

# 西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源

柳鉴容<sup>1,2</sup>, 宋献方<sup>1</sup>, 袁国富<sup>3</sup>, 孙晓敏<sup>3</sup>, 刘鑫<sup>1,2</sup>, 陈锋<sup>2,4</sup>, 王志民<sup>1</sup>, 王仕琴<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. 中国生态系统研究网络水分分中心, 北京 100101;

4. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 根据 2005 年各月在中国大气降水同位素观测网 (CHNIP) 位于西北地区的阜康、策勒、临泽、海北、沙坡头、长武和安塞观测站点收集的降水样品, 对其中的同位素的组分进行测定, 分析了西北地区大气降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的时空分布特征。所建立的局地大气降水线方程  $\delta\text{D} = 7.058\delta^{18}\text{O} - 2.17$ , 反应了西北地区独特的局地气候特点。降水  $\delta^{18}\text{O}$  的温度效应显著, 而降水量效应只在夏季 (6-8 月) 间存在。 $\delta^{18}\text{O}$  的空间分布特征可以很好地反映西北地区的大气环流背景。应用瑞利分馏模型及动力分馏模型对阜康—安塞沿线降水  $\delta^{18}\text{O}$  的定量模拟结果, 揭示了西北地区降水水汽的分馏主要以动力分馏为主, 雨滴在降落过程中历经了一定的二次蒸发过程, 其降水水汽中也混入一定量的由局地再蒸发的水汽。此外, 利用西北地区在全球大气降水同位素观测网络 (GNIP) 中的乌鲁木齐、和田、张掖、兰州、银川和西安 6 个站点的长时间序列的  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量、温度等气候因子建立的多元线性回归关系可以对降水  $\delta^{18}\text{O}$  进行定量估算; 基于乌鲁木齐站点 12 年的  $\delta^{18}\text{O}$  资料对该地区的温度拟合, 为历史气候的定量恢复提供了依据。

**关键词:** 西北地区;  $\delta^{18}\text{O}$ ; 大气降水; 水汽来源

环境同位素作为水体中的重要组成部分, 尽管其含量很小, 但它们却在非常敏感地响应环境的变化, 并记载着水循环的整个历史信息。这是因为环境同位素的分馏作用——即同位素以不同的比率分配到两种物质或物相中的现象普遍存在于水循环的每一个环节中。在水循环过程中, 水汽既作为载体, 又作为相变的主体, 其中同位素的含量必然会发生变化<sup>[1-4]</sup>。因此, 我们可以将水体中的环境同位素作为水汽来源及运动路径的自然示踪剂, 进而利用其变化规律来反演天气系统及大气环流过程。要将环境同位素这一工具应用于地下水/地表水相互转化关系、地下水补给等研究中, 最重要的前提就是要深入地了解大气降水同位素的组成, 因为大气降水是水资源的主要输入因子<sup>[5]</sup>。

我国的西北地区位于亚欧大陆的腹地, 青藏高原的北部及东北部, 地形条件十分复杂。冬季, 这里盛行干冷的西北气流, 降水很少。夏季, 来自印度洋的西南海洋气流, 由于青藏高原阻隔, 很难到达西北地区; 而来自西太平洋的东南暖湿气流, 又由于西太平洋副高的强度和位置的不同, 到达西北地区在年度和季节上的变化也十分明显<sup>[6-11]</sup>, 因此就造成了西北地区以干旱为主的气候特征。

以往关于西北地区降水水汽来源的许多研究成果是基于地面观测的气象资料得到的<sup>[12-14]</sup>。此外, 在我国南部地区的研究表明, 降水中的环境同位素信息可以很好地示踪和

收稿日期: 2007-08-28; 修订日期: 2007-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40671034); 中国科学院资源环境领域野外台站研究基金项目“中国生态系统研究网络大气降水环境同位素研究项目” [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40671034; Foundation for Environment Field Stations Research of CAS, Program for Isotopes in Precipitation of Chinese Ecosystem Research Network]

作者简介: 柳鉴容 (1982-), 女, 辽宁沈阳人, 中国地理学会会员, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水循环。

E-mail: liujr.05s@igsrr.ac.cn

反演夏季季风降水的主要水汽通道<sup>[15]</sup>。因此，对蕴涵在西北地区大气降水中的环境同位素组成进行分析，掌握其时空分布规律，将有助于深刻明晰干旱区的水循环特征。

## 1 方法与数据

### 1.1 大气降水同位素的观测

选取基于中国生态系统研究网络 CERN (Chinese Ecosystem Research Network) 各野外台站建立的中国大气降水同位素观测网络 CHNIP (Chinese Network of Isotopes in Precipitation)<sup>[16]</sup>中位于西北地区并主要致力于干旱区资源、环境及生态方面研究的阜康、策勒、临泽、海北、沙坡头、安塞和长武 7 个站点(图 1)，在 2005 年进行月大气降水样品的采集。样品的采集方法，对于降雨，在每个观测站点放置一个聚乙烯的瓶子，在瓶口处加装漏斗，并在漏斗口放置一个乒乓球，防止蒸发；降雪样品采用大的铁桶收集，降雪结束后，在室温下将雪融化。样品转移到 50 ml 塑料瓶，密封后送至中国科学院地理科学与资源研究所的环境同位素分析实验室，采用环境同位素质谱仪 Finnigan MAT253，TC/EA 法测定  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的含量。测量精度对于  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  分别为  $\pm 1\%$  和  $\pm 0.3\%$ 。测量结果，以相对于维也纳标准平均海水 (VSOMW) 的千分差表示为如下形式：

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

式中，R 为  $^2\text{H}/^1\text{H}$  或是  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 。

### 1.2 气象数据

月降水量、地表温度及相对湿度数据由各站点进行同步观测，观测数据由 CERN 综合中心进行汇总。长时间序列的气象数据由中国气象局国家气象信息中心提供。水汽通量值的计算应用美国 NOAA-CIRES 气候中心  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  的 NCEP/NCAR 再分析数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 大气降水线

1961 年，Craig 把发现的在全球范围内收集到的降水样品中  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  存在的线性规律用数学式表示为： $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ ，这就是全球大气降水线 GMWL (Global Meteoric Water Line)。GMWL 为各局地大气降水同位素的组成提供了基准，也为推断地下水的来源提供了参照<sup>[17]</sup>。由于局地环流系统中水汽来源及蒸发模式的不同，各局地大气降水线 LMWL 通常偏离 GMWL。

2005 年，由在西北地区观测到的月大气降水中  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  构成的局地大气降水线 LMWL(图 2a)为：

$$\delta\text{D}(\text{‰}) = 7.05\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) - 2.17 \quad (2)$$

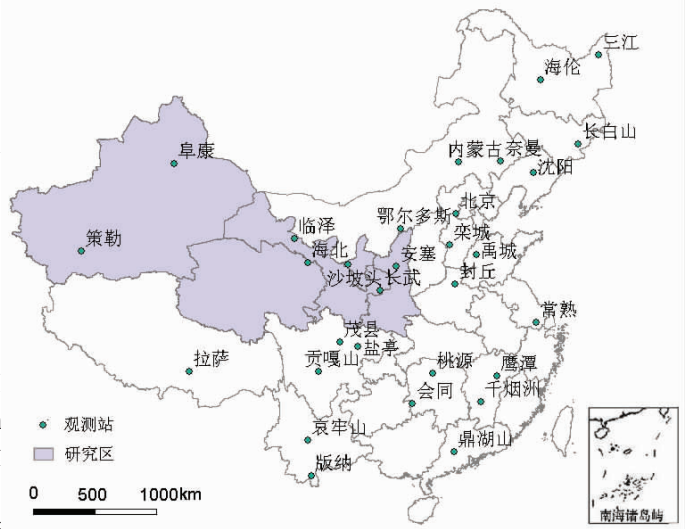


图 1 中国大气降水同位素观测站点分布

Fig. 1 Distributions of CHNIP (Chinese Network of Isotopes in Precipitation) stations

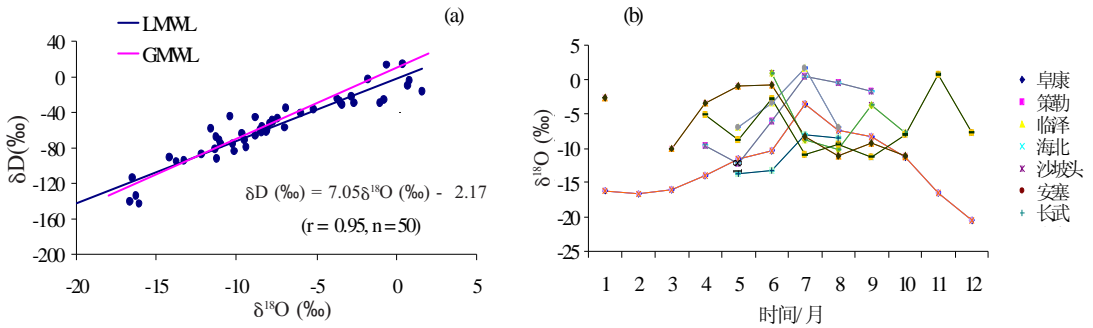


图 2 西北地区局地大气降水水线方程 (a) 及各站点  $\delta^{18}\text{O}$  的时间分布 (b)

Fig. 2 Local Meteoric Water Line of Northwest China and  $\delta^{18}\text{O}$  variations throughout the observation period

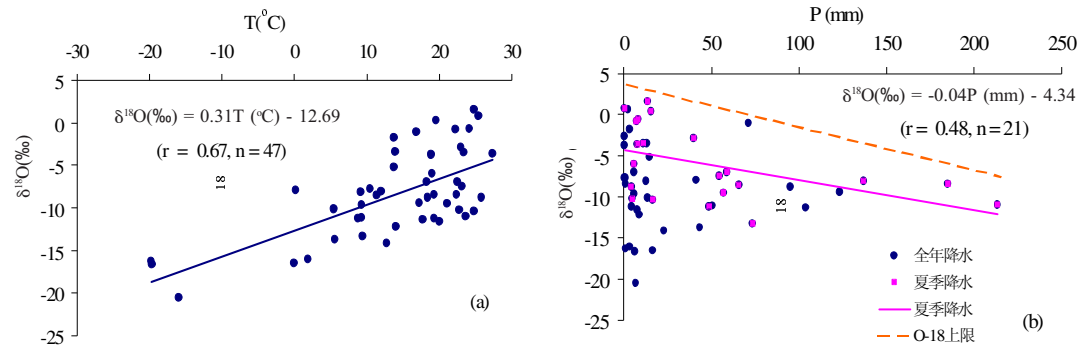


图 3  $\delta^{18}\text{O}$  的温度效应 (a) 和降水量效应 (b)

Fig. 3 Temperature effect and precipitation amount effect of  $\delta^{18}\text{O}$

式中，斜率和截距均低于全球大气降水的平均组成 8 和 10，表明西北地区的降水过程受到了二次蒸发的影响。低的斜率在干旱区是十分普遍的，主要是雨滴在云底相对干燥的大气发生部分分馏的结果<sup>[3]</sup>。

### 2.2 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的时空变化

由于大气降水中的  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  存在如上的线性关系，以下的讨论，主要以  $\delta^{18}\text{O}$  为主。

在整个观测期内，各站点  $\delta^{18}\text{O}$  值的变化范围较大 (-20.57‰~1.6‰)。总体表现为，1-7 月不断富集，8-12 月逐渐贫化。最大值出现夏季，最小值在冬季 (图 2b)。 $\delta^{18}\text{O}$  值的波动是西北地区典型大陆性气候年周期的变化规律的反映。

位于西北地区的 7 个观测站点，纬度 (35.2°~44.3°N) 差异不大，海拔基本在 1000 m 左右 (除阜康 460 m，海北 3280 m 外)。因此，在讨论各站点的  $\delta^{18}\text{O}$  的空间变化时，将经度、纬度和高程综合进行考虑，进行多元线性回归。得到：

$$\delta^{18}\text{O} = -0.16\text{Lon} - 0.67\text{Lat} - 0.0005\text{Alt} + 34.38 \quad (R^2 = 0.52) \quad (3)$$

式中，Lon 为经度 (°E)，Lat 为纬度 (°N)，Alt 为高程 (m)， $\delta^{18}\text{O}$  对三者的偏相关系数分别为 -0.34，-0.37 和 -0.03。相比，纬度的影响较大，高程的变化对  $\delta^{18}\text{O}$  几乎没有影响。

### 2.3 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的温度和降水量效应

通常，将大气降水中同位素的组分与各环境要素之间的相关关系称为环境同位素效应。温度效应，指温度与同位素的正相关关系。在各个环境同位素效应中，温度效应尤其重要，这是因为环境同位素的分馏作用主要受制于相变过程中的温度。西北地区降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的温度效应十分显著： $\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.31T(\text{°C}) - 12.69$ ，随着温度的升高， $\delta^{18}\text{O}$  逐渐富集 (图 3a)。

西北地区降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  并没有随着降水量的增大而显著贫化, 说明在全年尺度上不存在降水量效应。这一现象符合经典同位素理论中降水量效应在内陆区通常不显著, 而主要发生在中低纬度海岸和海岛地区, 它的产生与强烈的对流现象相联系<sup>[8]</sup>。但是, 在西北地区, 随着降水强度的增大,  $\delta^{18}\text{O}$  的上限值是有下降的(图 3b 虚线所示)。若只考虑夏季的降水,  $\delta^{18}\text{O}$  存在降水量效应:  $\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = -0.04P(\text{mm}) - 4.34$ 。这也验证了在干旱/半干旱地区, 尽管年尺度上,  $\delta^{18}\text{O}$  的降水量效应不显著, 但夏季的降水量效应是不能忽视的<sup>[19]</sup>。 $\delta^{18}\text{O}$ -P 的关系约为  $-0.04\text{‰}/\text{mm}$ 。

### 3 讨论

#### 3.1 西北地区降水水汽来源分析

大气降水是西北地区水循环的主要输入因子。借助环境同位素手段对降水水汽的来源、分布及输送规律的研究, 将有利于深刻明晰区域水循环特征。按照常规气象上对季节的划分方法, 将 3-5 月划分为春季, 6-8 月划分为夏季, 9-11 月划分为秋季, 12、1-2 月划分为冬季。

**3.1.1 冬季降水  $\delta^{18}\text{O}$  反映的水汽来源及运动路径** 冬季,  $\delta^{18}\text{O}$  空间分布主要有二个特点:

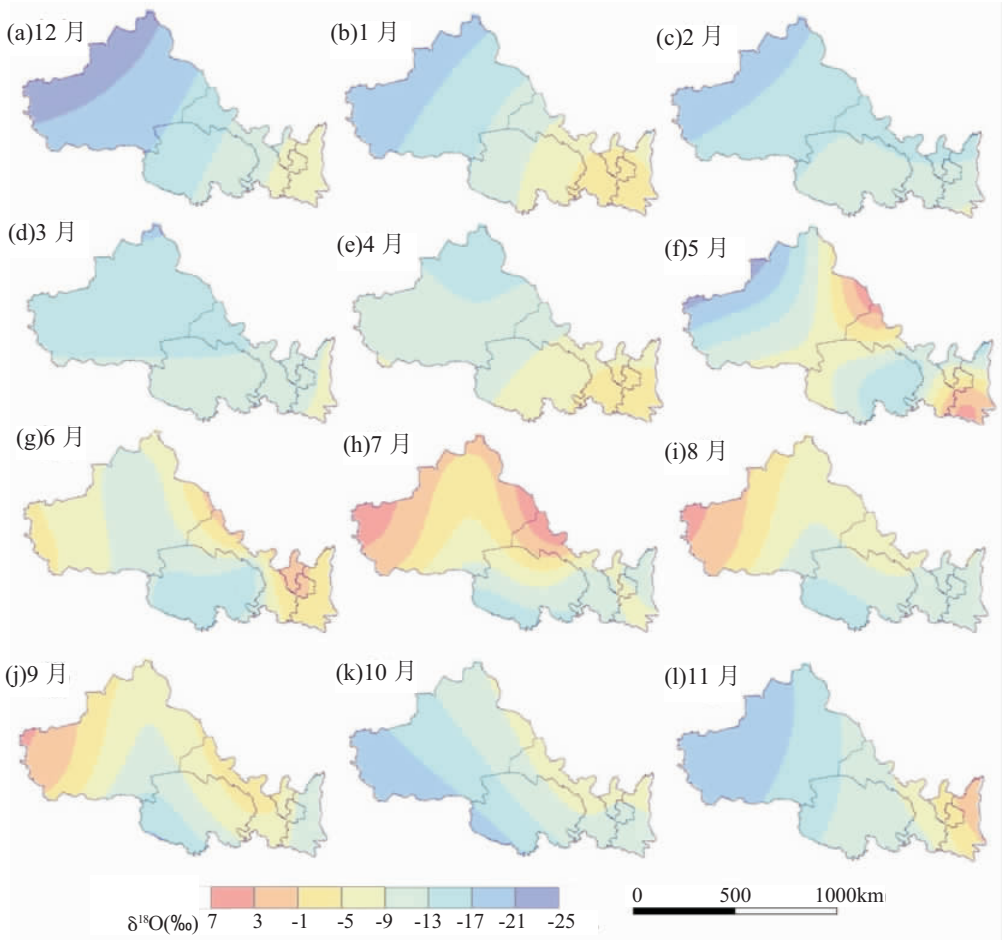


图 4 西北地区 2005 年各月降水  $\delta^{18}\text{O}$  的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of monthly  $\delta^{18}\text{O}$  in Northwest China, 2005

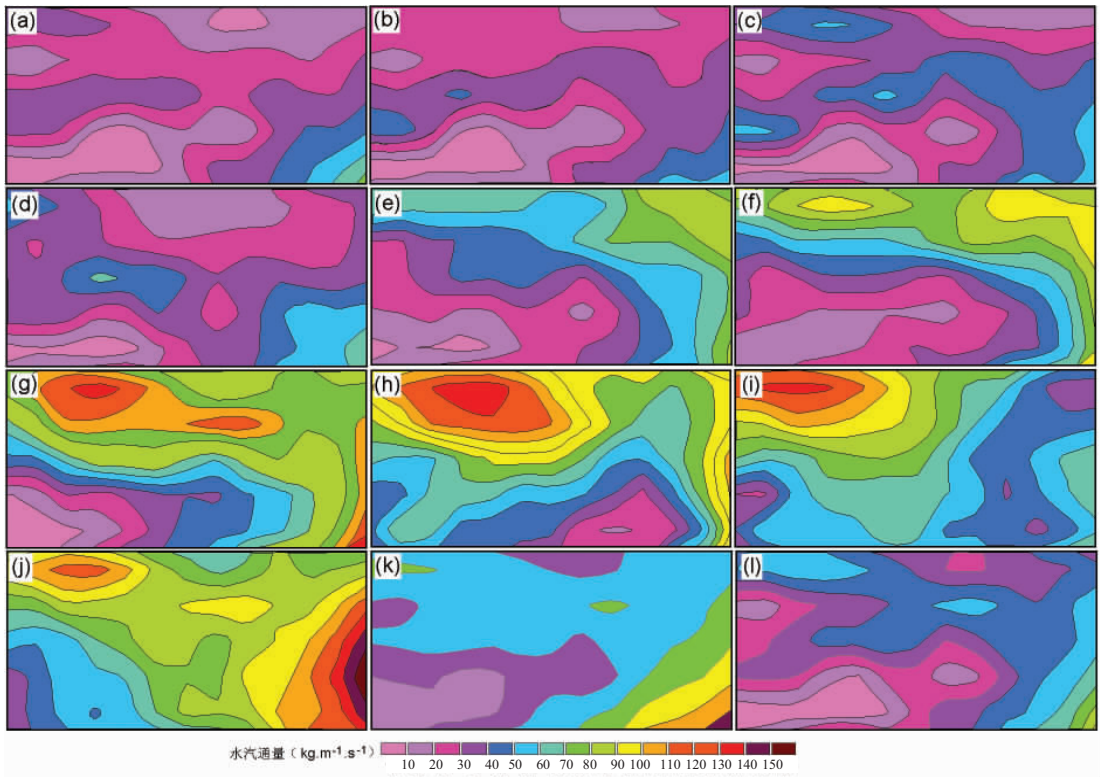


图5 西北地区(80°~110°E, 33.5°~46.5°N) 2005年各月地面~200hPa整层积分水汽通量分布  
Fig. 5 Distributions of monthly water vapour flux (integral through the whole layers from surface to 200 hPa)

不明显(图4g-i)。研究指出<sup>[25, 26]</sup>, 该期间内, 为西北地区带来降水的水汽通道主要有三支: 沿41°~48°N之间的西风带纬向输入的西北水汽通道; 低纬的来自孟加拉湾以东北—西南走向的S型自南边界经向输入, 翻越青藏高原, 沿四川盆地北侧到达西北地区的南亚季风水汽通道; 及源自西太平洋, 经我国东南部的东亚季风水汽通道(图5g-i)。δ<sup>18</sup>O的空间分布指示了以上三条水汽通道。

处于西风通道上的δ<sup>18</sup>O逐渐贫化, 说明这部分的降水在凝结过程中主要是瑞利分馏, 即雨滴一经形成立即从云底分离出来。而在南亚、东亚季风通道上逐渐升高的δ<sup>18</sup>O, 说明降水的凝结可能存在着动力学分馏过程或混入了一定量的局地再循环的水汽。

此外, 夏季降水δ<sup>18</sup>O整体偏高, 这也与通常情况下, 在全球范围的内陆高温干旱区在干季降水中的同位素数值普遍富集结果相一致<sup>[27, 28]</sup>。

**3.1.4 秋季降水δ<sup>18</sup>O反映的水汽来源及运动路径** 9月, δ<sup>18</sup>O的空间分布与6-8月类似(图4j), 说明西北地区仍保持着夏季的环流模式(图5j)。10-11月, 随着东亚季风及南亚季风的全面撤退, 来自于西伯利亚和蒙古的西北方向的水汽输送又逐渐成为西北地区冬季降水的主要来源(图5k, l), 因此, 又呈现出与冬季较为相近的δ<sup>18</sup>O空间分布特征(图4k, l)。

### 3.2 应用瑞利分馏模型模拟降水δ<sup>18</sup>O

瑞利分馏是指水汽由液相中蒸发出来后, 立即从系统中分离出去。然而, 随着蒸发率的增大, 水汽将会产生动力或非平衡同位素效应。动力分馏的影响因素有表面温度、湿度、风速(与水表面相切)、盐度等, 其中最重要的是湿度。当湿度较低时, 水汽交换减小, 蒸发逐渐变为一种非平衡过程<sup>[29-31]</sup>。西北地区蒸发强烈, 并且湿度较低, 尤其在夏季时期, 更为明显。因此, 对该地区大气降水δ<sup>18</sup>O进行定量模拟时, 需要同时考虑瑞利

分馏与动力分馏：

$$\delta^{18}\text{O}_k = \delta^{18}\text{O}_b + \Delta\varepsilon^{18}\text{O}_k \tag{4}$$

其中， $\delta^{18}\text{O}_b$  为平衡分馏时的  $\delta^{18}\text{O}$  值，即，剩余水的比率为  $f$  时的同位素比值，剩余水汽的比率通过 NCEP/NCAR 月平均的再分析数据进行计算； $\Delta\varepsilon^{18}\text{O}_k$  为由动力学分馏产生的  $\delta^{18}\text{O}$  富集 / 贫化量。

根据上面的分析，在全年内，西风通道输送的水汽是西北地区降水的主要来源之一。因此，选取在这条水汽路径上的阜康站点的  $\delta^{18}\text{O}$  值，作为水汽运动的初始值，定量模拟 4 个季节 (冬季用 12 月代表，春季用 4 月代表，夏季用 7 月代表，秋季用 10 月代表)，当水汽向东运动到安塞站点时，分别经过平衡分馏得到的  $\delta^{18}\text{O}_b$  和动力学分馏得到的  $\delta^{18}\text{O}_k$  (图 6)。

从模拟结果来看，动力分馏得到的  $\delta^{18}\text{O}$  值更接近于观测值，说明，西北地区大气降水在凝结过程中，以动力学分馏为主。这也验证了上面分析得到的结果。同时，如果雨滴穿过地表以上干空气柱降落，有一些雨滴就会蒸发，使降水  $\delta^{18}\text{O}$  值沿着斜率小于 8 的蒸发线而偏离大气降水线<sup>[32]</sup>。西北地区在春季和秋季，通常空气湿度相对较小。因此，实际观测到的  $\delta^{18}\text{O}$  值低于动力分馏模拟的  $\delta^{18}\text{O}$  值，也说明了雨滴在下降过程中可能历经了二次蒸发过程。

在湿度较低的地区，降水形成的地表水经再蒸发后产生的水汽团，其同位素组成将位于 LMWL 以上。如果这种水汽与较大的对流层混合前，达到一定的量并发生了再次冷凝，则产生的降水也位于 LMWL 之上<sup>[33]</sup>。那么，实际观测到的  $\delta^{18}\text{O}$  值若高于动力分馏模拟的  $\delta^{18}\text{O}$  值，则说明降水的水汽可能混入了局地再蒸发的水汽。如西北地区的冬季和夏季在临泽站点、沙坡头站点上，实测的  $\delta^{18}\text{O}$  值高于模拟值可能是混入了局地再蒸发的水汽。

### 3.3 长时间序列下大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 对气候因子的响应

以上讨论了 2005 年内，西北地区各月降水  $\delta^{18}\text{O}$  的空间分布特征及水汽来源。为了研

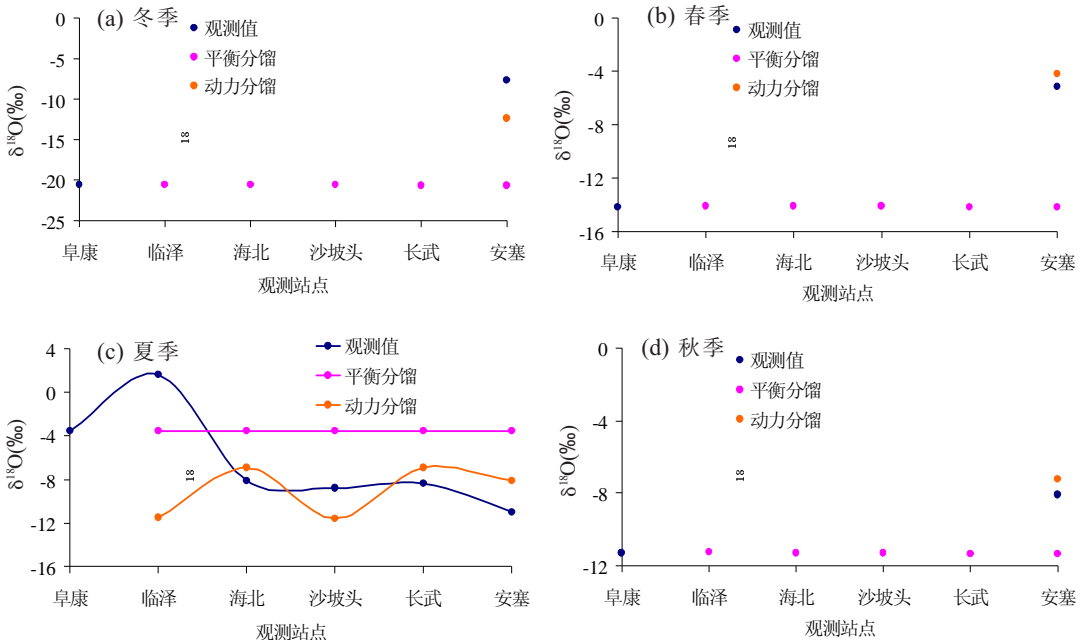


图 6 阜康—安塞不同季节沿途  $\delta^{18}\text{O}$  的平衡分馏与动力分馏的定量模拟

Fig. 6 Quantitative simulation of equilibrium and kinetic fractionation of  $\delta^{18}\text{O}$  from Fukang station to Ansai station

究更长时间序列下,西北地区降水同位素对区域气候因子的响应,选取全球大气降水同位素观测网络 GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation) 中,位于我国西北地区的站点。1961年,国际原子能机构 IAEA 与世界气象组织 WMO 联合发起了 GNIP 计划。这项计划的主要目的是通过在全球范围内,系统地收集降水中环境同位素的组成数据,分析其时空变化,明确全球及各局地大气环流模式及水循环机制,最终将这一工具应用到水文学的研究中。我国进入 GNIP 的时间较晚,1980s 中期才逐渐参与其中。本文选用乌鲁木齐、和田、张掖、兰州、银川和西安 6 个站点进行分析(图 7)。

**3.3.1 降水  $\delta^{18}\text{O}$  与地面气象要素的多元回归关系** 降水  $\delta^{18}\text{O}$  的变化是各气候因子共同作用的结果。这里,应用多元线性回归来描述这种响应关系。收集上述 GNIP 西北站点地面同步观测的各气候参数,建立回归关系(表 1):

这里,  $V_p$  是地面气压 (hPa),  $T$  是地表温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\text{RH}$  是相对湿度 (%),  $P$  是降水量 (mm),  $\text{WS}$  是风速 (m/s),  $\text{DS}$  是日照时数 (h)。从建立的回归关系来看,降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  对气候因子有很好的响应关系,并且随着观测序列的增长,  $\delta^{18}\text{O}$  的拟合精度也有增高的趋势。以乌鲁木齐为例,将  $\delta^{18}\text{O}$  的观测值与拟合值进行比较,除极值点的拟合稍差外,其余点的拟合精度还是很高的(图 8a)。说明利用长时间序列建立的回归关系,可实现  $\delta^{18}\text{O}$  进行定量的插补与估算。

**3.3.2 利用降水  $\delta^{18}\text{O}$  对温度的定量恢复** 在历史环境的研究中,长时间序列的降水同位素组成与地表温度变化的联系最受关注。这是因为,要利用蕴涵在沉积物(如冰芯、岩芯、树木年轮等)中的环境同位素记录对过去环境变化进行定量恢复,最重要的前提就是深入了解降水同位素信息与温度的变化关系<sup>[34]</sup>。

利用具有最长时间序列资料的乌鲁木齐站点为例,利用降水  $\delta^{18}\text{O}$  与地表温度,建立二者关系如下:

$$\delta^{18}\text{O}(\%) = 0.43T(^{\circ}\text{C}) - 15.62 \quad (R^2 = 0.78) \quad (5)$$

根据上面的关系,可以利用测得的  $\delta^{18}\text{O}$  数据,初步的对现代温度进行拟合。除对极端温度的拟合效果较差,其它温度上的拟合程度还是相当好的(图 8b)。当然,这只是应用 12 年的降水  $\delta^{18}\text{O}$  与温度数据建立的关系进行的拟合,用更长时间序列数据建立的关系的精确度将更高,结果也将有助于地区气候的定量反演。

## 4 结论

通过对中国大气降水同位素观测网络 (CHNIP) 及全球大气降水同位素观测网络 (GNIP) 中西北地区站点的月大气降水同位素信息分析,主要得到以下结论:

(1) 应用 2005 年观测的 50 组氢氧同位素组分建立的西北地区局地大气降水线方程 (LMWL)  $\delta\text{D} = 7.05\delta^{18}\text{O} - 2.17$ , 反映了西北地区独特的局地气候特点。 $\delta^{18}\text{O}$  值夏季富集、冬季贫化的特征,体现了西北地区典型大陆性气候年周期的变化规律;

(2) 降水  $\delta^{18}\text{O}$  的温度效应及



图 7 西北地区位于全球大气降水同位素观测网络中的站点  
Fig. 7 Distributions of northwestern stations in Global Network of Isotopes in Precipitation

表 1 西北地区各站点降水  $\delta^{18}\text{O}$  与气象要素的多元回归关系Tab. 1 Multiple linear regressions between  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and meteorological parameters in northwestern stations

	多元回归方程	$R^2$ 值	n
乌鲁木齐	$\delta^{18}\text{O} = 0.14Vp + 0.50T + 0.07RH - 0.03P + 0.89WS + 0.01DS - 151.71$	0.76	119
和田	$\delta^{18}\text{O} = 0.24Vp + 0.74T + 0.20RH - 0.08P + 1.03WS + 0.03DS - 246.42$	0.76	47
张掖	$\delta^{18}\text{O} = 0.38Vp + 0.59T + 0.03RH - 0.001P - 1.79WS + 0.03DS - 348.13$	0.69	68
兰州	$\delta^{18}\text{O} = 0.21Vp + 0.69T + 0.10RH - 0.04P + 2.87WS - 0.04DS - 195.13$	0.58	29
银川	$\delta^{18}\text{O} = 0.01Vp + 0.12T + 0.07RH - 0.02P + 3.95WS + 0.05DS - 38.16$	0.58	28
西安	$\delta^{18}\text{O} = -0.17Vp + 0.003T - 0.15RH - 0.02P + 0.71WS - 0.02DS + 167.11$	0.21	52

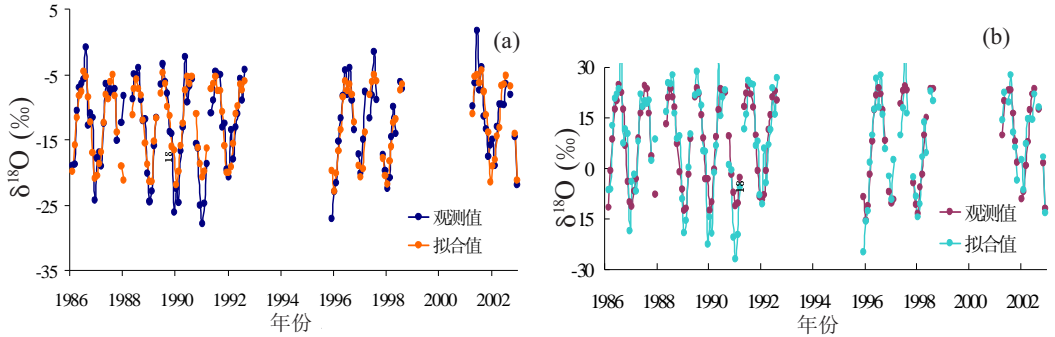


图 8 利用多元线性回归对乌鲁木齐站点降水  $\delta^{18}\text{O}$  的拟合 (a) 及利用温度- $\delta^{18}\text{O}$  关系对温度的定量恢复 (b)  
 Fig. 8 Quantitative simulation of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation using a multiple liner regression (a) and temperature reconstruction using the relationship between  $T-\delta^{18}\text{O}$  (b), taking Urumqi station as an example

纬度效应显著。虽然在年尺度上不存在降水量效应，但夏季 (6-8 月)  $\delta^{18}\text{O}$  与降水量的负相关关系显著，约为  $-0.04\text{‰}/\text{mm}$ ；

(3) 2005 年各月降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的空间分布特征可以很好地反映西北地区的大气环流背景。同时，也对西北地区降水水汽的主要输送通道有很好的示踪作用。利用瑞利分馏模型及动力分馏模型对阜康—安塞沿线降水  $\delta^{18}\text{O}$  的定量模拟结果，揭示了西北地区降水水汽的分馏主要以动力分馏为主，雨滴在降落过程中历经了一定的二次蒸发过程，降水水汽中也混入一定量的由局地再蒸发的水汽；

(4) 降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  对区域气候因子有很好的响应关系。利用  $\delta^{18}\text{O}$  与气压、降水量等气候参数建立的多元回归关系，可以对  $\delta^{18}\text{O}$  数值进行定量估算。同时，基于乌鲁木齐站 12 年的资料，实现了利用  $\delta^{18}\text{O}$  对现代条件下温度的拟合，这一结果将有助于该地区气候的定量反演。

致谢：感谢本文气象数据的提供单位：CERN 综合中心、中国气象局国家气象信息中心及美国国家海洋和大气局。本文有关于水汽通量的计算部分，得到了中国科学院大气物理研究所艾丽坤研究员的悉心指导，在此表示深深的感谢！同时对 CERN 各野外台站在水样采集中所付出的辛勤劳动，及同位素样品分析中，杨京蓉老师和苑晶晶硕士的热心帮助一并表示谢意！

## 参考文献 (References)

- [1] Dansgaard W. The abundance of  $\delta^{18}\text{O}$  in atmospheric water and water vapour. *Tellus*, 1953, 5(4): 461-469.
- [2] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [3] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(28): 721-728, 742.



- [4] Zhang Xinping, Liu Jingmiao, Tian Lide et al. Variations of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation along vapour transport paths over Asia. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 699-708. [章新平, 刘晶淼, 田立德等. 亚洲降水中  $\delta^{18}\text{O}$ 沿不同水汽输送路径的变化. 地理学报, 2004, 59(5): 699-708.]
- [5] Harvey F E, Welker J M. Stable isotopic composition of precipitation in the semi-arid north-central portion of the US Great Plains. *Journal of Hydrology*, 2000, 238: 90-109.
- [6] Zhang Cunjie, Xie Jinnan, Li Dongliang et al. Effect of East-Asian monsoon on drought climate of Northwest China. *Plateau Meteorology*, 2002, 21(2): 193-198. [张存杰, 谢金南, 李栋梁等. 东亚季风对西北地区干旱气候的影响. 高原气象, 2002, 21(2): 193-198.]
- [7] Guo Jiangyong, Li Yaohui. Climatic characteristics of summer precipitation in north western China. *Arid Zone Research*, 2006, 23(3): 489-494. [郭江勇, 李耀辉. 中国西北地区夏季降水的气候特征. 干旱区研究, 2006, 23(3): 489-494.]
- [8] Wang Baojian, Li Dongliang, Huang Yuxia et al. Relation between abnormality of East Asia summer monsoon and summer precipitation in east part of Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5): 563-568. [王宝鉴, 李栋梁, 黄玉霞等. 东亚夏季风异常与西北东部汛期降水的关系分析. 冰川冻土, 2004, 26(5): 563-568.]
- [9] Yu Yaxun, Wang Jinsong, Li Qingyan. Spatial and temporal distribution of water vapour and its variation trend in atmosphere over Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 149-156. [俞亚勋, 王劲松, 李青燕. 西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析. 冰川冻土, 2003, 25(2): 149-156.]
- [10] Wang Xiurong, Xu Xiangde, Yao Wenqing. Differences in circulation and moisture between dry and wet years in Northwest China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(5): 550-559. [王秀荣, 徐祥德, 姚文清. 西北地区干、湿夏季的前期环流和水汽差异. 应用气象学报, 2002, 13(5): 550-559.]
- [11] Wang Keli, Jiang Hao, Zhao Hongyan. Advection and convergence of water vapour transport over the northwest China. *Advances in Water Science*, 2006, 17(2): 164-169. [王可丽, 江灏, 赵红岩. 中国西北地区水汽的平流输送和辐合输送. 水科学进展, 2006, 17(2): 164-169.]
- [12] Bai Huzhi, Li Dongliang, Lu Dengrong et al. Climate characteristics of summer precipitation days in eastern part of northwest. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(3): 133-140. [白虎志, 李栋梁, 陆登荣等. 西北地区东部夏季降水日数的变化趋势及期气候特征. 干旱地区农业研究, 2005, 23(3): 133-140.]
- [13] Wang Chenghai, Cui Yang. A study of the stability of the precipitation cycle over Northwest China in the past 50 years. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(6): 576-584. [王澄海, 崔洋. 西北地区近50年降水周期的稳定性分析. 地球科学进展, 2006, 21(6): 576-584.]
- [14] Su Buda, Wang Guojie, Jiang Tong. Spatial and temporal variations and scaling of precipitation over Northwest China during 1960-2004. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(2): 176-182. [苏布达, 王国杰, 姜彤. 西北地区45a来降水异常的时空变化及其标度特征. 冰川冻土, 2007, 29(2): 176-182.]
- [15] Liu Jianrong, Song Xianfang, Yuan Guofu et al. Characteristics of stable isotopes in summer monsoonal precipitation in South China and the moisture sources evidence from  $\delta^{18}\text{O}$  signature. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(6): 1004-1012. [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. 自然资源学报, 2007, (6): 1004-1012.]
- [16] Song Xianfang, Liu Jianrong, Sun Xiaomin et al. Establishment of Chinese Network of Isotopes in Precipitation (CHNIP) based on CERN. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(7): 738-747. [宋献方, 柳鉴容, 孙晓敏等. 基于CERN的中国大气降水同位素观测网络. 地球科学进展, 2007, 22(7): 738-747.]
- [17] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, 133: 1702-1703.
- [18] Yurtsever Y, Gat J R. Atmospheric waters. In: Gat J R, Gonfiantini R (eds.). *Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1981. 103-142.
- [19] Yamanaka T, Tsujimura M, Oyunbaatar D et al. Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for the atmospheric water cycle. *Journal of Hydrology*, 2007, 333: 21-34.
- [20] Lin Zhenyao, Zheng Du. The tracks of moisture transportation and its vapour geocological characteristics on the Qinghai-Xizang Plateau. *Arid Zone Research*, 1992, 9(2): 1-7. [林振耀, 郑度. 新疆塔里木盆地东缘水汽输送路径. 干旱区研究, 1992, 9(2): 1-7.]
- [21] Wang Baojian, Huang Yuxia, Tao Jianhong et al. Regional features and variations of water vapour in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(1): 15-21. [王宝鉴, 黄玉霞, 陶健红等. 西北地区大气水汽的区域分布特征及其变化. 冰川冻土, 2006, 28(1): 15-21.]
- [22] Wang Keli, Jiang Hao, Zhao Hongyan. Atmospheric water vapour transport from westerly and monsoon over the Northwest China. *Advances in Water Science*, 2005, 16(3): 432-438. [王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送. 水科学进展, 2005, 16(3): 432-438.]
- [23] Lu Junmei, Zhang Qingyun, Tao Shiyun et al. Characteristics of the onset and advance of Chinese Asian monsoon. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(3): 332-338. [吕俊梅, 张庆云, 陶诗言等. 亚洲夏季风的爆发及推进特征. 科学通

- 报, 2006, 51(3): 332-338.]
- [24] Lu Junmei, Tao Shiyan, Zhang Qingyun et al. Processes of intraseasonal evolution of Asian summer monsoon under climatological mean condition. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(5): 814-823. [吕俊梅, 陶诗言, 张庆云等. 气候平均状况下亚洲夏季风的季节内演变过程. *高原气象*, 2006, 25(5): 814-823.]
- [25] He Jinhai, Liu Yunyun, Chang Yue. Analysis of summer precipitation anomaly and the feature of water vapor transport and circulation in Northwest China. *Arid Meteorology*, 2005, 23(1): 10-15. [何金海, 刘芸芸, 常越. 西北地区夏季降水异常及其水汽输送和环流特征分析. *干旱气象*, 2005, 23(1): 10-15.]
- [26] Zhao Di, Yao Ping, Yang Ruowen et al. The spatial and temporal distribution features of onset period of mean rainy season over Asian monsoon region. *Journal of Yunnan University*, 2006, 28(4): 333-336. [赵荻, 姚平, 杨若文等. 亚洲季风区平均雨季起始期的时空分布特征. *云南大学学报(自然科学版)*, 2006, 28(4): 333-336.]
- [27] He Yuanqing, Yao Tandong, Yang Meixue et al. The new results of  $\delta^{18}\text{O}$  studies on the system of precipitation, snow-ice and glacial runoff at the Glacier Baishui No.1 region in Mt. Yulong, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(4): 391-393. [何元庆, 姚檀栋, 杨梅学等. 玉龙山白水1号冰川区大气降水—冰雪—水文系统内  $\delta^{18}\text{O}$  研究的新结果. *冰川冻土*, 2000, 22(4): 391-393.]
- [28] Zhang Xinping, Liu Jingmiao, Sun Weizhen et al. Study on relationship between stable oxygen isotope in precipitation and relative metrological parameters in Southwest China. *Science in China (Series D)*, 2006, 36(9): 850-859. [章新平, 刘晶淼, 孙维贞等. 中国西南地区降水水中氧稳定同位素比率与相关气象要素之间关系的研究. *中国科学(D辑)*, 2006, 36(9): 850-859.]
- [29] Craig H, Gordon L. Deuterium and oxygen-18 variation in the ocean and the marine atmosphere. In: Tongiorgi E (ed.), *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, Spoleto, 1965. 3-130.
- [30] Gat J R. Comments on the stable isotope method in regional groundwater investigations. *Water Resources Research*, 1971, 7: 980-993.
- [31] Gonfiantini R. Environmental isotopes in lake studies. In: Fritz P, Fontes J C (eds.), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Vol. 2, The Terrestrial Environment. Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 1996. 113-168.
- [32] Friedman I, Machta L, Soller R. Water vapour exchange between a water droplet and its environment. *Journal of Geophysical Research*, 1962, 67: 2761-2766.
- [33] Clark I D, Fritz P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publisher, 1999. [张慧, 张新基译. 水文地质学中的环境同位素. 郑州: 黄河水利出版社, 2006. 59.]
- [34] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(28): 721-728, 742.

## Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation over Northwest China and Its Water Vapor Sources

LIU Jianrong<sup>1,2</sup>, SONG Xianfang<sup>1</sup>, YUAN Guofu<sup>3</sup>, SUN Xiaomin<sup>3</sup>,  
LIU Xin<sup>1,3</sup>, CHEN Feng<sup>2,4</sup>, WANG Zhimin<sup>1</sup>, WANG Shiqin<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle & Related Surface Process, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. CERN Sub-center of Water, Beijing 100101, China;

4. Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In order to reveal the characteristics and climatic controls on the stable isotope composition in precipitation over Northwest China, seven stations have been selected from the Chinese Network of Isotopes in Precipitation (CHNIP). During the year 2005, monthly precipitation samples have been collected and analyzed for the composition of  $\delta^{18}\text{O}$ . The established local meteoric water line  $\delta\text{D} = 7.05\delta^{18}\text{O} - 2.17$ , based on the 50 monthly samples

obtained, could be treated as isotope input functions across the region. The deviations of the slope and the intercept from the Global Meteoric Water Line indicated the specific regional meteorological conditions over Northwest China. The monthly  $\delta^{18}\text{O}$  values were characterized by a strong correlation with the surface air temperature and a weak correlation with precipitation amount. However, if only the  $\delta$  values during summer period have been taken into account, the amount effect visualized. Spatial distributions of  $\delta^{18}\text{O}$  have properly portrayed the atmospheric circulation background in each month over Northwest China. The quantitative simulation of  $\delta^{18}\text{O}$ , which involved a Rayleigh fractionation model and a kinetic fractional model, demonstrated that the kinetic fractionation was the dominating function of condensation of raindrops. Furthermore, the raindrops suffered re-evaporation during the falling process, and the precipitation vapor has been mixed with a quantity of local recycled water vapor. A multiple linear regression equation and a  $\delta^{18}\text{O}$ -T relation were gained by using meteorological parameters to evaluate physical controls on the long-term values. The established  $\delta^{18}\text{O}$ -T relation, which has been based on the present-day precipitation, was the first step of quantitatively reconstructing the paleo-climate.

**Key words:** Northwest China;  $\delta^{18}\text{O}$ ; precipitation; water vapour source