粤西云浮市大气降水 $\delta^{18}O$ 与水汽来源的关系

郑琰明, 钟巍*, 彭晓莹, 薛积彬, 赵引娟, 马巧红, 蔡颖
(华南师范大学地理科学学院, 广州 510631)

摘要: 2005-04-05~2006-04-01 期间在粤西云浮市采集了 59 次具有显著天气过程的大气降水样品, 并进行了稳定氧同位素测试, 结果显示此期间云浮市大气降水中$\delta^{18}O$值波动于-12.47‰~-0.18‰之间, 平均值为-4.91‰; 夏秋季(5~9 月)的$\delta^{18}O$值相对偏低, 多数在-10.00‰~-5.00‰, 平均-6.30‰; 冬春季(11 月~次年 4 月)的$\delta^{18}O$值相对偏高, 多数在-3.00‰~-1.00‰, 平均-2.20‰. 这些$\delta^{18}O$值与它们相应的气温、水汽压(e)呈较为显著负相关, 相关系数(R)均达-0.60, 而与降水量的负相关性较差, 相关系数(R)为-0.33. 与大致同时期的广州降水中$\delta^{18}O$月平均值相比, 云浮降水中$\delta^{18}O$呈相对低值, 可能与云浮市受到了较强的西南季风叠加影响有关. 后推气流轨迹的结果表明, 这些大气降水$\delta^{18}O$值在前汛期(4~6 月)、后汛期(7~9 月)和非汛期(10 月~次年 4 月)中的变化很大程度上受不同水汽来源决定, 表明降水$\delta^{18}O$值在一定程度上具有指示水汽来源的作用: $\delta^{18}O$值偏高的大气降水其水汽可能主要来源于西太平洋的副热带海区(包括我国南海海域)的变性热带太平洋暖气团; 而$\delta^{18}O$值偏低的大气降水其水汽则来源于印度洋和孟加拉湾的变性热带海洋气团.

关键词: 大气降水; 氧同位素; 水汽来源; 云浮市
中图分类号: X142; X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)03-0637-07

Correlation of $\delta^{18}O$ in Precipitation and Moisture Sources at Yunfu, Western Guangdong Province, China

ZHENG Yan-ming, ZHONG Wei, PENG Xiao-ying, XUE Ji-bin, ZHAO Yin-juan, MA Qiao-hong, CAI Ying
(School of Geography Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: Fifty-nine samples of atmospheric precipitation were collected at Yunfu, Western Guangdong province during the period of April 5, 2005 to April 1, 2006 and their oxygen isotopic compositions were analyzed. Results show that $\delta^{18}O$ values range from -12.47‰ to -0.18‰ with an average of -4.91‰; the $\delta^{18}O$ values of summer and autumn (from May to September) are relatively lower, ranging from -10.00‰ to -5.00‰ with an average of -6.30‰; the $\delta^{18}O$ values of winter and spring (from October to next April) are relatively higher, ranging from -3.00‰ to -1.00‰ with an average of -2.20‰. These $\delta^{18}O$ values have relatively marked negative correlation with the corresponding temperatures and water vapour pressure and their coefficients are both -0.60; but they have bad negative correlation with the precipitation amount, the coefficient is -0.33. Comparing with the monthly $\delta^{18}O$ value of Guangzhou atmospheric precipitation, those of Yunfu City is relatively lower, maybe the reason is that Yunfu City is influenced by stronger South-West Asian Monsoon. The results of HYSPLIT back trajectory analysis indicated that the differences of $\delta^{18}O$ values are determined by different water vapour sources during the pre-rainy season (from April to June), post-rainy season (from July to September) and non-rainy season (from October to next April), so the $\delta^{18}O$ values can be considered as an indicator of denoting their water vapour sources, relatively higher $\delta^{18}O$ values denote the water vapour sources are denaturalized tropical hot air mass located in the subtropical sea areas (including the South China Sea), western Pacific Ocean; relatively lower $\delta^{18}O$ values indicate denaturalized tropical hot air mass from the India Ocean and Bengal Gulf.

Key words: atmospheric precipitation; oxygen isotopic composition; moisture source; Yunfu City

现代大气降水中稳定同位素($\delta^{18}O$)组成是全球或局地水循环研究的重要载体, 同时也是运用冰芯、石笋等稳定同位素来重建古气候的极其重要的依据[1~5]. 自 1961 年起, 在国际原子能机构(IAEA)和世界气象组织(WMO)的共同努力下, 迄今已在全球了建立了超过 800 个降水取样站, 对降水中稳定同位素比率进行连续的跟踪监测[6]. 纵览国内外已发表的相关报道[7~15], 虽然由于不同学者因研究地点的差异, 所得出的结果和看法各有异同, 如高纬度地区的大气降水中$\delta^{18}O$受温度影响大[7,8], 低纬度热带地区深受降水量控制[9~11], 中纬度地区则是受温度和降水量共同作用[12]; 但他们多数认为, 现代大气降水中$\delta^{18}O$受包括降水时的气温、水汽压、降水量等气象要素和水汽来源、气团输送过程、海拔高度等多种因素的共同影响[13~15].

我国是深受亚洲季风影响的地区, 其现代大气降水$\delta^{18}O$必然与组成季风系统的各要素密切相

收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-07-30
基金项目: 国家自然科学基金项目(40671189); 广东省自然科学基金项目(06025042, 8151063101000044); 教育部霍英东基金项目(91021)
作者简介: 郑琰明(1980~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境演变, E-mail: nhzym2@163.com
* 通讯联系人, E-mail: DL06@scnu.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

关[16~20]. 目前, 国内也有不少学者对西南季风影响的西南地区、东南季风影响的东部沿海和独特季风系统的青藏高原现代大气降水$\delta^{18}O$及其影响因素、水汽来源等进行了较为深入的探讨[21~23], 而对于一些可能受东南季风和西南季风共同影响地区的大气降水$\delta^{18}O$的相关研究却涉及很少. 云浮市位于广东省西部(粤西), 其地理位置较为偏西且接近西南季风区, 推测该地区除受东南季风作用外, 还可能叠加了西南季风的影响. 本研究以云浮市为对象, 在2005-04~ 2006-04 期间共采集了 59 个具有显著天气过程的降水样品, 尝试通过分析样品中$\delta^{18}O$的变化特征, 来了解影响该地区现代大气降水氧同位素变化的可能因素.

1 材料与方法

1.1 样品采集和实验方法

研究区 ——云浮市地处广东省西部(图 1), 地貌特征以低山丘陵为主, 属亚热带季风性湿润气候, 年平均气温 21.50℃, 最热月均气温 28.50℃, 最冷月均气温 13.10℃; 降水丰沛且集中于夏秋季(4 ~ 9 月), 冬季降雨少, 多年平均降雨量为 1 518 mm, 最多年份达2 100 mm以上[24].

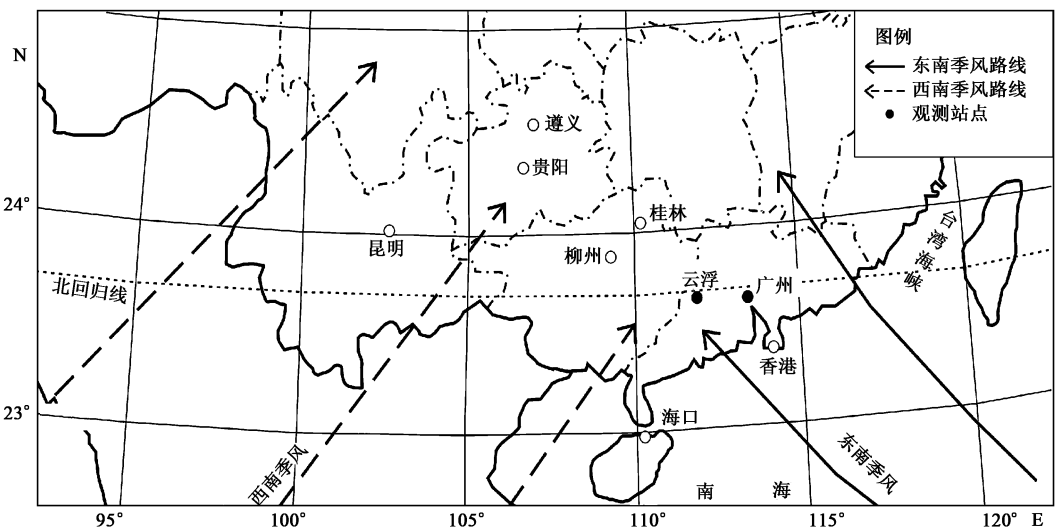


图 1 采样点位置及季风路径示意

Fig. 1 Location of study area and the monsoon trajectories

采样点选在云浮市西北郊区一处楼高约 4 m 的住宅楼顶, 采样时段为 2005-04-05~ 2006-04-01, 共采集了 59 个具有明显天气过程降水样品. 收集降水所用装置为 Koshin Denki Kogyo 公司生产的 DRS-154W 型自动干湿采样器, 其内设一个直径 155 mm 的 5 L 的聚乙烯桶, 桶上的集雨漏斗在无降水时被盖住, 发生降水时盖子自动揭开, 能有效地避免受到其它非降水污染物混入. 在收集降水样品时, 同步记录了当时的近地面气温、降水量和水汽压等气象要素. 所收集的降水样品经密封、低温保存(4℃), 在中国科学院青藏高原研究所用 MAT-253 型气体同位素质谱仪进行了稳定氧同位素测试, 以 VSMOW 标准, 得到的稳定同位素比率 δ(‰), 即:

$$\delta^{18}O = (R_{SAMPLE}/R_{SMOW} - 1) \times 1\,000‰$$

R_{SAMPLE}和 R_{SMOW}分别指样品中和标准物中氧同位素成分的相对含量, 精度在±0.2‰.

1.2 气流轨迹分析

气流轨迹是指大气气团在一定时间内的运动路径, 可以用来分析降水气团的来源和传输途径[21]. 本研究利用美国海洋与大气局(NOAA) 空气资源实验室 ARL (air resources laboratory) 和澳大利亚墨尔本气象研究中心联合开发的混合型单粒子拉格朗日综合轨迹模式 HYSPLIT (http://www.arl.noaa.gov/ready/open/hysplit4.html), 对引起每次降水的大气气团进行后推气流模拟. 气象数据选用 GDAS 数据库, 每次向后延伸时间为 144 h(6 d), 起始高度分别为地面以上 500、1 000和1 500 m.

2 结果与讨论

2.1 降水中$\delta^{18}O$值及其随时间的变化特征

图 2 绘制了这 59 次降水中$\delta^{18}O$值、近地面气温、水汽压和降水量随时间的变化趋势, 可以看出如下

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

特征: ①该地区大气降水中$\delta^{18}O$值波动较大, 变化幅度为 -12.47‰~ -0.18‰, 平均 -4.91‰. ②这些$\delta^{18}O$值变化具一定季节性变化, 即夏秋季(5~9月)的$\delta^{18}O$值普遍偏低, 多数在 -10.00‰~ -5.00‰, 平均 -6.30‰; 冬春季(11月~次年4月)的$\delta^{18}O$值普遍偏高, 多数在 -3.00‰~ -1.00‰, 平均 -2.20‰. 这些大气降水中$\delta^{18}O$值的波动特征与我国东部季风区已有相关研究的桂林、香港等地的大气降水中$\delta^{18}O$值的研究结果较为一致[15, 23].

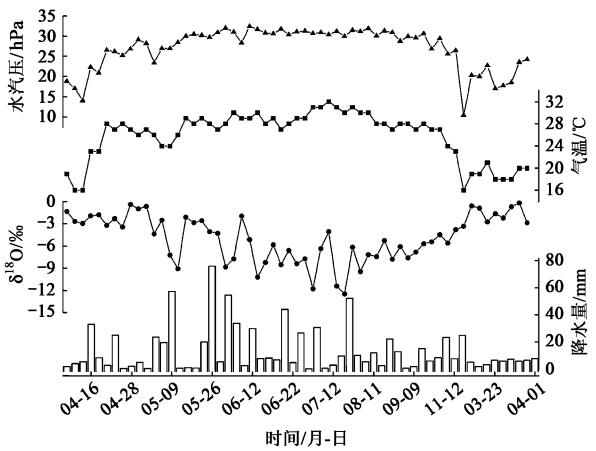


图 2　云浮 2005~2006 年间降水中$\delta^{18}O$值、水汽压、气温及降水量的变化

Fig. 2　Variations of the $\delta^{18}O$ in precipitation, vapor pressure, air temperature and precipitation amount at Yunfu City in 2005-2006

2.2　降水中$\delta^{18}O$值与气温、水汽压、降水量等气象要素的关系

由图2也可以看出, 这些$\delta^{18}O$值与气温、水汽压和降水量之间呈反向波动趋势, 即前者与后三者之间存在一定的负相关关系(图3), 其相关方程如下.

①$\delta^{18}O$与气温的关系:

$$\delta^{18}O\ (‰) = -0.43t + 6.18$$

$$(n = 59,\ R = -0.60,\ p < 0.001)$$

②$\delta^{18}O$与水汽压的关系:

$$\delta^{18}O\ (‰) = -0.36e + 4.93$$

$$(n = 59,\ R = -0.60,\ p < 0.001)$$

③$\delta^{18}O$与降水量的关系:

$$\delta^{18}O\ (‰) = -0.06P - 4.04$$

$$(n = 59,\ R = -0.33,\ p < 0.05)$$

就相关系数而言, $\delta^{18}O$与气温、水汽压(e)呈较为显著相关, 相关系数(R)均达 -0.60, 而与降水量的相关性较差, 相关系数(R)为 -0.33. 这说明与中高纬内陆所具有的"温度效应"[8, 21]不同, 云浮地区$\delta^{18}O$与气温存在明显的负相关性, 这是低纬季风区大气降水$\delta^{18}O$变化所特有的现象[9, 18, 20]. 然而, 低纬季风区降水$\delta^{18}O$中所具有的显著"降水量效应"[16, 18, 23]在云浮市表现并不明显, 这可能与季风活跃期和不活跃期的交替出现以及相邻较短天数内季风强度的不同, 从而引起降水中$\delta^{18}O$值发生异常有关[16~18]. 至于$\delta^{18}O$与水汽压之间较为显著的负相关性, 则反映了随着大气湿度的增大, 降水中$\delta^{18}O$因蒸发作用加强、重氧同位素富集而显著偏负[9].

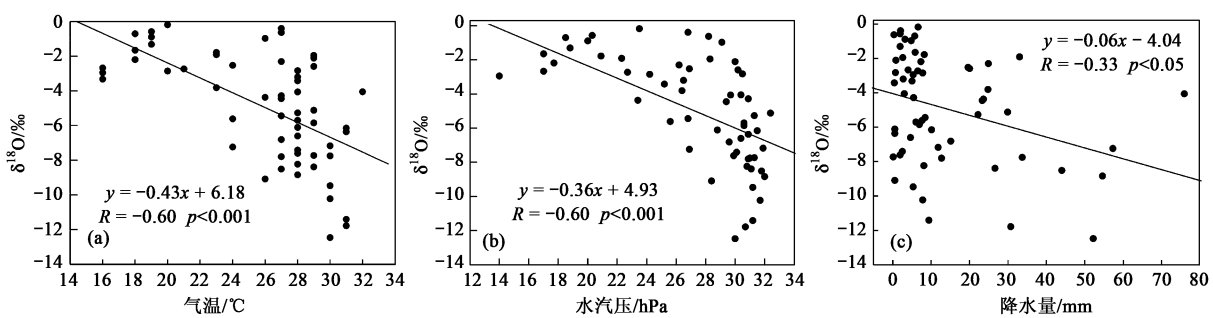


图 3　云浮降水中$\delta^{18}O$与气温、水汽压和降水量的关系

Fig. 3　Correlation of $\delta^{18}O$ in precipitation with air temperature, vapor pressure and precipitation amount at Yunfu City

2.3　云浮与广州降水中$\delta^{18}O$值比较

位于粤中珠三角地区的广州与云浮相差约1个经度(图1), 由于两地地理位置和水汽循环的不同, 影响两地降水中$\delta^{18}O$变化的主要因素也应该存在一定差异. 根据2004~2005年间在广州收集和分析的53个降水样品, 绘制了广州降水中$\delta^{18}O$与气温、降水量之间的散点图[图4(a)和4(b)]. 从中可见, 降水中$\delta^{18}O$与气温、降水量都具有负相关性, 其相关方程如下.

①$\delta^{18}O$与气温的关系:

$$\delta^{18}O\ (‰) = -0.38t + 4.74$$

$$(n = 53,\ R = -0.59,\ p < 0.001)$$

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

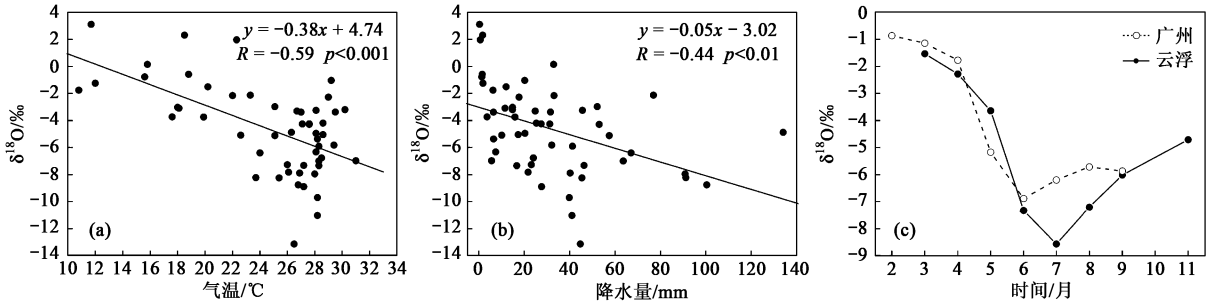


图 4 广州降水中$\delta^{18}O$与气温、降水量的散点分布以及广州与云浮降水中$\delta^{18}O$月值的比较

Fig. 4 Correlation of $\delta^{18}O$ in precipitation with air temperature and precipitation amount at Guangzhou, and monthly variations of $\delta^{18}O$ between Yunfu and Guangzhou

②$\delta^{18}O$与降水量的关系:

$$\delta^{18}O(‰) = -0.05P - 3.02$$

$$(n = 53,\ R = -0.44,\ p < 0.01)$$

显然, 广州降水中$\delta^{18}O$随气温、降水量增加的变率分别为 − 3.8 ‰/10 ℃和 − 5 ‰/100 mm, 明显低于云浮的 − 4.3 ‰/10 ℃和 − 6 ‰/100 mm, 同时降水中$\delta^{18}O$ 的"降水量效应"在广州降水中表现比较明显, 相关系数(R)达 − 0.44.

进一步分析云浮、广州降水中月平均$\delta^{18}O$值的随时间的变化[图 4(c)], 不难发现除 5 月外, 云浮降水中$\delta^{18}O$月值均较广州低. 尤其在夏季风盛行的 7 月和 8 月, 云浮降水中$\delta^{18}O$月值为 − 8.57 ‰和 − 7.21 ‰, 分别比广州偏负 2.37 ‰和 1.47 ‰. 造成这种现象的原因较为复杂, 首先是因为云浮和广州都主要受东南季风的影响, 但由于云浮地理位置更为偏西接近西南季风影响区(图 1), 更易受到西南季风的叠加影响, 导致降水中$\delta^{18}O$偏负; 其次, 云浮距海距离比广州远, 降水气团所携带$\delta^{18}O$自海洋向内陆输送过程中不断被贫化; 而且云浮海拔相对较高, 采样点海拔约 150 m, 而广州仅 6 m 左右, 这些因素也使得云浮降水中$\delta^{18}O$低于广州.

2.4 云浮降水中$\delta^{18}O$的波动与水汽来源的关系

研究表明, 大气降水中$\delta^{18}O$不仅与局地气候要素(如气温、降水量等) 存在相关关系, 同时也与大气水汽输送过程具紧密联系[20, 21]. 利用 HYSPLIT 气流轨迹模型, 本研究计算了 2005~ 2006 年间云浮市各次降水的水汽来源路径, 结合云浮市历次降水中$\delta^{18}O$的变化, 以此来探讨云浮地区降水中$\delta^{18}O$与水汽输送之间的可能关系. 图 5 中列出了 12 次较为典型的气流轨迹(图 5).

(1) 前汛期降水(4~ 6 月) 该时段云浮地区大气降水中$\delta^{18}O$值由 4 月向 6 月呈波动下降趋势(图 2): 2005 年 4 月 5~ 17 日, $\delta^{18}O$值较高, 其值介于 − 2.95 ‰~ − 1.31 ‰之间, 平均为 − 2.12 ‰; 4 月 23 日~ 5 月 4 日, 其值变化于 − 3.42 ‰~ − 0.29 ‰之间, 平均为 − 1.81 ‰; 5 月 6~ 26 日$\delta^{18}O$明显降低, 其值波动于 − 9.09 ‰~ − 2.11 ‰之间, 平均为 − 4.35 ‰; 6 月 3~ 30 日, $\delta^{18}O$波动较大, 变化于 − 11.78 ‰~ − 1.79 ‰之间, 平均为 − 7.33 ‰. 可见, 即使同处于前汛期, 不同时段中的降水中$\delta^{18}O$也存在明显的差异. 究其原因, 除前已述及的气温、水气压、降水量等气象要素外, 它们的水汽来源及其路径也是导致这些$\delta^{18}O$值差异的重要因素. 这可从用 HYSPLIT 气流轨迹模型后推的不同时段气流轨迹(图 5) 中得到较好地说明.

①4 月 5 日~ 17 日: 气流轨迹显示(图 5), 该时段大气降水气团看似来源于我国西北内陆途经东海后的海洋变性极地大陆气流[25]. 若果真如此, 那么水汽从远距离的西北输送至云浮, 很可能会造成重氧同位素的"遗失", 以致$\delta^{18}O$呈现低值, 这显然与该时段云浮大气降水$\delta^{18}O$出现 − 2 ‰~ − 1 ‰左右的"高值"的实际情况是相互矛盾的. 因此可以认为远距离的"海洋变性极地大陆气流"对该时段$\delta^{18}O$高值的贡献较小, 主要贡献因子很可能是来自近距离的局地环流气团.

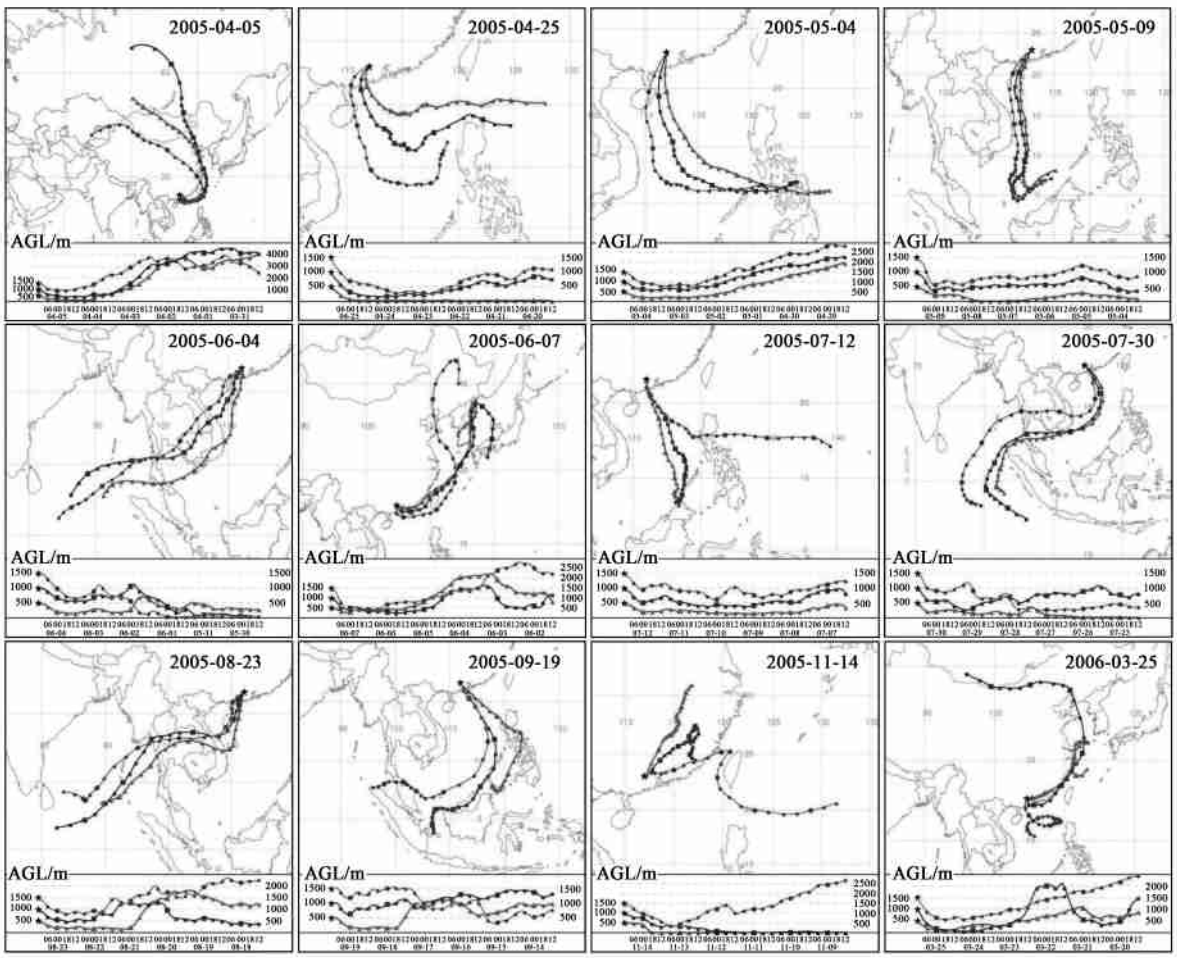
②4 月 23 日~ 5 月 4 日: 该时段气流轨迹 (图 5) 指示其水汽来源于西太平洋的副热带海区的变性热带太平洋气团 (东南季风)[25].

③5 月 6~ 26 日: 该时段气流轨迹表明其水汽来源于我国南海的海洋性气团.

④6 月 3~ 30 日: 该时段广东遭受了历史罕见的连续暴雨和强降水侵袭[26]. 6 月 4 日$\delta^{18}O$值为 − 8.84 ‰, 达到前汛期的低值, 其气流轨迹(图 5) 显示此次的水汽来源于印度洋和孟加拉湾的变性的

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

热带海洋气团(西南季风)[25]. 从图 2 可以看到, 6 月 7 日 $\delta^{18}O$ 突然回升到 - 1.95‰, 其气流轨迹(图 5)相应产生明显的变化, 其水汽则来源于西太平洋的日本海附近. 云浮地区该月份除 6 月 7 日外的其它时间, 多数 $\delta^{18}O$ 值和气流轨迹与 6 月 4 日的情形类似, 说明 6 月份的降水深受起源于印度洋和孟加拉湾的西南季风影响.



上部曲线代表气流水平运移路径; 下部曲线代表垂直方向气流轨迹, AGL 代表海拔高度

图 5　云浮市 2005~ 2006 年间不同时间的气流轨迹图

Fig.5　Moisture trajectories of different precipitations at Yunfu City in 2005-2006

(2) 后汛期降水(7~ 9 月)　该时段云浮地区大气降水中 $\delta^{18}O$ 值由 7 月向 9 月呈缓慢波动上升趋势(图 2): 7 月 8 日和 12 日的 2 次降水中 $\delta^{18}O$ 值较高, 分别为 - 6.36‰和 - 4.05‰; 7 月 29 日和 30 日降水中 $\delta^{18}O$ 突然下降, 依次为 - 11.41‰和 - 12.47‰; 8 月份, 记录的 6 次降水中 $\delta^{18}O$ 变化于 - 9.47‰~ - 5.27‰之间, 平均为 - 7.11‰; 9 月份, 记录的 6 次降水中 $\delta^{18}O$ 波动于 - 7.62‰~ - 4.45‰之间, 平均为 - 6.02‰. 从后推的气流轨迹来看, 它们的水汽来源同样也是影响这些降水中 $\delta^{18}O$ 波动的重要因素. 例如, $\delta^{18}O$ 值偏高的 7 月 12 日和 9 月 19 日, 其水汽来源于属西太平洋的副热带海区的菲律宾群岛附近海区; $\delta^{18}O$ 值偏高的 7 月 30 日和 8 月 23 日, 其水汽来源于印度洋和孟加拉湾南部附近, 但途中发生"S"型偏转, 进入我国南海后在沿海登陆. 当然, 每年的夏秋季是热带气旋的活跃时期, 其驱动的台风对云浮地区的大气降水过程必然产生了重要的影响[27]. 如 9 月 3 日、9 月 18~ 19 日和 9 月 25~ 27 日, 云浮地区的大气降水分别是深受 0513 号强台风"泰利"(9 月 1 日在福建省登陆)、0516 号热带风暴"韦森特"(9 月 18 日在越南登陆)和 0518 号台风"达维"(9 月 26 日在海南省登陆)的影响[27].

(3) 非汛期降水(10 月~ 次年 4 月)　气象观测表明[28], 2005 年 10~ 11 月, 副热带高压持续偏强且加强西伸, 使得广东省出现较历史同期的罕见高温, 降水严重偏少. 云浮地区仅在 11 中旬和次年 3 月份出现明显的降水过程. 2005-11-12 和 2005-11-14

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的$\delta^{18}O$值分别为－5.61‰和－3.81‰; 2006-03-13～2006-04-01 的 9 次降水, $\delta^{18}O$值波动于－3.32‰～－0.18‰之间, 平均为－1.68‰. 显然, 这些$\delta^{18}O$值呈现一个相对的高值, 它们的气流轨迹(图 5)显示, 这些降水过程的发生主要受西太平洋的副热带海区的变性热带太平洋暖气团和南下西伯利亚-蒙古大陆性冷气团(东亚冬季风)的共同作用, 其水汽来源主要来源于西太平洋的暖气团或伴随其运送过程中的局部水汽环流.

3 结论

(1) 2005-04～2006-04 期间云浮市大气降水中$\delta^{18}O$存在较大的波动, 变化于－12.47‰～－0.18‰之间, 平均值为－4.91‰; 这些$\delta^{18}O$值变化具一定季节性变化, 即夏秋季(5～9 月)的$\delta^{18}O$值普遍偏低, 多数在－10.00‰～－5.00‰, 平均值为－6.30‰; 冬春季(11 月～次年 4 月)的$\delta^{18}O$值普遍偏高, 多数在－3.00‰～－1.00‰, 平均值为－2.20‰.

(2) 云浮市降水中的$\delta^{18}O$与降水时气温、水汽压呈较为显著负相关, R 达－0.60, 而与降水量相关性较弱, R 为－0.33. 这主要是因为云浮市地处典型季风区内, 强烈的季风活动在一定程度上干扰了大气降水中$\delta^{18}O$的"降水量效应".

(3) 与大致同时期的广州降水中$\delta^{18}O$月平均值相比, 云浮降水中$\delta^{18}O$呈相对低值, 这可能与两地除受东南季风作用外, 云浮地理位置较为偏西且更加接近西南季风区, 更易受到西南季风的叠加影响有关. 此外, 距海远近、海拔高度的不同也可能对两地降水$\delta^{18}O$差异产生影响.

(4) 观测期间云浮市的前汛期降水(4～6 月)、后汛期降水(7～9 月)和非汛期降水(10 月～次年 4 月)$\delta^{18}O$值的变化在很大程度上受不同水汽来源决定, 即$\delta^{18}O$值在一定程度上具有指示水汽来源的作用. 气流轨迹显示, $\delta^{18}O$值偏高的大气降水的水汽主要来源于西太平洋的副热带海区的变性热带太平洋暖气团(包括我国南海海域), 部分叠加了局地水汽环流; $\delta^{18}O$值偏低的大气降水的水汽则来源于印度洋和孟加拉湾的变性热带海洋气团.

致谢: 降水样品的氧同位素分析得到了中国科学院青藏高原研究所康世昌研究员的大力帮助, 云浮市气象局提供了部分相关气象资料, 特致衷心感谢!

参考文献:

[1] 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.

[2] Gammons C H, Poulson S R, Pellicori D A, *et al*. The hydrogen and oxygen isotopic composition of precipitation, evaporated mine water, and river water in Montana, USA [J]. Journal of Hydrology, 2006, **328**(1-2): 319-330.

[3] Cobb K M, Adkins J F, Partin J W, *et al*. Regional-scale climate influences on temporal variations of rainwater and cave dripwater oxygen isotopes in northern Borneo[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, **263**(3-4): 207-220.

[4] Benway H M, Mix A C. Oxygen isotopes, upper-ocean salinity, and precipitation sources in the eastern tropical Pacific[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, **224**(3-4): 493-507.

[5] 罗维均, 王世杰, 刘秀明. 中国大气降水$\delta^{18}O$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.

[6] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, **16**(4): 436-468.

[7] Kohn M J, Welker J M. On the temperature correlation of $\delta^{18}O$ in modern precipitation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, **231**(1-2): 87-96.

[8] Yu W S, Yao T D, Tian L D, *et al*. Relationships between $\delta^{18}O$ in precipitation and air temperature and moisture origin on a south-north transect of the Tibetan Plateau[J]. Atmospheric Research, 2008, **87**(2): 158-169.

[9] Zhang X P, Liu J M, Sun W H, *et al*. Relations between oxygen stable isotopic ratios in precipitation and relevant meteorological factors in southwest China[J]. Science in China (Series D), 2007, **50**(4): 571-581.

[10] 牛 文, 何凌燕, 胡敏. 深圳大气降水的化学组成特征[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1014-1019.

[11] 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.

[12] Li Z, Yao T D, Tian L D, *et al*. Variations of $\delta^{18}O$ in precipitation from the Muztagata Glacier, East Pamirs[J]. Science in China (Series D), 2006, **49**(1): 36-42.

[13] Jeanton H C, Gonfiantini R, Travi Y, *et al*. Oxygen-18 variations of rainwater during precipitation: application of the Rayleigh model to selected rainfalls in Southern France[J]. Journal of Hydrology, 2004, **289**(1-4): 165-177.

[14] Alessandro W D, Federico C, Longo M, *et al*. Oxygen isotope composition of natural waters in the Mt Etna area [J]. Journal of Hydrology, 2004, **296**(1-4): 282-299.

[15] 李彬, 袁道先, 林玉石, 等. 桂林地区降水、洞穴滴水及现代洞穴碳酸盐氧碳同位素研究及其环境意义[J]. 中国科学(D 辑), 2000, **30**(1): 81-87.

[16] Pang H X, He Y Q, Lu A G, *et al*. Synoptic-scale variation of $\delta^{18}O$ in summer monsoon rainfall at Lijiang, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, **51**(23): 2897-2904.

[17] Pang H X, He Y Q, Zhang Z L, *et al*. Origin of summer monsoon rainfall identified by $\delta^{18}O$ in precipitation[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, **50**(23): 2761-2764.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[18] 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.

[19] 刘君峰, 宋之光, 许涛. 广州地区雨水化学组成与雨水酸度主控因子研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 1998-2002.

[20] 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.

[21] 徐彦伟, 康世昌, 周石 , 等. 青藏高原纳木错流域夏、秋季大气降水中 $\delta^{18}O$ 与水汽来源及温度的关系[J]. 地理科学, 2007, **27**(5): 718-723.

[22] 胡敏, 刘尚, 吴志军, 等. 北京夏季高温高湿和降水过程对大气颗粒物谱分布的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(11): 2293-2298.

[23] 薛积彬, 钟巍, 赵引娟. 珠江三角洲地区降水中 $\delta^{18}O$ 的变化特征与 ENSO 的关系[J]. 地理科学, 2007, **27**(6): 825-830.

[24] 云浮县地方志编纂委员会. 云浮县志[M]. 广州: 广东人民出版社, 1995. 102-103.

[25] 刘明光, 韩渊丰, 赵汝植, 等. 中国自然地理图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1998. 1-267.

[26] 罗晓玲. 大旱大涝与降水极端异常——广东 2005 年前汛期的天气气候[J]. 广东气象, 2005, (3): 49-50.

[27] 罗晓玲, 黄珍珠. 广东省 2005 年第 3 季度气候评述[J]. 广东气象, 2005, (4): 51-52.

[28] 曾侠, 罗晓玲. 气温大起大落, 降水严重偏少——广东省 2005 年第 4 季度气候评述[J]. 广东气象, 2006, (1): 66.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net