

•环境工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202300739



本刊网刊

## 雅鲁藏布江大峡谷降水稳定同位素对印度洋季风的响应

王钟毓<sup>1</sup>,漆继红<sup>1\*</sup>,许模<sup>1</sup>,李潇<sup>2</sup>,易磊<sup>1</sup>,梁敬沿<sup>1</sup>,谭谣<sup>1</sup>

(1.成都理工大学环境与土木工程学院,四川成都610051;2.天府永兴实验室,四川成都610200)

**摘要:**雅鲁藏布江大峡谷是印度洋季风输入青藏高原的重要通道,该地区特有的地形条件及水汽输送方式是此区域降水同位素组成的重要影响因素。为了分析青藏高原地区同位素高程效应规律以及同位素分馏特征,本文采集了2021—2022年的降水样品,运用同位素分馏理论和构建数学模型的方法,对大峡谷地区同位素高程梯度和氡盈余进行了研究,并得到了以下结论:1)雅鲁藏布江大峡谷地区的大气降水线为: $\delta(D)=8.02\delta(^{18}O)+13.21$ ( $\delta(D)$ 和 $\delta(^{18}O)$ 分别为水中稳定氢、氧同位素组成),同位素高程梯度为 $-1.43\text{‰}/\text{km}$ ,并通过模型进行了验证;2)研究区内的氡盈余分布呈自西至东缓慢增大的趋势,这是由于印度洋季风的影响逐渐减弱造成的,大峡谷地区的氡盈余显著高于季风输入和输出地区,显示出水汽在大峡谷中有一定的滞留过程;3)氡盈余分布特征与后向轨迹模型得到的水汽来源特征一致,即随着印度洋季风的向西移动,西风带和大陆气团水汽混入比例逐渐增大。

**关键词:**雅鲁藏布江大峡谷;大气降水;氢氧稳定同位素;氡盈余;水汽输送

**中图分类号:**P426.6; P434.4; P942.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3246(2025)04-0229-09

青藏高原的高地形在亚洲气候模式的形成中起关键性作用,其南侧边界平均海拔在5 000 m左右,多年平均水汽通量约为1 500 kg/(m·s),它提供了一个地形屏障,将热带生成的高湿度水汽团和干燥的大陆气团分隔开来<sup>[1]</sup>。与青藏高原内其他区域不同,位于藏东南地区的雅鲁藏布江大峡谷附近海拔低至1 000 m,同时水汽通量也高达7 000 kg/(m·s)<sup>[2]</sup>。所以,雅鲁藏布江河谷是一个印度洋暖湿气流向青藏高原输送的良好通道<sup>[3]</sup>,其地形对于水汽输送十分独特。印度洋季风主要从布拉马特拉河逆流而上,沿雅鲁藏布江流域输送至青藏高原,这也导致了青藏高原东南部的气候和水汽组成与高原北部和西部有较大差异性<sup>[4-5]</sup>。印度洋季风对于青藏高原降水稳定同位素的影响巨大,季风影响区域也没有普遍适用的大气降水线和同位素高程关系<sup>[6-7]</sup>。

降水同位素的高程效应指降水中的 $^{18}\text{O}$ 和 $^2\text{H}$ 随着海拔的逐渐升高而逐渐贫化的现象,是由降水过程中的瑞利分馏导致的<sup>[8]</sup>。在水文循环过程中,大气环流既

是 $\delta(^{18}\text{O})$ (水中稳定氧同位素组成)的载体,又是 $\delta(^{18}\text{O})$ 变化的主体,青藏高原上降水的氢氧同位素和高程梯度是季风与非季风水汽共同作用的结果<sup>[9]</sup>,所以,降水氢氧稳定同位素分析可以有效辅助水汽输送特征的分析,对于整个季风影响区域的降水过程也可以起到一定说明作用。所以,对高原东南边缘沿线的降雨和地表水同位素进行收集、整理,结合水汽来源分析,可以更深入地解释季风水汽通过雅鲁藏布江通道进入这一地形陡升区域后如何输送及输送过程中降水如何形成,有助于研究青藏高原整体的水文循环过程。

章新平等<sup>[10]</sup>对南亚、青藏高原和中亚地区的降水资料进行研究,发现在青藏高原的唐古拉山以北,降水稳定同位素成分随纬度增高而增大;唐古拉山以南,平均稳定同位素比率急剧减小,受季节性水汽影响。Hren等<sup>[3]</sup>收集了青藏高原191个地下水样品,认为青藏高原中部和西南部降水 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(D)$ (水中稳定氢同位素组成)值的变化可能反映了水汽输送路径的地表隆起,或季风运移的变化。Rowley等<sup>[11]</sup>在古海拔

收稿日期:2023-09-19 修回日期:2023-12-30 网络出版日期:2024-03-21

基金项目:四川省地热资源综合利用产教融合示范项目(11100-22Z09-02)

作者简介:王钟毓(1999—),男,硕士生。研究方向:地质资源与地质工程。E-mail:445827075@qq.com

\*通信作者:漆继红,副教授,E-mail:qijihong@cdut.cn

重建的研究中指出:不同来源的水汽有不同的同位素组成、起始温度和相对湿度特征,这些都可能影响到大气降水的高程效应。宋春林等<sup>[12]</sup>利用同位素特征和后向轨迹模型,得到了青藏高原东南缘贡嘎山区的水汽来源组成为西风、东部季风和局地水汽内循环,且降水中氢氧同位素的高程效应和季节效应显著。Yan等<sup>[13]</sup>采集了藏南地区雅鲁藏布江流域季风降水前后的地表、地下水样,发现其沿干流方向 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(\text{D})$ 自西向东逐步增加,总体符合高程效应和大陆效应。李捷等<sup>[14]</sup>通过采集逐次降水样品得出青藏高原东坡的同位素高程梯度,并利用瑞利分馏模型进行了验证,发现小流域的地表水可以代替降水样品进行稳定氢氧同位素分析。

本文利用雅鲁藏布江大峡谷区域内的取样数据和前人在雅鲁藏布江流域东南沿线的取样资料进行研究,基于雅鲁藏布江东南部的的水汽输送条件和特征,计算出当地大气降水线和同位素高程梯度,并运用理论模型进行验证,分析印度洋季风的输入对于大气降水稳定同位素的影响,还结合研究区内的同位素数值和分布特征对季风输入的模式进行总结。

## 1 研究区概况

研究区位于青藏高原东南部的雅鲁藏布江流域下游地区,研究区位置及取样点分布如图 1 所示。该地区气候受喜马拉雅山脉影响严重,海拔 2 700 m 下属亚热带气候带,2 700~4 200 m 属高原温暖半湿润气候,4 200 m 以上属高原冷湿寒湿带,年均温度为 8.5 °C。

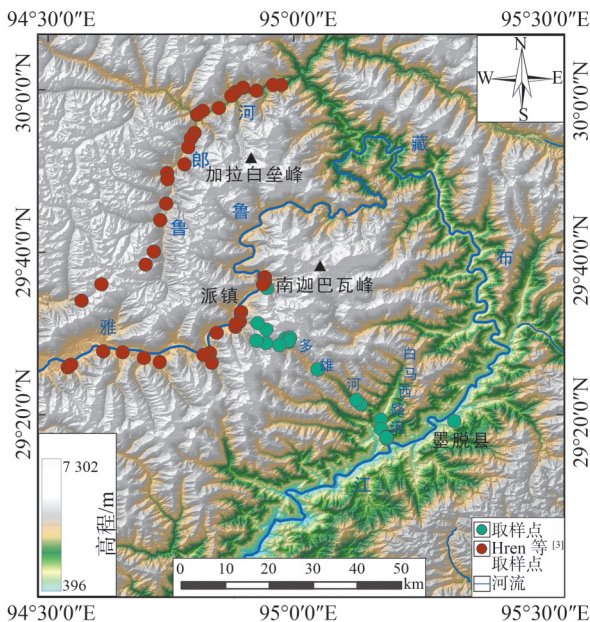


图 1 研究区地理位置及取样点分布

Fig. 1 Geographical location and sampling point distribution map of the research area

从水汽源角度分析,该区位于印度洋季风影响严重的地带,而更偏西的拉萨则属于西风带与印度洋季风交汇的位置。

在夏季,印度洋暖湿气流沿雅鲁藏布江河谷进入青藏高原东南内陆,为研究区和青藏高原带来季节性季风湿气通量<sup>[11]</sup>。青藏高原地区年降水量为 200 mm(高原中西部)至 3 000 mm(雅鲁藏布江下游)不等<sup>[12]</sup>,很大程度上也表明东南亚季风的影响从雅鲁藏布江进入高原后自东至西是逐渐减弱的。

在冬季,西风带气团可以延申至青藏高原中部的拉萨等地,由于多雄拉山的天然阻隔,在仅 20 km 的距离上,南北坡的年降水量差异达到了 1 500 mm。并且,研究区内的大部分降水发生在 6~9 月的雨季<sup>[4, 15]</sup>。

## 2 数据和方法

### 2.1 数据来源

采样时间为 2021 年 7、12 月和 2022 年 5 月,主要在多雄河、白马西路河流域和雅鲁藏布江大拐弯地区对大气降水和地表水进行了采样(图 1),取样后储存在 500 mL 聚乙烯瓶中并用蜡密封直至分析。样品测试由自然资源部岩溶地质资源环境监督检测中心完成,检测仪器为液态水同位素分析仪(L2130-i),同位素结果以样品同位素比率 $R_{\text{sample}}$ 和国际标准 $R_{\text{standard}}$ (V-SMOW,维也纳标准平均海洋水)的相对千分偏差值表示: $\delta=(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}-1)\times 1\,000$ 。同时,本文还取用了来自 Hren 等<sup>[3]</sup>的位于雅鲁藏布江中下游的 75 个水样数据(图 1)。

### 2.2 研究方法

#### 1) 瑞利蒸馏模型

一般情况下,温度随着海拔的升高而降低,温度梯度为每 1 000 m 海拔变化的温度。因此,温度和海拔的关系可以表示为:

$$T = kH + A_0 \quad (1)$$

式中: $T$ 为温度,°C; $k$ 为温度梯度,°C/km; $H$ 为海拔,m, $A_0$ 为海平面温度,°C。

水汽在迎风坡受高地形阻挡而被迫抬升并形成降雨,饱和水汽的蒸汽含量与温度有关,其关系为:

$$W = 0.000\,2T^3 + 0.011\,1T^2 + 0.321T + 4.8 \quad (2)$$

式中, $W$ 为蒸汽含量, $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

根据瑞利分馏模型,在降水轨迹上任何一点的降水同位素组成可以表示为:

$$\delta(^{18}\text{O}) = \delta(^{18}\text{O})_i + \epsilon(^{18}\text{O})_{i-v} \times \ln f \quad (3)$$

式中: $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})_i$ 分别是最终和初始降水的 $\delta(^{18}\text{O})$ 值; $\epsilon(^{18}\text{O})_{i-v}$ 为水汽平衡交换的富集系数,取决于温度; $f$ 为剩余水汽比,即残余水汽含量与初始水汽含量之比。

$\varepsilon(^{18}\text{O})_{\text{L-V}}$ 的计算如下:

$$\varepsilon(^{18}\text{O})_{\text{L-V}} \approx \frac{1.137 \times 10^6}{(T+273.16)^2} - \frac{0.4156 \times 10^3}{T+273.16} - 2.0667 \quad (4)$$

$f$ 的计算如下:

$$f = \frac{W}{W_0} \quad (5)$$

理想瑞利分馏模型<sup>[16]</sup>表达式为:

$$\delta \times 10^{-3} = (\delta_0 \times 10^{-3} + 1) \times f^{\alpha-1} - 1 \quad (6)$$

式中, $\delta$ 和 $\delta_0$ 分别表示凝结水和初始水汽中的稳定同位素组成, $\alpha$ 为降水在冷凝温度时的分馏系数。

2)后向轨迹模型

利用美国国家海洋和大气管理局的大气资源实验室开发的混合单粒子拉格朗日积分轨迹 HYSPLIT

模型分析大气运移的后向轨迹模型,来验证研究区内水汽的来源,并且对水汽输送通道进行聚类,得出研究区内的优势水汽补给通道<sup>[17-18]</sup>。气象数据来源于美国国家环境预报中心(NCEP)提供的GDAS数据(ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1)。

3 数据结果

3.1 研究区稳定同位素和大气降水线

研究区内取得水样所测得的 $\delta(^{18}\text{O})$ 值位于 $-7.07\text{‰} \sim -17.14\text{‰}$ 之间, $\delta(\text{D})$ 值位于 $-48.9\text{‰} \sim -133.00\text{‰}$ 之间。取样点中,大气降水稳定同位素最高值来自白马西路河阿尼桥附近取得的大气降水,最低值来自多雄拉山坡取得的大气降水。具体取样分析结果见表1。

表1 研究区大气降水、地表水氢氧稳定同位素成分

Tab. 1 Stable hydrogen and oxygen isotope composition of atmospheric precipitation and surface water in the study area

编号	纬度	经度	集水区高程/m	$^a\delta(\text{D})/\text{‰}$	$^a\delta(^{18}\text{O})/\text{‰}$	$^b d_E$
S01	29.509 0°N	94.944 2°E	4 160	-95.88	-13.62	13.1
S02	29.522 3°N	94.926 2°E	3 690	-105.13	-14.45	10.5
S03	29.486 1°N	94.924 1°E	3 598	-68.50	-10.47	15.3
S04	29.484 1°N	94.989 3°E	3 444	-88.19	-12.82	14.4
S05	29.285 8°N	95.190 5°E	1 540	-59.57	-9.29	14.8
S06	29.481 5°N	94.943 5°E	3 560	-65.80	-10.40	17.4
S07	29.490 6°N	94.983 7°E	3 817	-133.00	-17.14	4.0
S08	29.325 3°N	95.178 3°E	1 080	-56.60	-7.71	5.0
S09	29.492 3°N	94.992 5°E	3 500	-83.78	-12.63	17.2
S10	29.485 9°N	94.990 6°E	3 440	-87.12	-12.85	15.7
S11	29.593 8°N	94.945 2°E	2 980	-95.60	-13.63	13.4
S12	29.356 7°N	95.137 3°E	1 944	-66.10	-10.17	15.3
S13	29.325 3°N	95.178 3°E	926	-63.40	-9.87	15.6
S14	29.427 2°N	95.049 1°E	2 891	-85.35	-12.42	14.0
S15	29.306 2°N	95.178 5°E	987	-48.90	-7.42	10.4
S16	29.486 2°N	94.923 8°E	3 587	-102.32	-14.45	13.3
S17	29.477 4°N	94.970 7°E	3 546	-99.51	-13.85	11.3
S18	29.427 2°N	95.049 0°E	2 891	-85.63	-12.53	14.6
S19	29.364 6°N	95.128 3°E	2 130	-105.06	-14.55	11.3
S20	29.322 0°N	95.328 5°E	1 106	-50.27	-7.07	6.3
S21	29.289 6°N	95.189 6°E	1 660	-57.35	-8.96	14.3
S22	29.288 6°N	95.189 4°E	1 559	-56.54	-8.90	14.7

注: $^a\delta(\text{D})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 的标准为V-SMOW标准; $^b d_E$ 为水样的氦盈余值, $d_E = \delta(\text{D}) - 8\delta(^{18}\text{O})$ 。

图2为研究区大气降水线图和雅鲁藏布江中游至下游的高程梯度图。图2中,LMWL和GMWL分别表

示当地大气降水线和全球大气降水线。如图2(a)所示,将本研究中取得的样品和Hren等<sup>[3]</sup>样品中的雅鲁

藏布江下游 19 组数据结合,对  $\delta(D)$  和  $\delta(^{18}O)$  进行回归分析,得到当地大气降水线方程为: $\delta(D)=8.02\delta(^{18}O)+13.2$ ,  $R^2=0.96$ ,  $N=41$ 。

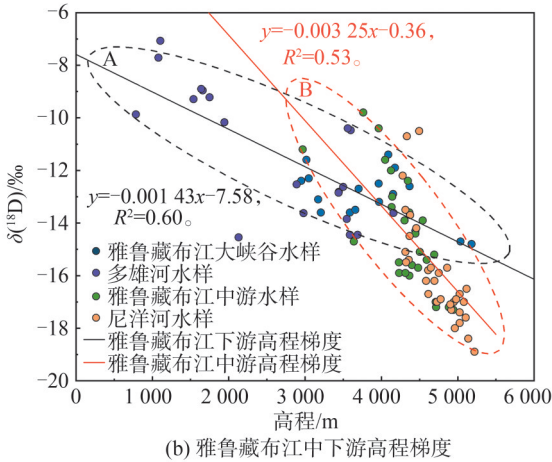
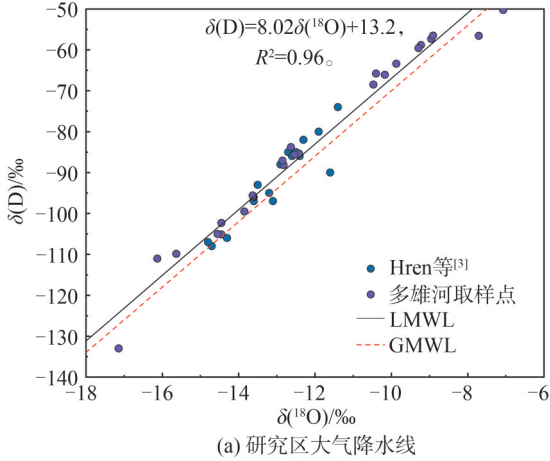


图2 研究区大气降水线和雅鲁藏布江中游至下游高程梯度  
Fig. 2 Atmospheric water fall line map of the study area and elevation gradient map from the middle reaches to the lower reaches of the the Yarlung Zangbo River

### 3.2 $\delta(^{18}O)$ 与高程的关系

研究区在地形方面的差异主要表现为自东向西高程不断抬升,尤其是在藏东南部雅鲁藏布江大峡谷区域。因此,除了气候,海拔也是控制当地降水同位素成分的一个重要因素,随着自东向西海拔的升高,降水的  $\delta(^{18}O)$  值总体呈现逐渐降低的趋势<sup>[19-21]</sup>。基于本次取得的水样  $\delta(^{18}O)$  和集水区高程,将数据分组后分别进行线性拟合,得到雅鲁藏布江大峡谷地区高程梯度为  $-1.43\text{‰}/\text{km}$ , 尼洋河和雅鲁藏布江中游地区高程梯度为  $-3.25\text{‰}/\text{km}$ 。

表1中集水区高程的计算基准点为S20,该点为在墨脱县采集的大气降水。如图2(b)所示,雅鲁藏布江的中游和下游水体所收集的水样氢氧同位素特征有明显差异,整体按趋势可以划分为:位于雅鲁藏布江下游的A类(包括多雄河水样和雅鲁藏布江大峡谷水

样)和位于雅鲁藏布江中游的B类(包括雅鲁藏布江中游和尼洋河水样)。

A类水样所分布的地区高程落差很大,在10 km的距离上高程由3000 m(多雄拉山)降低至900 m(白马西路河),但该地所计算出的高程梯度明显小于藏南(尼洋河、雅鲁藏布江中游)的地势平缓地区。这也与已有文献所得研究结果类似:雅鲁藏布江下游的氢氧稳定同位素高程梯度低至  $-1.5\text{‰}/\text{km}$ <sup>[22-23]</sup>、 $-1.9\text{‰}/\text{km}$ <sup>[24]</sup>;该水平低于雅鲁藏布江中游  $-3.0\text{‰}/\text{km} \sim -2.3\text{‰}/\text{km}$  的高程梯度<sup>[9,25]</sup>。

## 4 讨论

### 4.1 稳定同位素高程梯度计算和检验

假设在海拔1000 m的高度下初始降水遵循图2中确定的  $\delta(^{18}O)$ -高程关系,其初始值为  $-9.15\text{‰}$ 。对于给定的  $A_0$  和  $k$  值,可以通过式(1)~(5)计算出对应的高程梯度值,并得到一系列高程梯度值与  $A_0$  和  $k$  的关系,如图3所示。

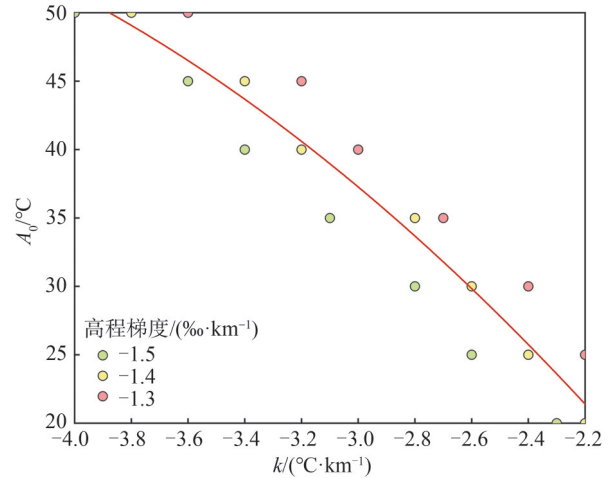


图3 瑞丽分馏模型验证高程梯度

Fig. 3 Rayleigh fractionation model validation for elevation gradients

如图3所示,同位素高程梯度在给定  $k$  时随着  $A_0$  的增加而减小,在给定  $A_0$  时随着  $k$  的增加而减小。

用瑞利分馏模型<sup>[23]</sup>来模拟并验证同位素高程梯度。在模型中,由蒸汽冷凝形成的降水从系统中完全去除。当地的凝结温度用多雄河和白马西路河流域地表的露点温度(平均为  $18\text{°C}$ )代替,凝结温度从墨脱县(海拔1000 m)的  $14.6\text{°C}$  下降至多雄拉山(海拔3500 m)的  $6.1\text{°C}$ 。输入参数水汽设置为  $-18.7\text{‰}$ 。这种模式输出的第一次降水  $\delta(^{18}O)$  值为  $-9.15\text{‰}$ ,这与利用实际数据拟合的高程梯度线计算出的  $\delta(^{18}O)$  值接近。

将同位素分馏分为6个阶段,每次从系统中凝结出10%的水汽。随着冷凝温度从  $14.6\text{°C}$  下降到  $6.1\text{°C}$ ,

模拟的 $\delta(^{18}\text{O})$ 值逐渐从 $-9.15\text{‰}$ 下降到 $-13.91\text{‰}$ 。本模型最终得到的高程梯度为 $-1.9\text{‰}/\text{km}$ ,比第3.2节中的数据处理结果较大,但总体来说比较相似,造成实际高程梯度小的原因可能是印度洋水汽在经过青藏高原时,由于海拔陡升造成了气候变化,从而造成了实际与理想模型在一定程度上的不吻合(见附录A表A1、图A1)。

## 4.2 雅鲁藏布江中下游氡盈余特征

### 4.2.1 氡盈余数值特征

由图2可知,研究区大气降水方程的截距明显高于全球大气降水线,水体所显示出的整体氡盈余在13%左右。研究区所处地理位置特殊,主要受南边来自孟加拉湾的东南季风影响,其水汽主要来源与国际原子能机构在布拉马特拉河流域设置的两个站点 Satkhira 和 Shilong (<https://www.iaea.org>) 相同,因此,与之进行对比。两个站点加权平均降雨样本的 $\delta(^{18}\text{O})$ 、 $\delta(\text{D})$ 分别为: $\delta(\text{D})=7.94\delta(^{18}\text{O})+10.06$ ,  $R^2=0.99$ ,  $N=48$  和  $\delta(\text{D})=8.02\delta(^{18}\text{O})+11.9$ ,  $R^2=0.98$ ,  $N=30$ ,所显示出的氡盈余在10%左右,接近全球大气降水线。研究区的水汽主要来源与两个站点相同,当地大气降水线理应接近下游两个站点。但实际上,研究区大气降水线所显示出的氡盈余却高出 Satkhira 站和 Shilong 站3%左右。

理论上,降水中的氡盈余值与降水过程中发生的动力学分馏有关<sup>[26]</sup>。有几个自然过程控制降水中的氡盈余,其中最重要的是空气的相对湿度和温度,在干燥和低温的气候条件下,动力学影响变得更强,并在随后的降水中产生高氡盈余值,反之亦然。

综上所述,研究区的氡盈余值偏高的情况原因如下:1)虽然该地水汽基本来自印度洋的海源补给,但水汽进入青藏高原后遭遇地形的陡然抬升造成了气温和相对湿度在此处骤然下降(从 $30\text{℃}$ 下降到 $10\text{℃}$ ),总体上要比下游布拉马特拉河流域的温度低;2)青藏高原的总体相对湿度只有50%左右(如拉萨),雅鲁藏布江下游的相对湿度本应该接近拉萨等地,但实际相对湿度却可高达80%~90%,是由沿布拉马特拉河逆流而上的印度洋暖湿气流造成的;3)研究区的蒸发量较大,气团运输过程中发生的局部蒸汽再循环作用也会导致区域水体有较大的氡盈余。

所以,高截距现象在这种与高原接壤的地区被解释为低相对湿度下的二次蒸发或局部水循环的结果。局部水分循环将导致同位素的非平衡分馏,并且使 $\delta(\text{D})/\delta(^{18}\text{O}) > 8$ <sup>[1,27]</sup>。研究区靠近印度地区冰雪水样的氡盈余很低,而某些降雨和小溪流水样的氡盈余很高也可以证明该观点<sup>[28]</sup>。

### 4.2.2 氡盈余分布特征

研究区样品的氡盈余分布如图4所示。由图4可知:氡盈余( $d_E$ )位于4%~17%之间;与雅鲁藏布江中游和尼洋河水样数据进行对比可以发现,在此地区靠西的位置氡盈余较小,靠东的位置氡盈余较大,由西至东氡盈余展现出上升的趋势;同时,在雅鲁藏布江大拐弯地区采集的水样也表现出明显的氡盈余差异,表明区域内地表水受局部水循环的影响。

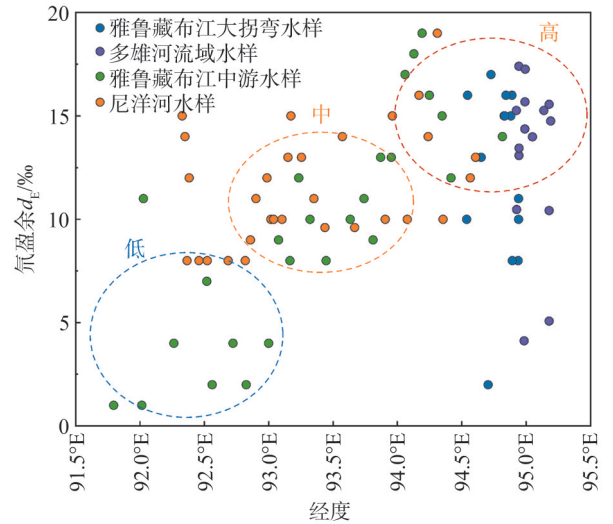


图4 研究区整体氡盈余值分布

Fig. 4 Characteristics of  $d_E$  values in the study area

目前 ArcGIS 软件中常用的空间插值方法主要有克里金法和反距离加权(IDW)插值法。其中,反距离加权插值属于确定性插值方法,适用于已经确定插值点大致变化趋势的情况,如印度洋季风向青藏高原的输送路径。所以本文利用 ArcGIS10.8 软件中的反距离加权插值方法得出研究区氡盈余的空间分布,如图5所示。

总体上,研究区的水体氡盈余在空间上的分布与上文中发现的规律相似,可以分为3个阶段:

1)输入阶段:刚输入雅鲁藏布江大峡谷的印度洋季风是海源补给,所含氡盈余较低,接近全球平均水平( $d_E=10\text{‰}$ )。

2)滞留阶段:季风绕雅鲁藏布江大峡谷东移,水体中整体的氡盈余较高,在12%~20%之间,原因为地形的陡升造成的温度、湿度变化和当地的局部水循环等影响,但总体来看,该地的主要水汽来源是南部输入的印度洋暖湿气流。

3)输出阶段:在季风穿过雅鲁藏布江大峡谷,继续向西输入青藏高原的过程中,逐步与西风带来源的水汽进行混合,导致氡盈余沿着雅鲁藏布江河谷逐步降低。

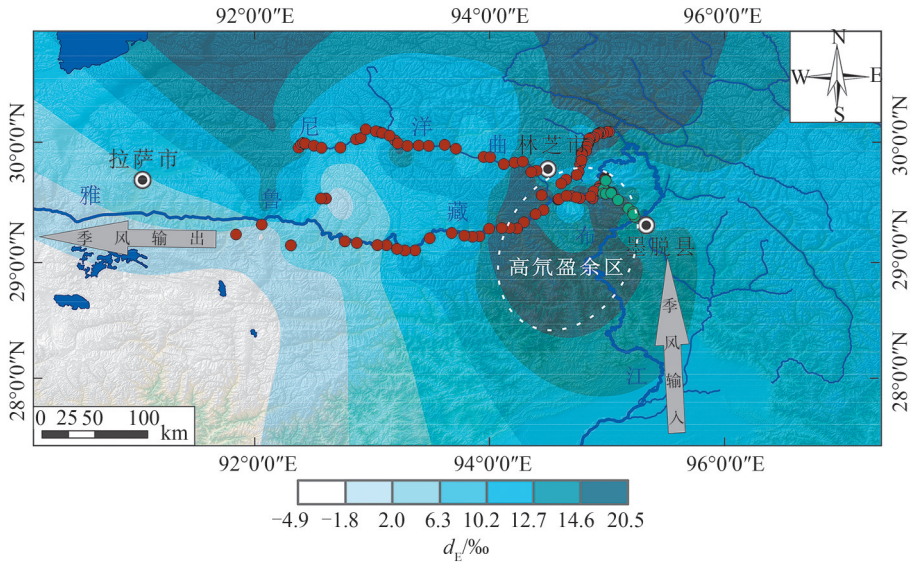


图5 研究区氘盈余分布

Fig. 5 Distribution of  $d_E$  in the study area

4.3 藏南谷地的水汽来源分析

基于第 4.1 与 4.2 节中藏南地区降水同位素高程梯度及氘盈余的显著空间分异特征,本研究证实该区域东西两侧的降水稳定同位素组成存在一定差异,因此判断其水汽来源并不相同。雅鲁藏布江大峡谷的墨

脱等地属于孟加拉湾气候型,偏西的拉萨属于青藏高原南部气候型<sup>[8]</sup>。由于青藏高原的全年降水分布极不均衡,主要的降水集中在雨季(6~9月),故采用 6~9 月的 GDAS 数据进行 48 h 后向轨迹模拟,所得水汽输送通道聚类分析结果见表 2。

表 2 2020—2022 年雨季青藏高原水汽输送通道聚类分析

Tab. 2 Cluster analysis of water vapor transport channels in the Qinghai-Xizang Plateau during the rainy season from 2020 to 2022

地点	时间	路径来源方向	占比/%	大致输送距离/km	
拉萨	2020 年 6~9 月	南路	78	100	
		西北路	9	600	
		东北路	14	200	
	2021 年 6~9 月	南路	59	150	
		西北路 1	5	600	
		西北路 2	10	300	
		西路	26	5	
	2022 年 6~9 月	南路	60	100	
		东路	21	30	
		东南路	3	200	
	林芝	2020 年 6~9 月	西南路	11	150
			北路	5	150
2021 年 6~9 月		西北路	8	300	
		东南路	93	100	
		西北路 1	3	600	
		西北路 2	9	200	
2022 年 6~9 月		东南路	89	50	
		东南路	64	100	
墨脱		2020 年 6~9 月	东路	37	50
			西北路	4	600
		2021 年 6~9 月	南路	96	10
			东南路	69	100
	2022 年 6~9 月	南路	31	150	
		东南路	99	100	
		东路	1	100	

如表2所示,青藏高原东南部拉萨、林芝、墨脱3站的大气后向轨迹聚类分析表明,区域水汽输送存在显著的经向分异:随着自西向东推进(拉萨→林芝→墨脱),来自东南路和南路的水汽占比逐渐降低,由95%以上降至78%,而源自西北路和东路的水汽占比逐渐升高,总占比可达20%以上。这种现象可被解释为源自西风带的远距离水汽贡献比例呈系统性增强趋势,而东南亚季风区的水汽输入占比则逐渐降低。这与氡盈余展现出的自西向东的显著递增趋势一致,揭示了水汽来源的转变过程。

## 5 结论

本文收集了雅鲁藏布江中下游地区的降雨样品数据,通过氢氧稳定同位素分析建立了当地的大气降水线和同位素高程梯度。研究区大气降水线方程为: $\delta(D)=8.02\delta(^{18}O)+13.21$ 。雅鲁藏布江大峡谷地区的氡盈余显著高于季风输入和输出地区,同时氡盈余自西向东呈现缓慢增大趋势,显示出大峡谷地区具有显著的蒸汽再循环特征。雅鲁藏布江大峡谷地区高程梯度为 $-1.43\%/km$ ,而中游的高程梯度为 $3.30\%/km$ 。造成高程梯度相差巨大的原因是地形坡度差异和季风的控制。

结合后向轨迹模型,大气降水稳定同位素的分布与印度洋季风进入青藏高原的过程有较大的关联,从墨脱到拉萨的水汽构成逐渐复杂。这说明水汽来源显著影响了大气降水同位素组成,并且其运移的规律与大气降水同位素的分布特征相一致。

附录见本刊网络版,扫描标题旁的二维码可阅读网络全文。

### 参考文献:

- [1] Qiang Xu, Hoke G D, Jing Liuzeng, et al. Stable isotopes of surface water across the Longmenshan margin of the eastern Tibetan Plateau[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15(8): 3416–3429.
- [2] Li Linjing. Study on water vapor transport and precipitation characteristics in the Yarlung Zangbo River basin[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. [李琳静. 雅鲁藏布江流域水汽输送及降水特征研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.]
- [3] Hren M T, Bookhagen B, Blisniuk P M, et al.  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$  of streamwaters across the Himalaya and Tibetan Plateau: Implications for moisture sources and paleoelevation reconstructions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288(1/2): 20–32.
- [4] Li Hu, Pan Xiaoduo. Review of research methods on water vapor transport processes and source regions in the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2022, 37: 1025–1036. [李虎, 潘小多. 青藏高原水汽输送过程及水汽源地研究方法综述[J]. *地球科学进展*, 2022, 37: 1025–1036]
- [5] Liu Zhao. Study on hydrochemical and isotopic characteristics of natural water in the Lhasa–Nyingchi reach of the Yarlung Zangbo River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. [刘昭. 雅鲁藏布江拉萨—林芝段天然水水化学及同位素特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.]
- [6] Quade J, Breecker D O, Daeron M, et al. The paleoaltimetry of Tibet: An isotopic perspective[J]. *American Journal of Science*, 2011, 311(2): 77–115.
- [7] Yao Tandong, Masson–Delmotte V, Gao Jing, et al. A review of climatic controls on  $\delta^{18}O$  in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations[J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(4): 525–548.
- [8] Siegenthaler U, Oeschger H. Correlation of  $^{18}O$  in precipitation with temperature and altitude[J]. *Nature*, 1980, 285(5763): 314–317.
- [9] Yao Tandong, Zhou Xing, Yang Xiaoxin. Influence of Indian monsoon moisture on the  $\delta^{18}O$  altitude effect in precipitation and river water across the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54: 2124–2130. [姚檀栋, 周行, 杨晓新. 印度季风水汽对青藏高原降水和河水中  $\delta^{18}O$  高程递减率的影响[J]. *科学通报*, 2009, 54: 2124–2130]
- [10] Zhang Xinping, Zhang Xinping, Yao Tandong, et al. Temporal and spatial variation of stable isotope composition in precipitation in Qinghai–Tibet Plateau and its adjacent areas[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2001, 31(5): 353–361. [章新平, 中尾正义, 姚檀栋, 等. 青藏高原及其毗邻地区降水中稳定同位素成分的时空变化[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2001, 31(5): 353–361.]
- [11] Rowley D B, Garzione C N. Stable isotope-based paleoaltimetry[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2007, 35: 463–508.
- [12] Song Chunlin, Sun Xiangyang, Wang Genxu. Characteristics of stable isotopes in precipitation and water vapor sources in the subalpine zone of Gongga Mountain[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24: 1860–1869. [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]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24: 1860–1869.]
- [13] Yan Yani, Zhang Junwen, Zhang Wei, et al. Spatiotemporal variation of hydrogen and oxygen stable isotopes in the Yarlung Tsangpo River Basin, southern Tibetan Plateau[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 757094.
- [14] Li Jie, Pang Zhonghe. Isotope altitude gradient of precipi-

- tation on the eastern slope of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 52(11): 2193–2205. [李捷, 庞忠和. 青藏高原东坡降水的同位素高程梯度[J]. *中国科学:地球科学*, 2022, 52(11): 2193–2205.]
- [15] Li Weijie, Wang Jianli, Wang Jialu. Characteristics of stable isotopes in precipitation under different topographies in Southwest China and their water vapor sources[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27: 1132–1142. [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: 1132–1142]
- [16] Wang Yongsen, Ma Zhenmin, Xu Zhenghe. Slope of evaporation lines in a model based on Rayleigh fractionation formula[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(6): 795–800. [王永森, 马振民, 徐征和. 基于瑞利分馏模式的水体蒸发线斜率模型[J]. *水科学进展*, 2011, 22(6): 795–800.]
- [17] Song Yang, Wang Shengjie, Zhang Mingjun, et al. Stable isotopes of precipitation in the Eastern Tarim River Basin and water vapor sources[J]. *Environmental Science*, 2022, 43: 199–209. [宋洋, 王圣杰, 张明军, 等. 塔里木河东部流域降水稳定同位素特征及水汽来源研究[J]. *环境科学*, 2022, 43: 199–209.]
- [18] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(8): 938–939.
- [19] Rozanski K, Araguás – Araguás L, Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation[M]. Swart P K, Lohmann K C, Mckenzie J, Savin S. *Climate change in continental isotopic records*. Washington: the American Geophysical Union, 1993: 1–36
- [20] Gat J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1996, 24: 225–262.
- [21] Liu Jiaju, Guo Huaicheng. Spatiotemporal variation characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in the Yarlung Tsangpo River water[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41: 5194–5200. [刘佳驹, 郭怀成. 雅鲁藏布江河水氢氧同位素时空变化特征[J]. *中国环境科学*, 2021, 41: 5194–5200]
- [22] Quade J, Garzione C, Eiler J. Paleoelevation reconstruction using pedogenic carbonates[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2007, 66(1): 53–87.
- [23] Bershaw J, Penny S M, Garzione C N. Stable isotopes of modern water across the Himalaya and eastern Tibetan Plateau: Implications for estimates of paleoelevation and paleoclimate[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D2): 2011JD016132.
- [24] Hoke G D, Jing L, Hren M T, et al. Stable isotopes reveal high southeast Tibetan Plateau margin since the Paleogene[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 394: 270–278.
- [25] Garzione C N, Quade J, Decelles P G, et al. Predicting paleoelevation of Tibet and the Himalaya from  $\delta^{18}\text{O}$  vs. altitude gradients in meteoric water across the Nepal Himalaya[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 183(1/2): 215–229.
- [26] Jouzel J, Froehlich K, Schotterer U. Deuterium and oxygen-18 in present-day precipitation: Data and modelling[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1997, 42(5): 747–763.
- [27] Tian Lide, Yao Tandong, Numaguti A, et al. Stable isotope fluctuation and water vapor transport process in monsoon precipitation in southern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2001, 31(Supp1): 215–220. [田立德, 姚檀栋, Numaguti A, 等. 青藏高原南部季风降水中稳定同位素波动与水汽输送过程[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2001, 31(增刊1): 215–220.]
- [28] Song Hongwei, Meng Yuchuan, Jiang Fangting, et al. Isotopic characteristics and implications of surface water and groundwater in the middle reaches of the Yarlung Tsangpo River[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35: 122–128. [宋泓苇, 孟玉川, 蒋芳婷, 等. 雅鲁藏布江中游地区地表水、地下水同位素特征及其指示作用[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35: 122–128.]

## Monsoon Forcing on Precipitation Stable Isotopes in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon: Evidence from Indian Summer Monsoon Dynamics

WANG Zhongyu<sup>1</sup>, QI Jihong<sup>1\*</sup>, XU Mo<sup>1</sup>, LI Xiao<sup>2</sup>, YI Lei<sup>1</sup>, LIANG Jingyan<sup>1</sup>, TAN Yao<sup>1</sup>

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610051, China;

2. Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu 610200, China)

### Abstract:

**Objective** The lower reaches of the Yarlung Tsangpo River, characterized by a significant topographical gradient, play a crucial role in transporting moisture from the Indian Ocean through the Indian monsoon to the Tibetan Plateau. This study investigates isotopic altitudinal effects on atmospheric precipitation and the distribution characteristics of d-excess in this region. It compares the isotopic altitudinal gradients of atmospheric precipitation in the midstream and downstream regions of the Yarlung Tsangpo River to clarify the factors contributing to discernible differences. The study explores the complex dynamics of the Indian Ocean monsoon airflow as it traverses and circulates within this geographical expanse by

carefully examining these disparities. This expanded investigation proves pivotal for advancing comprehension of the nuanced interactions between topography and meteorological phenomena, shedding light on the complex mechanisms influencing isotopic variations in precipitation and refining insights into broader climatic processes in the studied area.

**Methods** The data source for this study included atmospheric precipitation and surface water samples collected through field surveys. The Karst Geological Resources and Environment Supervision and Testing Center of the Ministry of Land and Resources conducted sample testing using a liquid water isotope analyzer (L2130-i). Isotope results were expressed as the relative thousandth deviation value of the same isotope ratio  $R_{\text{sample}}$  and the international standard  $R_{\text{standard}}$  (V-SMOW, Vienna standard average ocean water):  $\delta = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1\ 000$ . The primary research methodology employed in this study involved the simulation of isotopic altitudinal gradients using the Rayleigh distillation model. This model operated under the assumption of an idealized open system in which condensed rainwater promptly exited the atmospheric system, leading to variations in the stable isotopic content of hydrogen and oxygen in precipitation at different altitudes. The study aimed to capture the complex processes that contributed to observed isotopic differences in precipitation at various elevations utilizing the Rayleigh distillation model. This approach provided a theoretical framework for understanding the dynamics of isotopic fractionation in rainfall within the context of altitude, facilitating a comprehensive analysis of atmospheric conditions in the studied region. Building upon this theoretical framework, the study involved inputting actual isotopic initial values within the research area and simulating the altitudinal effects of precipitation isotopes under ideal conditions. The simulation assumed that for every 1 000 meters of elevation gain, 10% of the precipitation condensed, allowing for the verification of actual altitudinal gradient values within the study area. In addition, the backward trajectory model employed the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model. This Lagrangian trajectory model analyzed atmospheric transport, providing insights into the composition of water vapor sources within the research area. The model served as a complementary tool to support the understanding of the transport processes of the Indian Ocean monsoon within the study area, enriching the interpretation of the complex dynamics that influenced isotopic variations in precipitation at different altitudes.

**Results and Discussions** The stable hydrogen and oxygen isotope analysis enabled the establishment of a local atmospheric precipitation line and isotopic altitudinal gradient. The equation representing the atmospheric precipitation line in the research area is  $\delta(D) = 8.02\delta(^{18}\text{O}) + 13.21$ . The elevated d-excess in this region is attributed to the abrupt ascent of moist air encountering the topography upon entering the Tibetan Plateau, leading to a sudden decrease in temperature and relative humidity. Another contributing factor is the local vapor recycling within the large canyon, which contributes to the observed high d-excess. These findings provide valuable insights into the factors that influence isotopic variations in precipitation in the study area, highlighting the complex interplay between atmospheric dynamics and geographical features. Interpolation analysis was employed to discern the distribution pattern of d-excess in atmospheric precipitation within the study area. The findings revealed a distinctive low-high-low pattern of d-excess across the research region, with elevated d-excess observed in the Himalayan eastern tectonic zone. This geographical area exhibited a high d-excess, indicating unique atmospheric processes and moisture sources that contributed to the isotopic composition in this specific locale. Identifying such spatial variations in d-excess enhanced the understanding of regional atmospheric dynamics and the complex factors influencing isotopic characteristics in precipitation. Through regression analysis and validation using an ideal model, the altitudinal gradient in the Yarlung Tsangpo River Grand Canyon region was determined to be  $-1.43\%/km$ , while in the midstream, the altitudinal gradient was found to be  $3.30\%/km$ . The primary drivers for this disparity were attributed to variations in topographical slopes and the influence of monsoons. The distinct altitudinal gradients were validated by the composition of airflow sources across different locations in the backward trajectory model. This analysis highlighted the significance of both topography and monsoonal patterns in shaping the isotopic characteristics of precipitation, providing valuable insights into the regional atmospheric dynamics within the Yarlung Tsangpo River basin.

**Conclusions** Through an examination of atmospheric precipitation isotopes in the Yarlung Tsangpo River Grand Canyon region, this study establishes the atmospheric precipitation line and the isotopic altitudinal gradient within the area. Compared to the midstream, the altitudinal gradient in this region is relatively modest and closely linked to variations in topography and water vapor composition. In addition, the research highlights the retention of Indian Ocean moisture within the Yarlung Tsangpo Grand Canyon region following its ingress into the Tibetan Plateau.

**Key words:** the Yarlung Tsangpo River Grand Canyon; atmospheric precipitation; hydrogen and oxygen stable isotopes; d-excess; water vapor transportation

(编辑 陈雪)

引用格式: Wang Zhongyu, Qi Jihong, Xu Mo, et al. Monsoon forcing on precipitation stable isotopes in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon: evidence from Indian summer monsoon dynamics[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(4): 229–237. [王钟毓, 漆继红, 许模, 等. 雅鲁藏布江大峡谷降水稳定同位素对印度洋季风的响应[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(4): 229–237.]