

# 云南白水台雨水线及钙华 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节和空间变化特征

孙海龙<sup>1,2</sup>, 刘再华<sup>2\*</sup>, 吕保樱<sup>1,2</sup>, 叶文炳<sup>1,2,3</sup>,  
刘香玲<sup>1,2,4</sup>, 曾成<sup>1,2</sup>, 王海静<sup>1,2,5</sup>

(1. 中国地质科学院 岩溶地质研究所 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 3. 桂林工学院 资源与环境工程系, 广西 桂林 541004; 4. 广西师范大学 生命科学学院, 广西 桂林 541004; 5. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715)

**摘要:** 通过对云南白水台地区大气降水的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  分析, 建立了该地区大气降水线, 并通过对过量氘的季节性变化特征分析, 发现白水台地区冬、夏季风期间降雨云团有不同的源区。对现代钙华  $\delta^{18}\text{O}$  的季节变化分析, 发现钙华的氧同位素值与降雨量有着较好的线性负相关关系, 这一发现为下一步利用古钙华的  $\delta^{18}\text{O}$  数据重建古降水量提供了基础。研究还发现, 水中富含轻氧稳定同位素  $^{16}\text{O}$  的  $\text{H}_2\text{O}$  向大气蒸发以及富含轻氧稳定同位素  $^{16}\text{O}$  的  $\text{CO}_2$  向大气逸出, 是下游方向钙华  $\delta^{18}\text{O}$  增加的主要原因。

**关键词:** 地区降水线; 过量氘; 钙华; 氧同位素; 降雨量; 白水台; 云南省

中图分类号: P597; P532

文献标识码: A

文章编号: 0379-1726(2008)06-0542-07

## Meteoric water line and spatiotemporal change in $\delta^{18}\text{O}$ of the travertine in Baishuitai area

SUN Hai-long<sup>1,2</sup>, LIU Zai-hua<sup>2\*</sup>, LÜ Bao-ying<sup>1,2</sup>, YE Wen-bing<sup>1,2,3</sup>,  
LIU Xiang-ling<sup>1,2,4</sup>, ZENG Cheng<sup>1,2</sup> and WANG Hai-jing<sup>1,2,5</sup>

1. Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

3. Department of Resources and Environmental Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

4. College of Life Science, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China;

5. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** By analyzing oxygen and deuterium stable isotopes of the rainwater, the local meteoric water line in Baishuitai area was obtained. Different vapor sources of precipitation during summer and winter monsoon are recognized in light of deuterium excess. A linear negative correlation between the oxygen isotopes in travertine and rainfall was obtained by analyzing oxygen stable isotopes of travertine, which provides the experimental base for paleo-rainfall reconstruction with old travertine. It is also found that water evaporation and degassing of  $\text{CO}_2$  rich in  $^{16}\text{O}$  from water are the reasons for the increase of  $\delta^{18}\text{O}$  in the travertine downstream.

**Key words:** local meteoric water line; deuterium excess; travertine; oxygen stable isotope; rainfall amount; Baishuitai; Yunnan Province

## 0 引言

随着全球变化研究的深入, 多种古气候变化信

息地质载体的研究得到了越来越多的重视, 其中利用钙华获取古气候和古环境信息的研究也得到了广泛的关注。钙华是一种产于地表的次生碳酸钙沉积物, 它与洞穴石笋一样具有重要的古气候重建意

收稿日期(Received): 2008-01-24; 改回日期(Revised): 2008-04-24; 接受日期(Accepted): 2008-05-15

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目, 国家自然科学基金(40572107), 国家社会公益项目(2005DIB3J067)

作者简介: 孙海龙(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事地球化学和环境生态学研究。E-mail: shldragon@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): LIU Zai-hua, E-mail: liuzaihua@vip.gyig.ac.cn; Tel: +86-851-5892338

义。相对于洞穴内的石笋, 钙华由于产出于地表往往对气候环境变化更加敏感; 而且其沉积速率相对于石笋更快, 因而进行古气候重建的精度和分辨率也更高。目前, 国内外钙华古气候古环境重建研究主要集中在大气成因类钙华(tufa)上<sup>[1-6]</sup>, 而对于热成因类钙华(travertine)则相对较少关注<sup>[7-11]</sup>, 并且对于钙华中气候环境替代指标(如  $\delta^{18}\text{O}$ )与气候环境因子(如降雨量)之间的对应关系研究更少。为此, 本文拟结合白水台地区降雨水汽来源的研究, 试图对白水台热成因类钙华的  $\delta^{18}\text{O}$  及其与降雨量之间的关系进行较为深入的探讨, 以便为下一步利用热成因类钙华进行古气候重建工作提供必要的实验依据和理论基础。

## 1 研究区概况

白水台位于云南省香格里拉县东南约 100 km 处的三坝乡白地村, 海拔 2380~2600 m。区内岩石为三叠纪地层, 主要由砂页岩、火山岩和石灰岩构成。西北部补给区灰岩分布广、厚度大, 灰岩含生物碎屑, 具有粒屑泥晶结构及其残余结构, 质纯性脆, 其方解石含量达 99%。

白水台现今气候属于亚热带山地气候, 景区海拔高度与地势高差均较大, 因此其立体气候十分明显: 即在同一山坡或沟谷中, 兼有暖温带(海拔 2200~2500 m)、寒温带(海拔 3000~3500 m)和寒带(海拔 3500 m 以上)。该地区的年均气温为 9.1 °C, 年均降水量为 754 mm, 平均雨季开始于 5 月上旬, 结束于 10 月上旬, 表明该地区的气候主要受印度洋西南季风和行星西风带的控制。

本研究关注的重点是白水台 S1-3 号常流泉 ( $Q = 70 \text{ L/s}$ ) 及其补给的引水渠道中的钙华沉积(图 1)。泉域面积大约 10 km<sup>2</sup>, 海拔高度约 2800~4000 m。构成山体的岩石主要是三叠系石灰岩、页岩和砂岩。该区被 0~0.8 m 的褐色土壤所覆盖。植被属于原始森林体系, 主要是 C<sub>3</sub> 植物(乔木及

大部分灌木)。有关研究区概况的其他情况可参阅文献[7]、[9]和[11]。

## 2 研究方法

### 2.1 雨水及引水渠道水氧氘同位素的取样

为建立白水台地区的地区雨水线并了解该地区降水的主要来源, 本研究自雨季起先后取得该地区不同季节的雨水样 6 个。同时为了解引水渠道中水样的  $\delta^{18}\text{O}$  值变化, 在旱季和雨季分别在渠道上中下游各取 3 个水样进行分析。所取样品均送中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室进行  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  分析。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  均用连续流同位素质谱仪 IsoPrime 测定, 分析误差分别小于 0.2‰ 和 1‰。

### 2.2 玻璃试片的安放及钙华样品的取样、分析

本研究在 S1-3 号泉以下约 300 m 处的引水渠道开始放置 5 cm × 5 cm × 0.4 cm 的有机玻璃片作为钙华的沉积底物, 上中下游分别设置 11 个观测点(图 1)。每半个月取一次钙华沉积样品并更换新的沉积底物。所取钙华样品送中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室进行  $\delta^{18}\text{O}$  分析。 $\delta^{18}\text{O}$  分析采用连续流同位素质谱仪 IsoPrime 进行测定,  $\delta^{18}\text{O}$  的分析系统误差小于 0.2‰。

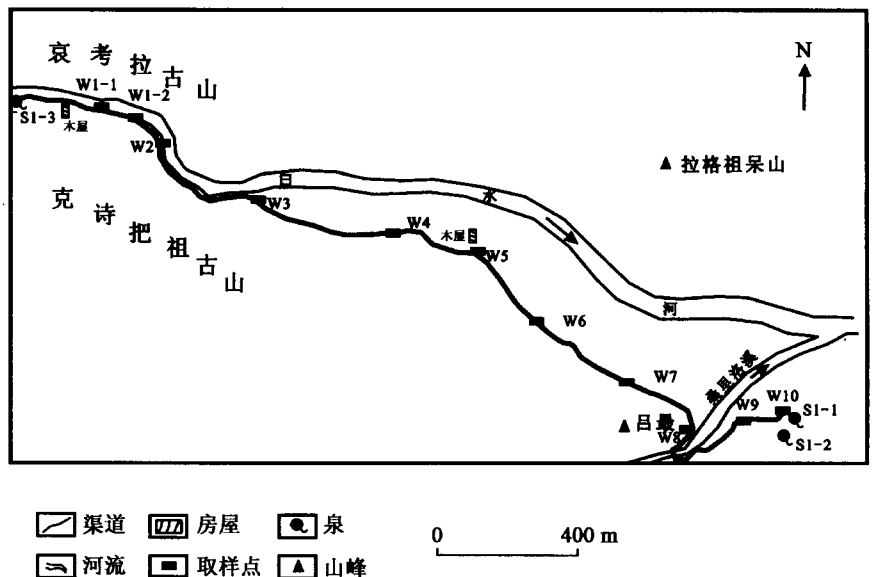


图 1 云南白水台引水渠道观测取样点分布图

Fig. 1 Distribution of the sampling sites in the travertine-depositing canal of Baishuitai, Yunnan

### 3 结果与分析

#### 3.1 雨水氧氘同位素分析结果与讨论

3.1.1 白水台地区雨季降水线及氘过剩值( $d$ )分析  
在雨季的不同时间段,取白水台地区的6个雨水样对其进行 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 的线性拟合,得到当地雨季的地区降水线,并与全球大气降水线(GMWL)进行比较,结果如图2。

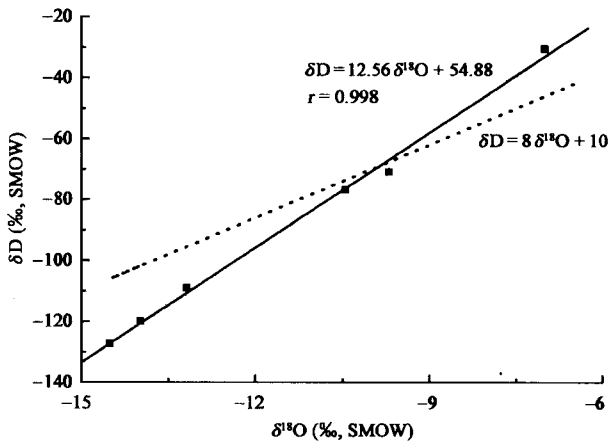


图2 白水台地区雨水线及全球大气降水线对比图

Fig. 2 Difference between the meteoric water line in Baishuitai and the global meteoric water line  
虚线为全球大气降水线。

The dashed line is the GMWL.

从图2中可见,白水台地区雨季的降水线与全球大气降水线有一定的偏离。在水循环过程中,同位素成分平行分馏作用使得全球大气降水中氧氘同位素存在一定线性关系,Craig<sup>[12]</sup>把这个关系定义为全球大气降水线: $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ 。水在蒸发过程中的动力分馏使氧氘的平行分馏被破坏,在 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的关系中出现一个差值,Dansgaard<sup>[13]</sup>将其定义为过剩氘: $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$ 。卫克勤等<sup>[14]</sup>指出, $d$ 值反映形成降水过程的气团同位素组成,含有形成暖湿汽团源区蒸发过程性质的重要信息,包括蒸发过程的平衡或不平衡状态和蒸发速率等。如果蒸发速率大,气候干旱,风速大, $d$ 值也增大。并且随着水汽循环过程, $d$ 值也呈现季节性变化。白水台地区雨水中的 $d$ 值的季节性变化特征如图3所示。

从图中可以看出,进入雨季,白水台地区雨水中的 $d$ 值明显减小。表明在夏季风期间,水汽源区的缓慢蒸发过程<sup>[14]</sup>。而冬季 $d$ 值增大,反映冬季期

间降水汽团源区在不平衡条件下的快速蒸发过程<sup>[14]</sup>。这说明白水台地区冬、夏季风期间降雨云团可能存在不同的源区,即,夏季降水的源区主要是印度洋和孟加拉湾,其特点是空气湿润,水汽蒸发缓慢,降水气团受海洋性水汽影响。而冬季降水的气团则主要受大陆内部气团影响,空气干燥,蒸发强<sup>[14]</sup>。

另外,通过对昆明地区大气降水的稳定同位素分析也发现,昆明地区在雨季,受来自海洋水汽的影响,空气湿润,降水量大,蒸发弱,因此降水中稳定同位素比率低;在旱季,受大陆性气团的影响,空气干燥,降水量小,蒸发强,重同位素富集作用强,因此降水中稳定同位素比率偏高<sup>[15]</sup>。白水台与昆明邻近,属于同一季风影响区内,昆明地区降雨云团源区的转换也证明了白水台地区冬、夏季风期间降雨云团确实有不同的源区。

#### 3.1.2 白水台地区雨水氧同位素与降雨关系

根据前人的研究,雨水中的氧同位素变化比较大,在不同的时期有着非常大的差异,这对于我们研究雨水对渠道水的影响是有利的。对雨水的同位素值和雨量的关系进行分析,其关系如图4所示。

从分析结果(图4)可见,白水台降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 与降雨量 $P$ 之间有着显著的负相关关系: $\delta^{18}\text{O} = -0.035P - 8.10$  ( $r = -0.95$ )。相关系数的显著性水平 $\alpha < 0.01$ 。

从图中我们可以清楚地看出,受雨季降雨增加的影响,雨水的氧同位素由 $-7\text{‰}$ 减小到 $-14.51\text{‰}$ (SMOW标准),这为下文更好地说明降雨对钙华氧同位素的影响提供了依据。

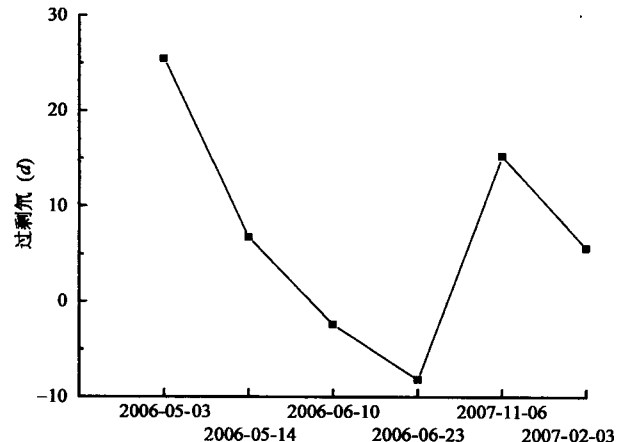


图3 白水台地区雨水中 $d$ 值随时间变化曲线图  
Fig. 3 Temporal variation in deuterium excess ( $d$ ) of the rain in Baishuitai area

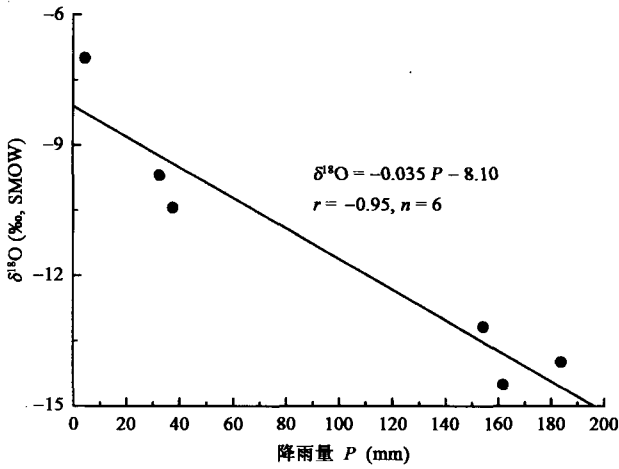


图 4 雨水氧同位素与降雨量关系图 (P 为降雨量)  
Fig. 4 Relationship between  $\delta^{18}\text{O}$  values of rainwater and the rainfall amount (P)

### 3.2 白水台钙华氧同位素分析结果与讨论

#### 3.2.1 白水台钙华氧同位素的季节变化规律

为了了解钙华沉积过程中氧同位素的季节变化规律，我们对白水台引水渠道中试片上沉积的钙华做定期的取样分析。

取样点分别是 W4、W6、W10 三个观测点，其他各观测点由于试块丢失，样品不全故不予以采用。取样时间分别是 2006 年 5 月 7 日、5 月 23 日、6 月 7 日、6 月 24 日、7 月 7 日、7 月 24 日、8 月 9 日、8 月 28 日、9 月 15 日、10 月 3 日、10 月 17 日、11 月 4 日、11 月 17 日、12 月 2 日、12 月 19 日、2007 年 1 月 10 日、2 月 6 日、2 月 24 日、3 月 20 日、4 月 6 日和 4 月 23 日。分析结果如图 5。

从图 5 中可以看出，白水台地区从 2006 年 5 月中旬进入雨季后，渠道各点的钙华氧同位素值均有一定程度的下降。且随着降雨的延续，钙华中的氧同位素值大体都呈现下降的趋势，直到 2006 年 7 月 24 日，出现了一个上升点，主要由引水渠道水源的改变造成的：2006 年 7 月 7 日以前，引水渠道的水是 S1-3 号泉和白水河的河水混合形成的，而 2006 年 7 月 7 日 S1-3 号泉处的引水渠道被洪水冲垮后，重新对 S1-3 号泉附近的引水渠道进行了整修，整修后引水渠道内的水只由 S1-3 号泉供给。而雨季过后随着降雨量的减少，引水渠道各点的钙华氧

同位素值则逐渐上升，显示钙华中氧同位素值与降雨量有着较好的相关性。对 W4、W6 和 W10 观测点进行钙华氧同位素值和钙华沉积期间的降雨量的相关性分析，如图 6、图 7 和图 8。由于 2006 年 7 月 7 日水源的改变，故此时间以前和以后的数据分别进行分析。由图 6、图 7 和图 8 中可见，在水源头未改变以前钙华氧同位素值和降雨量有着很好的线性负相关关系。这反映了钙华氧同位素值能够反映降雨量的变化，反映的是降雨量效应，这一发现为下一步利用古钙华的  $\delta^{18}\text{O}$  数据重建古降水量提供了基础。而 2006 年 7 月 7 日后由于水源头的改变以及旱季的来临造成氧同位素值与降雨量相关性并不高。这主要是 7 月 7 日前渠道水为 S1-3 号泉水和白水河的河水混合形成，河水在流动过程中接受的雨水和雨后坡面流都比 S1-3 号泉多，因而降水中的同位素组成对河水的同位素组成影响较大，因而对渠道水的同位素组成影响较大，反映出较强的降水量效应。而此后渠道水全由 S1-3 泉水补给，因而降雨量效应相对降低所致。图 6、图 7 和图 8 中 2006 年 7 月 7 日后钙华氧同位素与降雨量的线性斜率显著降低达 4~10 倍进一步说明了这一点。通过以上分析我们可以发现钙华中氧同位素的季节变化是春夏季(雨季)偏负，而秋冬(旱季)偏正。钙华氧同位素值的季节变化反映了降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的季节变化，进而反映的是降水云团不同源区的转换<sup>[13]</sup>。

从钙华氧同位素值演化的控制因素分析，钙华

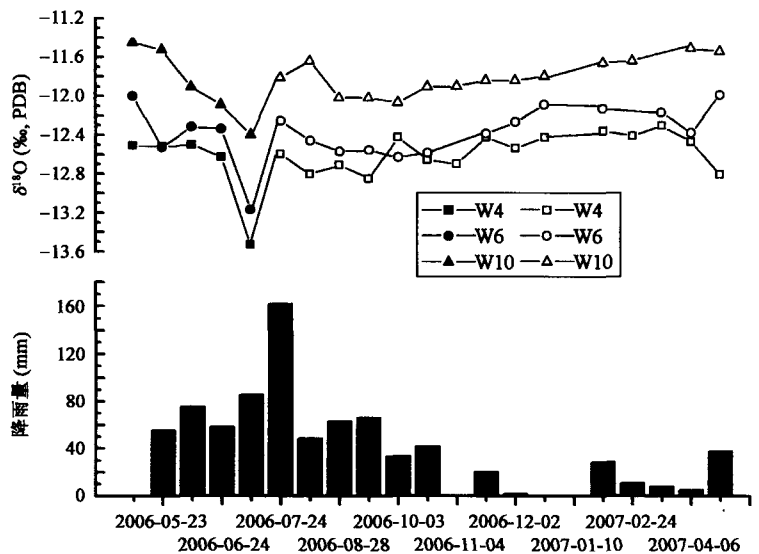


图 5 白水台渠道 W4、W6 和 W10 号点现代钙华氧同位素的时间变化图  
Fig. 5 Temporal variation in  $\delta^{18}\text{O}$  values of travertine at sampling sites W4, W6 and W10 of Baishuitai

空心点数据表示 2006 年 7 月 7 日后水源发生了改变，详见正文说明。

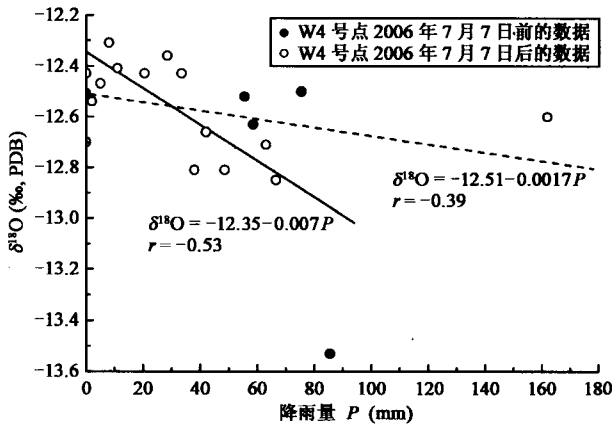


图6 W4号点钙华氧同位素与降雨量的线性关系图  
 Fig. 6 Relationship between  $\delta^{18}O$  values of travertine and rainfall amount ( $P$ ) at sampling site W4  
 $P$ 为降雨量,虚线为2006年7月7日后的数据。  
 The dashed line is the data after Jul 7, 2006.

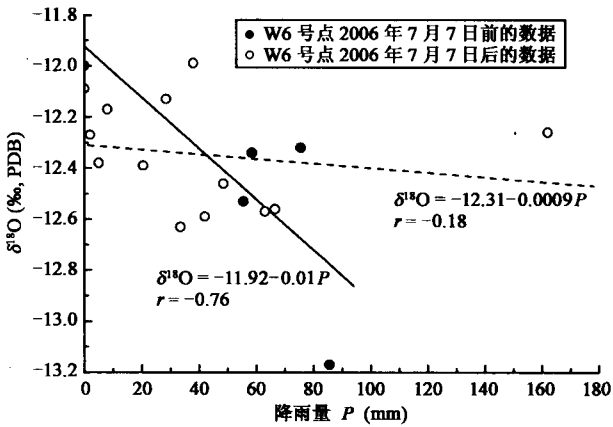


图7 W6号点钙华氧同位素与降雨量的线性关系图  
 Fig. 7 Relationship between  $\delta^{18}O$  values of travertine and rainfall amount ( $P$ ) at sampling site W6  
 $P$ 为降雨量,虚线为2006年7月7日后的数据。  
 The dashed line is the data after Jul 7, 2006.

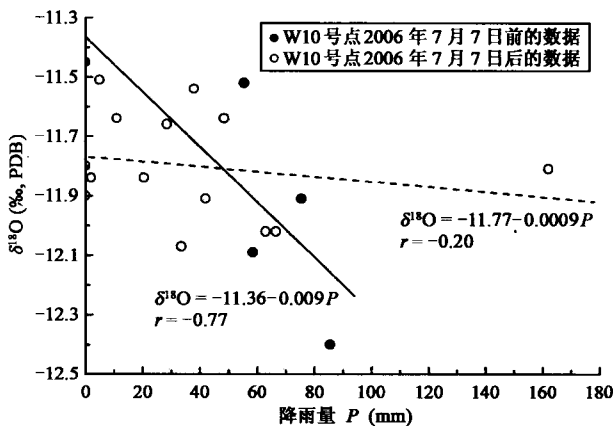


图8 W10号点钙华氧同位素与降雨量的线性关系图  
 Fig. 8 Relationship between  $\delta^{18}O$  values of travertine and rainfall amount ( $P$ ) at sampling site W10  
 $P$ 为降雨量,虚线为2006年7月7日后的数据。  
 The dashed line is the data after Jul 7, 2006.

$\delta^{18}O$  主要决定于两方面:一是水温对钙华  $\delta^{18}O$  的影响;二是雨量效应,降雨量越大,钙华的  $\delta^{18}O$  越负。以白水台渠道 W10 号点为例:其  $\delta^{18}O$  值最大变幅为  $-1.0\text{‰}$ 。5月白水台渠道水平均温度约为  $9.0\text{℃}$ ,7月约为  $11.0\text{℃}$ 。温度升高约  $2\text{℃}$ 。据 Kim *et al.* [16],若方解石沉积与水达到氧同位素交换平衡,则有:  $1000 \ln \alpha_{\text{方解石-水}} = 18.03(10^3 T^{-1}) - 32.42$  (其中  $1000 \ln \alpha_{\text{方解石-水}} \approx \delta^{18}O_{\text{方解石}} - \delta^{18}O_{\text{水}}$ )。根据这个方程估算,如果渠道5月份和7月份的钙华氧同位素变化幅度在  $1.2\text{‰}$ 左右,则渠道5月份和7月份的水温温差应该在  $5\text{℃}$ 左右,  $2\text{℃}$ 的水温变化造成的  $\delta^{18}O$  变化仅为  $0.4\text{‰}$ 左右。因此白水台钙华的  $\delta^{18}O$  季节变化影响因素主要是降雨量效应,水温的影响次之。

3.2.2 白水台钙华氧同位素的空间变化规律

为了了解钙华沉积过程中氧同位素的空间变化规律,我们对白水台引水渠道中试片上沉积的钙华从上游到下游的 W3~W10 号点取样进行分析,取样时间分别是2006年5月7日、2006年7月7日及2006年12月2日,其中2006年5月7日代表雨季刚开始的时间,2006年7月7日代表雨季,2006年12月2日则代表的是旱季。结果如图9所示。

从图9可见,钙华中氧同位素的空间变化规律是随着渠道水的向下游流动,氧同位素的数值总体呈现出上升的趋势,上升幅度在  $1.0\text{‰}$ 左右。分析其原因,首先必须从钙华氧同位素演化的控制因素开始。钙华中氧同位素演化经历两个阶段:第一阶段,大气降水中的氧同位素组分→土壤水氧同位素组分→岩溶水氧同位素组分。在这一系列过程中,  $\delta^{18}O$  的值与降雨量呈负相关关系,反映的是降雨量效应;

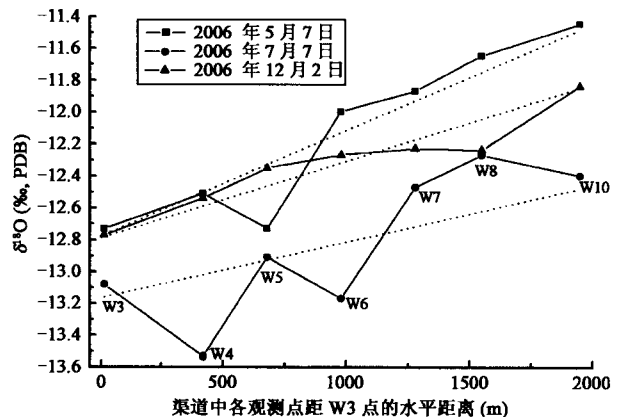


图9 不同季节白水台渠道钙华氧同位素的空间变化曲线图  
 Fig. 9 Spatial variation in  $\delta^{18}O$  values of travertine in different seasons in Baishuitai area

第二阶段从饱和岩溶水到钙华的形成。在这一阶段氧同位素可能经历两种演化方式: 一是平衡分馏条件下, 氧同位素在介质水和碳酸钙之间平衡分馏, 这时碳酸钙与水之间的氧同位素分馏系数仅决定于外界环境的温度。二是在非平衡条件下进行演化, 这样会引起氧同位素的动力分馏, 氧同位素在介质水和碳酸钙之间的分馏很复杂, 通常与钙华沉积速率和水的蒸发有关。碳酸钙沉积物的氧同位素主要来源于大气降水, 其氧同位素组成主要由大气降水氧同位素组成和钙华形成时外界温度决定<sup>[17]</sup>。从测试数据来看, 氧同位素的空间演化应该不是由于大气降水所造成, 因为各观测点的取样都是同一时段。可能的原因包括沉积的外界环境温度和二氧化碳逸出效应。根据上文估算, 如果渠道上游至下游的钙华氧同位素上升幅度在 1.0‰ 左右, 则渠道下游的温差应该比上游低 4℃ 左右, 但实际上除了 12 月渠道上下游之间的温度基本保持在 6.9℃ 左右变化不大外, 5 月和 7 月渠道的水温反而是下游比上游高 4℃ 左右(表 1), 因此, 在平衡分馏的条件下, 温度效应引起碳酸盐沉积物的  $\delta^{18}\text{O}$  是下降而不是上升。这说明温度不是渠道钙华氧同位素空间变化的控制因素。渠道是一个开放的系统, 在从上游到下游的过程中, 伴随着水中富含轻氧稳定同位素  $^{16}\text{O}$  的  $\text{H}_2\text{O}$  向大气中蒸发以及富含轻氧稳定同位素  $^{16}\text{O}$  的  $\text{CO}_2$  向大气逸出, 水及其沉积的钙华相对富集  $^{18}\text{O}$ , 结果是自泉向下游方向, 水和钙华的  $\delta^{18}\text{O}$  值普遍升高。引水渠道中上下游观测点水样的  $\delta^{18}\text{O}$  值升高进一步证明了水汽蒸发对  $\delta^{18}\text{O}$  的影响(表 2)。

此外, 从图 9 中可以看出, 雨季开始前的 2006 年 5 月 7 日取的钙华样的氧同位素值相对其他时间段样品的氧同位素值都偏高, 而雨季时的钙华样品中的氧同位素值最低, 且随距离变化的斜率最小(图 9 中的虚线)。造成这种现象的原因, 一方面是降雨

表 1 白水台引水渠道各观测点的水温  
Table 1 Water temperature of the sampling sites along the Baishuitai travertine-depositing canal

观测点号	时间	水温(℃)	时间	水温(℃)	时间	水温(℃)
W3	2006-05-06	8.4	2006-07-10	9.9	2006-12-01	6.8
W4	2006-05-06	9.5	2006-07-10	11.2	2006-12-01	7.1
W5	2006-05-06	10.1	2006-07-10	12.0	2006-12-01	7.0
W6	2006-05-06	10.7	2006-07-10	12.5	2006-12-01	6.9
W7	2006-05-06	11.1	2006-07-10	12.9	2006-12-01	6.8
W8	2006-05-06	11.7	2006-07-10	13.6	2006-12-01	6.9
W10	2006-05-06	12.1	2006-07-10	14.0	2006-12-01	6.8

对于钙华沉积  $\delta^{18}\text{O}$  的降雨量效应, 而另一方面可能是由于旱季渠道水量减少后(在雨季, 渠道的平均流量大约为 90 L/s, 而旱季只有大约 70 L/s), 渠道水蒸发水量和  $\text{CO}_2$  逸出量分别占渠道总水量和总溶解无机碳的比重加大, 从而导致水和钙华中  $^{18}\text{O}$  的相对富集。

表 2 白水台引水渠道 W3、W5 和 W10 观测点水的  $\delta^{18}\text{O}$  值  
Table 2  $\delta^{18}\text{O}$  values of water at sampling sites W3, W5 and W10 along the Baishuitai travertine-depositing canal

观测点号	时间	水样的 $\delta^{18}\text{O}$ (‰, SMOW)	时间	水样的 $\delta^{18}\text{O}$ (‰, SMOW)
W3	2006-06-23	-14.33	2006-11-03	-14.65
W5	2006-06-23	-14.13	2006-11-03	-14.61
W10	2006-06-23	-13.13	2006-11-03	-14.19

## 4 结 论

(1) 由全球大气降水线、地区降水线以及水样同位素的氘剩余值  $d$  的分析可知, 白水台地区的降雨水汽主要来源于受季风影响的海洋性水汽。

(2) 对降雨量和雨水中氧同位素的相关分析发现, 雨水氧同位素与降雨量有很好的线性负相关关系。

(3) 钙华氧同位素与降雨量有较好的线性负相关关系, 这为下一步利用钙华中的  $\delta^{18}\text{O}$  数据重建古降水量提供了基础。

(4) 水中富含轻氧稳定同位素  $^{16}\text{O}$  的  $\text{H}_2\text{O}$  向大气中蒸发以及富含轻氧稳定同位素  $^{16}\text{O}$  的  $\text{CO}_2$  向大气的释放, 是下游方向钙华  $\delta^{18}\text{O}$  增加的主要原因。

在开展本项研究工作中, 得到了云南天界神川旅游公司白水台风景区管理人员的大力支持和帮助; 在论文修改过程中, 审稿老师对论文的修改提出了宝贵的修改建议, 在此一并深表感谢。

## 参考文献(References):

- [1] Matsuoka J, Kano A, Oba T, Watanabe T, Sakai S, Seto K. Seasonal variation of stable isotopic compositions recorded in a laminated tufa, SW Japan[J]. Earth Planet Sci Lett, 2001, 192(1): 31-44.
- [2] Kano A, Matsuoka J, Kojo T, Fujii H. Origin of annual laminations in tufa deposits, southwest Japan[J]. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2003, 191(2):

- 243 - 262.
- [3] Kano A, Kawai T, Matsuoka J, Ihara T. High-resolution records of rainfall events from clay bands in tufa[J]. *Geology*, 2004, 32(9): 793 - 796.
- [4] Ihlenfeld C, Norman M D, Gagan M K, Drysdale R N, Maas R, Webb J. Climatic significance of seasonal trace element and stable isotope variations in a modern freshwater tufa[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67(13): 2341 - 2357.
- [5] 刘再华, 戴亚南, 林玉石. 水化学和钙华碳氧稳定同位素在古环境重建中的应用——以贵州荔波小七孔景区响水河为例[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(4): 447 - 454.  
Liu Zai-hua, Dai Ya-nan, Lin Yu-shi. Paleoenvironmental reconstruction based on hydrochemistry and tufa stable isotopes: Case study of Xiangshui river, Libo, Guizhou [J]. *Quatern Sci*, 2004, 24(4): 447 - 454 (in Chinese with English abstract).
- [6] O'Brien G R, Kaufman D S, Sharp W D, Atudorei V, Parnell R A, Crossey L J. Oxygen isotope composition of annually banded modern and mid-Holocene travertine and evidence of paleomonsoon floods, Grand Canyon, Arizona, USA[J]. *Quatern Res*, 2006, 65(3): 366 - 379.
- [7] 刘再华, 游省易, 李强, 张美良. 云南白水台钙华景区的水化学和碳氧同位素特征及其在古环境重建研究中的意义[J]. *第四纪研究*, 2002, 22(5): 459 - 467.  
Liu Zai-hua, You Sheng-yi, Li Qiang, Zhang Mei-liang. Hydrochemical and isotopic characteristics of tufa in the Baishuitai Scenic Area of Yunnan and their implications for paleoenvironment reconstruction [J]. *Quatern Sci*, 2002, 22(5): 459 - 467 (in Chinese with English abstract).
- [8] 刘再华, 袁道先, 何师意, 曹建华, 游省易, Dreybrodt W, Svensson U, Yoshimura K, Drysdale R. 四川黄龙沟景区钙华的起源和形成机理研究[J]. *地球化学*, 2003, 32(1): 1 - 10.  
Liu Zai-hua, Yuan Dao-xian, He Shi-yi, Cao Jian-hua, You Sheng-yi, Dreybrodt W, Svensson U, Yoshimura K, Drysdale R. Origin and forming mechanisms of travertine at Huanglong Ravine of Sichuan[J]. *Geochimica*, 2003, 32(1): 1 - 10 (in Chinese with English abstract).
- [9] 刘再华, 张美良, 游省易, 李强, 孙海龙, 汪进良, 吴孔运. 碳酸钙沉积溪流中地球化学指标的空间分布和日变化特征: 以云南白水台为例[J]. *地球化学*, 2004, 33(3): 269 - 278.  
Liu Zai-hua, Zhang Mei-liang, You Sheng-yi, Li Qiang, Sun Hai-long, Wang Jin-liang, Wu Kong-yun. Spatial and diurnal variations of geochemical indicators in a calcite-precipitating stream-Case study of Baishuitai, Yunnan [J]. *Geochimica*, 2004, 33(3): 269 - 278 (in Chinese with English abstract).
- [10] 刘再华, Yoshimura K, Inokura Y, Noto M, 曹云. 四川黄龙沟天然水中的深源 CO<sub>2</sub> 与大规模的钙华沉积 [J]. *地球与环境*, 2005, 33(2): 1 - 10.  
Liu Zai-hua, Yoshimura K, Inokura Y, Noto M, Cao Yun. Deep-source CO<sub>2</sub> in natural waters and its role in extensive tufa deposition in the Huanglong Ravines, Sichuan, China [J]. *Earth Environ*, 2005, 33(2): 1 - 10 (in Chinese with English abstract).
- [11] 刘再华, 李红春, 游镇烽, 万乃容, 孙海龙, 刘香玲. 云南白水台现代内生钙华微层的特征及其古气候重建意义[J]. *地球学报*, 2006, 27(5): 479 - 486.  
Liu Zai-hua, Li Hong-chun, You Zheng-feng, Wan Nai-rong, Sun Hai-long, Liu Xiang-ling. Thickness and stable isotopic characteristics of modern seasonal climate controlled sub-annual travertine laminae in a travertine-depositing stream at Baishuitai, SW China: Implications for paleoclimate reconstruction [J]. *Acta Geosci Sinica*, 2006, 27(5): 479 - 486 (in Chinese with English abstract).
- [12] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133(3465): 1702 - 1703.
- [13] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436 - 468.
- [14] 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.  
Wei Ke-qin, Lin Rui-fen. The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China[J]. *Geochimica*, 1994, 23(1): 33 - 41 (in Chinese with English abstract).
- [15] 章新平, 孙维贞, 刘晶森. 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.  
Zhang Xin-ping, Sun Wei-zhen, Liu Jing-miao. Stable isotopes in precipitation in the vapor transport path in Kunming of southwest China [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2005, 14(5): 665 - 669 (in Chinese with English abstract).
- [16] Kim Sang-Tae, O'Neil J R. Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61(16): 3461 - 3475.
- [17] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1 - 316.  
Zheng Yong-fei, Chen Jiang-feng. *Stable Isotope Geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 2000: 1 - 316 (in Chinese).