}O + 4.59$  ( $R^2 = 0.92$ ,  $P = 0.016$ )，其斜率略高于西北内陆区，表明低海拔地区的云下蒸发弱于高海拔地区，水汽含量受西风影响较重，其次，海拔每升高 100 m，气温降低 0.65℃，降水同位素亦随温度发生变化。

如图 5(c) 和 5(d) 所示，可以明显看出东部季风区大气方程斜率高于西北内陆区，而截距远低于西北内陆区，说明东部季风区受蒸发程度低于西北内陆区；而西南季风区其斜率远小于西北内陆区，截距甚至为负值，表明西南季风区在冬季受温度效应较强，在夏季存在降雨量效应。

如图 6 所示，西北内陆 4 个区域大气降水方程差异较大，均低于全球大气方程，其中塔里木地区大气降水线为： $\delta D = 5.48\delta^{18}O - 7.76$  ( $R^2 = 0.95$ )，斜

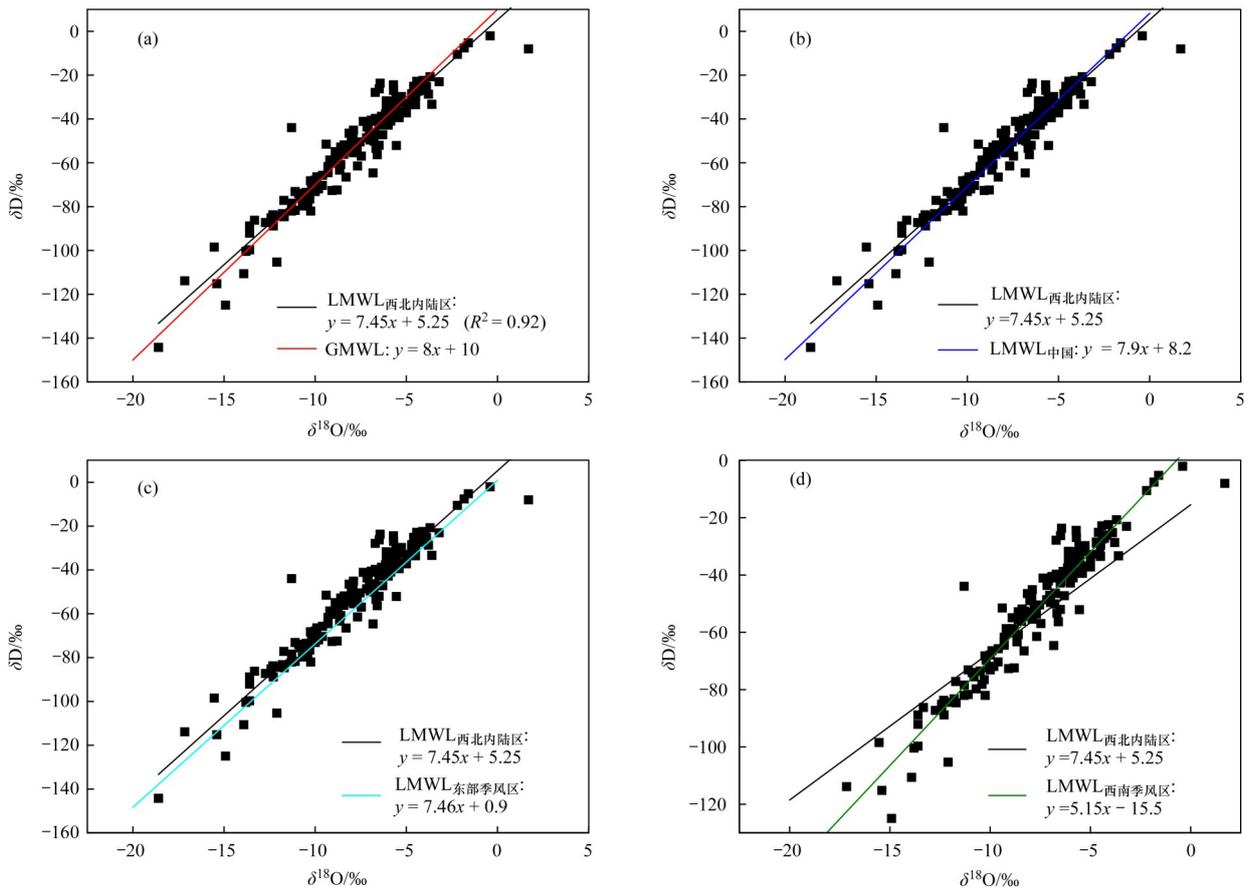


图5 西北内陆区及其他地区大气降水线对比

Fig. 5 Comparison of atmospheric precipitation lines in the inland region of Northwest China and other precipitation areas

率和截距与全球大气降水线斜率相差最大, 而塔里木地区  $d$ -excess 值远低于全国均值, 相差约 4‰, 同时夏季塔里木地区蒸发显著,  $d$ -excess 值远低于其他地区, 这与塔里木地区大气降水线斜率低于其他 3 区表现一致. 准噶尔-吐哈地区 ( $\delta D = 7.58 \delta^{18}O + 3.38$ ,  $R^2 = 0.95$ ) 与新疆天山<sup>[47]</sup> ( $\delta D = 7.6 \delta^{18}O + 2.66$ ,  $R^2 = 0.98$ ) 较为相似, 是西北内陆区距全球大气降水线斜率最小的地区, 李晖等<sup>[48]</sup>对乌鲁木齐地区大气降水的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的关系研究中得出, 造成斜率和截距较低差异主要是源于远离海洋, 气候干燥, 和来自局地的蒸发作用. 河西内陆区大气降水线 ( $\delta D = 6.53 \delta^{18}O + 0.45$ ,  $R^2 = 0.99$ ) 与张掖站<sup>[37]</sup>大气降水线 ( $\delta D = 6.76 \delta^{18}O - 4.54$ ,  $R^2 = 0.94$ ) 结果相近, 柴达木盆地-青海湖地区 ( $\delta D = 6.68 \delta^{18}O + 3.37$ ,  $R^2 = 0.95$ ) 与托来河上游<sup>[19]</sup> ( $\delta D = 7.69 \delta^{18}O + 15.53$ ) 斜率相似, 均表明在干旱区水汽在输送过程中发生了动力分馏. 西北内陆区  $\delta^{18}O$  的月均值随海拔升高基本呈下降趋势(图 7), 同时  $d$ -excess 值亦随海拔升高呈增加趋势, 均证明在水汽循环中, 雨滴在降落过程中受到了二次蒸发, 并存在局地再循环水汽的混入, 而西北内陆 4 个子区域大气降水线均小于全国大气降水线, 进一步证实西北内陆区降水稳定同位素除受环境因子影响

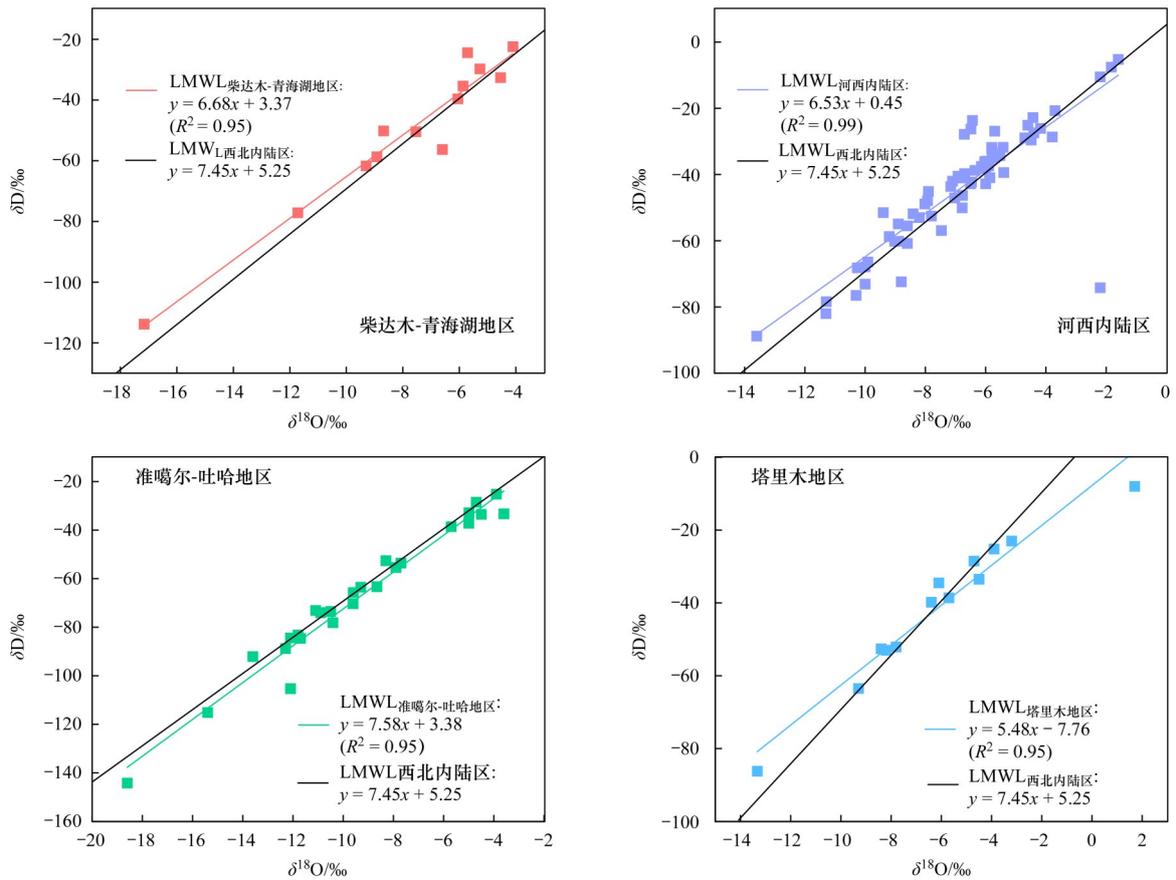
外, 水汽来源亦是重要影响因素.

### 3 讨论

Dansgaard<sup>[7]</sup>早在 1964 年就提出影响降水中稳定同位素时空分布的相关因素, 为温度效应、纬度效应、海拔效应、雨量效应和大陆效应等, 目前有关影响降水稳定同位素的研究也都是通过这几个方面分析.

**3.1 海拔和经纬度对西北内陆区降水稳定同位素的影响**

西北内陆区的降水  $\delta^{18}O$  值与海拔 ( $H$ ) 呈现显著负梯度(图 7), 线性关系为:  $\delta^{18}O = -0.0004H - 6.92$  ( $R^2 = 0.013$ ,  $P = 0.21$ ), 即海拔越高,  $\delta^{18}O$  值越低, 海拔每升高 100 m,  $\delta^{18}O$  减少 0.04‰, 在相关性检验中  $R^2$  仅为 0.013, 表现为不显著弱相关. 将  $d$ -excess 与海拔进行线性回归分析, 得到  $d\text{-excess} = 0.0032H + 3.99$  ( $R^2 = 0.19$ ,  $P < 0.01$ ), 表明西北内陆区过量氘有显著的海拔效应, 海拔每升高 100 m,  $d$ -excess 增加 0.32‰. 根据现有关于西北内陆区降水  $\delta^{18}O$  与海拔的相关性研究, 其斜率大多为负, 波动范围在  $-0.0167 \sim 0.003$ , 表明海拔升高,  $\delta^{18}O$  减少; 如祁连山<sup>[80]</sup>的海拔效应为  $-0.26\text{‰} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ , 而张子宇<sup>[49]</sup>



色块表示站点所对应的降水稳定同位素  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  的对应值

图 6 西北内陆 4 个子区域大气降水水线方程

Fig. 6 Atmospheric precipitation waterline equations for four subregions in the inland region of Northwest China

在对西北高寒区海拔梯度研究中，得出  $\delta^{18}\text{O} = -0.0013H + 8.56$  ( $R^2 = 0.80$ ,  $P < 0.05$ )，表明昆仑山地

区在年际中有显著的海拔效应，刘忠方等<sup>[10]</sup>研究表明中国降水稳定同位素与海拔有显著的负相关。

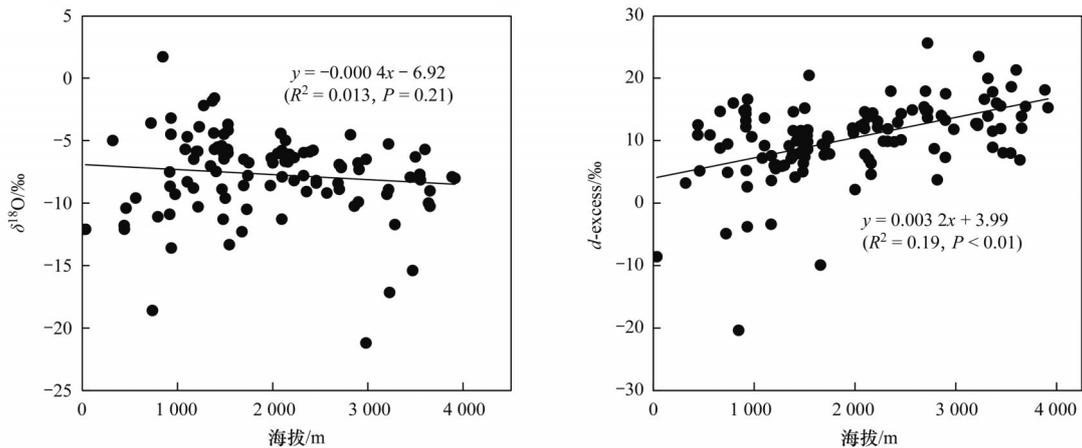


图 7 西北内陆区的降水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $d\text{-excess}$  的海拔效应

Fig. 7 Precipitation in the inland region of Northwest China  $\delta^{18}\text{O}$  and  $d\text{-excess}$  altitude effects

为了进一步明确西北内陆区 4 个区  $\delta^{18}\text{O}$  与海拔高度的关系(图 8)，本文对  $\delta^{18}\text{O}$  和海拔高度( $H$ )进行相关分析，结果表明河西内陆区  $\delta^{18}\text{O} = -0.0013H - 4.24$  ( $R^2 = 0.21$ ,  $P = 0.0003$ ) 降水  $\delta^{18}\text{O}$  值与海拔呈现显著负相关性，海拔升高 100 m， $\delta^{18}\text{O}$  减少 0.13‰。塔里木地区 ( $\delta^{18}\text{O} = -0.003H - 1.87$  ( $R^2 = 0.23$ ,  $P =$

0.09))也表现为显著的负相关，海拔升高 100 m， $\delta^{18}\text{O}$  减少 0.3‰；而柴达木青海湖地区  $\delta^{18}\text{O} = 0.004H - 23.56$  ( $R^2 = 0.04$ ,  $P = 0.54$ )和准噶尔-吐哈地区  $\delta^{18}\text{O} = 0.0002H - 9.28$  ( $R^2 = 0.004$ ,  $P = 0.73$ )降水  $\delta^{18}\text{O}$  值与海拔相关性较弱，这主要是由于受到局地较强云下二次蒸发和大气水分循环过程的影响。

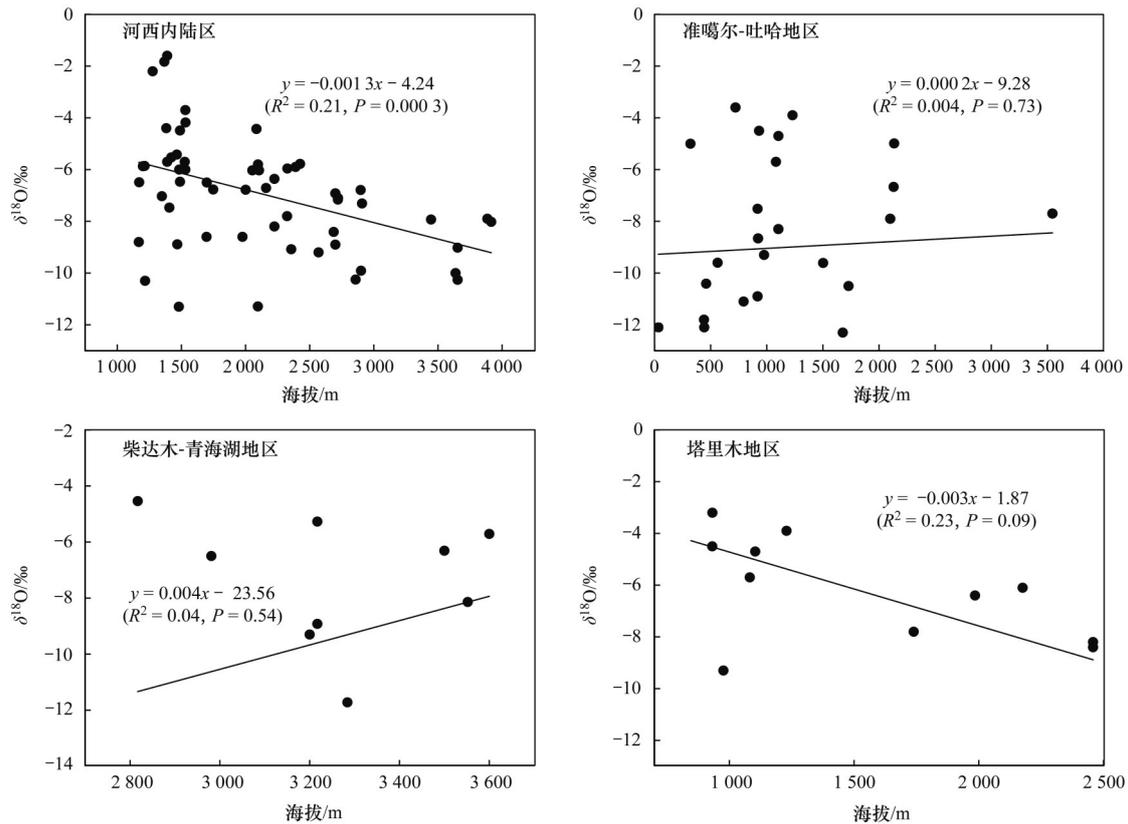


图8 西北内陆区不同子区域降水  $\delta^{18}\text{O}$  值与海拔之间的关系

Fig. 8 Relationship between precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  values and altitude in different subregions of the inland region of Northwest China

为揭示经度(E/W)和纬度(N/S)对西北内陆区降水  $\delta^{18}\text{O}$  的影响,对二者分别进行一元线性相关分析,发现经度与  $\delta^{18}\text{O}$  的相关关系为:  $\delta^{18}\text{O} = 0.018E - 9.61$  ( $R^2 = 0.0013, P = 0.69$ );  $\delta^{18}\text{O}$  值与经度成正相关,并通过了0.05水平的显著性检验,降水  $\delta^{18}\text{O}$  值随经度的变化率为  $0.18\text{‰} \cdot (10^\circ)^{-1}$ ,也就是说经度每增加  $10^\circ$ ,降水  $\delta^{18}\text{O}$  值就会随之增加  $0.18\text{‰}$ . Wu 等<sup>[50]</sup>也发现在冬季西北地区降水同位素的分布与经向变化有关.例如,德令哈<sup>[51]</sup>(地处  $97.97^\circ\text{E}$ )  $\delta^{18}\text{O}$  年值为  $-6.50\text{‰}$ ,祁连山<sup>[52]</sup>(地处  $102^\circ\text{E}$ )  $\delta^{18}\text{O}$  年值为  $-5.90\text{‰}$ .而研究结果指出在95%的置信区间下,  $\delta^{18}\text{O}$  值与纬度成不显著相关  $\delta^{18}\text{O} = -0.183N - 0.54$

( $R^2 = 0.013, P = 0.20$ )(图9),降水发生的纬度越高,降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  值就会越低,但其相关性未通过0.05水平的显著性检验,这可能是源于西北内陆区远离海洋且大陆性气候明显,蒸发强且降雨少,自然环境的影响超过了地理因子的影响.尽管其显著性微弱,但仍在西北内陆区有一定影响,比如库尔勒<sup>[38]</sup>(地处  $41.25^\circ\text{N}$ )  $\delta^{18}\text{O}$  年值为  $-3.2\text{‰}$ ,高山站<sup>[53]</sup>(地处  $45.10^\circ\text{N}$ )  $\delta^{18}\text{O}$  年值为  $-7.70\text{‰}$ .

### 3.2 降水稳定同位素的温度效应和降水量效应

西北内陆区大部分地区处于中高纬度且海拔较高,降水稳定同位素具有显著的温度效应,根据现有西北内陆区针对  $\delta^{18}\text{O}$  与温度( $T$ )的关系所做的研究

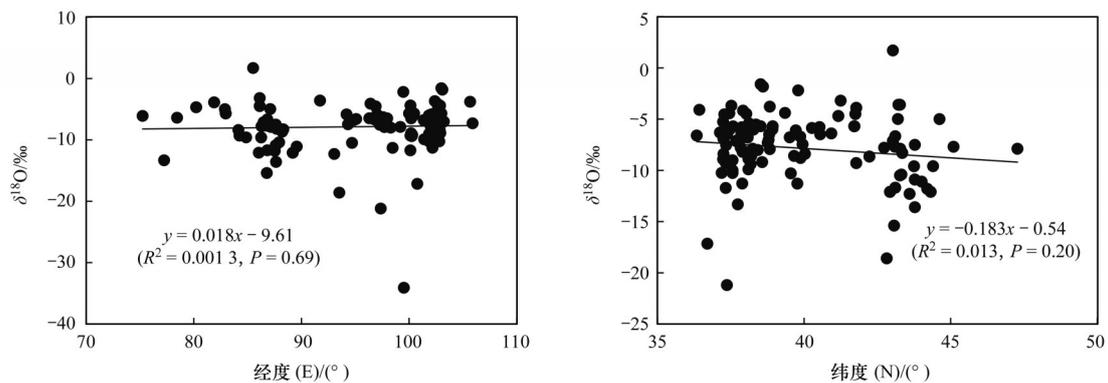


图9 西北内陆区降水  $\delta^{18}\text{O}$  与经度和纬度的关系

Fig. 9 Precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  in the inland region of Northwest China in relation to latitude and longitude

表明,不同地区具有不同的温度效应(表3).通过对西北内陆区部分站点的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度进行分析发现,其呈现显著相关性,气温每上升 $1^\circ\text{C}$ , $\delta^{18}\text{O}$ 值增加 $0.60\text{‰}$ ( $R^2 = 0.52$ ),其中,准噶尔-吐哈地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值受温度的控制较强,温度梯度为 $0.75\text{‰}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ( $R^2 = 0.73$ ),如乌鲁木齐<sup>[23]</sup>和喀什流域<sup>[54]</sup> $\delta^{18}\text{O}$ 与 $T$ 具有显著的相关性, $R^2$ 分别为0.97和0.66;其次是塔里木地区,温度梯度为 $0.7\text{‰}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ( $R^2 = 0.61$ ),和田<sup>[39]</sup>则表现为明显的温度效应,夏季降水

稳定同位素富集,冬季贫化,相差 $25\text{‰}$ 左右;河西内陆区 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度亦具有正相关,其温度上升 $1^\circ\text{C}$ , $\delta^{18}\text{O}$ 值增加 $0.59\text{‰}$ ( $R^2 = 0.53$ ),敦煌<sup>[22]</sup>和张掖<sup>[37]</sup>均具有显著的温度效应;柴达木-青海湖地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值对气温的变化的响应相对较弱,温度梯度仅为 $0.29\text{‰}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ( $R^2 = 0.22$ ),但仍有一定的温度效应,如德令哈站<sup>[16]</sup>在对温度的响应中相关性仅有0.27,而托来河流域研究则表明气温在 $0\sim 10^\circ\text{C}$ 时,温度效应不显著<sup>[19]</sup>.

表3 研究区部分站点降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度( $T$ )及降水量( $P$ )的相关关系

Table 3 Correlation between precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  and temperature ( $T$ ) and precipitation ( $P$ ) at some stations in the study area

研究区	研究点	温度效应	相关性( $R^2$ )	降水效应	相关性( $R^2$ )	文献
河西内陆区	野牛沟	$\delta^{18}\text{O} = 0.73T - 11.02$	0.81	$\delta^{18}\text{O} = -0.17P - 18.96$	0.68	[49]
	敦煌	$\delta^{18}\text{O} = 0.92T - 19.33$	0.85	$\delta^{18}\text{O} = -1.58P - 2.21$	0.1	[22]
	张掖	$\delta^{18}\text{O} = 0.496T - 14.07$	0.64	$\delta^{18}\text{O} = 0.03P - 6.06$	0.22	[37]
	祁连北山	$\delta^{18}\text{O} = 0.56T - 11.98$	0.75	$\delta^{18}\text{O} = 0.001P - 5.56$	0.001	[55]
	阿拉善地区	$\delta^{18}\text{O} = 0.52T - 12.61$	0.56	$\delta^{18}\text{O} = -0.06P - 4.1$	0.002	[56]
柴达木-青海湖地区	德令哈	$\delta^{18}\text{O} = 0.77T - 18.65$	0.27	$\delta^{18}\text{O} = -0.06P - 5.75$	0.01	[57]
	格尔木	$\delta^{18}\text{O} = 0.03T - 5.95$	0.001	$\delta^{18}\text{O} = 0.13P - 6.09$	0.01	[57]
	青海湖流域	$\delta^{18}\text{O} = -0.4T - 3.24$	-0.3	$\delta^{18}\text{O} = -0.4P - 5.30$	-0.45	[41]
准噶尔-吐哈盆地	天山观测站	$\delta^{18}\text{O} = 0.80T - 12.98$	0.56	$\delta^{18}\text{O} = -1.7P - 3.57$	-0.39	[58]
	喀什流域	$\delta^{18}\text{O} = 0.73T - 18.21$	0.66	$\delta^{18}\text{O} = 0.19P - 16.42$	0.01	[54]
	乌鲁木齐	$\delta^{18}\text{O} = 0.72T - 15.90$	0.97	$\delta^{18}\text{O} = 0.29P - 14.71$	0.68	[23]
塔里木地区	和田	$\delta^{18}\text{O} = 0.68T - 15.35$	0.77	$\delta^{18}\text{O} = 0.10P - 10.97$	0.11	[59]
	乌恰	$\delta^{18}\text{O} = 0.89T - 19.43$	0.81	$\delta^{18}\text{O} = 0.22P - 15.87$	0.20	[49]
	巴音布鲁克	$\delta^{18}\text{O} = 0.66T - 13.96$	0.77	$\delta^{18}\text{O} = 0.20P - 20.35$	0.37	[49]
	江卡	$\delta^{18}\text{O} = 0.71T - 16.23$	0.72	$\delta^{18}\text{O} = 0.84P - 18.92$	0.27	[49]

西北内陆区年降雨量仅有221 mm,集中在夏季,冬季降水稀少.由表2可知,西北内陆区的降水稳定同位素值在雨季并未表现明显的降水量效应.通过对西北内陆区 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量线性分析,结果表明西北内陆区降水量效应 $-0.19\text{‰}\cdot\text{mm}^{-1}$ ( $R^2 = 0.08$ )呈现显著不相关的负梯度,这可能是季节尺度上的温度效应过于明显,完全掩盖了降水量效应.但在子区域尺度上,准噶尔-吐哈地区、河西内陆区、柴达木-青海湖地区、和塔里木地区降水量效应( $\text{‰}\cdot\text{mm}^{-1}$ )分别为: $-0.41$ ( $R^2 = 0.10$ )、 $-0.27$ ( $R^2 = 0.11$ )、 $-0.13$ ( $R^2 = 0.04$ )和 $-0.10$ ( $R^2 = 0.11$ ),由于西北内陆区纬度海拔的升高,距海愈远,整体西北内陆区的降雨量效应基本上不存在.吴锦奎等<sup>[14]</sup>在黑河流域得出降水稳定同位素与降水量呈微弱的负相关,朱建佳等<sup>[16]</sup>的研究表明在柴达木盆地降水量效应基本不存在.证明在西北内陆区,降水量效应不是决定降水稳定同位素的关键因素<sup>[60]</sup>.而在单个连续降水事件,同位素值也表现出一定的淋溶效应,连续降雨过程使降水同位素值越来越小<sup>[61]</sup>,降水初期和降水结束期其同位素差异显著.疏勒河在2013

年6月的一次持续降雨中降雨同位素值越来越负<sup>[90]</sup>,而大量的来自季风的水汽会导致北方地区 $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐偏负.

通过对西北内陆区各研究站点降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水的变化率及其相关性系数空间分析,发现西北内陆区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的温度效应强烈[图10(a)和10(c)],但降雨量效应并不显著[图10(b)和10(d)].从空间变化特征来看,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 温度效应表现为西北高东南低[图10(c)],准噶尔-吐哈地区和塔里木地区北部受温度影响,表现为显著正相关;而在河西内陆区和柴达木-青海湖地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 温度效应则较弱.值得注意的是高海拔地区,由于温度低,温度效应则是呈显著负相关.降雨量效应整体表现为中部低四周高的空间变化规律[图10(a)],除准噶尔-吐哈地区周边降雨量效应为负相关,其他地区均为正相关,但并不显著,降雨量效应也较为微弱;其次由图10(b)可知,有降雨量效应的地区基本分布在高海拔降雨量高的地区,而降雨量低的地区,基本无降雨量效应.

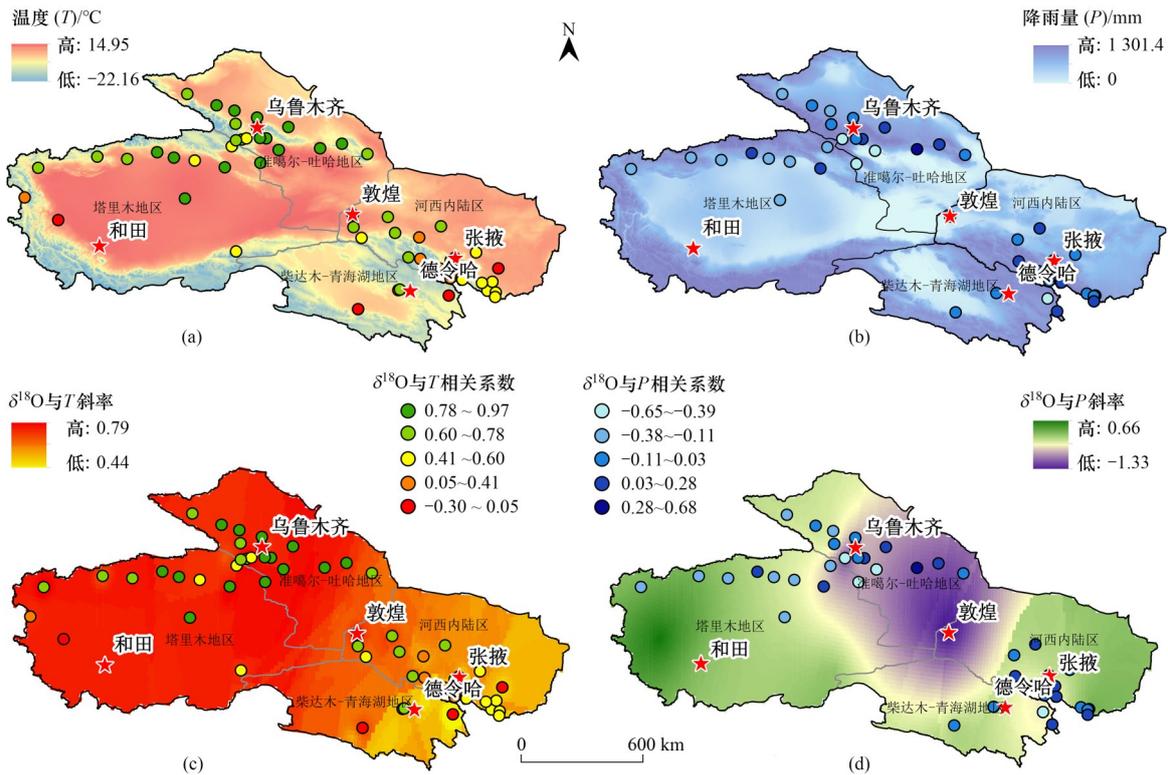


图 10 西北内陆区降水温度效应与降雨量效应

Fig. 10 Precipitation temperature effect and rainfall effect in the inland region of Northwest China

### 3.3 过量氘与水汽来源

过量氘含有水汽来源的重要信息,在追踪大气降水水中稳定同位素的来源中作为重要的示踪剂<sup>[62]</sup>.影响过量氘的变化主要因素是气温和相对湿度<sup>[63]</sup>,图4所示,过量氘在夏半年贫化,冬半年富集, $d$ -excess 值范围为 $-20.37\text{‰} \sim 46.48\text{‰}$ ,表明西北内陆区过量氘随气温的升高而降低,而研究过量氘与相对湿度相关关系发现两者呈正相关,相对湿度越高, $d$ -excess 值越高(图11),其拟合方程为: $d$ -excess =  $0.29RH - 7.53$ ,  $R^2 = 0.26$ ,  $P = 0.01$ .说明  $d$ -excess 值在夏季高温时,由于相对湿度大,造成降水时雨滴下降过程中受到地面的高温蒸发,使  $d$ -excess 值减小,而西北内陆区虽然夏季是雨季,但由于其气候干燥,降雨量少且持续时间短,导致过量氘在夏季表现为负值.孙从建等<sup>[64]</sup>在对塔里木盆地站点研究中曾说明,夏季较高的过量氘值可能与当地夏季降水再度蒸发有关,夏季低海拔被蒸发的水汽在途经山区时会再次凝结降水,此时将造成高海拔地点过量氘值增大.而造成夏季降水的水汽来源,部分研究得出夏季主要水汽来源于西风气团和局部的再蒸发,而来自大西洋的暖湿气团降水相对湿度高,导致形成降水过量氘处于较低值<sup>[65]</sup>.冬季来自极地水汽相对湿度低,导致降水中过量氘值较高,赵玮<sup>[66]</sup>对疏勒河流域水汽来源追踪中分析发

现,西风水汽可能来源于亚欧大陆高纬度地区,北大西洋等海洋性水汽,局地再循环水汽大多来源于附近区域的蒸发,夏季的西南季风可能来源于印度洋的海洋性水汽,而冬季水汽源地可能为青藏高原.

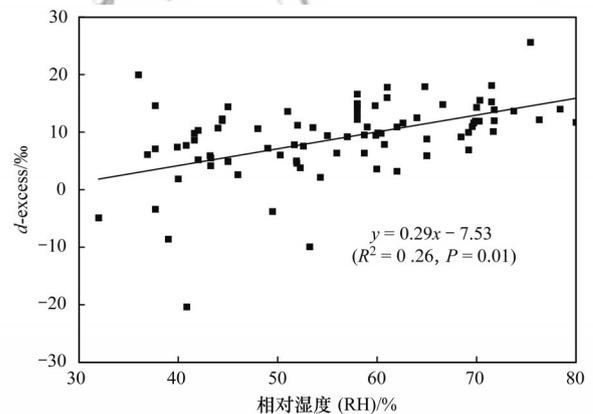


图 11 过量氘与相对湿度的相互关系

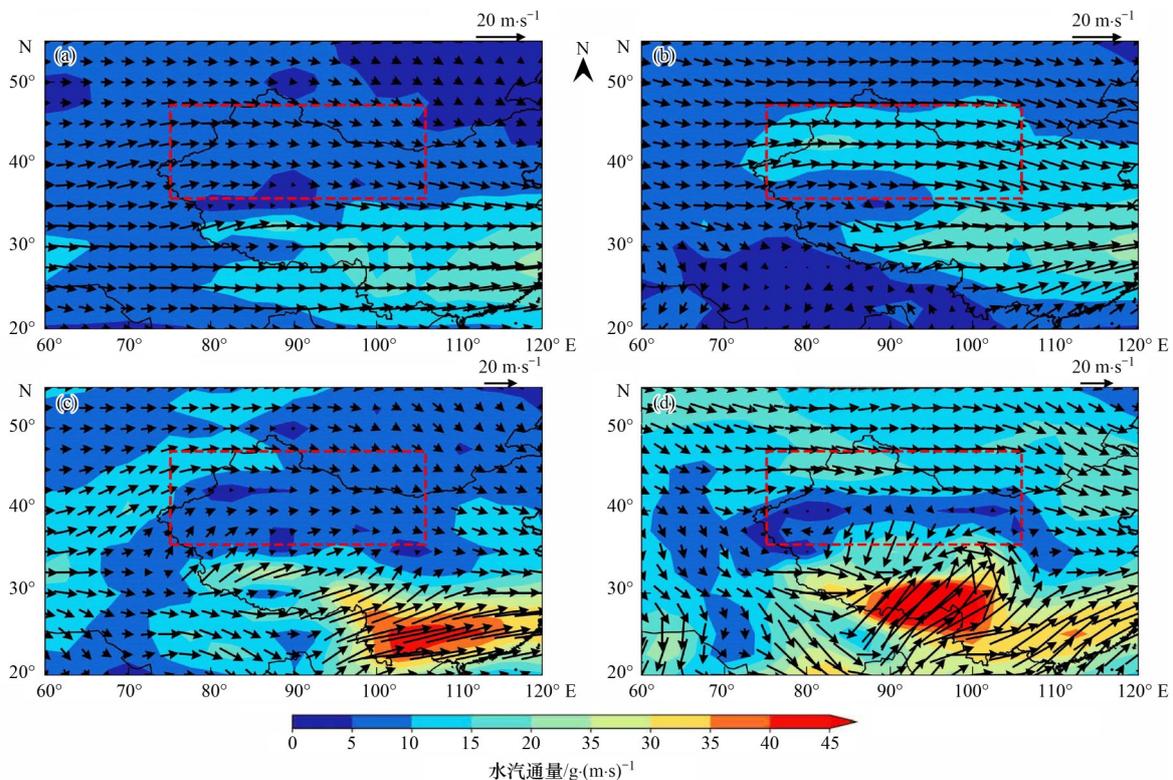
Fig. 11 Correlation between  $d$ -excess and relative humidity

为进一步了解西北内陆区降水的水汽来源,在不同气压高度场下观测西北内陆区的水汽通量,如图12所示.在冬半年西北内陆区水汽通量较低,不足  $10 \text{ mm}$ ; 在  $500 \text{ hPa}$  其水汽均是来自西风方向[图12(a)],在  $700 \text{ hPa}$  除西风水汽外[图12(c)],还有部分西南水汽流向塔里木盆地.除外部水汽来源,西北内陆区局部循环水汽也有体现,在冬季  $500 \text{ hPa}$  上,柴达木-青海湖地区水汽通量比西北内陆区其他

地区低, 其值不足 5 mm. 在夏半年, 西北内陆区水汽通量有所增加, 但仍主要受西风水汽影响. 在 500 hPa 气压下[图 12(b)], 仅有塔里木盆地区水汽通量不足 10 mm; 而在 700 hPa 气压高度下, 水汽通量在空间上表现为中间低两边高, 这表明在西北内陆区夏季局地蒸发强烈, 水汽来源较为复杂[图 12(d)], 水汽通量在塔里木盆地区和河西内陆区受到多种水汽影响, 水汽通量值不足 5 mm.

结合西北内陆区过量氧与水汽通量对水汽来源研究发现, 西北内陆区全年受西风气团影响, 同时伴随局地水汽循环影响. 在冬季受盛行西风的影响, 在夏季部分地区受季风气团影响<sup>[67]</sup>, 导致水汽通量部分地区存在高低值差异. 侯典炯等<sup>[68]</sup>在对乌鲁木

齐地区大气降水来源研究中也表明乌鲁木齐全年大气降水来源于西风带和局地再循环水汽源区, 主要为大陆性气团. 李小飞等<sup>[59]</sup>在对西北干旱区研究中表明张掖约有 59% 的水汽气流源自里海及其附近地区, 另一条源于中亚东北部边缘与俄罗斯、蒙古和中国边境交界处; 而德令哈站在冬季的降水水汽主要来源于局地再循环, 这可能是由于夏季青藏高原形成了高原低压中心, 使得亚洲季风不断地影响内陆地区, 大陆水汽再循环导致中亚地区在全年都受到大陆水汽影响, 导致稳定同位素相对较高<sup>[69]</sup>. 和田站<sup>[4]</sup>在冬季主要水汽来源是除西风输送外还有部分西南水汽, 而夏季主要是西风水汽和西北方向的气团.



(a) 冬季-500 hPa, (b) 夏季-500 hPa, (c) 冬季-700 hPa, (d) 夏季-700 hPa; 虚线红框表示研究区; 箭头表示风向

图 12 西北内陆区冬-夏季水汽通量

Fig. 12 Winter-summer water vapor flux in the inland region of Northwest China

由于西北内陆区降雨多在夏半年, 为了更详细了解西北内陆区大气降水的水汽来源, 利用拉格朗日 HYSPLIT 气团轨迹模型, 对酒泉、乌鲁木齐、和田和德令哈的夏季极端降水<sup>[70,71]</sup>情况进行追踪, 如图 13 所示. 在不同气压场下对大气降水气团进行后向轨迹模拟发现, 酒泉市在 2019 年 6 月 20 日的极端降水中, 其水汽来源在 500、100 和 1 500 hPa 的高度下均来自东南方向, 暴雨过程受到河套地区歪脖子高压脊阻挡和青海低涡前部动力抬升影响<sup>[72]</sup>, 将来自孟加拉湾水汽输送至河西走廊东部地区<sup>[73]</sup>. 乌鲁

木齐市 2020 年 6 月 29 日的大规模降雨, 其水汽来源在 500 hPa 和 1 000 hPa 上来自西风水汽, 而在 1 500 hPa 上来自西南方向, 这可能是源于地形复杂, 导致高空对流引起<sup>[74]</sup>. 和田市 2021 年 6 月 15 日的暴雨主要源于副热带高压下的西风急流, 在不同气压场下, 在西北和东南方向存在两个涡流中心, 水汽受低层气旋影响, 塔里木盆地有偏东急流将低层水汽输送至南疆西部<sup>[75]</sup>. 德令哈站 2022 年 8 月 27 日的极端降水气团轨迹在 3 个气压场下均来自北方, 水汽沿祁连山区西北气流东灌至湟水河谷地<sup>[76]</sup>, 引起降

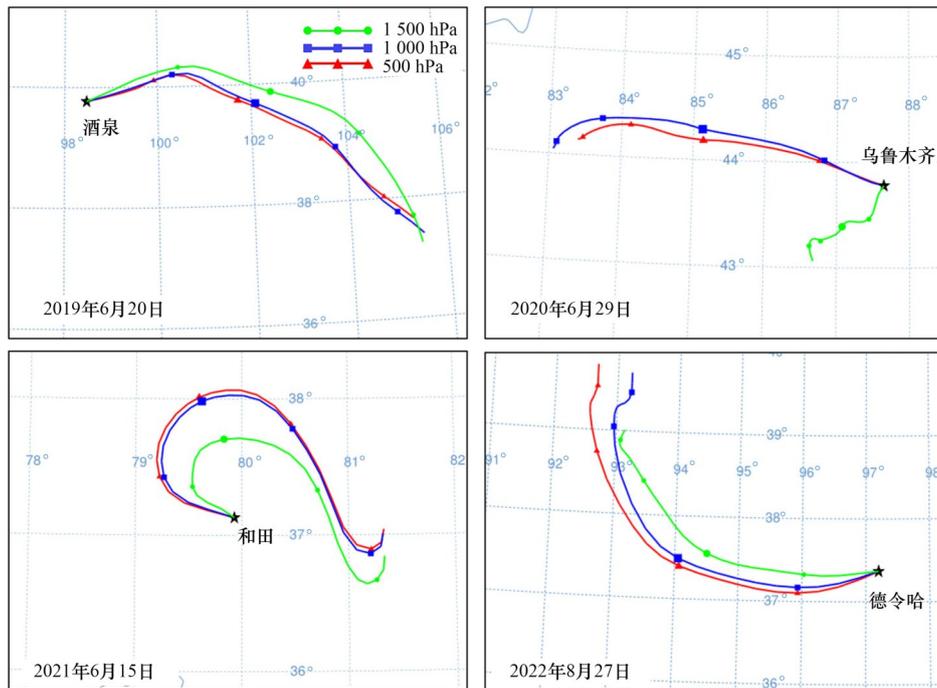


图 13 西北内陆区极端降水气团后向轨迹模拟

Fig. 13 Simulation of backward trajectories of extreme precipitation air masses in the inland region of Northwest China

水的主要原因是冷空气南移，与局地水汽辐合产生大规模的降水。

总体而言，准噶尔盆地区的主要水汽来源为西风水汽，部分来自局地循环和大陆气团；河西内陆区全年均受西风气团控制，夏季则还受东南季风的水汽和局部再蒸发的影响；柴达木盆地-青海湖地区水汽来源主要受局地在循环气团影响，还有部分大陆性气团影响；塔里木盆地区的全年水汽来源于西风输送和大陆气团控制，冬季还受少量西南季风水汽影响。西北内陆区全年受西风控制，西风水汽输送为主导，部分地区受局部水汽再蒸发循环影响，冬季受西南季风水汽影响，夏季降水受东南季风水汽影响。

#### 4 结论

(1) 西北内陆区降水同位素  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  表现为夏季富集冬季贫化的变化特征，与东南季风区和西南季风区相反；夏高冬低最大值出现在塔里木地区，表明该地区降水稳定同位素因地形因素抑制，受局地水汽影响更强烈。大气降水  $d$ -excess 平均值为  $10.0\text{‰}$ ，与全球降水  $d$ -excess 值一致。西北内陆区全年  $d$ -excess 呈冬高夏低的变化趋势，其中柴达木-青海湖地区的过量氘平均值最高，而塔里木地区  $d$ -excess 值在夏季最低。

(2) 西北内陆区大气降水线方程为  $\delta D = 7.45 \delta^{18}O + 5.25$  ( $R^2 = 0.92$ )，塔里木盆地区大气降水线为：

$\delta D = 5.48 \delta^{18}O - 7.76$  ( $R^2 = 0.92$ )，准噶尔盆地地区 ( $\delta D = 7.58 \delta^{18}O + 3.38$ ,  $R^2 = 0.95$ )，河西内陆区大气降水线 ( $\delta D = 6.53 \delta^{18}O + 0.45$ ,  $R^2 = 0.99$ )，柴达木-青海湖地区 ( $\delta D = 6.68 \delta^{18}O + 3.37$ ,  $R^2 = 0.95$ )。研究区斜率与截距均低于全球大气降水线，同时随海拔升高，斜率越大，表明其水汽来源复杂，且受二次蒸发和局地水循环的影响。

(3) 西北内陆区内存在显著的海拔效应： $\delta^{18}O = -0.0004H - 6.92$  ( $R^2 = 0.013$ ,  $P = 0.21$ )；其中河西内陆区  $\delta^{18}O = -0.0013H - 4.24$  ( $R^2 = 0.21$ ,  $P = 0.0003$ )，塔里木地区 ( $\delta^{18}O = -0.003H - 1.87$  ( $R^2 = 0.23$ ,  $P = 0.09$ ))，表明西北内陆区  $\delta^{18}O$  随海拔升高而贫化；而柴达木青海湖地区  $\delta^{18}O = 0.004H - 23.56$  ( $R^2 = 0.04$ ,  $P = 0.54$ ) 和准噶尔-吐哈地区  $\delta^{18}O = 0.0002H - 9.28$  ( $R^2 = 0.004$ ,  $P = 0.73$ ) 则不显著，表明其受局地水汽循环影响掩盖了海拔因素对降水稳定同位素的变化。降水  $\delta^{18}O$  值随经度的变化率为  $0.18\text{‰} \cdot (10^\circ)^{-1}$ ，但不存在显著的纬度效应，表明西北内陆区降水稳定同位素主要受自然环境因素的影响。

(4) 西北内陆区存在显著的温度效应 ( $0.6\text{‰} \cdot \text{C}^{-1}$ ) 和显著不相关的降水量效应 ( $-0.19\text{‰} \cdot \text{mm}^{-1}$ )。准噶尔-吐哈盆地受温度影响更强 ( $0.75\text{‰} \cdot \text{C}^{-1}$ )，柴达木-青海湖区相对较弱 ( $0.29\text{‰} \cdot \text{C}^{-1}$ )，表现为西北高东南低的空间变化特征。而降雨量效应则较微弱，整体表现为中部低四周高的空间变化规律，除准噶尔-吐哈地区周边降雨量效应为负相关，其他地区均为正

相关;4个子区域降雨量效应均不显著,在极端降水中存在一定的淋溶效应,可能导致降雨量效应不显著。

(5)西北内陆区大气水汽全年主要来自西风水汽输送,冬季受极地大陆气团影响,夏季极端降水时,受到季风水汽影响。 $d$ -excess与相对湿度呈显著正相关,表明西北内陆区降水还同局地水汽再循环有关。通过HYSPLIT气团后向轨迹追踪和水汽通量也发现河西内陆区水汽来源还受孟加拉湾水汽输送,准噶尔-吐哈地区除西风输入外还有部分西南季风水汽来源;塔里木盆地夏季除西风环流影响外,亦与东南季风水汽有关;柴达木-青海湖区水汽来源则比较复杂,与其地形因素有关,除受来自局地二次蒸发和西北水汽输送影响外,还有部分大陆气团的南下产生降水。

#### 参考文献:

- [1] 王英,曹明奎,陶波,等.全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J].地理研究,2006,25(6):1031-1040.  
Wang Y, Cao M K, Tao B, et al. The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change[J]. Geographical Research, 2006, 25(6): 1031-1040.
- [2] Nolan C, Overpeck J T, Allen J R M, et al. Past and future global transformation of terrestrial ecosystems under climate change[J]. Science, 2018, 361(6405): 920-923.
- [3] Zhang W X, Furtado K, Wu P L, et al. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world[J]. Science Advances, 2021, 7(31), doi: 10.1126/sciadv.abf8021
- [4] 刘洁遥,张福平,冯起,等.西北地区降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J].应用生态学报,2018,29(5):1479-1488.  
Liu J Y, Zhang F P, Feng Q, et al. Influence of below-cloud secondary evaporation on stable isotope composition in precipitation in Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(5): 1479-1488.
- [5] 马兴刚,贾文雄,丁丹,等.祁连山东部大气降水 $\delta^{17}\text{O}$ 变化特征及水汽输送[J].干旱区地理,2019,42(3):517-525.  
Ma X G, Jia W X, Ding D, et al. Variation characteristics of  $\delta^{17}\text{O}$  in precipitation and moisture transports in eastern Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 517-525.
- [6] Joussaume S, Sadourny R, Jouzel J. A general circulation model of water isotope cycles in the atmosphere[J]. Nature, 1984, 311(5981): 24-29.
- [7] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.
- [8] 郑淑蕙,侯发高,倪葆龄.我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J].科学通报,1983,28(13):801-806.
- [9] 章新平,姚檀栋.我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点[J].地理学报,1998,53(4):356-364.  
Zhang X P, Yao T D. Distributional features of  $\delta^{18}\text{O}$  precipitation in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(4): 356-364.
- [10] 刘忠方,田立德,姚檀栋,等.中国大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布[J].科学通报,2009,54(6):804-811.  
Liu Z F, Tian L D, Yao T D, et al. Spatial distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation over China[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(6): 804-811.
- [11] 柳鉴容,宋献方,袁国富,等.中国东部季风区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J].科学通报,2009,54(22):3521-3531.  
Liu J R, Song X F, Yuan G F, et al. Characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation over Eastern Monsoon China and the water vapor sources[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(2): 200-211.
- [12] 柳鉴容,宋献方,袁国富,等.我国南部夏季季风降水水汽来源的稳定同位素证据[J].自然资源学报,2007,22(6):1004-1012.  
Liu J R, Song X F, Yuan G F, et al. Stable isotope evidence of vapor sources in summer monsoonal precipitation over Southern China[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(6): 1004-1012.
- [13] 柳鉴容,宋献方,袁国富,等.西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J].地理学报,2008,63(1):12-22.  
Liu J R, Song X F, Yuan G F, et al. Characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation over Northwest China and its water vapor sources[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(1): 12-22.
- [14] 吴锦奎,杨洪越,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] 黄天明,聂中青,袁利娟.西部降水氢氧稳定同位素温度及地理效应[J].干旱区资源与环境,2008,22(8):76-81.  
Huang T M, Nie Z Q, Yuan L J. Temperature and geographical effects of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in west of China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(8): 76-81.
- [16] 朱建佳,陈辉,巩国丽.柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源[J].环境科学,2015,36(8):2784-2790.  
Zhu J J, Chen H, Gong G L. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation and its water vapor sources in Eastern Qaidam Basin[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2784-2790.
- [17] 袁瑞丰,贾文雄,李宗省,等.石羊河流域降水稳定同位素变化的区域差异[J].中国环境科学,2020,40(11):4945-4956.  
Yuan R F, Jia W X, Li Z X, et al. Precipitation stable isotope regional difference in Shiyang River basin[J]. China Environmental Science, 2020, 40(11): 4945-4956.
- [18] 桂娟,李宗省,冯起,等.古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义[J].环境科学,2019,40(1):149-156.  
Gui J, Li Z X, Feng Q, et al. Space-Time characteristics and environmental significance of the stable isotopes in precipitation in the Gulang River Basin[J]. Environmental Science, 2019, 40(1): 149-156.
- [19] 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.
- [20] Zhang B J, Li Z X, Feng Q, et al. A review of isotope ecohydrology in the cold regions of Western China[J]. Science of the Total Environment, 2023, 857, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159438.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Liu X K, Rao Z G, Zhang X J, et al. Variations in the oxygen isotopic composition of precipitation in the Tianshan Mountains region and their significance for the Westerly circulation[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(7): 801-816.
- [24] 閻錫璜,段永侯,賈永瑞.中国西北和内蒙干旱地区的水文地质特征[J].地质学报,1973,(1):102-112.

- [25] 张雪芹, 孙杨, 郑度, 等. 中国干旱区温度带界线对气候变暖的响应[J]. 地理学报, 2011, **66**(9): 1166-1178.  
Zhang X Q, Sun Y, Zheng D, *et al.* Responses of temperature zone boundaries in the Arid Region of China to climatic warming [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(9): 1166-1178.
- [26] 胡汝骥, 陈曦, 葛朔晓, 等. 冰冻圈过程对中国干旱区水文环境的影响评估[J]. 干旱区研究, 2015, **32**(1): 1-6.  
Hu R J, Chen X, Ge Y X, *et al.* Evaluation on the impacts of cryospheric processes on the hydrological environment in Arid Land of China [J]. *Arid Zone Research*, 2015, **32**(1): 1-6.
- [27] 年福华, 李新. 中国干旱区地理水文研究概述[J]. 干旱区地理, 2000, **23**(1): 91-95.  
Nian F H, Li X. A comprehensive review of the research on hydrography in Arid Lands in China [J]. *Arid Land Geography*, 2000, **23**(1): 91-95.
- [28] 娄华君, 毛任钊, 夏军, 等. 中国地下水资源系统三级分区及其在海河流域的应用[J]. 地理科学进展, 2002, **21**(6): 554-563.  
Lou H J, Mao R Z, Xia J, *et al.* The study for groundwater resources system of China with three-rated appraising method of Sub Area [J]. *Progress in Geography*, 2002, **21**(6): 554-563.
- [29] Che Y J, Zhang M J, Wang S J, *et al.* Stable water isotopes of precipitation in China simulated by SWING2 models [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, **9**(19): 732.
- [30] Zhang H, Yu J J, Wang P, *et al.* Groundwater-fed oasis in arid Northwest China: Insights into hydrological and hydrochemical processes [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, **597**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126154.
- [31] Qu S, Duan L M, Mao H R, *et al.* Hydrochemical and isotopic fingerprints of groundwater origin and evolution in the Urugulan River basin, China's Loess Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **866**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.161377.
- [32] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域大气降水水汽来源分析[J]. 干旱区地理, 2008, **31**(3): 403-408.  
Zhang Y H, Wu Y Q. Precipitation from different water vapor sources in the Heihe River Basin, China [J]. *Arid Land Geography*, 2008, **31**(3): 403-408.
- [33] 李晖, 周宏飞. 乌鲁木齐地区大气降水中 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 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  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  stable isotopes in the precipitation of Urumqi [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, **21**(9): 46-50.
- [34] 冯芳, 李忠勤, 金爽, 等. 天山乌鲁木齐河流域山区降水 $\delta^{18}O$ 和 $\delta D$ 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  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$  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.
- [35] 郑新军, 戴岳, 周海, 等. 准噶尔盆地东南部降水中 $\delta^{18}O$ 的温度与降水量效应[J]. 干旱区研究, 2016, **33**(4): 732-738.  
Zheng X J, Dai Y, Zhou H, *et al.* Effect of temperature and precipitation on  $\delta^{18}O$  in precipitation water in the Southeastern Junggar Basin, China [J]. *Arid Zone Research*, 2016, **33**(4): 732-738.
- [36] 尹常亮, 姚檀栋, 田立德, 等. 德令哈大气水汽中 $\delta^{18}O$ 的时间变化特征——以2005年7月~2006年2月为例[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2008, **38**(6): 723-731.
- [37] 李佳芳, 石培基, 朱国锋, 等. 河西走廊中部大气降水 $\delta^{18}O$ 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  $\delta^{18}O$  in precipitation and moisture transports in the central Hexi Corridor [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(4): 947-955.
- [38] 宋洋, 王圣杰, 张明军, 等. 塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 199-209.  
Song Y, Wang S J, Zhang M J, *et al.* Stable isotopes of precipitation in the Eastern Tarim River Basin and water vapor sources [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 199-209.
- [39] 吐尔逊江·艾莎, 海米提·依米提, 古丽娜尔·哈历别克, 等. 塔里木盆地降水中稳定同位素变化特征浅析——以和田地区为例[J]. 安徽农业科学, 2012, **40**(4): 2163-2165.  
Aysa A, *et al.* Analysis on variation characteristics of stable isotopes in the precipitation of Tarim Basin [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, **40**(4): 2163-2165.
- [40] 郭新, 李升, 邓恩松, 等. 皮山河绿洲带大气降水同位素特征及其应用[J]. 中国农村水利水电, 2018, (9): 20-24.  
Guo X, Li S, Deng E S, *et al.* Isotope characteristics and application of precipitation in the oasis of Pishan River [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018, (9): 20-24.
- [41] 吴华武, 李小雁, 赵国琴, 等. 青海湖流域降水和河水中 $\delta^{18}O$ 和 $\delta D$ 变化特征[J]. 自然资源学报, 2014, **29**(9): 1552-1564.  
Wu H W, Li X Y, Zhao G Q, *et al.* The variation characteristics of  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$  in precipitation and river water, Qinghai Lake Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, **29**(9): 1552-1564.
- [42] 张琳, 陈立, 刘君, 等. 香港地区大气降水的D和 $^{18}O$ 同位素研究[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(2): 572-577.  
Zhang L, Chen L, Liu J, *et al.* D and  $^{18}O$  isotopes in atmospheric precipitation in Hongkong area [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(2): 572-577.
- [43] 章新平, 孙维贞, 刘晶淼. 西南水汽通道上昆明站降水中的稳定同位素[J]. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(5): 665-669.  
Zhang X P, Sun W Z, Liu J M. Stable isotopes in precipitation in the vapor transport path in Kunming of southwest China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14**(5): 665-669.
- [44] 朱秀勤, 范斐, 官威. 昆明大气降水稳定同位素分析[J]. 云南地理环境研究, 2013, **25**(5): 90-95.  
Zhu X Q, Fan T, Guan W. The analysis of stable isotopes of precipitation in Kunming [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2013, **25**(5): 90-95.
- [45] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 李晖, 蒋忠诚, 王月, 等. 新疆地区大气降水中稳定同位素的变化特征[J]. 水土保持研究, 2009, **16**(5): 157-161.  
Li H, Jiang Z C, Wang Y, *et al.* Variation characteristics of stable isotopes in the precipitation of Xinjiang [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, **16**(5): 157-161.
- [49] 张子宇. 西北高寒山区大气降水稳定同位素组成时空特征分布研究[D]. 临汾: 山西师范大学, 2019.  
Zhang Z Y. Temporal and Spatial variations of stable isotopes of precipitation in the Northwest alpine mountainous area [D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2019.
- [50] Yu W S, Wei F L, Ma Y M, *et al.* Stable isotope variations in precipitation over Deqin on the southeastern margin of the Tibetan Plateau during different seasons related to various meteorological factors and moisture sources [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **170**: 123-130.
- [51] Tian L, Masson-Delmotte V, Stievenard M, *et al.* Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, **106**(D22): 28081-28088.
- [52] Yong L L, Zhu G F, Wan Q Z, *et al.* The soil water evaporation

- process from mountains based on the stable isotope composition in a Headwater Basin and Northwest China[J]. *Water*, 2020, **12**(10), doi: 10.3390/w12102711.
- [53] Kong Y L, Pang Z H. A positive altitude gradient of isotopes in the precipitation over the Tianshan Mountains: effects of moisture recycling and sub-cloud evaporation [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **542**: 222-230.
- [54] 曾康康, 杨余辉, 胡义成, 等. 喀什河流域降水同位素特征及水汽来源分析[J]. *干旱区研究*, 2021, **38**(5): 1263-1273.  
Zeng K K, Yang Y H, Hu Y C, *et al.* Isotopic characteristics and water vapor sources of precipitation in the Kashi River Basin [J]. *Arid Zone Research*, 2021, **38**(5): 1263-1273.
- [55] 李杰彪, 苏锐, 周志超, 等. 北山地区大气降水中水化学及稳定同位素特征[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(12): 5152-5161.  
Li J B, Su R, Zhou Z C, *et al.* Hydrochemical and stable isotope characteristics of precipitation in Beishan Area [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(12): 5152-5161.
- [56] 王帅, 饶文波, 金可, 等. 阿拉善地区降水同位素特征与水汽来源[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, **47**(5): 411-419.  
Wang S, Rao W B, Jin K, *et al.* Hydrogen and oxygen isotopic characteristic and moisture source of precipitation of Alxa Desert Plateau[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, **47**(5): 411-419.
- [57] 杨暖. 柴达木盆地东部地下水稳定同位素组成特征及其对水汽来源与气候变化的指示[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.  
Yang N. Characteristics of groundwater stable isotopic compositions in eastern Qaidam Basin: implications for moisture sources and climate change [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [58] 石梦雨. 乌鲁木齐河上游事件内尺度降水氢氧稳定同位素变化及其与水汽同位素的关系[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.  
Shi M Y. Intra-event variability of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation and the relationship with water vapor isotopes in the upper reaches of the Urumqi River [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.
- [59] 李小飞, 张明军, 李亚举, 等. 西北干旱区降水中  $\delta^{18}\text{O}$  变化特征及其水汽输送[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 711-719.  
Li X F, Zhang M J, Li Y J, *et al.* Characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and moisture transports over the arid region in northwest China [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(3): 711-719.
- [60] Zhao W, Ma J Z, Gu C J, *et al.* Distribution of isotopes and chemicals in precipitation in Shule River Basin, northwestern China: an implication for water cycle and groundwater recharge[J]. *Journal of Arid Land*, 2016, **8**(6): 973-985.
- [61] 赵佩佩. 中国北方季风地区大气降水稳定同位素特征及影响因素[D]. 西安: 西北大学, 2018.  
Zhao P P. Stable isotopic characteristic and influencing factors in precipitation in the monsoon region of Northern China [D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- [62] Cui B L, Li X Y. Stable isotopes reveal sources of precipitation in the Qinghai Lake Basin of the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **527-528**: 26-37.
- [63] 蓝永超, 丁永建, 沈永平, 等. 河西内陆河流域出山径流对气候转型的响应[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(2): 188-192.  
Lan Y C, Ding Y J, Shen Y P, *et al.* Responding of river streamflow to the climate shift in the Hexi Inland Region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(2): 188-192.
- [64] 孙从建, 张子宇, 李捷, 等. 青藏高原西北部大气降水稳定同位素时空特征变化[J]. *山地学报*, 2018, **36**(2): 217-228.  
Sun C J, Zhang Z Y, Li J, *et al.* Temporal and spatial characteristics of stable isotopes of atmospheric precipitation in the Northwestern Tibetan Plateau [J]. *Mountain Research*, 2018, **36**(2): 217-228.
- [65] 孙从建, 张子宇, 陈伟, 等. 亚洲中部高山降水稳定同位素空间分布特征[J]. *干旱区研究*, 2019, **36**(1): 19-28.  
Sun C J, Zhang Z Y, Chen W, *et al.* Spatial distribution of precipitation stable isotopes in the alpine zones in central Asia [J]. *Arid Zone Research*, 2019, **36**(1): 19-28.
- [66] 赵玮. 疏勒河流域大气降水同位素特征及水汽来源研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.  
Zhao W. Study on the isotopes and moisture source in precipitation in the Shule River Basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [67] 龚咏琪, 于海鹏, 周洁, 等. 东亚干旱半干旱区水汽来源研究进展[J]. *地球科学进展*, 2023, **38**(2): 168-182.  
Gong Y Q, Yu H P, Zhou J, *et al.* Review on water vapor sources in drylands of East Asia [J]. *Advances in Earth Science*, 2023, **38**(2): 168-182.
- [68] 侯典炳, 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.
- [69] Kang S C, Kreutz K J, Mayewski P A, *et al.* Stable-isotopic composition of precipitation over the northern slope of the central Himalaya [J]. *Journal of Glaciology*, 2002, **48**(163): 519-526.
- [70] 李培都, 司建华, 冯起, 等. 1958—2015年敦煌及周边地区极端降水事件的时空变化特征[J]. *高原气象*, 2018, **37**(2): 535-544.  
Li P D, Si J H, Feng Q, *et al.* Temporal and spatial variation of extreme precipitation events in Dunhuang and surrounding areas from 1958 to 2015 [J]. *Plateau Meteorology*, 2018, **37**(2): 535-544.
- [71] Lu S, Hu Z Y, Yu H P, *et al.* Changes of extreme precipitation and its associated mechanisms in Northwest China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, **38**(10): 1665-1681.
- [72] 王海燕, 田庆明, 刘新雨. 基于溃变理论对河西走廊西段一次极端暴雨的研究[J]. *气象水文海洋仪器*, 2021, **38**(4): 63-65.  
Wang H Y, Tian Q M, Liu X Y. Study on an extreme rainstorm in western Hexi Corridor based on collapse theory [J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2021, **38**(4): 63-65.
- [73] 卢姝, 许东蓓, 严小杰, 等. 西北半干旱区一次盛夏暴雨水汽追踪分析[J]. *自然灾害学报*, 2021, **30**(5): 122-134.  
Lu S, Xu D B, Yan X J, *et al.* Analysis of the water vapor tracking on a rainstorm in midsummer and in semi-arid region of Northwest China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, **30**(5): 122-134.
- [74] 张金霞, 张云惠, 于碧馨, 等. 基于多源资料的乌鲁木齐市两次极端短时强降水对比分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2021, **15**(3): 10-19.  
Zhang J X, Zhang Y H, Yu B X, *et al.* Comparative analysis on the two extreme short-time heavy precipitation in Urumqi Based on the multi-sources data [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2021, **15**(3): 10-19.
- [75] 胡素琴, 希热娜依·铁里瓦尔地, 李娜, 等. 南疆西部干旱区两次极端暴雨过程对比分析[J]. *大气科学*, 2022, **46**(5): 1177-1197.  
Hu S Q, Tiliwaldi X, Li N, *et al.* Comparative analysis of two extreme rainstorms in the Arid Area of Western South Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2022, **46**(5): 1177-1197.
- [76] 马琼, 邢子毅, 马晓真, 等. 2022年8月青海东部一次极端性降水过程的成因分析[J]. *农业灾害研究*, 2023, **13**(1): 55-58, 62.  
Ma Q, Xing Z Y, Ma X Z, *et al.* Cause analysis of an extreme precipitation process Qinghai in August 2022 [J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2023, **13**(1): 55-58, 62.

## CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China .....	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency .....	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition .....	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing .....	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University .....	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing .....	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China .....	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Chinese Cities .....	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021 .....	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period .....	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM <sub>2.5</sub> Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter .....	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei .....	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Liaocheng City .....	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa .....	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries .....	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes .....	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment .....	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River .....	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang .....	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China .....	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes .....	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin .....	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin .....	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City .....	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network .....	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed .....	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus .....	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects .....	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation .....	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism .....	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar .....	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin .....	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake .....	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River .....	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers .....	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process .....	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area .....	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost .....	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field .....	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics .....	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N <sub>2</sub> O Emission: A Meta-analysis .....	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model .....	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction .....	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning .....	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity .....	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall .....	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity .....	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil .....	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain .....	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites .....	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou .....	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China .....	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing .....	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines .....	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil .....	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems .....	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)