

黄龙内生钙华沉积速率对气候的指示意义

王海静^{1,2,*}, 巴明廷¹, 丁晋利¹

(1. 郑州师范学院 地理与旅游学院, 河南 郑州 450044;
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)

摘要: 通过研究黄龙钙华滩流处的沉积速率和气候要素之间的关系, 发现钙华沉积速率对气候重建的指示意义, 为利用黄龙古钙华重建当地的古气候奠定了理论依据。通过现场采集水样和钙华样品, 进行水化学分析, 并进行沉积速率的监测, 研究黄龙内生钙华的沉积速率在时间上的变化及其主要控制机理, 找出影响钙华沉积的主要因素, 发现在雨季沉积速率具有显著的降水量效应, 即在雨季降水较多的时间钙华的沉积速率受地表水和雨后坡面流的稀释作用也降低, 旱季钙华的沉积速率主要受水温的影响。钙华沉积速率的季节变化与气候(降雨、水温)有很好的线性关系: 雨季时以降水量控制为主, 旱季时以水温控制为主。

关键词: 钙华; 沉积速率; 气候; 黄龙

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 1673-2464(2014)05-0090-05

INDICATION OF HUANGLONG'S ENDOGENOUS TRAVERTINE DEPOSITION RATE TO CLIMATE

WANG Hai-jing^{1,2,*}, BA Ming-ting¹, DING Jin-li¹

(1. School of Geography and Tourism, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, China;
2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China)

Abstract: This paper discusses the indication of travertine deposition rate to climate through an investigation on Huanglong's travertine shoal, which provides a theoretical basis for reconstructing Huanglong's ancient climate by using its ancient travertine. Based on water and travertine samples and deposition rate, this paper studies the deposition rate changes over time and its mechanism. The major factors for travertine deposition rate is largely controlled by waterfall, also influenced by groundwater and slope. During dry season, it is controlled by water temperature. A linear relation is shown between seasonal changes of travertine deposition rate and climate (waterfall and water temperature) that waterfall prevails during rainy season and water temperature during dry season.

Key words: travertine; deposition rate; climate; Huanglong

0 引言

钙华由于其对气候和环境的敏感性, 加上较快

的沉积速率, 因而适合高分辨率和短时间尺度的古气候环境重建。要想利用钙华进行古气候环境重建, 对钙华沉积速率的研究也是其中必不可少的一项内容。目前对钙华沉积速率的研究流行的两个主

收稿日期: 2014-03-14; 修订日期: 2014-07-08; 责任编辑: 段丽萍。

基金项目: 郑州师范学院课题(2012062); 国家自然科学基金项目(40872168)。

* 通讯作者: 王海静(E-mail: whj0707@sina.com)

引用格式: 王海静, 巴明廷, 丁晋利. 黄龙内生钙华沉积速率对气候的指示意义 [J]. 资源与产业, 2014, 16(5): 90-94
Wang Haijing, Ba Mingting, Ding Jinli. Indication of Huanglong's endogenous travertine deposition rate to climate [J].
Resources & Industries, 2014, 16(5): 90-94

要预报模型^[1]是：1) Plummer、Wigley、Parkhurstff 等得出的 PWP 模型（表面反应控制模型）未考虑扩散边界层内溶质传输对速率的控制，因而无法解释野外监测到的边石坝上与水池内沉积速率的巨大差异；2) 扩散边界层（diffusion boundary layer, DBL）模型除了考虑水动力条件对方解石溶解和沉积速率的影响外，还考虑了溶液中 CO₂ 慢速转换的控制（扩散边界层的影响），这是 PWP 模型无法实现的，因此，DBL 模型是目前较为理想的研究流动系统中方解石沉积的动力学模型。在考虑扩散边界层的情况下，方解石沉积速率的影响因素^[2]主要有：1) 水动力效应。水动力效应对方解石的沉积速率具有显著的控制作用，其他条件相同时，流速越快，越有利于方解石的沉积，反之亦然。因为快速流时固液界面间扩散边界层较薄，阻力较小，沉积表面的 H⁺ 浓度较低，进而方解石沉积越快。这可从机理上揭示黄龙沟景区形态各异的钙华成因，即边石坝和瀑华形成于地形初始状态为凸起或陡坎处，这里流速较快，边界层较薄，沉积速率较大，滩华形成时，原始地形既无明显凸起，也无陡坎，但有一定坡度并较开阔。2) 溶液方解石饱和度的影响。钙华的沉积速率不仅取决于与水动力条件有关的扩散边界层厚度，而且与方解石饱和指数有关，即方解石饱和指数较低不利于方解石的沉积。此外方解石沉积在 $SIc < 1.0$ （方解石饱和指数小于 1.0）时受到阻滞^[1]。3) 温度对方解石沉积速率的控制。其他条件相同的情况下，我国南方方解石沉积速率是北方的 2 倍左右，温度对钙华或洞穴石笋沉积速率的显著控制，李红春等^[3]和袁道先等^[4]分别对北京和桂林石笋的研究已证明了这一点。4) 水层厚度对沉积速率的影响。该控制作用主要发生在扩散边界层厚度较小或流速较快、温度和 CO₂ 分压较低的情况下。在同一个地点不同季节钙华沉积速率主要的影响因素是温度的变化影响，降水在时间上的差异则通过影响水中的方解石饱和度进而影响钙华的沉积速率。

前人对黄龙钙华沉积速率的研究表明：研究区现代钙华的沉积仍以相对比较高的速率在进行。胥良等^[5]通过钙均衡估算出黄龙钙华在整个现代堆积区内的平均沉积速率为 2.51 mm/a。刘再华等^[6]通过大理石岩片实验得出的沉积速率为 0.43 ~ 4.7 mm/a。陈先等^[7]通过同位素研究得出的沉积速率

为 0.4 ~ 5 mm/a。卢国平等^[8]从 ¹⁴C 年龄推算钙华沉积速率为 0.482 ± 0.03 mm/a。根据五彩池中修建于 1620 年的石塔至 1986 年被钙华掩埋 1.8 ~ 2.0 m 计算，该区钙华的堆积速度为 4.92 ~ 5.46 mm/a。整体上来看，黄龙的钙华沉积速率较快，但是由于气候的影响，在不同的季节出露地表的钙华沉积速率是有差异的，而造成这些差异的主要影响因素也可能是不同的，但是相关的研究在黄龙地区仍比较缺乏。通过对黄龙沟地表钙华沉积速率与气候环境之间关系的研究，进而可以了解已形成的古钙华沉积速率对古气候环境的指示意义。

1 研究区概况

黄龙国家级风景区地处 102°38'E—104°15'E，32°05'N—33°09'N，位于四川省西北部阿坝藏族羌族自治州松潘县境内，青藏高原东缘岷山主峰雪宝鼎东北侧，属高山峡谷区，是青藏高原东部边缘向四川盆地的过渡地带。黄龙主景区黄龙沟全长 3.5 km，南起望乡台（3 658 m），北至涪江河谷（3 080 m），两侧山坡是葱茏苍翠的落叶阔叶林和针叶林带，沟中谷底是金黄蜿蜒的钙华滩流，连接着 3 400 多个千姿百态、色彩斑斓、错落有致的钙华彩池、钙华瀑布，素来享有“胜地仙境，人间瑶池”之美誉。气候上处于北亚热带湿润区与青藏高原—川西北湿润区界边缘。该区属于典型的高原温带—亚寒带季风气候，冬季漫长，年平均气温只有 1.1 °C，昼夜温差大，冬寒夏凉，降雨量 760 mm/a 左右，且集中在 5—9 月份，约占全年降水量的 70%。其余时间多为降雪，春涸夏盈，季节性强^[9]。在遍布全沟的钙华滩流中，我们选取其中位于黄龙沟内第一循环段处^[9]的钙华滩流实验点作为本研究的代表，该点海拔高度约为 3 500 m，主要由泉水和地表水混合补给，和钙华彩池中的水流相比，此处水深较浅，流速快，离补给水源近，水中营养物质含量少，研究点处水中和沉积的钙华上均少见水藻的存在，这和彩池是有明显不同的。除了保护区严格防止污染的各种措施外，水流的快速流动加速了水的循环过程，极大地减弱了游客的旅游活动对此处的影响。由于水流在流动过程中受外界的影响相对较小，选取此处的钙华滩流点研究沉积速率的变化过程对气候的指示意义将具有很好的代

表性。

2 研究方法

为了解黄龙钙华沉积速率在时间上的具体变化,在观测点处放置有机玻璃试片,试片大小为 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ (平均面积大约为 60 cm^2),试片采集日期间隔约为每10 d左右。取出样品后,对钙华沉积试片进行称重,从试片质量的增加,计算钙华的沉积速率。有机玻璃试片在放进水中之前和从水中取出之后,要在恒温 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干24 h,然后称重,以减少水汽对同位素的影响。沉积速率的计算公式为

$$R = (W_h - W_q) / A * T, \quad (1)$$

式中: R 为沉积速率; W_h 和 W_q 分别为每次实验后、前的钙华沉积试片的重量; A 为有机玻璃试片的总表面积; T 为每次沉积实验的时间(10 d左右)。

3 结果与分析

3.1 钙华沉积速率的季节变化

对钙华点的沉积速率与沉积期间的降水量、水温、钙离子浓度和方解石饱和指数、二氧化碳分压等的关系作图。从图1可以看出,在暖湿的雨季,该点钙华沉积速率明显受降水量的控制:当降水量增大时,钙华沉积速率降低;而降水量降低时,钙华沉积速率升高,钙华沉积速率的降低与雨水的稀释造成水中钙离子浓度和方解石饱和指数降低有关。但从图1中也发现,沉积速率的降低有时滞后于降雨(如8月20日),因为沉积速率的结果是采用钙华沉积的一段时期内的平均值,因此可能会出现略微滞后于降水的情况。在旱季(10月份以后),该点钙华沉积速率受水温控制:当水温降低时,钙华沉积速率降低;当水温升高时,钙华沉积速率升高。温度从两个方面控制钙华的沉积速率:1) 温度控制钙华沉积速率的沉积速率常数^[10],比如,假设扩散边界层厚度为 0.01 cm ,水深为 10 cm ,二氧化碳分压为 1000 ppmv ,方解石沉积速率的沉积速率常数在水温为 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 时为 2.15 cm/s ,在 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 时则升高到 3.28 cm/s ^[10];2) 温度还控制水中二氧化碳的逸出,一般认为,水温越高,二氧化碳的逸出速率越快,方解石的沉积速率也越快。

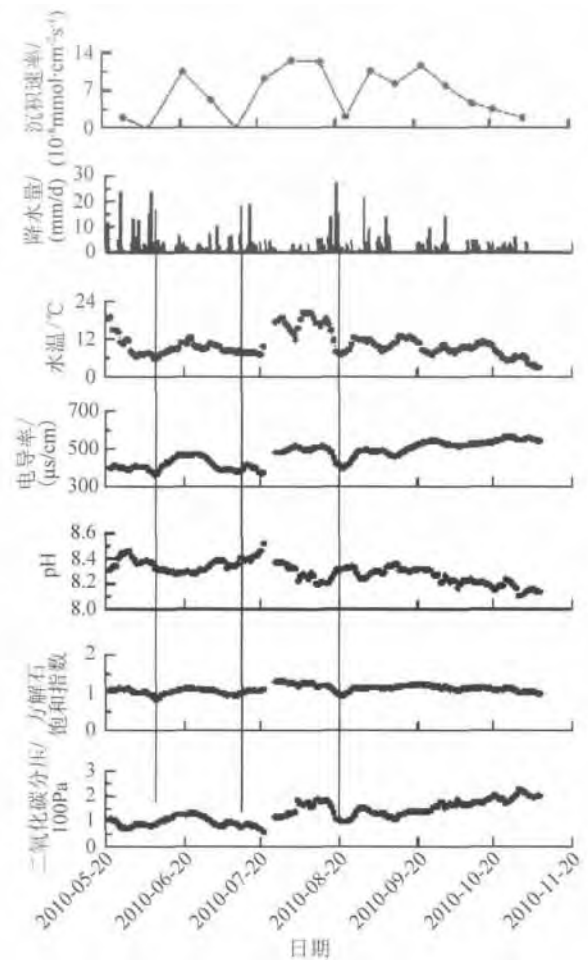


图1 钙华沉积速率的时间变化及与降水量、水温和 $[\text{Ca}^{2+}]$ 和 S_{C} 的关系

3.2 降水量及水温对钙华沉积速率的控制

碳酸钙沉积的基本条件是水溶液中具有较高的钙离子浓度和重碳酸根离子浓度,达到过饱和且水溶液处于流动条件下^[10]。但是另一方面,降水量和水温也可以通过影响钙华沉积过程中多种物理化学过程(如水中离子浓度和二氧化碳逸出的快慢)来影响钙华的沉积速率。为了更好地研究降水量和水温对钙华沉积速率的影响,以该点为例,对钙华沉积速率与降水量和水温的关系进行分析。

从图2可以看出,钙华沉积速率与降水量之间在雨季时具有明显的负相关关系。但是在10月份以后的旱季,钙华沉积速率则与降水量呈正相关,此时水温降至冰点,出现结冰现象,水量大大减少不利于钙华沉积,而降水增加,可以使水的流速加快,减小扩散边界层厚度,促进钙华沉积。

从图3可以看出,旱季时的钙华沉积速率与水温具有明显的正相关关系,雨季时的沉积速率和水

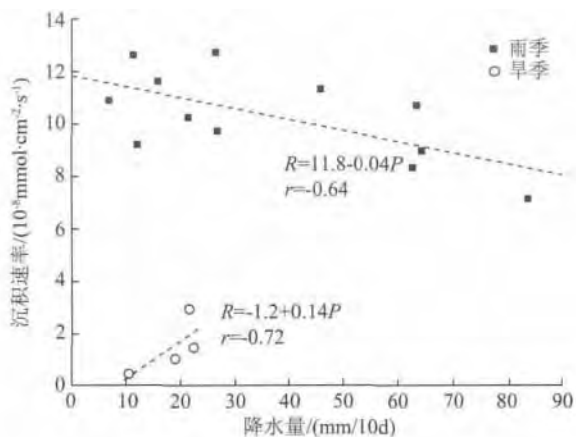


图 2 钙华沉积速率与同期降水量的关系

温的相关性较弱 (相关系数 = 0.40。KMO 取值 0.5, 说明可以进行因子分析)。这应该是雨季时的稀释效应部分抵消温度效应有关 (图 2 中雨季钙华沉积速率与降水的相关性高于图 3 中雨季沉积速率与水温的相关性)。旱季时沉积速率明显低于雨季, 因为此时较低的水温和流速使得二氧化碳的脱气作用大大减小, 钙华的沉积速率出现显著降低的特点。旱季时钙华沉积速率和水温的正相关关系较好, 从图 3 可以看出, 当旱季水温小于 11℃ 时, 钙华的沉积速率明显受温度的控制, 水温升高, 融化的雪水量增加, 流速增大使得扩散边界层相对变薄可以促进钙华的沉积。图 3 中旱季钙华沉积速率与水温的相关性也高于图 2 中旱季沉积速率与降水量的相关性, 进一步说明了旱季钙华的沉积速率主要影响因素为温度。

由于钙华沉积速率的影响因素较多, 在比较不同类型和同一类型不同地点的钙华沉积速率时, 主要了解沉积速率的快慢在季节变化上的异同及其控制机理的差异。此外, 研究区沉积的古钙华剖面中可看到钙华的厚度可达到数十米, 所以当前所研究的次生沉积物很少直接与下伏岩层接触。泉水和地表水混合以后在特定的环境中形成的钙华的沉积速率更多地受到外界环境的影响。黄龙钙华沉积速率的时间变化与日本学者 Kano 等^[11]发现的日本表生钙华系统中钙华沉积速率的季节变化不同。他们的研究发现, 由于地下水系统 CO₂ 浓度的季节变化造成水中溶解的碳酸钙浓度夏秋季高, 而冬春季低, 从而导致钙华沉积速率是夏秋季高而冬春季低。而黄龙钙华属于内生钙华, 其起源的 CO₂ 主要来自深部地热系统, 包括深部碳酸盐岩变质作用产

生的 CO₂ 和幔源 CO₂^[12]。由于内生钙华系统中游离 CO₂ 浓度以及钙离子和重碳酸根离子的浓度要远远高于表生钙华, 因此, 内生钙华沉积速率的季节变化及其控制因素与表生钙华存在显著差异。雨季由雨水控制的稀释效应^[13]和旱季时温度的影响是黄龙内生钙华沉积速率季节变化的主要控制因素。黄龙与云南白水台内生钙华的沉积速率的季节变化特征也是有差异的, 由于白水台钙华形成的地表水流较为单一——由白水河和源头泉水混合补给为主, 地表水主要受降水的稀释作用为主, 所以导致钙华沉积速率的季节变化主要反映了降水的稀释作用^[14]。

由于内生钙华沉积速率季节变化的控制因素^[15] (稀释效应和温度效应) 与表生钙华系统中钙华沉积速率季节变化的控制因素 (温度效应和 CO₂ 效应) 不同, 因此在利用钙华进行古气候和古环境重建时, 必须首先要明确所研究钙华的类型^[16], 并需注意具体地区不同气候环境条件的影响差异^[17]。

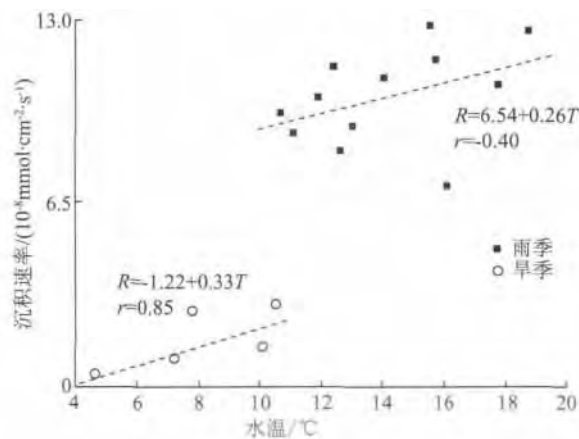


图 3 钙华沉积速率与同期平均水温的关系

4 结论

黄龙内生钙华的沉积速率在雨季具有显著的降水量效应, 即在雨季降水较多的时间钙华的沉积速率受地表水和雨后坡面流的稀释作用也降低, 旱季钙华的沉积速率主要受水温的影响。钙华沉积速率的季节变化与气候 (降雨、水温) 有很好的线性关系。雨季时以降水量控制为主, 旱季时水温控制为主。该发现为利用黄龙古钙华重建当地的古气候奠定了基础。

参考文献

- [1] 刘再华,袁道先,何师意,等. 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
- [2] 刘再华, Dreybrodt W. 方解石沉积速率控制的物理化学机制及其古环境重建意义[J]. 中国岩溶, 2002, 21(4): 252-257
- [3] 李红春, 顾德隆, Stott L D, 等. 高分辨率洞穴石笋稳定同位素应用之一: 京津地区 500a 来的气候变化[J]. 中国科学: D 辑, 1998, 28(2): 181-186
- [4] 袁道先, 覃嘉铭, 林玉石, 等. 桂林 20 万年石笋高分辨率古环境重建[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 1999
- [5] 胥良, 姜泽凡. 基于钙同位素估算黄龙钙华沉积速率的探讨[J]. 中国岩溶, 2007, 26(2): 132-136
- [6] 刘再华, 袁道先, Dreybrodt W, 等. 四川黄龙钙华的形成[J]. 中国岩溶, 1993, 12(3): 185-191
- [7] 陈先, 朱学稳, 周绪纶. 黄龙风景区岩溶水及泉华沉积的同位素研究[J]. 中国岩溶, 1988, 7(3): 209-212
- [8] 卢国平, 李行健. 四川黄龙自然风景区冷水型钙华地表堆积地貌研究[J]. 成都地质学院学报, 1992, 19(4): 55-64
- [9] 王海静, 张金流, 刘再华, 等. 基于水化学和同位素特征的四川黄龙沟泉群分类研究[J]. 地球学报, 2011, 32(3): 367-372
- [10] 刘再华, 袁道先, 何师意. 不同岩溶动力系统的碳稳定同位素和地球化学特征及意义: 以我国几个典型岩溶地区为例[J]. 地质学报, 1997, 71(3): 281-288
- [11] Kano A, Matsuoka J, Kojo T, et al. Origin of annual laminations in Tufa deposits, southwest Japan [J]. Palaeogeogr, Palaeoclimatol, Palaeoecol, 2003, 191(2): 243-262
- [12] 刘再华, Yoshimura K, Inokura Y, 等. 四川黄龙沟天然水中的深源 CO₂ 与大规模的钙华沉积[J]. 地球与环境, 2005, 33(2): 1-10
- [13] 王海静, 张金流, 刘再华. 四川黄龙降水氢、氧同位素对气候变化的指示意义[J]. 中国岩溶, 2012, 31(3): 253-258
- [14] Sun Hailong, Liu Zaihua. Wet-dry seasonal and spatial variations in the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of the modern endogenic travertine at Baishuitai, Yunnan, SW China and their paleoclimatic and paleoenvironmental implications [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74(3): 1016-1029
- [15] Zhang Jinliu, Wang Haijing, Liu Zaihua, et al. Spatial-temporal variations of travertine deposition rates and their controlling factors in Huanglong ravine, China - a world's heritage site [J]. Applied Geochemistry, 2012, 27(1): 211-222
- [16] Wang Haijing, Yan Hao, Liu Zaihua. Contrasts in variations of the carbon and oxygen isotopic composition of travertines formed in pools and a ramp stream at Huanglong ravine, China: implications for paleoclimatic interpretations [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, 125: 34-48
- [17] Le Thi Thuy Van. 东亚气候变化与可持续发展: 影响与政策挑战[J]. 资源与产业, 2012, 14(6): 25-30

《资源与产业》投稿方式

1) 来稿欢迎使用网上在线投稿系统 <http://www.resourcesindustries.net.cn>, 也可以发电子邮件至 zycy@cugb.edu.cn

2) 编辑部邮寄地址

收件人: 《资源与产业》编辑部

收件人单位: 中国地质大学(北京)

收件人地址: 北京市海淀区学院路 29 号

邮政编码: 100083

联系电话: 010-82322841, 82335048