

文章编号: 1672-9250(2008)01-0047-09

# 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

罗维均<sup>1,2</sup>, 王世杰<sup>1\*</sup>, 刘秀明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**系统地收集和分析IAEA/WMO数据库GNIP/ISOHIS与文献报道的中国及周边大气降水和石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 等数据,发现大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值和降水量效应在大尺度上均与前人研究结果相似,但在小尺度上具有显著的区域性特征:以塔里木盆地、鄂尔多斯盆地和横川—合肥盆地等为中心的区域大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显高于其它地区,而以拉萨和川—滇—黔为中心的区域明显低于其它地区;在川—滇—黔三省交界地区和湖南中东部分别出现了强和弱降水量效应。大气降水出现 $\delta^{18}\text{O}$ 较高值或降低值的主要原因可能与当地蒸发和季风等因子控制的水汽来源特征有关;而降水量效应的区域性特征可能与水汽来源结构变化密切相关。对区域上的大气降水和石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 进行比较分析表明,以单一水汽来源为主的地区,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值能较好地反映太阳辐射强度或季风强度;两种水汽来源强度相当的地区,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值反映的是两种水汽来源的综合信息;在太阳辐射强度变化对不同水汽影响差异性明确之前很难直接解析为太阳辐射或季风强度信息。

**关键词:** 大气降水; 稳定氧同位素; 区域性特征; 石笋; 中国

中图分类号: X142; P468

文献标识码: A

认识现代全球气候变化背景下大气降水氧同位素分布的基本规律和区域差异及其控制因素,对地质档案中氧同位素记录信息的诠释有着重要的意义。全球大气降水氧同位素的观测和研究始于上世纪50年代<sup>[1]</sup>,至1961年,以IAEA/GNIP<sup>[2]</sup>为首的世界各国研究机构陆续开展了系统的监测和研究工作,迄今已取得颇多重要成果,如各种大气循环模型(AGCMs)及根据瑞利模型总结了大气降水氧同位素的纬度效应、温度效应、降雨量效应、大陆效应等。我国在该方面的研究起步于70年代,之后采样研究工作陆续开展起来<sup>[3-17]</sup>,对中国大陆大气降水氧同

位素的分布规律进行了大尺度的总结,并利用国际数据和各自的监测数据对部分地区进行了较为详细的分析和讨论。总的来说,迄今为止,对中国大陆大气降水氧同位素分布的认识基本上都是大尺度的和/或零星的,这严重滞后于当前对生态、环境和气候的区域性和系统性研究。随着“不同区域对全球气候变化可能有着不同响应”的认识不断深入,中国大陆地貌类型众多、区域跨度大,大气降水氧同位素组成在不同的地区可能有着不同的特点和规律性。因此需要在已有成果和数据的基础上扩充监测点和数据量,在揭示总体规律的基础上尽可能地挖掘区域信息,以利于为过去全球气候变化的高分辨率研究服务。在此背景下,在前人研究成果和数据积累的基础上,更加系统地开展对中国大陆大气降水氧同位素分布的区域性特征的总结工作。本文拟通过分析国际原子能机构(IAEA)和世界气象组织(WMO)<sup>[2]</sup>对中国及周边站点长期的监测数据,以及前人在西南<sup>[6]</sup>、东部<sup>[7]</sup>、青藏高原<sup>[9,10,12]</sup>、桂林<sup>[18]</sup>、台北<sup>[13]</sup>和北京等<sup>[6]</sup>地区监测的结果,更加系

收稿日期: 2007-10-16; 修回日期: 2007-12-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403200); 中国科学院知识创新工程方向性项目(kzcx2-yw-306); 创新团队国际合作伙伴计划; 国家自然科学基金面上项目(40672112, 90202003)

第一作者简介: 罗维均(1978—), 助理研究员, 从事环境地球化学研究。

\* 通讯作者: wangshijie@vip.skleg.cn

统地总结我国大气降水的氧同位素特征、区域差异并讨论基本机理,同时结合不同区域已有的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 信息探讨现代大气降水氧同位素分布特征对古气候研究的意义。

## 1 数据收集与处理

本文收集的大气降水同位素、气温、降水量和经纬度等数据主要来源于 IAEA/WMO 数据库 GNIP/ISOHIS<sup>[2]</sup> 和相关文献<sup>[9-15, 19-23]</sup>, 其中来自前者的数据主要包括 1961—2001 年(不完全统计)雨水 $\delta^{18}\text{O}$ 的加权平均值、年总降水量和气温的年算术平均值以及经纬度等,文中使用数据范围为 $6^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$ ,  $67^{\circ}\text{E} \sim 142^{\circ}\text{E}$ , 共计 58 个站点;而相关文献中的数据则是上世纪 70 年代至 2007 年,在上述经纬度范围内,报道的长期监测年均值(同位素均为降水量加权平均),如青藏高原大部、台北、北京和蒙古国东部等是 IAEA 站点网络没有覆盖的地区,共计约 40 个。综合整理这些数据,并采用软件 SURFER 8.0 进行作图。

## 2 结果和讨论

### 2.1 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布特征

图 1 是全国大气降水年均 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布图,可以

看出大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的分布与前人研究结果<sup>[17, 24]</sup>基本一致,即 $\delta^{18}\text{O}$ 值的分布不完全与纬度平行,在中国呈现出典型的鞍形分布特征,在东南部以及西北地区, $\delta^{18}\text{O}$ 值较高,在东北地区和青藏高原南部, $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低。由于监测点和数据量的增加,本次的统计结果比前人的结果更为详细,体现出了一些区域特点:在塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、鄂—豫—皖三省交界(潢川—合肥盆地)、以拉萨为中心的西藏地区、川—滇—黔等区域 $\delta^{18}\text{O}$ 值出现了同心一半圆状的分布规律,其中前三个地区(塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、潢川—合肥盆地)中心区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有较高值,分别约为 $-6.5\%$ 、 $-5\%$ 、 $-5\%$ 左右,明显高于其它地区,由中心向外 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐减小;只有拉萨和川—滇—黔出现了由中心向外 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐增大的现象,中心区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低,分别约为 $-17\%$ 和 $-10\%$ ,明显低于其它地区,其中拉萨地区的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值为中国大陆的最低值。至于中国全区的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的整体分布规律及其基本机理,相关文献已讨论较为充分,本文就不再赘述。在此,我们着重就前人总结数据未揭示出的几个区域大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的分布规律及机理进行分析和讨论。

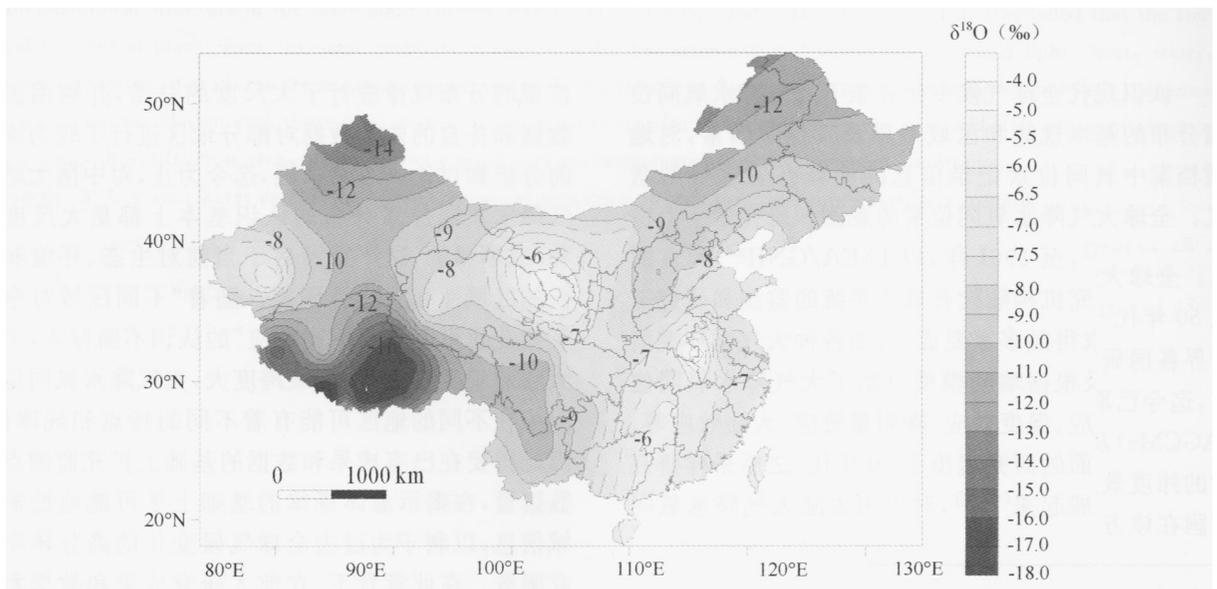


图 1 全国大气降水年均 $\delta^{18}\text{O}$ 分布图

(资料来源于 IAEA 和文献 9—15, 19—23)

Fig. 1. Map showing the distribution of average annual  $\delta^{18}\text{O}$  values of modern precipitation in China.

从季风的路线来看(图 2), 西藏、川—滇—黔可能同时受西南(印度)和东南(东亚)季风的共同影响,即沿西南季风路线大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐减小,

沿东南季风路线大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值也出现逐渐减小的态势。具体来看,西藏南部、云南西—西南部均主要受西南季风影响,西藏北—东部、云南东—南部

主要受东南季风的影响, 而贵州整体、四川大部主要受东南季风的影响, 四川西南部分地区可能受西南季风的影响。至于为何西藏地区大气降水  $\delta^{18}O$  值同心圆状分布的中心点在拉萨, 可能与拉萨附近的雅鲁藏布江这一暖湿气流通道<sup>[25]</sup> 有关: 沿通道进入

腹地的水汽本身由于山前强烈降水的洗涤作用<sup>[26]</sup> 导致具有较低  $\delta^{18}O$  值。当然, 在拉萨地区是否存在水汽向外扩散的过程中降水雨滴由于蒸发作用(空气稀薄和干旱)产生的同位素富集效应导致降水的  $\delta^{18}O$  值逐渐增大<sup>[15]</sup>, 还需要进一步研究。

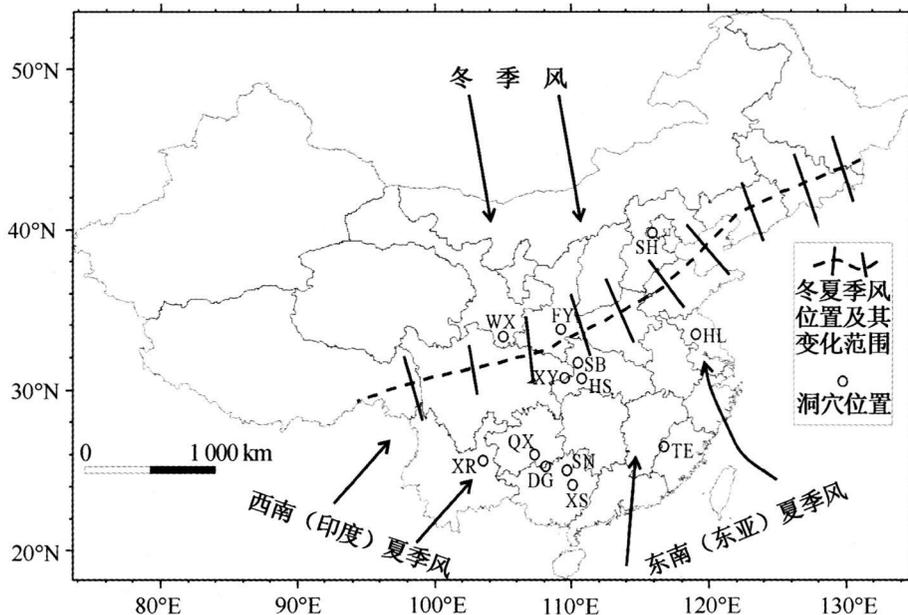


图 2 我国季风特征及洞穴地理位置示意图<sup>[27-29]</sup>

Fig. 2. Sketch map showing the monsoon characteristics and karst cave location in China.

(注: HL 为南京葫芦洞<sup>[27, 30]</sup>; WX 为甘肃武都万象洞<sup>[31]</sup>; XR 为云南寻甸仙人洞<sup>[32]</sup>; XY 为重庆奉节新崖洞<sup>[33]</sup>; TE 为福建宁化天鹅洞<sup>[34]</sup>; HS 为湖北清江和尚洞<sup>[35]</sup>; FV 为陕南柞水佛爷洞<sup>[36]</sup>; SH 为北京房山石花洞<sup>[37]</sup>; DG 为贵州荔波董歌洞<sup>[38-40]</sup>; QX 为贵州都匀七星洞<sup>[41-42]</sup>; SB 为湖北神农架山宝洞<sup>[43-45]</sup>; SN 为广西桂林水南洞<sup>[41]</sup>; XS 为铁蓝色响水岩洞<sup>[46]</sup>)

从图 1 大气降水  $\delta^{18}O$  值的整体分布及同心圆状分布规律来看(我国绝大部分地区的大气降水主要集中于夏季, 因此降水量加权平均的年均  $\delta^{18}O$  值很大程度上代表的是夏季的情况), 塔里木、鄂尔多斯、鄂一豫一皖(潢川—合肥盆地)夏季可能只受单一季风水汽来源的影响, 如塔里木受西风影响, 鄂尔多斯和鄂一豫一皖受东南季风影响。然而, 单一季风水汽来源无法解释大气降水  $\delta^{18}O$  值的同心圆状分布。因此, 这三个地区还可能存在着区域蒸发水汽来源的可能性, 因为这些地区均在长江以北, 为干旱和相对干旱的蒸发盆地。由于常年的蒸发作用, 导致这些地区的地表水  $\delta^{18}O$  值较大气降水高很多, 因而由蒸发产生的水汽也相应具有较高的  $\delta^{18}O$  值, 最终形成的大气降水  $\delta^{18}O$  值也较高, 这可能就是这些地区中心点的大气降水  $\delta^{18}O$  值比周缘地区大气降水的  $\delta^{18}O$  值高的重要原因。由中心点向外, 这些地区大气降水  $\delta^{18}O$  值逐渐减小的规律性, 也正是盆

地蒸发水汽来源向外扩散过程中氧同位素瑞利分馏规律的体现。事实上, 氕盈余值( $d = \delta D + 8 \delta^{18}O$ ) 的分布特征即是较好例证(图 3), 如在上述三个只受单一季风水汽来源控制的地区(塔里木、鄂尔多斯和鄂一豫一皖), 尤其是鄂一豫一皖, 氕盈余值显著偏大于周围, 表明其水汽很大部分来源于大气相对湿度低(干旱或半干旱)的地区<sup>[47]</sup>, 如当地干旱和相对干旱的蒸发盆地。

### 2.2 大气降水 $\delta^{18}O$ 的“Dansgaard”效应

大气降水  $\delta^{18}O$  值的变化是一个蒸发和凝结的物理过程, 在此过程中, 温度效应(气温与降水  $\delta^{18}O$  呈正相关关系)和降水量效应(降水量与降水  $\delta^{18}O$  呈反相关关系)是“Dansgaard”效应<sup>[48]</sup> (温度、降水量、海拔、纬度和大陆效应等)中最为重要的两种同位素效应, 二者也正是  $\delta^{18}O$  在各种地质档案古气候研究中的主要内容。

图 4 和图 5 分别显示了我国广大地区大气降水

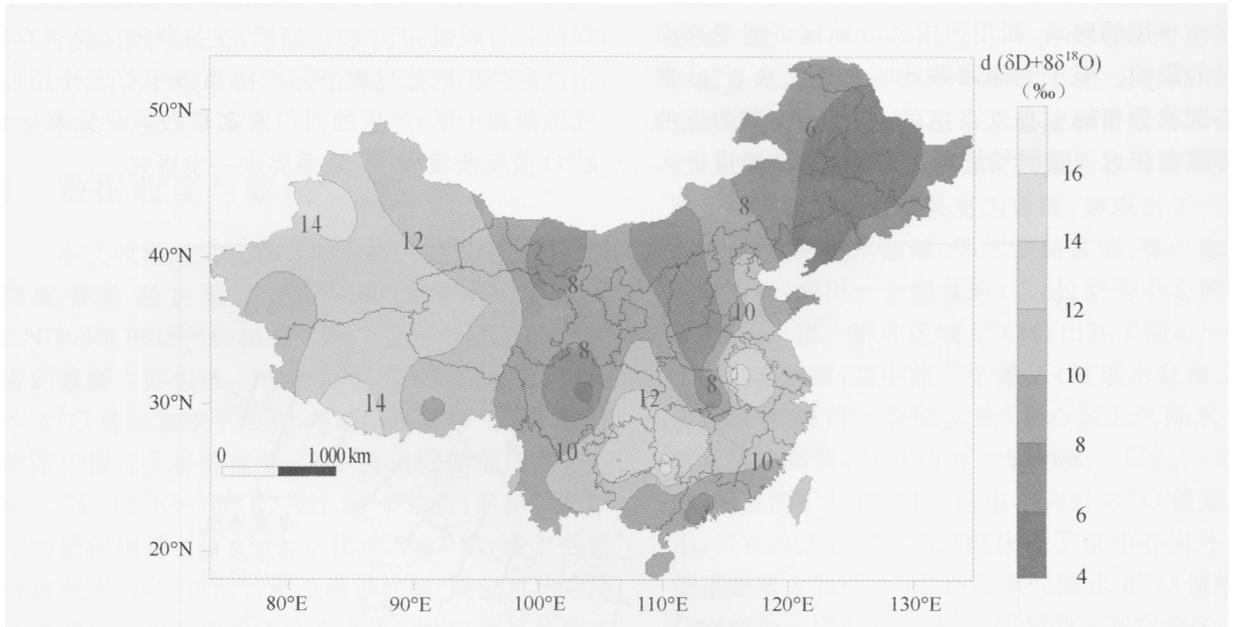


图3 全国大气降水水汽盈余分布(资料同图1)

Fig. 3. Map showing the distribution of average annual  $d(\delta D+8\delta^{18}O)$  values of modern precipitation in China.

$\delta^{18}O$  的温度效应和降水量效应分布, 总体上也与前人研究相似<sup>[17]</sup>, 即在我国, 温度效应主要出现在大致以东营—漯河—襄樊—成都—甘孜—那曲—朗玛为分界线的中、高纬度地区, 非常有规律地呈现出越向大陆内部温度效应越强烈的态势; 降水量效应则与温度效应相反, 出现在大致以抚顺—天津—石家

庄—武汉—衡阳—重庆—玛沁—沱沱河沿—朗玛为界的中、低纬度地区和青藏高原南部。从图 2、4 和 5 可见, 我国季风界线(图 2)与温度效应(图 4)和降水量效应(图 5)的分界线都基本上一致(而非与纬度完全对应), 即夏季风影响区域, 主要显示出降水量效应, 而另外一个区域主要显示温度效应。

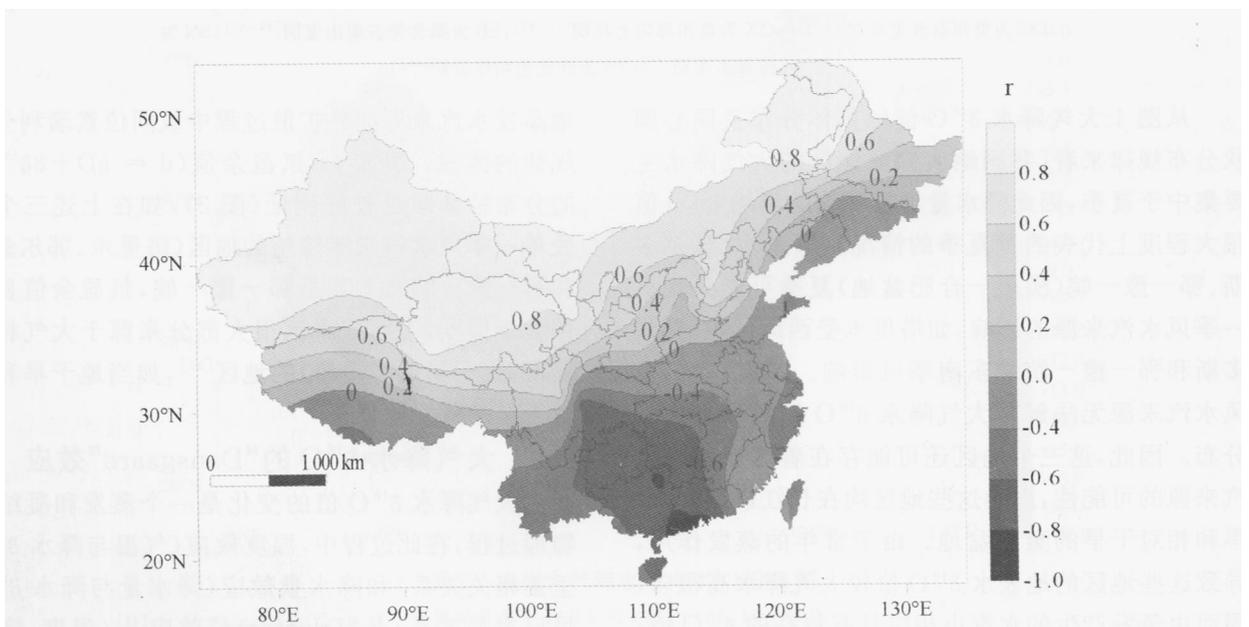


图4 全国大气降水年均  $\delta^{18}O$  温度效应(资料同图1)

Fig. 4. Temperature effect of average annual  $\delta^{18}O$  values of modern precipitation in China.

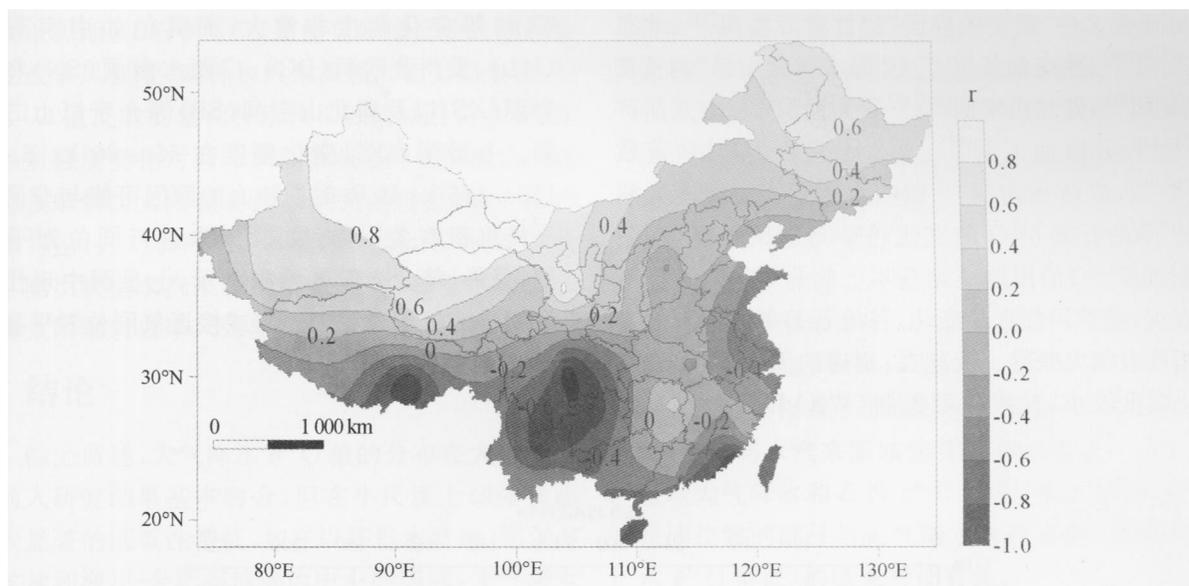


图 5 全国大气降水年均  $\delta^{18}\text{O}$  降水量效应(资料同图 1)

Fig. 5. Amount effect of average annual  $\delta^{18}\text{O}$  values of modern precipitation in China.

由图 5 可见, 在沿海地区和青藏高原南部出现了强降水量效应, 它的产生与强对流天气的降水过程相联系<sup>[17]</sup>, 往内地这种大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值与降水量的负相关性逐渐减弱。但是, 并非所有地区都体现出一致的规律性, 而是出现了一定的区域性特征, 即在川—滇—黔三省交界地区和湖南中东部(包括广西东北部和江西西部部分地区)分别出现了强降水量效应和弱降水量效应现象。从川—滇—黔三省的大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值与降水量的相关关系来看, 无论沿西南季风路线还是沿东南季风路线都出现了降水量效应增强的规律性, 这与中国大陆的整体规律性相反。而在湖南中东部地区出现了降水量效应“消失”的情况, 甚至在部分地区还出现了大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值与降水量存在微弱的正相关性。就目前的认识来看, 大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的降水量效应的机制还存在诸多疑问, 是否只是一个统计学关系? 很多研究实例表明, 大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的降水量效应可能是不同水汽来源对降水中稳定同位素影响的产物<sup>[8, 15, 49]</sup>。也就是说, 大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的降水量效应与水汽来源结构变化密切相关, 尤其是受西南季风和东南季风共同影响的地区, 而在仅受单一水汽来源的地区大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的降水量效应可能只是瑞利分馏的体现。

### 2.3 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的古气候意义——以石笋为例

大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值是古气候研究的重要组成部分, 是“将今论古”从而“将古论未来”研究关键的中

间环节。从前文分析可知, 中国大陆大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值分布具有总体规律性, 也存在着一些地区受不同季风(西南季风、东南季风或两者的综合)和蒸发作用的影响而呈现出区域特点; 此外, 中、低纬度地区大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值与降水量的负相关性在受单一季风影响的沿海和西藏南部地区可以被认为是降水量效应外, 其它地区如川—滇—黔等地这种负相关性还可能受西南季风和东南季风结构变化的影响, 体现出一定的复杂性。因此, 在利用地质档案大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值反演古气候演化历史的研究中, 研究点或面的区域性特征理应得到重视。也就是说, 不同区域古大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值所指示的古气候信息可能是不一致的, 不同区域古气候演化历史的空间对比需要特别小心。下面, 以石笋为例, 对在不同地区所获取的石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值进行同时段对比说明, 大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值区域性特征对古气候研究的意义。之所以选择石笋作为研究实例, 一是因为石笋目前所获取的都是 50 万年以来的古气候信息(受测年方法限制), 而中国大陆的地质地貌和河流发育约在百万年前已定型<sup>[50]</sup>, 所以在不同地区, 这段历史时期的古气候变化不会受区域性的地质构造运动所影响; 二是, 石笋研究程度较高, 研究区域也较为广泛, 易于多区域的空间对比。

虽然洞穴顶板盖层的厚度和植被覆盖、洞穴内空气流通和相对湿度等会对大气降水—石笋氧同位素信号产生干扰, 但总体上石笋氧同位素组成能直接反映大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值及变化情况。文献所报道

的处于图2中“温度效应区”的甘肃万象洞<sup>[31]</sup>、北京石花洞<sup>[37]</sup>、陕南佛爷洞<sup>[36]</sup>与“降水量效应区”的重庆新崖洞<sup>[33]</sup>、湖北山宝洞<sup>[43-45]</sup>和尚洞<sup>[35]</sup>、南京葫芦洞<sup>[27,30]</sup>、云南仙人洞<sup>[32]</sup>、贵州七星洞<sup>[41-42]</sup>和董歌洞<sup>[38-40]</sup>、广西水南洞<sup>[41]</sup>和响水岩洞<sup>[46]</sup>、福建天鹅洞<sup>[34]</sup>等的石笋  $\delta^{18}\text{O}$  的变化趋势与季风强度(太阳辐射强度<sup>[51]</sup>)的周期变化基本上吻合(图6)。但不难发现,随季风强度的变化,各地石笋氧同位素的变化幅度有很大差异。表现在:福建的天鹅洞(TE)等变化幅度较小,甘肃的万象洞(WX)和云南仙人洞

(XR)等变化幅度非常大,而其他如南京葫芦洞(HL)、贵州董歌洞(DG)、广西水南洞(SN)和响水岩洞(XS)以及湖北山宝洞(SB)等介于以上二者之间。七星洞(QX)变化幅度在65~80 ka B. P. 和110~135 ka B. P. 时期较大的原因可能与非同位素平衡沉积有关:参考文献<sup>[41]</sup>未进行同位素平衡检测;另外,笔者未发表结果显示,七星洞中现代化学沉积物的沉积过程未达到或接近氧同位素平衡的现象非常普遍。

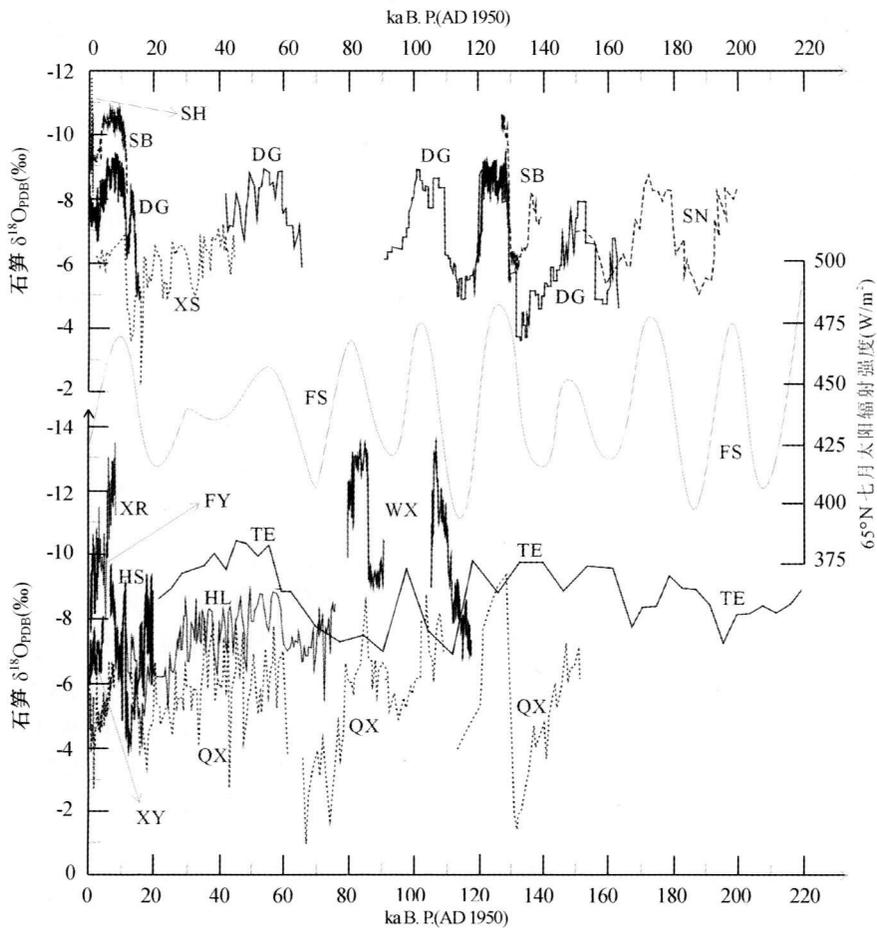


图6 石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值与太阳辐射强度关系

Fig. 6. Relationship between stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  values and the solar radiation intensity.

(注: FS 为 N65 七月太阳辐射强度<sup>[51]</sup>, 其他字母所代表的洞穴名称等见图2)

从图2、图5可以看出,甘肃万象洞位于鄂尔多斯盆地大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值同心圆状分布区,该地区不仅受东南季风的影响,还受区域强烈蒸发作用影响;云南仙人洞处于西南季风和东南季风的双重影响下。受两种水汽来源的影响,甘肃万象洞和云南仙人洞石笋氧同位素制约因素较为复杂,太阳辐射强

度的变化是否对不同水汽来源起着一致作用还不得而知。相对而言,受单一水汽来源控制的福建天鹅洞与太阳辐射强度的变化较为一致,变化幅度较小;而水汽来源以东南季风为主、西南季风为次的其它地区洞穴石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值处于中等变化态势。这初步表明,石笋记录同位素的信号与区域特征有关,单一

水汽来源地区, 石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值能更好地反映太阳辐射强度或季风强度; 两种水汽来源强度相当的地区, 石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值反映的是两种水汽来源的综合信息, 在太阳辐射强度变化对两种水汽影响差异性明确之前很难直接解析为太阳辐射或季风强度信息; 单一水汽来源为主, 另一水汽来源为次的地区, 石笋  $\delta^{18}\text{O}$  值基本能反映主水汽来源的变化信息, 即基本可以解析为太阳辐射或季风强度变化。

### 3 结论

综上所述, 大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的分布在大尺度上与前人研究结果基本吻合, 但在小尺度上却体现出比较显著的区域性特征, 如在以塔里木盆地、鄂尔多斯盆地和潢川-合肥盆地等为中心的区域, 大气降水

$\delta^{18}\text{O}$  值具有明显高于其它地区的值, 而以拉萨和川-滇-黔为中心的区域大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值较低, 明显低于其它地区。大气降水出现  $\delta^{18}\text{O}$  较高值或降低值的主要原因可能与当地蒸发和季风等因子控制的水汽来源特征有关。对我国大气降水温度效应和降水量效应分布特征的研究结果与前人的相似, 即夏季季风影响区域, 主要显示出降水量效应, 而另外一个区域主要显示温度效应。但降水量效应也显示出一定的区域性特征, 如在川-滇-黔三省交界地区和湖南中东部分别出现了强降水量效应和弱降水量效应现象, 可能与水汽来源结构变化密切相关。对比分析区域大气降水和石笋  $\delta^{18}\text{O}$  特征, 初步表明, 石笋记录同位素的信号与大气降水水汽来源(也即大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  特征)的区域特征有关。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Dansgaard W. The abundance of  $^{18}\text{O}$  in atmospheric water and water vapour[ J ]. *Tellus*, 1953, 5(4): 461—469
- [ 2 ] IAEA/WMO. Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Accessible at: <http://isohis.iaea.org/> IAEA (2004). Isotope Hydrology Information System. The ISOHIS Database. Accessible at: [http://isohis.iaea.org](http://isohis.iaea.org/) [ DB/OL ]. 2004.
- [ 3 ] 章申, 于维新, 张青莲. 我国西藏南部珠穆朗玛峰地区冰雪中氕和重氧的分布[ J ]. *中国科学*, 1973(4): 430—433
- [ 4 ] 林瑞芬, 卫克勤. 北京及上梅降水的同位素组成[ A ]. *中国科学院地理化学研究所年报(1980~1981)* [ C ]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1982: 39—41
- [ 5 ] 卫克勤, 林瑞芬, 王志祥. 北京地区降水中的氕、氧 18、氙含量[ J ]. *中国科学(B辑)*, 1982(8): 754—757
- [ 6 ] 郑淑慧, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素的研究[ J ]. *科学通报*, 1983, (13): 801—806
- [ 7 ] 于律生, 虞福基, 刘德平. 中国东部大气降水中氢、氧同位素组成[ J ]. *地球化学*, 1987, 16(1): 22—26
- [ 8 ] 卫克勤, 韩瑞芬. 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
- [ 9 ] 章新平, 姚檀栋. 青藏高原降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度和降水量的关[ J ]. *地理科学*, 1995, 15(1): 1—7
- [ 10 ] 章新平, 姚檀栋, 田立德. 青藏高原降水中  $\delta^{18}\text{O}$  时空分布特征初探[ J ]. *湖南师范大学自然科学学报*, 1996, 19(1): 83—86
- [ 11 ] 刘进达, 赵迎昌, 刘恩凯. 中国大气降水稳定同位素时空分布规律探讨[ J ]. *勘察科学技术*, 1997, (3): 34—39
- [ 12 ] 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 青藏高原南北降水中  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  关系及水汽循环[ J ]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(3): 214—220
- [ 13 ] Wang C H, Peng T R. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of Taipei precipitation: 1990—1998[ J ]. *Western Pacific Earth Sciences*, 2001, 1(4): 429—442
- [ 14 ] 章新平, 刘晶淼, 田立德, 等. 亚洲降水  $\delta^{18}\text{O}$  沿不同水汽输送路径的变化[ J ]. *地理学报*, 2004, 59(5): 699—708
- [ 15 ] 章新平, 田立德, 刘晶淼, 等. 沿三条水汽输送路径的降水中  $\delta^{18}\text{O}$  变化特征[ J ]. *地理科学*, 2005, 25(2): 190—196
- [ 16 ] 章新平, 刘晶淼, 孙维贞, 等. 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)*, 2006, 36(9): 850—859
- [ 17 ] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的分布特点[ J ]. *地理学报*, 1998, 53(4): 356—364
- [ 18 ] 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(1): 225—230
- [ 19 ] 李红春, 顾德隆, 赵树森, 等. 北京石花洞地区水系氢氧同位素及氙含量研究—石花洞研究系列之一[ J ]. *地震地质*, 1996, 18(4): 325—328
- [ 20 ] 崔军, 安树青, 徐振, 等. 卧龙巴郎山高山灌丛降雨和穿透水稳定性氢氧同位素特征研究[ J ]. *自然资源学报*, 2005, 20

(5): 660—668

- [ 21] 田立德, 姚檀栋, 余武生, 等. 青藏高原水汽输送与冰芯中稳定同位素记录[ J ]. 第四纪研究, 2006, 26(2): 145—152
- [ 22] 刘文杰, 李鹏菊, 李红梅, 等. 西双版纳热带季节雨林林下土壤蒸发的稳定性同位素分析[ J ]. 生态学报, 2006, 26(5): 1303—1311
- [ 23] Yamanaka T, Tsujimura M, Oyunbaatar D, et al. Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for the atmospheric water cycle[ J ]. Journal of Hydrology, 2007, 333(1): 21—34
- [ 24] Hoffmann G, Heimann M. Water isotope modeling in the Asian monsoon region[ J ]. Quaternary International, 1997, 37: 115—128
- [ 25] 高登义, 吕位秀. 青藏高原对大气环流和天气系统影响的初步探讨[ A ]. 中国科学院西藏科学考察队. 珠穆朗玛峰地区科学考察报告(1966—1968): 气象与太阳辐射[ M ]. 北京: 科学出版社, 1975. 91—110
- [ 26] 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[ J ]. Science in China (D), 2002, 45(6): 481—493
- [ 27] Treble P C, Schmitt A K, Edwards R L, et al. High resolution Secondary Ionisation Mass Spectrometry (SIMS)  $\delta^{18}\text{O}$  analyses of Hulu Cave speleothem at the time of Heinrich Event I[ J ]. Chemical Geology, 2007, 238(3—4): 197—212
- [ 28] An Z, Porter S C. A synchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon[ J ]. Quaternary Science Review, 2000, 19(8): 743—762
- [ 29] Johnson K R, Ingram B L. Spatial and temporal variability in the stable isotope systematics of modern precipitation in China: implications for paleoclimate reconstructions[ J ]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 220(3—4): 365—377
- [ 30] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China[ J ]. Science, 2001, 294(5550): 2345—2348
- [ 31] Johnson K R, Ingram B L, Sharp W D, et al. East Asian summer monsoon variability during Marine Isotope Stage 5 based on speleothem  $\delta^{18}\text{O}$  records from Wanxiang Cave, central China[ J ]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 236(1—2): 5—19
- [ 32] 张会领, 袁道先, 覃嘉铭, 等. 云南寻甸地区最近八千年气候环境变迁[ J ]. 中国岩溶, 2004, 23(4): 293—298
- [ 33] 李廷勇, 李红春, 袁道先, 等. 重庆新崖洞 XY6 石笋 4.5ka 以来高分辨率  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  记录的气候变化[ J ]. 中国岩溶, 2006, 25(2): 95—100
- [ 34] 洪阿实, 彭子成, 李平, 等. 福建宁化天鹅洞石笋晚第四纪同位素古温度研究[ J ]. 地球化学, 1995, 24(2): 138—143
- [ 35] 黄俊华, 胡超涌, 周群峰. 湖北清江和尚洞石笋的高分辨率碳氧同位素及古气候研究[ J ]. 地球科学—中国地质大学学报, 2000, 25(5): 505—509
- [ 36] 李红春, 顾德隆, Dorte P, 等. 陕南石笋稳定同位素记录中的古气候和古季风信息[ J ]. 地震地质, 2000, 22(增刊): 63—78
- [ 37] 谭明, 刘东生, 秦小光, 等. 北京石花洞全新世石笋微生长层与稳定同位素气候意义初步研究[ J ]. 中国岩溶, 1997, 16(1): 1—10
- [ 38] Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transition of the last interglacial Asian Monsoon[ J ]. Science, 2004, 304(5670): 575—578
- [ 39] Dykoski C, Edwards R L, Cheng H, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China[ J ]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233(1—2): 71—86
- [ 40] Kelly M J, Edwards R L, Cheng H, et al. High resolution characterization of the Asian Monsoon between 146,000 and 99,000 years B. P. from Dongge Cave, China and global correlation of events surrounding Termination II[ J ]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 236(1—2): 20—38
- [ 41] 覃嘉铭, 袁道先, 程海, 等. 过去 25 万年黔桂地区千年尺度东亚季风气候的变化[ J ]. 中国岩溶, 2004, 23(4): 261—266
- [ 42] 蔡演军, 彭子成, 安芷生, 等. 贵州七星洞全新世石笋的氧同位素记录及其指示的季风气候变化[ J ]. 科学通报, 2001, 46(16): 1398—1402
- [ 43] 姜修洋, 汪永进, 孔兴功, 等. 神农架 140~124 kaBP 百年尺度东亚季风降水的石笋记录[ J ]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(3): 39—44
- [ 44] 姜修洋, 汪永进, 孔兴功, 等. 130kaBP 左右东亚季风突变过程的洞穴石笋记录[ J ]. 科学通报, 2005, 50(23): 2644—

- [ 45] 邵晓华, 汪永进, 程海, 等. 全新世季风气候演化与干旱事件的湖北神农架石笋记录[ J]. 科学通报, 2006, 51(1): 80—86
- [ 46] 李彬, 袁道先, 林玉石, 等. 桂林地区 4 万年来气候变化及其动力机制浅析[ J]. 地球学报, 2000, 21(3): 313—319
- [ 47] Johnson K R, Ingram B L, Sharp W D, et al. East Asian summer monsoon variability during Marine Isotope Stage 5 based on speleothem  $\delta^{18}\text{O}$  records from Wanxiang Cave, central China[ J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 236(1—2): 5—19
- [ 48] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[ J]. Tellus, 1964, 16(4): 436—468
- [ 49] 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
- [ 50] 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响[ J]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 381—390
- [ 51] Berger A, Loutre M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years[ J]. Quaternary Science Review, 1991, 10(4): 297—317

## REGIONAL CHARACTERISTICS OF MODERN PRECIPITATION $\delta^{18}\text{O}$ VALUES AND IMPLICATIONS FOR PALEOCLIMATE RESEARCH IN CHINA

LUO Wei-jun<sup>1,2</sup>, WANG Shi-jie<sup>1</sup>, LIU Xiu-ming<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China)

### Abstract

Stable oxygen isotope values of modern precipitation, stalagmites and other relative data from the GNIP/ISOHIS databases of IAEA/WMO and literature concerning China and its adjacent areas were collected and analyzed systematically. Results indicated that, the characteristics of precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  values and their amount effects were similar to those reported in previous studies on a regional scale, though there was a significant difference on a small scale. In detail, the  $\delta^{18}\text{O}$  values of precipitation in regions centered on Tarim, Ordos Basin and Huangchuan-Hefei Basin were significantly higher than those of other regions; while they were remarkably lower in regions centered on Lhasa, Sichuan-Yunnan-Guizhou provinces. Moreover, a stronger amount effect was observed in the border areas of Sichuan-Yunnan-Guizhou provinces and a weaker one in the eastern part of Hunan Province. The variation of  $\delta^{18}\text{O}$  values of precipitation may be caused mainly by the vapor source which is controlled by local surface evaporation, monsoon, etc.; and regional characteristics of the amount effect may be closely related to the variation of vapor sources structure. When comparing the relationships of  $\delta^{18}\text{O}$  values between precipitation and stalagmites in some regions, it was found that the  $\delta^{18}\text{O}$  values of stalagmites could well respond to solar radiation intensity or monsoon strength in a region where a single vapor source was dominant; and the  $\delta^{18}\text{O}$  values of stalagmites may reflect more comprehensive information in a region where there were two near vapor sources. It would be hard to directly interpret solar and/or monsoon intensity information from the  $\delta^{18}\text{O}$  values of stalagmites before their interacting mechanisms were completely understood.

**Key words:** modern precipitation; stable oxygen isotope; regional characteristic; stalagmite; China