

刘海生,周训,张彧齐,等. 温泉钙华沉积的影响因素[J]. 中国岩溶, 2020, 39(1): 11-16.  
DOI: 10. 11932/karst20200101

## 温泉钙华沉积的影响因素

刘海生<sup>1</sup>, 周训<sup>1,2</sup>, 张彧齐<sup>1</sup>, 海阔<sup>1</sup>, 余鸣潇<sup>1</sup>, 谭梦如<sup>1</sup>, 尚子琦<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)地下水循环与环境演化教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 钙华是在泉水、河水、湖水、洞穴周围沉积的非海相碳酸钙沉积物。钙华是陆地水循环过程中物质迁移的一种表现形式, 研究钙华的形成有助于了解局部水文循环中的物质迁移规律并间接了解古气候与古水文地质条件。部分温泉的泉口附近沉积有形态多样的钙华。本文综述温泉钙华的形成过程、钙华沉积的主要影响因素和它们之间的相互影响关系。水化学条件是钙华沉积的物质基础和必要条件, 水动力条件是钙华沉积的充分条件, 生物效应对钙华沉积起到加强的作用, 沉积环境通过影响水化学条件或水动力条件间接控制钙华的沉积。

**关键词:** 温泉; 钙华; 水化学; 水动力; 生物效应; 沉积环境

中图分类号: P314.1 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2020)01-0011-06 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### 0 引言

钙华在广义范围内是指在泉水、河水、湖水或者洞穴周围沉积的非海相碳酸钙沉积物<sup>[1-2]</sup>。研究钙华的形成有助于了解局部水文循环中的物质迁移规律和间接了解古气候与古水文地质条件, 特别是第四纪气候及水文地质特征<sup>[3-4]</sup>。钙华在全世界都有分布<sup>[5]</sup>, 但并不是所有的温泉都能形成钙华, 实际上大多数温泉不沉积钙华, 沉积钙华的温泉只占少数<sup>[6]</sup>。碳酸钙沉积物中文专业词汇多用“钙华”表示, 英文专业名词一般用“Tufa”和“Travertine”。Viles<sup>[1]</sup>根据大量文献资料, 对最近一百年来世界各国关于钙华等碳酸盐沉积的研究成果进行了对比研究, 认为“tufa”与“travertine”在一般情况下是可以混用的, 总结前人对钙华的分类标准, 主要包括生物、地形条件和岩石学等分类标准。另外根据形成钙华的水温不同, Ford<sup>[4]</sup>将其分为常温沉积钙华(Tufa)和热水沉积钙华(Travertine)。他认为“Tufa”是形成于冷水环境

的碳酸钙沉积物, 含有微生物、大型植物和无脊椎动物等; “Travertine”是形成于热水系统的碳酸钙沉积物, 规模一般较小, 微型形态丰富。钙华在全世界是零星分布的, Pentecost<sup>[5]</sup>根据大量文献资料, 对欧洲和亚洲部分地区的钙华进行分类。依据形态、成因和环境等因素将泉水钙华分为4类: 钙华丘、钙华脊、钙华瀑布和边石坝, 并且认为钙华的形成受到物理、化学和生物因素共同控制。另外, Pentecost和Zhang<sup>[7]</sup>通过野外踏勘和资料收集, 绘制了中国钙华分布图, 在广西、贵州、云南、四川和西藏均有大量钙华沉积。2005年Pentecost<sup>[2]</sup>对全球钙华的研究目的与意义及研究方向进行了总结, 涉及钙华的形成条件, 起源和矿物组成等方面。

温泉钙华是由含有一定量Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和游离二氧化碳的热水出露地表后, 由于压力降低, 二氧化碳气体大量逸出, 导致碳酸钙在泉口附近过饱和沉淀而成<sup>[6]</sup>。本文主要阐述影响热水钙华沉积的因素, 归结为4个方面: 水化学条件、水动力条件、生物效应和

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572223)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2652016098, 2652015426)

第一作者简介: 刘海生(1992-), 男, 博士研究生, 主要从事水文地质学专业的研究。E-mail: 18810548943@163.com。

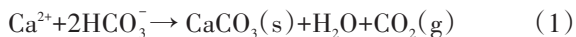
通信作者: 周训(1963-), 男, 教授, 主要从事地下热水(温泉)、海岸带地下水、地下卤水(盐泉)等的研究。E-mail: zhouxun@cugb.edu.cn。

收稿日期: 2019-06-19

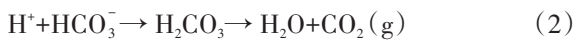
沉积环境,并总结温泉钙华成因的研究方法和发展趋势。

## 1 水化学条件

温泉的水化学条件是控制温泉钙华沉积的必要条件,它是钙华沉积的内因和物质基础<sup>[6]</sup>。在相似的地质背景和气候条件下,泉水达到了一定的水化学条件,才可能产生钙华。地球表面的CaCO<sub>3</sub>沉积一般用以下的总反应式描述:



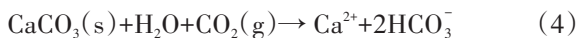
在这个反应中,当CO<sub>2</sub>被生物或者非生物消耗时,CaCO<sub>3</sub>并不会立即沉积。另外,溶液中CO<sub>2</sub>损失可以用如下反应式表示:



随后溶液中CaCO<sub>3</sub>逐渐过饱和,最终使CaCO<sub>3</sub>发生结核沉积<sup>[8]</sup>:



Andreo等<sup>[3]</sup>认为钙华的沉积可能会受到同离子效应的影响,同离子效应是指水中会溶解不同种类的矿物质,当方解石饱和时,白云石等矿物并不一定饱和而会继续溶解,这样就有可能水中钙离子会过饱和而导致方解石沉积。Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度对温泉钙华沉积具有重要的作用,高浓度的Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>有利于温泉钙华的形成。Fouke等<sup>[9]</sup>和Veysey等<sup>[10]</sup>相继指出在美国黄石公园沉积钙华的泉水中,Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量都比较高,这说明钙华在形成过程中,Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度对于钙华的沉积有较大的影响作用。另外,在相似的环境中,水温接近的情况下,碳酸钙的沉积速率主要是受Ca<sup>2+</sup>和碱度控制的,当Ca<sup>2+</sup>浓度低于65 mg·L<sup>-1</sup>时,碳酸钙的沉积速率极低<sup>[11]</sup>。沉积钙华的泉水一般出露于碳酸盐岩地层,CO<sub>2</sub>溶于地下水,使得水pH值降低,从而溶蚀周围碳酸盐岩:



当泉水流出地表时,随着CO<sub>2</sub>的释放,碳酸钙沉积<sup>[12]</sup>[反应式(1)]。

另外,矿物饱和指数对于矿物的沉积、溶解均具有重要的指示意义。方解石饱和指数在一定程度上可以指示钙华沉积,钙华沉积主要取决于Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度,并且溶液中方解石矿物一定要过饱和<sup>[13]</sup>。方解石饱和指数(SIc)是离子活度积(IAP)与溶解平衡常数(Kc)比值的对数,表达式为:

$$\text{SIc} = \log(\text{IAP} / \text{Kc}) \quad (5)$$

当SIc>0时,表示方解石饱和,有沉积的趋势;SIc

<0时,表示方解石未饱和;SIc=0时,表示方解石处于均衡状态<sup>[14]</sup>。Lorah等<sup>[15]</sup>对美国弗吉尼亚州Falling泉进行了水化学研究,根据水样中Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量,利用WATEQF软件计算得出泉水中二氧化碳分压(pCO<sub>2</sub>)和方解石饱和指数(SIc),并且发现当方解石过饱和时并不会立即沉淀,而是当SIc>1时,钙华才会大量沉积。Dilsiz等<sup>[16]</sup>在不同时间段,对沉积钙华的土耳其Pamukkale温泉3个泉眼进行取样(编号为Pm1、Pm2、Pm3),通过野外实测和实验室检测得知Pm1、Pm2、Pm3水样pH值变化范围为6~7,水化学类型为HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca型,pCO<sub>2</sub>值变化范围在0.12~1.16 atm,远远高于大气中pCO<sub>2</sub>值(pCO<sub>2</sub>=0.0003 atm),SIc为0.2~0.4,Ca<sup>2+</sup>与HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量的毫克当量比值位于1.0~1.5。沉积钙华的温泉都含有较高浓度的CO<sub>2</sub>和较高的pCO<sub>2</sub>,在其出露地表时二氧化碳迅速向大气中释放,CaCO<sub>3</sub>逐渐过饱和,有助于钙华的形成<sup>[17-18]</sup>。在土耳其Jandarma温泉的水化学分析中发现,Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度成正相关关系,而且其当量比值在1~1.5之间<sup>[19]</sup>。Wang等<sup>[20]</sup>通过对云南炼场坪温泉钙华的研究,发现沿着钙华斜坡温泉水流动方向,钙华沉积水中Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和CO<sub>2</sub>含量逐渐降低,pH值逐渐变大,并且源水处当Ca<sup>2+</sup>与HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量的毫克当量比值接近且变化不大时,容易沉积钙华,其源水水化学类型为HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Na·Ca型。Liu等<sup>[21]</sup>在对云南鸡飞温泉和其他一些温泉水样的测试结果,发现沉积钙华的温泉pH值一般接近于7,为中性,水化学类型为HCO<sub>3</sub>-Ca·Na型。

CO<sub>2</sub>作为水化学条件中最为敏感的因素,对CaCO<sub>3</sub>的沉积过程起着重要的控制作用。地下水中CO<sub>2</sub>来源比较复杂,但主要来源于土壤。有机质残骸的发酵作用与植物的呼吸作用均产生CO<sub>2</sub>,并溶入流经的地下水中。此外,还有深部火山和变质来源,含碳酸盐类的岩石在地壳深部高温下变质也可以生成CO<sub>2</sub><sup>[22]</sup>。

由此可见,满足钙华沉积的水化学条件为泉水中必须含有一定量的Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和CO<sub>2</sub>,Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量的毫克当量比值大于1,并且pCO<sub>2</sub>要远远高于大气压,水化学类型主要为HCO<sub>3</sub>-Ca型,pH值接近于7,以及SIc>0等。

## 2 水动力条件

当泉水满足一定的水化学条件时,是否沉积钙华还取决于水动力条件。因为水动力条件影响着CO<sub>2</sub>的逸出速度,CO<sub>2</sub>的逸出速度决定着CaCO<sub>3</sub>的沉积速率。有利于CO<sub>2</sub>逸出的水动力条件是形成钙华的

充分条件<sup>[6]</sup>。

Dreybrodt<sup>[23]</sup>提出“薄膜水理论”,当水流变薄或者开阔时,CO<sub>2</sub>的逸出速度会提高,CaCO<sub>3</sub>沉积会加快。在相同的沉积环境下,CaCO<sub>3</sub>沉积过程的快慢受溶液的水-气交界面和水深度控制,水气交界面越大,水深越浅,越有利于CO<sub>2</sub>的逸出,从而可能加快CaCO<sub>3</sub>沉积<sup>[24]</sup>。另外,薄膜水理论可以较好地解释边石坝的形成,当水体排出后,自然散开,形成薄水,CO<sub>2</sub>的加快逸出导致CaCO<sub>3</sub>的沉积,水的散开导致动能减少,这时泥砂和析出的碳酸钙晶体混合物将沉积在地面。在水退去后,因受水波影响,它们呈一定的弧形排列,很类似于留在海岸上的沙波,只是这种沉积起伏很小。水退去后,这些具起伏变化的沉积物被胶结起来,便成为最原始的雏坝,随着雏坝生长,由慢到快地形成了边石坝水池<sup>[25]</sup>。刘再华等<sup>[26-28]</sup>应用薄膜理论解释四川黄龙钙华的成因,认为黄龙钙华的形成受水动力影响较大。因为在相同水化学组分的情况下,实验室钙华的沉积速率低于四川黄龙钙华形成的速率。但是,笔者认为薄膜水理论一般适用于水流速较慢的条件,尚不能很好地解释高速水流形成的钙华。

由于运动的水带动CO<sub>2</sub>和溶质一起运动,这种运动的速度大于溶质本身的扩散速度,水的运动也会减薄界面层厚度,因此在水流流速较快的水动力条件下,可以加快CO<sub>2</sub>向空气中扩散和CaCO<sub>3</sub>在固体表面的沉积<sup>[29]</sup>。张英骏等<sup>[30]</sup>提出“气泡效应”,认为水流速的增加导致内部压力相应地减小,当内部压力减小到一定程度后,水中会出现低压气泡,大量的气泡促使河水释放CO<sub>2</sub>,高速水流的物理化学环境使得河水沉积CaCO<sub>3</sub>。祝安<sup>[31]</sup>通过野外观察发现CaCO<sub>3</sub>沉积多发生在急流或浅滩处,提出“掺气效应”,认为急流的水中带入空气,增加水-气接触面积,CO<sub>2</sub>大量逸出,导致CaCO<sub>3</sub>大量沉积。这两种理论都是基于高速水流,但是产生气泡的方式不同,区别在于是内部低压造成的或是混入空气形成的气泡。张英骏等<sup>[32]</sup>研究表明,无论是低压气泡还是掺气气泡,都是高速水流的产物,对钙华的沉积有很大影响。上述观点虽然说法不一,但形成机理却相似,都认为是在高速水流的情况下,水-气交界面突然变大,空气进入水中,使环境中的CO<sub>2</sub>分压降低,水中碳酸钙变得过饱和而沉积下来。

流动比较迅速的薄层水流最利于钙华的形成,所以钙华常见于温泉泉口附近的斜坡、陡壁和悬崖处<sup>[6]</sup>。例如广西温罗温泉,在泉口并无钙华沉积,泉

水向南东方向顺着坡势蜿蜒而下,泉水围绕附近生长的植物根茎向下流,在这些根茎上也沉积有钙华。距温泉出露处约80 m处有一陡坎,陡坎高度大于5 m,在此集中沉积了钙华<sup>[33]</sup>。天津宝坻区一眼揭露沉积盆地深层热水井,自流热水至一圆柱形水池,当注满水池后,热水沿着池外壁向流下,在池外壁上沉积了钙华,但在热水到达地面呈水平流动时却无钙华沉积<sup>[6]</sup>。这些都说明水动力条件对于温泉钙华的形成具有极其重要的作用。

### 3 生物效应

钙华形成过程中可能会受到生物作用的影响,生物条件对于钙华的沉积具有促进作用。钙华沉积生物因素的控制作用,前人已经有很多研究。

Prime-Habdija 等<sup>[34]</sup>等通过对CaCO<sub>3</sub>沉积速率和固着生物的成长速率的研究,发现它们之间存在正相关关系,但不是线性关系,说明生物对于CaCO<sub>3</sub>沉积具有促进作用。Pentecost和Zhang<sup>[35-36]</sup>对法国和英国以及欧洲一些沉积钙华地区的研究发现,苔藓类植物几乎都生长在HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca型水里或者附近,并伴有钙华沉积,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>离子浓度变化范围为86~462 mg·L<sup>-1</sup>,pH值在6.9~8.3。张朝晖和Pentecost<sup>[37]</sup>从苔藓植物的分类以及种群特征来研究不同岩溶地区的钙华特点,根据钙华分布环境地貌特点,结合岩溶水源特征和苔藓种类组成,把英国苔藓植物钙华沉积主要类型划分为4种基本类型和12种小类型:①苔藓类植物泉华,包括常温泉苔藓植物钙华、温泉苔藓植物钙华、海滨苔藓植物钙华和峭壁底部苔藓植物钙华。②瀑布苔藓植物钙华,包括沟谷苔藓植物瀑华和峭壁苔藓植物瀑华。③溪流苔藓植物钙华,包括沟谷溪流苔藓植物钙华和Cron苔藓植物钙华。④洞穴弱光带苔藓植物钙华,包括洞穴泉华、洞穴钟乳石、洞侧壁瀑布华和洞底滴水钙华。

国内也有大量关于生物因素影响钙华形成的研究,田友萍等<sup>[38]</sup>认为微生物对钙华沉积的发生和形成过程的控制作用,是与水动力控制作用共同影响的。其中,生物的控制作用处于十分重要或中心地位,研究区钙华沉积的发生和形成是微生物的“裂点”附生所引起的;“裂点”是指引起水流分离,水流方向改变的一些突起,蓝藻等藻类容易在“裂点”处附生,并进行大量繁殖。通过蓝藻的光合作用、拦截和粘结作用、结壳作用、胶结作用、生物钙化和分泌作用使得CaCO<sub>3</sub>沉积。Pentecost和Zhang<sup>[39-40]</sup>对中国四川和贵州等地钙华附近生长的苔藓类植物进行了



介绍,表明植物茂盛的地区更容易沉积钙华。刘再华等<sup>[41]</sup>为了研究生物作用对钙华沉积的影响,选取云南白水台泉水及其流经的6号和10号钙华水池作为研究对象,对上述水体的日动态变化进行自动监测,其中6号钙华水池水生植物生长茂盛,植物茎叶大部分露出水面,因而这些水生植物的光合作用在空中进行,而在水下进行的是根呼吸作用;10号钙华水池植物生长在水下,其光合作用和呼吸作用均在水体中进行。监测数据显示,10号钙华水池白天pH值增加,水体的电导率、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 浓度以及 $p\text{CO}_2$ 逐渐降低,表明了植物的光合作用确实可以促进钙华的沉积。辜寄蓉等<sup>[42]</sup>对黄龙钙华的研究发现,由于园区内水生植被和藻类特别发育,它们光合作用消耗了水中的 $\text{CO}_2$ 并放出大量的 $\text{O}_2$ , $\text{O}_2$ 部分溶解于水,水合生成 $\text{OH}^-$ ,从而使水中的pH值增高,而水中的 $\text{CaCO}_3$ 饱和指数增大,即其溶解量降低,进而促进 $\text{CaCO}_3$ 的沉积。郭云等<sup>[43]</sup>在研究硅藻对石灰华的影响时提出硅藻控制钙华沉积的6种作用:光合作用、拦截和粘结作用、结壳作用、胶结作用、生物钙化和分泌作用。藻类沉积作用具有综合性,即多种作用同时进行,而藻体表面的 $\text{CaCO}_3$ 沉积可能具有不同的阶段性。

生物效应对钙华的沉积具有较明显的促进作用,特别是在水流缓慢的情况下,藻类的光合作用消耗 $\text{CO}_2$ ,使得pH值和 $\text{HCO}_3^-$ 离子含量增高,促进钙华的形成;另外植物的根系可以为钙华的沉积提供生物构架,有利于钙华的沉积。例如广西温罗温泉除了在陡壁处沉积钙华外,在植物根系发育的地方同样大量沉积钙华,形成以植物根系为生物构架的沉积模式<sup>[33]</sup>。

#### 4 沉积环境

沉积环境主要包括地质背景和气候条件,通过控制水化学条件和水动力条件或者生物因素来影响钙华的沉积。地质背景条件包括地质构造和地层岩性等;气候条件主要是温度,光照强度和降雨量等。

Pedley等<sup>[44]</sup>通过实验模拟和WATEQP软件的计算,认为当其他变量恒定时,随着温度的升高,碳酸盐的过饱和程度也会提高。温度为 $6\text{ }^\circ\text{C}$ 时,方解石的饱和指数为0.82;当温度升高到 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 时,方解石的饱和指数为0.95;由此可见,温度是气候条件中影响钙华沉积最主要的因素。中国科学院地质研究所岩溶研究组<sup>[45]</sup>通过实验发现,在常压下温度为 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\text{CaCO}_3$ 的溶解度为 $86\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,当温度升高至 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 时,

$\text{CaCO}_3$ 的溶解度为 $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,温度为 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\text{CaCO}_3$ 的溶解度降低到 $67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,说明 $\text{CaCO}_3$ 的溶解度随温度的升高而降低。Merz-Preiß等<sup>[46]</sup>发现在个别地区,随着光照强度的增强, $\text{CaCO}_3$ 沉积也会增多,这是因为光照强度的增强可以提高生物的生长速率和活性,加快其光合作用效率。

除了气候条件外,在活动断层或者曾发生火山活动地区,地质构造形成的裂隙或者断层更有利于钙华的形成,并且对钙华的形态具有控制作用;强烈的地质构造可能切断钙华的原形态,而后继续沉积会形成不同形态的钙华<sup>[47]</sup>。在黄龙钙华景区内,断裂密集、纵深,岩石破碎,裂隙发育,而且碳酸盐岩地层分布海拔较高,断层多与非可溶性碳酸盐岩地层接触,因而断层、褶皱成为岩溶泉水汇集的场所和运移的通道。许多岩溶泉水常常沿断层出露,泉眼出露的地区也是钙华生长的区域,地质构造控制泉水出露的地方,即对钙华的形成同样具有控制作用<sup>[40]</sup>。

温度与 $\text{CaCO}_3$ 的溶解度呈负相关关系,温度的升高会加快钙华的沉积;随着光照强度的增强,可以提高生物的生长速率和活性,加快其光合作用效率, $\text{CaCO}_3$ 沉积也会增多。

#### 5 总结与展望

钙华沉积受气候环境、地质背景、水的物理化学性质、生物等多种因素控制,对于不同地区的钙华,其沉积机制也有差异。温泉钙华沉积的水化学条件中最主要的是 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度和 $\text{HCO}_3^-$ 浓度,其次是 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 的当量比例关系( $\gamma\text{Ca}^{2+}/\gamma\text{HCO}_3^-$ )和 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 的百分含量, $\text{CO}_2$ 浓度及其分压、pH、水化学类型和方解石饱和指数可以作为辅助的判断条件。利于钙华的水动力条件一般为流动比较迅速的薄层水流,因而钙华常见于温泉泉口附近的斜坡,陡壁和悬崖处。生物效应对钙华的沉积具有较明显的促进作用,特别是在水流缓慢的情况下,藻类的光合作用消耗 $\text{CO}_2$ ,促进钙华的形成;植物根系还可以为钙华的沉积提供生物构架,利于钙华的沉积。温度与 $\text{CaCO}_3$ 的溶解度呈负相关关系,温度升高会加快钙华的沉积。随着光照强度的增强,可以提高生物的生长速率和活性,加快其光合作用效率,促进 $\text{CaCO}_3$ 沉积。沉积钙华的温泉多位于断层附近,是因为这些断层控制着地下热水的分布。

未来关于钙华成因的研究应在以下方面予以重视。①重视与钙华沉积有关的水化学成分,不能仅局限于主要离子,还应加强对各种离子比例关系的

研究。②加强钙华沉积前后温泉水样水化学组分的研究,以便更加深入地了解影响钙华沉积的水化学因素。③开展实验研究控制钙华沉积的水动力条件,有利于掌握钙华沉积的影响机制。在野外注意观察泉水流量、流速等条件情况。④不应仅局限于宏观观察生物因素对钙华沉积的影响,还应重视微生物的结构、生命活动等影响因素。⑤重视实例验证沉积环境对钙华沉积的影响,特别是对全球大区域和局部地区气候条件的对比研究。⑥钙华沉积影响因素复杂,要充分考虑各种因素对钙华沉积的影响程度,研究一种影响因素时,尽量把握控制变量。

### 参考文献

- [1] Viles H A, Goudie A S. Tufas, travertines and allied carbonate deposits [J]. *Progress in Physical Geography*, 1990, 14 (1): 19-41.
- [2] Pentecost A. Travertines [M]. The Netherlands: Springer, 2005:1-445.
- [3] Andreo B, Martín—Martín M, Martín-Algarra A, et al. Hydrochemistry of spring water associated with travertines. Example of the Sierra de la Alfaguara (Granada, southern Spain) [J]. *Surface Geoscience*, 1999, 328(11): 745-750.
- [4] Ford T D, Pedley H M. A review of tufa and travertine deposits of the world [J]. *Earth—Science Reviews*, 1996, 41(3-4): 117-175.
- [5] Pentecost A. The Quaternary travertine deposits of Europe and Asia Minor [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1995, 14(10): 1005-1028.
- [6] 周训, 金晓媚, 梁四海, 等. 地下水科学专论 [M]. 北京: 地质出版社, 2010:78-80.
- [7] Pentecost A, Zhang Z H. A review of Chinese travertines [J]. *Cave and Karst Science*, 2001, 28: 15-28.
- [8] Dandurand J L, Gout R, Hoefs J, et al. Kinetically controlled variations of major components and carbon isotopes in a calcite-precipitating stream [J]. *Chemical Geology*, 1982, 36(3-4): 299-315.
- [9] Fouke B W, Farmer J D, Des Marais D J, et al. Depositional facies and aqueous-solid geochemistry of travertine -depositing hot springs (Angel Terrace, Mammoth hot springs, Yellowstone National Park, U.S.A.) [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70(3): 565-585.
- [10] Veysey J, Fouke B W, Kandianis M T, et al. Reconstruction of water temperature, pH, and flux of ancient hot springs from travertine depositional facies [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2008, 78(1-2): 69-76.
- [11] Kawai T, Kano A, Hori M. Geochemical and hydrological controls on biannual lamination of tufa deposits [J]. *Sedimentary Geology*, 2009, 213(1-2): 41-50.
- [12] Zentmyer R, Myrow P M, Newell D L. Travertine deposits from along the South Tibetan Fault System near Nyalam, Tibet [J]. *Geological Magazine*, 2008, 145(6): 753-765.
- [13] Dilsiz C. Conceptual hydrodynamic model of the Pamukkale hydrothermal field, southwestern Turkey, based on hydrochemical and isotopic data. *Hydrogeology Journal*, 2006, 14 (4): 562-572.
- [14] 沈照理, 朱宛华, 钟佐桑. 水文地球化学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1993:5-15.
- [15] Lorah M M, Herman J S. The chemical evolution of a travertine—depositing stream: Geochemical processes and mass transfer reactions [J]. *Water Resources Research*, 1988, 24 (9): 1541-1552.
- [16] Dilsiz C, Marques J M, Carreira P M M. The impact of hydrological changes on travertine deposits related to thermal springs in the Pamukkale area (SW Turkey) [J]. *Environmental Geology*, 2004, 45(6): 808-817.
- [17] Kele S, Demény A, Siklósy Z, et al. Chemical and stable isotope composition of recent hot-water travertines and associated thermal waters, from Egerszalók, Hungary: Depositional facies and non-equilibrium fractionation [J]. *Sedimentary Geology*, 2008, 211(3): 53-72.
- [18] Acikel S, Ekmekci M. Hydrochemical characterization of Pamukkale travertines, Denizli, Turkey, for remediative measures [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(22): 1456.
- [19] Kele S, Özkul M, Förizs I, et al. Stable isotope geochemical study of Pamukkale travertines: New evidences of low-temperature non-equilibrium calcite-water fractionation [J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 238(1): 191-212.
- [20] Wang X C, Zhou X, Zhao J B, et al. Hydrochemical evolution and reaction simulation of travertine deposition of the Lianchangping hot springs in Yunnan, China [J]. *Quaternary International*, 2015, 374:62-75.
- [21] Liu Y P, Zhou X, Deng Z J, et al. Hydrochemical characteristics and genesis analysis of the Jifei hot spring in Yunnan, southwestern China [J]. *Geothermics*, 2015, 53: 38-45.
- [22] Liu Z H, Zhang M, Li Q, et al. Hydrochemical and isotope characteristics of spring water and travertine in the Baishuitai area (SW China) and their meaning for paleo-environmental reconstruction [J]. *Environmental Geology*, 2003, 44 (6): 698-704.
- [23] Dreybrodt W, Buhmann D. A mass transfer model for dissolution and precipitation of calcite from solutions in turbulent motion [J]. *Chemical Geology*, 1991, 90(1-2): 107-122.
- [24] 程星. 薄水效应初论 [J]. *中国岩溶*, 1994, 13(3): 207-213.
- [25] 程星. 边石坝结构及其水动力条件研究 [J]. *中国岩溶*, 1999, 18(2): 135-143.
- [26] 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): 4-10.
- [27] Liu Z H, Svensson U, Dreybrodt W, et al. Hydrodynamic control of inorganic calcite precipitation in Huanglong Ravine, China: Field measurements and theoretical prediction of deposition rates [J]. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 1995, 59 (15): 3087-3097.

- [28] 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): 1-11.
- [29] 章典. 洞穴碳酸钙沉积的水运动条件[J]. 中国岩溶, 1983, 2(1): 33-41.
- [30] 张英骏, 莫仲达. 黄果树瀑布成因初探[J]. 地理学报, 1982, 37(3): 303-317.
- [31] 祝安. 河成石灰华成因: 掺气效应研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 1994, 12(1): 33-40.
- [32] 张英骏, 程星, 祝安. 石灰华沉积机制的实验研究[J]. 中国岩溶, 1994, 13(3): 197-205.
- [33] 杨妍妍. 广西博白温罗温泉形成演化与钙华沉积机制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
- [34] Primc-Habdija B, Habdija I, An P M. Tufa deposition and periphyton overgrowth as factors affecting the ciliate community on travertine barriers in different current velocity conditions [J]. Hydrobiologia, 2001, 457(1-3): 87-96.
- [35] Pentecost A, Zhang Z H. Bryophytes from some travertine-depositing sites in France and the UK: relationships with climate and water chemistry [J]. Journal of Bryology, 2002, 24: 233-241.
- [36] Pentecost A, Zhang Z H. Response of bryophytes to exposure and water availability on some European travertines [J]. Journal of Bryology, 2006, 28: 21-26.
- [37] 张朝晖, Pentecost A. 英国钙华苔藓植物区系特征及其主要钙华沉积类型[J]. 中国岩溶, 2002, 21(1): 38-45.
- [38] 田友萍, 何复胜. 石灰华的生物成因研究: 以四川九寨沟和贵州黄果树等地石灰华为例[J]. 中国岩溶, 1998, 17(1): 49-56.
- [39] Pentecost A, Zhang Z H. The travertine flora of Juizhaigou and Munigou, China, and its relationship with calcium carbonate deposition [J]. Cave and Karst Science, 2000, 27(2): 71-78.
- [40] Pentecost A, Zhang Z H. New and noteworthy list of bryophytes from active travertine sites of Guizhou and Sichuan [J], S.W. China. Journal of Bryology, 2000, 22(1): 66-68
- [41] 刘再华, 李强, 孙海龙, 等. 云南白水台钙华水池中水化学日变化及其生物控制的发现[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(6): 10-15.
- [42] 辜寄蓉, 范晓, 范立学. 黄龙钙华景观影响因素分析[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(32): 10319-10322.
- [43] 郭云, 支崇远, 赵宇中, 等. 硅藻对地表石灰华沉积的生物作用及其意义[J]. 上海地质, 2007, 28(1): 21-24.
- [44] Pedley M, Andrews J, Ordonez S, et al. Does climate control the morphological fabric of freshwater carbonates? A comparative study of Holocene barrage tufas from Spain and Britain [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1996, 121(3-4): 239-257.
- [45] 中国科学院地质研究所岩溶研究组[M]. 中国岩溶研究. 北京: 科学出版社, 1979: 37-40.
- [46] Merz-Preiß M, Riding R. Cyanobacterial tufa calcification in two freshwater streams: ambient environment, chemical thresholds and biological processes [J]. Sedimentary Geology, 1999, 126(1): 103-124.
- [47] Hancock P L, Chalmers R M L, Altunel E, et al. Travertines: using travertines in active fault studies [J]. Journal of Structural Geology, 1999, 21(8): 903-916.

## A brief review on the factors affecting deposition of travertines in hot springs

LIU Haisheng<sup>1</sup>, ZHOU Xun<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuqi<sup>1</sup>, HAI kuo<sup>1</sup>, YU Mingxiao<sup>1</sup>, TAN Mengru<sup>1</sup>, SHANG Ziqi<sup>1</sup>

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Circulation and Environmental Evolution, Ministry of Education, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract** Travertines or tufas are non-marine carbonate precipitates around springs, rivers, lakes and caves, a manifestation of material migration in water cycles on lands. Studying the formation of travertines is helpful to understand the material migration regularity in local hydrologic circulation processes and indirectly examine the conditions of paleo-climate and paleo-hydrogeology. There are various travertines deposits near some of the hot springs. This paper presents a brief review on the formation of travertines from hot springs and the main factors controlling the deposition of travertines and their interrelation. Research suggests that hydrochemical conditions are the material basis and necessary conditions for travertine deposition, which are the sufficient conditions for travertine deposition. Biological effects may accelerate the travertine deposition and the depositional environment may indirectly control the travertine deposition through changing hydrochemical or hydrodynamic conditions.

**Key words** hot spring, travertine, hydrochemistry, hydrodynamics, biological effect, depositional environment

(编辑 张玲)