

**Identification of Different Moisture Sources through Isotopic Monitoring during a Storm Event**JIE LI,\* TAO TAO,<sup>†,‡</sup> ZHONGHE PANG,\* MING TAN,<sup>#</sup> YANLONG KONG,\*  
WUHUI DUAN,<sup>#</sup> AND YUWEI ZHANG<sup>®</sup><sup>\*</sup> Key Laboratory of Shale Gas and Geoengineering, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China<sup>†</sup> Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, China<sup>‡</sup> Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China<sup>®</sup> Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland, College Park, College Park, Maryland

(Manuscript received 7 January 2015, in final form 17 March 2015)

DOI: 10.1175/JHM-D-15-0005.1

编者按:

极端降雨易造成地质灾害、城市内涝及农田积涝,严重危害人民健康财产安全。河南省突发暴雨事件更是敲响对关注极端天气预警的警钟。本次解读“利用水同位素方法对北京市(2012年7月21日)60年一遇特大暴雨进行水汽溯源”的科研论文,以求为认识极端暴雨形成过程以及气象灾害预警的相关研究提供帮助。在此,我们诚挚地希望灾情早日结束,河南人民回归幸福生活!

**1. 前言:**

在一般或极端降雨事件中,将降水与其特定来源相联系的研究十分少见。普遍使用的大气环流模型方法,对时间空间分辨率和所使用的参数化方案的有效性过于敏感,且无法估计不同气团对降水的相对贡献。以前的研究集中于,使用风型计算的轨迹来检验和量化产生降水的气团路径,但计算轨迹所使用的标准未曾统一。因此,有必要开发其他独立的方法来验证基于模型的结果。

许多研究中已经使用降水中的同位素作为示踪剂,来探测水汽来源和气团输送途径。特别是短时间间隔的同位素测量,更能反映时间动态变化下水汽来源。但对于利用同位素方法细致识别和量化不同来源的气团仍然存在研究壁垒。

本研究针对2012年7月21日的北京市特大暴雨过程中,通过“Rayleigh分馏模型”及同位素混合模型,对两个不同气团的同位素值进行了计算。结合附近全球降水同位素网络(GNIP)站点的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征,识别出降雨初期的西南轨迹和后期的东南轨迹的混合轨迹,以及两者合并时的过渡性降雨。本研究的结果与气象学研究结果相符合,表明使用同位素混合模型确定不同气团对降水的相对贡献,相比于以前的气象轨迹方法更加可靠。本研究结果对同位素水文和同位素气候学-气候变化研究具有广泛的意义。

**2. 研究方法****2.1 采样点描述及采样方法**

选择位于北京市西南部,距离市中心西南偏南约40公里的石花洞(39.788N, 115.938E)进行样品采集(图1)。选取太原和天津两个相邻的GNIP站点,分别代表西南和东南地区降水的同位素特征。在18h降雨量为399.8mm期间收集雨水,用以代表强降雨时间。

采样间隔由10min~2h不等(初期收集频率更高),共收集30个样本。迅速承装于棕色瓶中充分填充以避免蒸发。而后样品被运送到实验室并在4°C冷藏后进行分析。

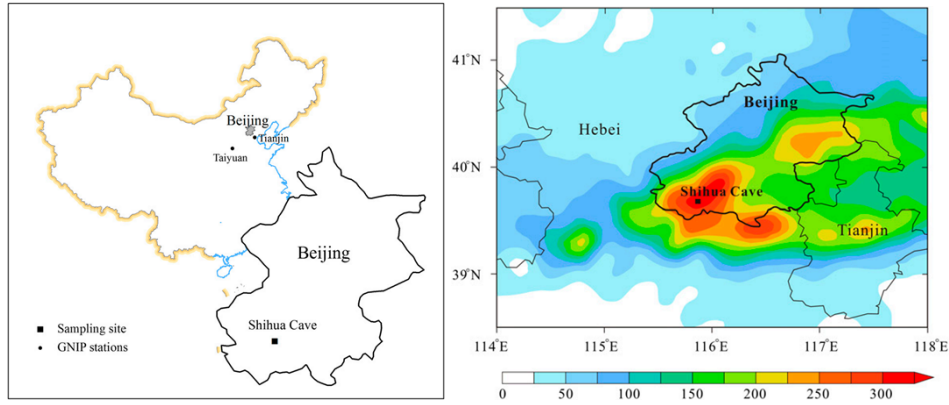


图 1. 采样点位置及 2012 年 7 月 22 日 24 小时累积雨量(毫米)

## 2.2 数据测定与分析方法

总降水量及气温数据由 RG3-M 数据雨量计自动记录。

采用中国科学院青藏高原研究所水同位素光谱仪对降水的稳定同位素进行分析。

使用美国国家海洋和大气管理局大气资源实验室开发的“混合单粒子拉格朗日综合轨迹模(HYSPLIT)”，推断研究区域的水汽轨迹。发现在到达采样点前 24h 的水汽模型如图 2 所示。模型显示，0400 时间水汽主要来自西南方向，1600 时间主要来自东南方向。

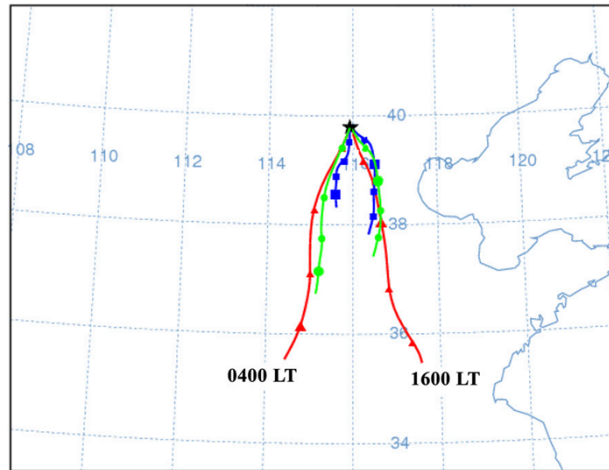


图 2. HYSPLIT 模型中，7 月 21 日凌晨 0400 和 1600 的水汽轨迹（颜色为不同的高度）

## 3. 结果与讨论

### 3.1 降雨过程中 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化特征

如表 1 和图 3 所示， $^{18}\text{O}$  的稳定同位素值的组成随时间发生了明显变化，将降雨划分为 4 个阶段：

阶段 1:  $\delta^{18}\text{O}$  值呈现下降趋势，与温度的下降趋势一致；

阶段 2: 受新气团的影响， $\delta^{18}\text{O}$  值轻微上升，持续 2.5h，温度维持不变后降雨量减少；

阶段 3:  $\delta^{18}\text{O}$  值呈现下降趋势，初始最快下降量达到 8‰；

阶段 4:  $\delta^{18}\text{O}$  值保持稳定，呈现轻微的波动。

表 1 北京降雨过程中同位素的观测数据

TABLE 2. Isotopic data observed in the Beijing rainfall.

Time and date	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta\text{D}$ (‰)	Deuterium excess (‰)
0935-0955 LT 21 Jul 2012	-6.8	-52.7	2.0
0955-1015 LT 21 Jul 2012	-6.9	-51.9	3.4
1015-1035 LT 21 Jul 2012	-6.6	-48.5	4.3
1035-1050 LT 21 Jul 2012	-7.7	-55.7	6.0
1050-1100 LT 21 Jul 2012	-8.0	-58.2	5.9
1100-1110 LT 21 Jul 2012	-7.4	-53.2	5.6
1123-1150 LT 21 Jul 2012	-7.6	-54.2	6.5
1150-1200 LT 21 Jul 2012	-8.6	-60.2	8.9
1200-1210 LT 21 Jul 2012	-8.7	-62.3	7.4
1210-1220 LT 21 Jul 2012	-9.6	-66.8	9.6
1220-1230 LT 21 Jul 2012	-9.8	-69.2	9.1
1230-1240 LT 21 Jul 2012	-10.1	-70.4	10.4
1240-1250 LT 21 Jul 2012	-9.9	-69.1	10.4
1250-1300 LT 21 Jul 2012	-9.7	-67.3	10.7
1300-1310 LT 21 Jul 2012	-9.4	-65.1	10.2
1310-1320 LT 21 Jul 2012	-9.8	-66.0	12.0
1320-1330 LT 21 Jul 2012	-9.3	-65.5	9.0
1330-1350 LT 21 Jul 2012	-9.0	-63.4	8.7
1350-1420 LT 21 Jul 2012	-9.1	-62.5	10.2
1420-1500 LT 21 Jul 2012	-8.9	-60.4	10.9
1500-1530 LT 21 Jul 2012	-8.7	-59.2	10.6
1530-1630 LT 21 Jul 2012	-9.4	-65.4	10.0
1630-1800 LT 21 Jul 2012	-10.2	-72.4	9.0
1800-1900 LT 21 Jul 2012	-14.4	-105.0	10.5
1900-2000 LT 21 Jul 2012	-16.9	-125.5	9.8
2000-2100 LT 21 Jul 2012	-16.2	-124.2	5.6
2100-2200 LT 21 Jul 2012	-16.6	-124.1	8.4
2200-2300 LT 21 Jul 2012	-16.8	-125.3	9.3
2300-2400 LT 21 Jul 2012	-16.9	-125.6	9.4
0000-0200 LT 22 Jul 2012	-16.6	-125.4	7.5

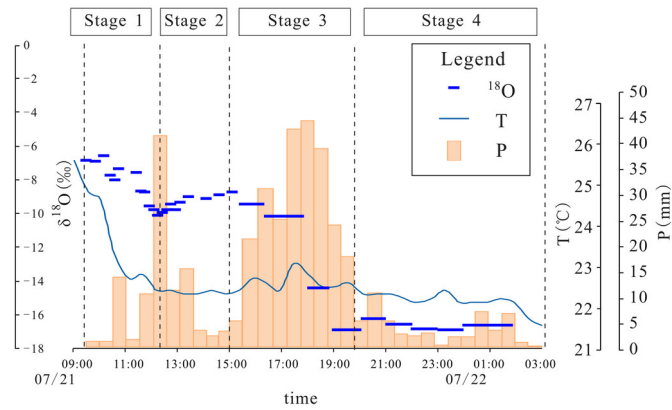


图3. 2012年7.21降雨期间雨水样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化代表了降雨的三个过程：1) 单一水汽来源(过程1)；2) 混合水汽来源(过程2)；3) 强降雨影响下的混合水汽来源(过程3和4)。

### 3.2 大气水线

本次降雨过程中，雨水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 $\delta^2\text{H}$ 值呈现显著的线性关系( $r^2=0.99$ )，斜率与截距均与中国当地的大气水线相似(图4)，表明暴雨在降雨过程和结束之后不会产生明显的动力学效应。

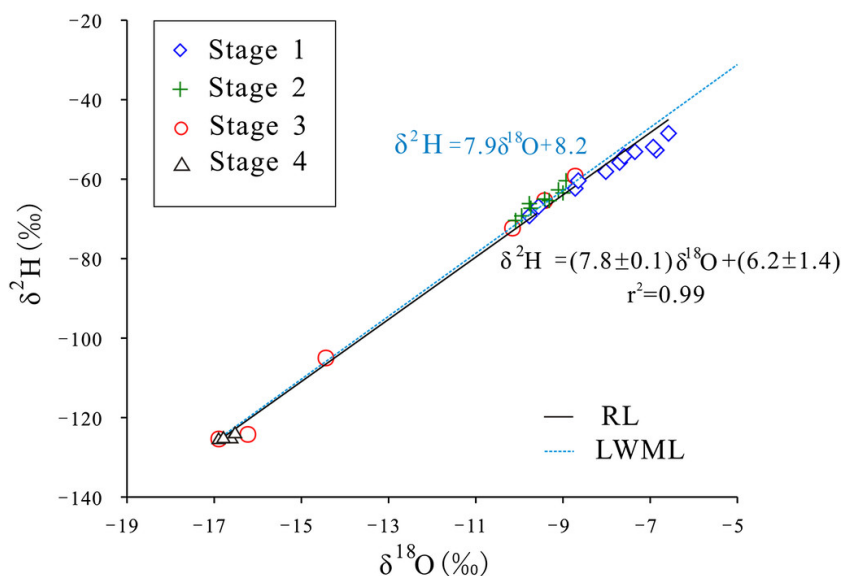


图4 2012年7.21降雨期间雨水样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 $\delta^2\text{H}$ 值的相关性。

### 3.3 降雨中的同位素模拟

当气团从其来源地区迁移到特定地区上空时，会冷却并以降水的形式损失水汽，即“雨洗效应”（rainout）。利用“Rayleigh分馏模型”来描述雨水中重同位素组分的渐进演化，如图5所示。图5a表明，在阶段1、3、4的降雨过程中， $\delta^{18}\text{O}$ 值和残留水汽分数（ $f$ ）的相关关系较为显著，表明“雨洗效应”是降雨过程中 $\delta^{18}\text{O}$ 削减的主要原因。不同方法计算得到的残留水汽分数也表明，雨洗效应是阶段1、3、4降雨过程中 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化的主要原因。

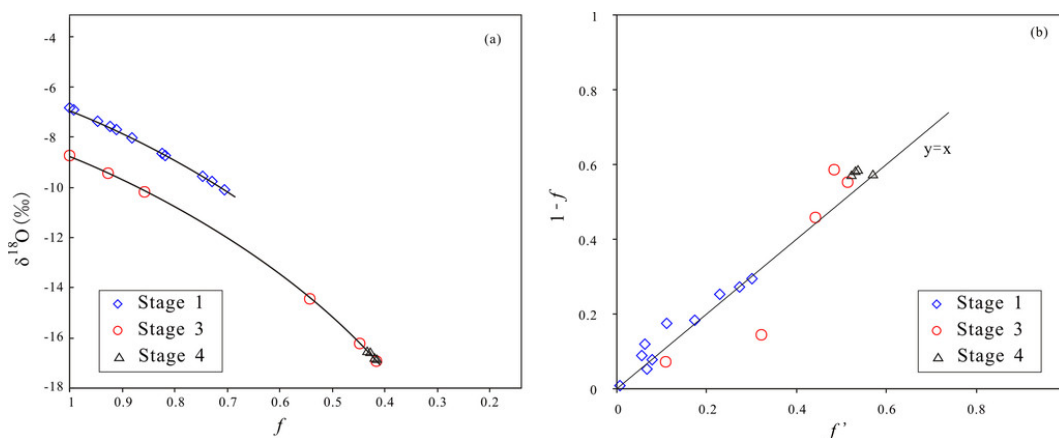


图5 (a) 在 $22.8^\circ\text{C}$ 的平均温度下，基于Rayleigh分馏模型的雨水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化；(b) 用不同方法计算得到的雨水 $f$ 值的比较。

### 3.4 水汽轨迹

雨水中的同位素测量值明确了两个气团来源，同时用邻近的天津和太原站点的雨水同位素特征值分别代表东南方向和西南方向的气团轨迹。氘盈余（ $d$ ， $d = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$ ）通常被用来识别水汽来源的。该研究中，氘盈余的结果同样为雨水的来源提供了证据（图6）。此外，Rayleigh分馏模型的结果也表明，在降雨不同阶段，水汽的来源发生了明显变化（表2）。

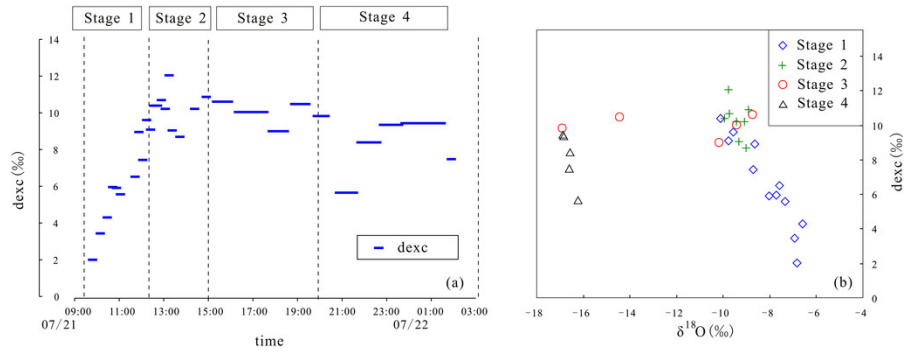


图 6 氡盈余随时间变化 (a) 以及和雨水中 $\delta^{18}O$  的关系 (b)。

表 2 基于同位素分馏模型的两来源的水汽对降雨事件的贡献率。

	Rainfall amount		
	Total (mm)	From southwest trajectory (%)	From southeast trajectory (%)
Stage 1	75.4	100	0
Stage 2	28.0	—	—
Stages 3 and 4	296.4	~0-35	~65-100

#### 4. 主要结论

1. 雨水同位素监测和模拟可以用于揭示不同来源的气团对降雨事件的相对贡献率。
2. Rayleigh 分馏模型可以重建雨水中 $\delta^{18}O$  同位素的组成，从而识别潜在来源。
3. 利用基于同位素质量平衡的混合模型，确定了降雨事件的两个湿气来源；结合氡盈余的证据，可以确定不同来源的气团对降雨过程中不同阶段的贡献。

论文链接: [https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/16/4/jhm-d-15-0005\\_1.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/16/4/jhm-d-15-0005_1.xml)