

香港地区大气降水的 D 和 ^{18}O 同位素研究

张琳, 陈立, 刘君, 刘福亮, 陈宗宇

中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 正定 050803

摘要: 研究了香港地区近20 a (1986–2002) 大气降水的氢、氧同位素组成, 提出了大气降水线方程为 $\delta\text{D} = 8.13\delta^{18}\text{O} + 11.392$, 并与全国及全球降水线方程进行对比, 揭示了该方程的特征。对全年氘盈余及降水线特征的研究表明, 香港地区全年降水来源较为单一, 主要为海洋性气团, 夏季大气降水同位素组成主要受夏季风或夏季台风的影响, 加权平均月降水 δ 值与月降水、月气温均呈负相关关系; 降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的降水量效应明显, 且该影响远远掩盖了温度效应。

关键词: 大气降水; 氢氧同位素; 降水量效应; 香港

中图分类号: P402

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 02-0572-06

在水循环研究过程中, 降水的水汽来源一直是水文学与气象学家共同关注的热点, 它对于我们深入了解水循环过程及其结构具有重要意义^[1-2]。大气降水中的氢、氧同位素组成, 主要受蒸发和凝结过程控制。经典的同位素降水模式^[3]认为氢和氧的分馏作用服从瑞利定律, 即水汽在云团中平衡冷凝后迅速从其中分离出来, 造成不同地区降水同位素组成不同。

在全球尺度上, 受地理因素和气候条件影响, 降水中稳定同位素含量一定程度上反映了天气气候与区域性特征^[4]。因此, 20 世纪 60 年代以来雨水同位素组成已成为地球化学的研究热点之一。国际原子能机构(IAEA)与世界气象组织(WMO)自1961年以来, 已在全球各地设立 100 多个观测点, 对大气降水中的稳定同位素进行连续监测, 以建立全球降水模型^[5]。我国自 1966 年对珠穆朗玛峰科考的降雪样品中氘和重氧分析以来, 在此方面陆续开展了一些工作^[6-8], 有组织地建立长期观测站则始于1983 年^[5,10], 并初步获得了中国大气降水稳定同位素资料^[5,8-11]。目前国内研究主要集中在以下 2 个方面: (1)青藏高原大气降水(雪)的氢、氧同位素研究^[7,9-12], 其重要意义在于: 帮助追溯该地区的古环境和古气候, 进而阐明人类活动对全球变化的影响。(2)总结中国大气降水的氢、氧同位素组成与分布规律, 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^[5-6,8], 进而为全球降水循环模型提供基本数据。

目前国内大气降水中氢氧同位素的研究, 较多地集中在内陆地区^[9-14], 而对于沿海地区尤其是沿岸岛屿的研究则甚少报道。沿海地区处于大陆

气团与海洋气团相互作用的区域, 受气候影响最大, 导致其降水同位素组成比较复杂; 同时, 沿海地区又是人类活动最为密集的区域。本文以香港气象站大气降水中氢氧同位素多年监测数据为基础, 建立了本地区大气降水线方程与“降水量效应”方程, 探讨了它们与水汽来源的关系, 对于深入探讨区域水分来源变化及其水文循环过程研究具有积极的意义。

1 资料来源和分析方法

香港降水同位素资料 D 和 ^{18}O (1986–2002)来自全球降水同位素观测网 GNIP(Global of Isotope in Precipitation), 观测网中各个观测点项目包括 D, ^{18}O , ^3H , 温度和降水量以及水气压, 所有观测项目数据记录均为月值, 与月平均温度和月降水量的统计不同, IAEA/WMO 取样站降水中稳定同位素的取样时间为每月 15 日。因此, 稳定同位素比率的月值实际上代表上个月 16 日到本月 15 日的平均。数据通过国际互联网(<http://isohis.iaea.org>)可直接下载。

水中氢氧同位素制样分别采用金属铀法和 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 平衡法, 同位素分析采用英国 MM903 质谱仪进行。质谱仪内部精度: $\text{CO}_2 < 0.125\text{‰}$, $\text{H/D} < \pm 1.0\text{‰}$, 文中的 δ 值均以 SMOW 为标准。降水中氢、氧同位素含量分别由 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 表示:

$$\delta\text{D} = ((\text{D}/\text{H}_{\text{sam}} - \text{D}/\text{H}_{\text{std}}) / \text{D}/\text{H}_{\text{std}}) \times 1000 (\text{‰})$$

$$\delta^{18}\text{O} = ((^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{sam}} - ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{std}}) / ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{std}}) \times 1000 (\text{‰})$$

式中 R_{sam} 和 R_{std} 表示样品和标准物中稳定性氢同位素(D/H)或稳定性氧同位素($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), 精度分别为 $\pm 2\text{‰}$ 和 $\pm 0.3\text{‰}$ 。17 年降水样品的同位素组成(图 1)。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40472125); 中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费专项经费 (SK200805)

作者简介: 张琳 (1971 年生), 女, 助研, 硕士, 从事地下水同位素研究工作。E-mail: zhl5369@163.com

*通讯作者: 陈宗宇 (1963 年生), 男, 研究员, 博士生导师, 从事地下水同位素研究工作。E-mail: chengzy@heinfo.net

收稿日期: 2009-02-10

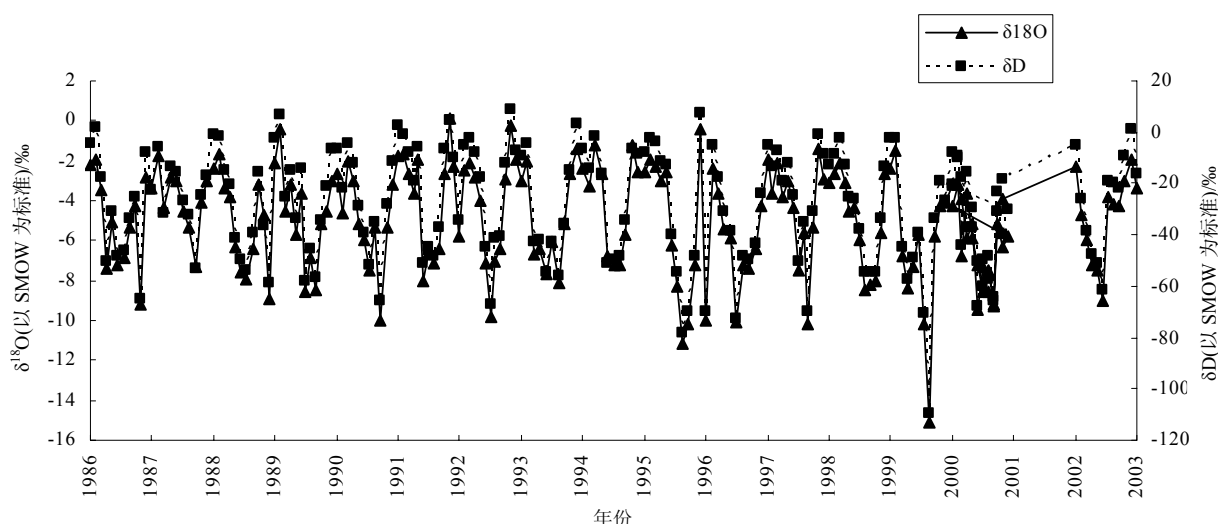


图 1 1986—2002 年香港大气降水同位素组成

Fig. 1 The component of isotopes in the precipitation from 1986 to 2002 in Hongkong area

2 结果与讨论

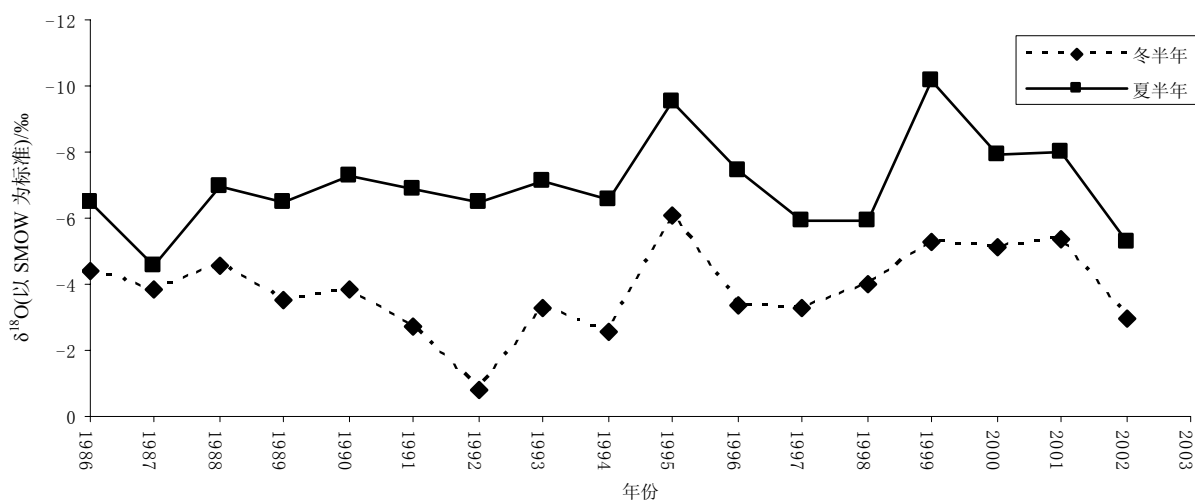
2.1 香港大气降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化及其影响因素

从图1可以看出, 香港降雨同位素值有较大的变化幅度: δD 从8.9‰到-109.8‰, $\delta^{18}\text{O}$ 从0.1‰到-15.7‰。全球降水平均稳定同位素组成, 估计 δD 介于+50‰ ~ -350‰之间, $\delta^{18}\text{O}$ 介于+10‰ ~ -50‰^[15]。郑淑惠^[7]等报道了中国大气降水 δD 含量为+20‰ ~ -210‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为+2.0‰ ~ -24‰。可见, 香港大气降水的氢氧同位素含量均落在中国与全球降水的变化范围之内。

香港地区4—9月代表夏半年, 10—3月代表冬半年。由于降水中氢氧同位素比率的大小受气象条件的制约, 因此, 随着环境气象要素的季节变化, δ 也发生变化(图2)。夏半年 $\delta^{18}\text{O}$ 值一般<-4.6‰,

最小月份的7—9月为-7.5‰左右, 最低值为-11.2‰; δD 值一般<-35‰, 最小月份7—9月为-54‰左右, 最低值达-78.2‰。冬半年 $\delta^{18}\text{O}$ 值一般介于-2‰ ~ -6‰, 最高达0.2‰, δD 一般>-8‰ ~ -35‰, 最大值达7‰。总体来说, 夏半年 δ 值小, 冬半年 δ 值大。

从水汽循环的角度上讲, 多年香港大气降水 δ 值的明显季节差异可能反映了海洋气团在以下两方面的综合影响, 其一为季风气候的影响: 香港地处亚洲大陆东南沿海, 濒临西北太平洋, 来自海洋的西南暖湿气流长期向该地区提供大量的水汽, 后者具有湿度大、蒸发弱、降水量大、 δ 值相对较低的特点, 从而造成雨水中 δ 值大部分时间相对较低。只有在冬季由于受西风环流携带具有大陆性气团特性的空气影响, δ 值才略有升高。其二为台风的影响: 台风经常在每年5—11月影响香港地区, 是

图 2 香港地区多年大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 季节变化Fig. 2 Relation between $\delta^{18}\text{O}$ and season in Hongkong

该地区最重要的灾害性气候。卫克勤^[3]等(1994)指出,台风中心经过的地区常有大暴雨或特大暴雨,这可能是香港夏季雨水 δ 值较低的主要原因之一。

2.2 香港大气降水线方程的特征

大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间的关系对于研究水循环过程中稳定同位素的变化具有重要意义。根据实测 δD 和 $\delta^{18}O$ 数据(图1)用最小二乘法求得香港大气降水线方程(图3)为: $\delta D=8.13\delta^{18}O+11.392$, $R^2=0.991$ 。

该方程与 Craig^[16](1961)首次提出的全球雨水线方程($\delta D=8\delta^{18}O+10$)、Yurtsever^[17](1975)获得的全球雨水线方程($\delta D=8.17\delta^{18}O+10.56$)非常接近;此外,与郑淑蕙等^[6](1983)报道的中国大气降水线方程($\delta D=7.9\delta^{18}O+8.2$)、沿海城市漳州^[18]等地亦很接

近。该降水线方程具有2个显著的特征:(1)相关系数 R 值最高,表明降水的氢、氧同位素组成有极好的相关性;(2)与全球雨水线方程非常接近,这也许说明全球雨水线方程在相当程度上反映了海洋性气候的海岛城市的降水氢、氧同位素特征。

2.3 大气降水过量氘的变化

过量氘参数亦称氘盈余,同全球性降水线方程相比,任何地区的大气降水,都可以计算出一个氘的过量参数 d 。Dansgaard^[3](1964)引入“氘盈余(d)”概念,其定义为 $d=\delta D-8\delta^{18}O$ 。它既反映了海水蒸发形成云气团时的热力条件和水汽平衡条件,同时又反映降水形成时的地理环境和气候条件。香港多年降水 d 值介于3.12‰~18.7‰,平均值为10.65‰(图4),与世界大部分地区雨水 d 值(10‰左右)^[8]很接

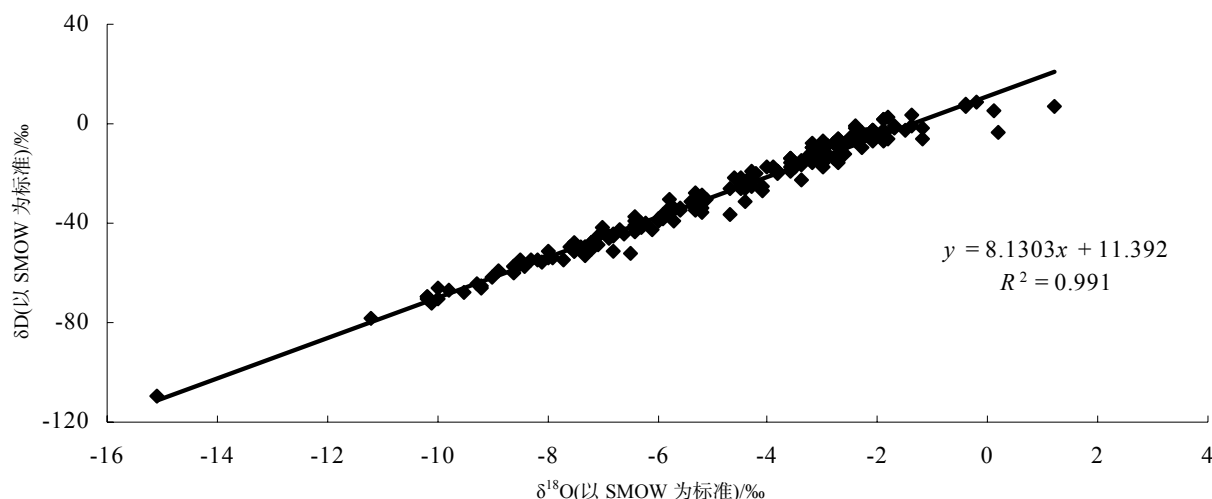


图3 香港地区大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系

Fig. 3 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ in the precipitation in Hongkong area

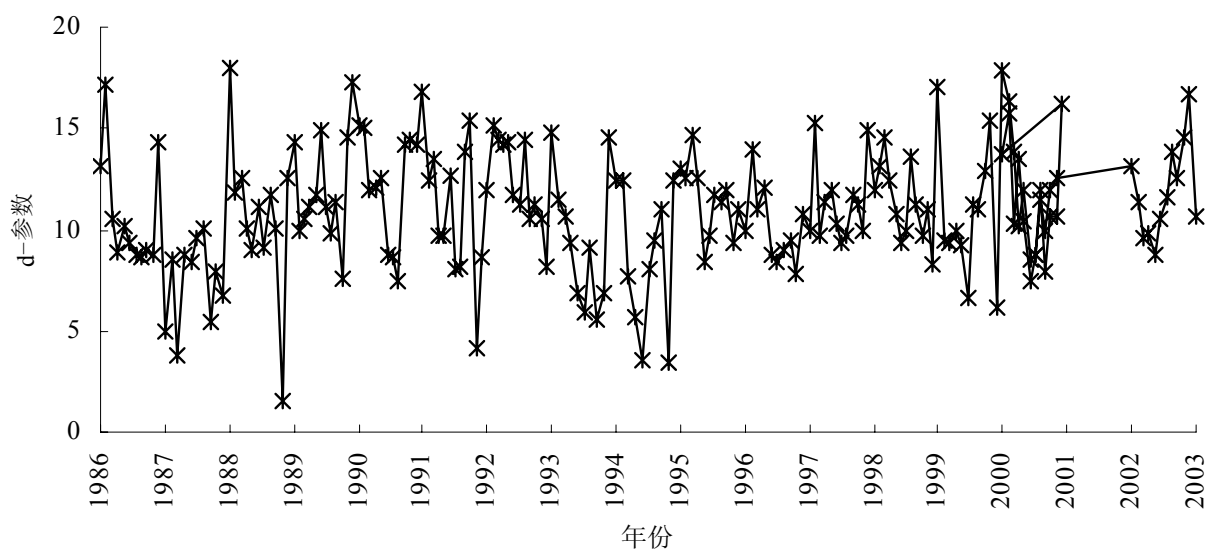


图4 香港气象站大气降水氘盈余(d)的变化

Fig. 4 Ranges of deuterium amount in the rain water at Hongkong station

近。香港 d 过剩值较低表明，其大气降水水源区的蒸发过程较为缓慢。

大陆受季风影响的地区，冬、夏季风期间降水云团有不同的来源，反映在 d 值上为冬季风期普遍高于夏季风期。例如桂林(1983—1998)冬季风期 d 值为 16.65‰，而夏季风期仅为 12‰^[19]。相对而言，香港 1—4 月平均 d 值(11.34‰)略高于 5—9 月平均 d 值(10.12‰)。这表明冬季风期香港降水仍主要受到海洋气团的影响，且水汽源区蒸发过程较之前述的我国其它内陆地区慢。香港 d 值冬、夏季风期差别不明显，表明全年降水水汽团来源相同，均受海洋气团影响较大。由于香港地区的降水主要为锋面雨和夏季雨或台风雨两类，每年 6—8 月，氡盈余值小(9.89‰)，主要反映的是台风季节热带天气系统形成的夏季风雨或台风雨。

2.4 降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 与月平均温度的关系

在影响雨水同位素组成的诸多要素中，温度被认为是与之关系最密切的^[20]。气温对降水中稳定同位素产生作用的主要机制是：地面温度在一定程度上与上空降水云团的冷凝温度有对应关系，而后者与降水的 δ 值有直接关系^[8]。因此气温越低，降水中同位素的分馏系数 α 也越大，从而降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 也越低。但只有当大气水中 $\delta^{18}\text{O}$ 保持基本稳定时，气温和降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 才有可能表现出明显的正相关关系^[11]。一般而言，温度效应主要出现在中、高纬度地区，且在两极表现尤为明显^[3,10]；另一方面，越深入大陆内部，其正相关关系越密切^[5]。 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的正相关关系称为温度效应。

笔者曾经研究过我国不同时间尺度月降水稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 与月平均气温的关系发现^[21]，我国低纬度地区都显示出与气温的负相关关系，反映出在季节时间尺度上，温度效应不明显，甚至不存在，香港地区也符合这一规律。将香港台站降水中 $\delta^{18}\text{O}$

与月平均气温进行线性回归(图5)，发现二者存在负相关关系，这与温度效应的结论相反。这可能与香港地处中低纬度季风区有关，虽然气温较高，但常年受到海洋性季风气候的影响，大气降水导致空气的湿度较大，降水过程中雨滴的再蒸发使 $\delta^{18}\text{O}$ 浓缩作用不明显。高温季节地面雨水蒸发水汽混入大气云团中又增加了降水量，而降水量增加在一定程度上又干扰了温度效应，致使温度与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出负相关关系。

2.5 大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量效应

大气降水的平均同位素组成是空气湿度的函数，其差别主要是云团冷凝时遵循瑞利分馏过程所造成的^[3]，因此，雨水的同位素组成与当地降水量存在一定的联系。“降水量”效应指降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量大小呈反相关关系。

按照降雨量加权的方法得到降水月平均 $\delta^{18}\text{O}$ ，计算出多年月降水量的平均值，将二者进行线性回归分析(图6)，图中显示降水月平均 $\delta^{18}\text{O}$ 与月降水量之间存在负相关，相关系数为 0.833 3，产生这种负相关关系的原因是由于香港地处低纬度地区，一年四季均受季风影响，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。香港由于受到低纬度季风气候的影响：夏季，来自海洋的气团具有湿度大、蒸发弱、降水量大、 $\delta^{18}\text{O}$ 相对较低；冬季，由冬季风携带的空气具有大陆性气团的特性：湿度低、蒸发强、降水量小、 $\delta^{18}\text{O}$ 相对较高。湿季和干季的交替对 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化产生影响。但是值得注意的是，在许多年份里降水量最大月并不与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 最小值相一致，说明在季风气候区，降水量并不是决定降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值高低的根本性因素，水汽来源不同可能是决定降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的深层次原因，季风可能是造成该效应的深层机制之一，降水量效应只是体现形式。

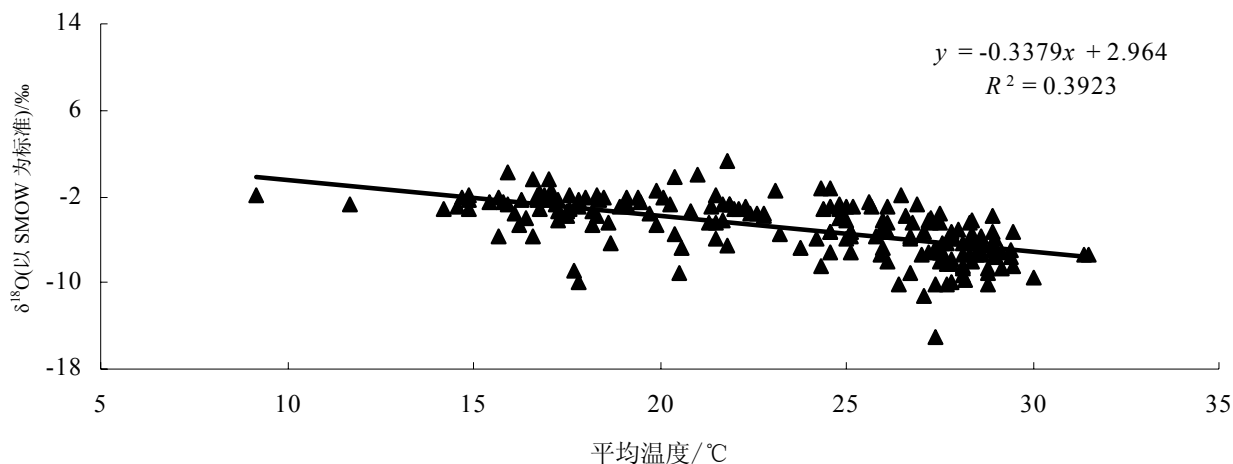
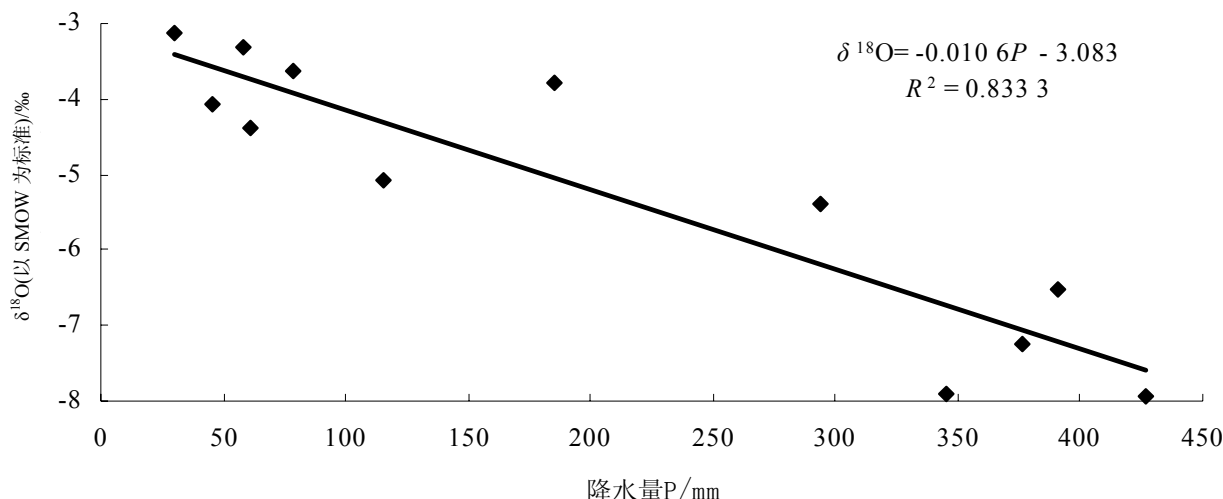


图5 香港大气降水月平均 $\delta^{18}\text{O}$ 与月平均气温相关

Fig. 5 Correlation between the average monthly $\delta^{18}\text{O}$ in the precipitation and average monthly Temperature at Hongkong station

图6 香港大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量 (P) 的关系Fig. 6 Relation between monthly $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation amount (P) in Hongkong

3 结语

本文研究了香港地区大气降水中氢、氧同位素组成特征及其水汽来源的关系, 结果表明:

(1) 香港地区大气降水的氢、氧同位素含量处于中国与全球雨水的变化范围之内。多年 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 变幅较大, 反映了季风气候及台风对其影响显著, 形成降水的汽团来源及性质是决定雨水同位素组成的重要因素。

(2) 香港站的大气降水线方程为 $\delta\text{D} = 8.13\delta^{18}\text{O} + 11.392$ ($R^2 = 0.991$), 与全球降水线非常吻合。全年氘过剩值变化不大, 接近世界平均值。上述结果表明香港全年大气降水来源相同, 主要为海洋性气团。

(3) 大气降水中氢、氧同位素组成存在明显的降雨量效应, $\delta^{18}\text{O}$ 降水量方程为 $\delta^{18}\text{O} = -0.0106P - 3.083$ ($R^2 = 0.8333$), 但观察不到明显的温度效应。产生降雨量效应的主要条件是研究区域降水的水汽来源较为单一, 而在季风区, 季风可能是造成该效应的深层机制之一。

参考文献:

- [1] BOSILOVICH M G, SCHUBERT S D. Water vapor tracers as diagnostics of the regional hydrologic cycle [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2002, 3: 149-165.
- [2] KOSTER R D, JOUZEL J, SUOZZO R, et al. Global sources of local precipitation as determined by the NASS/GISS GCM[J]. *Geophysical Research Letters*, 1986, 13: 121-124.
- [3] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16: 436-468.
- [4] 章新平, 姚檀栋. 全球降水中氧同位素比率的分布特点[J]. *冰川冻土*, 1994, 16(3): 202-210.
ZHANG Xinpin, YAO Tandong. World spatial characteristics of oxy-

- gen isotope ratio in precipitation[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(3): 202-210.
- [5] 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.
ZHANG Xinpin, YAO Tandong. Distributional features of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(4): 356-364.
- [6] 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.
- [7] 于津生, 张鸿斌, 虞福平, 等. 西藏东部大气降水氢同位素组成特征[J]. *地球化学*, 1980, 2: 113-121.
YU Jinsheng, ZHANG Hongbin, YU Fujing, et al. Oxygen isotopic composition of meteoric water in the eastern part of Tibet [J]. *Geochimica*, 1980, 2: 113-121.
- [8] 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, 1: 33-46.
WEI Keqin, LIN Ruifen. The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China[J]. *Geochimica*, 1994, 1: 33-46.
- [9] 田立德, 姚檀栋, Stievenard M, 等. 中国西部降水中 δD 的初步研究[J]. *冰川冻土*, 1998, 20(2): 175-179.
TIAN Lide, YAO Tandong, STIEVENARD M, et al. A study of hydrogen isotope in precipitation in west China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(2): 175-179.
- [10] 章新平, 施雅风, 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.
ZHANG Xinping, SHI Yafeng, YAO Tandong. Variation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in the north-east Tibetan Plateau[J]. *Science in China Series(B)*, 1995, 25(5): 540-547.
- [11] 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.
TIAN Lide, YAO Tandong, PU Jianchen, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in summer precipitation at Lhasa[J]. *Journal of Glaciology and*

- Geocryology, 1997, 19(4): 295-301.
- [12] 王军, 刘天仇, 尹观. 西藏雅鲁藏布江中、下游地区大气降水同位素分布特征[J]. 地质地球化学, 2000, 28(1): 63-67.
- WANG Jun, LIU Tianchou, YING Guan. Characteristics of isotope distribution in precipitation in the middle-lower reaches of Yarlung-zangbo river[J]. Geology Geochemistry, 2000, 28(1): 63-67.
- [13] 张生春. 陕西省现代大气降水氢氧同位素组成特征研究[J]. 陕西地质, 1989, 7(2): 57-66.
- ZHANG Shengchun. Characteristics of hydrogen-oxygen isotope compositions of contemporarily atmospheric sedimentation in Shaanxi Province[J]. Geology of Shanxi, 1989, 7(2): 57-66.
- [14] 王凤生. 吉林省大气降水氢氧同位素浓度场时空展布及其环境效应[J]. 吉林地质, 1997, 16(1): 51-56.
- WANG Fengsheng. The law of O and H isotopic concentration field on the time-space distribution and environmental effect of atmospheric water in jilin province[J]. Jilin Geology, 1997, 16(1): 51-56.
- [15] 丁梯平. 氢氧同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1980: 61-65.
- DING Tiping. Isotopic Geochemistry of Hydrogen and Oxygen[M]. Beijing: Geology Press, 1980, 61-65.
- [16] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133: 1702-1703.
- [17] YURTSEVER Y. Worldwide Survey of Stable Isotopes in Precipitation[M]. International Report-Vienna: IAEA, 1975.
- [18] 庞忠和, 樊志成, 汪集杨. 漳州盆地地下水成因与海水混入的同位素证据[J]. 地球化学, 1990, 4: 296-302.
- PANG Zhonghe, FAN Zhicheng, WANG Jiyang. Isotopic evidence for geothermal water genesis and seawater involvement in Zhangzhou basin, Southeast China[J]. Geochimica, 1990, 4: 296-302.
- [19] 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.
- 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.
- [20] YAPP C J. A model for the relationship between precipitation D/H ratios and precipitation intensity[J]. Geophys Res, 1982, 87(C2): 9614-9620.
- [21] 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.
- ZHANG Lin, CHEN Zongyu, NIE Zhenlong, et al. Correlation between the monthly $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and monthly mean temperature in north China[J]. Nuclear Techniques, 2008, 31(9): 715-720.

D and ^{18}O Isotopes in Atmospheric Precipitation in Hongkong Area

Zhang Lin, Chen Li, Liu Jun, Liu Fuliang, Chen Zongyu

Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Zhengding, Hebei, 050803, China

Abstract: In this paper, the author studied hydrogen and oxygen isotopic compositions in the precipitation over past 16 years (from 1986 to 2002) in Hongkong area and put forward the precipitation line equation, namely, $\delta\text{D} = 8.13\delta^{18}\text{O} + 11.392$. In addition, the author compared the above-mentioned equation with the nationwide and worldwide ones and revealed the characteristics of the equation as well. The study on the year-round deuterium surplus and characteristics of precipitation line shows that the year-round precipitation source in Hongkong area is comparatively simplex, mainly being maritime air mass. The components of isotopes in summer precipitation are mainly controlled by the summer monsoon and typhoon. The δ value of weighted average monthly precipitation is in negative proportion to the monthly precipitation and monthly temperature. The precipitation effect of the δD and $\delta^{18}\text{O}$ in the precipitation is very pronounced, which overshadows the temperature effect.

Key words: Atmospheric precipitation; hydrogen and oxygen isotopes; precipitation effect; Hongkong