

# 基于温度作为辅助变量的中国降水 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布特征

李亚举<sup>1</sup>, 张明军<sup>1,2</sup>, 王圣杰<sup>1</sup>, 李忠勤<sup>1,2</sup>, 李小飞<sup>1</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川观测试验站, 兰州 730000)

**摘要:**本研究利用从 WorldClim 获得的高分辨率气象数据分析稳定同位素温度效应, 研究发现最热季度的平均气温与中国 62 个站点同位素年平均值之间表现出很好的相关性( $R^2=0.79$ )。在此基础上利用地统计学方法, 也就是采用温度作为辅助变量的空间插值算法——局部平均的简单克里金法(Simple Kriging with locally varying mean, SKlm), 对中国降水中稳定同位素年平均值空间分布进行了模拟, 得到了较高分辨率的中国降水中年均 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布图, 该图能够较好地表现区域同位素变化模式, 能够反映如降水水汽团的来源、性质等的气候环境背景, 也能在一定程度上反映包括当地的纬度、地形、海拔高度等在内的局部地理因素。

**关键词:**  $\delta^{18}\text{O}$ ; 辅助变量; 克里金插值; 空间分布; 中国

## 1 引言

降水是水循环过程中一个重要环节, 降水中稳定同位素的丰度与降水形成的气象条件以及水汽源区的初始状态存在密切联系。随着气候的变化, 大气降水中稳定同位素氘( $^2\text{H}$ )和氧-18( $^{18}\text{O}$ )也会因空间和时间的变化而变化。因此, 降水中稳定同位素可作为水汽源的自然示踪, 从而反演大气过程, 为全球以及区域气候和水文的现代过程研究提供手段。此外, 保存在冰芯、原生矿物和生物化石中的稳定同位素记录已经广泛应用于古气候古水文的研究<sup>[1-5]</sup>。

虽然同位素技术已经在很多领域得到应用, 但是有关利用现有的同位素数据创建区域性的同位素空间分布的研究却很少。全球范围内只有少量气象站点长时间观测降水同位素, 由这些站点通过一般插值方法生成的同位素空间分布在精度上会

有很大的误差。这是由于目标变量的空间分布插值估值的精度主要受取样站点数与密度的影响, 但增加站点密度会耗费大量的人力和时间。在目标变量数据有限的情况下, 利用那些较易获得的辅助变量进行插值估值, 在一定程度上是提高插值精度的有效方法。实际上已经有学者使用这种方法进行过研究, 并取得了较有价值的成果<sup>[6]</sup>。在选择辅助变量进行差值时应选取很强相关性的已知事物以尽量减小差值误差。

从全球大气循环的角度, 由于降水中稳定同位素的变化受控于大气水汽的运移。通常, 从海洋蒸发的水汽由低纬度向中高纬度内陆输送, 并在一定的气象条件下形成云并产生降水。在冷凝过程中, 水汽中的同位素处于平衡状态, 同位素分馏服从瑞利分馏<sup>[1]</sup>, 较重的同位素优先进入冷凝水中。由于随着气温的降低同位素分馏增大, 这就导致在较高纬度地区 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 瑞利分馏愈加明显。瑞利分馏

收稿日期: 2011-03; 修订日期: 2011-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161012, 40701035, 40631001, 40571033, 40701034); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0019); 陇原青年创新人才扶持计划项目; 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB951003, 2007CB411501); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-127); 冰冻圈科学国家重点实验室自主研究项目资助; 西北师范大学知识与科技创新工程创新团队项目(NWNU-KJXCXG-03-66); 西北师范大学科研骨干培育项目(NWNU-KJXCXG-03-78)。

作者简介: 李亚举(1988-), 男, 河南平顶山人, 硕士研究生, 主要研究方向为同位素地球化学。E-mail: liyaju100@126.com

通讯作者: 张明军, E-mail: mjzhang2004@163.com

是降水中稳定同位素“温度效应”的基础<sup>[1]</sup>。本文以中国为例,进一步探讨自然界现代降水中稳定同位素组成与温度的关系,并利用其关系对同位素进行空间插值。

## 2 数据来源

### 2.1 同位素数据

在过去的近50年里,国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)和世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)建立的全球大气降水同位素监测网(Global Network of Isotopes in precipitation, GNIP)已发展到100多个国家的800多个站点,对大气降水同位素样品进行收集。数据主要包括1961-2002年(不完全统计)降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的月平均值以及观测站点降水量、气温以及经纬度等信息。统计显示,中国先后加入GNIP的台站数量共计31个,这些站点主要分布在中国东部地区,在广大的西部地区站点非常少。为了全面评估中国降水中同位素的空间分布(图1),本研究在GNIP数据的基础上,根据相关文献<sup>[7-17]</sup>,增补部分台站,选取62站点对中国降水中氧稳定同位素的空间分布进行研究。氧稳定同位素的比率以相对于标准平均大洋水(Standard Mean Ocean Water, SMOW)的千分差,即国际规定统一采用待测样品中某元素的同位素比值与标准同种同位素的相对千分差作为量度。表示为如下形式:

$$\delta^{18}\text{O} = \left[ \frac{R_{\text{样品}}}{R_{\text{SMOW}}} - 1 \right] \times 1000 \quad (1)$$

式中: $R_{\text{样品}}$ 为降水或冰芯样中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值; $R_{\text{SMOW}}$ 为SMOW中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值。

### 2.2 气象数据

气象数据取自WorldClim(<http://www.worldclim.org>)的高分辨率世界气候图<sup>[18]</sup>。此地图包含高空间分辨率的平均气温、最低气温、最高气温、降水量以及其他一些推导的气象参数(表1)。世界气候图是由美国California大学,澳大利亚Queensland大学共同基于ANUSPLIN模型和全球至少运行了10年以上的47554个气象站点数据(1950-2000年)利用经纬度和高度作为联合因子进行样条插值开发的,分辨率为1 km 网格。本次研究使用的是GIS-file“bio\_5m\_esri.zip”,包含19个气象变量,其中5个与温度有关的变量将在本文中应用。

### 2.3 地图数据

研究所使用的矢量地图分别来源于从DIVA-GIS网站(<http://www.diva-gis.org>)和国家基础地理信息系统网站(<http://nfgis.nsd.gov.cn/>)下载的中国行政区划图。

表1  $\delta^{18}\text{O}$  年平均值与各气象要素的线性回归相关性

Tab.1 Linear regression correlation between the annual mean of  $\delta^{18}\text{O}$  and the meteorological factors

名称	描述	$\delta^{18}\text{O}$ 线性回归 $R^2$
Bio1	年平均气温	0.72
Bio8	降水量最多季度平均气温	0.73
Bio9	降水量最少季度平均气温	0.51
Bio10	最热季度平均气温	0.79
Bio11	最冷季度平均气温	0.52

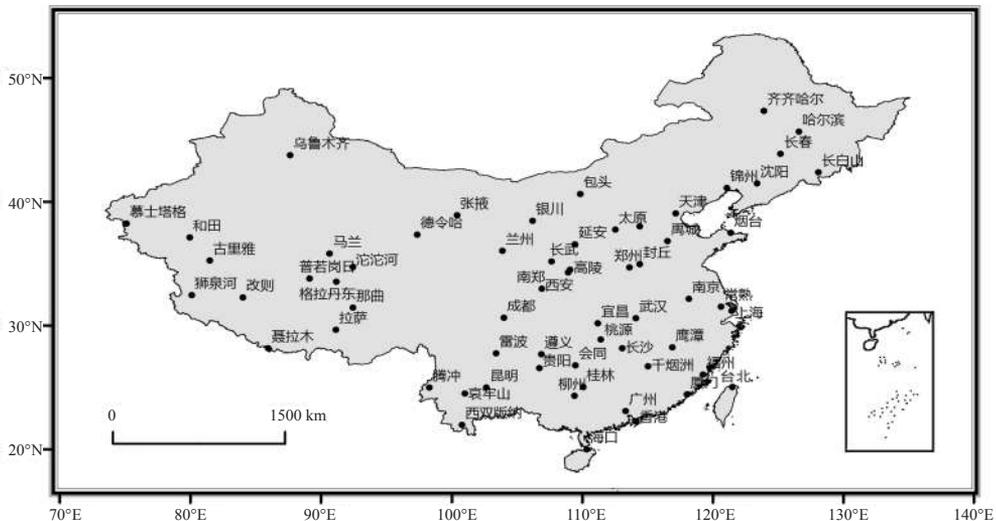


图1 中国稳定同位素观测站点的空间分布

## 3 研究方法

### 3.1 基本思路

本研究大体包含 3 个步骤: ①运用一个回归方程表现出气温变量与区域内年平均 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化情况; ②计算出回归方程中空间差值的残差; ③将残差数据和模拟结果相加得出全国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 年平均空间分布图。在这种方法中, 明确使用了一个辅助变量。一个适合的辅助变量应包含两个特点: 提供比主变量更高的分辨率/密度; 与主要变量有很强整体关系, 因为大多数差值技术中如果相关的变量是正态分布, 回归方程产生的残差也应优先遵循正态分布。利用辅助变量的主要优势之一是它灵活地建立了主变量和辅助变量之间的关系, 而且它可与任何插值方法(克里金、反距离加权、样条等)结合。

### 3.2 克里金差值

与其他空间插值算法(反距离加权插值法、三角网插值法、样条插值法等)相比, 克里金差值首先考虑的是空间属性的变异分布, 确定对一个待插点值有影响的距离范围, 然后用此范围内的采样点来估计待插点的属性值, 它是一种对空间分布数据求最优无偏内插的估计。

变异函数是克里金插值法插值的基础, 当变异函数仅依赖于距离  $h$  时, 设  $Z(x_i)$  是系统某属性  $Z$  在空间位置  $i$  处的值,  $Z(x)$  为一区域随机变量, 并满足二阶平稳假设,  $h$  为两样本点空间分隔距离, 半变异函数的离散公式为:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [(Z(x_i) - Z(x_i + h))^2] \quad (2)$$

接下来, 将使用一些线性模型拟合变异函数, 该数据的空间相关结构模型将会反馈到克里金算法中。

### 3.3 克里金辅助变量

带有辅助变量的克里金估值可以采用协同克里格(Co Kriging, CK)、具有外部漂移的克里金(Kriging with External Drift, KED)和局部平均的简单克里金(Simple Kriging using Locally varying mean, SKlm)。这些方法的不同之处在于使用的辅助变量不同, 比如CK和KED使用搜索区域内的信息, SKlm则利用数据的整体关系。

SKlm法利用主、辅助变量之间的相关关系求得均值, 起到趋势约束作用, 估值方程如下<sup>[19]</sup>:

$$Z^*_{SKlm}(u) - m^*_{sk}(u) = \sum_{a=1}^n k_a^{sk}(u) [z(u_a) - m^*_{sk}(u_a)] \quad (3)$$

式中:  $m^*_{sk}(u)$  为用线性方程组得到的变化平均值。 $m^*_{sk}(u)$  可由主、辅助变量之间的相关关系得到, 即  $m^*_{sk}(u) = f[y(u)]$ 。

所以, 式(3)又可写成:

$$\begin{aligned} Z^*_{SKlm}(u) &= f[y(u)] + \sum_{a=1}^n k_a^{sk}(u) [z(u_a) - m^*_{sk}(u_a)] \\ &= \sum_{a=1}^n k_a^{sk}(u) r(u_a) + m^*_{sk}(u) \\ &= f[y(u)] + r^*_{sk}(u) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: 残差  $r(u_a) = z(u_a) - f[y(u_a)]$ ; 权重  $k_a^{sk}(u)$  由式(7)求得。

$$\sum_{a=1}^n k_a^{sk}(u) C_R(u_a - u_b) = C_R(u_a - u) \quad (5)$$

式中:  $a=1, \dots, n$ 。  $C_R(h)$  为残差  $r(u_a)$  的协  $C_R(h)=0$  方差函数, 并不是测量点  $z(u_a)$  本身的协方差。如果残差不相关, 即  $C_R(h)=0$ , 则所有的克里金权重值均为 0, SKlm 的插值结果就只是主、辅助变量之间相关关系所计算的结果。

### 3.4 预测误差

对空间差值模型的预测误差估计的计算方法有很多, 本文这里使用平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)检验模型是否符合实际观察。因为平均误差的误差值有正有负, 在进行代数求和时有时会相互抵消, 所以无法精确地显示误差, 而平均绝对误差能比较准确地反映预测误差的大小, 在一定程度上克服了平均误差的缺陷。计算公式为:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{N_k} |z(u_k) - z(u'_k)|_k \quad (6)$$

式中:  $z(u_k)$  和  $z(u'_k)$  分别是  $k$  观测站的实际值和预测值。

## 4 分析与讨论

### 4.1 降水中同位素与气候变量的关系

如前所述, 本研究的主要目标之一是要探讨中国境内地表温度和现代降水中同位素组成的关系。由于区域性的气温间接地与纬度和海拔有关, 而这些变量可以作为预测降水中稳定同位素的相关因子。2002年Bowen和Wilkinson<sup>[20]</sup>就利用降水中稳定同位素的纬度效应和高程效应(实际上为温

度效应)得出一经验模型(BW模型),并结合空间插值的方法<sup>[21]</sup>运用此模型对全球降水中氧稳定同位素的空间分布进行了模拟。BW模型的为:

$$\delta^{18}\text{O} = a |\text{LAT}|^2 + b \text{LAT} + c \text{ALT} + d \quad (7)$$

式中: $\delta^{18}\text{O}$ 为观测站点降水或冰芯中氧稳定同位素的年平均估计值; $\text{LAT}$ 为观测站的纬度; $\text{ALT}$ 为观测站的海拔; $a$ 、 $b$ 和 $c$ 分别为经验参数; $d$ 为截距。

这一模型已经被证明能够有效地对降水中稳定同位素的空间分布进行估算,并在中国也有相似研究<sup>[16]</sup>。相对于Bowen和Wilkinson的经验模型,瑞利分馏是使用表面温度来描述的物理模型<sup>[1,22]</sup>。因为降水中稳定同位素组成是与大气中的水汽输送过程密切相关的,产生同位素分馏的两个主要过程是水的蒸发和水汽的凝结,而制约蒸发和凝结过程的重要因子之一是温度。随着水汽从低纬向高纬的输送,温度不断降低而发生凝结降水,使得剩余水汽以及随后降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐降低。同样的原理,水汽从沿海向大陆内部的输送也是一样, $\delta^{18}\text{O}$ 与温度之间的正相关关系愈加明显。因此,直接使用制约同位素分馏的重要因子之一的地表温度作为相关因子的模型,将比之前简单运用纬度和海拔高度相结合的模型更好地解释区域同位素的变化。

需要说明的是,降水中稳定同位素的空间变化是多种要素相互作用、综合影响的结果,温度效应也和水汽源地有关。然而,一方面,对各站点水汽来源及不同水汽源的重要性仍缺乏确切的认识,特别是过渡地带的水汽来源还存在一定的不确定性;另一方面,即使水汽源相同,各站点仍受到纬度、海拔高度和局地地形等因素的影响。本文试图以各采样点的常年平均气温为基础,着重讨论采样点当地的地理要素对同位素分馏的影响,因此对研究区更加细分可能不利于文章的讨论。

为了进一步验证上述模型假设,也是为了进一步提高对稳定同位素温度效应的认识,本研究利用从WorldClim获得的与气温相关地数据,验证温度对中国降水中稳定同位素变化的影响程度。在描述同位素与温度的关系时,采用了一元线性回归方法进行拟合。表1和

图2给出所有站点降水中氧稳定同位素值的年平均均值与部分气温要素的相关性。

从表1及图2可以看出, $\delta^{18}\text{O}$ 的年平均均值与平均气温有很高的相关性( $R^2=0.72$ )。而且,其趋势也与降水中稳定同位素的温度效应一致,即同位素的组分与温度成正相关关系。虽然年平均气温很好地解释了年平均同位素的变化,但是最热季节平均温度与同位素之间表现出更高的相关性( $R^2=0.79$ )。而在最冷的季度关系不明显( $R^2=0.52$ ),可能是由于中国大部分地区为季风气候,降水多集中在夏季,最热的季度的降水远远高于最冷的季度,致使其对年平均同位素值信息的反映程度比较冷月份大得多。但这是否真正反映了同位素温度效应,或者与降水形式、冬夏季风不同水汽来源等因素有关,必须做进一步研究。

值得一提的是,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的年平均均值与降水量最多的季度的气温也有很高相关性( $R^2=0.73$ ),而相应的与最干旱季度的气温相关性不是很高( $R^2=0.51$ )。这是因为在中国降水量最多的季节也是平均气温最高的季度,使得降水量最多的季度与年平均 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关性远高于最干旱的季度。

在以整个中国为研究区域的早期文献中,大多未对获得的同位素空间分布状况进行量化评估,只有BW模型在中国的应用<sup>[16]</sup>提出了站点实际值与模型预测值的相关性。在该文献中相关系数为 $R^2=0.71$ ,而本文的运算结果而为 $R^2=0.79$ ,因此本研究在一定程度上提高了对中国降水年均 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间变化模拟的精度。

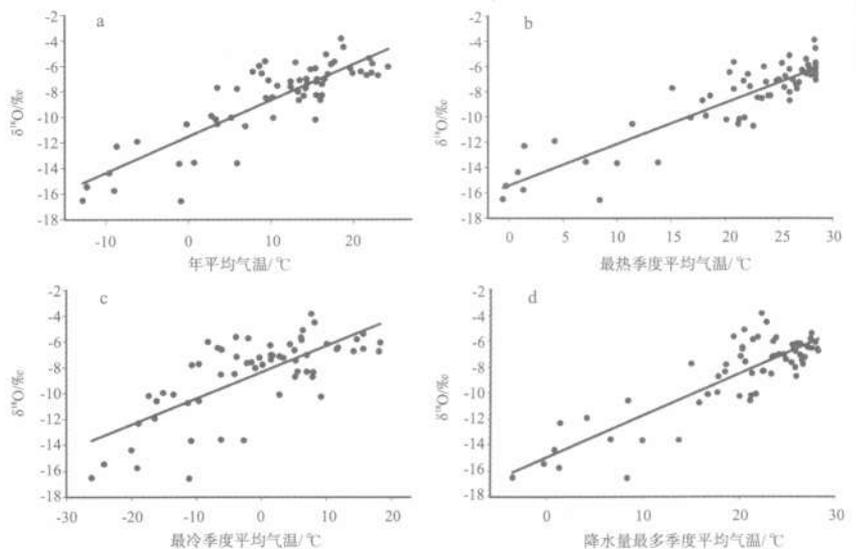


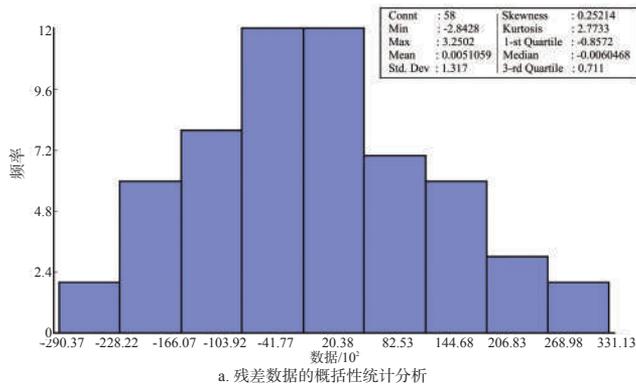
图2 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 年平均均值与气象要素点图

### 4.2 空间相关结构

显然从上一节可知,在最热季度的平均气温最能体现区域降水中同位素的变化情况( $R^2=0.79$ )。因此,根据上一节的理论选择最热季度的平均气温作为对中国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布预测的辅助变量。

首先,计算最热季节平均气温的回归方程的残差,从图 3a 中可以看出,残差数据呈正态分布。其次,使用简单克里金对残差进行空间插值。为了优化克里金插值,使用半方差研究 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间相关结构。图 3b 是计算出的 $\delta^{18}\text{O}$ 残差的变异函数图。实验变异函数的拟合使用块金效应加球状模型:

$$\gamma(h) = n_0 + \begin{cases} C(1.5h - 0.5h^3) & h < 1 \\ C & h \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$



式中:  $n_0$  是块金效应值;  $C$  为基台值;  $h$  为滞积距离。半方差模型显示了相当大的块金效应,约占总的半方差的 40%(图 3b)。由于变异函数是以回归方程的残差为基础的,它包含各种来源的误差。这些误差不仅包括在同位素和温度的测量分析时产生的误差,还包括大多数站点非代表性的短时间的同位素记录产生的额外误差。这也反映了其他一些因素对降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响,如降水量效应、大陆效应、水汽输送路径以及相对湿度等。虽然有很大的块金效应,但是仍然在一定的距离上各站点仍然存在明显的空间相关性。这表明,同位素残差值能够表现出空间相关结构。

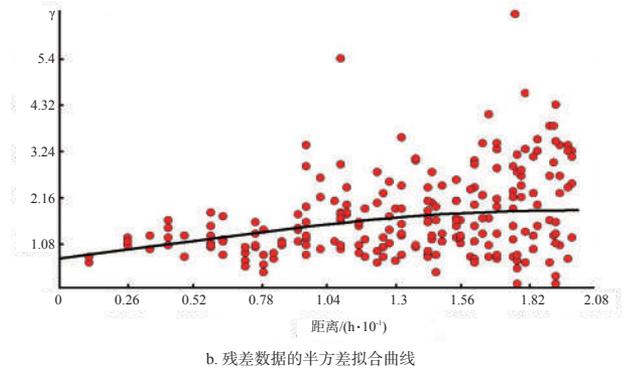


图3 残差数据的概括性统计分析与半方差拟合曲线

Fig.3 General statistics of the residual analysis and semivariogram fitting curve

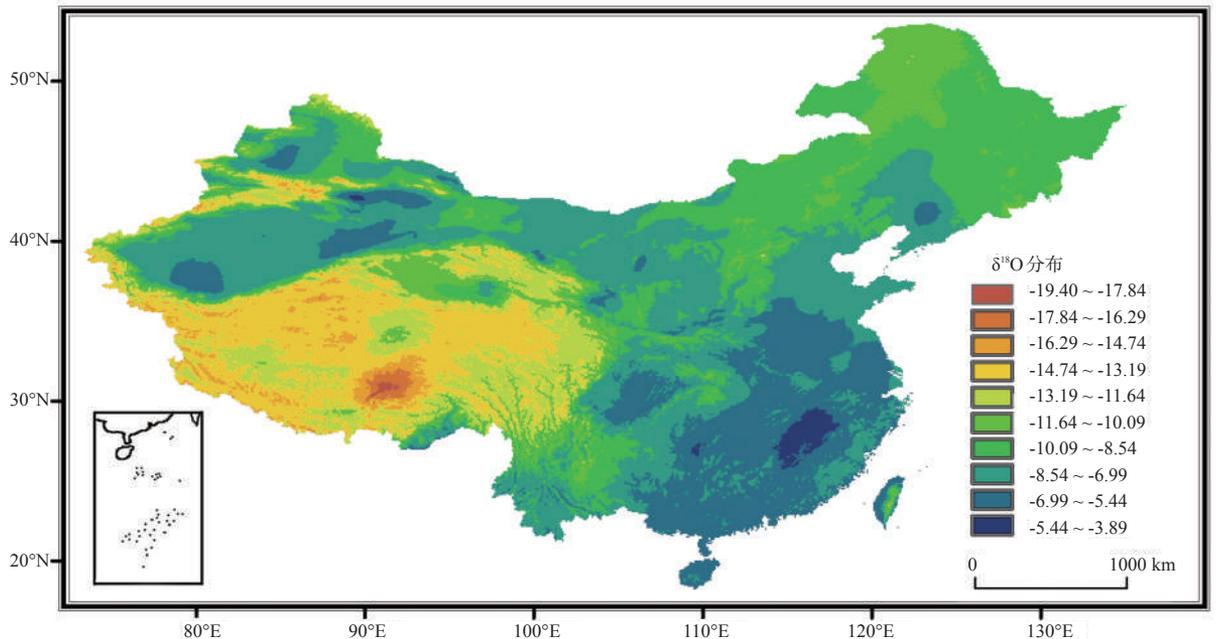


图4 中国降水年均 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of China's annual mean  $\delta^{18}\text{O}$  values of precipitation

### 4.3 中国降水年均 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布

利用上一节中所得半方差模型,使用简单克里金对同位素残差数据进行差值。本文将内插残差地图添加到最热季节平均温度为基础的同位素预测图中,得到中国降水年均 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布图(图4)。

中国位于北半球亚欧大陆的东部,太平洋西海岸,气候的多样性造成降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 在地区分布上的差异。从中国大气降水年均 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布图可以看出,大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的分布大体上与前人的研究结果<sup>[16,23-24]</sup>相似,即在中国东南部以及西北地区, $\delta^{18}\text{O}$ 值较高,在青藏高原、天山、阿尔泰山及东北地区,与周围地区相比 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低。东南沿海靠近水汽补给区、雨量充沛,海洋蒸发大量水汽经过这里形成降雨时,首先形成重同位素分馏,形成东南沿海高值区。甘肃中北部地区和塔里木盆地由于地处内陆,远离海洋,气候干旱,地表水体中 $\delta^{18}\text{O}$ 偏高,局地蒸发形成的水汽再降水后 $\delta^{18}\text{O}$ 值仍很高;再加上雨滴在降落过程中产生的云下二次蒸发作用使同位素更加富集,致使西北地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 偏高。华北北部和东北地区降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 以沈阳为中心逐渐降低,反映了降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的纬度效应和大陆效应。青藏高原南部藏南地区以及云贵高原的南部,由于位于西南季风的迎风坡,形成了相对的高值区。相对地,由于山前强烈降水的洗涤作用<sup>[25]</sup>导致以拉萨地区为中心的青藏高原具有较低 $\delta^{18}\text{O}$ 值。但在高原上也有内陆湖泊蒸发水的蒸发所引起相对的高值区。天山和阿尔泰山的低值区域可以解释为同位素分馏的海拔效应。部分地区受局地地形影响明显,比如鄂-豫-皖、柴达木盆地、吐-哈盆地、准噶尔盆地等地区多为相对干旱和干旱的蒸发盆地,这可能是导致大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值比周缘地区大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值高的重要原因<sup>[26]</sup>。同时在部分地区与之前的模拟结果<sup>[16]</sup>存在着一定差异,这种差异主要是两个方面造成的:①站点及文献处的代表性。本研究中未考虑部分观测时段过短的站点,且在很多地区(特别是在中南和西南地区)我们的观测点是较为密集的。②插值方法的差异。模型算法的不同,可能会对结果的模拟产生一定影响。

总体上说,利用温度作为辅助变量得到的降水年均 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布图能够反映区域气候的环境背景,如降水水汽团的来源、性质等;也能在一定程度上反映局部的地理因素,包括当地的纬度、地形、海拔

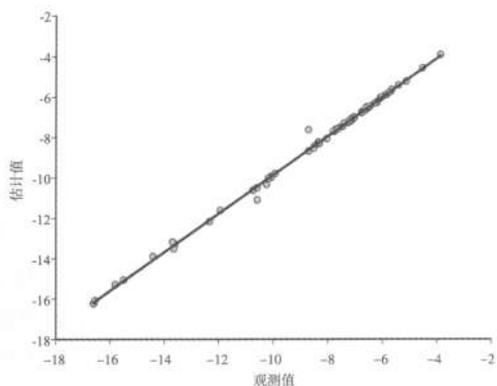


图5 利用SKlm模型得到的各观测站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 估计值与实际观测值比较

Fig.5 Comparison between estimated values of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation using SKlm and observed values at all stations

高度等。为利用降水中稳定同位素研究现代水循环过程以及古气候变化有重要的参考。

### 4.4 预测误差

总的预测误差的确定使用平均绝对误差,与克里金方差相比,平均绝对误差只反映了具体某一地区真实值与预测值之间的不同。SKlm法对观测站点降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 提供了比较好的模拟,站点实测值与SKlm估计值的平均绝对误差为0.13‰,估计值与观测值之间的线性回归方程为 $y=1.0389x+0.2321(R^2=0.99, P<0.0001)$ 。此外,所模拟的降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与实测结果也符合正态分布。因此,SKlm法对中国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值的预测没有系统性的偏差且有很好的预测。

但是,本次研究所利用的采样点虽较以前的研究在站点数量上更为丰富,分布也较合理,但是在广大的西北、东北以及青藏高原东部地区相对缺乏采样点,因此得到的降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布图在部分地区可能与实际有一定差异。

## 5 结论

本文通过对现代降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 资料的分析,绘制出了高分辨率的中国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布图。为此,使用高分辨率气象数据结合中国现有降水和冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 资料对降水中同位素组成与温度相关的变量进行了更为深入的分析。

本文使用了一元线性回归模型以适应不同的温度变量与同位素组成的关系。研究表明,现代降

水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化与一年中最热季节平均温度的相关性很高。与最热季节的气温有很好的相关性,表明每年最炎热时期的降水比寒冷时期的降水对年平均同位素值贡献更大。但对产生这种现象的原因还需要更加深入的研究。

为了得到中国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 高分辨率空间分布图,使用局部平均的简单克里金法(SKlm),并将最热季季度的平均气温作为其辅助变量。在这种方法中,首先使用简单克里金将最热季度的同位素回归方程残差插值,然后再以最热季度气温为基础添加到中国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布图中。由于同位素与辅助变量很好的相关性( $R^2=0.79$ ),因此本文的同位素空间分布图能够较好地表现区域同位素变化模式。

另外,使用同位素残差进行空间差值也能将当地的同位素效应计算在内。能够反映区域气候的环境背景,如降水汽团的来源、性质等;也能在一定程度上反映局部的地理因素,包括当地的纬度、地形、海拔高度等。较低的预测误差以及实际值与预测值的偏差呈对称分布表明运用SKlm法预测的准确性。

总之,使用地表气温作为辅助变量的确比简单利用纬度和高程的结合在预测区域降水中同位素分布方面更为精确,能够反映区域气候的环境背景和局部的地理因素的影响。由于在广大西部地区缺乏同位素观测站点,对此地区的预测可能与实际有一定差异,因此在以后的研究中需要添加更多的站点数据以使预测模型更为精确。

## 参考文献

- [1] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [2] Lorius C, Merlivat L, Jouzel J, et al. A 30,000-yr isotope climatic record from Antarctic ice. *Nature*, 1979, 280(5724): 644-648.
- [3] Rozanski K. Deuterium and oxygen-18 in European groundwaters links to atmospheric circulation in the past. *Chemical Geology*. 1985, 52(3-4): 349-363.
- [4] Bryant J D, Koch P L, Froelich P N, et al. Oxygen isotope partitioning between phosphate and carbonate in mammalian apatite. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60(24): 5145-5148.
- [5] Dettman D L, Lohmann K C. Oxygen isotope evidence for high-altitude snow in the Laramide Rocky Mountains of North America during the Late Cretaceous and Paleogene. *Geology*, 2000, 28(3): 243-246.
- [6] Bowen G J, Wilkinson B. Spatial distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  in meteoric precipitation. *Geology*, 2002, 30(4): 315-318.
- [7] 韩庆之, 曾克峰, 梁杏, 等. 川西南雷波地区降水的D和 $^{18}\text{O}$ 同位素研究. *地质科技情报*, 1998, 17(2): 106-110.
- [8] 赵家成, 魏宝华, 肖尚斌. 湖北宜昌地区大气降水中稳定同位素特征. *热带地理*, 2009, 29(6): 526-531.
- [9] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国东部季风区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源. *科学通报*, 2009, 54(22): 3521-3531.
- [10] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响. *地球化学*, 1994, 23(1): 33-41.
- [11] Tian L, Yao T, Schuster P F, et al. Oxygen-18 concentrations in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D9): 4293-4302.
- [12] Tian L D, Yao T D, MacClune K, et al. Stable isotopic variations in west China: A consideration of moisture sources. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: doi: 10.1029/2006JD007718.
- [13] 姚檀栋, 秦大河, 徐柏青, 等. 冰芯记录的过去1000 a青藏高原温度变化. *气候变化研究进展*, 2006, 2(3): 99-103.
- [14] Kang Shichang, Zhang Yongjun, Qin Dahe, et al. Recent temperature increase recorded in an ice core in the source region of Yangtze River. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(6): 825-831.
- [15] Tian L D, Yao T D, Li Z, et al. Recent rapid warming trend revealed from the isotopic record in Muztagata ice core, eastern Pamirs. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: doi: 10.1029/2005JD006249.
- [16] Liu Zhongfang, Tian Lide, Chai Xurong, et al. A model-based determination of spatial variation of precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  over China. *Chemical Geology*, 2008, 249(1-2): 203-212.
- [17] Wang C H, Peng T R. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of Taipei precipitation: 1990-1998. *Western Pacific Earth Sciences*, 2001, 1(4): 429-442.
- [18] Hijmans, R J, Cameron S E, Parra J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(15): 1965-1978.
- [19] Bourennane H, King D C. Comparison of kriging with external drift and simple linear regression for predicting soil horizon thickness with different sample densities. *Geoderma*, 2000, 97(3-4): 255-271.
- [20] Bowen G J, Wilkinson B H. Spatial distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  in

- meteoric precipitation. *Geology*, 2002, 30(4): 315-318.
- [21] Bowen G J, Revenaugh J. Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation. *Water Resour Res*, 2003, 39(10): doi: 10D1029/2003WR002086.
- [22] Philippe C, Jean J. Deuterium and oxygen 18 in precipitation: Isotopic model, including mixed cloud processes. *Journal of Geophysical Research*. 1994, 99(8): 16793-16803.
- [23] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点. *地理学报*, 1998, 53(4): 356-364.
- [24] Hoffmann G, Heimann M. Water isotope modeling in the Asian monsoon region. *Quaternary International*, 1997, 37: 115-128.
- [25] Zhang X P, Nakawo M, Yao T D, et al. Variations of stable isotopic compositions in precipitation on the Tibetan Plateau and its adjacent regions. *Science in China: Series D*, 2002, 45(6): 481-493.
- [26] 罗维均, 王世杰, 刘秀明. 中国大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 区域特征及其对古气候研究的意义. *地球与环境*, 2008, 36(1): 47-55.

## Spatial Distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in China's Precipitation Based on a Secondary Variable of Temperature

LI Yaju<sup>1</sup>, ZHANG Mingjun<sup>1,2</sup>, WANG Shengjie<sup>1</sup>, LI Zhongqin<sup>1,2</sup>, LI Xiaofei<sup>1</sup>

(1. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station,

Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** To acquire knowledge of temperature effect on stable isotope, the relation between various temperature related variables and isotopic composition of modern precipitation was explored, based on the high-resolution meteorological data and the isotope values from WorldClim and China's stable isotope observation sites. We used a linear model to fit the relation between the different temperature variables and the isotopic composition. Although the annual mean temperature does well to explain the annual mean isotope signal, the better correlation between the mean temperature in the hottest quarter and the annual mean isotope of 63 sites in China is found ( $R^2=0.79$ ). The temperature during the coldest quarter is used as an ancillary variable in simple kriging with varying local means (SKlm). In SKlm, the residual isotope values from the regression with mean temperature in the hottest quarter are kriging interpolated, which are then added to the high-resolution spatial distribution of stable isotope ( $\delta^{18}\text{O}$ ) in China's precipitation. So more local isotope effects are accounted for by the spatial interpolation of the residual isotope values. With the good correlation between mean temperature in the hottest quarter and annual mean isotope values, the spatial distribution map can well present the pattern of variability of isotope in China. The low prediction error and a symmetrical distribution of the differences between the true and predicted values demonstrate the successful application of the SKlm approach. In summary, using surface temperature as a factor does improve the prediction of the China's isotope variation in precipitation compared to a combination of latitude and altitude, and also indicates the environmental background of regional climate and local geographic factor.

**Key words:** oxygen isotope; secondary variable; Kriging interpolation; spatial distribution; China

本文引用格式:

李亚举, 张明军, 王圣杰, 等. 基于温度作为辅助变量的中国降水 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布特征. *地理科学进展*, 2011, 30(11): 1387-1394.