

陈中笑,程军,郭品文,等. 中国降水稳定同位素的分布特点及其影响因素[J]. 大气科学学报,2010,33(6):667-679.

Chen Zhong-xiao, Cheng Jun, Guo Pin-wen, et al. Distribution characters and its control factors of stable isotope in precipitation over China[J]. Trans Atmos Sci, 2010, 33(6):667-679.

中国降水稳定同位素的分布特点及其影响因素

陈中笑¹,程军¹,郭品文¹,林振毅²,张福颖¹

(南京信息工程大学 1. 气象灾害省部共建教育部重点实验室; 2. 大气物理学院, 江苏 南京 210044)

摘要:利用 IAEA\WMO\GNIP 的降水稳定同位素资料, 分析了我国降水稳定同位素的时空分布特征及其影响因素。结果表明, 整体来看我国降水稳定同位素有明显的大陆效应和高度效应。各地大气降水线存在地域差异, 内陆地区同一站点冬、夏半年也有明显差异, 显示出水汽团特性的不同。不同地区降水稳定同位素(δ 和过量氘)的季节变化特征明显不同, 表明主要水汽来源存在季节性差异。通过对比长序列降水稳定同位素的年际变化与季风和 ENSO 指数的关系, 发现 ENSO 与降水稳定同位素有显著的正相关, 但不一定通过影响降水量来引起降水稳定同位素(stable isotope in precipitation, SIP)的变化。重点分析了我国降水量效应、温度效应的特点, 指出沿海和西南等季风区主要受降水量的影响, 北方非季风区温度效应起主要作用, 交叉地带则两种效应都有影响。

关键词:降水稳定同位素; 水汽源; 大气降水线; 降水量效应; 温度效应

中图分类号: P426.612 文献标识码: A 文章编号: 1674-7097(2010)06-0667-13

Distribution Characters and Its Control Factors of Stable Isotope in Precipitation over China

CHEN Zhong-xiao¹, CHENG Jun¹, GUO Pin-wen¹, LIN Zhen-yi², ZHANG Fu-ying¹

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education; 2. School of Atmospheric Physics, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract: The temporal and spatial variations of stable isotope in precipitation over China and its control factors are analyzed based on the observations from IAEA\WMO\GNIP. The results show that the overall stable isotope in precipitation in China has obvious continental and altitude effects. For the Local Meteoric Water Line, the regional differences exist among the studying areas, and there also are obvious differences between winter and summer semi-years at the individual stations of inland area, which reveals the different characters of water vapour mass. The various seasonal variation patterns of stable isotope in precipitation(δ and d -excess) infer that there are different air masses influencing these areas at different seasons. The correlations of long term interannual variations of stable isotope in precipitation with monsoon index and ENSO index interpret that ENSO has an obvious positive relation with the stable isotope, but not always cause the stable isotope variations through the influence on the amount of precipitation. With the emphasis on analyzing the amount and temperature effects, we point out that, the amount of precipitation is the dominative factor in the monsoon areas of China Coast and Southwest China, the temperature is the main factor in the northern territory unaffected by monsoon, and the both effects work together in the intersectant zone.

Key words: stable isotope in precipitation; vapour source; meteoric water line; precipitation amount effect; temperature effect

收稿日期: 2010-04-08; 改回日期: 2010-09-01

基金项目: 江苏省高校自然科学研究计划项目(06KJD170115); 江苏省高校研究生创新计划项目(CX07B_043z); 南京信息工程大学科研基金项目(y602)

作者简介: 陈中笑(1967—), 男, 江苏靖江人, 博士, 副教授, 研究方向为地球化学循环, czxchen@nuist.edu.cn.

0 引言

水圈通过水、能量和地球化学组分的循环连接着生物圈、大气圈和岩石圈,作为气候变化的组成部分和影响因素,全球水循环由蒸发、大气循环和降水、陆地径流及地下水循环组成,其过程可简单表示为海洋→大气→河流→海洋,并强烈地受人类活动的影响。对水循环的研究主要包括水的来源及输送、水储藏库的大小及其间的收支,而水同位素的应用提供了研究探索水循环特性的重要手段^[1]。水的稳定同位素作为研究水循环的示踪元素,在水的相变和输送过程中常常会改变同位素的丰度,早期研究已发现海水、淡水和雪水的 H、O 稳定同位素 (D 和 ¹⁸O) 组成的差异,并发现了降水稳定同位素 (stable isotope in precipitation, 简称为 SIP) 组成依赖于地表温度、降雨量、经度和纬度等因子^[2-6],而通过观测不同水循环过程中同位素丰度的变化会引导我们认识及了解某些地球化学和水循环过程^[6]。

因 H₂¹⁶O, HD¹⁶O 和 H₂¹⁸O 在天然水的稳定同位素分子中容易测量,广泛应用于水循环特别是降水过程的研究^[1,5-7]。由于海洋占全球总水量的 97% 且观测的 D 和 ¹⁸O 的丰度变化很小,水样中的重同位素含量 (δ) 常用与标准海水的比率 (单位:‰) 来表示:

$$\delta = \frac{r_{\text{样本}} - r_{\text{标准}}}{r_{\text{标准}}} \times 1000. \quad (1)$$

其中, r 为同位素比率 (D/¹H, ¹⁸O/¹⁶O), 标准海水国际上一般采用维也纳标准海水 (V-SMOW)。

SIP 组成变化范围很大 (δD、δ¹⁸O 分别为 400‰、50‰)^[1], 主要原自来源的不同 (水汽源地和雨、雪、雾等) 及在输送和相变过程中的同位素分馏, 后者会使水汽富集轻同位素。Craig^[5] 大范围测定了世界各地的河水、湖水、雨水和雪水, 发现了 δD 和 δ¹⁸O 间的线性关系 (δD = 8δ¹⁸O + 10), 即后来的全球大气降水线 (global meteoric water line, GMWL)。

为更好地了解全球 SIP 的分布特征及其在水汽输送过程中的变化和分布规律以了解大气环流及水循环机制, 国际原子能机构 (IAEA) 和世界气象组织 (WMO) 于 1961 年成立了全球降水同位素检测网 (GNIP), 目前已有 53 个国家的 183 个观测站点, 其观测数据已被广泛应用在大气环流模式的验证与改进、气候变化和生态研究中。我国于 1983 年开始加入该计划, 并陆续建立了约 30 个站点, 为东亚降

水和季风研究提供了新的分析手段^[7-8]。本文即利用包括香港在内的中国 GNIP 资料研究了我国不同地区 SIP 的时空分布特点及各自主要影响因素, 为利用 SIP 分析水汽来源及水汽输送路径提供理论依据。

1 影响 SIP 分布的因素

在早期 Dansgaard^[6] 的开创性研究中, 提出了影响 SIP 的主要因素有:

1) 水汽源的情况。即水汽来源的差异, 主要指蒸发源地的不同, 或蒸发源地天气状况的季节变化。因全球水汽主要来自海洋蒸发, 影响水汽同位素组成的主要因素是蒸发源地的海表温度、盐度和风速等。

2) 温度效应。SIP 的组成主要受传输过程中冷凝温度的影响, 温度越低, 降水中越容易富集重同位素。这是因为控制水相变过程中同位素分馏的主要因素是温度^[1,6], 且温度与 SIP 有近似的线性关系^[6], 这一规律常被用来复原不同地区特别是极地的古环境温度变化。

3) 大陆效应。因水汽主要来自海洋蒸发, 进入内陆越远, 随着降水事件的不断进行降水中越富集轻同位素。

4) 高度效应。即 SIP 随着地表高度的增加, 降水中轻同位素逐渐富集。

5) 纬度效应。水汽循环可表示为在热带海洋的蒸发, 然后由低纬度向高纬度地区输送, 使 SIP 随纬度的增加而减小。

6) 雨量效应。由于重同位素会优先冷凝, 造成 SIP 随降水量的增加而减小, 若降水量足够大, 如暴雨等强对流事件, SIP 会接近上层水汽的同位素含量^[1]。从热带到中纬度地区的大量观测表明降水量与 SIP 有近似的线性关系, 利用该特征, 常用洞穴沉积物的 δ¹⁸O 作为古气候降水量 (季风强度) 参照指标。

在上述影响因素中, 3) ~ 5) 本质上都受逐渐变化的温度控制, 因为全球水循环包括海表蒸发和水汽输送、冷凝, 沿着水汽的传输路径, 离海岸越远, 纬度、高度越高, 温度越低, 此时温度对 SIP 的影响起了主要作用^[1]。

综合来看, SIP 的变化主要取决于温度、降水量及距离水汽源的水平 and 垂直距离, 另外还受陆地水汽循环^[9]、雨滴的大小^[10] 和大气环流^[11] 等的影响, 造成 SIP 分布的复杂性与多变性。

水汽蒸发、传输和冷凝过程中的 SIP 组成的变化符合 Rayleigh 分馏模型^[1],可近似用图 1 表示:海水(黑点)的非平衡蒸发形成海洋水汽(白方块),水汽冷凝形成降水(黑方块),由于同位素分馏作用降水会较水汽富集重同位素,而剩余水汽会富集轻同位素。这样随着降水事件的不断发生,同一云团中水汽和所产生的降水的 δ 值都越来越小。且平衡蒸发的同位素分馏要小于非平衡蒸发,这也是为什么 GMWL 的截距表示偏离平衡程度的原因。

事实上,因气象条件和降水过程的差异,各站点的降水线(Local MWL)都偏离 GMWL,可表示为 $\delta D = a \delta^{18}O + b$ 。LMWL 取决于形成降水的水汽源地状况,其中斜率(a)表示不同的相变过程(如再蒸发、降雪等),而截距(b)则受海气相互作用的影响,在输送过程中会保持平衡。造成不同地区的 LMWL 差异的原因主要有:一,水汽源的不同;二,雨滴在离开云底后的再蒸发,使 δ 值偏高,主要发生在温暖干燥地区;三,雪与冰雹, δ 值偏低^[12];四,在输送路径上的水汽补充,主要指地表蒸发与植被的蒸腾,特别是在干旱地区。但只要观测的时间系列足够长, δ 值取对降水量的加权平均,LMWL 与 GWML 近似相同^[13],因为水汽主要仍是来自海洋蒸发。

Gat^[13]通过对 1961—2000 年的全球 GNIP 数据

分析,得出算数和对降水量加权平均的 GMWL 分别为

$$\delta D = 8.07\delta^{18}O + 9.9, (r^2 = 0.98); \quad (2)$$

$$\delta D_{\text{加权}} = 8.14\delta^{18}O_{\text{加权}} + 10.9, (r^2 = 0.98)。 \quad (3)$$

与 Craig 的 GMWL 非常接近,说明从全球尺度上来看 SIP 具有相似分布特征。

2 数据及处理

目前 GNIP 在中国的观测站点达到 30 个,主要分布在东部沿海地区(图 2)。研究中采用的月均降水的氢氧稳定同位素比数据(δD 和 $\delta^{18}O$)及地表气象资料(包括月均温度、降水量、水汽压、高度、经纬度)均来自 GNIP (IAEA/WMO, 2004, <http://nds121.iaea.org/wiser/>)。ENSO 指数采用 Climate Prediction Center 提供的 Nino3.4 (170~120°W, 5°N~5°S) 月均 SST 距平 (<http://www.cpc.noaa.gov/>),季风指数则分别选用李建平的东亚季风指数 (<http://www.lasg.ac.cn/staff/ljp/data-monsoon/EASMI.htm>)、Bing Wang 的西北太平洋和印度洋季风指数 (<http://www.soest.hawaii.edu/users/bwang/>)。

因某些站点的 δ 值数据在一些月份出现不合理的正值,特别是在中国沿海地区及季风区,本研究将

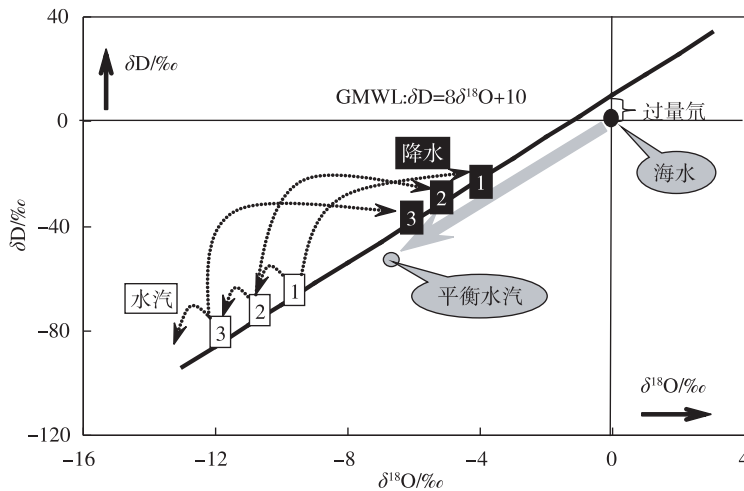


图 1 全球大气降水线(GMWL)和 Rayleigh 分馏模型下的水汽及相关降水的同位素组成变化示意图(黑点、白方块和黑方块分别代表海水、水汽和降水的 δ 值,数字表示持续的冷凝过程中水汽与降水的同位素变化顺序;黑实线为 GMWL,黑点线表示水汽冷凝与输送过程,灰箭头表示海水的平衡蒸发)

Fig. 1 The schematic diagram of GMWL and variations of isotopic composition of water vapour and corresponding precipitation under Rayleigh fractionation model(The black dot, white and black square represent the δ values of seawater, water vapour and precipitation, respectively. The numbers denote the gradual changes of isotopic composition of the vapour and precipitation during the persistent condensation process. The black solid line is GMWL, the black dotted line figures the condensation and transportation process of water vapour, and the gray arrow represents the equilibrium evaporation of seawater)

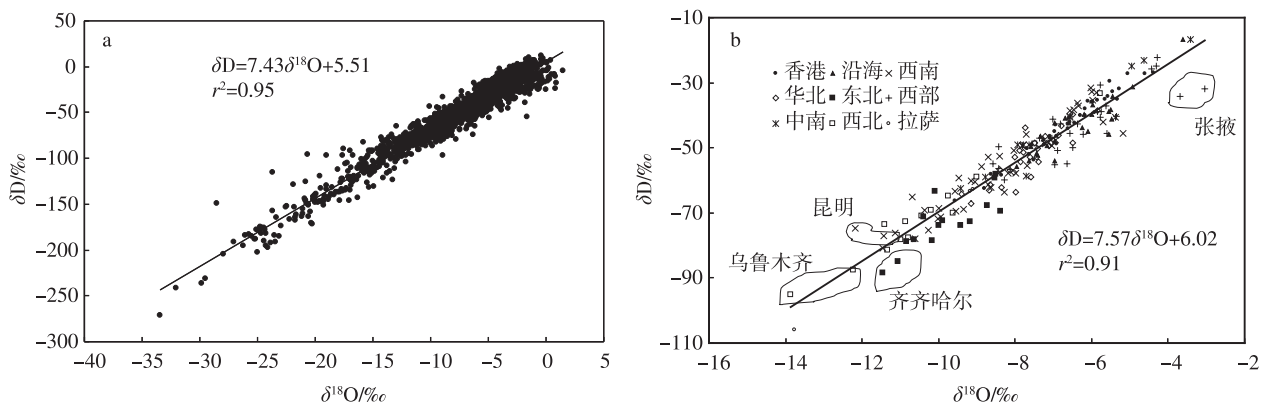


图 3 中国 SIP 的 $\delta D-\delta^{18}O$ 的关系(站点分为沿海(烟台、福州、柳州、广州和海口)、西南(成都、昆明、遵义、贵阳和桂林)、华北(石家庄、太原、天津和包头)、东北(齐齐哈尔、长春、锦州和哈尔滨)、西部(张掖、兰州、西安、郑州和银川)、中南(武汉、长沙和南京)、西北(和田和乌鲁木齐)及拉萨、香港) a. 月均观测值;b. 年加权平均值

Fig. 3 The correlations of $\delta D-\delta^{18}O$ of China SIP(All stations are divided into China Coast(Yantai, Fuzhou, Liuzhou, Guangzhou and Haikou), Southwest(Chengdu, Kunming, Zunyi, Guiyang and Guilin), North China(Shijiazhuang, Taiyuan, Tianjin and Baotou), Northeast China(Qiqihaer, Changchun, Jinzhou and Harbin), West China(Zhangye, Lanzhou, Xian, Zhengzhou and Yinchuan), Central-south China(Wuhan, Changsha and Nanjing), Northwest China(Khotan and Urumchi), Lhasa and Hong Kong) a. monthly observation data; b. annual weighted mean data

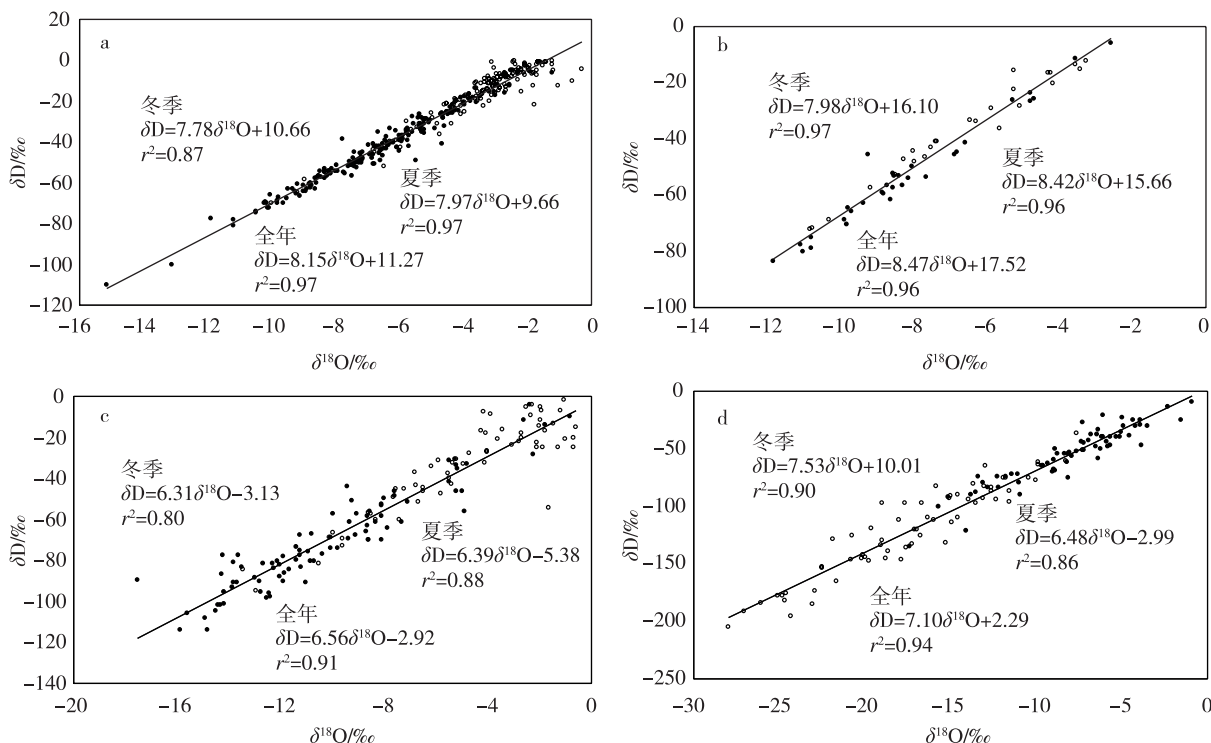


图 4 4 个代表站的 LMWL(○为冬半年(11—4 月), ●为夏半年(5—10 月), 实线为全年的 LMWL) a. 香港;b. 南京;c. 昆明;d. 乌鲁木齐

Fig. 4 The LMWL of 4 representative stations(○ is winter semi-year(from November to April), ● is summer semi-year(from May to October), and the solid line is yearly LMWL) a. Hong Kong;b. Nanjing;c. Kunming;d. Urumchi

香港和昆明全年变化不大,而南京明显夏季斜率高于冬季,乌鲁木齐则正好相反。LMWL 的相对差异表明单纯的通过 LMWL 分析降水来源的价值有限,特别是中国因地形、纬度、离岸距离的差异及复杂的大陆性和海洋性气团的影响更加难于由 LMWL 简单判断。

3.2 SIP 的季节变化

一般而言,除海岛站点外都有明显的局地温度的季节变化,因 SIP 主要受当地温度和上层大气水汽含量的影响^[17],而中国各地两者的季节变化较为明显,造成 SIP 显著的季节变化。大量的观测事实表明,海岛的降水量和温度的年际变化不大,其 SIP 的季节变化也不太明显^[7],而沿海、内陆及高纬度地区因水汽来源的差异及温度和降水量的变化表现出不同的变化类别(图 5)。通过与温度和降水量的对比(图 6)可以发现:沿海地区(香港)随温度的增加 SIP 减小,表现出“反温度效应”,同时降雨量效应明显,说明沿海地区 SIP 主要受降水量的影响;南方地区(南京)夏半年(5—10 月)与香港相似受降水量的影响明显,而冬半年(11 月—次年 4 月)则表现出明显的温度效应,与降水量的关系不显著,说明南京地区冬夏两季水汽分别受冬夏季风的影响;西南(昆明)主要受印度洋季风的影响,全年温度变化较小,夏半年主要受降水量的影响,而冬半年特别是 1—4 月因降水量的变化不大,温度效应明显;西北

地区(乌鲁木齐)降水量少,全年都有明显的温度效应;华北和东北(天津和齐齐哈尔)降水量都不大但季节变化显著,冬半年表现出明显的温度效应,而夏半年则可能降水量起了主要作用。温度和降水量对 SIP 的相关关系将在第 4 节讨论。

季节变化对 SIP 的影响可能主要取决于冷凝温度,而温度对 SIP 的影响在不同纬度也有差异,从热带海洋的约 $0\%/^{\circ}\text{C}$ 到高纬度地区的 $0.5\%/^{\circ}\text{C}$ ^[11],可见温度效应在不同地区的作用也差异。考虑到水滴的再蒸发、降水的种类(雨、雪、冰雹等)、特别是水汽源的影响,造成中国复杂的 SIP 季节变化特征。

中国降水主要受 5 大源区水汽的影响^[18-20]:东北地区的降水主要来自北太平洋,南太平洋影响东南沿海地区,西南则受印度洋的影响,西部的水汽主要来自中亚和北冰洋。水汽团的特征肯定也对不同地区 SIP 的季节变化造成影响,这也能从 $\delta^{18}\text{O}$ 在不同站点的大小分布和冬、夏半年同一站点 LMWL 的差异中看出(图 4 和 6)。

3.3 SIP 的年际变化

中国 GNIP 的观测时间较短,很少有时间序列超过 10 a 的站点,研究气候态的 SIP 变化及其与温度和降水量的关系较为困难。香港站有最长的观测时间(1961—2004 年),本研究以香港为例分析我国 SIP 的年际变化。通过长序列 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布可以看出

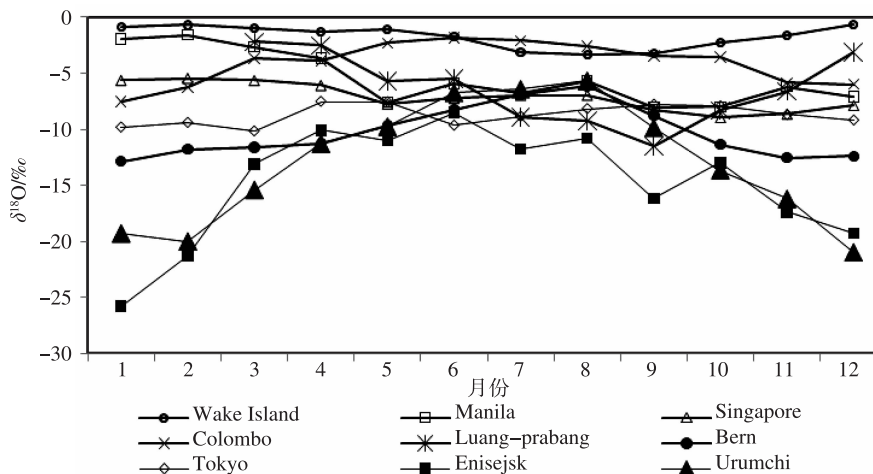


图 5 一些北半球 GNIP 站点的月均加权 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化类型(太平洋的 Wake 岛、马尼拉、新加坡和东京及印度洋的科伦坡、琅勃拉邦的季节变化都不显著,而内陆及高纬度地区的伯尔尼、乌鲁木齐和 Enisejsk 则有明显的季节变化)

Fig. 5 The seasonal variation patterns of monthly weighted mean $\delta^{18}\text{O}$ of some GNIP stations in the Northern Hemisphere(The seasonal variations of Wake Island, Manila, Singapore and Tokyo of Pacific Ocean, and Colombo and Luang-prabang of India Ocean are all inapparent, but those of Bern, Urumchi and Enisejsk of inland and high latitude region are distinct)

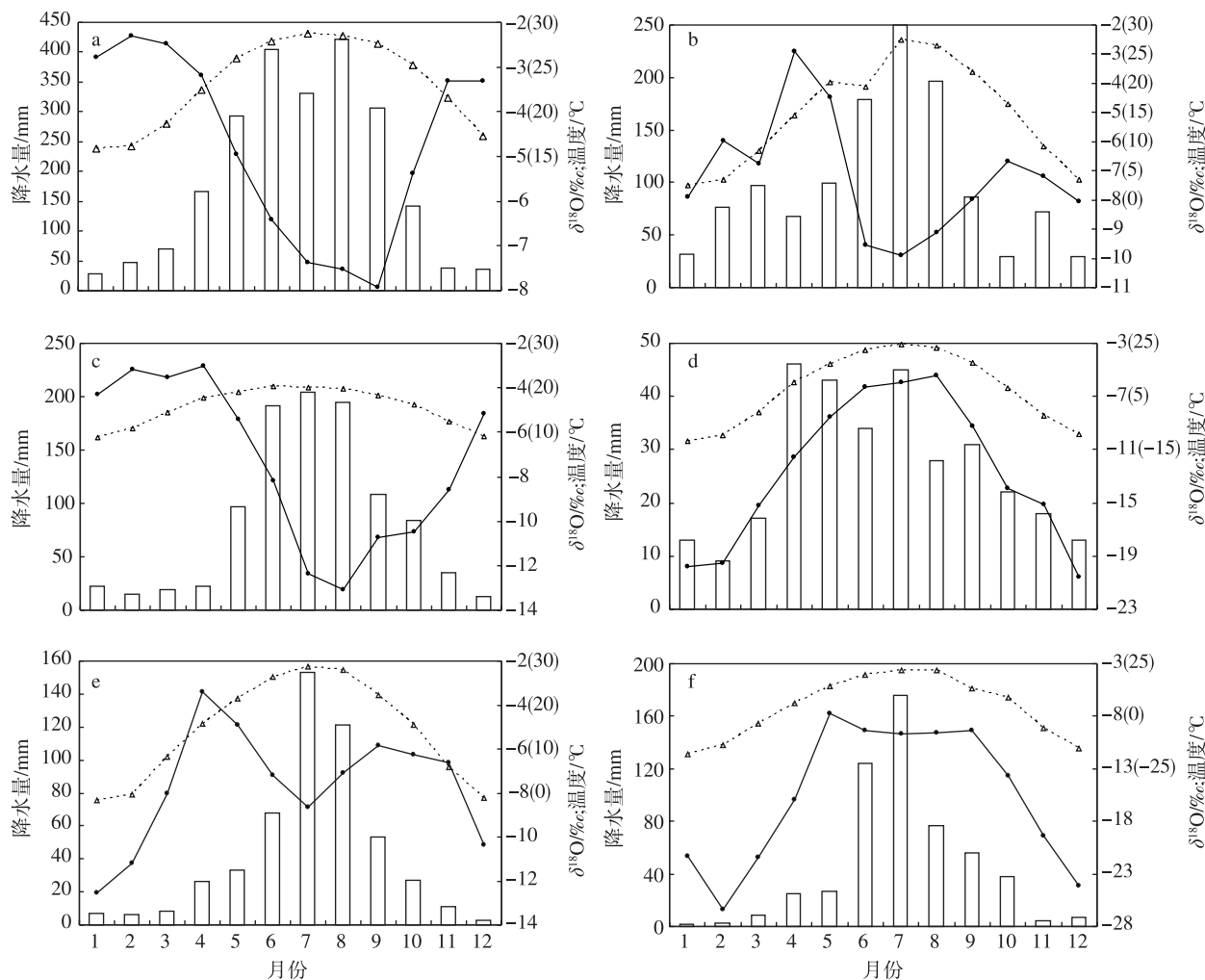


图6 一些典型站点的月均降水量(柱), $\delta^{18}\text{O}$ (实线)和温度(点线)的季节变化 a. 香港;b. 南京;c. 昆明;d. 乌鲁木齐;e. 天津;f. 齐齐哈尔

Fig. 6 The seasonal variations of the monthly mean amount of precipitation (bar), $\delta^{18}\text{O}$ (solid line) and temperature (dashed line) of some representative stations a. Hong Kong; b. Nanjing; c. Kunming; d. Urumchi; e. Tianjin; f. Qiqihar

其年际变幅较大(图7a),符合中国季风性气候特点:季风建立时间、季风的强弱^[21]、进入内地的程度等都会影响各地降水量的变化进而造成 SIP 的变化^[22]。由图7b可以看出,季风对香港降水量的影响较大,但难于发现该地区降水量与季风指数间的稳定相关关系,可能是由于两者间有较强的年代际振荡,另一原因可能是香港地区的降水不仅与季风有关,还与北半球大气环流的变化有关^[23-24]。而且研究^[25]表明,季风指数适于描述大尺度季风环流,不一定适用于单站点的降水。一般而言,强季风年 SIP 偏小,弱季风年 SIP 偏大。但通过对香港站的分析难于找出季风强度与 SIP 的关系,可解释为香港 SIP 受整个水汽输送的历史过程影响,即大气环流起了重要的作用^[26]。

通过与 Nino3.4 区的海温距平对比发现 ENSO 与香港 SIP 有显著的正相关,与降水量的相关关系则相对较弱,表明 ENSO 事件对中国 SIP 的年际变化的影响较大,且不一定直接通过影响降水量来引起 SIP 的变化。厄尔尼诺年(正 SST 距平)对应 SIP 为正距平,拉尼娜年(负 SST 距平)对应 SIP 为负距平,仅 1982—1983 强厄尔尼诺年和 1988—1989 强拉尼娜年 SIP 距平偏小,1996—1997 弱拉尼娜年 SIP 负距平偏大。香港的 SIP 与 ENSO 的关系与曼谷相似^[27]而与南极的阿根廷岛相反^[28],说明 ENSO 是通过影响全球大气环流进而影响水汽输送的。需要强调的是,ENSO 与季风强度的关系较为复杂,在 20 世纪 70 年代中期以前,ENSO 对季风强度有影响,而之后因温暖化的加速造成的地表温度变化可

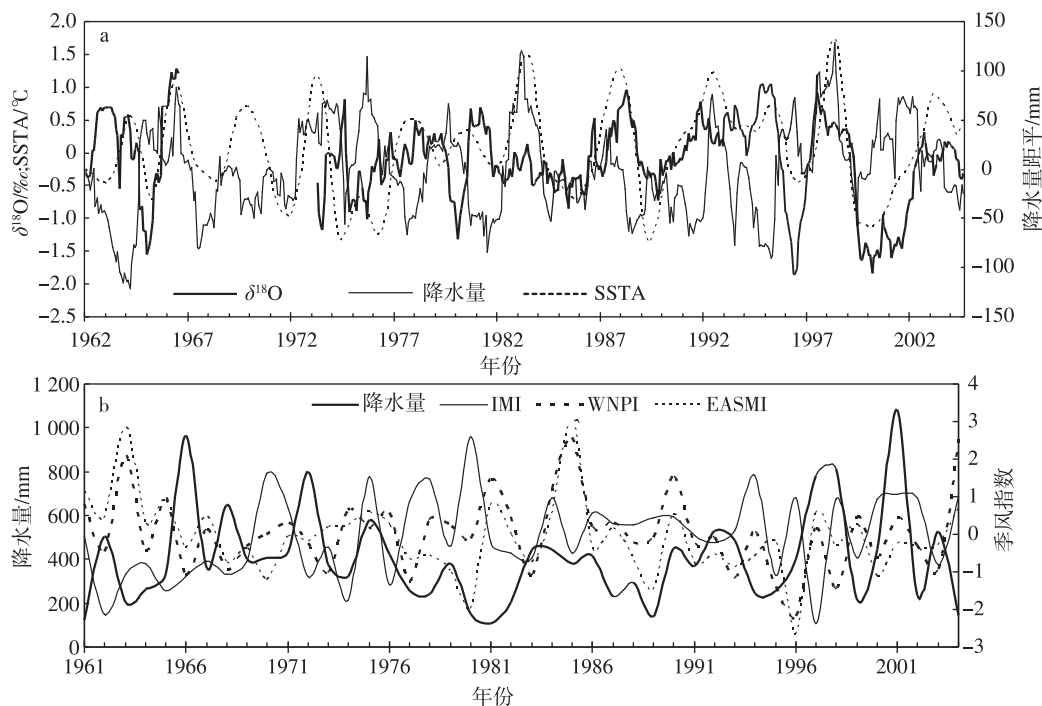


图 7 香港降水的月均 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量、Nino3.4 海温及季风指数的时间变化序列 a. $\delta^{18}\text{O}$ 、降水量和 Nino3.4 海温距平的 13 个月的滑动平均值; b. 降水量与不同的季风指数的关系 (IMI、NWPI 和 EASMI 分别为印度洋、西北太平洋和东亚夏季季风指数)

Fig. 7 The time series of monthly mean $\delta^{18}\text{O}$ and amount of precipitation in Hong Kong, Nino3.4 sea surface temperature (SST) and monsoon indexes a. thirteen-month moving averages of $\delta^{18}\text{O}$, amount of precipitation and Nino3.4 SST anomaly; b. the relations of amount of precipitation with various monsoon indexes (IMI, NWPI and EASMI are India Ocean monsoon index, Northwest Pacific Ocean monsoon index, and East Asia summer monsoon index, respectively).

能对季风环流的影响更大^[29]。

3.4 过量氘的分布

Dansgaard^[6]首先定义了过量氘 (deuterium excess): $d = \delta\text{D} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$, 表示水汽蒸发过程中因同位素的动力分馏过程而偏离平衡分馏的程度或局地 SIP 偏离 GMWL 的程度, 全球降水的平均 d 约为 10 (图 1)。 d 反映了上空水汽团的同位素组成特征, 并取决于水汽蒸发源地的状况, 如空气相对湿度、海表温度、盐度及风速等^[12-13], 且同一水汽团在输送、冷凝过程中 d 会保持不变^[1,6], 因此, d 常常被用来研究追踪水汽源地^[1,16,30]。但是由于水汽源地的不同、降水形成过程等的变化造成不同地区 d 在时空分布上有较大的变化, 如海洋站点虽 SIP 的季节变化小但因相对湿度变化大使 d 的季节变化明显, 雨滴的再蒸发会使降水更为富集重同位素 (δ 升高) 但 d 会降低, 而雪、冰雹等因分馏大使得 δ 较小但 d 会升高。

从中国几个典型站点的 d 的季节分布 (图 8) 来

看, 沿海地区的香港 d 较低, 季节变化不明显; 东部的南京 d 相对较高, 季节变化明显; 西南的昆明 d 冬低夏高, 夏季受季风的影响降水量大, d 带有印度洋水汽的特点, 而冬季较低的 d 可能因较为干燥造成再蒸发增强引起; 而乌鲁木齐和天津的 d 冬高夏低, 冬季的高 d 可能是由于降雪造成的, 而夏季的低 d 则可能是因再蒸发引起。

通过对比上述 6 站点的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 的季节变化 (图 9) 可以发现, 香港较一致的 d 明显带有海洋气团的特征, SIP 的变化则主要受降水量的影响; 南京因处季风影响区域, 夏半年 SIP 和 d 均小, 带有梅雨等对流天气的特征, 而冬半年 d 高 SIP 小, 很可能是由于再蒸发的影响, 或不同气团的混入; 昆明和乌鲁木齐的 SIP 和 d 有较强的反相关关系, 但两者的机制不同, 前者水汽主要来自印度洋, d 的变化主要来自源区的季节变化, 后者夏季的低 d 高 SIP 则明显受来自中东水汽的影响, 冬季的高 d 值主要源自降雪; 天津和齐齐哈尔夏季 d 极低, 可能是因为夏季再

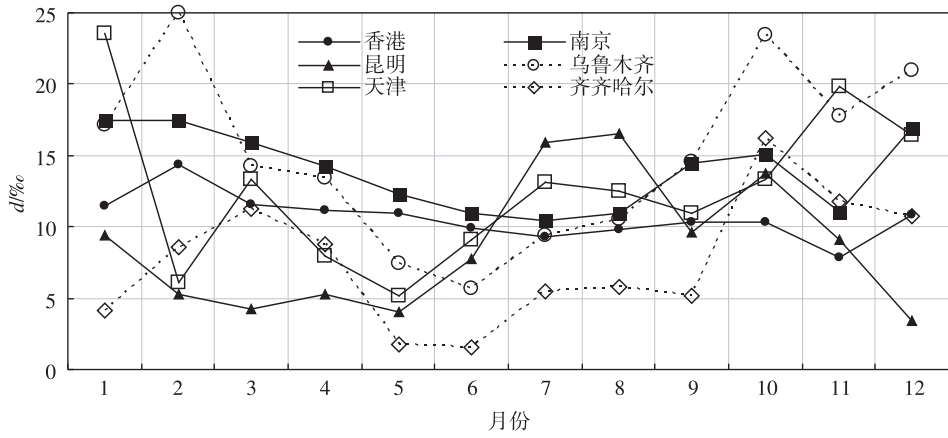


图 8 一些典型站点的月均加权平均过量氘 d 的季节变化

Fig. 8 The seasonal variations of monthly weighted mean d -excess of some representative stations

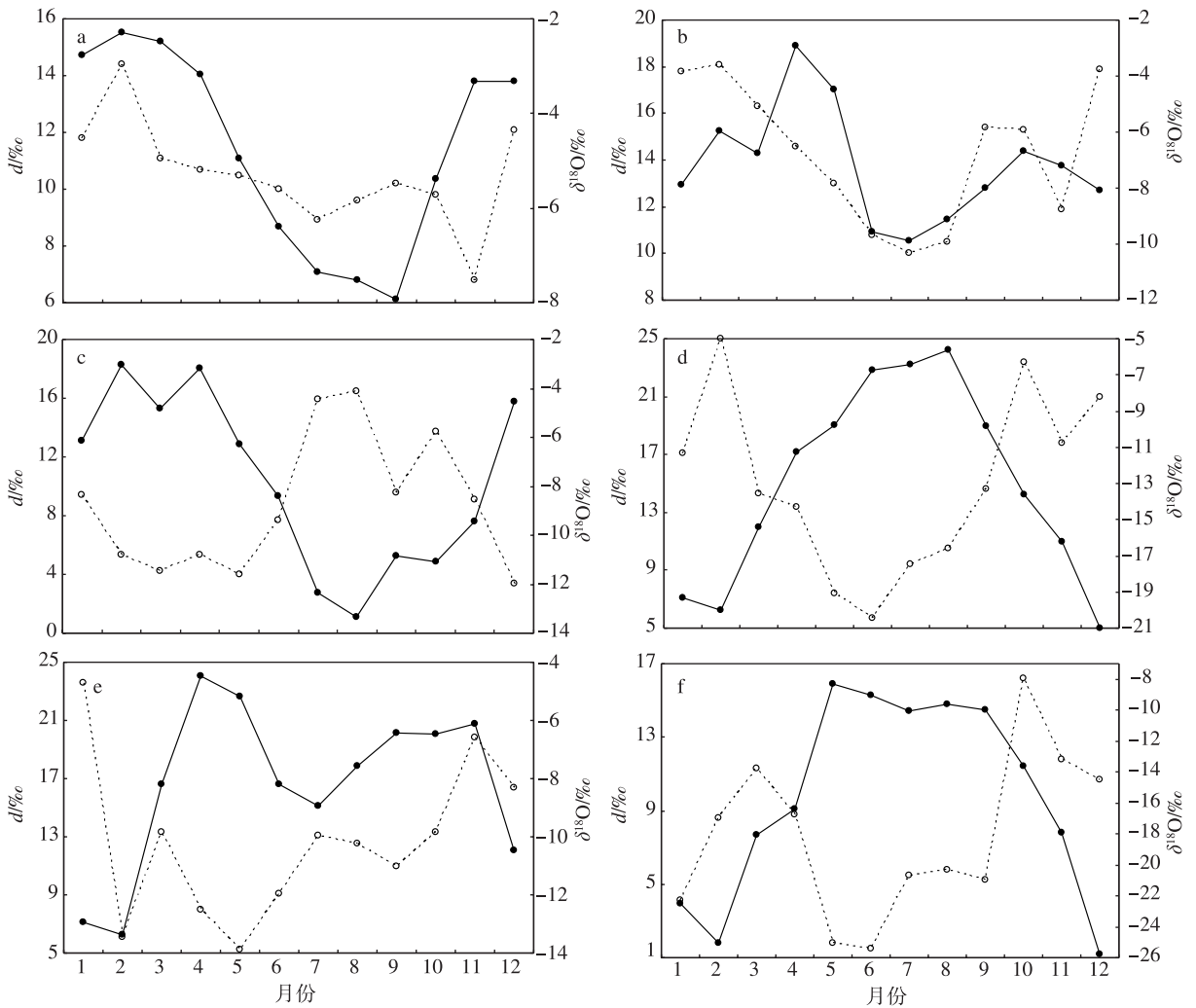


图 9 一些典型站点的月均加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ (实线) 和过量氘 d (虚线) 的季节变化 a. 香港; b. 南京; c. 昆明; d. 乌鲁木齐; e. 天津; f. 齐齐哈尔

Fig. 9 The seasonal variations of the monthly weighted mean $\delta^{18}\text{O}$ (solid line) and d -excess (dashed line) of some representative stations a. Hong Kong; b. Nanjing; c. Kunming; d. Urumchi; e. Tianjin; f. Qiqihar

蒸发率较大。需要强调的是,从单一站点 d 的变化不足以分析水汽团的特征及降水过程^[10],判断某一地区水汽的输送路径(水汽源),需要综合考虑整个地区及整个水汽输送通路上的不同站点的 SIP、LMWL 及过量氘的特征进行更加详细的分析。

4 中国降水的同位素效应

第 1 节已讨论了影响降水稳定同位素的主要因素,因中国复杂的地形及青藏高原的动力作用^[31]、水汽来源的多样性^[18-19,32]、水汽输送中的不同过程等原因,使不同地区表现出的主要影响因素(图 6)也有差异。这对利用钟乳石等的 $\delta^{18}\text{O}$ 研究古气候变化尤其重要,因为洞穴堆积物特别是中国内陆洞穴经常被作为古季风变化研究的指标^[33-34]。

4.1 降水量效应

降水量效应表现在不同地域的强度有较大差异,岛屿和海岸带较为明显,雨量少的区域如干旱区也较明显(虽然可能被温度效应掩盖),而降雪及强对流天气系统该效应不太显著。事实上,SIP 与降水量的关系与整个水汽输送路径上的降水量有关,而不仅仅在观测站点上的降水量有关;从另一方面而言,严格的降水量效应是指同一水汽团的一次降水事件,而 GNIP 的样本采集是按月进行。虽然如此,考虑到一定期间内(月、季)水汽源相对稳定,分析站点的降水量效应对分析 SIP 的分布乃至水气团特征仍有重要的意义。

从月均 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量的散布关系(图 10)可以看出,受季风影响较大的香港、昆明、南京都有明显的雨量效应,天津则较弱,齐齐哈尔和乌鲁木齐全年没有符合 Rayleigh 模型的降水量效应。表明由南到北,降水量对 SIP 分布的影响逐渐减弱,再考虑不同季节的降雨量效应的差异(图 6,夏季比冬季要强得多),季风特别是夏季风的影响对南方 SIP 的影响占主要地位。从图 6 和图 10 还可看出,温度的季节变化越小,降水量效应就越明显,显示出降水量和温度对 SIP 分布相反的作用;一般而言,雨量少的区域(干旱区等),降水量效应较明显^[1],但以乌鲁木齐为代表的干旱站点没能发现这一规律,可能是温度的影响过大所致。

4.2 温度效应

温度是控制影响同位素分馏的关键因素,温度越低,冷凝越快,同位素分馏越大,因此,温度变化是造成 SIP 分布变化的主要因素。由于表面温度与上空温度基本存在对应关系,一般都采用观测的表面

温度来分析温度效应。

利用北大西洋的观测数据,Dansgaard^[6]最先报告了温度效应: $\delta^{18}\text{O} = 0.695t - 13.6$ 。Yurtsever^[35]则利用 GNIP 站点资料分析得到: $\delta^{18}\text{O} = (0.521 \pm 0.014)t - (14.96 \pm 0.21)$ 。而图 10 仅乌鲁木齐和齐齐哈尔有明显的温度效应,天津较弱,处于季风区的香港、南京和昆明都没有温度效应。为减少降水量的影响,采用了上述 6 站点的年均加权平均来分析中国的温度效应(图 11),得出 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的关系为: $\delta^{18}\text{O} = 0.23t - 11.85$,表明去除降雨量影响后在较大的范围内温度都对 SIP 的分布造成影响,且 SIP 年际分布变化明显,说明温度的影响也有较大的年际变化。但长期来看,中国 SIP 的温度效应与 GNIP^[35]的较为一致。

从上面的分析可以看出,受季风影响大的区域(香港、南京、昆明),降水量对 SIP 的影响明显大于温度,夏季温度高但 SIP 较小;北方非季风区(乌鲁木齐、齐齐哈尔)则温度效应占主导地位,夏季降水量虽大但 SIP 较高;交叉地域或季风的北界限(天津)则两种效应都有影响。高度、纬度和大陆效应本质上都与温度的变化有关^[1],Bowen 和 Wilkinson^[36]根据 GNIP 站点资料统计了 SIP 与纬度和高度的关系,得出: $\delta^{18}\text{O} = -0.0051(\text{纬度})^2 + 0.1805(\text{纬度}) - 0.002(\text{高度}) - 5.247$,并利用该式模拟了全球 $\delta^{18}\text{O}$ 分布。刘忠方等^[37]利用相似的方法建立了中国 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布统计模型为: $\delta^{18}\text{O} = -0.00176(\text{纬度})^2 + 1.1195(\text{纬度}) - 0.0016(\text{高度}) - 23.7553$ 。因中国地形复杂,纬度跨度大,内陆纵深广,季风的影响复杂,这些效应的综合分析更加复杂,将在今后工作中分析讨论。

5 结论与展望

通过分析不同地区典型站点的 SIP 分布特征发现,我国 SIP 空间分布范围大,从年均值来看呈现沿海高内陆低、低纬高中纬低的趋势。建立的中国 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 的关系接近 GMWL,但各地 LMWL 却有差异,且某些地区冬夏半年 LMWL 的差距明显,显示出水汽团特性的不同。我国 SIP 的季节变化显著,即受温度和降水量的影响,还与水汽来源和大气环流的变化有关^[38],不同地区季节变化特征的差异表明水汽来源和水汽输送过程的不同。SIP 年际变化复杂,受季风、ENSO 及大气环流的影响,且季风并不是直接通过降水量的变化影响 SIP 的变化。ENSO 与香港 SIP 的正相关关系说明 ENSO 对我国

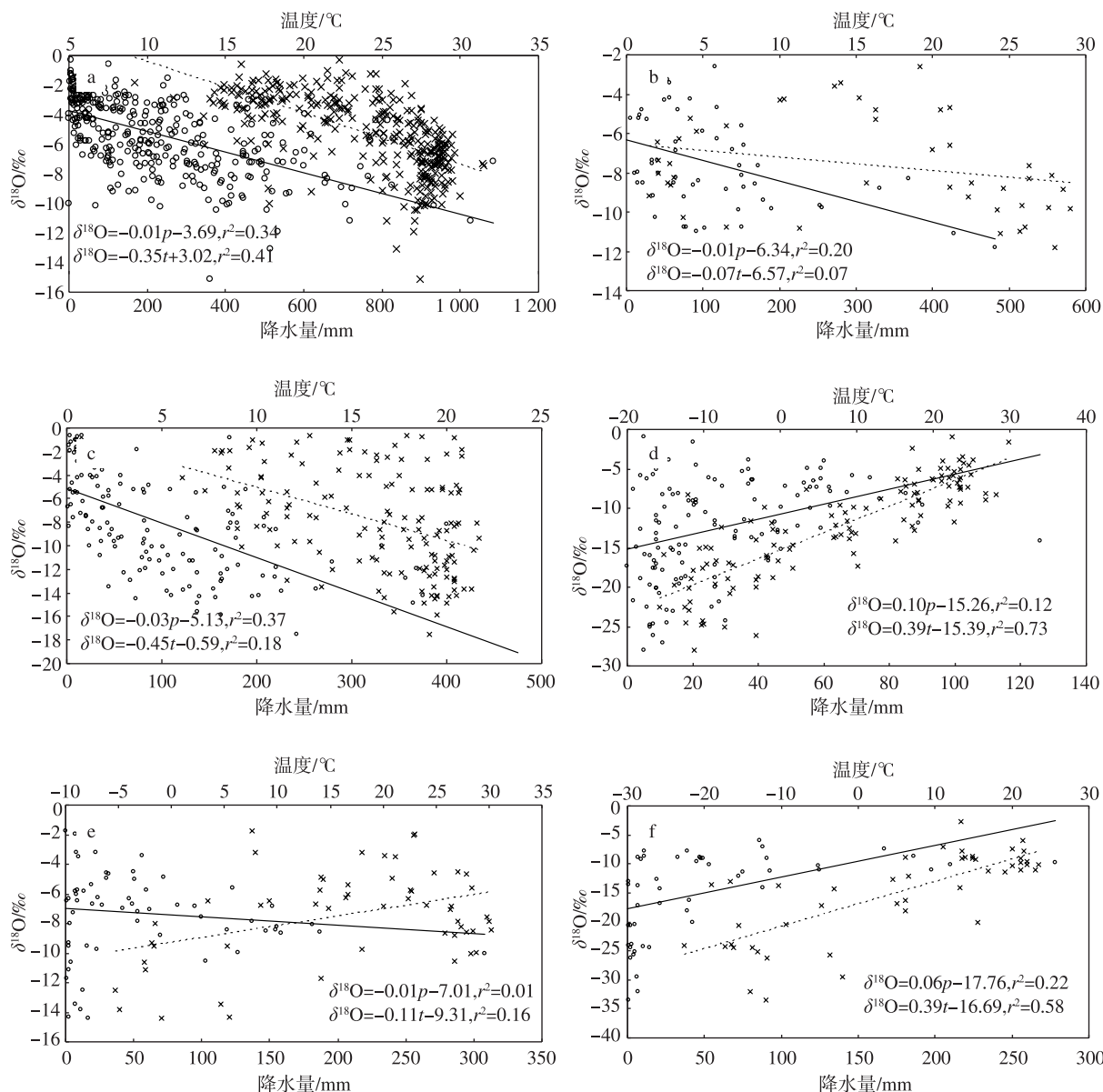


图 10 一些站点的月均 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量(p , \circ 、实线)、温度(t , \times 、点线)的相关关系 a. 香港;b. 南京;c. 昆明;d. 乌鲁木齐;e. 天津;f. 齐齐哈尔

Fig. 10 Correlations of monthly $\delta^{18}\text{O}$ with precipitation (p , \circ , solid line) and temperature (t , \times , dotted line) of some representative stations a. Hong Kong; b. Nanjing; c. Kunming; d. Urumchi; e. Tianjin; f. Qiqihar

SIP 的年际变化影响较大,但并非影响降水量而是通过影响大气环流引起 SIP 的年际变化的。我国 SIP 的温度和降水量效应在不同地区的主导地位也有差异,整体来看与季风特别是夏季风的影响区域有关,季风区降水量效应占优,而非季风区则温度效应明显,并伴随着一定的季节变化,交叉地带则两种效应都有影响。

事实上,从我国 SIP 的年均分布来看仍有一些疑问。首先,同处西北的乌鲁木齐、和田和张掖 $\delta^{18}\text{O}$ 差距很大(分别为 -10.07‰ 、 -5.3‰ 和 -5.8‰ ,图 2),

且 d 的分布与 SIP 也不相关(分别为 12.8‰ 、 11.1‰ 和 7.7‰),若该地区主要受来自中亚的水汽影响^[7],那么是什么原因造成了 SIP 的差异? 其次,既然现代观测表明 SIP 有复杂的季节变化,且有可能冬夏(干、雨)两季水汽来源及影响因素都有差异,那么在复原古气候特别是古季风的研究中能否直接利用洞穴堆积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 来代表季风的强度? 最后,单站点的 SIP 能否代表整个地区的降水特征? 这对利用洞穴堆积物 $\delta^{18}\text{O}$ 研究古季风显得极为重要。

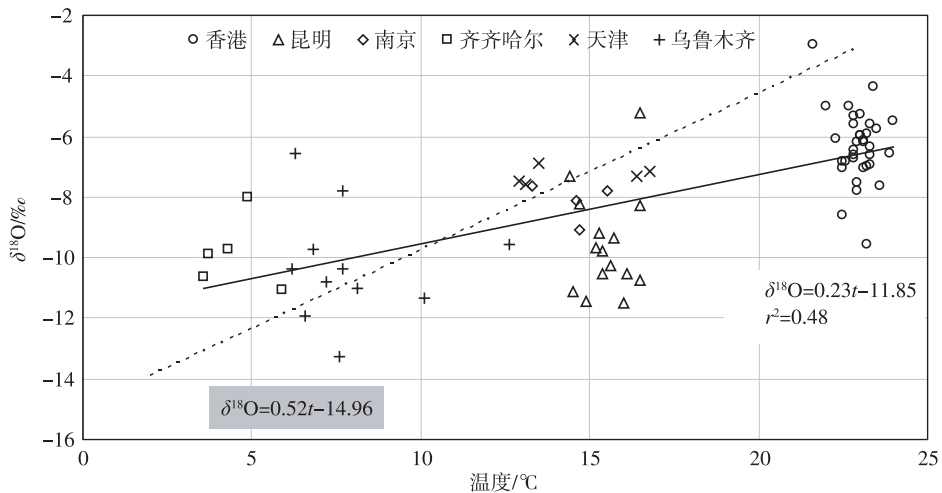


图 11 一些站点的年均加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 与地表温度的相关关系(实线为中国、虚线及灰影为 GNIP^[35] 的分析结果)

Fig. 11 Correlations of annual weighted mean $\delta^{18}\text{O}$ and surface temperature of some representative stations(Solid line is the result of China stations, and dashed line and grey area are the results of GNIP^[35])

参考文献:

- [1] Mook W G. Environmental isotopes in the hydrological cycle; principles and applications[C]//IAEA Technical Documents in Hydrology. Paris: UNESCO, 2001.
- [2] Friedman I. Deuterium content of natural waters and other substances[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1953, 4: 89-103.
- [3] Dansgaard W. The abundance of O^{18} in atmospheric water and water vapour[J]. Tellus, 1953, 5: 461-469.
- [4] Epstein S. Variations of the $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$ ratios of fresh water and ice [R]//Nat Acad Sci, Nucl Sci Ser, 1956, Rep. No. 19. 1956: 20-25.
- [5] Craig H. Isotopic variation in meteoric waters [J]. Science, 1961, 133: 1702-1703.
- [6] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. Tellus, 1964, XVI(4): 436-468.
- [7] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia[J]. J Geophys Res, 1998, 103(D22): 28721-28742.
- [8] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中 O^{18} 的分布特点[J]. 地理学报, 1998, 53(4): 356-364.
- [9] Gat J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle [J]. Annu Rev Earth Planet Sci, 1996, 24: 225-262.
- [10] Lee J E, Fung I. "Amount effect" of water isotopes and quantitative analysis of post-condensation processes [J]. Hydrol Process, 2008, 22: 1-8.
- [11] Rozanski K, Araguás-Araguás L, Gonfiantini R. Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate[J]. Science, 1992, 258: 981-985.
- [12] Merlivat J, Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium—oxygen-18 relationship for precipitation [J]. J Geophys Res, 1978, 84: 5029-5033.
- [13] Gat J R. Some classical concepts of isotope hydrology [C]// Aggarwal P, et al. Isotopes in the Water Cycle: Past, Present and Future of a Developing Science. Dordrecht: Springer, IAEA, 2005: 127-137.
- [14] 郑淑慧, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, 13(3): 801-806.
- [15] 于津生, 虞福基, 刘德平. 中国东部大气降水氢、氧同位素组成[J]. 地球化学, 1987, 16(1): 22-26.
- [16] 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 青藏高原南北降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系[J]. 中国科学 D 辑, 2001, 31(3): 214-220.
- [17] Sonntag C, Munnich K, Jacob H, et al. Variation of Deuterium and Oxygen 18 in continental precipitation and groundwater, and their causes [C]// Street-Perrot, et al. Variation in the Global Water Budget. Dordrecht: Reidel Publ, 1983: 107-124.
- [18] Bryson R A. Airstream climatology of Asia [C]// Proceedings of the International Symposium on the Qinghai-Xizang Plateau and Mountain Meteorology. Boston, Mass: Amer Meteor Soc, 1986: 604-617.
- [19] Winkler M G, Wang P K. The late-quaternary vegetation and climate of China [C]// Wright H, et al. Global Climates Since the Last Glacial Maximum. Minneapolis: Univ of Minn Press, 1993: 221-264.
- [20] 周长艳, 何金海, 李薇, 等. 夏季东亚地区水汽输送的气候特征[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(1): 18-27.
- [21] 朱敏, 左瑞亭, 张铭. 南海季风爆发与风向改变指数关系初探[J]. 气象科学, 2009, 29(6): 787-792.
- [22] 卫克勤, 林瑞芬. 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.
- [23] 曾刚, 孙照渤, 林朝晖, 等. 东亚夏季风的自然变率——NCAR Cam3 模拟结果分析[J]. 大气科学学报, 2009, 32(4): 498-506.
- [24] 蔡学湛, 温珍治, 扬义文. 东亚夏季风异常大气环流遥相关及

- 其对我国降水的影响[J]. 气象科学,2009,29(1):46-51.
- [25] Webster P J, Magana V O, Palmer T N, et al. Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction [J]. *J Geophys Res*, 1998, 103(C7):14451-14510.
- [26] Vuille M, Werner M, Bradley R S, et al. Stable isotopes in precipitation in the Asian monsoon region [J]. *J Geophys Res*, 2005, 110, D23108, doi:10.1029/2005JD006022.
- [27] Ichiyanagi K, Yamanaka M. Interannual variation of stable isotopes in precipitation at Bangkok in response to El Nino Southern Oscillation [J]. *Hydrol Process*, 2005, 19:3413-3423.
- [28] Ichiyanagi K, Numaguti A, Kato K. Interannual variation of stable isotopes in Antarctic precipitation in response to El Nino Southern Oscillation [J]. *Geophys Res Lett*, 2002, 29, 1001, doi:10.1029/2000GL012815.
- [29] Ashrit R G, Kumar K R, Kumar K K. ENSO-monsoon relationships in a greenhouse warming scenario [J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(9):1727-1730.
- [30] Tian L D, Yao T D, MacClune K, et al. Stable isotopic variations in West China: A consideration of moisture sources [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112, D10112, doi:10.1029/2006JD007718.
- [31] 钱永甫,王谦谦,钱云,等. 青藏高原等大地形和下垫面的动力和热力强迫在东亚和全球气候变化中作用的新探索[J]. 气象科学,1995,15(4):7-16.
- [32] 田红,郭品文,陆维松. 夏季水汽输送特征及其与中国降水异常的关系 [J]. 南京气象学院学报,2002,25(4):496-502.
- [33] Cai Y, An Z, Cheng H, et al. High-resolution absolute-dated Indian Monsoon record between 53 and 36 ka from Xiaobailong Cave, southwestern China [J]. *Geology*, 2006, 34:621-624.
- [34] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years [J]. *Nature*, 2008, 451:1090-1093.
- [35] Yurtsever Y. Worldwide survey of isotopes in precipitation [R]//Report of the Isotope Hydrology Section. Vienna:IAEA, 1975.
- [36] Bowen G J, Wilkinson B. Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in meteoric precipitation [J]. *Geology*, 2002, 30(4):315-318.
- [37] 刘忠方,田立德,姚檀栋,等. 中国大气降水中 ^{18}O 的空间分布 [J]. 科学通报,2009,54(6):804-811.
- [38] 章新平,刘晶森,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.

(责任编辑:倪东鸿)