

文章编号:1000-0240(2011)03-0624-10

# 我国大气降水中稳定同位素研究进展

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>, 王飞腾<sup>2</sup>

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 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, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 大气降水中稳定同位素的比率与降水产生过程中的气象条件密切相关, 可以利用其时空分布特征来反演大气过程, 示踪水汽来源, 反映天气气候的区域性特征. 对影响我国大气降水中稳定同位素组成与分布进行了总结, 探讨了影响降水中氢氧同位素的因素及空间变化特征, 并分别介绍了我国青藏高原区、西北干旱区和东部季风区等地区近年来降水中稳定同位素的研究进展, 并结合现有研究存在的问题对其前景进行了展望.

**关键词:** 降水; 稳定同位素; 影响因素; 分布规律

**中图分类号:** 426.61<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A

## 0 引言

稳定同位素是自然水体的重要组成, 同位素在不同的比值分配到两种物质或物相中的同位素分馏现象, 发生在自然界水循环的每一个环节中, 且非常敏感地响应环境的变化. 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<sup>[1]</sup>. 随着气候的变化, 大气降水中稳定同位素氘(<sup>2</sup>H)和氧-18(<sup>18</sup>O)也会因空间和时间的变化而变化<sup>[1-3]</sup>. 因此, 降水中稳定同位素可作为水汽源的自然示踪或利用其变化来反演大气过程, 能在一定程度上反映天气气候与区域性特征<sup>[4]</sup>. 此外, 稳定同位素在冰芯中、树轮中、湖泊沉积中以及石笋中的古气候恢复以及水资源调查等方面研究取得了一系列成果<sup>[5-12]</sup>.

对降水中稳定同位素的观测和研究国外起步较早, 始于 20 世纪 50 年代初<sup>[2]</sup>. 为了在全球范围内调查环境同位素, 1961 年开始, 国际原子能机构

(IAEA)和世界气象组织(WMO)在全球范围内启动了降水中同位素观测计划(the Global Network of Isotopes in Precipitation, 简称 GNIP)<sup>[3]</sup>, 在全球共建立 100 多个观测点, 对降水中稳定同位素成分进行连续监测, 到目前关于降水中稳定同位素的监测网站已有 550 多个.

我国水循环过程中稳定同位素研究起步相对较晚, 始于 1966 年珠穆朗玛峰科学考察<sup>[13]</sup>, 而 1983 年以前, 全球降水同位素监测网(GNIP)在我国只有香港一个站点<sup>[14]</sup>. 之后才陆续开始在齐齐哈尔、和田、银川、石家庄、天津、拉萨、昆明、长沙、贵阳、南京、福州、海口、桂林、西安、广州等城市建立长期观测站, 开始进行水样收集与降水中稳定同位素的研究工作, 到目前其中十多个监测站已被纳入 IAEA 全球观测网. 但从绝对数目上说, 仍不能满足科研的需要, 2004 年对照 GNIP, 借鉴国外已建立的国家大气降水同位素观测网络的成功经验, 以中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, 简称 CERN)各野外台站为依托, 开始建

收稿日期: 2010-10-08; 修订日期: 2011-01-06

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0019); 国家自然科学基金项目(40701035; 40631001; 40571033; 40701034; J0630966); 陇原青年创新人才扶持计划项目; 国家重点基础研究发展计划(973 计划)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(0714A51001); 西北师范大学知识与科技创新工程创新团队项目(NWNU-KJCXGC-03-66)资助

作者简介: 李亚举(1988—), 男, 河南平顶山人, 2009 年毕业于南阳师范学院, 现为在读硕士研究生, 主要从事同位素地球化学与全球变化方面的研究. E-mail: liyajul00@126.com

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

立中国大气降水同位素网络(Chinese Network Isotopes in Precipitation, 简称 CHNIP), 系统地对  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  进行观测<sup>[15]</sup>。

基于这些数据我国学者对降水中同位素进行丰富的研究<sup>[1, 16-23]</sup>, 对我国大气降水稳定同位素的分布规律进行了总结, 并对部分地区进行了较为详细的分析和讨论。本文就我国大气降水中稳定同位素组成与分布进行了总结, 探讨各种气象因素(如降水量、气温、季风等)对降水中同位素组成的影响, 归纳和综述了青藏高原区、西北干旱区和东部季风区的重要研究成果, 并简要论述了降水中稳定同位素未来的研究和发展趋势。

## 1 研究进展

### 1.1 影响降水中 $\delta^{18}O$ 的因素

根据 1961—1962 年汇集的资料, Dansgaard<sup>[3]</sup> 讨论了影响降水中同位素组成季节分布和地理分布的因素, 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、高度效应、降水量效应、大陆效应。这些效应主要考虑采样点本身的气象数据和地理要素。研究表明<sup>[2]</sup>, 在高纬度地区影响降水中稳定同位素组分变化的主要控制因子是温度, 且在南北两极表现得尤为明显<sup>[24]</sup>, 并且越深入大陆内部, 其正相关关系越密切<sup>[20]</sup>; 在低纬度热带地区则是降水量; 中纬度地区温度和降水量共同影响同位素的变化。我国学者根据国内外气象数据也论证了温度效应和降水量效应<sup>[25-26]</sup>。章新平等<sup>[27-28]</sup>认为在温度效应中, 上空降水云团的冷凝温度比地面温度与降水的  $\delta$  值有更为直接关系, 并得出在月尺度下无论是温度效应还是降水量效应, 在年际尺度下, 均存在一定程度的正相关关系, 刘忠方等<sup>[23]</sup>利用 BW 模型明确了中国降水中 $\delta^{18}O$ 的变化与纬度和海拔之间存在明显的负相关关系。

但相关研究发现降水气团的来源及其性质在某种程度上也是决定降水中同位素组成的主要因素<sup>[16]</sup>, 因为大气中的水汽是降水发生的物质前提, 故大气水汽中的稳定同位素组成对于降水中稳定同位素组成具有重要的影响<sup>[29-30]</sup>。水汽压的大小也对降水中的 $\delta^{18}O$ 值有影响<sup>[4]</sup>。章新平等<sup>[31]</sup>就对影响降水中的 $\delta^{18}O$ 值大小的第二类因素即水汽源地初始状态、水汽输送方式、云中饱和状态和云中液态水含量等进行研究, 也发现其对降水中 $\delta^{18}O$ 值有重要影响, 如发现雨滴在未饱和大气中降落时稳定同位素比率随降落距离而不断增大, 空气湿度越小增加幅

度越明显, 并受大气水汽中稳定同位素比率的影响<sup>[32-33]</sup>。Zhang Xinping 等<sup>[34]</sup>利用动力分馏模型对产生在混合云中的稳定同位素效应进行了模拟, 结果显示, 凝结水中稳定同位素比率与最大可能凝结量之间存在反相关关系, 但到达地面的降水中稳定同位素比率与之并不一致, 所以提出了湿度效应, 即降水中稳定同位素比率与大气的温度露点差  $\Delta T_d$  存在显著的正相关关系<sup>[35]</sup>。此外, 王永森等<sup>[36]</sup>建立微分方程模型试图通过数值模拟降雨过程的稳定同位素组成变化。

我国大部地区属于季风气候, 由于季风环流通过影响和制约大尺度水汽输送场的分布和水汽收支状况对季风区的降水产生影响, 同时又是水汽输送的重要载体, 因此, 它直接控制着降水特征的空间分布格局和季节分配特征, 使温度效应、纬度效应受到抑制, 从而使影响我国降水事件中气象条件的变化更为复杂, 季风气候条件下的同位素行为必定具有其独特的方式和过程<sup>[37-38]</sup>。这使得对季风降水中 $\delta^{18}O$ 的研究显得尤为重要。卫克勤等<sup>[16]</sup>和 Yamanaoka 等<sup>[39]</sup>的研究表明, 受季风活动的影响, 中国东部降水的 $\delta^{18}O$ 具有明显的降水量效应。庞洪喜等<sup>[38]</sup>总结出季风降水中 $\delta^{18}O$ 还与太阳黑子和 ENSO 有关, 之后<sup>[37]</sup>进一步分析出季风区风场中高空风速与降水中 $\delta^{18}O$ 存在显著正相关关系, 还利用稳定同位素瑞利分馏模型提出了一种确定季风水汽来源的新方法<sup>[40]</sup>。

概括来讲, 影响大气降水中氢、氧同位素组成的因素主要有两个: 一是区域气候的环境背景, 即该降水气团的来源、性质以及水汽由产生到输送直至发生降水事件整个过程中氢、氧同位素发生的一切变化; 二是局部的地理因素, 包括降水时的各种气象要素(降水量、气温和湿度等)以及当地的纬度、海拔高度等<sup>[41]</sup>。降水中稳定同位素的时空变化是这些要素相互作用、综合影响的结果。

结合我国学者总结的这些分布规律, 对我国大气降水中稳定同位素组成的研究, 可以揭示形成我国大气降水水汽来源与水汽循环方式, 探讨季风活动、ENSO 等气候事件对我国降水中稳定同位素组成时空分布的影响, 以及分析区域间差异。

### 1.2 我国降水中 $\delta^{18}O$ 的空间分布

就全球分布特点而言, 受气候条件和地理因素影响, 降水中 $\delta^{18}O$ 一定程度上反映出天气气候的区域性特征<sup>[4]</sup>。由于我国的地理位置和多样的气候条件, 致使降水中 $\delta^{18}O$ 在地区分布上出现差异性。章

新平等<sup>[20]</sup>根据 GNIP 数据绘制出我国 $\delta^{18}\text{O}$ 时空分布图(东南部地区以及西北地区的大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 较高,东北和青藏高原南部的 $\delta^{18}\text{O}$ 则较低),并给出了比较详尽而合理的解释,提出了影响我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的 3 条水汽路线<sup>[1]</sup>.刘进达<sup>[19]</sup>研究表明,我国大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的总体规律是东南沿海一年四季均为高值区,而低值区则随时间不同有所变化.就我国中高纬度和中低纬度,冬夏半年 $\delta^{18}\text{O}$ 存在差异性;章新平<sup>[20, 35]</sup>认为这与温度变化和不同来源气团的季节交替有关.降水中稳定同位素比率的季节分布大体上分为两类:在中高纬度内陆地区,受大陆性气候的影响,降水中稳定同位素比率与温度存在显著的正相关关系,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节分布与温度的季节分布相同,属于温度效应;在沿海地区和受季风影响的地区,降水中稳定同位素比率与降水量存在显著的负相关关系,属于降水量效应.温度效应大致发生在 $34^\circ\sim 36^\circ\text{N}$ 以北地区<sup>[42]</sup>.罗维均等<sup>[43]</sup>运用了更多的数据量得出: $\delta^{18}\text{O}$ 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,这与前人的研究结果类似,但在小尺度上具有显著的区域性特征,这可能与当地蒸发、季风和在水汽来源的特征有关.

### 1.3 我国区域间降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的差异研究

由于我国幅员辽阔,区域跨度大,地貌类型众多,而监测网又相对较少,因此对于我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究主要集中在典型区域和热点区域.本文参照黄秉维<sup>[44]</sup>对中国综合自然区域的划分,把我国分为青藏高原区、西北干旱区和东部季风区 3 个区域进行详细讨论.

#### 1.3.1 青藏高原区

青藏高原上现代冰川十分发育,是中低纬度冰川分布最多的区域,为青藏高原古气候古环境研究提供了理想的场所.近 20 a 来,我国科学家与国际同行合作先后在青藏高原不同地区钻取了大量冰芯<sup>[45-48]</sup>.随着高原冰芯的研究的迅速开展,也为降水中稳定同位素研究提供了契机.研究表明,由于青藏高原特殊的地理位置和地形,使得整个高原面上降水的水汽来源比较复杂.受不同水汽来源和性质的影响,青藏高原不同地区降水中稳定同位素比率的变化具有不同的变化规律.所以,可以将其划分为季风区、非季风区以及季风区和非季风区的过渡区.

相关研究结果表明,青藏高原南部在夏季季风

开始时降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值突然大幅度降低<sup>[49]</sup>,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出降水量效应<sup>[41]</sup>,这可能与低层洋面蒸发水汽输送有关<sup>[50]</sup>.而又有研究表明,除了夏季季风活动期降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 表现为低值,而一年中其他季节均表现为相对高值<sup>[51-53]</sup>,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的相关系数是负值,不表现出温度效应.Tian Lide 等<sup>[54]</sup>研究发现,在高原的中南部地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 夏季变化同季风活动的强弱有密切的关系,并模拟了南部地区季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的波动与水汽输送的关系,即有很强的降水量效应.但在长时间尺度上,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度仍然存在一定的正相关关系<sup>[47]</sup>,在冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 也表现为温度效应<sup>[55]</sup>.另外,在该区的高海拔地区,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的高程效应表现非常明显<sup>[56]</sup>,但同时地形对降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随高程的分布也有较大影响<sup>[57]</sup>.

在青藏高原中部地区, $32^\circ\sim 33^\circ\text{N}$ 一线(唐古拉山)是青藏高原一个重要的气候分界线<sup>[58-59]</sup>,即季风区与非季风区的过渡区域.夏季降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 受到西南季风活动的入侵有一定的降低趋势,即降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 都记录西南季风活动的信息<sup>[60-61]</sup>,但是相比南部地区,其降低趋势相对较弱<sup>[62]</sup>;而在季风间歇期,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 仍然表现相对高值,水汽主要来源于局地水汽的再循环<sup>[63]</sup>.也有研究表明,青藏高原中部夏季降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的波动受制于大规模天气过程,而不是地方性的气象条件<sup>[64]</sup>.总之,夏季伴随西南季风进入高原南部的降水形成的降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 较低,季风活动越强,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 越低;从青藏高原北部而来的水汽或地方蒸发水汽形成的降水,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高.但在全年尺度上,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度之间存在一定的正相关,而在季风爆发前,二者相关性更显著,夏季季风降水削弱了降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的关系<sup>[61]</sup>.

青藏高原北部地区,属于内陆干旱荒漠气候,许多研究表明降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度二者呈正相关关系,表现为温度效应<sup>[47, 65-66]</sup>,且许多站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度之间都存在非常好的线性关系.姚檀栋等<sup>[66]</sup>还对降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和气温的正相关关系通过数学模型进行了定量描述:降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 每增大(或减少)1‰,温度上升(或下降)约 $1.6^\circ\text{C}$ .降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 还与海拔呈现反相关的关系,这实际上也反映了温度变化对 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响<sup>[46, 67]</sup>.也正是因为青藏高原北部降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间存在明显的正相关关系,该地区冰芯中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值气温的可靠代替指标,对研究古气候有重要意义.

综上所述, 青藏高原区不同地区降水中稳定同位素变化表现出不同的特征, 这主要与当地气温、湿度、气压、气团的性质、海拔高度和复杂的降水条件等有关, 但主要受制于气团的性质。反映为受季风的影响降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度之间的正相关性由南到北越来越显著<sup>[68]</sup>, 夏季降水中平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值从南到北逐渐升高<sup>[69]</sup>。

### 1.3.2 西北干旱区

西北干旱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。冬季盛行西北风, 气候干燥, 降水很少; 夏季, 来自海洋的暖湿气团对这里的影响又很有限<sup>[70-71]</sup>。因此就造成西北地区以干旱为主的气候特征。而对西北干旱区大气降水中的稳定同位素组成时空分布规律的分析, 将有助于深刻明晰干旱区的水循环特征。

许多报道表明, 西北干旱区大气水线的截距和斜率都比全球大气水线要低, 在全年尺度下西北干旱区降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 并没有随着降水量的增大而显著贫化, 即不存在降水量效应, 夏季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 整体偏高, 与内陆地区在干季降水中的同位素数值普遍富集结果相一致<sup>[22]</sup>。但在全年尺度下西北干旱区的温度效应十分明显, 随着温度的升高,  $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐富集, 最大值出现在夏季, 最小值出现在冬季。而温度效应主要是因为大气和大气降水中稳定同位素的分馏主要受制于相变过程中的温度<sup>[72]</sup>, 利用稳定同位素比率/温度之间的简单线性关系可以对中高纬度不同沉积物中蕴含的气候信息进行合理的解释和定量的恢复, 这对于反演当地气候有重要意义<sup>[57]</sup>。

对西北干旱区降水水汽来源分析表明: 冬季, 西北干旱区的降水水汽主要来源于北冰洋偏北, 从新疆西北部流入西北干旱区, 并转向东输送<sup>[73-75]</sup>。但在西北干旱区西风的移动路径上,  $\delta^{18}\text{O}$ 表现为逐渐富集的现象<sup>[76]</sup>。这与西北干旱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有关<sup>[77-78]</sup>。反映了西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 独特的变化特征。夏季, 影响西北干旱区的气团较为复杂<sup>[79-80]</sup>, 不同地区表现出不同的特征。柳鉴容等<sup>[76]</sup>通过对夏季降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特征分析, 揭示了夏季西北干旱区的降水水汽来源及运动路径。

### 1.3.3 东部季风区

东部季风区大致以  $105^\circ\text{E}$  为界, 即沿大兴安

岭-阴山-贺兰山-乌鞘岭-念青唐古拉山-横断山脉以东的广大地区<sup>[44]</sup>。为了研究方便, 我们大致根据气温和降水以秦岭-淮河一线将东部季风区再划分为南方地区和北方地区。

我国的南方地区降水的水汽来源以及影响降水的因素非常复杂。该地区的水汽通道汇东太平洋、南海、孟加拉湾、阿拉伯海以及跨赤道气流之水汽, 并向华北和东亚输送, 强烈地影响着这些地区的季风降水<sup>[81]</sup>。另外, 该地区也是东亚季风、南亚季风和青藏高原季风相互作用的区域, 降水中的稳定氢氧同位素分布可以很好地示踪和反演夏季季风的水汽源及传输路径<sup>[3, 40, 82]</sup>, 因而倍受关注。例如, 庞洪喜等<sup>[40]</sup>应用西南季风区典型代表站新德里和东南季风区典型代表站香港夏季同位素资料, 确定了两站点季风降水的水汽来源, 所得结果与基本的大气环流背景相吻合。

研究表明, 南方地区大气降水同位素值表现出非常明显的季节变化: 夏半年偏负, 冬半年偏正。显著的降水量效应<sup>[83-85]</sup>说明, 南方雨季降水的水汽主要来源于低纬度海洋, 受海洋水汽的影响, 空气湿润, 降水量大, 蒸发弱, 重同位素富集作用轻, 因此, 降水中稳定同位素比率低; 旱季受大陆性气团的影响, 空气干燥, 降水量小蒸发强, 重同位素富集作用强, 降水中稳定同位素比率高, 但降水量效应对降水同位素组成影响较大, 并已大大掩盖了温度效应。与当地气温相比较,  $\delta^{18}\text{O}$ 与气温存在明显的负相关性, 这是低纬季风区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化所特有的现象<sup>[16, 22, 86]</sup>, 但也存在一些分歧, 庞洪喜等<sup>[87]</sup>对天气尺度下丽江地区季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究认为 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度存在一定的正相关关系; 章新平等<sup>[22]</sup>对蒙自、思茅(今普洱)、腾冲 3 站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究发现降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与不同高度大气的日平均温度存在显著的负相关关系。

从空间上看,  $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现呈中间低, 两边高的趋势: 中部广西、贵州两省区的 $\delta^{18}\text{O}$ 值最低; 向东、西两侧依次逐渐升高<sup>[88]</sup>。中部地区 $\delta^{18}\text{O}$ 值低, 可能是东南季风和西南季风共同影响的结果<sup>[86]</sup>。

另外, 本区在夏季风时常受台风和热带低压的影响, 有研究表明<sup>[88-89]</sup>, 台风也是影响降水 $\delta$ 值明显季节差异的原因。当台风带来的降水量在月降水量中的比重较大时, 降水中的同位素分布也可以在一定程度上刻画台风的运动路径, 即同位素对台风路径的指示作用。

我国北方地区地处北半球中纬度地带, 冬季西

伯利亚高压控制, 强冷空气活动频繁, 降水较少, 夏季受太平洋暖湿空气影响, 雨量丰沛<sup>[90]</sup>. 平均温度和降水量总体呈由南向北逐渐递减的趋势.

不同地区影响降水同位素的气候因子不同. 在北方地区, 降水量、温度(地面温度和露点温度)、水汽压和风(风速和风向)都是影响降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的气候因子<sup>[89]</sup>. 但由于同位素的分馏作用主要受制于相变过程中的温度, 随着向内陆的延伸, 温度逐渐成为影响 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的主要因子: 由南向北, 温度效应逐渐增强, 冬季贫化, 夏季富集; 降水量效应由全年存在, 变为只在主要降水期(6—9月)存在<sup>[23]</sup>. 温度效应的表现形式为: 在中低纬度地区, 控制降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的主要地理因子是高程; 在远离海洋的内陆地区, 纬度则成为主要因素. 其实这些都是温度效应的派生<sup>[89]</sup>.

#### 1.4 我国降水中大气水线和过量氘的研究

在全球范围内水循环蒸发、凝结过程中出现的同位素分馏, 导致大气降水的氢、氧同位素组成呈线性相关变化, 这一规律一般可以用  $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$  数学方程表示, 称之为全球大气降水方程, 即 Craig 方程<sup>[91]</sup>.

大气水线方程斜率反映了同位素分馏类型, 如若斜率为 8, 说明降水形成于同位素平衡分馏; 反之, 则说明降水产生于非平衡分馏. 由于在自然条件下, 由于从水汽源区到雨滴降落, 影响稳定同位素分馏的因子之间存在差异, 因此各地大气水线的斜率会不同程度的偏离 8. 我国学者对中国的大气水线亦作了大量研究, 郑淑蕙等<sup>[92]</sup>较早地提出了中国降水线方程  $\delta\text{D}=7.9\delta^{18}\text{O}+8.2$ , 随后又涌现出大量关于我国各地大气水线的报道(表 1). 一般来说, 在干旱和半干旱地区降水较少且蒸发强烈, 雨滴降落过程中由不平衡蒸发引起的同位素分馏, 使方程斜率较低. 温度越高, 湿度越小, 大气水线的斜率也越小, 截距值将随着偏离的程度而减小<sup>[93]</sup>. 相比, 东部季风区的斜率和截距较为接近, 反映了具有相似的气候条件和水汽来源. 但也看出, 越接近沿海其与全球大气水线越接近, 这也许说明全球大气水线方程在相当程度上反映了海洋性气候的降水氢、氧同位素特征<sup>[83]</sup>.

Dansgaard 由大气水线定义了过量氘:  $d=\delta\text{D}-8\delta^{18}\text{O}$ , 降水中过量氘主要受制于水汽源区的相对湿度、海温和风速等气象条件<sup>[2]</sup>,  $d$  值反映形成降水过程的气团同位素, 含有形成暖湿气团源区蒸发过程性质的重要信息, 包括蒸发过程的平衡或

表 1 我国部分站点 $\delta\text{D}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

Table 1 Some relations between  $\delta\text{D}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in some stations of China

站点	水线方程	相关系数
黑河流域 <sup>[94]</sup>	$\delta\text{D}=4.14\delta^{18}\text{O}-20.69\%$	0.99
西宁 <sup>[93]</sup>	$\delta\text{D}=6.96\delta^{18}\text{O}-30.19\%$	0.66
德令哈 <sup>[93]</sup>	$\delta\text{D}=5.86\delta^{18}\text{O}-27.28\%$	0.57
乌鲁木齐 <sup>[78]</sup>	$\delta\text{D}=7.21\delta^{18}\text{O}+4.50\%$	0.95
宜昌 <sup>[20]</sup>	$\delta\text{D}=8.4\delta^{18}\text{O}+15\%$	0.97
南京 <sup>[20]</sup>	$\delta\text{D}=8.43\delta^{18}\text{O}+15.46\%$	0.99
贵阳 <sup>[84]</sup>	$\delta\text{D}=8.83\delta^{18}\text{O}+22.15\%$	0.99
昆明 <sup>[20]</sup>	$\delta\text{D}=7.34\delta^{18}\text{O}+4.18\%$	0.98
腾冲 <sup>[16]</sup>	$\delta\text{D}=8.71\delta^{18}\text{O}+19.78\%$	0.99
桂林 <sup>[95]</sup>	$\delta\text{D}=8.42\delta^{18}\text{O}+16.28\%$	0.99
福州 <sup>[20]</sup>	$\delta\text{D}=8.84\delta^{18}\text{O}+16.49\%$	0.98
厦门 <sup>[83]</sup>	$\delta\text{D}=8.16\delta^{18}\text{O}+10.68\%$	0.99
香港 <sup>[96]</sup>	$\delta\text{D}=8.13\delta^{18}\text{O}+11.39\%$	0.99
海口 <sup>[20]</sup>	$\delta\text{D}=7.89\delta^{18}\text{O}+11.04\%$	0.99

不平衡状态和蒸发速率等<sup>[16]</sup>. 所以, 过量氘是示踪水汽源区的一个重要参数. 在利用  $d$  对我国不同区域水汽来源调查方面也有较多成果, 卫克勤等<sup>[16]</sup>利用过量氘进一步证实了我国季风区, 冬、夏季风期间降水云团有不同的来源. Tian Lide 等<sup>[97]</sup>通过分析青藏高原南、北部降水中  $d$  的变化特征, 印证了唐古拉山是青藏高原季风区与非季风区的重要分界线, 并得出喜马拉雅山中段并非只受西南季风影响, 西风输送也占重要部分<sup>[98]</sup>. 庞洪喜等<sup>[99]</sup>基于降水中  $d$  和水汽源区相对湿度关系的考虑, 认为西阿拉伯海是新德里季风水汽的主要来源. 最近, 章新平等<sup>[100]</sup>利用  $d$  对西南地区降水的研究同样发现气团性质是制约  $d$  季节性变化的重要因素.

## 2 小结与展望

尽管稳定同位素在自然水中所占比例很小, 但降水中稳定同位素含量能在一定程度上反映了天气气候与区域性特征, 对研究全球变化和古气候有着至关重要的作用. 我们已经知道影响降水中稳定同位素的因素包括区域气候的环境背景和局部的地理因素, 降水中稳定同位素的空间变化是这些要素相互作用、综合影响的结果. 而针对某一具体的研究区域, 实际上存在着某些能够起到主导作用的因素. 也正是如此, 我国降水中稳定同位素在季节上和空间上, 都有着一定的地域差异性. 但综合分析

国际和国内降水中稳定同位素研究,我国降水中稳定同位素研究存在以下问题:1)受仪器限制,相对稳定氧同位素研究,对我国稳定氢同位素和过量氘的研究还不够丰富;2)利用稳定同位素示踪大尺度水汽循环过程的研究多,而利用稳定同位素示踪水汽的微循环过程的研究却不多见;3)水汽中的稳定同位素研究也不多。另外,对一些新问题新发现往往缺少进一步深入的研究,多数科研项目规模也较小,对同位素技术的应用还不足够。全球变化已成为国际地学研究的前沿领域之一,同位素技术也成为热点,随着国内外一系列同位素项目的开展(CHNIP),监测点和数据量不断增大,这必将对更加系统地开展我国大气降水氢氧同位素工作产生重大促进作用。

#### 参考文献(References):

- [1] Zhang Xinping, Liu Jingmiao, Tian Lide, *et al.* Variations of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation along vapor transport paths over Asia[J]. *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[J]. *地理学报*, 2004, **59**(5): 699–708.]
- [2] Dansgaard W. The abundance of  $\delta^{18}\text{O}$  in atmospheric water and water vapour[J]. *Tellus*, 1953, **5**(4): 461–469.
- [3] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436–468.
- [4] Zhang Xinping, Yao Tandong. World spatial characteristics of oxygen isotope ratio in precipitation[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, **16**(3): 202–210. [章新平, 姚檀栋. 全球降水中氧同位素比率分布特点[J]. *冰川冻土*, 1994, **16**(3): 202–210.]
- [5] Rozanski K. Deuterium and oxygen-18 in European groundwater links to atmospheric circulation in the past[J]. *Chemical Geology*, 1985, **52**: 349–363.
- [6] Yao T D, Thompson L G. Trends and features of climatic changes in the past 5000 years recorded by the Dunde Ice Core [J]. *Annals of Glaciology*, 1992, **16**: 21–24.
- [7] Dansgaard W, Johansen S J, Clausen H B, *et al.* Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record[J]. *Nature*, 1993, **364**: 218–220.
- [8] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Daviss M E, *et al.* Late glacial stage and Holocene tropical ice core records from Huscaran, Peru[J]. *Science*, 1995, **269**: 46–50.
- [9] Bryant J D, Koch P L, Froelich P N, *et al.* Oxygen isotope partitioning between phosphate and carbonate in mammalian apatite[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, **60**: 5145–5148.
- [10] Fricke H C, Clyde W C, O'Neil J R. Intra-tooth variations in  $\delta^{18}\text{O}(\text{PO}_4)$  of mammalian tooth enamel as a record of seasonal variations in continental climate variables[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1998, **62**: 1839–1850.
- [11] Chamberlain C P, Poage M A. Reconstructing the paleotopography of mountain belts from the isotopic composition of authigenic minerals[J]. *Geology*, 2000, **28**(2): 115–118.
- [12] 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[J]. *Geology*, 2000, **28**(3): 243–246.
- [13] Zhang Shen, Yu Weixin, Zhang Qinglian, *et al.* Distribution of  $^2\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$  in ice, firn and water in Qomolangma, Southern Tibetan Plateau, China[J]. *Science in China (A)*, 1973 (4): 430–433. [章申, 于维新, 张青莲, 等. 我国西藏南部珠穆朗玛峰地区冰雪水中氘和重氧的分布[J]. *中国科学(A辑)*, 1973(4): 430–433.]
- [14] Li Zhengong, Zhang Fawang. Hydrogen and Oxygen Isotope Research of Global Precipitation[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2004(1): 1–6. [李政红, 张发旺. 全球降水氢氧同位素研究进展[J]. *勘察科学技术*, 2004(1): 1–6.]
- [15] Song Xianfang, Liu Jianrong, Sun Xiaomin, *et al.* Establishment of Chinese Network of Isotopes in Precipitation (CHNIP) Based on CERN[J]. *Advance in Earth Sciences*, 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[J]. *地球科学进展*, 2007, **22**(7): 738–747.]
- [16] Wei Keqin, Lin Ruifen. Influence of the monsoon on the isotope of precipitation in China[J]. *Geochimica*, 1994, **23**(1): 33–41. [卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国降水同位素组成的影响[J]. *地球化学*, 1994, **23**(1): 33–41.]
- [17] Zhang Xinping, Yao Tandong. Relations of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation with temperature and precipitation amount in Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1995, **15**(1): 1–7. [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系[J]. *地理科学*, 1995, **15**(1): 1–7.]
- [18] Zhang Xinping, Yao Tandong, Tian Lide. Preliminary Study on Temporal-Spatial Distribution Features of  $\delta^{18}\text{O}$  in Precipitation of Qing-Zang Plateau[J]. *Acta Sci Nat Univ Norm Hunan*, 1996, **19**(1): 83–86. [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.]
- [19] Liu Jinda, Zhao Yingchang, Liu Enkai. Discussion on the stable isotope time-space distribution law of China atmospheric precipitation[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1997(3): 34–39. [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.]
- [20] Zhang Xinping, Yao Tandong. Distributional features of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, **53**(4): 356–364. [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.]
- [21] Tian Lide, Yao Tandong, Sun Weizhen, *et al.* The relationship between  $\delta\text{D}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and vapor cycle from the southern to the northern Tibetan Plateau[J]. *Science in China (D)*, 2001, **31**(3): 214–220. [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.]
- [22] Zhang Xinping, Liu Jingmiao, Sun Weizhen, *et al.* The oxygen isotope ratio in precipitation and relationship with meteorological factors in Southwest China[J]. *Science in China (D)*, 2006, **36**(9): 850–859. [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.]

- [23] Liu Zhongfang, Tian Lide, Yao Tandong. Spatial distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation over China[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, **54**(6): 804–811. [刘忠芳, 田立德, 姚檀栋, 等. 中国大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布[J]. 科学通报, 2009, **54**(6): 804–811.]
- [24] Zhang Xinping, Shi Yafeng, Yao Tandong. Variational features of precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  in Northeast Qinghai-Tibet Plateau [J]. Science in China(B), 1995, **25**(5): 540–547. [章新平, 施雅凤, 姚檀栋. 青藏高原东北部降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征[J]. 中国科学(B辑), 1995, **25**(5): 540–547.]
- [25] Zhang Xinping, Yao Tandong. Relations of oxygen isotopic composition in precipitation with temperature and precipitation amount in some regions of China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, **16**(1): 31–39. [章新平, 姚檀栋. 我国部分地区降水中氧同位素成分与温度和降水量之间的关系[J]. 冰川冻土, 1994, **16**(1): 31–39.]
- [26] Wang Dongsheng, Wang Jinglan, Shen Jianmei, *et al.* The isotope thermometer of precipitation in China[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2001, **20**(4): 394–396. [王东升, 王经兰, 申建梅, 等. 中国大气降水的氧同位素温标[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, **20**(4): 394–396.]
- [27] Zhang Xinping, Yao Tandong, Liu Jingmiao, *et al.* Isotopic variations under different time scales[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, **25**(4): 428–432. [章新平, 姚檀栋, 刘晶淼, 等. 不同时间尺度下的稳定同位素变化[J]. 冰川冻土, 2003, **25**(4): 428–432.]
- [28] Zhang Xinping. Comparisons on seasonal and annual variations of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation[J]. Acta Sci Nat Univ Norm Hunan, 2005, **28**(1): 88–93. [章新平. 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 月变化和年际变化的比较[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2005, **28**(1): 88–93.]
- [29] Hubner H, Kowski P, Hermichen W D, *et al.* Regional and temporal variations of Deuterium in the precipitation and atmospheric moisture of central Europe[C]//Isotope Hydrology 1978. Vienna, Austria: IAEA-publications, 1979: 289–307.
- [30] Schoch-Fischer H, Rozanski K, Jacob H *et al.* Hydrometeorological factors controlling the time variation of D,  $^{18}\text{O}$  and  $^3\text{H}$  in atmospheric water vapour and precipitation in the northern westwind belt[C]//Isotope Hydrology 1983. Vienna, Austria: IAEA-publications, 1984: 3–30.
- [31] Zhang Xinping, Yao Tandong. Factors of influencing  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and their relative importance[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, **17**(1): 65–71. [章新平, 姚檀栋. 影响降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的因素及其相对重要性[J]. 冰川冻土, 1995, **17**(1): 65–71.]
- [32] Zhang Xinping. Variation of stable isotope ratio in falling water drops[J]. Acta Sci Nat Univ Norm Hunan, 1997, **20**(2): 87–91. [章新平. 降落雨滴中稳定同位素比率的变化[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 1997, **20**(2): 87–91.]
- [33] Zhang Xinping, Xie Zichu, Yao Tangdong. Mathematical modeling of variation on stable isotopes in falling drop[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1998, **56**(1): 87–95. [章新平, 谢自楚, 姚檀栋. 降落雨滴中稳定同位素比率变化的数学模拟[J]. 气象学报, 1998, **56**(1): 87–95.]
- [34] Zhang Xinping, Nakawo M, Fujita K, *et al.* Variation of precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  in Langtang valley, Himalayas[J]. Science in China (D), 2001, **44**(9): 769–778.
- [35] Zhang Xinping, Yao Tandong, Tian Lide, *et al.* Humidity effect and its influence on seasonal distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, **26**(4): 420–405. [章新平, 姚檀栋, 田立德, 等. 湿度效应及其对降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 季节分布的影响[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(4): 420–405.]
- [36] Wang Yongsen, Chen Jiansheng, Wang Jiyang, *et al.* Theoretical research on the relationship between deuterium and oxygen 18 in precipitation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009, **20**(2): 204–208. [王永森, 陈建生, 汪集阳, 等. 降水过程中氘氧稳定同位素理论关系研究[J]. 中国农村水利水电, 2009, **20**(2): 204–208.]
- [37] Pang Hongxi, He Yuanqing, Zhang Zhonglin. Relationship between  $\delta^{18}\text{O}$  in monsoon precipitation and wind speeds in upper atmosphere[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, **49**(9): 905–908. [庞洪喜, 何元庆, 张忠林. 季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与高空风速关系[J]. 科学通报, 2004, **49**(9): 905–908.]
- [38] Pang Hongxi, He Yuanqing, Zhang Zhonglin. Correlation between  $\delta^{18}\text{O}$  in the monsoonal precipitation and some astronomy-atmosphere-ocean events[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, **26**(1): 42–47. [庞洪喜, 何元庆, 张忠林. 重要海-气-天文事件与新德里季风季水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(1): 42–47.]
- [39] Yamanaka T, Shimada J, Hamada Y, *et al.* Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the northern part of the North China Plain: Climatology and inter-storm variability [J]. Hydrological Processes, 2004, **18**: 2211–2222.
- [40] Pang Hongxi, He Yuanqing. Sources of  $\delta^{18}\text{O}$  in monsoon precipitation and monsoon vapor[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, **50**(20): 2213–2216. [庞洪喜, 何元庆. 季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与季风水汽来源[J]. 科学通报, 2005, **50**(20): 2213–2216.]
- [41] Tian Lide, Yao Tandong, Pu Jianchen, *et al.* Characteristics of stable isotope in summer precipitation at Lhasa[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, **19**(4): 295–301. [田立德, 姚檀栋, 蒲健辰, 等. 拉萨夏季降水中稳定同位素变化特征[J]. 冰川冻土, 1997, **19**(4): 295–301.]
- [42] Zhang Lin, Chen Zongyu, Nie Zhenlong, *et al.* Correlation between  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and surface air temperature on different time-scale in China[J]. Nuclear Techniques, 2008, **31**(9): 715–720. [张琳, 陈宗宇, 聂振龙, 等. 我国不同时间尺度的大气降水氧同位素与气温的相关性分析[J]. 核技术, 2008, **31**(9): 715–720.]
- [43] Luo Weijun, Wang Shijie, Liu Xiuming. Regional Characteristics of modern precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  values and implications for paleoclimate research in China[J]. Earth and Environment, 2008, **36**(1): 47–55. [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[J]. 地球与环境, 2008, **36**(1): 47–55.]
- [44] Huang Bingwei. A draft of comprehensive natural zoning of China[J]. Chinese Science Bulletin, 1959, **18**: 594–602. [黄秉维. 中国综合自然区划草案[J]. 科学通报, 1959, **18**: 594–602.]
- [45] Yao Tandong, Xie Zichu, Wu Xiaoling, *et al.* Climatic change since Little Ice Age recorded by Dunde ice cap[J]. Science in China(B), 1991, **34**(6): 760–767.
- [46] Yao Tandong, Jiao Keqin, Li Zhongqin, *et al.* Climate envi-

- ronmental record in Guliya Ice Cap[J]. *Science in China(B)*, 1994, **24**(7): 766—773. [姚檀栋, 焦克勤, 李忠勤, 等. 古里雅冰帽气候环境记录[J]. *中国科学(B辑)*, 1994, **24**(7): 766—773.]
- [47] Yao Tandong, Thompson L G, Mosley-Thompson E, *et al.* Climatological significance of  $\delta^{18}\text{O}$  in north Tibetan ice cores [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101** (D 23): 29531—29537.
- [48] Hou Shugui, Zhang Dongqi. Comparison of two ice core records since 1954 from Mt. Qomolangma (Everest) Region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(3): 256—260. [侯书贵, 张东启. 1954 年以来珠穆朗玛峰地区两支冰芯记录的对比分析[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(3): 256—260.]
- [49] Yao Tandong, Ding Liangfu, Pu Jianchen, *et al.* Characteristic of  $\delta^{18}\text{O}$  in snowfall and the relationship with vapor source in Tanggula Mountains, Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1991, **36**(20): 1570—1573. [姚檀栋, 丁良福, 蒲健辰, 等. 青藏高原唐古拉山地区降雪中  $\delta^{18}\text{O}$  特征及其与水汽来源的关系[J]. *科学通报*, 1991, **36**(20): 1570—1573.]
- [50] Tian Lide, Yao Tandong, Numaguti A, *et al.* Fluctuation of stable isotopes and vapor transportation process in the monsoonal precipitation in southern Tibetan Plateau[J]. *Science in China(B)*, 2001, **31**(Suppl.): 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)*, 2001, **31**(增刊): 215—220.]
- [51] Tian Lide, Yao Tandong, Schuster P F, *et al.* Oxygen-18 concentrations in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**: 4293—4302.
- [52] Tian Lide, Yao Tandong, White J C W, *et al.* Westerly moisture transport to the middle of Himalayas revealed from the high deuterium excess [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(10): 1026—1030.
- [53] Tian Lide, Yao Tandong, Yu Wusheng, *et al.* Stable isotopes of precipitation and ice core on the Tibetan Plateau and moisture transports[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(2): 145—152. [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.]
- [54] Tian Lide, Yao Tandong, Numaguti A, *et al.* Relation between stable isotope in monsoon precipitation in southern Tibetan plateau and moisture transport history[J]. *Science in China (D)*, 2001, **44**(Suppl.): 267—274.
- [55] Thompson L G, Yao Tandong, Mosley-Thompson E, *et al.* A high-resolution millennial record of the South Asian monsoon from Himalayan ice cores[J]. *Science*, 2000, **289**: 1916—1919.
- [56] Tian Lide, Yao Tandong, Zhang Yinsheng, *et al.* Chemical characteristics of summer precipitation at Xixiabangma, Tibetan Plateau[J]. *Environmental Science*, 1998, **19**(6): 1—5. [田立德, 姚檀栋, 张寅生, 等. 希夏邦马夏季降水中水化学特征[J]. *环境科学*, 1998, **19**(6): 1—5.]
- [57] Kang Shichang, Qin Dahe, Yao Tandon, *et al.* Characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation during summer monsoon season in high elevation of the Dasuopu Glacier, Mount Xixiabangma [J]. *Journal of Mountain Science*, 2000, **18**(1): 1—6. [康世昌, 秦大河, 姚檀栋, 等. 希夏邦马峰达索普冰川高海拔区夏季季风期间大气降水的  $\delta^{18}\text{O}$  特征[J]. *山地学报*, 2000, **18**(1): 1—6.]
- [58] Liu Xiaodong, Hou Ping. Variation of summer rainfall over Qinghaixizang Plateau and its association with the North Atlantic Oscillation[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, **57** (5): 561—570. [刘晓东, 侯萍. 青藏高原中东部夏季降水变化及其与北大西洋涛动的联系[J]. *气象学报*, 1999, **57**(5): 561—570.]
- [59] Wang Ninglian. The boundary between the northern and southern Tibetan Plateau with different variations in the warm season air temperatures on the decadal time scale[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(2): 165—172. [王宁练. 青藏高原南部和北部暖季气温年代际变化差异的界线位置[J]. *第四纪研究*, 2006, **26**(2): 165—172.]
- [60] Tian Lide, Yao Tandong, Shen Yongping, *et al.* Study on stable isotope in river water and precipitation in Naqu River basin, Tibetan Plateau [J]. *Advances In Water Science*, 2002, **13**(2): 206—210. [田立德, 姚檀栋, 沈永平等. 青藏高原那曲河流域降水及河流水体中氧稳定同位素研究[J]. *水科学进展*, 2002, **13**(2): 206—210.]
- [61] Yu Wusheng, Yao Tandong, Tian Lide, *et al.* Oxygen-18 isotopes in precipitation on the eastern Tibetan Plateau[J]. *Annals of Glaciology*, 2006, **43**: 263—268.
- [62] Yu Wusheng, Yao Tandong, Tian Lide, *et al.* Relationships between  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and air temperature and moisture origin on a south-north transect of the Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Research*, 2008, **87**: 158—169.
- [63] Yu W S, Ma Y M, Sun W Z, *et al.* Climatic significance of  $\delta^{18}\text{O}$  records from precipitation on the western Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**(15): 2131—2139. [余武生, 马耀明, 孙维贞, 等. 青藏高原西部降水中  $\delta^{18}\text{O}$  变化特征及其气候意义[J]. *科学通报*, 2009, **54**(15): 2131—2139.]
- [64] Tian Lide, Yao Tandong, Sun Weizhen, *et al.* Stable isotope variation of precipitation in the middle of Qinghai-Xizang Plateau and monsoon activity[J]. *Geochimica*, 2001, **30**(3): 217—220. [田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 青藏高原中部降水稳定同位素变化与季风活动[J]. *地球化学*, 2001, **30**(3): 217—220.]
- [65] Zhang Xinping, Shi Yafeng, Yao Tandong. Variational features of precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  in Northeast Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science in China(B)*, 1995, **38**(7): 854—864.
- [66] Yao Tandong, Thompson L G, Jiao Keqin, *et al.* Recent warming as recorded in the Qinghai Tibetan cryosphere[J]. *Annals of Glaciology*, 1995, **21**: 196—200.
- [67] Li Zhen, Yao Tandong, Tian Lide, *et al.* Variations of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation from the Muztagata Glacier, East Pamirs[J]. *Science in China(D)*, 2006, **49**(1): 36—42.
- [68] Zhang Xinping, Nakawo M, Yao Tandong, *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.
- [69] Tian Lide, Masson-Delmotte V, Stievenard M, *et al.* Tibetan plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D22): 28081—28088.
- [70] Yu Yaxun, Wang Jinsong, Li Qingyan. Spatial and temporal distribution of water vapor and its variation trend in atmo-

- phere over Northwest China[J]. *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[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(2): 149—156.]
- [71] Guo Jiangyong, Li Yaohui. Climatic characteristics of summer precipitation in northwestern China[J]. *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[J]. *干旱区研究*, 2006, **23**(3): 489—494.]
- [72] Zhang Xinping, Liu Jingmiao, Yao Tandong, *et al.* Simulations of stable isotopic fractionation in mixed cloud in middle latitudes—a case of the precipitation at Urumqi[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, **61**(1): 95—105. [章新平, 刘晶淼, 姚檀栋, 等. 中纬度地区混合云中稳定同位素分馏的数学模拟——以乌鲁木齐降水为例[J]. *气象学报*, 2003, **61**(1): 95—105.]
- [73] Lin Zhenyao, Zheng Du. The transportation path of vapor in east of Tarim Basin, Xinjiang[J]. *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[J]. *干旱区研究*, 1992, **9**(2): 1—7.]
- [74] Wang Keli, Jiang Hao, Zhao Hongyan. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the Northwest China[J]. *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[J]. *水科学进展*, 2005, **16**(3): 432—438.]
- [75] Wang Baojian, Huang Yuxia, Tao Jianhong, *et al.* Regional features and variations of water vapor in Northwest China[J]. *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[J]. *冰川冻土*, 2006, **28**(1): 15—21.]
- [76] Liu Jianrong, Song Xianfan, Yuan Guofu, *et al.* Characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation over Northwest China and its water vapor sources[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, **63**(1): 12—22. [柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J]. *地理学报*, 2008, **63**(1): 12—22.]
- [77] Li Hui, Zhou Hongfei. Variation characteristics of  $\delta\text{D}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  stable isotopes in the precipitation of Urumqi[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, **21**(9): 46—50. [李晖, 周宏飞. 乌鲁木齐地区大气降水中 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, **21**(9): 46—50.]
- [78] Li Hui, Jiang Zhongcheng, Wang Yue, *et al.* Variation characteristics of stable isotopes in the precipitation of Xinjiang [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, **16**(5): 157—161. [李晖, 蒋忠诚, 王月, 等. 新疆地区大气降水中稳定同位素的变化特征[J]. *水土保持研究*, 2009, **16**(5): 157—161.]
- [79] He Jinhai, Liu Yunyun, Chang Yue. Analysis of summer precipitation anomaly and the feature of water vapor transport and circulation in northwest China[J]. *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[J]. *干旱气象*, 2005, **23**(1): 10—15.]
- [80] 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[J]. *Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition)*, 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[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2006, **28**(4): 333—336.]
- [81] Sun Jianhua, Wei Jie, Zhao Sixiong, *et al.* The weather and its circulation in summer of 2005[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, **3**(1): 138—154. [孙建华, 卫捷, 赵思雄, 等. 2005年夏季的主要天气及其环流分析[J]. *气候与环境研究*, 2006, **3**(1): 138—154.]
- [82] Cui Jun, An Shuqing, Xu Zhen, *et al.* Isotopic characteristics of precipitation and throughfall of alpine shrubs on Balang Mountains in Wolong[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, **20**(4): 660—668. [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**(4): 660—668.]
- [83] Cai Minggang, Huang Yipu, Chen Min, *et al.* A study on hydrogen and oxygen isotopes composition of precipitation in Xiamen[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2000, **19**(4): 446—453. [蔡明刚, 黄奕普, 陈敏, 等. 厦门大气降水的氢氧同位素研究[J]. *台湾海峡*, 2000, **19**(4): 446—453.]
- [84] Zhang Xinping, Sun Weizhen, Liu Jingmiao. Stable isotopes in precipitation in the vapor transport path in Kunming of Southwest China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14**(5): 665—669. [章新平, 孙维贞, 刘晶淼. 西南水汽通道上昆明站降水中的稳定同位素[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, **14**(5): 665—669.]
- [85] Xu Zhen, Liu Yuhong, Wang Zhongsheng, *et al.* Relationships between stable isotopes in precipitation in Wolong and monsoon activity[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(4): 1007—1013. [徐振, 刘玉虹, 王中生, 等. 卧龙降水稳定同位素与季风活动的关系[J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 1007—1013.]
- [86] Zheng Yanming, Zhong Wei, Peng Xiaoying, *et al.* Correlation of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and moisture sources at Yunfu, Western Guangdong Province, China[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(3): 638—643. [郑琰明, 钟巍, 彭晓莹, 等. 粤西云浮市大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽来源的关系[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 638—643.]
- [87] Pang Hongxi, He Yuanqing, Lu Aigang, *et al.* Variation of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation of monsoon in Lijiang in synoptic scale [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(10): 1218—1224. [庞洪喜, 何元庆, 卢爱刚, 等. 天气尺度下丽江季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化[J]. *科学通报*, 2006, **51**(10): 1218—1224.]
- [88] Liu Jianrong, Song Xianfang, Yuan Guofu, *et al.* Stable Isotope Evidence of Vapor Sources in Summer Monsoonal Precipitation over Southern China [J]. *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[J]. *自然资源学报*, 2007, **22**(6): 1004—1012.]
- [89] Liu J R, Song X F, Yuan G F, *et al.* Characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation over Eastern Monsoon China and the water vapor sources[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**(22): 3521—3531. [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[J]. *科学通报*, 2009, **54**(22): 3521—3531.]
- [90] Song Yougui, Yu Shiyong, Zhu Cheng. Simulations of paleoclimate in the East China monsoon area since the Last Glaciation[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1998, **7**: 260—265. [宋友桂, 于世永, 朱诚. 中国东部季风

- 区末次冰期以来古气候模拟[J]. 长江流域资源与环境, 1998, 7: 260—265.]
- [91] Craig H. Isotopic variation in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133: 1702—1703.
- [92] Zheng Shuhui, Hou Fagao, Ni Baoling. The studies of hydrogen and oxygen stable isotopes in atmospheric precipitation in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1983, 13: 801—806. [郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧同位素研究[J]. 科学通报, 1983, 13: 801—806.]
- [93] Zhang Xinping, Yao Tandong. Relations between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in precipitation at present in the northeast Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(6): 360—365. [章新平, 姚檀栋. 青藏高原东北地区现代降水中  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  的关系研究[J]. 冰川冻土, 1996, 18(6): 360—365.]
- [94] Zhang Yinghua, Wu Yanqing. Oxygen and hydrogen isotopes in precipitation in Heihe River Basin, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(1): 34—39. [张应华, 仵彦卿. 黑河流域中上游地区降水中氢氧同位素研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 34—39.]
- [95] Tu Linling, Wang Hua, Feng Yumei. Research on D and  $^{18}O$  isotope in the precipitation of Guilin[J]. Carsologica Sinica, 2004, 23(4): 304—309. [涂林玲, 王华, 冯玉梅. 桂林地区大气降水的 D 和  $^{18}O$  同位素的研究[J]. 中国岩溶, 2004, 23(4): 304—309.]
- [96] Zhang Lin, Chen Li, Liu Jun, *et al.* D and  $^{18}O$  Isotopes in atmospheric precipitation in Hongkong area[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(2): 572—577. [张琳, 陈立, 刘君. 香港地区大气降水的 D 和  $^{18}O$  同位素研究[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 572—577.]
- [97] Tian Lide, Yao Tandong, Sun Weizhen, *et al.* Relationship between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in precipitation on north and south of the Tibetan Plateau and moisture recycling[J]. Science in China (D), 2001, 44(9): 789—796.
- [98] Tian Lide, Yao Tandong, White J W C, *et al.* Westerly moisture transport to the middle of Himalayas revealed from the high deuterium excess [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(10): 1026—1030.
- [99] Pang Hongxi, He Yuanqing, Zhang Zhonglin. Correlation between deuterium excess in monsoon precipitation of New Delhi and the origin of precipitation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(6): 876—880. [庞洪喜, 何元庆, 张忠林. 新德里季风降水中过量氘与季风水汽来源[J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 876—880.]
- [100] Zhang Xinping, Liu Jingmiao, Masayoshi Nakawo, *et al.* Vapor origins revealed by deuterium excess in precipitation in Southwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(4): 613—619. [章新平, 刘晶淼, 中尾正义, 等. 我国西南地区降水中过量氘指示水汽来源[J]. 冰川冻土, 2009, 31(4): 613—619.]

## Progress of the Research of Stable Isotope in Precipitation in China: A Review

LI Ya-ju<sup>1</sup>, ZHANG Ming-jun<sup>1, 2</sup>, WANG Sheng-jie<sup>1</sup>, LI Zhong-qin<sup>1, 2</sup>, WANG Fei-teng<sup>2</sup>

(1. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station, CAREERI, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China)

**Abstract:** Precipitation is an important section in water cycle. Isotope ratios in precipitation are associated with the meteorological process, which display an obvious spatial and temporal distribution. So they can be used in inversing the atmospheric processes, tracing the vapor source and reflecting the local weather and climate conditions.

**Key words:** precipitation; stable isotope; influence factor; distribution

The composition and distribution of stable isotope in precipitation of China is summarized. The influencing factors, as well as the recent research in China (Tibetan Plateau, Northwest China arid East China), are presented. In addition, some existing problems are pointed out, and prospect of future work was also put forwards.