

珠江流域大气降水稳定性氢氧同位素特征

郭政昇, 王 娟, 赵 培

(商洛学院城乡规划与建筑工程学院, 陕西 商洛 726000)

摘 要:大气降水稳定同位素的特征对于明确流域水循环过程、水汽来源和气候变化等方面都有重要指示作用。选取珠江流域的广州、桂林、柳州和香港4个站点的IAEA大气降水氢氧同位素数据,对其时空分布特点及影响因素进行了研究。结果显示:该地区降水中氧同位素的变化呈现出旱季高、雨季低的特点。全年尺度下,4个站点主要受温度效应影响,只在旱季有着较为微弱的降水量效应;得到的珠江流域大气降水线方程: $\delta D=8.084\delta^{18}O+10.998$, $R=0.965$,对比全球及中国大气降水线方程,都较为接近,证明该地区降水主要遵循瑞利分馏过程; d 盈余值的变化呈现出雨季低、旱季高的特征,表明珠江流域水汽主要源于海洋,在旱季受到北方空气南下及局地水循环的影响。

关键词:珠江流域;大气降水;氢氧同位素;水汽来源

中图分类号:P342

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2017)02-0078-05

大气降水中的氢氧稳定同位素 ^{18}O 和 D 在全球与区域气候和水文学研究中被广泛运用。降水中所蕴含的 ^{18}O 和 D 是构成水体的原子,参与 to 自然界的水体循环,已成为研究水气团循环过程和追踪水汽来源变化的最好的天然示踪剂^[1-2]。同位素的浓度变化主要受不同区域自然条件的变化影响,进而引起水循环中分馏过程的变化。在气团运移过程中,由于沿海到内陆的温度、海拔等环境因素的改变,导致气团中的稳定同位素表现出逐渐贫化的趋势。内陆的蒸发导致同位素富集,而不同水体间的局地水循环则会引起同位素交换^[3]。因此通过同位素技术能够有效的分析地球表面和陆地水的来源与演变,进而有助于对地区水循环和气候变化做深入了解。

将同位素技术运用于水循环的研究最早开始于国外:早在1953年,学者Dansgaard就开始对降水中的稳定同位素进行观测和系统研究^[4]。国际原子能机构IAEA(International Atomic Energy Agency)与世界气象组织WMO(World Meteorological Organization)在1961年合作建立了全球大气降水同位素网络GNIP(Global Network of Isotope in Precipitation),开始在全球范围内收集降水样品和气象数据,进行同位素分析^[5]。我国于1983年加入GNIP研究计划,目前已有多个站点。在2004年,中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem

Research Network, CERN)以各野外台站为基础,建立了我国大气降水同位素网络(Chinese Network Isotope in Precipitation, CHNIP),并开始系统地对 ^{18}O 和 D 进行采样、观测和分析,揭示我国大气降水中氢氧同位素的时空变化特征与规律^[6]。

我国处于亚欧大陆东部季风区,不同季节的季风变化成为影响区域内各水体同位素变化特征的主要因素。珠江流域地处华南地区,主要受到来自于印度洋和太平洋的西南和东南季风的共同影响。作为两支季风入境首先经过的区域,对珠江流域的降水同位素研究,有助于加深在全国降水同位素分布及变化特征的理解。本文结合相关气象资料,着重研究珠江流域降水同位素的变化特征。

1 研究区概况

珠江全长2 214 km,发源于云南曲靖的马雄山,在我国流经滇、黔、桂、粤、湘、赣、港、澳,于珠江三角洲入南海。珠江流域(102°14'~115°53'E, 21°31'~26°49'N)内河流密布,水系复杂,由西江、北江、东江及珠江三角洲诸河等四个水系所组成,流域面积45.2×10⁴ km²^[7]。本流域靠近南海,地处亚热带,北回归线横贯流域的中部,属于湿热少雨的亚热带气候,大部分地区年平

收稿日期:2016-06-13

作者简介:郭政昇(1993-),男,山西大同人,就读于陕西省商洛学院,主要研究方向为同位素水文学。E-mail:1452952176@qq.com

通讯作者:赵培(1982-)男,吉林磐石人,博士,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为同位素水文学。E-mail:626268@qq.com

均温度在 20℃ 以上, 年际变化不大。降雨集中发生在 4~9 月, 汛期降雨量约占全年的 80% 以上, 流域内年降水量多在 1 000~2 200mm 之间^[8]。流域内降水时间、空间分布差异较大, 分为干湿两季, 夏半年多雨、冬半年少雨, 空间分布总体呈由东向西逐渐减少的变化趋势^[9]。

2 数据来源

本文所采用的降水氢氧同位素数据资料在 GNIP 网下载。全球降水同位素网(GNIP)中珠江流域包括: 广州站(1986~1989)、桂林站(1983~1990)、柳州站(1988~1992)和香港站(1961~2014)四个站点。各站点相关数据由 IAEA 发布, 可在 <http://iaea.org/water> 上查阅。文中的 δ 值均以 V-SMOW 为标准, 单位为 ‰, 表示为:

$$\delta = (R_{\text{水样}} / R_{\text{V-SMOW}}) \times 1000$$

式中: $R_{\text{水样}}$ 为样品中的 ^{18}O 、 ^{16}O 比值; $R_{\text{V-SMOW}}$ 为 SMOW 中的 ^{18}O / ^{16}O 比值。

3 结果与分析

3.1 珠江流域大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的时间变化

珠江流域站点、全球和中国大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围见图 1。总体来看, 珠江流域 4 个站点大气降水氢氧同位素的比值并未超出全球大气降水氢氧同位素的变化范围。但相对于郑淑慧等^[10]报道的中国大气降水同位素变化范围 ($\delta^{18}\text{O}$: 2.0‰~24‰, δD : 20‰~210‰) 而言, 香港站 $\delta^{18}\text{O}$ 为 2.65‰~15.13‰, 略微超出了中国大气降水同位素变化范围上界 0.65‰。

中国珠江流域 4~9 月集中了全年 80% 的降水^[11], 因此将珠江流域的 4~9 月划分为雨季, 旱季则为 10 月至次年 3 月。珠江流域 4 个站点的 $\delta^{18}\text{O}$ 月均变化见

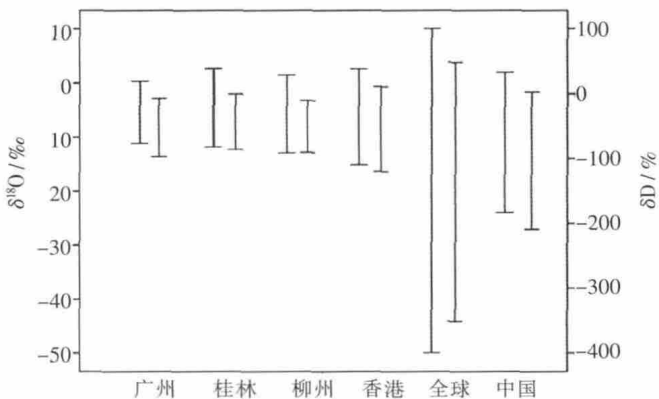


图 1 珠江流域、全球和中国大气降水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围

Fig.1 The δD and $\delta^{18}\text{O}$ variations of the meteoric water in the Pearl River basin, China and world

图 2, 桂林和柳州两地的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征接近, 1~4 月间总体平稳上升, 4 月为全年 $\delta^{18}\text{O}$ 最高值, 4~9 月总体大幅下降, 9 月为全年 $\delta^{18}\text{O}$ 最低值。9~12 月, 又再度上升, 柳州 10~11 月有小幅波动。广州和香港两站的月均 $\delta^{18}\text{O}$ 变化趋势相似, 年初的 2 月两站出现 $\delta^{18}\text{O}$ 最高值, 之后随温度和降水的升高都大幅下降, 广州 8 月 (香港 9 月) 出现 $\delta^{18}\text{O}$ 最低值, 此时正是气温的最高值, 由于广州较香港而言距海远, 受因此气温变化较香港早, $\delta^{18}\text{O}$ 最低值也较早出现。广州 9 月 (香港 10 月) 到次年 2 月, $\delta^{18}\text{O}$ 随气温降水的下降都呈上升趋势。值得注意的是, 在广州站 $\delta^{18}\text{O}$ 变化趋势中, 6 月和 11 月都出现了异常的波动。5 月广州降水量为全年最高, 6 月的降水剧减且可能多为局地水循环, 因此推高了 6 月的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; 而 11 月主要受大陆气团的干冷偏北风控制, 但在其减弱期间, 也会有较暖湿的海洋气流到达, 冷暖气流的交替可能是导致广州和柳州 $\delta^{18}\text{O}$ 在 11 月发生异常下降的原因。而香港与桂林地处沿海或内陆, 受相对单一的气团控制, 因此变化平稳。

总体而言, 4 个站点的 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异并不大, 季节波动幅度也较小。就其变化特征来看, 珠江流域全年的温度变化与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间有着较好的对应关系, 说明其降水同位素值随着温度的增加而不断减少。这是由于夏季温度较高, 且降水集中, 雨水中较重的水分子 (如 H_2^{18}O) 较多, 而冬季气温较低, 雨水中重水分子含量也相应减少, 这一过程同样受到降水变化的影响而产生波动。因此, 温度效应在氧同位素的变化特征中有着极其重要的影响。

3.2 降水线方程

大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的线性关系被称作大气降水线方程(WML), 由于降水时的诸多自然环境因素影响着降水中同位素的分馏过程, 因而同位素比率变化以及 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的关系对于研究地域降水特

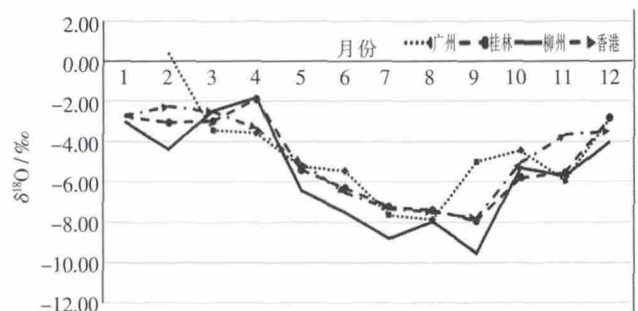


图 2 珠江流域大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的月均值变化

Fig.2 The seasonal variations of the monthly weighted mean $\delta^{18}\text{O}$ in the Pearl River basin

征有着重要意义。由于各站点数据采集时间段不同,为避免香港站(1961~2014)对大气降水线的影响,采用各站点共有的采样时间 1988~1989 年间数据,求得珠江流域大气降水线方程:

$$\delta D = 8.084\delta^{18}O + 10.998 \quad (R=0.965)$$

该方程与 Craig^[12]首次提出的全球大气降水线方程 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$, 以及 Yurtsever^[13]获得的全球大气降水线方程 $\delta D = 8.17\delta^{18}O + 10.56$ 相比,极为接近。这表明珠江流域水汽主要来源于南海和孟加拉湾的暖湿气流,海洋水汽是其降水的主要来源。与郑淑慧等^[10]在 1983 年所提出的中国降水线方程: $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 8.2$ 相较而言,其斜率相近,但截距偏高。该方程与柳鉴容等^[14]所报道的中国东部季风区降水线方程: $\delta D = 7.46\delta^{18}O + 0.90$ 相比,斜率与截距均较高。该方程斜率接近于 8,是由于距海较近,受到内陆水汽的影响较小,这表明珠江流域的大气降水中同位素分馏过程主要遵循瑞利分馏;截距较高,是由于蒸发强烈引起的局地水循环导致。

3.3 温度效应和雨量效应

根据 Dansgaard^[15]对影响降水中同位素组成的时间和地域分布因素的研究,纬度效应、温度效应、高度效应、降水量效应及大陆效应成为影响降水中氢氧同

位素变化特征的主要因素。各自然因子中,温度、降水量对稳定同位素比率的影响最为显著。

珠江流域 4 站点 $\delta^{18}O$ 、 δD 值与温度、降雨量之间的关系见图 3,在珠江流域,温度效应在降水同位素变化中起主导作用,这是由珠江流域特殊的水文条件决定的。珠江流域雨量充沛,但时空分布不均匀,水面蒸发量高达 1400mm,蒸发系数较高。降水由中西部往中北部依次递减,因此西北部地区属于相对湿热少雨的亚热带气候^[11]。4 站点的月均降水量变化和月均温度变化只有香港保持了较好的一致。4~9 月的雨季,降水中 $\delta^{18}O$ 值逐渐波动降低,桂林、柳州、香港在 9 月出现全年的最低值(广州为 8 月);10~12 月间,降水量相对保持稳定,随着温度的降低, $\delta^{18}O$ 值逐渐升高,但 11 月柳州、广州和桂林出现下降或增幅减缓,可能与台风活动有关;次年 1~3 月,随着降水与温度的逐渐升高,柳州和桂林站 $\delta^{18}O$ 值都有上升的过程,可能是由于这一时期以局地水循环为主而引起。而广州 2 月降水量全年最低,因而出现 $\delta^{18}O$ 最高值,香港 1~2 月小幅上升,2~4 月随气温降水的升高而下降。因此, $\delta^{18}O$ 值与温度呈较为明显的负相关。

为此,我们将 4 站点分为雨季和旱季分别讨论。

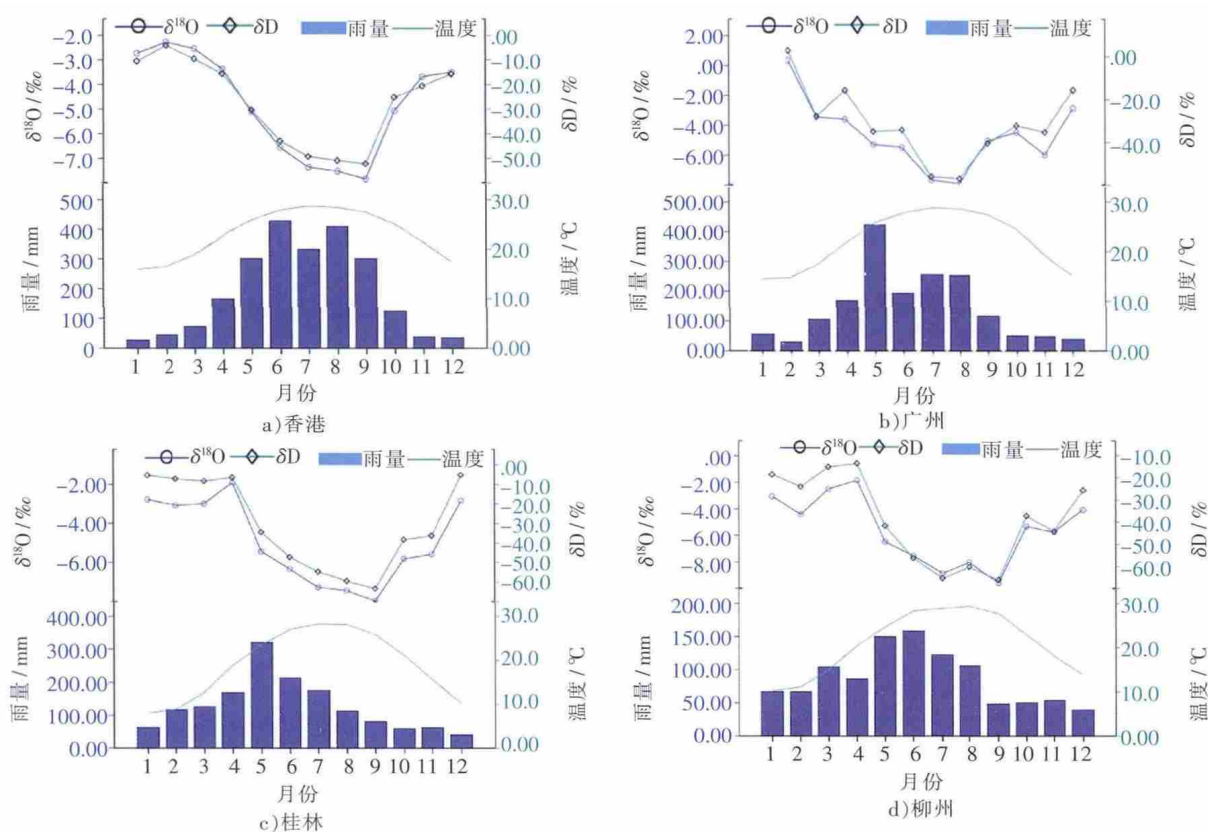


图3 珠江流域大气降水的 $\delta^{18}O$ 、 δD 和雨量、温度的变化

Fig.3 The variations of the monthly weighted mean $\delta^{18}O$, δD , precipitation and temperature

将4个站点分为雨季和旱季,对 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温和降水进行回归分析,结果表明:在雨季,4站点的 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间高度相关,温度效应极为显著,降水量效应相对较为微弱:

$$\text{广州: } \delta^{18}\text{O} = -0.535T + 8.153 \quad (R=0.839)$$

$$\text{桂林: } \delta^{18}\text{O} = -0.570T + 8.365 \quad (R=0.918)$$

$$\text{柳州: } \delta^{18}\text{O} = -0.741T + 12.658 \quad (R=0.92)$$

$$\text{香港: } \delta^{18}\text{O} = -0.7T + 12.508 \quad (R=0.933)$$

在旱季,广州与桂林两站温度效应依旧处于主导地位,而柳州与香港的降水量效应则相对明显:

$$\text{柳州: } \delta^{18}\text{O} = -0.039P - 6.678 \quad (R=0.7)$$

$$\text{香港: } \delta^{18}\text{O} = -0.19P - 2.237 \quad (R=0.669)$$

综上所述,在雨季温度效应十分显著,而在旱季降水量与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的关系则相对突出,主要原因是由于旱季的温度变化幅度较小,突出了降水量对 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响。由此可以发现,降水量效应在全年尺度视角下并不明显。这是由于月均 $\delta^{18}\text{O}$ 是受到温度和降水量两种因素的影响,而GNIP的样本采集是按月进行,并不能如实反映同一水汽团一次降水事件的降水量影响,从而造成全年尺度下降雨量效应受温度影响的表现不太明显^[15]。

3.4 降水氘盈余研究

大气降水中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的差值称为氘盈余(d),是由于同位素的分馏过程中,动力分馏与热力分馏共同作用于水体蒸发而产生^[16]。Dansgaard^[14]定义氘盈余为 $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O} (\text{‰})$,它既能反映海水蒸发形成的热力条件和水汽平衡条件,又反映了降水形成时的地理环境和气候条件^[17-18]。

珠江流域大气降水氘盈余的月均变化图见图4。桂林与柳州两地的 d 值全年变化规律相对接近,变化范围分别为 $0.05\text{‰} \sim 17.49\text{‰}$ 和 $1.25\text{‰} \sim 11.29\text{‰}$ 。旱季

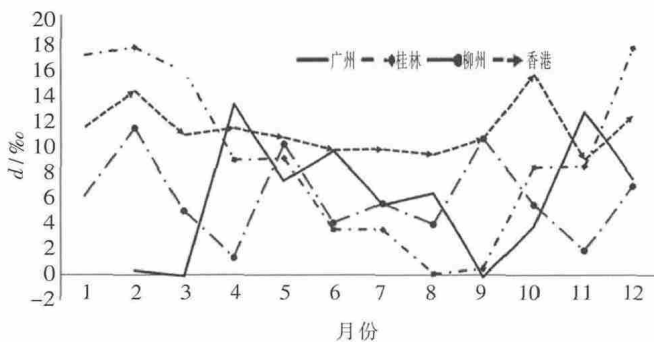


图4 珠江流域大气降水 d 值的月均变化

Fig.4 The seasonal variations of the monthly weighted mean deuterium excess in the Pearl River basin

水汽受北方冷空气南下的影响,由北方内陆输送,输送距离长,因而 d 值逐渐增大。其中,桂林大气降水的 d 值旱季大于柳州,雨季小于柳州,是因为旱季桂林大气降水中混入了大量的局地循环水汽。雨季两地 d 值明显偏小,是由于夏季相对高温,降水过程中雨水受到强烈的蒸发而导致;广州2、3、12月数据只有一年,因此舍去。广州 d 值变化范围为 $-0.19\text{‰} \sim 13.13\text{‰}$,4~11月间变化趋势与桂林与柳州两地一致仍是以海洋水汽输送为主,11月受北方冷空气及局地水循环的影响, d 值升高;香港 d 值变化范围为 $8.87\text{‰} \sim 15.41\text{‰}$,保持了相对稳定,变化不大,水汽主要来自海洋水,旱季受北方冷空气南下影响, d 值出现波动。

从总体上来看,珠江流域氘盈余表现为雨季较低、旱季略高的趋势。雨季较低的 d 值说明水汽主要来源于季风入境带来的海洋水;旱季较高的 d 值,反映了珠江流域受北方冷空气南下的影响,内陆水汽使得气温降低而 d 值会升高,同时旱季降水少而蒸发强烈,也进一步推高 d 值。

4 结论

(1)珠江流域大气降水的氢氧同位素值均落在全球大气降水的范围内。广州、桂林、柳州和香港4个站点的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化规律呈明显的旱季高、雨季低的特征。全年尺度而言,4个站点主要受温度效应影响,在旱季表现出了较为微弱的降水量效应。

(2)珠江流域的大气降水线方程,与全球的降水线方程相比极为接近,这表明珠江流域降水过程都是在瑞利条件下进行的。与中国、东部季风区的降水线方程相比,截距较高,说明该地区降水受到的蒸发作用较大,因而推高了 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

(3)对珠江流域4站点的氘盈余的分析来看,整体上呈现出雨季低、旱季高的特点,保持了较好的一致性。雨季降水主要来源于季风携带的海洋水;旱季则受到北方冷空气南下及蒸发所引起的局地水循环的共同影响。

参考文献:

- [1] Lawrence J R, Gedzelman S D, Gamache J, et al. Stable isotope ratios: hurricane Olivia [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2002,41(1): 67-82.
- [2] 孙玮玮,毕春娟,陈振楼,等.稳定性同位素示踪技术在环境领域的应用初探[J].环境科学与技术,2009,9:88-92. (SUN Weiwei, BI Chunjuan, CHEN Zhenlou, et al. A preliminary study on application of stable Isotope tracer technique in environmental field [J]. Environ-

- mental Science & Technology, 2009, 9: 88–92. (in Chinese))
- [3] Gat J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1996, 24: 225–262.
- [4] Dansgaard W. The abundance of $\delta^{18}\text{O}$ in atmospheric water and water vapor[J]. Tellus., 1953, 4: 1072–1073.
- [5] 王涛, 张洁茹, 刘笑, 等. 南京大气降水氧同位素变化及水汽来源分析[J]. 水文, 2013, (4): 25–31. (WANG Tao, ZHANG Jieru, LIU Xiao, et al. Variations of stable isotopes in precipitation and water vapor sources in Nanjing area[J]. Journal of China Hydrology, 2013, (4): 25–31. (in Chinese))
- [6] 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, (7): 738–745. (SONG Xianfang, LIU Jianrong, SUN Xiaomin, et al. Establishment of Chinese network of isotopes in precipitation (CHNIP) based on CERN [J]. Advances in Earth Science, 2007, (7): 738–745. (in Chinese))
- [7] 陆文秀, 刘丙军, 陈俊凡, 等. 近 50a 来珠江流域降水变化趋势分析[J]. 自然资源学报, 2014, (1): 80–89. (LU Wenxiu, LIU Bingjun, CHEN Junfan, et al. Variation trend of precipitation in the Pearl River basin in recent 50 years [J]. Journal of Natural Resources, 2014, (1): 80–89. (in Chinese))
- [8] 彭俊台, 张强, 刘春玲. 珠江流域降雨特征研究[J]. 人民珠江, 1980, (1): 16–38. (PENG Juntao, ZHANG Qiang, LIU Chunling. Changing properties of precipitation regimes over the Pearl River basin [J]. Pearl River, 1980, (1): 16–38. (in Chinese))
- [9] 黄增明. 珠江流域的降水特征[J]. 人民珠江, 1982, (1): 18–26. (HUANG Zengming. Characteristics of precipitation in the Pearl River basin [J]. Pearl River, 1982, (1): 18–26. (in Chinese))
- [10] 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. (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. (in Chinese))
- [11] 童娟. 珠江流域概况及水文特性分析[J]. 水利科技与经济, 2007, (1): 31–33. (TONG Juan. The generalization and hydrological character analysis of Pearl River basin [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2007, (1): 31–33. (in Chinese))
- [12] Craig H. Isotopic Variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, 133 (3456): 1702–1703.
- [13] Yurtsever Y, Gat J R. Atmospheric waters [A]. In: Gat J R, Gonfiantini R, eds. Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle [C]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1981: 103–142.
- [14] 柳鉴容, 宋献方. 中国东部季风区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J]. 中国科学, 2009, 11(54): 3521–3531. (LIU Jianrong, SONG Xianfang. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Eastern Monsoon China and the water vapor sources [J]. Chinese Science Bulletin, doi:10.1007/s11434-009-0202-7. (in Chinese))
- [15] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. Tellus, 1964, 15(4): 436–468.
- [16] 黄锦忠, 谭红兵, 王若安, 等. 我国西北地区多年降水的氢氧同位素分布特征研究[J]. 水文, 2015, 35(1): 33–39. (HUANG Jinzhong, TAN Hongbing, WANG Ruohan, et al. Hydrogen and Oxygen isotopic analysis of perennial meteoric water in northwest China [J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(1): 33–39. (in Chinese))
- [17] 邓文平, 余新晓, 贾国栋. 华北地区大气降水稳定同位素特征与水汽来源[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, (5): 489–494. (DENG Wenping, YU Xinxiao, JIA Guodong. Sources and stable isotope characteristics of precipitation in north China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, (5): 489–494. (in Chinese))
- [18] 侯典炯, 秦翔, 吴锦奎, 等. 乌鲁木齐大气降水稳定同位素与水汽来源关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 10: 136–142. (HOU Dianjiong, QIN Xiang, WU Jinkui, et al. Characteristics of stable isotopes in precipitation and the water vapor sources in Urumqi [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 10: 136–142. (in Chinese))

Characteristics of Hydrogen and Oxygen Stable Isotopes in Precipitation in Pearl River Basin

GUO Zhengsheng, WANG Juan, ZHAO Pei

(College of Urban, Rural Planning and Architectural Engineering, Shangluo University, Shangluo 726000, China)

Abstract: The isotopic characteristics of atmospheric precipitation have important implication for the water cycle, water vapor sources and climate change studies. This research analyzed temporal and spatial characteristics of stable isotopes and its influencing factors at four IAEA's site: guangzhou, guilin, liuzhou and Hong Kong in the Pearl River Basin. The results show that the change of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation behaves obvious low value in dry season and the high value in rainy season. Throughout the year, isotopic values at the four sites are mainly affected by temperature. In the dry season, the isotopic values of precipitation show relatively weak amount effect. The local WML is obtained: $\delta\text{D} = 8.084\delta^{18}\text{O} + 10.998$, $R = 0.965$, in the Pearl River Basin. This value is relatively close to the global and Chinese ones. This implies that the precipitation underwent the Rayleigh fractionation. The deuterium excess presented low value during the rainy season and high value during dry season, indicating that water vapor in the Pearl River Basin mainly comes from the ocean. However, this basin would be affected by the north air and local evapotranspiration vapor in dry season.

Key words: Pearl River Basin; precipitation; hydrogen and oxygen stable isotopes; water vapor source