

卧龙降水稳定同位素与季风活动的关系

徐振^{1, 2}, 刘玉虹¹, 王中生¹, 崔军¹, 徐庆³, 安树青^{1*}, 刘世荣³

(1. 南京大学生命科学学院森林生态与全球变化实验室, 南京 210093; 2. 国电环境保护研究院, 南京 210031; 3. 中国林业科学院森林生态环境与保护研究所, 北京 100093)

摘要: 2003-07 ~ 2004-07 在四川卧龙自然保护区对逐次降水事件进行采样, 分析了降水的稳定同位素特征及其与降水量、气温和风向风速等气象参数的关系. 结果表明, 4 ~ 8 月降水的过量氘 ($d\text{-excess}$) 值为 $(8.4 \pm 7.4)\text{‰}$, 降水由东亚季风带来的大洋水汽主导; 9 ~ 10 月降水的 $d\text{-excess}$ 值为 $(-7.4 \pm 12.5)\text{‰}$, 降水由南亚季风带来的经过强烈分馏作用的大洋水汽主导; 11 月 ~ 次年 3 月降水的 $d\text{-excess}$ 值为 $(12.5 \pm 12.1)\text{‰}$, 降水由本地蒸发水汽以及西风环流带来的内陆蒸发水汽主导. 季风期降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 具降水量效应 (r 分别为 -0.389 、 -0.380 , $p < 0.05$), 次一级是气温影响 ($p \leq 0.10$). 季风期降水的 δD 、 $\delta^{18}O$ 与南风指数呈显著负相关 (r 分别为 -0.354 、 -0.390 , $p < 0.05$), 表明降水中的稳定同位素比率对水汽来源与运输过程指示性很强, 特别是南亚季风的暴发带来了稳定同位素比率和 $d\text{-excess}$ 值都极低的降水.

关键词: 降水; 氢、氧稳定同位素; 过量氘; 季风; 南风指数; 卧龙自然保护区

中图分类号: X142; X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)04-1007-07

Relationships Between Stable Isotopes in Precipitation in Wolong and Monsoon Activity

XU Zhen^{1, 2}, LIU Yu-hong¹, WANG Zhong-sheng¹, CUI Jun¹, XU Qing³, AN Shu-qing¹, LIU Shi-rong³

(1. Laboratory of Forest Ecology and Global Changes, School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. State Power Environmental Protection Research Institute, Nanjing 210031, China; 3. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100093, China)

Abstract: Stable isotopic analyses with precipitation, air temperature, wind direction and wind speed were performed in the Wolong Nature Reserve from July, 2003 to July, 2004. Results showed that $d\text{-excess}$ values were $(8.4 \pm 7.4)\text{‰}$, $(-7.4 \pm 12.5)\text{‰}$ and $(12.5 \pm 12.1)\text{‰}$ in precipitation events from April to August, September to October and November to March, respectively. Stable isotopic characteristics and $d\text{-excess}$ values indicated that precipitation was mainly brought by the East Asia monsoon from ocean surface moisture from April to August, by the Indian summer monsoon from ocean moisture which extremely affected by rainout (strong depletion of heavy isotope) from September to October, and by Westerly from inland evaporation and local evaporation from November to March. Significant negative correlations between isotopic values and precipitation, which was amount effect, were found from April to October ($r = -0.389$ for δD and $r = -0.380$ for $\delta^{18}O$, $p < 0.05$, respectively). Temperature effect also might affect isotopic values in precipitation ($p \leq 0.10$). During the active period of the East Asia monsoon and the Indian summer monsoon, stable isotopes in precipitation events had significant negative correlations with south wind index ($r = -0.354$ for δD and $r = -0.390$ for $\delta^{18}O$, $p < 0.05$, respectively), indicating that isotopic values closely associated with the origin and transport of moisture, and especially the Indian summer monsoon could bring vapors with very low isotopic values and $d\text{-excess}$ values.

Key words: precipitation; stable hydrogen and oxygen isotopes; $d\text{-excess}$; monsoon; south wind index; Wolong Nature Reserve

降水中稳定同位素与一些关键气候参数如气温、降水量、相对湿度等有很大相关性, 能记录气候变化的信息, 可以定量地研究洋面蒸发、区域水汽水平垂直输送、云层中降水的形成与改变等过程^[1]. 1H ^{16}O 和 1H ^{18}O 浓度的变化主要由水循环中的一系列分馏过程引起^[2], 大气水中的重同位素从洋面开始往内陆不断移动过程中逐步贫化^[3], 同时蒸发作用又导致重同位素富集, 水穿过含水层时还可能与岩层发生同位素交换而导致同位素值漂移^[4]. 这些在大气水、地表水、地下水以及生物圈水中的变化可被一些介质(如冰芯、湖泊沉积物)记录, 从而可用来分析水文系统的特征、研究过去气候变化^[4]. 故降水

中 D 和 ^{18}O 组成是研究当代气候状况与古气候重建的重要代用指标之一^[2, 5].

我国的大部分地区属于典型的季风气候, 季风带来的降水对这些地区的土壤水、地下水、植物水等的稳定同位素组成有重大影响. 尤其是在我国的西南地区, 东亚季风和南亚季风在这里交汇并在雨季分别带来了西太平洋和印度洋的水汽^[6]. 来自西太

收稿日期: 2007-05-19; 修订日期: 2007-08-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB111504)

作者简介: 徐振(1981 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为稳定同位素技术在生态水文和森林生态中的应用, E-mail: alex_xuzhen@163.com

* 通讯联系人, E-mail: anshq@nju.edu.cn

平洋和印度洋的水汽具有不同的氢氧稳定同位素组成,通过对降水的氢氧稳定同位素研究可以揭示季风对当地的影响以及降水云团的水汽来源^[3,7,8].目前,在青藏高原进行了详细的大气降水与水文循环特征研究^[9~16],在云贵及临近地区也有类似工作^[17~19],但是在四川地区仅有一些水文循环局部过程及其与植被相互作用的研究^[20~24],详细的降水云团水汽输送方面研究很少.本研究于 2003-07~2004-07 在四川卧龙自然保护区采集了降水,并收集相对应的气象资料,分析降水的稳定同位素比率与气温、风向、风速和降水量等气象参数的关系及变化特征,探讨降水云团的水汽特征、来源及季风对当地降水的影响,以期为研究岷江上游流域降水输入与植被动态相互关系提供依据.

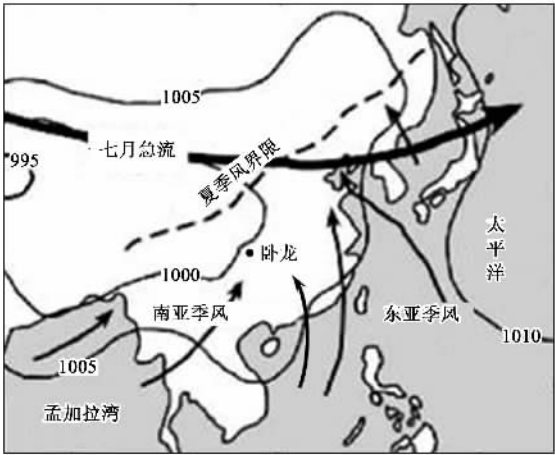
1 材料与方法

1.1 研究区概况

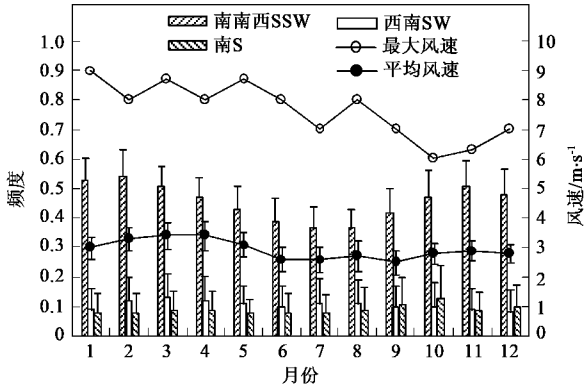
卧龙自然保护区位于四川省阿坝藏族、羌族自治州汶川县西南部,地处东经102°52′~103°24′、北纬30°45′~31°25′的成都平原西缘、岷江上游西侧、邛崃山东南坡,东西长约 52 km,南北宽约 62 km,总面积约2 000 km².该区为四川盆地向川西高原的过渡地带,属于四川盆地的边缘山地,具有典型的高山峡谷地貌,地势由东南向西北递增^[25].卧龙属于青藏高原气候区中的川西东部高原温带亚湿润气候区,是亚热带季风气候向大陆性高原气候过渡地区,西风急流南支和东亚季风控制着本区的主要天气过程,其中在 4~8 月主要受东亚季风控制、并伴有南亚季风的影响,在 9~10 月由南亚季风主导,期间给本区带来了充沛的降水(图 1);而从 11 月~次年 3 月主要受高空西风环流影响,随着其进退过程带来小降水天气^[25,26].全年主导风向是 SSW(图 2).卧龙气候凉爽,年温差小,干湿季节明显,年降水量 861.8 mm,降水日数在 200 d 以上,其中 5~10 月降水约占全年的 75%~90%^[26],巴郎山垭口是区内山地的最大降水带,本区年蒸发量约为 800 mm^[25];本区相对湿度较大,特别是在夏季,年均相对湿度在 80%左右;本区地形对气候影响显著,气候垂直变化明显,年均气温 8.9℃,海拔每升高 100 m 气温递减 0.42~0.46℃^[25].

1.2 降水样品与相关气象资料采集

2003-07~2004-07,在卧龙自然保护区邓生生态定位站(海拔 2 743 m, 102°58.308'E, 30°51.437'N)林外气象站内收集降水(DSJ2 型自计雨量计,天津气



平均海平面气压单位为 hPa, 修改自文献[6]
图 1 影响东亚地区的季风(7 月)
Fig.1 Map showing the summer monsoon regime of eastern Asia (July)



据汶川县气象局未公开资料
图 2 卧龙自然保护区 1971~1989 年主要风向、风速逐月分布
Fig.2 Dominant monthly wind direction and wind speed during 1971 to 1989 in the Wolong Nature Reserve

象仪器厂),装入 10 mL 玻璃管并用 Parafilm[®] 密封.共收集降水样品 45 个,其中降雨样品 30 个、降雪样品 15 个,所有样品保存温度为 2℃^[27].降水量、气温、风向风速等数据由林外气象站和自动气象站(海拔 2 785 m, 102°58.441'E, 30°51.806'N, Campbell Scientific Inc., Logan UT, USA)每 30 min 记录 1 次.

1.3 样品分析与数据处理

注射 1~2 μL 水样进入稳定同位素质谱仪(DELTA^{plus} XP, Thermo-Finnigan Instrument Inc., Germany)分析,以 VSMOW 作为标准,得到的稳定同位素比率以 δ(‰)表示.

$$\delta_{\text{sample}} = [(R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}] \times 1000 \quad (1)$$
$$R_{\text{sample}} \text{ 和 } R_{\text{standard}} \text{ 分别表示样品和标准物中稳定性氢同位素(D/H)或稳定性氧同位素}(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})\text{比例.}$$

2003-07 ~ 2003-09 降水的分析时间为 2004-03, 其余样品分析时间为 2004-08; 样品分析由中国科学院北京植物所生态中心稳定同位素实验室完成, δD 和 $\delta^{18}O$ 的分析精度分别为 3‰和 0.3‰.

使用南风指数(south wind index, SWI)来评估水汽来源对降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的影响^[9], 南风指数由风向(W_d)和风速(W_s)计算得出:

$$SWI = 3W_s \times \cos(W_d - \pi). \quad (2)$$

SWI 的正值或负值分别显示当地由南方或北方输送降水气团的强度.

降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系主要由与 Rayleigh 蒸馏有关的浓缩过程控制^[4, 28], 全球降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 主要落在全球大气降水线(global meteoric water line, GMWL)上, 其方程为^[29]:

$$\delta D = 8\delta^{18}O + 10 \quad (3)$$

过量氘(d -excess)被定义为^[30]:

$$d\text{-excess} = \delta D - 8\delta^{18}O \quad (4)$$

因此根据公式(3)和(4), 全球大气降水的平均 d -excess 为 10‰.

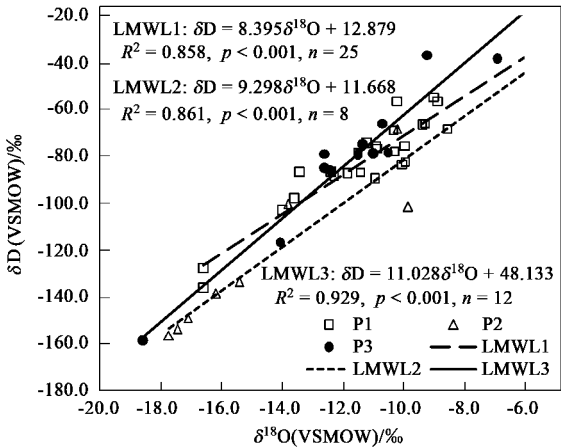
卧龙降水样品的稳定同位素比率按东亚季风、南亚季风及高空西风环流分别主导的 3 个阶段分类^[26], 分别进行一元回归分析, 并对 3 个阶段降水的 d -excess 值进行 One-Way ANOVA 分析. 降水中稳定同位素比率与降雨量存在负相关关系被称为降水量效应, 与气温显著正相关关系被称为温度效应^[3, 4, 31]. 使用 Pearson 相关检验降水量、气温、SWI 与稳定同位素比率之间的相关性, 显著性检验采用单尾检验. 来自于季风的降水云团一般会显示显著的降水量效应^[3, 6, 19], 因此降水样品按照季风阶段(包括东亚季风阶段和南亚季风阶段)和西风环流阶段划分进行检验, 季风阶段为 33 个样品(包括 3 个降雪样品), 西风环流阶段为 12 个样品. 温度是制约大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化的重要因子之一^[3, 4], 采样期间降雨与降雪发生时平均气温相差很大(分别为 $11.4^{\circ}C \pm 3.1^{\circ}C$ 和 $-2.7^{\circ}C \pm 3.5^{\circ}C$), 因此降水被分为 30 个降雨样品和 15 个降雪样品进行温度效应分析. 所有数据使用 SPSS 12.0 和 Excel 进行统计分析、绘图.

2 结果与分析

2.1 降水中稳定同位素比率与 d -excess 值特征

2003-07 ~ 2004-07 卧龙降水中 δD 的范围是 $-158.9‰ \sim -36.7‰$, $\delta^{18}O$ 的范围是 $-18.5‰ \sim -6.9‰$ (图 3). 降水中 d -excess 值的范围是

$-22.7‰ \sim 36.7‰$ (图 4), 在东亚季风阶段、南亚季风阶段和西风环流阶段的均值分别为 $(8.4 \pm 7.4)‰$ 、 $(-7.4 \pm 12.5)‰$ 和 $(12.5 \pm 12.1)‰$. OneWay ANOVA 分析结果显示, 南亚季风阶段的 d -excess 值与另 2 个阶段都有极显著差异($p < 0.001$), 东亚季风阶段与西风环流阶段之间差异不显著($p = 0.237$). 注意到南亚季风在西风环流阶段偶尔暴发带来极低 d -excess 值的降水(图 4), 将这样偶尔暴发的 2 个事件剔除, 比较剩余的西风环流阶段与东亚季风阶段 d -excess 值, ANOVA 分析显示两者有显著差异($p = 0.016$). 这些统计结果表明, 排除阶段交替时期偶尔干扰, 3 个阶段的过量氘差异显著, 即东亚季风、南亚季风和西风环流对卧龙大气降水的影响阶段性明显.



P1 表示 2003-07 ~ 2003-08 及 2004-04 ~ 2004-07 期间的降水; P2 表示 2003-09 ~ 2003-10 期间的降水; P3 表示 2003-11 ~ 2004-03 期间的降水; LMWL1、LMWL2、LMWL3 分别是对应 P1、P2、P3 的回归线

图 3 卧龙降水稳定同位素回归分析

Fig.3 Regression analyses of stable isotopes in precipitation events in Wolong

2.2 降水稳定同位素比率与降水量、气温的关系

卧龙季风阶段降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 与降雨量都存在显著的降水量效应($p < 0.05$, 图 5), 而西风环流阶段降水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 不存在降水量效应(p 分别为 0.266 和 0.325, $n = 12$).

统计结果显示温度效应在卧龙降水稳定同位素比率中不显著, 其中降雨的 δD 、 $\delta^{18}O$ 与气温相关系数分别为 $r = 0.244$ ($p = 0.097$, $n = 30$) 和 $r = 0.241$ ($p = 0.100$, $n = 30$), 降雪的 δD 、 $\delta^{18}O$ 与气温相关系数分别为 $r = 0.160$ ($p = 0.284$, $n = 15$) 和 $r = 0.254$ ($p = 0.181$, $n = 15$). 这很可能是季风带来的降水量效应掩盖了温度效应, 本区年温差小、相对湿度较大也可能弱化了温度效应.

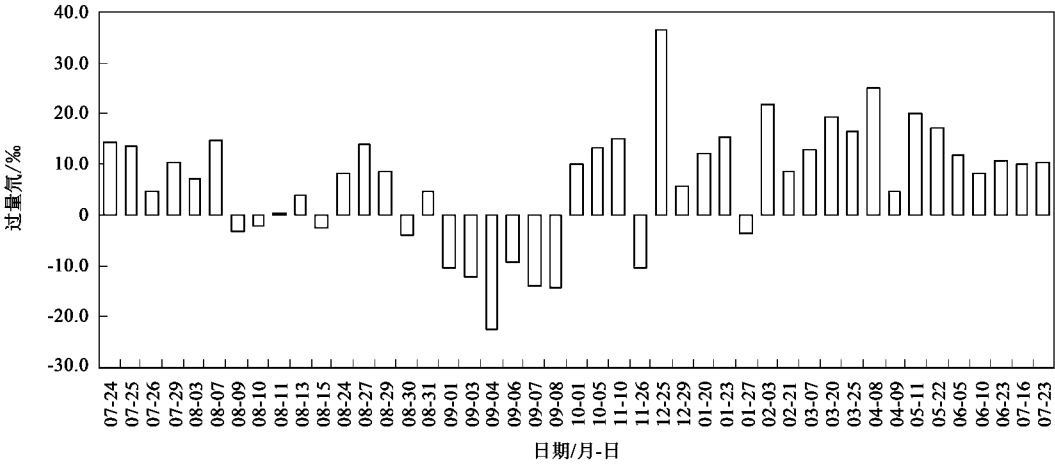
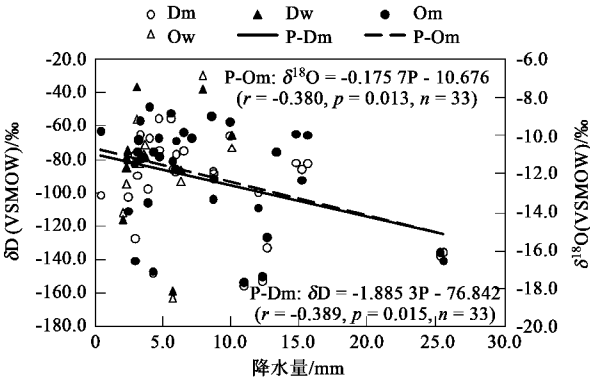


图4 2003-07~2004-07 卧龙自然保护区降水事件过量氘的变化

Fig.4 Variations of *d*-excess values in precipitation events in the Wolong Nature Reserve from Jul., 2003 to Jul., 2004



Dm、Om: 季风阶段降水中的 δD 、 $\delta^{18}O$; Dw、Ow: 西风环流阶段降水中的 δD 、 $\delta^{18}O$; P-Dm、P-Om: 季风阶段降水中的 δD 、 $\delta^{18}O$ 与降水量的回归线

图5 卧龙降水事件中 δD 、 $\delta^{18}O$ 与相应降水量的相关散布

Fig.5 Scatter of δD and $\delta^{18}O$ in precipitation events against precipitation in the Wolong Nature Reserve

2.3 降水稳定同位素比率与SWI的关系

根据公式(2),计算出在卧龙采样期间的SWI(图6).统计结果显示,季风阶段 δD 、 $\delta^{18}O$ 都与SWI呈显著负相关(分别为 $r = -0.354, p = 0.022$ 和 $r = -0.390, p = 0.013, n = 33$),意味着此阶段南风对降水中稳定同位素比率影响显著;而西风环流阶段 $\delta^{18}O$ 、 δD 与SWI无显著相关(分别为 $r = -0.119, p = 0.357$ 与 $r = -0.116, p = 0.360, n = 12$),意味着此阶段南风对降水中稳定同位素比率影响不显著.所有降水的 δD 、 $\delta^{18}O$ 也与SWI呈显著负相关(分别为 $r = -0.292, p = 0.026$ 和 $r = -0.336, p = 0.012, n = 45$),表明整体上南风对卧龙降水有较大影响.统

计结果显示出 $\delta^{18}O$ 与SWI相关性更强,因此其指示性比 δD 好.

3 讨论

3.1 东亚季风、南亚季风和西风阶段降水稳定同位素特征

卧龙地区受亚热带季风气候和大陆性高原气候双重影响,降水气团来源有洋面、本地蒸发和内陆蒸发.

首先,与GMWL方程、四川九寨沟雨季LMWL^[20]和桂林地区多年降水LMWL^[17]对比,代表4~8月降水的回归方程(图3)与这3个海洋性气团为主的降水线方程基本相同,此阶段平均*d*-excess值为 $(8.4 \pm 7.4)\text{‰}$,与全球平均*d*-excess值基本一致.降水量效应与强烈的对流现象有紧密关系且主要发生在中低纬度的洋面、海岸和海岛地区^[6, 12, 18, 32, 33],因此本阶段降水云团主要由季风自中低纬度的洋面、海岸和海岛地区直接输送而来^[16].季风带来的洋面水汽经过沿途降水分馏, δD 和 $\delta^{18}O$ 值会降低,若途中凝结过程不剧烈改变,*d*-excess值变动幅度不大、且回归方程斜率也在8左右^[6, 15],故该阶段降水的稳定同位素比率能反映洋面水汽特征.在卧龙周边地区,比如九寨沟和黄龙地区^[20, 21]、黑水流域^[34]雨季的降水同位素研究也得出了类似结论.

其次,9~10月降水中稳定同位素比率很低(图6),且大部分*d*-excess值低于 -10‰ (图4)并与其他时段有显著差异.在青藏高原和云贵高原的研究表明,南亚季风暴发带来既有极低稳定同位素比率又

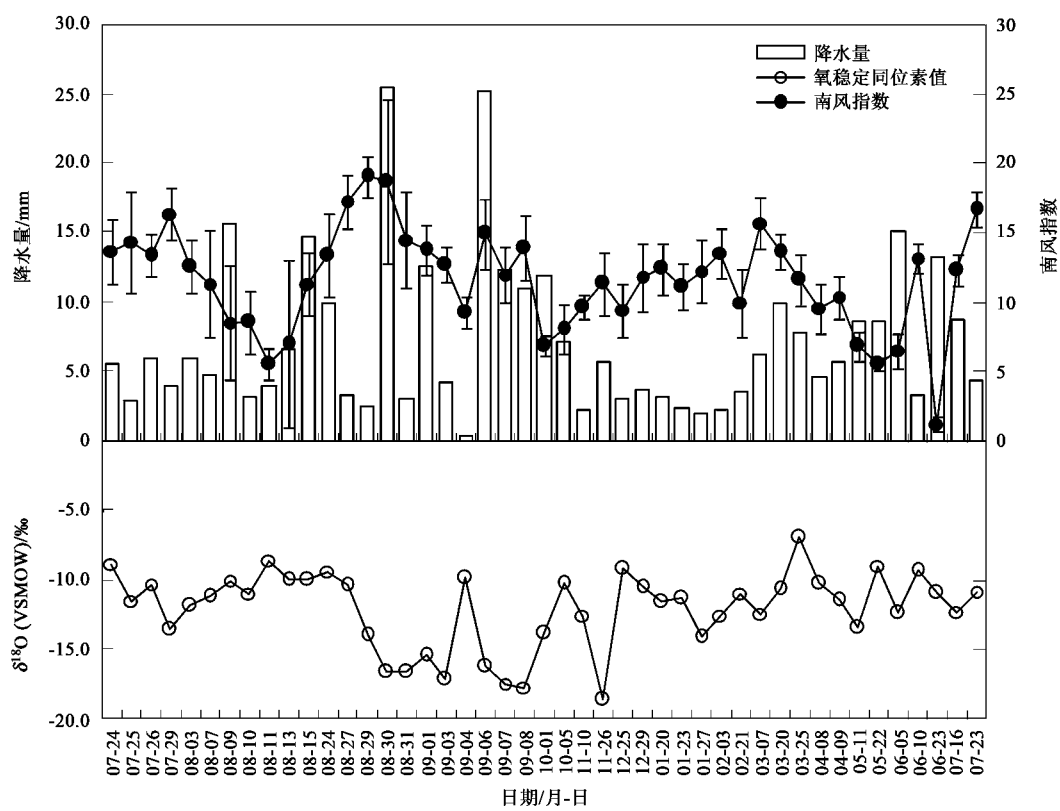


图 6 2003-07 ~ 2004-07 卧龙自然保护区降水事件中 $\delta^{18}\text{O}$ 与相应降水量和南风指数的对比

Fig.6 Variations of $\delta^{18}\text{O}$, daily precipitation and south wind index in precipitation events in the Wolong Nature Reserve from Jul., 2003 to Jul., 2004

有洋面水汽特征的降水^[9,12,14~16,19],这种同位素比率和 $d\text{-excess}$ 值的大幅度降低与气团越过高山受到强烈分馏作用影响(即重同位素随着水汽抬升会优先凝结)^[11]及沿途不断产生降水^[15,16]有关.在地中海高海拔地区的研究也表明,降落的雨滴与地形云之间的同位素交换会显著的改变 $d\text{-excess}$ 值^[35].在此阶段,2003-09-04 降水具较高的同位素比率(图 6),这应该是局地水汽的对流降水所致.此阶段降水稳定同位素比率同样具有显著的降水量效应,故本阶段的降水由受到强烈分馏作用影响的南亚季风输送的海洋性气团主导.

最后,代表 11 月 ~ 次年 3 月降水的回归方程(图 3)显示了很高的斜率、截距,同时具有高的 $d\text{-excess}$ 值降水事件主要集中在此阶段(图 4).在青藏高原的研究表明本地长期地、强烈地蒸发会导致补给的水汽中重同位素富集及 $d\text{-excess}$ 值偏高^[9,11,19,33],而卧龙地区蒸发强烈且冬季气候干燥^[25],因此非平衡条件下形成的水汽有着较高的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$;同时高空西风环流输送的大陆性气团带来内陆蒸发水汽中稳定同位素比率和 $d\text{-excess}$ 值都较高^[4,6,10,13].因此在季风影响较弱、大陆性气候

增强的 11 月 ~ 次年 3 月,主导当地降水的本地水汽再循环过程和西风环流输送了同位素比率较高的水汽.在黑水县 2004 ~ 2005 年观测的降水稳定同位素比率回归方程斜率达到了 9.3^[34],在卧龙相关研究中也提出部分时段降水稳定同位素回归方程斜率超过 9.0、最大达 12.1^[22~24],而本研究中此阶段降水稳定同位素回归方程斜率也达到 11.0,因此推测该阶段降水过程并非处于平衡分馏状态:雨滴、雪与大气存在同位素交换.

$d\text{-excess}$ 值灵敏地显示出东亚季风、南亚季风和西风环流的交替、暴发以及偶然性事件,比如 4 月初西风环流与东亚季风的交替,8 月东亚季风和南亚季风的双重影响,10 月由南亚季风过渡到西风环流,11 月偶然的南亚季风暴发事件等(图 4).这是因为高海拔地区地形对 $d\text{-excess}$ 值有显著影响^[35],故可在季风期内区别东亚季风和南亚季风主导期:东亚季风由都江堰市沿着岷江河谷到达本区^[25], $d\text{-excess}$ 值基本未改变;南亚季风需翻越青藏高原和云贵高原抵达本区^[9,12,14,19,26], $d\text{-excess}$ 值受到高山地形^[35]和沿途多次降水^[15,16]的强烈影响.

3.2 季风活动对降水稳定同位素比率的影响

温度效应主要由大陆性气候引起,降水过程中雨滴再蒸发而同位素富集^[4, 31].但是显著受季风影响地区,降水中的稳定同位素比率受降水量控制,同时季风气候会抑止和掩盖温度效应^[3, 19, 32].而降水量效应主要发生在中低纬度的洋面、海岸和海岛地区^[6, 12, 18, 32, 33],本区 4~10 月降水具有显著的降水量效应应该与季风活动带来中低纬度水汽有关;并且降水量效应显著地区,降水稳定同位素比率的大小一定程度上可以指示季风的强度^[32].

季风活动较强的阶段带来更多的大洋水汽,而且由于水汽来源地距离更远,沿途降水的分馏使得 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 出现低值^[3, 9];尤其是南亚季风翻越青藏高原和云贵高原经过剧烈的分馏作用使得稳定同位素出现极低值^[11, 15, 16].而西风环流活动主导的时期,降水主要来自于本地蒸发和西风带来的来源于内陆蒸发的大陆气团,因此稳定同位素比率出现高值^[14]且降水量较小^[25].这种水汽来源不一致以及输送过程的巨大差别,使得降水稳定同位素比率与 SWI 之间的关系很好地指示了季风活动对降水的影响^[9, 19].SWI 反映气团由南向北输送的强度,SWI 越大则输送强度越高;同时 SWI 与稳定同位素比率之间的对应关系则显示南风对降水云团水汽来源的影响.卧龙的降水事件,特别是在东亚季风和南亚季风阶段, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 与 SWI 间的负相关关系显著性增强(图 6),表明 2 种季风输送的水汽对当地降水中稳定同位素比率影响更显著.2003 年 8 月底到 9 月初的大规模降水事件中,SWI 与稳定同位素比率的相应变化(图 6),显示了南亚季风 1 次暴发的开始、高峰和结束:强季风活动在 1 周多时间带来约 100 mm 降水,SWI 峰值与降水量峰值相对应,同时 $\delta^{18}\text{O}$ 值大幅下降.而在西风环流阶段,这种负相关关系变得不显著,表明季风对当地降水贡献不明显.

卧龙所在的岷江流域上游地区,大气环流特征与高山峡谷地貌共同作用造成季节性干旱气候,并对当地植被动态有重大影响^[36].而对当地降水中稳定同位素比率的分析,可以揭示水文输入来源、季风与西风的交替等一系列大气环流特征以及其他环境因子的变化,因此对研究该地区干旱河谷森林植被分布、生长、演替等动态过程有重大应用价值.

4 结论

(1)在 4~10 月降水云团由季风带来的中低纬度大洋水汽主导,降水稳定同位素主要受降水量影响,次一级是气温影响.

(2)在 4~10 月的季风阶段,稳定同位素比率和 $d\text{-excess}$ 值的变化可以将该阶段划分为 4~8 月的东亚季风主导期和 9~10 月的南亚季风主导期.

(3)降水稳定同位素比率与南风指数的关系很强地指示了水汽来源与运输过程,其显著负相关的时段即为东亚季风和南亚季风对卧龙降水气团有重大贡献的主导时段.

(4)11 月~次年 3 月,降水气团主要来自于本地水汽再循环和西风环流,故此阶段降水稳定同位素比率和 $d\text{-excess}$ 值均相对较高.

参考文献:

- [1] Araguas-Araguas L, Froehlich K, Rozanski K. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture [J]. *Hydrological Processes*, 2000, **14**: 1341-1355.
- [2] Jouzel J, Hoffmann G, Koster R D, *et al.* Water isotopes in precipitation: data/model comparison for present-day and past climates [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, **19**: 363-379.
- [3] 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.
- [4] Gat J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1996, **24**: 225-262.
- [5] Rozanski K, Araguas-Araguas L, Gonfiantini R. Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate [J]. *Science*, 1992, **258**: 981-985.
- [6] Johnson K R, Ingram B L. Spatial and temporal variability in the stable isotope systematics of modern precipitation in China: implications for paleoclimate reconstructions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, **220**: 365-377.
- [7] Hoffmann G, Heimann M. Water isotope modeling in the asian monsoon region [J]. *Quaternary International*, 1997, **37**: 115-128.
- [8] 庞洪喜,何元庆,张忠林,等.季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与季风水汽来源[J].*科学通报*, 2005, **50**(20): 2263-2266.
- [9] 田立德,姚檀栋,孙维贞,等.青藏高原中部降水稳定同位素变化与季风活动[J].*地球化学*, 2001, **30**(3): 217-222.
- [10] 田立德,姚檀栋,孙维贞,等.青藏高原南北降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系及水汽循环[J].*中国科学(D 辑)*, 2001, **31**(3): 214-220.
- [11] 章新平,中尾正义,姚檀栋,等.青藏高原及其毗邻地区降水中稳定同位素成分的时空变化[J].*中国科学(D 辑)*, 2001, **31**(5): 353-361.
- [12] 章新平,中尾正义,藤田耕史,等.喜马拉雅山朗塘流域降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化[J].*中国科学(D 辑)*, 2001, **31**(3): 206-213.
- [13] 杨梅学,姚檀栋,田立德,等.藏北高原夏季降水的水汽来源分析[J].*地理科学*, 2004, **24**(4): 426-431.
- [14] 余武生,姚檀栋,田立德,等.那曲河流域季风结束后大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征[J].*科学通报*, 2006, **51**(2): 194-199.
- [15] Kang S, Kreutz K J, Mayewski P A, *et al.* Stable isotopic composition of precipitation over the northern slope of the central Himalaya [J]. *Journal of Glaciology*, 2002, **48**(163): 519-526.

[16] Kang S C, Wake C P, Qin D, *et al.* Monsoon and dust signals in the Dasuopu firn core, central Himalaya [J]. *Journal of Glaciology*, 2000, **46**(153): 222-226.

[17] 涂林玲,王华,冯玉梅. 桂林地区大气降水的 D 和¹⁸O 同位素的研究[J]. *中国岩溶*, 2004, **23**(4): 304-309.

[18] 章新平,孙维贞,刘晶淼. 西南水汽通道上昆明站降水中的稳定同位素[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, **14**(5): 665-669.

[19] 庞洪喜,何元庆,卢爱刚,等. 天气尺度下丽江季风降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化[J]. *科学通报*, 2006, **51**(10): 1218-1224.

[20] 尹观,范晓,郭建强,等. 四川九寨沟水循环系统的同位素示踪[J]. *地理学报*, 2000, **55**(4): 487-494.

[21] 尹观,倪师军,张其春. 氡过量参数及其水文地质学意义——以四川九寨沟和冶勒水文地质研究为例[J]. *成都理工学院学报*, 2001, **28**(3): 251-254.

[22] 崔军,安树青,徐振,等. 卧龙巴郎山高山灌丛降雨和穿透水稳定性氢氧同位素特征研究[J]. *自然资源学报*, 2005, **20**(5): 660-668.

[23] 徐庆,安树青,刘世荣,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.

[24] 徐庆,安树青,刘世荣,等. 四川卧龙亚高山暗针叶林降水分配过程的氢稳定同位素特征[J]. *林业科学*, 2005, **41**(4): 7-12.

[25] 卧龙自然保护区管理局. 卧龙植被及资源植物[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1987. 1-10.

[26] 刘丽娟,咎国盛,葛剑平,等. MTCLIM 模型在岷江上游气候模拟中的应用[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, **14**(2): 248-253.

[27] Yopez E A, Williams D G, Scott R L, *et al.* Partitioning overstory and understory evapotranspiration in a semiarid savanna woodland from the isotopic composition of water vapor [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, **119**: 53-68.

[28] Harvey P E, Welker J M. Stable isotopic composition of precipitation in the semi-arid north-central portion of the US Great Plains [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, **238**: 90-109.

[29] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**: 1702.

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

[31] 刘进达,刘恩凯,赵迎昌,等. 影响中国大气降水稳定同位素组成的主要因素分析[J]. *勘察科学技术*, 1997, **4**: 14-18.

[32] 章新平,姚檀栋,中尾正义,等. 青藏高原及其毗邻地区降水中稳定同位素成分的经向变化[J]. *冰川冻土*, 2002, **24**(3): 245-253.

[33] 章新平,田立德,刘晶淼,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.

[34] 刘玉虹. 四川黑水河水稳定同位素时空分异及其对植被格局的响应[D]. 南京: 南京大学, 2006.

[35] Liotta M, Favara R, Valenza M. Isotopic composition of the precipitations in the central Mediterranean: Origin marks and orographic precipitation effects [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**, D19302, doi:10.1029/2005JD006818.

[36] 张文辉,卢涛,马克明,等. 岷江上游干旱河谷植物群落分布的环境与空间因素分析[J]. *生态学报*, 2004, **24**(3): 552-559.