

孙婷婷, 杨琰, 姜修洋, 等. 重庆酉阳龙潭槽谷和毛坝向斜大气降水氢氧稳定同位素变化特征[J]. 中国岩溶, 2024, 43(4): 796-809.  
DOI: [10.11932/karst2024y013](https://doi.org/10.11932/karst2024y013)

# 重庆酉阳龙潭槽谷和毛坝向斜大气降水 氢氧稳定同位素变化特征

孙婷婷<sup>1,2</sup>, 杨琰<sup>1,2</sup>, 姜修洋<sup>3</sup>, 罗振宇<sup>1,2</sup>, 唐越尔<sup>1,2</sup>

(1. 岩溶环境重庆市重点实验室, 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 重庆 400715; 3. 福建师范大学地理科学学院, 福建福州 350007)

**摘要:** 为深入探究重庆市东南部武陵山龙潭槽谷和毛坝向斜两个相邻地形区大气降水中  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  的特征及其影响因素, 文章基于两个水文年(2020.06—2022.05)在重庆市酉阳县龙潭槽谷(海拔 333 m)和毛坝向斜(海拔 1140 m)降水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  的采样数据, 建立了两地的大气降水线, 分析两地大气降水氢氧稳定同位素的变化特征及影响因素。结果表明: (1) 龙潭槽谷和毛坝向斜大气降水线的斜率和截距均大于全球大气降水线。大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  具有明显的季节变化, 雨季(5—10 月)偏负, 旱季(11 月至次年 4 月)偏正。两地大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  表现出显著的降水量效应, 温度效应的影响较弱。(2) 龙潭槽谷大气降水线的斜率和截距小于毛坝向斜, 两地大气降水线的差异主要受控于水汽凝结时的温度和蒸发条件。(3) 龙潭槽谷大气降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  的平均值较毛坝向斜偏正。*d-excess* 的结果表明, 龙潭槽谷  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  存在微弱的云下二次蒸发。同次降水过程中龙潭槽谷大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  总体上较毛坝向斜降水  $\delta^{18}\text{O}$  偏正, 这表明龙潭槽谷和毛坝向斜两地的大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  受高程效应影响。(4) 年际变化上, 龙潭槽谷和毛坝向斜两地大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  的变化主要受印度洋水汽输送比例的影响。2020 年夏季, 印度洋水汽到达研究区的比例为 76%, 降水  $\delta^{18}\text{O}$  偏负; 2021 年夏季, 印度洋水汽到达研究区的比例为 52%, 降水  $\delta^{18}\text{O}$  偏正。研究结果对增进西南岩溶槽谷区水循环过程的认识和今后展开龙潭槽谷和毛坝向斜两地生态水文过程的研究具有重要的意义。

**关键词:** 大气降水; 氢氧稳定同位素; 局部地形; 龙潭槽谷; 毛坝向斜; 武陵山

**创新点:** 通过分析龙潭槽谷和毛坝向斜两地的降水稳定同位素数据, 揭示局地地形和小气候影响下两地降水同位素特征及影响因素, 对了解渝东南的气候水文过程, 促进岩溶槽谷区生态水文研究具有十分重要的意义。

**中图分类号:** P426.612    **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810 (2024) 04-0796-14

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## 0 引言

大气降水是陆地生态系统水循环的重要输入项, 同时也是水圈和大气圈之间物质和能量交换最为活跃的因子, 降水中氢氧稳定同位素的研究有助于理解区域水循环过程和机制<sup>[1]</sup>。大气降水氢氧稳定同

位素组成不仅受水汽源的初始状态和水汽运移过程中蒸发和分馏状况的影响, 而且受局地温度、降水量、地形、海拔等环境因素的控制<sup>[2-6]</sup>。因此, 大气降水氢氧稳定同位素总是随着时间、空间的变化而变化, 可以有效指示区域气候特征<sup>[7-9]</sup>。

西南地区位于青藏高原东部, 属典型的亚热带

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277048); 国家重点研发计划子课题(2016YFC050230205)

第一作者简介: 孙婷婷(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事岩溶区生态水文过程研究, E-mail: [3041911469@qq.com](mailto:3041911469@qq.com)。

通信作者: 杨琰(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩溶关键带水资源与水环境研究。E-mail: [yy2954@swu.edu.cn](mailto:yy2954@swu.edu.cn)。

收稿日期: 2023-09-11

季风气候, 降水的水汽来源及其影响因素非常复杂, 受印度夏季风、东亚夏季风、亚洲冬季风以及西风带南北分支的影响<sup>[9-12]</sup>。地形地貌的复杂多样性更是对区域降水稳定同位素的研究增加了挑战<sup>[8]</sup>。过去对西南地区大气降水氢氧稳定同位素的研究主要集中在两个方面: 一是不同时间尺度上大气降水氢氧稳定同位素影响因素的研究<sup>[12-14]</sup>; 二是不同地形地貌和气候条件下大气降水氢氧稳定同位素特征的对比分析<sup>[8,15-16]</sup>。这些研究的共同点是大多集中在一个采样点或者较大区域尺度的研究上, 而关于西南岩溶槽谷区不同海拔的2个临近地理单元大气降水氢氧稳定同位素变化特征的研究比较少。

研究区龙潭槽谷和毛坝向斜位于重庆市东南部, 两地同属于武陵山腹地, 海拔相差约810 m。对于龙潭槽谷和毛坝向斜两个临近的地形区, 通过对比两地降水氢氧稳定同位素组成, 分析两地大气降水氢氧稳定同位素的时间变化特征, 及其与气温、降水量的关系, 探讨龙潭槽谷和毛坝向斜两地局地海拔差异和水汽来源对氢氧稳定同位素组成的影响。本研究对揭示局部地形和小气候影响下临近地形区的水循环特征, 了解较小地理单元的气候水文过程, 对岩溶槽谷区生态、水文等研究具有重要的意义。

## 1 研究区概况

龙潭槽谷地处重庆市东南部桐麻岭背斜的东南

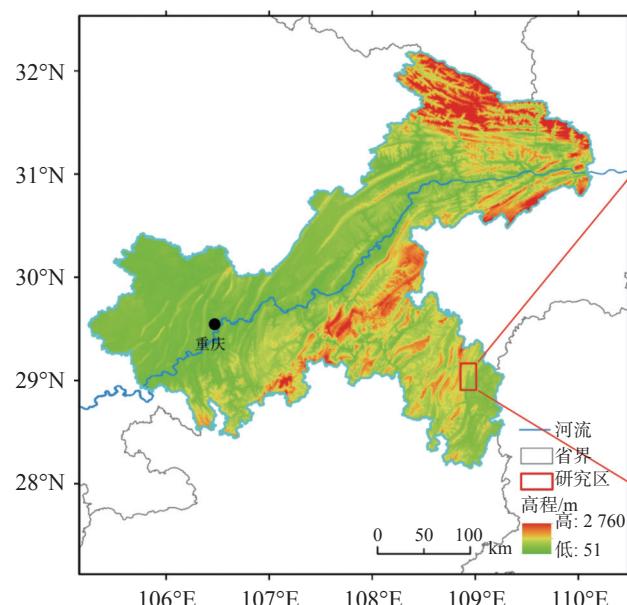


图1 研究区位置及地理概况

Fig. 1 Geographical overview of the study areas and sampling sites of precipitation

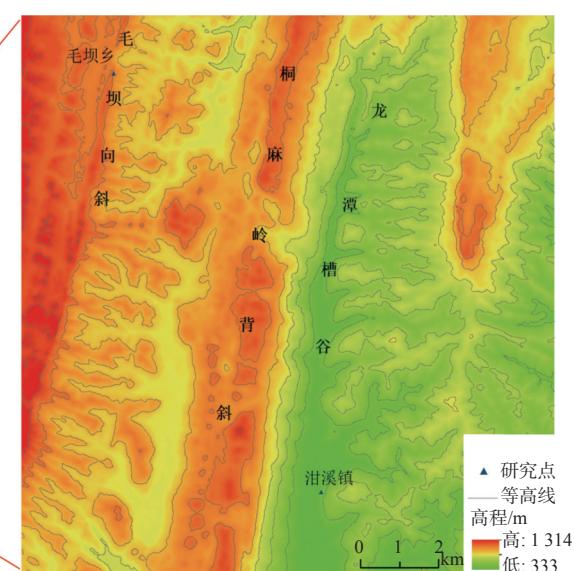
翼, 重庆市酉阳县泔溪镇至麻旺镇一带(图1)。槽谷延伸方向与构造线方向一致, 呈NE-SW走向, 长约35 km, 属背斜型岩溶低位槽谷。龙潭槽谷桐麻岭背斜的轴部以寒武系(e)的白云岩与奥陶系(O)的白云质灰岩为主, 背斜两翼分别为志留系(S)的砂页岩、二叠系(P)与三叠系(T)的灰岩(图2)。槽谷西侧为坡向和岩层倾向一致的顺层坡、槽谷东侧为坡向和岩层倾向相反的逆层坡(图2)。龙潭槽谷底部海拔约330 m, 年均降水量为1 625 mm, 5—10月降水充沛, 年均气温为16.5 ℃。

毛坝向斜地处龙潭槽谷以西, 桐麻岭背斜的西北翼, 海拔约1 140 m, 与龙潭槽谷海拔高差约810 m, 毛坝向斜岩层以二叠系(P)与三叠系(T)的灰岩为主, 其周围出露有泥盆纪(D)和志留系(S)的砂页岩(图2)。年均降水量为1 700 mm, 年均气温为12 ℃, 全年多雾且湿度大。龙潭槽谷和毛坝向斜同属武陵山腹地, 属亚热带季风性湿润气候, 5—10月降雨量占全年降雨量的70%左右, 为雨季, 11月—次年4月降水量占全年降雨量的30%左右, 为旱季。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

两个降水采样点分别布置在重庆市酉阳县龙潭槽谷的泔溪镇和毛坝向斜的毛坝乡(图1, 图2)。2020年6月至2022年5月整个采样期间, 气温和降



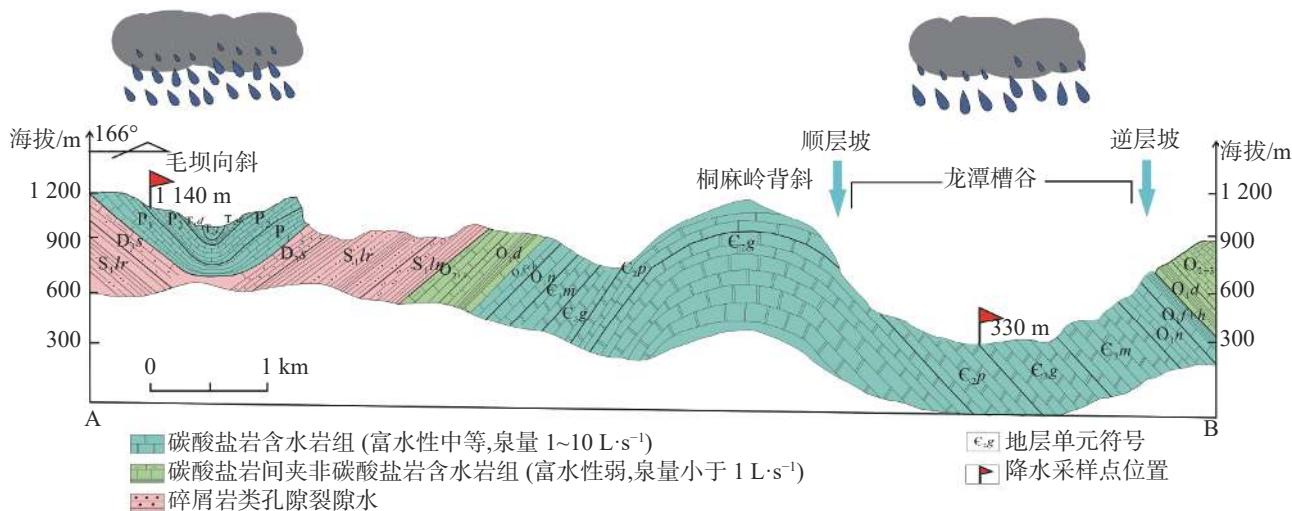


图 2 研究区水文地质剖面图及降水采样点位置

Fig. 2 Hydrogeological profile of the study areas and elevations of sampling sites of precipitation

水量由戴维斯气象站记录。气温和降水量的记录精度分别是 0.01 °C 和 0.1 mm, 每隔 15 分钟记录一次气温和降水量。长沙湘蓝科学仪器股份有限公司生产的降水采样器(APS-3A)用于自动收集降雨样品, 该仪器记录了每次降水事件的起止时间, 气象站在同一时间段内记录的降水量和气温被认定为单次降水事件的降水量和气温, 并使用日期命名。整个采样期间在毛坝向斜共收集降水样品 151 个, 龙潭槽谷共收集降水样品 137 个。用于稳定同位素( $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$ )分析的水样, 取样前用样品水冲洗 30 mL 的无色聚乙烯瓶 3~4 次, 并用水样装满塑料瓶, 这是考虑到液态水分子间存在着范德华力, 它会使水分子的运动速度大大小于气态情形, 这样能降低蒸发时的分馏作用。之后, 用密封膜密封瓶口, 带回实验室在 3 °C 条件下冷藏, 直至进行氢氧稳定同位素分析。

## 2.2 样品测试

使用 Picarro L2140i-CRDS 液态水同位素分析仪测量样品的氢氧稳定同位素组成( $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$ )。氢氧稳定同位素的分析在福建师范大学地理科学学院稳定同位素实验室中心进行。稳定同位素组成的结果表示为  $\delta$  值, 与标准 V-SMOW(维也纳标准平均海水)相关:

$$\delta\text{D}(\delta^{18}\text{O}) = \frac{\text{R}_{\text{sample}} - \text{R}_{\text{V-SMOW}}}{\text{R}_{\text{V-SMOW}}} \times 10^3 \quad (1)$$

式中:  $\text{R}$  是  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  或  $^2\text{H}/^1\text{H}$  比值。 $\delta\text{D}$  的测量精度为  $\pm 0.5\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  的测量精度为  $\pm 0.8\text{‰}$ 。

## 2.3 数据分析

降水稳定同位素的加权平均值, 计算公式如下:

$$\delta\bar{\text{X}} = \sum P_i \delta_i / \sum P_i \quad (2)$$

$\delta\bar{\text{X}}$  为加权平均值,  $P_i$  为降水量,  $\delta_i$  为其相应的稳定同位素值。

本文采用 SPSS 23 软件进行数据分析, 采用 Origin 2019 软件进行图表绘制。

## 2.4 HYSPLIT 后向轨迹模型

为了确定研究地降水的水汽来源, 本研究采用了美国国家海洋与大气局(National oceanic and Atmospheric Administration, 简称 NOAA)空气资源实验室(Air Resources Laboratory)开发的 HYSPLIT 模型(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model)对 2020 年 6—8 月和 2021 年 6—8 月降水目的水汽轨迹进行后向反演。本研究使用全球再分析数据 NCEP/NCAR 中  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  再分析资料 GBL, 分析位于 850 hPa(约 1 500 m)水汽的运动轨迹, 时间间隔为 6 h, 追踪时长为 240 h。最后, 对水汽轨迹进行了聚类分析。

## 3 结果与讨论

### 3.1 龙潭槽谷、毛坝向斜大气降水线

大气降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  与  $\delta\text{D}$  存在线性关系, 这一关系用最小二乘法表示, 即为大气降水线方程<sup>[17]</sup>。根据重庆市酉阳县龙潭槽谷和毛坝向斜 2020 年 6 月

至 2022 年 5 月的单次降水采样数据, 建立的龙潭槽谷大气降水线方程为:  $\delta D = 8.47\delta^{18}\text{O} + 17.66$  ( $n=137$ ,  $R=0.98$ ,  $P<0.01$ ) (图 3), 建立的毛坝向斜大气降水线方程为:  $\delta D = 8.84\delta^{18}\text{O} + 24.78$  ( $n=151$ ,  $R=0.98$ ,  $P<0.01$ ) (图 3)。两地大气降水线与重庆市北碚区的大气降水线:  $\delta D = 8.73\delta^{18}\text{O} + 15.73$ <sup>[18]</sup> 和桂林地区的大气降水线:  $\delta D = 8.98\delta^{18}\text{O} + 20$ <sup>[19]</sup> 接近, 与 Craig 提出的全球降水线  $\delta D = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ <sup>[20]</sup> 和郑淑蕙等提出的中国大气降水线  $\delta D = 7.9\delta^{18}\text{O} + 8.2$ <sup>[21]</sup> 相比, 斜率和截距均有不同程度的偏大。一方面是由于全球大气降水线和中国大气降水线分别是通过对全球和整个中国的数据进行综合分析而产生的, 呈现了各种自然环境的平均情况, 包括潮湿和干旱地区。龙潭槽谷和毛坝向斜地处季风区, 水汽充足, 湿度较大, 蒸发相对较弱, 导致大气降

水线的斜率和截距偏大<sup>[12]</sup>。另一方面是基于次降水氢氧稳定同位素数据建立的大气降水线, 降水的氢氧稳定同位素容易受到降水时水汽运输、蒸发作用、降水时自然条件等因素的影响<sup>[18]</sup>。龙潭槽谷大气降水线与毛坝向斜大气降水线相比, 其斜率和截距相对较小, 两地同属于重庆市武陵山地区, 水汽来源和水汽输送路径基本相同, 导致大气降水线斜率和截距差异的主要原因是水汽凝结时的温度和蒸发条件<sup>[3]</sup>, 大气越干热, 大气降水线的斜率就越小, 截距也越小<sup>[3]</sup>。这是由于凝结物在未饱和大气中降落从而造成重同位素蒸发富集<sup>[22]</sup>。龙潭槽谷与毛坝向斜相比, 海拔较低, 气候条件较为干热, 雨滴在降落过程中受到云下二次蒸发作用影响, 大气降水线的斜率和截距偏小。

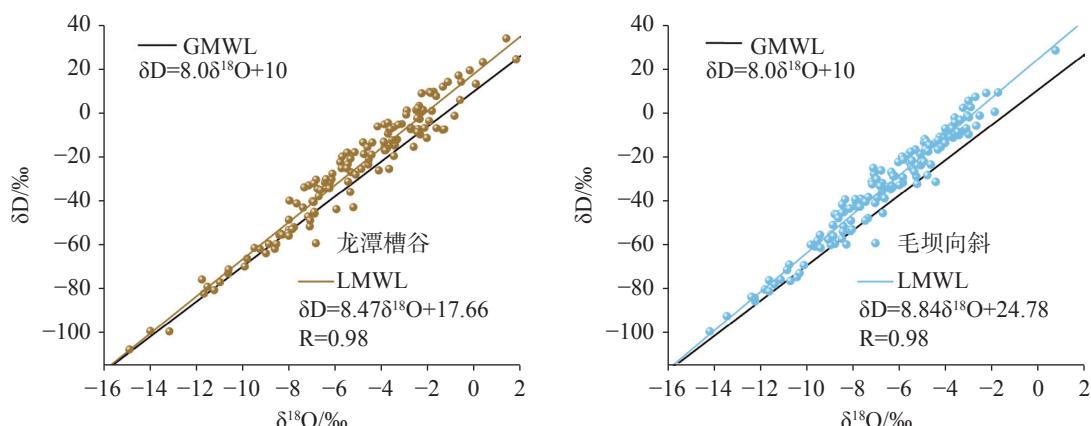


图 3 龙潭槽谷、毛坝向斜大气降水线与全球大气降水线的对比

Fig. 3 Comparison of meteoric water lines in Longtan trough valley and Maoba syncline with global meteoric water lines

### 3.2 龙潭槽谷、毛坝向斜大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta\text{D}$ 的变化特征

从龙潭槽谷和毛坝向斜大气降水中  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  随时间的变化可以看出, 大气降水中  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  的变化趋势一致(图 4)。龙潭槽谷降水  $\delta^{18}\text{O}$  的变化范围是:  $-16.33\text{‰} \sim 1.82\text{‰}$ ,  $\delta\text{D}$  的变化范围是:  $-121.97\text{‰} \sim 33.77\text{‰}$ , 算数平均值分别是:  $-5.17\text{‰}$ ,  $-26.13\text{‰}$ , 雨量加权平均值分别是:  $-6.62\text{‰}$ ,  $-39.60\text{‰}$ 。毛坝向斜降水  $\delta^{18}\text{O}$  的变化范围是:  $-14.23\text{‰} \sim 0.76\text{‰}$ ,  $\delta\text{D}$  的变化范围:  $-99.66\text{‰} \sim 28.80\text{‰}$ , 算数平均值分别是:  $-6.49\text{‰}$ ,  $-32.58\text{‰}$ , 雨量加权平均值分别是:  $-7.39\text{‰}$  和  $-42.12\text{‰}$ 。由龙潭槽谷和毛坝向斜两地  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  的变化范围可知, 龙潭槽谷降水氢氧稳定同位素波动幅度大于毛坝向斜; 龙潭槽谷  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  的算数

平均值和雨量加权平均值与毛坝向斜  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  的算数平均值和雨量加权平均值相比, 更加偏正。推测龙潭槽谷降水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  经历了微弱的云下二次蒸发作用或局地水汽再循环过程。降水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  的差异, 表明两地降水氢氧稳定同位素可能存在差异<sup>[23]</sup>。龙潭槽谷、毛坝两地降水  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  整体上呈现出雨季 5 月至 10 月偏负、旱季 11 月至次年 4 月偏正的变化特征(图 4), 显示出季风区降水的特点, 这是由冬夏半年降水水汽来源及蒸发条件差异导致的<sup>[24-25]</sup>。

### 3.3 过量氘 ( $d$ -excess) 的区域差异

Dansgaard<sup>[2]</sup> 定义了“过量氘( $d$ -excess)”, 即  $d$ -excess =  $\delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$ , 大气降水  $d$ -excess 值可以反映降水来源、水汽运移规律以及降水过程中由于动力分

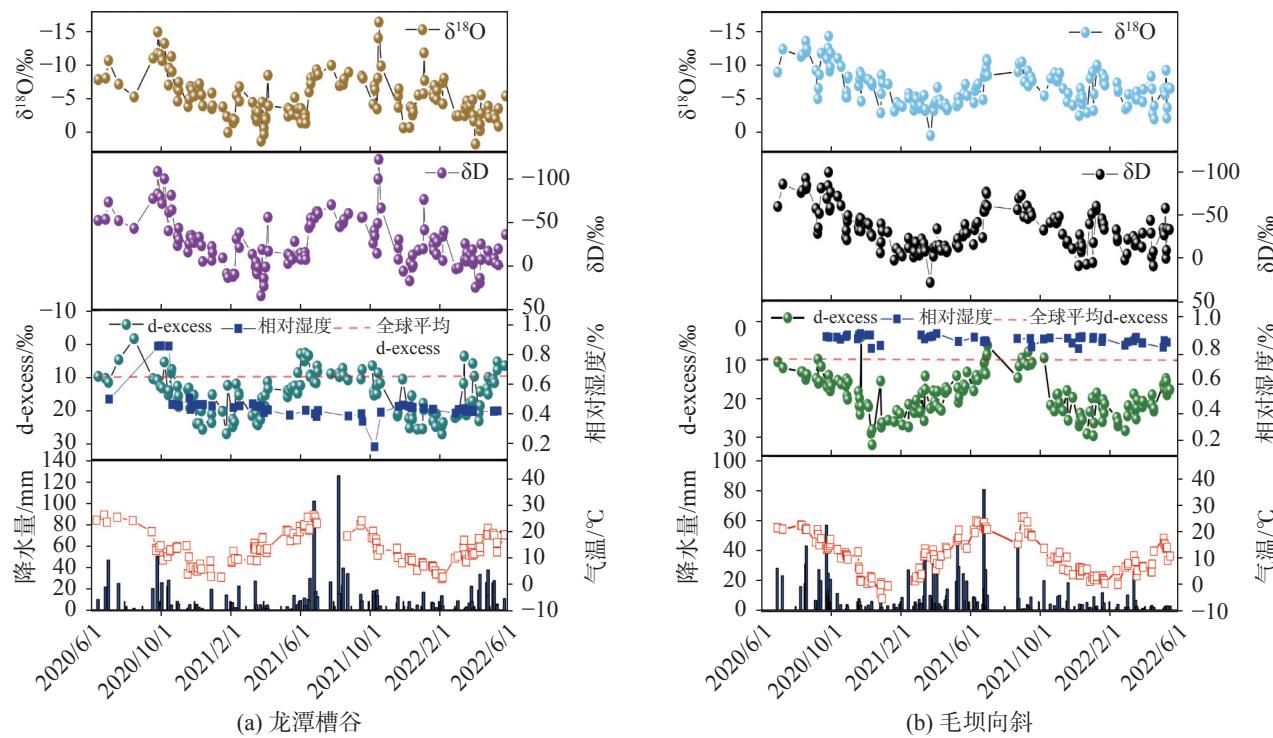


图 4 2020 年 6 月—2022 年 5 月龙潭槽谷和毛坝向斜降水  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  和  $d\text{-excess}$  组成随时间的分布

Fig. 4 Distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  values and  $\delta\text{D}$  values and their  $d\text{-excess}$  compositions in precipitation in Longtan trough valley and Maoba syncline from June 2020 to May 2022

馏而偏离平衡分馏的程度。龙潭槽谷和毛坝向斜两地降水中过量氘( $d\text{-excess}$ )呈现出雨季较低,旱季较高的变化趋势(图 4),反映了夏秋季水汽蒸发形成的热力条件和平衡条件的改变<sup>[3]</sup>。在我国季风影响的地区,冬季风期间  $d\text{-excess}$  值一般大于 10‰,夏季风期间的  $d\text{-excess}$  值一般小于 10‰,反映出冬、夏季风期间降水云团具有不同的源区<sup>[26]</sup>。研究区地处亚热带季风气候区,夏季降水主要来自低纬度的海洋水汽凝结,空气湿度大,因水汽输送距离较远,降水中的重同位素( $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$ )受沿途“雨除”作用强,重同位素逐渐贫化,  $d\text{-excess}$  值偏小<sup>[12,27]</sup>;冬季降水主要受大陆气团的影响,以及西风带的输送和内陆再蒸发的补给,空气湿度小,降水中的重同位素( $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$ )经历云下二次蒸发作用而富集,  $d\text{-excess}$  值偏大<sup>[28]</sup>。

$d\text{-excess}$  不仅与水汽蒸发形成的热力条件和平衡条件有关,还受到降水形成时的地理环境和气候条件的影响<sup>[29-30]</sup>。2020 年 6 月至 2022 年 5 月整个采样期间,龙潭槽  $d\text{-excess}$  的变化范围是: -1.60‰~26.95‰, 算数平均值是 15.25‰, 雨量加权平均值是: 13.34‰。毛坝向斜  $d\text{-excess}$  的变化范围是: 4.15‰~32.10‰, 算数平均值是: 19.37‰, 雨量加权平均值是:

17.03‰。两地大气降水的  $d\text{-excess}$  值均高于全球平均值 10‰<sup>[20]</sup>。龙潭槽谷的  $d\text{-excess}$  值总体上小于毛坝向斜的  $d\text{-excess}$  值。局部复杂地形带来的相对气象因素及云下二次蒸发的差异是导致  $d\text{-excess}$  在研究区呈现出差异性的主要原因<sup>[23,31]</sup>。龙潭槽谷海拔较低,气温高,降水量少,湿度低,大气降水过程中,雨滴由云层底部降落至地面经过不饱和空气时会发生云下二次蒸发现象,使降水同位素中的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  富集、 $d\text{-excess}$  降低,因此云下未发生蒸发的雨滴同位素值与受蒸发降落到地面处的同位素值存在差别<sup>[23,32]</sup>。毛坝向斜与龙潭槽谷相比海拔较高,气温低,湿度高,由于雨滴的云下二次蒸发减少,云底和地面之间的距离较短会产生更大的降水  $d\text{-excess}$ <sup>[33-34]</sup>。

### 3.4 龙潭槽谷、毛坝向斜单次降水稳定同位素的影响因素

#### 3.4.1 单次降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与不同等级气温的关系

研究表明中国亚热带季风气候区降水  $\delta^{18}\text{O}$  具有“反温度效应”,即降水  $\delta^{18}\text{O}$  与气温的负相关关系<sup>[17,35]</sup>。将龙潭槽谷和毛坝向斜降水  $\delta^{18}\text{O}$  按不同的温度等级划分( $T < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $10\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),用

于研究不同的温度条件下降水  $\delta^{18}\text{O}$  和气温的关系, 不同温度等级下  $\delta^{18}\text{O}$  的分布如图 5,  $\delta^{18}\text{O}$  与温度的相

关性如表 1。

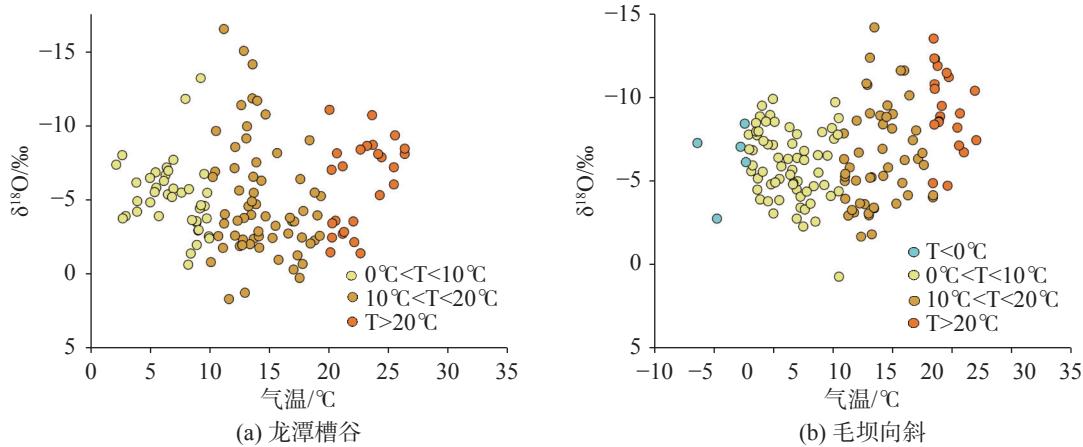


图 5 不同温度等级下  $\delta^{18}\text{O}$  的分布

Fig. 5 Distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  values at different temperature levels

表 1 龙潭槽谷和毛坝向斜不同气温标准下  $\delta^{18}\text{O}$  与气温的相关性

Table 1 Correlation of  $\delta^{18}\text{O}$  values with temperatures meeting different temperature criteria in Longtan trough valley and Maoba syncline

采样点	R(P)				
	全部	T<0 °C	0 °C<T<10 °C	10 °C<T<20 °C	T>20 °C
龙潭槽谷	-0.02(0.80) n=130	-	0.22(0.18) n=41	0.21(0.09) n=64	-0.43(0.03*) n=25
	-0.31(0.00**) n=143	-0.28(0.65) n= 5	0.21(0.10) n= 66	-0.13(0.34) n= 56	0.21(0.45) n= 16
毛坝向斜					

表格中\*, \*\*分别代表相关系数的信度达到 0.05, 0.01; 下同。

\*: significant at 0.01 level; \*\*: significant at 0.05 level (hereinafter the same).

采样期间的全部样品中, 龙潭槽谷降水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水时气温的相关系数为 -0.02, 未通过显著性的检验, 即龙潭槽谷降水  $\delta^{18}\text{O}$  没有呈现出与温度的稳定规律(图 5a)。毛坝向斜降水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水时气温的相关系数为 -0.31, 通过了 0.01 的显著性检验, 呈现一种较明显的“反温度效应”, 与其他学者得出的西南季风区大气降水氢氧稳定同位素与气温的负相关一致<sup>[36]</sup>。这是由于毛坝向斜采样点海拔高达 1 140 m, 气温低、湿度大, 特殊的地形导致全年多雾, 雾水混入云团增加了降水量, 推测雾水的存在一定程度上干扰了“温度效应”<sup>[3]</sup>。

2020 年 6 月至 2022 年 5 月, 龙潭槽谷降水  $\delta^{18}\text{O}$  对应的气温均大于 0 °C, 毛坝向斜在 T<0 °C 条件下有 5 次降雪事件, 降雪  $\delta^{18}\text{O}$  与气温的相关系数为 -0.28, 未通过显著性检验。0 °C<T<10 °C 的条件下, 龙潭槽谷降水  $\delta^{18}\text{O}$  和毛坝向斜降水  $\delta^{18}\text{O}$  与气温的相

关系数为正, 未通过显著性检验。这可能是由于气温较低条件主要出现在冬季, 降水量较少, 气温对降水  $\delta^{18}\text{O}$  的影响增大有关。

T>20 °C 条件下, 龙潭槽谷降水  $\delta^{18}\text{O}$  与气温的相关系数为 -0.43, 呈现出明显的“反温度效应”。可能是由于气温较高条件下的降水  $\delta^{18}\text{O}$  多出现在雨季(5—10 月), 此时研究区湿度和降水量也较大, 湿热的气候条件使得雨滴在降落过程中的蒸发分馏不显著<sup>[37]</sup>。

#### 3.4.2 单次降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与不同强度降水量的关系

降水量影响同位素组成<sup>[32]</sup>。在许多热带和季风地区, 可以观察到降水量与  $\delta^{18}\text{O}$  之间的负相关关系, 称为“降水量效应”<sup>[2]</sup>。将龙潭槽谷降水  $\delta^{18}\text{O}$  和毛坝向斜降水  $\delta^{18}\text{O}$  按照单次降水量大小划分为 4 个级别( $p<5 \text{ mm}$ ,  $5 \text{ mm}<p<10 \text{ mm}$ ,  $10 \text{ mm}<p<25 \text{ mm}$ ,  $p>$

25 mm), 计算其与单次降水量的相关性, 不同降水量等级下  $\delta^{18}\text{O}$  的分布(图 6),  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量的相关性如表 2。在全部降水事件中, 龙潭槽谷和毛坝向斜降

水  $\delta^{18}\text{O}$  均呈现出“降水量效应”，相关系数分别为 -0.28 和 -0.24（表 2）。与李廷勇<sup>[18]</sup>在重庆北碚观测的降水中  $\delta^{18}\text{O}$  呈现出“降水量效应”的结果一致。

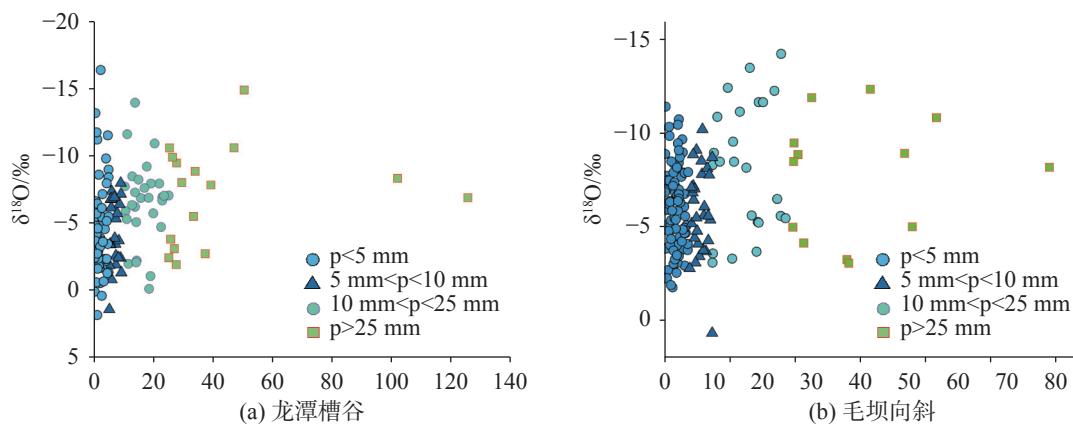


图 6 不同降水量等级下  $\delta^{18}\text{O}$  的分布

Fig. 6 Distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  values at different precipitation levels

表 2 龙潭槽谷和毛坝向斜不同降水量标准下  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量的相关性

Table 2 Correlation between  $\delta^{18}\text{O}$  values and rainfall meeting different rainfall criteria in Longtan trough valley and Maoba syncline

4个级别的降水事件中,  $\delta^{18}\text{O}$  和降水量在两个采样点均未表现出显著的相关性, 这可能是由于次降水的  $\delta^{18}\text{O}$  受凝结高度、风速、大气的稳定度、湿度以及水汽条件等气象要素的随机影响, 降雨中的同位素离散程度较大, 从而导致同位素的降水量效应相对较弱<sup>[38]</sup>。

### 3.5 气温和降水量对龙潭槽谷、毛坝向斜降水氢氧稳定同位素季节变化的影响

2020年6月至2022年5月整个采样期间，龙潭

槽谷和毛坝向斜不同季节单次降水量与对应  $\delta^{18}\text{O}$  的相关关系如表 3。从表 3 可以得知, 2020 年夏季和秋季龙潭槽谷降水量与  $\delta^{18}\text{O}$  呈显著的负相关关系; 2020 年夏季毛坝向斜降水量与  $\delta^{18}\text{O}$  没有相关性, 2020 年秋季毛坝向斜降水量与  $\delta^{18}\text{O}$  呈显著的负相关关系。推测两地夏秋季节降水  $\delta^{18}\text{O}$  受“降水量效应”的影响较大。这是由于夏秋两季的 6—10 月是研究区的雨季, 降水量较大, 此时空气湿度较大而蒸发较小,  $\delta^{18}\text{O}$  主要受降水强度的影响。

表 3 龙潭槽谷、毛坝向斜不同季节降水量与  $\delta^{18}\text{O}$  的关系

Table 3 Relationship between precipitation and  $\delta^{18}\text{O}$  values in different seasons in Longtan trough valley and Maoba syncline

采样点	R(P)							
	2020年			2021年			2022年	
	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春
龙潭槽谷	-0.90(0.04*) n=5	-0.55(0.01*) n=20	-0.22(0.39) n=17	-0.12(0.59) n=22	-0.32(0.20) n=18	-0.23(0.42) n=14	-0.29(0.26) n=17	-0.27(0.20) n=24
	0.00(1.00) n=7	-0.60(0.00**) n=24	0.13(0.59) n=20	-0.04(0.84) n=26	-0.12(0.68) n=14	0.26(0.33) n=16	-0.02(0.92) n=21	-0.03(0.88) n=23

龙潭槽谷各季节  $\delta^{18}\text{O}$  与气温无显著相关性(表 4)。毛坝向斜 2021 年冬季气温与  $\delta^{18}\text{O}$  呈显著的正相关关系, 即 2021 年冬季毛坝向斜降水  $\delta^{18}\text{O}$  受“温度效应”的影响, 表明降水过程受局地气温影响较为显著。2021 年秋季气温与  $\delta^{18}\text{O}$  呈显著的负相关关系, 降水

$\delta^{18}\text{O}$  受“反温度效应”的影响, 这可能与秋季降水量较大, 季风气候对大气降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的影响较大, 在某种程度上季风气候抑制和掩盖了温度效应, 使得该区表现出反温度效应<sup>[39]</sup>。

表 4 龙潭槽谷、毛坝向斜不同季节气温与  $\delta^{18}\text{O}$  的关系Table 4 Relationship between temperatures and  $\delta^{18}\text{O}$  values in different seasons in Longtan trough valley and Maoba syncline

采样点	R(P)							
	2020年				2021年			
	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春
龙潭槽谷	0.24(0.70) n=5	-0.31(0.18) n=20	-0.18(0.19) n=15	0.11(0.12) n=22	0.26(0.31) n=13	-0.02(0.95) n=14	0.47(0.06) n=17	0.08(0.71) n=24
	0.48(0.28) n=7	-0.24(0.26) n=24	-0.07(0.83) n=13	-0.01(0.96) n=26	0.29(0.32) n=15	-0.58(0.02*) n=16	0.55(0.01*) n=21	0.07(0.76) n=23

值得注意的是, 监测期间龙潭槽谷和毛坝向斜气温和降水量在不同年份的相同季节和降水  $\delta^{18}\text{O}$  的相关性不同(表 3、表 4), 这表明气温和降水对  $\delta^{18}\text{O}$  的影响存在变率。即降水  $\delta^{18}\text{O}$  可能受到除气温和降水以外其他因素的干扰, 如水汽来源和大气环流<sup>[12]</sup>。

### 3.6 龙潭槽谷、毛坝向斜降水氢氧稳定同位素的高程效应分析

“高程效应”是指在地形起伏比较大的地区当水汽团从地面升起发生绝热冷凝时会出现地形降水, 从而使得大气降水的  $\delta^{18}\text{O}$  随着高程增加而降低的现象<sup>[40]</sup>。龙潭槽谷与毛坝向斜两地海拔相差 807 m, 海拔越高气温越低, 在大多数同次降水过程中, 毛坝向斜降水  $\delta^{18}\text{O}$  比龙潭槽谷降水  $\delta^{18}\text{O}$  更加偏负, 符合“高程效应”的结论。需要注意的是这些降水  $\delta^{18}\text{O}$  对应的温度和降水量也表现出差异性, 这是因为海拔效应大多与其他效应叠加, 如降水量和气温<sup>[41]</sup>。2020 年 6 月至 2022 年 5 月整个采样期间, 龙潭槽谷和毛坝向斜两地共计有 53 次降水发生在同一天, 且这些降水过程中毛坝向斜的气温总体上低于龙潭槽谷, 而两个采样点的降水量并没有表现出规律性的变化(图 7)。大部分降水事件中龙潭槽谷  $\delta^{18}\text{O}$  较毛坝向斜  $\delta^{18}\text{O}$  偏正(图 7)。这主要是由两地的气温和相对湿度的差异造成的, 由于龙潭槽谷采样点海拔较低, 气温相对较高, 湿度较低, 降水过程受到局地蒸发作用进而导致  $\delta^{18}\text{O}$  的值也较高。龙潭槽谷和毛

坝向斜 53 次同一天发生的降水事件中, 仅有 16 次降水龙潭槽谷降水  $\delta^{18}\text{O}$  小于毛坝向斜降水  $\delta^{18}\text{O}$ (图 7)。这可能是降水、气温及蒸发等气象因素共同影响的结果, 并非受某一或两个因素的主导<sup>[42]</sup>。

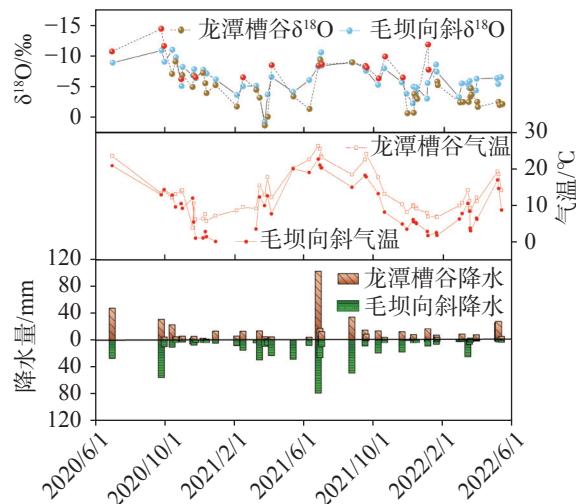


图 7 龙潭槽谷、毛坝向斜同次降水  $\delta^{18}\text{O}$  和气温降水量的分布  
注: 红色圆表示降水事件中龙潭槽谷降水  $\delta^{18}\text{O}$  较毛坝向斜偏负

Fig. 7 Comparison of  $\delta^{18}\text{O}$  values and environmental factors during the same precipitation event in Longtan trough valley and Maoba syncline

Note: The red circle indicates that the  $\delta^{18}\text{O}$  values in precipitation in Longtan trough valley is more negative than that in Maoba syncline during the precipitation event

值得注意的是过去有关大气降水氢氧稳定同位素“高程效应”的讨论多集中于不同海拔梯度分布的多个点上<sup>[43-44]</sup>。本研究尝试讨论的龙潭槽谷和毛

向斜两地“高程效应”的结果表明,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响因素,包括降水量和气温,都可归因于两地在高程和地形的差异上,即龙潭槽谷和毛坝向斜降水 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现出一定的“高程效应”。

### 3.7 水汽来源对降水 $\delta^{18}\text{O}$ 年际变化的影响

龙潭槽谷和毛坝向斜两地降水 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现出2020年夏季偏负,2021年夏季偏正的变化趋势(图8)。2020年夏季龙潭槽谷降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的加权平均值是 $-8.02\text{\textperthousand}$ ,2021年夏季龙潭槽谷降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的加权平均值是 $-7.55\text{\textperthousand}$ ;2020年毛坝向斜夏季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的加权平均值是 $-10.88\text{\textperthousand}$ ,2021年毛坝向斜夏季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的加权平均值是 $-8.59\text{\textperthousand}$ 。

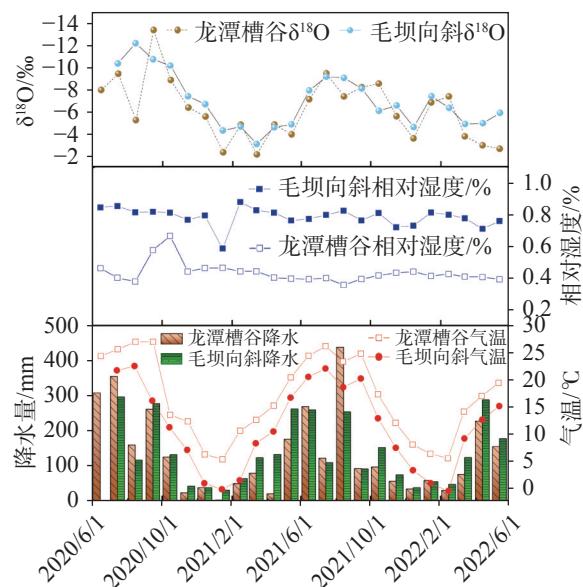


图 8 龙潭槽谷、毛坝向斜 $\delta^{18}\text{O}$ 月加权平均值和相对湿度及气温降水量的分布

Fig. 8 Monthly weighted average of  $\delta^{18}\text{O}$  values and distribution of relative humidity, temperature and precipitation in Longtan trough valley and Maoba syncline

研究表明,中国西南地区的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 受“水汽来源”、“环流效应”等多种因素的综合作用<sup>[24,45-46]</sup>。厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)对北半球大气环流特别是对西太平洋副热带高压系统(WPSH)位置和强度的影响将对中国南方地区的降水产生重要影响<sup>[47]</sup>。谭明<sup>[48]</sup>指出西太平洋副热带高压影响下近源水汽(西太平洋水汽)和远源水汽(印度洋水汽)贡献比例的变化导致了中国季风区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 在年际或更长时间尺度上的波动。因此,水汽来源对降水 $\delta^{18}\text{O}$ 年际间的变化具有十分重要的影响。

从2020年和2021年6—8月对流层整层水汽通

量图可以看出2020年和2021年研究区水汽输送呈现出显著的差异(图9a,图9c)。由图9a、图9c可以看出,2020年夏季西南季风携带印度洋和孟加拉湾的水汽经印度半岛和中南半岛到达研究区,水汽输送量大;2021年西南季风携带的印度洋水汽经印度半岛南部和中南半岛南部,在中国南海与西太平洋水汽汇合而向北输送,只有少部分的水汽到达研究区,水汽输送量较少。由此可知,2020年和2021年夏季印度洋水汽(远源水汽)对研究区输送量的差异可能是影响龙潭槽谷和毛坝向斜两地降水 $\delta^{18}\text{O}$ 年际间变化的主要原因。为了进一步证明水汽来源差异对两地降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响,本文以龙潭槽谷研究点为例,利用NCEP/NCAR资料和HYSPLIT后向轨迹模拟分析了2020年6—8月和2021年6—8月降水水汽来源和水汽输送比例(图9b,图9d)。结果表明,2020年夏季来自印度洋的水汽占比达为76%,2021年夏季来自印度洋的水汽占比为52%。而2020年和2021年夏季西太平洋水汽(近源水汽)输送到研究区的比例较少(图9b,图9d)。因此,造成两地降水 $\delta^{18}\text{O}$ 年际间变化的主要原因是印度洋水汽(远源水汽)输送比例的变化,即2020年更多的远源水汽输送到研究区,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负,而2021年远源水汽对研究区的输送比例小,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正。

## 4 结 论

通过分析2020年6月至2022年5月龙潭槽谷和毛坝向斜两地的降水稳定同位素采样数据发现:

(1) 龙潭槽谷大气降水线为:  $\delta\text{D}=8.47\delta^{18}\text{O}+17.66$  ( $n=137$ ,  $R=0.98$ ,  $P<0.01$ ),毛坝向斜大气降水线为:  $\delta\text{D}=8.84\delta^{18}\text{O}+24.78$  ( $n=151$ ,  $R=0.98$ ,  $P<0.01$ )。两地大气降水线的斜率和截距均大于全球大气降水线,代表温暖湿润的气候条件。毛坝向斜大气降水线的斜率和截距均大于龙潭槽谷,这与局地小气候差异导致的水汽凝结过程中蒸发、温度条件有关。

(2) 龙潭槽谷和毛坝向斜两地大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 和 $d\text{-excess}$ 呈现出明显的季节变化,雨季(5—10月)偏负,旱季(11月—次年4月)偏正,这是由于季节性水汽来源差异不同导致的。龙潭槽谷 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 较毛坝向斜偏正,而 $d\text{-excess}$ 偏负,表明龙潭槽谷降水稳定同位素可能受到云下二次蒸发作用的影响。

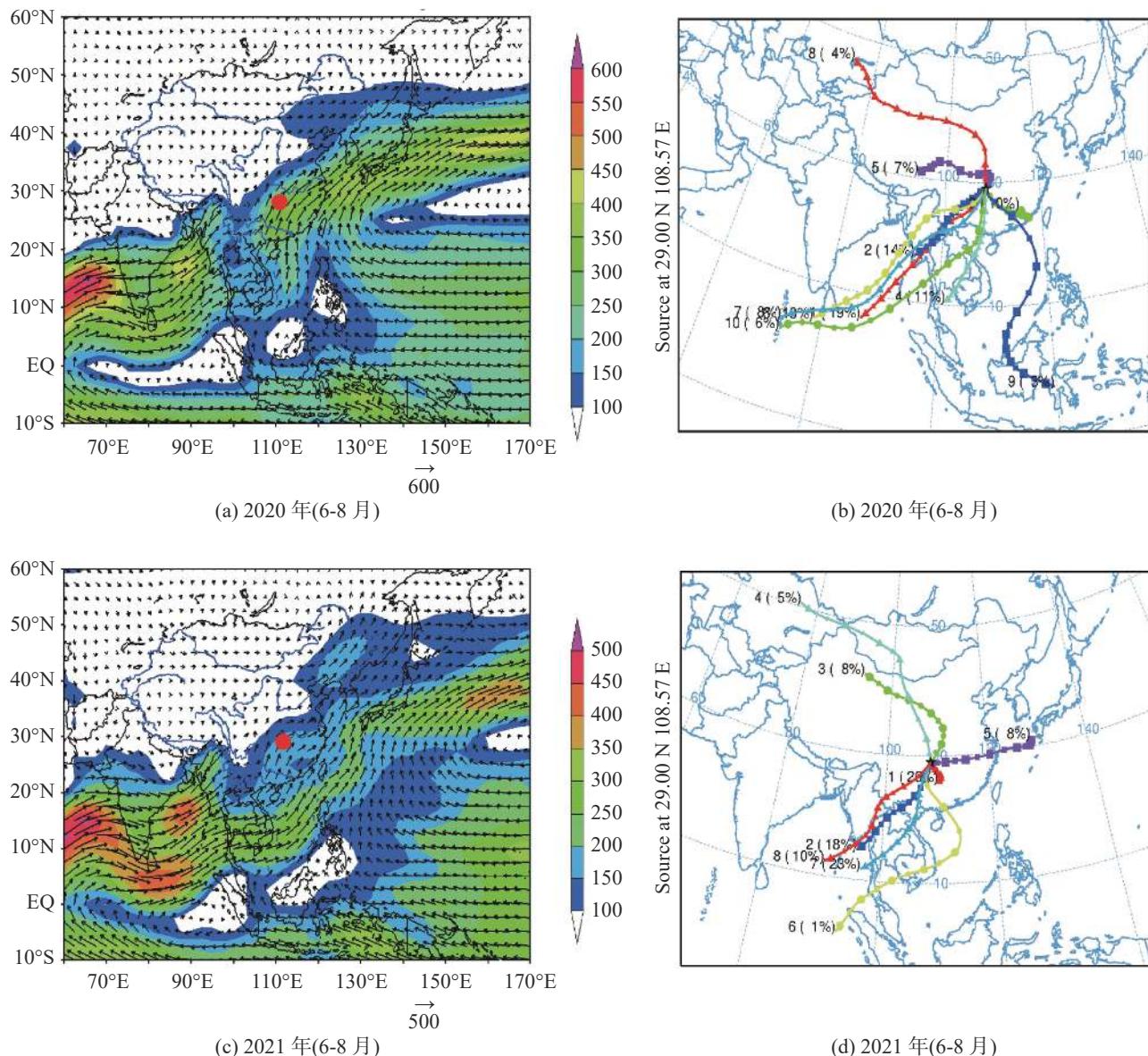


图9 2020年—2021年6至8月对流层1 000~300 hPa整层水汽通量图(左)和850 hPa水汽后向轨迹聚类分析(右)  
左图中研究区位置用红色圆点表示;右图中括号内的数字表示不同水汽来源的比例。

Fig. 9 Map of tropospheric water vapor flux of 1,000–300 hPa from June 2020 to August 2021 (left) and clustering analysis of backward trajectory of 850 hPa water vapor (right)

red dot in the left figure: locations of the study areas; numbers in parentheses of the right figure: proportions of different sources of water vapor

(3) 龙潭槽谷和毛坝向斜两地降水 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现出显著的降水量效应, 温度效应的影响较弱。龙潭槽谷单次降水 $\delta^{18}\text{O}$ 在T>20 °C时表现出反温度效应, 毛坝向斜单次降水 $\delta^{18}\text{O}$ 总体上表现出反温度效应, 推测雾水的混入在一定程度上干扰了毛坝向斜降水氢氧稳定同位素的温度效应。

(4) 龙潭槽谷和毛坝向斜两地降水稳定同位素呈现出一定的高程效应。同次降水过程中, 龙潭槽谷降水 $\delta^{18}\text{O}$ 总体上偏正, 而毛坝向斜降水 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负。只有少数同次降水过程中龙潭槽谷降水 $\delta^{18}\text{O}$ 较毛坝

向斜降水 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负。

(5) 印度洋水汽(远源水汽)输送比例的变化可能是影响龙潭槽谷和毛坝向斜两地降水 $\delta^{18}\text{O}$ 年际变化的主要因素。2020年夏季印度洋(远源水汽)对研究区的输送比例达到76%, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负, 而2021年夏季印度洋(远源水汽)对研究区的输送比例为52%, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正。

## 参考文献

- [1] 宋春林, 孙向阳, 王根绪. 贡嘎山亚高山降水稳定同位素特征

- 及水汽来源研究[J]. 长江资源与环境, 2015, 24(11): 1860-1869.
- SONG Chunlin, SUN Xiangyang, WANG Genxu. A study on precipitation stable isotopes characteristics and vapor sources of the subalpine Gongga mountain, China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(11): 1860-1869.
- [2] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.
- [3] 陈琦, 郭锦荣, 李超, 王翰琨, 吴春生, 邓文平, 刘苑秋, 叶清, 李晓东. 庐山地区大气降水稳定同位素变化特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(6): 1306-1316.
- CHEN Qi, GUO Jinrong, LI Chao, WANG Hankun, WU Chunsheng, DENG Wenping, LIU Yuanqiu, YE Qing, LI Xiaodong. Variation characteristics of stable isotope in precipitation in Mount Lu area[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(6): 1306-1316.
- [4] Rozanski K, Araguas Araguas L, Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation[A]//Swart P K, Lohmann K C, Mckenzie J, et al. Climate Change in Continental Isotopic Records. Washington DC: American Geophysical Union, 1993: 1-36.
- [5] 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.
- [6] 折远洋, 王圣杰, 王鹏, 雷世军, 杨磊. 西秦岭地区大气降水氢氧稳定同位素特征[J]. 地球与环境, 2023, 51(2): 143-152.
- SHE Yuanyang, WANG Shengjie, WANG Peng, LEI Shijun, YANG Lei. Stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the western Qinling mountains[J]. Earth and Environment, 2023, 51(2): 143-152.
- [7] 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, M Stievenard, J Jouzel. 青藏高原南北降水中  $\delta D$  和  $\delta^{18}\text{O}$  关系及水汽循环[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(3): 214-220.
- ZHU Lei, FAN Tao, GUO Huan. Sources and stable isotope characteristics of precipitation in southwest of China[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2014, 26(5): 61-67.
- [8] 张贵玲, 角媛梅, 何礼平, 刘歆, 刘澄静, 闫晓景, 王梅. 中国西南地区降水氢氧同位素研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 1094-1103.
- ZHANG Guiling, JIAO Yuanmei, HE Liping, LIU Xin, LIU Chengjing, YAN Xiaojing, WANG Mei. Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in Southwest China: Progress and prospects[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(4): 1094-1103.
- [10] 章新平, 关华德, 孙治安, 孙广禄, 张新主, 吴华武. 云南降水中稳定同位素变化的模拟和比较[J]. 地理科学, 2012, 32(1): 121-128.
- ZHANG Xinping, GUAN Huade, SUN Zhian, SUN Guanglu, ZHANG Xinzu, WU Huawu. Simulations of stable isotopic variations in precipitation and comparison with measured values in Yunnan Province, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(1): 121-128.
- [11] 章新平, 刘晶森, 孙维贞, 黄一民, 张剑明. 中国西南地区降水中氧稳定同位素比率与相关气象要素之间关系的研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(9): 850-859.
- Zhou J L, Li T Y. A tentative study of the relationship between annual  $\delta^{18}\text{O}$  &  $\delta D$  variations of precipitation and atmospheric circulations: A case from Southwest China[J]. Quaternary International, 2017, 479: 117-127.
- [13] 庞洪喜, 何元庆, 卢爱刚, 赵井东, 宁宝英, 院玲玲, 宋波. 天气尺度下丽江季风降水中  $\delta^{18}\text{O}$  变化[J]. 科学通报, 2006, 51(10): 1218-1224.
- [14] 朱秀勤, 范弢, 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 Xiuqin, FAN Tao, GUAN Wei. The analysis of stable isotopes of precipitation in Kunming[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2013, 25(5): 90-95.
- [15] 王涛, 邵晓华, 张娴. 四川盆地与关中盆地春夏季大气降水氧同位素特征及意义[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2013, 5(3): 209-215.
- WANG Tao, SHAO Xiaohua, ZHANG Xian. Regional characteristics and implications of spring and summer precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  values in Sichuan and Guanzhong basin[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition, 2013, 5(3): 209-215.
- [16] 李维杰, 王建力, 王家录. 西南地区不同地形降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 1132-1142.
- LI Weijie, WANG Jianli, WANG Jialu. Characteristics of the stable isotopes in precipitation and the source of water vapor in different terrain in the southwest region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(5): 1132-1142.
- [17] 张君, 陈洪松, 黄荣. 桂西北喀斯特小流域降雨稳定氢氧同位素组成及影响因素[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 236-245.
- ZHANG Jun, CHEN Hongsong, HUANG Rong. Composition of stable hydrogen and oxygen isotopic of precipitation and its influencing factors in karst area, northwest Guangxi of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 236-245.
- [18] 李廷勇, 李红春, 沈川洲. 2006~2008 年重庆大气降水  $\delta D$  和  $\delta^{18}\text{O}$  特征初步分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 757-764.
- LI Tingyong, LI Hongchuan, SHEN Chuanzhou. Study on the  $\delta D$  and  $\delta^{18}\text{O}$  characteristics of meteoric precipitation during 2006-2008 in Chongqing, China[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(6): 757-764.
- [19] 刘东生, 陈正明, 罗可文. 桂林地区大气降水的氢氧同位素研究[J]. 中国岩溶, 1987, 6(3): 225-231.
- LIU Dongsheng, CHEN Zhengming, LUO Kewen. A study on hydrogen and oxygen isotopic composition of the precipitation in Guilin area[J]. Carsologica Sinica, 1987, 6(3): 225-231.
- [20] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science,

- 1961, 133: 1702-1703.
- [21] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究 [J]. 科学通报, 1983(13): 801-806.
- [22] 章新平, 孙维贞, 刘晶森. 西南水汽通道上昆明站降水中的稳定同位素 [J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5): 665-669.
- ZHANG Xinping, SUN Weizhen, LIU Jingmiao. 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.
- [23] 周思捷, 孙从建, 陈伟, 张鑫. 黄土高原东部夏半年降水稳定同位素特征及水汽来源分析 [J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1745-1761.
- ZHOU Sijie, SUN Congjian, CHEN Wei, ZHANG Xin. Precipitation isotope characteristics and water vapor sources in summer in eastern Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(7): 1745-1761.
- [24] 王海静, 张金流, 刘再华. 四川黄龙降水氢、氧同位素对气候变化的指示意义 [J]. 中国岩溶, 2012, 31(3): 253-258.
- WANG Haijing, ZHANG Jinliu, LIU Zaihua. Indications of the hydrogen and oxygen isotopes in precipitation for climate change in Huanglong, Sichuan[J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(3): 253-258.
- [25] 涂林玲, 王华, 冯玉梅. 桂林地区大气降水的 D 和  $^{18}\text{O}$  同位素的研究 [J]. 中国岩溶, 2004, 23(4): 304-309.
- TU Linling, WANG Hua, FENG Yumei. Research on D and  $^{18}\text{O}$  isotope in the precipitation of Guilin[J]. Carsologica Sinica, 2004, 23(4): 304-309.
- [26] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响 [J]. 地球化学, 1994, 23(1): 33-41.
- WEI Keqin, LIN Ruifen. The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China[J]. Geochimica, 1994, 23(1): 33-41.
- [27] Chen C J, Li T Y. Geochemical characteristics of cave drip water respond to ENSO based on a 6-year monitoring work in Yangkou cave, Southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2018, 561: 896-907.
- Cai Z Y, Tian L D. Atmospheric controls on seasonal and inter-annual variations in the precipitation isotope in the East Asian monsoon region [J]. Journal of Climate, 2016, 29(4): 1339-1352.
- [29] 侯典炯, 秦翔, 吴锦奎, 杜文涛. 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 Dianjiong, QIN Xiang, WU Jinkui, DU Wentao. 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.
- [30] 宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东. 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 Yang, WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, SHI Yudong. Stable isotopes of precipitation in the eastern Tarim river basin and water vapor sources[J]. Environmental Science, 2022, 43(1): 199-209.
- [31] 徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张昱, 袁瑞丰, 张志远, 石阳. 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 Xiuting, JIA Wenxiong, ZHU Guofeng, MA Xinggang, ZHAN Yu, YUAN Ruijing, ZHANG Zhiyuan, SHI Yang. 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.
- [32] 肖涵余, 张明军, 王圣杰, 车存伟, 杜勤勤, 张宇, 韩婷婷, 苏鹏燕. 陕甘宁地区降水同位素云下二次蒸发效应 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3814-3822.
- XIAO Hanyu, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, CHE Cunwei, DU Qinjin, ZHANG Yu, HAN Tingting, SU Pengyan. Sub-cloud secondary evaporation effect of precipitation isotope in Shaanxi-Gansu-Ningxia region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(11): 3814-3822.
- [33] Peng H D, Mayer B, Harris S, Krouse H R. The influence of below-cloud secondary effects on the stable isotope composition of hydrogen and oxygen in precipitation at Calgary, Alberta, Canada[J]. Tellus, 2007, 59(4): 698-704.
- [34] Froehlich K, Kralik M, Papesch W, Rank D, Scheifinger H, Stichler W. Deuterium excess in precipitation of Alpine regions: Moisture recycling[J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2008, 44(1): 61-70.
- [35] Liu J R, Song X F, Yuan G F, Liu X, Wang S Q. 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.
- [36] 刘梦娇, 王勇, 张耀华, 李果. 中国西南季风区不同水体稳定同位素特征分析: 以重庆市北碚区为例 [J]. 中国岩溶, 2015, 34(5): 486-494.
- LIU Mengjiao, WANG Yong, ZHANG Yaohua, LI Guo. Variation characteristics of stable isotopes in different water bodies in Southwestern China monsoon area: A case study of Beibei district, Chongqing[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(5): 486-494.
- [37] 闫胜文, 刘加珍, 陈永金, 马笑丹, 张亚茹, 朱海勇. 聊城大气降水氢氧同位素特征及水汽来源分析 [J]. 生态环境学报, 2022, 31(3): 546-555.
- YAN Shengwen, LIU Jiazen, CHEN Yongjin, MA Xiaodan, ZHANG Yaru, ZHU Haiyong. Moisture sources and characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in Liaocheng[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(3): 546-555.
- [38] 章新平, 刘晶森, 中尾正义, 谢自楚. 我国西南地区降水中过量氯指示水汽来源 [J]. 冰川冻土, 2009, 31(4): 613-619.
- ZHANG Xinping, LIU Jingmiao, Masayoshi Nakawo, XIE Zichu. Vapor origins revealed by deuterium excess in precipitation in Southwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(4): 613-619.
- [39] 胡菡, 王建力. 重庆市 2013 年 10—12 月大气降水中氢氧同位素

- 素特征及水汽来源分析[J]. 中国岩溶, 2015, 34(3): 247-253.
- HU Han, WANG Jianli. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation from October to December 2013 in Chongqing and analysis of moisture sources[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(3): 247-253.
- [40] Bortolami G C, Ricci B, Susella G F, Zuppi G M. Hydrogeochemistry of the Corsaglia Valley, Maritime Alps, Piedmont, Italy[J]. Journal of Hydrology, 1979, 44(1): 57-79.
- [41] Akers P D, Welker J M, Brook G A. Reassessing the role of temperature in precipitation oxygen isotopes across the eastern and central United States through weekly precipitation-day data[J]. Water Resources Research, 2017, 53: 7644-7661.
- [42] 张海发, 郑芳文, 杨海全. 南昌市大气降水 H-O 稳定同位素特征及其水汽来源解析[J]. 地球与环境, 2023, 51(2): 133-142.
- ZHANG Haifa, ZHENG Fangwen, YANG Haiquan. The stable H-O isotope characteristic of atmospheric precipitation and the moisture source tracing in Nanchang City[J]. Earth and Environment, 2023, 51(2): 133-142.
- [43] Xue Y X, Zhang J, Su Z, Wu Y, Liang Q S, Liang M Q, Liu X Z, Chen C J, Qiu H Y, Li J Y, Li T Y. Quantifying source effects based on rainwater  $\delta^{18}\text{O}$  from 10-year monitoring records in Southwest China[J]. Applied Geochemistry, 2023, 155: 105706.
- [44] 袁娜, 李廷勇, 王海波, 李俊云, 南素兰, 韩立银, 黄春霞, 赵鑫, 张涛涛. 降水-滴水的  $\delta^{18}\text{O}$  / $\delta\text{D}$  年季变化及与大气环流的关系: 以重庆芙蓉洞地区为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(9): 133-139.
- YUAN Na, LI Tingyong, WANG Haibo, LI Junyun, NAN Sulan,
- HAN Liyin, HUANG Chunxia, ZHAO Xin, ZHANG Taotao. Annual and monthly variations of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  values in precipitation and drip water and their relationship with atmospheric circulation: A case study in Furong Cave area[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2015, 37(9): 133-139.
- [45] Otte I, Detsch F, Gutlein A, Scholl M, Kiese R, Appelhans T, Nauss T. Seasonality of stable isotope composition of atmospheric water input at the southern slopes of Mt. Kilimanjaro, Tanzania[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(22): 3932-3947.
- [46] Ren W, Yao T D, Xie S Y, You H. Controls on the stable isotopes in precipitation and surface waters across the southeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2017, 545: 276-287.
- [47] 李永华, 青吉铭, 李强, 向波. 西南地区东部夏季旱涝的西太平洋副高特征[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 106-116.
- LI Yonghua, QING Jiming, LI Qiang, XIANG Bo. Features of western pacific subtropical high (WPSH) associated with drought/flood in summer over the eastern part of Southwest China[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2013, 35(3): 106-116.
- [48] 谭明, 南素兰. 中国季风区降水氧同位素年际变化的“环流效应”初探[J]. 第四纪研究, 2010, 30(3): 620-622.
- TAN Ming, NAN Sulan. Primary investigation on interannual changes in the circulation effect of precipitation oxygen isotopes in monsoon China[J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(3): 620-622.

## Variation characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation of Longtan trough valley and Maoba syncline in Youyang, Chongqing

SUN Tingting<sup>1,2</sup>, YANG Yan<sup>1,2</sup>, JIANG Xiuyang<sup>3</sup>, LUO Zhenyu<sup>1,2</sup>, TANG Yueer<sup>1,2</sup>

(1. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographic Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. National Observation and Research Station of Karst Ecosystem in Jinmo Mountain of Chongqing, Chongqing 400715, China;

3. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

**Abstract** This study aims to explore the characteristics and influencing factors of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  in precipitation in two adjacent topographic areas of Longtan trough valley and Maoba syncline in Wuling mountain, southeastern Chongqing. Based on the sampling data about  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  in precipitation of Maoba syncline (altitude of 1,140 m) and Longtan trough valley (altitude of 330 m) in Youyang county of Chongqing in two hydrological years from June 2020 to May 2022, the meteoric water lines of the two studies areas were established, and the variation characteristics and influencing factors of hydrogen and oxygen stable isotopes in precipitation in these areas were also analyzed.

The results show as follows. (1) The slopes and intercepts of meteoric water lines in Longtan trough valley and Maoba syncline exceeded those of the global meteoric water lines. The values of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation in these two study areas show a significant effect of precipitation, while the influence of temperature effect is relatively weak. (2) The slope and intercept of the meteoric water line in Longtan trough valley were smaller than those in the Maoba syncline. The difference between the meteoric water lines in these two study areas was mainly controlled by the temperature and evaporation conditions during water vapor condensation. (3) The average values of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  in

precipitation in Longtan trough valley were more positive than those in Maoba syncline. The results of d-excess showed that there was a weak sub-cloud secondary evaporation of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  in Longtan trough valley. The values of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  in precipitation in Longtan trough valley and Maoba syncline exhibited significant seasonal changes, with negative values during the rainy season (May to October) and positive values during the dry season (November to the following April). (3) The values of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation in Longtan trough valley and Maoba syncline showed a significant precipitation effect, while the influence of temperature effect is weak. During the same precipitation event, the values of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation in Longtan trough valley were generally more positive than those in Maoba syncline, indicating that  $\delta^{18}\text{O}$  values in precipitation in Longtan trough valley and Maoba syncline were influenced by elevation effects. (4) The interannual variations of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation in Longtan trough valley and Maoba syncline were mainly affected by the change of the proportion of water vapor transported from Indian Ocean. In the summer of 2020, the proportion of water vapor from the Indian Ocean to the study areas reached 76%, with negative  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation. However, the proportion decreased to 52% in the summer of 2021, with positive  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation. This study is of great significance for the understanding of the water cycle process in the karst trough valley areas of Southwest China and for future studies on the eco-hydrological process of Longtan trough valley and Maoba syncline.

**Key words** precipitation, hydrogen and oxygen stable isotopes, local terrain, Longtan trough valley, Maoba syncline, Wuling mountain

(编辑 张玲)

~~~~~

(上接第 779 页)

of research on carbon cycle and carbon sink after 2015, in which studies have been conducted under the guidance of karst critical zone theory based on the atmosphere–biology–soil–water–bedrock system, and they mainly focus on the effect of aquatic photosynthesis, considering the impact of climate change and land-use change.

In the future, the research of carbon cycle and carbon sink in karst critical zones should be carried out under the guidance of earth system science theory. At a micro level, studies should focus on the catalysis of carbonic anhydrase in soil, microbial carbon sequestration, photosynthesis of aquatic plants and other biological carbon pumps to improve the potential of karst carbon sink. At a macro level, studies should pay attention to the impact factors such as climate change, change of land use, and change of ecosystem service functions under human activities.

**Key words** karst carbon cycle, karst carbon sink, bibliometrics, research trends

(编辑 杨杨)