

鼎湖山大气降水氢氧同位素特征及水汽来源

高德强¹, 徐庆^{1*}, 张蓓蓓¹, 马迎宾^{1,2}, 陈婕¹, 刘世荣¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200)

摘要: [目的] 鼎湖山自然保护区地处我国热带与亚热带交汇处, 在全球气候变化研究中占居独特而重要的地位。全球气候变化背景下, 降水格局变化将影响区域森林生态系统内部小气候。降水森林生态系统水循环过程中重要的输入因子, 研究鼎湖山大气降水氢氧稳定同位素特征和水汽来源, 对探讨该地区森林生态系统水循环过程、森林群落演替动态及区域水资源合理利用和管理等具有重要理论和实践意义。[方法] 运用氢氧稳定同位素技术, 研究和分析鼎湖山 2013 年 8 月~2014 年 8 月 13 个月 108 个大气降水的氢氧同位素组成及与环境因子的关系, 并运用 HYSPLIT 模型后向轨迹法模拟大气降水气团传输途径和过程, 判定该地区水汽来源。[结果] 鼎湖山大气降水线方程为: $\delta D = 7.863\delta^{18}O + 9.664$ ($R^2 = 0.975, n = 108$); δD 和 $\delta^{18}O$ 值范围分别为 $-118.26‰ \sim -15.52‰$, $-16.05‰ \sim 2.25‰$, 均值分别为 $-34.44‰$, $-5.58‰$; 大气降水过量氘(d) 显示出冬高夏低的季节变化; 鼎湖山降水量效应显著, 温度效应不显著。[结论] 鼎湖山大气降水氢氧稳定同位素特征存在明显的季节性变化; 干季的气团主要来自局地蒸发、中国华北地区及寒冷干燥的亚欧大陆, 湿季的气团主要来自温暖湿润的西太平洋、南海和印度洋。

关键词: 鼎湖山; 大气降水; 水汽来源; 氢氧稳定同位素

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)03-0384-08

Characteristics of δD and $\delta^{18}O$ in Precipitation in Mt. Dinghu and Its Water Vapor Sources

GAO De-qiang¹, XU Qing¹, ZHANG Bei-bei¹, MA Ying-bin^{1,2}, CHEN Jie¹, LIU Shi-rong¹

(1. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China)

Abstract: [Objective] Mt. Dinghu National Nature Reserve, located in Guangdong Province, is a transitional zone of tropics and subtropics. It provides a unique and important opportunity for climate change studies. The change of precipitation pattern affects the microclimate within a regional forest ecosystem. The research on the characteristics of hydrogen (δD) and oxygen ($\delta^{18}O$) stable isotope in precipitation and the source of regional atmospheric precipitation are theoretically and practically important to understand the water cycling and community succession in the forest ecosystem of Mt. Dinghu, and wisely use and manage regional water resources. [Method] The precipitation δD and $\delta^{18}O$ data in the period from August 2013 to August 2014 were analyzed to examine the relationship between the characteristics of δD and $\delta^{18}O$ and their environmental factors. Furthermore, the air mass transmission pathway was determined and the regional water vapor sources were identified based on HYSPLIT model. [Result] The meteoric water line equation is $\delta D = 7.863\delta^{18}O + 9.664$ ($R^2 = 0.975, n = 108$); the average δD value is -

收稿日期: 2016-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(31290223, 31670720, 31170661)、林业公益行业专项(201504423)及院基金(CAFYBB2017ZB003)资助。

作者简介: 高德强(1986—), 男, 在读博士。主要研究方向: 稳定同位素生态学。E-mail: ylgaoeqiang@163.com。

* 通讯作者: 徐庆(1964—), 女, 博士, 研究员。主要研究方向: 稳定同位素生态学。E-mail: xuqing@caf.ac.cn。

34.44‰, ranging from -118.26‰ to -15.52‰, and the average $\delta^{18}\text{O}$ value is -5.58‰, ranging from -16.05‰ to 2.25‰. The atmospheric precipitation excess deuterium (d) follows a seasonal pattern with low value in winter and high value in summer. A “precipitation effect” exists significantly whereas the “temperature effect” is not obvious. [Conclusion] There are obvious seasonal changes of δD and $\delta^{18}\text{O}$ in atmospheric precipitation in Mt. Dinghu. In dry season, the air mass mainly comes from North China and Eurasia, as well as local evaporation, while in the wet season, the air mass mainly comes from the western Pacific Ocean, the South China Sea, and the Indian Ocean.

Keywords: Mt. Dinghu; meteoric water; water resource; hydrogen and oxygen stable isotopes

水是联系陆地表层水圈和大气圈的核心纽带,大气降水是水循环过程输入端的主要组成部分,广泛参与各圈层的物质能量交换^[1]。存在于自然水体中的氢氧同位素具有较高的灵敏度和准确性,已经成为在时空尺度上分析水汽来源的有效方法之一^[2-4]。降水是森林生态系统水循环过程中重要的输入因子,对其氢氧稳定同位素组成的时空变化进行分析,可探讨区域大气降水水汽来源及水文循环过程特征^[5-8],为定量阐明降水对生态系统中的土壤水、地下水及植物水的补给^[9]及森林生态系统水循环过程深层机理奠定基础^[10]。同时,降水中的氢氧同位素组成受到水汽来源和传输过程、各环境因子等诸多因素的影响而出现差异,如温度效应^[11-13]、降水量效应^[11-12]等,因此,降水中的氢氧稳定同位素可用来示踪区域大气降水的水汽来源,进而利用其运动规律反演水汽的传输过程^[1, 14]。

20世纪50年代初期,国际上就开始对降水中氢氧稳定同位素进行观测和研究^[15]。1961年,国际原子能机构 IAEA 与世界气象组织 WMO 共同建立的大气降水同位素网络 GNIP 正式启动^[2],其目的在于为研究全球和局地水循环提供大气降水氢氧同位素背景资料数据^[16]。1966年,珠穆朗玛峰的科学考察标志着我国降水稳定同位素研究正式拉开序幕^[1, 17],近年来,我国学者对不同地区和规模的降水中氢氧稳定同位素组成开展了研究^[2, 18-20],取得了丰富的研究成果。尽管降水稳定同位素的研究在全球范围内已持续多年,但在小范围(特别是小流域)的多站点强化研究不足,这使得对其物理机制的研究仍不够深入。全球降水同位素监测网络在中国乃至整个亚洲的监测站点较少,且监测时间也较短,仍然不能满足科研的需要^[21]。

鼎湖山地处热带与亚热带交汇处^[22],是我国第一个国家自然保护区,被列为第17号生物圈保护区,表明国内外生态学专家们已高度认识到鼎湖山

自然保护区森林生态系统重要性及其区域代表性^[23]。鼎湖山生态水文过程的研究对于探讨鼎湖山群落演替动态、森林经营和生态系统水资源管理等有重要的意义。前人对鼎湖山森林水文的研究主要集中在森林水文模型建立^[24]、降水量和地表径流水化学特征^[25-26]、降水的变化对森林土壤呼吸的调节作用和凋落物的持水性^[27-28]、土壤微生物量碳和有机碳对模拟酸雨的响应^[29]、干旱对森林结构的变化对森林水文的影响^[30-31]等方面的研究。然而,对鼎湖山大气降水氢氧同位素特征及水汽来源的研究未见报道。因此,本文基于鼎湖山2013年8月~2014年8月共13个月108个大气降水的氢氧稳定同位素样品实测值,结合该研究区 HYSPLIT 轨迹模型和环境因子,分析了鼎湖山大气降水氢氧同位素组成及其与气象要素之间的关系,深入探讨了该区大气降水的水汽来源和运移过程,为定量研究鼎湖山自然保护区水循环过程、提出合理的水资源管理措施,进一步完善全国乃至全球降水同位素监测网络提供科学依据和理论参考。

1 研究区概况

鼎湖山国家级自然保护区(112°30′39″~112°33′41″ E, 23°09′21″~23°11′30″ N)位于我国广东省中部肇庆市境内,总面积1 155 hm²,最高海拔1 000.3 m。该区属典型亚热带湿润季风气候,年平均气温21.0℃,最热月(7月)平均气温为28.0℃,最冷月(1月)平均气温分别为12.6℃。年均相对湿度为81.5%,年均降雨量1 956 mm,年均蒸发量1 115 mm,全年干湿季明显,干季为10月~翌年3月,湿季为4~9月,其中3/4的降水分布在湿季^[32]。研究区属亚热带地带性植被,主要植被类型有马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)针叶林、针阔叶混交林和季风常绿阔叶林^[33]。马尾松针叶林和针阔叶混交林林下土壤类型主要为赤红壤,土层较浅;季

风常绿阔叶林林下土壤为发育于砂岩或砂页岩的赤红壤,酸性较强,土壤层深度为60~90 cm^[29]。

2 研究方法

2.1 大气降水样品采集

2013年8月至2014年8月,在广东省鼎湖山国家级自然保护区空旷地(112°32′56.62″~112°32′56.85″ E, 23°10′0.06″~23°10′0.20″ N)随机放入3个雨量筒(在雨量筒上部放一漏斗,并在漏斗中放置1个乒乓球,以防止水分蒸发引起氢氧同位素分馏)。每次降雨结束后,立即用采样瓶收集降水样品,迅速拧紧盖子,并立即用Parafilm封口膜密封。每天早上7:00采集大气降水(每天将3个雨量筒的降水样品混合),共收集13个月108个降水样品。所有水样在野外条件下用保温箱低温(-5℃~0℃)保存,带回实验室后置于-5℃以下冰柜中保存。温度、湿度、降水量等气象数据皆由鼎湖山自然保护区气象观测站提供。

2.2 同位素样品测试

大气降水 δD 、 $\delta^{18}O$ 的测定由清华大学地学中心稳定同位素实验室的MAT 253同位素比率质谱仪(Isotope Ratio Mass Spectrometer)和Flash 2000 HT元素分析仪完成(δD 的测定精度为 $\pm < 1\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 的测定精度为 $\pm < 0.2\text{‰}$)。同位素比值可以用相对于维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)的千分差(‰)表示:

$$\delta = \left[\left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} \right) - 1 \right] \times 1000\text{‰}$$

其中 R_{sample} 和 R_{standard} 分别为样品和V-SMOW中的 $D/{}^1H$ 、 ${}^{18}O/{}^{16}O$ 稳定同位素组成。

2.3 水汽来源模型

大气气团传输途径和过程运用美国国家海洋和大气管理局开发的拉格朗日积分轨迹模型(HYSPLIT)(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model, <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)的后向轨迹法进行模拟^[2, 34-35],美国国家环境预报中心NCEP(National Centers for Environmental Prediction)为该模型提供气象资料,模拟并计算了鼎湖山自然保护区上空海拔500 m、1 000 m和1 500 m降水168 h之前大气气团后向传输途径。

2.4 数据处理与分析

本文运用SPSS 12.0统计分析软件线性回归分析方法得到鼎湖山大气降水线方程,用相关分析方

法得到降水量与温度以及与降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间的相关关系,用Origin 8.5制图软件作图。

3 结果与分析

3.1 大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 、日降水量随采样时间变化

根据鼎湖山自然保护区2013年8月—2014年8月13个月108个大气降水样品的 δD ($\delta^{18}O$)的实测值可以看出,其 δD 介于-118.26‰~-15.52‰之间,其 $\delta^{18}O$ 介于-16.05‰~2.25‰之间,均值分别为-34.44‰和-5.58‰(见图1)。由图1可看出,鼎湖山自然保护区降水 δD ($\delta^{18}O$)值呈现出较为明显的季节变化,在干季,降水中 δD ($\delta^{18}O$)均值为-25.89‰(-4.84‰),均值偏大;在湿季,降水中 δD ($\delta^{18}O$)均值为-38.37‰(-5.92‰),均值偏小。

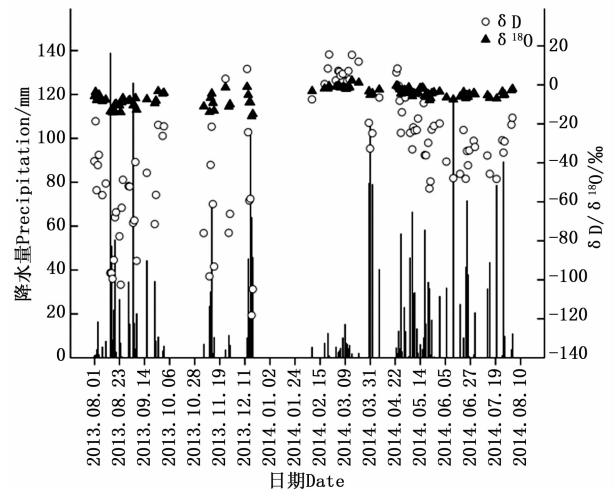


图1 鼎湖山自然保护区大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 、降水量的日变化

Fig. 1 Daily variation of δD and $\delta^{18}O$ composition of precipitation and rainfall in MT. Dinghu National Nature Reserve, China

3.2 大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 特征

在 δD - $\delta^{18}O$ 关系图中,用来表示降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系变化的直线,称为降水线(MWL)。除全球降水线(GMWL)外,不同地区都有反映区域降水特点的降水线,我们通常把它称为地区大气降水线(LMWL)^[36]。由于水汽来源和环境因子等因素的差异,导致LMWL不同程度偏离GMWL。根据鼎湖山自然保护区2013年8月—2014年8月13个月大气降水 δD ($\delta^{18}O$)实测值,将大气降水的 δD 对 $\delta^{18}O$ 进行一元线性回归分析,得出鼎湖山大气降水线方

程为: $\delta D = 7.863\delta^{18}O + 9.664, R^2 = 0.975, n = 108$ 。干季大气降水线方程: $\delta D = 7.920\delta^{18}O + 12.457, R^2 = 0.986, n = 34$; 与全球大气降水线相比, 其斜率偏小, 截距偏大。湿季大气降水线方程: $\delta D = 7.719\delta^{18}O + 7.316, R^2 = 0.982, n = 74$; 与全球大气降水线相比, 其斜率和截距均偏小。

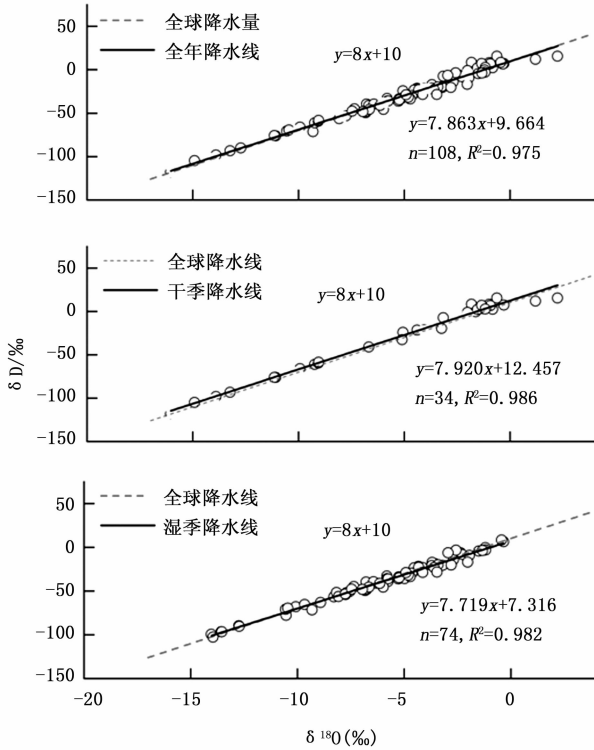


图2 鼎湖山大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系

Fig.2 The correlation between δD and $\delta^{18}O$ of precipitation in MT. Dinghu

3.3 大气降水氘过量(d)的季节变化

降水过程中随着蒸发作用的影响, 在降水 δD ($\delta^{18}O$) 的关系中会出现一个差值(d), Dansgaard^[37]称之为过量氘(d -excess): $d = \delta D - 8\delta^{18}O$, 全球降水中 d 的平均值在 10‰ 左右。从图 3 可以看出, 在干季, 鼎湖山大气降水过量氘 (d -excess) 均值为 11.28‰, 大于于全球平均 d 值(10‰); 在湿季, 鼎湖山大气降水过量氘 (d -excess) 均值为 7.76‰, 小于于全球平均 d 值(10‰)。

3.4 降水 δD 与 $\delta^{18}O$ 的温度效应

从图 4 可看出, 将降水 δD 与温度(T)进行线性回归分析, 降水 δD - T 线性方程为: $\delta D = -1.610T + 0.279 (r = 0.303, n = 108, F = 10.754, P < 0.01)$; 将图 4 中降水 $\delta^{18}O$ 与温度(T)进行线性回归分析, 降水 $\delta^{18}O$ - T 线性方程为: $\delta^{18}O = -0.157T -$

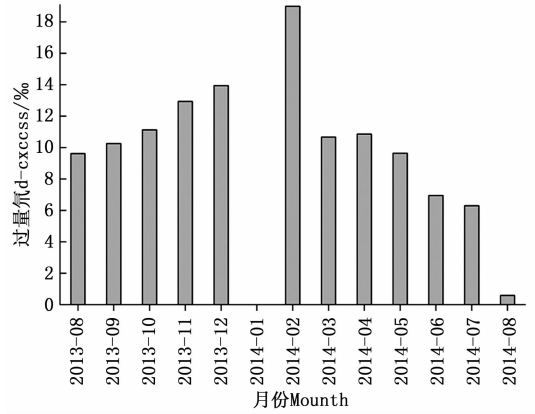


图3 鼎湖山降水中氘过量(d)的月变化

Fig.3 Monthly variation of d -excess of precipitation in MT. Dinghu

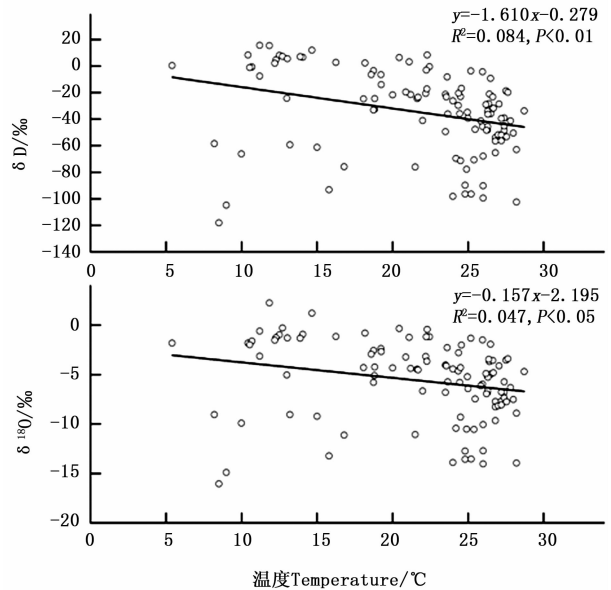


图4 鼎湖山降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 温度效应

Fig. 4 The correlation between δD ($\delta^{18}O$) of daily precipitation and daily mean temperature in MT. Dinghu

$2.195 (r = 0.235, n = 108, F = 6.201, P < 0.05)$ 。可见, 鼎湖山降水氢氧同位素组成与温度存在显著负相关关系。

3.5 降水 δD 与 $\delta^{18}O$ 的降水量效应

从图 5 可看出, 将降水 δD 与降水量(P)进行线性回归分析, 降水 δD - P 线性方程为: $\delta D = -0.333P - 26.263 (r = 0.318, n = 108, F = 11.943, P < 0.01)$; 将图 5 中降水 $\delta^{18}O$ 与降水量(P)进行线性回归分析, 降水 $\delta^{18}O$ - P 线性方程为: $\delta^{18}O = -0.043P - 4.520 (r = 0.328, n = 108, F = 12.774, P < 0.01)$ 。可见, 鼎湖山地区存在极显著的降水量效应。

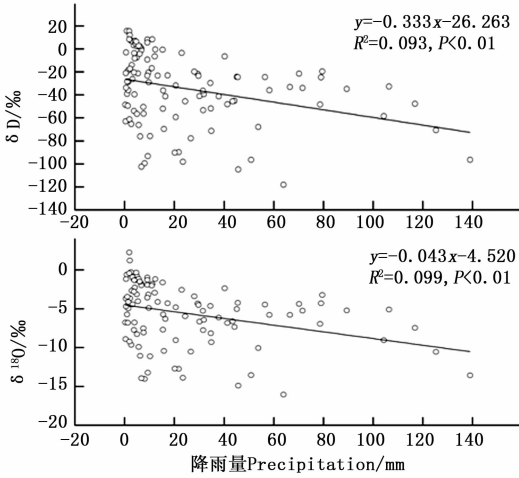


图5 鼎湖山降水 δD 和 δ¹⁸O 降水量效应

Fig. 5 The correlation between δD (δ¹⁸O) of daily precipitation and daily rainfall in MT. Dinghu

3.6 降水水汽来源轨迹模拟

为了进一步验证氢氧稳定同位素技术指示鼎湖山大气降水水汽来源结果的可靠性,本研究选择鼎湖山2013年8月—2014年8月13个月中8次典型降水事件(即湿季和干季各4个不同强度降水事件),利用HYSPLIT模型进行气团轨迹模型模拟,垂直方向上选取500、1000、1500 m这3个高度作为模拟的初始高度,模拟其向后追踪7天(d)的气团运动轨迹(图6)。从图6可以看出,在湿季,鼎湖山自然保护区水汽主要来自太平洋的东南季风及印度洋的西南季风,在干季,其水汽主要来源于局地蒸发、我国华北地区及寒冷干燥的亚欧大陆。后向轨迹模拟的结果与大气降水氢氧同位素组成的分析结果基本上相符合。

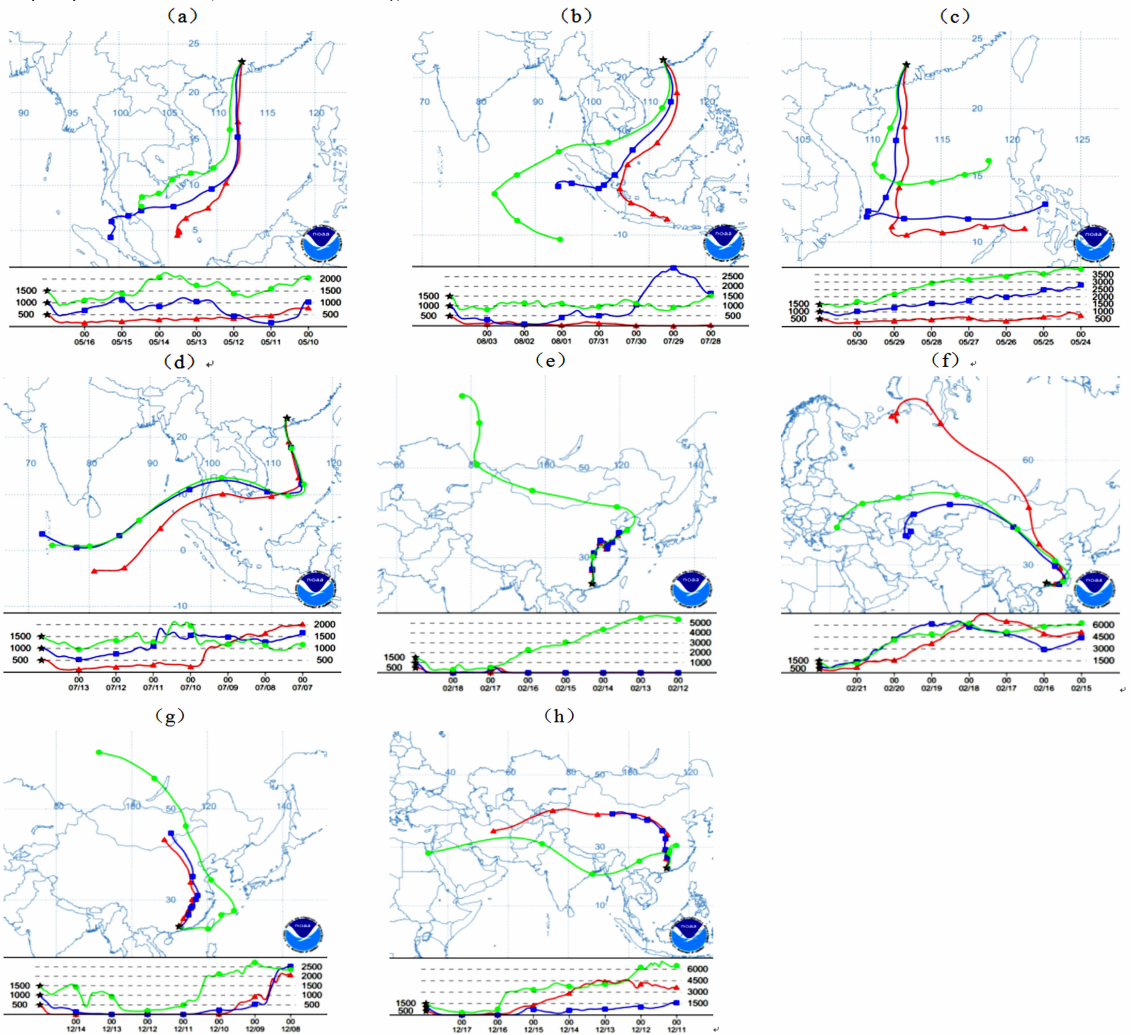


图6 鼎湖山部分降水事件的气团轨迹模拟

Fig. 6 The air trajectory simulation of partial precipitation event in MT. Dinghu

注:不同颜色轨迹代表垂直高度分别为,红色:500 m;蓝色:1 000 m;绿色:1 500m。(a)、(b)、(c)、(d)分别是湿季4次降水事件,降水强度分别为9.8 mm、16.4 mm、28.1 mm、43.5 mm;(e)、(f)、(g)、(h)分别是干季4次降水事件,降水强度分别为6.8 mm、11.2 mm、20.6 mm、45.8 mm。

4 讨论

全球大气降水中的 δD 的变化范围为 $-350‰ \sim +50‰$, 平均值为 $-22‰$, $\delta^{18}O$ 的变化范围为 $-50‰ \sim +10‰$, 平均值为 $-4‰$ [38]。可见, 鼎湖山大气降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化范围均落在全球雨水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化范围之内。与全球大气降水 δD ($\delta^{18}O$) 相比, 鼎湖山降水 δD ($\delta^{18}O$) 均值更小, 说明鼎湖山地区在南部季风气候影响下, 降水量大, 降水过程中氢氧同位素的分馏程度比其它地区小, 造成降水中氢氧同位素值偏低。鼎湖山自然保护区降水 δD ($\delta^{18}O$) 值呈现出较为明显的季节变化规律, δD ($\delta^{18}O$) 的最大值出现在干季, 此时其均值偏大, δD ($\delta^{18}O$) 最小值出现在湿季, 此时其均值偏小。这种现象在中低纬度季风区普遍存在, 鼎湖山地区大气降水的水汽来源是决定其氢氧同位素组成的重要因素 [20, 39]。

与全球降水线方程 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ 相比 [40], 鼎湖山全年大气降水线方程的斜率 (7.859) 和截距 (9.674) 都稍微偏小, 也与厦门大气降水线方程 [2] 及郑淑蕙 [41] 报道的中国大气降水线方程 $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 8.2$ 很接近; 与四川卧龙地区 [4] 大气降水线方程 $\delta D = 9.443\delta^{18}O + 28.658$ 相比, 其斜率和截距明显偏小, 这与鼎湖山地处南亚热带, 气候相对湿润, 蒸发量相对较小和降水量较大使得降水过程中氢氧同位素分馏不明显, 降水中氢氧同位素值相对较低, 反映了鼎湖山气候湿润的特点。地区降水线的斜率反映了大气降水蒸发凝结过程同位素分馏差异, 而截距则反映氘对平衡状态的偏离程度 [42]。

同时, 降水氢氧同位素组成与各环境因子 (如降水量、温度) 及季节、海拔高度等存在着密切的相关关系。而本研究显示, 鼎湖山降水同位素组成与降水量呈显著负相关关系, 即降水量效应显著, 造成这种现象的原因主要是鼎湖山水汽主要来源于低纬度的西太平洋、南海和印度洋, 海洋气团具有降水量大、空气湿度较高、蒸发弱, 降水同位素组成同位素偏低的特点, 研究结果表明降水量效应是显著存在的 [2, 6, 43]。产生降水的物理过程 (蒸发和凝结) 影响大气降水中同位素分馏, 而温度是该过程中重要的制约因子之一, 大气降水同位素组成与温度存在的正相关关系称作温度效应 [37], 降水过程中随着温度的升高, 雨滴再蒸发引起 $\delta^{18}O$ 富集作用。鼎湖山降

水氢氧同位素组成表现出反温度效应, 分析其原因在于鼎湖山地区年平均温度变化范围小, 湿季降水量大且持续时间长, 另外鼎湖山地处亚热带季风气候区, 受高温高湿的影响, 降水过程中云下雨滴再蒸发而产生的 $\delta^{18}O$ 富集作用较轻, 因而温度效应可能被降水量效应所掩盖, 使降水氢氧同位素组成与温度呈反比 [35, 43-44]。

过量氘 (d) 用以表示蒸发过程的不平衡程度, 其值可以作为示踪水汽来源一个重要参数 [45-46]。鼎湖山自然保护区过量氘存在明显的季节性变化, 干季 d 值偏大, 湿季 d 值偏小, 研究发现季风区过量氘存在明显的冬高夏低的季节变化 [4, 6, 20, 44]。在湿季, 鼎湖山地区水汽主要来源于南海、印度洋等低纬度海洋, 降水过程中受到的蒸发作用弱, d 值较小, 受沿途降水的不断冲刷, 降水中氢氧稳定同位素比率较低; 在干季, 来自局地蒸发、我国华北地区及寒冷干燥的亚欧大陆等气团的影响, 降水过程中受到的蒸发作用强, 降水中的氢氧稳定同位素比率和 d 值较大 [2, 47]。

5 结论

(1) 鼎湖山自然保护区大气降水线方程为 $\delta D = 7.863\delta^{18}O + 9.664$ ($R^2 = 0.975, n = 108$)。干季降水线方程为 $\delta D = 7.920\delta^{18}O + 12.457$ ($R^2 = 0.986, n = 34$); 湿季降水线方程为 $\delta D = 7.719\delta^{18}O + 7.316$ ($R^2 = 0.982, n = 74$)。在干季, 其斜率小于 8, 截距大于 10, 反映了鼎湖山地区大气降水在干季受到一定程度的蒸发作用。

(2) 鼎湖山地区大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 与温度及降水量均呈显著负相关关系, 降水量效应显著, 但温度效应不显著。

(3) 鼎湖山大气降水过量氘 (d) 值波动范围较大 ($-2.61‰ \sim 22.85‰$), d 值表现为干季偏高, 湿季低, 干季水汽主要来源于鼎湖山局地蒸发、中国华北地区及寒冷干燥的亚欧大陆; 湿季水汽主要来源于温暖湿润的西太平洋、南海和印度洋。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 等. 厦门地区大气降水氢氧同位素组成特征及水汽来源探讨[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 667-674.
- [3] Meng Y, Liu G. Isotopic characteristics of precipitation, groundwa-

- ter, and stream water in an alpine region in southwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(10): 1–11.
- [4] 徐庆, 刘世荣, 安树青, 等. 卧龙地区大气降水氢氧同位素特征的研究[J]. *林业科学研究*, 2006, 19(6): 679–686.
- [5] 何元庆, 姚檀栋, 杨梅学, 等. 玉龙山白水1号冰川区大气降水-冰雪-水文系统内 $\delta^{18}\text{O}$ 研究的新结果[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(4): 391–393.
- [6] 李广, 章新平, 许有鹏, 等. 滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. *环境科学*, 2016, 37(4): 1313–1320.
- [7] Welker J M. Isotopic ($\delta^{18}\text{O}$) characteristics of weekly precipitation collected across the USA: an initial analysis with application to water source studies[J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(8): 1449–1464.
- [8] Amesbury M J, Charman D J, Newnham R M, *et al.* Can oxygen stable isotopes be used to track precipitation moisture source in vascular plant-dominated peatlands? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 430: 149–159.
- [9] Jouzel J, Delaygue G, Landais A, *et al.* Water isotopes as tools to document oceanic sources of precipitation[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(11): 7469–7486.
- [10] 刘鑫, 宋献方, 夏军, 等. 黄土高原岔巴沟流域降水氢氧同位素特征及水汽来源初探[J]. *资源科学*, 2007, 29(3): 59–66.
- [11] Lachniet M S, Patterson W P. Oxygen isotope values of precipitation and surface waters in northern Central America (Belize and Guatemala) are dominated by temperature and amount effects [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 284(3): 435–446.
- [12] Yang X X, Yao T D, Yang W L, *et al.* Co-existence of temperature and amount effects on precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in the Asian monsoon region[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(21): 1–6.
- [13] Salamalikis V, Argiriou A A, Dotsika E. Periodicity analysis of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Central Europe: Time-frequency considerations of the isotopic ‘temperature’ effect[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 534: 150–163.
- [14] Liu J R, Song X F, Fu G B, *et al.* Precipitation isotope characteristics and climatic controls at a continental and an island site in Northeast Asia[J]. *Climate Research*, 2011, 49(1): 29–44.
- [15] Dansgaard W. The abundance of O^{18} in atmospheric water and water vapour[J]. *Tellus*, 1953, 5(4): 461–469.
- [16] 林光辉. 稳定同位素生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [17] 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.
- [18] 刘相超, 宋献方, 夏军, 等. 东台沟实验流域降水氧同位素特征与水汽来源[J]. *地理研究*, 2005, 24(2): 196–205.
- [19] 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.
- [20] 张贵玲, 角媛梅, 何礼平, 等. 中国西南地区降水氢氧同位素研究进展与展望[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(4): 1094–1103.
- [21] 章新平, 田立, 刘晶森, 等. 沿三条水汽输送路径的降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征[J]. *地理科学*, 2005, 25(2): 190–196.
- [22] 练璐愉, 陈灿, 黄忠良, 等. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林不同成熟度群落特征的比较[J]. *生物多样性*, 2015, 23(2): 174–182.
- [23] 刘岸东, 史文飞, 刘滔, 等. 森林生态景观土壤酸化及修复技术研究[J]. *亚热带水土保持*, 2013, 25(2): 12–16.
- [24] Zhou G Y, Wei X H, Wu Y P, *et al.* Quantifying the hydrological responses to climate change in an intact forested small watershed in Southern China[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(12): 3736–3746.
- [25] Deng Q, Hui D F, Zhang D Q, *et al.* Effects of Precipitation Increase on Soil Respiration: A Three-Year Field Experiment in Subtropical Forests in China[J]. *Plos One*, 2012, 7(7): e41493.
- [26] 丘清燕, 陈小梅, 梁国华, 等. 模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林地表径流水化学特征的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(13): 4021–4030.
- [27] Zhou G Y, Peng C H, Li Y L, *et al.* A climate change-induced threat to the ecological resilience of a subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest in Southern China[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 1197–1210.
- [28] 刘效东, 周国逸, 张德强, 等. 鼎湖山流域下游浅层地下水动态变化及其机理研究[J]. *生态科学*, 2013, 32(2): 137–143.
- [29] 吴建平, 梁国华, 熊鑫, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤微生物量碳和有机碳对模拟酸雨的响应[J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6686–6693.
- [30] Otieno D, Li Y L, Ou Y X, *et al.* Stand characteristics and water use at two elevations in a sub-tropical evergreen forest in southern China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 194: 155–166.
- [31] Li R, Zhu S, Chen H Y H, *et al.* Are functional traits a good predictor of global change impacts on tree species abundance dynamics in a subtropical forest? [J]. *Ecology Letters*, 2015, 18(11): 1181–1189.
- [32] 程静, 欧阳旭, 黄德卫, 等. 鼎湖山针阔叶混交林4种优势树种树干液流特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(12): 4097–4104.
- [33] 罗艳, 周国逸, 张德强, 等. 鼎湖山三种主要林型水文学过程中总有机碳浓度对比[J]. *生态学报*, 2004, 24(12): 2973–2978.
- [34] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories [J]. *Australian Meteorological Magazine*, 1998, 47(4): 295–308.
- [35] 宋春林, 孙向阳, 王根绪. 贡嘎山亚高山降水稳定同位素特征及水汽来源研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(11): 1860–1869.
- [36] 尹观, 倪师军. 同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [37] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436–468.
- [38] IAEA/WMO. Global network for isotopes in precipitation (EB/OL). <http://isohis.iaea.org>.

- [39] 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]. 地球化学杂志, 1994, 23(1): 35-42.
- [40] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [41] 郑淑蕙, 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, 28(13): 801-801.
- [42] 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.
- [43] 胡海英, 黄华茂, 杨健文. 香港地区降水氢氧同位素多尺度演变特征分析[J]. 武汉大学学报:工学版, 2014, 47(5): 577-584.
- [44] 李 广, 章新平, 张新主, 等. 云南腾冲地区大气降水中氢氧稳定同位素特征[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(11): 1458-1465.
- [45] Welp L R, Lee X, Griffis T J, *et al.* A meta-analysis of water vapor deuterium-excess in the midlatitude atmospheric surface layer[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(9): 902-906.
- [46] Lai C T, Ehleringer J R. Deuterium excess reveals diurnal sources of water vapor in forest air[J]. Oecologia, 2011, 165(1): 213-223.
- [47] 胡 茵, 王健力. 重庆市2013年10-12月大气降水中氢氧同位素特征及水汽来源分析[J]. 中国岩溶, 2015(3): 247-253.

(责任编辑:崔 贝)