

董发勤,李刚,代群威,等.雪宝顶区块流域钙华形成的生物作用研究[J].中国岩溶,2021,40(1):11-18.
DOI:10.11932/karst20210102

雪宝顶区块流域钙华形成的生物作用研究

董发勤^{1,2},李刚^{1,2},代群威³,周琳^{1,2},王富东^{1,2},赵学钦^{1,2},蒋忠诚⁴,张强⁴,
李博文⁵,Enrico Capezzuoli⁶,Mike O'Driscoll⁷,Anelka Plenkovic-Moraj⁸

(1. 西南科技大学固体废物处理与资源化教育部重点实验室,四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学环境与资源学院,四川 绵阳 621010; 3. 西南科技大学核废物与环境安全国防重点学科实验室,四川 绵阳 621010; 4. 中国地质科学院岩溶地质研究所,广西 桂林 541004; 5. Department of Materials Science and Engineering, Michigan Technological University, Houghton 49931, USA; 6. Department of Earth Sciences, University of Florence, Firenze 50121, Italy; 7. Department of Informed Industrial Mineral Forums & Research Ltd, Epsom KT17 4RH, UK; 8. Department of Biology, Faculty of Science, University of Zagreb, Rooseveltov trg 6, 10 000 Zagreb, Croatia)

摘要:钙华不仅具有重要的景观旅游价值,而且对确定区内碳酸盐沉积特征、环境演化规律及同期环境生物的作用与贡献有重要的研究意义。本文在对比国内外典型钙华特征的基础上,以黄龙和九寨沟为例,对雪宝顶区块流域内钙华的沉积特征、环境化学与生物作用进行阐述,指出了雪宝顶区块流域冷水型钙华的形成与演化是化学沉积—溶解作用、生物沉积与溶蚀作用等共同作用的结果,并受非生物、生物因素影响。在雪宝顶冷水型钙华的形成过程中,微生物协同参与了钙华的沉积与溶蚀过程,通过自身新陈代谢促活动促使钙离子结晶,并诱导晶型变化;其他生物体如植物、藻类等或以间接的方式促进或加快了钙华形成,或为钙华生长提供模板和体量。

关键词:雪宝顶;钙华;沉积特征;生物作用;植物;微生物

中图分类号:Q948;P642.25 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2021)01-0011-08 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

雪宝顶为岷山山脉的主峰,位于横断山地区的东北部,海拔高度为5 588 m,常年冰雪覆盖,雪水融化后渗入地下或流经地表汇入江河之中。雪宝顶区域位于四川省西北部,包含平武县、松潘县、北川县、茂县和黑水县^[1],地处四川盆地与青藏高原的过渡带,是川西北地区重要的生态屏障,为岷江、涪江、白龙江的发源地。雪宝顶生态研究区域,主要包括了岷江、涪江、白龙江等三江流域的雪宝顶地质区块,下简称“雪宝顶区块流域”(图1)。

雪宝顶区块流域地质情况复杂,世界著名钙华自然遗产地九寨沟和黄龙就位于此。钙华是由碳酸钙在热泉、岩溶泉、河、湖水沉积而成^[2-5]。目前,在雪宝顶区块流域内已发现大约34处钙华沉积点,以黄龙和九寨沟地区的钙华最为典型。雪宝顶区块流域与国外发现的热带碳酸盐沉积物形成地区不同,热带碳酸盐沉积地区的水介质温度约为27℃,而雪宝顶区块流域纬度较热带更高,地处高海拔地区,以黄龙和九寨沟地区为例,其水介质温度远低于热带,碳酸盐沉积物多在10℃以下生成,在冬季形成钙华的地表水温甚至低于5℃(1~3℃)^[6-8],这一现象与前人

基金项目:国家自然科学基金项目(41831285,41877288);四川灾后重建先导科研项目第130-1-1

第一作者简介:董发勤(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为环境矿物学、固体废弃物处理及资源利用。E-mail: fqdong@swust.edu.cn。

收稿日期:2020-09-20



图1 雪宝顶区块流域

Fig. 1 Xuebaoding drainage basin

研究中探讨的高原热水型钙华形成有所不同,该区域钙华形成的生物沉积动力学机制具有独特的环境意义。

钙华景观的形成和当地的地理条件有着密不可分的联系。当携带有大量碳酸根和钙离子的水源流经凹凸不平的地表时水流流速发生变化,加上树根、落叶等的局部阻塞作用,在温度、水动力等因素变化的影响下,水中的碳酸钙渐渐沉积下来^[9-11],最终形成了各种类型的钙华景观。本文以九寨沟和黄龙地区(张家沟、牟尼沟、黄龙沟)钙华为例,对雪宝顶区块流域的钙华成因和生物在钙华形成过程中的作用进行研究,结合前人的研究成果,探讨雪宝顶区块流域内的钙华形成机制以及沉积过程中的生物影响,以期揭示区域内钙华沉积时所发生的环境变化、微生物群落独特代谢途径及特异地球化学贡献、区内微生物物种及进化的重要依据。

1 国内外典型钙华对比分析

在陆地表面分布着众多的钙华沉积地貌,形成了形状万千、令人目眩神迷的钙华景观,如美国的黄石公园,还有中国四川广为人知的钙华风景区——黄龙和九寨沟风景区。此外还有土耳其的棉花堡、墨西哥的 Cascadas de Agua Azul 以及美国亚利桑那州 Supai 保留地的哈瓦苏溪流(Havasus Creek)和中国西南高原地区白水台等地。表1中列出了国内外一些典型钙华景观的基本特征。

有资料^[21]显示,当环境温度大于 30 ℃时生成的钙华一般为热水型钙华。美国黄石公园是典型的极端地热环境,以热水型硅华和钙华为主地貌;而中国四川九寨沟和黄龙是典型的冷水型钙华沉积地貌。Golubic 等^[22]认为藻类的生长确定了沉积的总体形态,且沉积发生在藻类和藓类生长最好的激流和瀑

表 1 国内外典型钙华景观基本特征对比

Table 1 Comparison of basic characteristics of typical travertine landscape at home and abroad

景点名称	钙华年龄	地质环境	水源(流量/L·s ⁻¹)	温度/℃	参考文献
四川黄龙沟	1.2 万—3.5 万年或8万年	灰岩、白云岩为主;全新世以来留下冰蚀地貌和冰积物,海拔3 115~3 578 m	冰川融水及大气降水;(83.46 L·s ⁻¹)	5~7	董发勤等 ^[9] Gan ^[12]
四川九寨沟	3 600—21 000 年*	少量薄层砂岩、板岩、页岩和含煤地层,绝大部分为碳酸盐岩地层,海拔1 966~2 768 m	大气降水	7.3	晏浩等 ^[13]
云南白水台	2 500 年—12.7 万年	玄武岩为主,依地形而形成一层层钙华组成的钙华台地;断陷溶蚀作用而成,海拔2 520~2 608 m	雪水沿雪水裂隙下渗	10	Feng and Dong ^[14] 李强等 ^[15]
土耳其帕穆克卡莱	40 万年	白云灰岩;泉眼沿着主要的断层线从西北方向延伸至东南方向,海拔1 200 m	温泉水及高原流水;(386 L·s ⁻¹)	35~36	Yesertener ^[16] Dilsiz ^[17]
云南鸡飞峡谷	1—2 万年	砂质黏土岩、黏土岩;属于侵蚀构造地貌,区内水系发育,地形切割强烈,海拔850~2 251 m	流量大小不等的泉眼群;(10 L·s ⁻¹)	35~81	刘亚平 ^[18]
美国黄石公园	8 000 年	以玄武岩、流纹岩为主,地处火山活跃地带、地热丰富,海拔2 134~2 438 m	温泉水;(140~420 L·s ⁻¹)	71~73	Fouke et al. ^[19] Li et al. ^[20]

*,西南科技大学董发勤课题组测定。

水处;Chafetz 等^[23]认为细菌群体是启动方解石沉积的主要因子;Inskeep 等^[24]也发现在黄石不同的地热环境中分布着不同的微生物群落;Fouke 等^[19]对黄石国家公园猛犸热泉的地表水系微生物研究表明,不同的钙华沉积相在细菌群落的组成上有明显的分区。

现阶段有关热水型钙华的生物作用方面研究较多,其微生物群落的分布及细菌群落的组成已大致清晰;而冷水型钙华沉积与形成过程中的生物作用已有初步研究,但仅限于现存活体物种的种属鉴定及多样性分析,古老钙华的微生物种属在参与沉积、环境气候演变证据、现代与古老微生物直接形成方解石或文石的机制和调控条件等方面的研究很少。

2 黄龙和九寨沟钙华研究现状

目前对黄龙和九寨沟地区的地学研究多集中在四川省地矿局区域地质调查队、中国地质科学院岩溶地质研究所、中国科学院地球化学研究所、成都理工大学和西南科技大学等研究院所,按研究内容可划分为三个阶段。20 世纪 80 年代之前,主要针对在于普通地质、矿产、水文、岩溶和钙华调查;20 世纪 90 年代后,主要研究内容为冷水型钙华成因、水文地球化学、水循环与地质灾害防治等;近十年的研究在于钙华景观的演化趋势、现代钙华形成的控制因素、钙华的退化与保护以及旅游开发和景观保护等。作者团队所做的研究工作主要在钙华形成的生物作用和钙华景观的退化与震后钙华的保育修复方面。

2.1 黄龙和九寨沟水源分析

由钙华环境化学作用与钙华景观形成与演化的关系研究可知,钙华的形成主要是 CaCO₃-H₂O-CO₂ 三相相互作用的结果。黄龙钙华源泉水中 CO₂ 气体的来源主要存在两种不同观点:冷成因论(或气候成因论)^[25]和热成因论(或深成因论)^[26-27]。周绪纶等^[25]对泉水气体成分,土壤中的 CO₂ 分压、水温及泉口特征等进行研究,认为泉水中的 CO₂ 来源于表层土壤,即冷成因型;而刘再华等^[27]经过十余年系统深入的研究发现,黄龙钙华的形成是由于地球深部高分压的 CO₂ 在碳酸盐岩补给区产生富含碳酸氢钙的地下水,当其以泉的形式出露地表时,泉水的 CO₂ 分压高于空气的,泉水中 CO₂ 大量逸出,导致碳酸钙过饱和而发生沉积。这一发现与上世纪 90 年代初关于黄龙钙华是冷成因的认识有实质不同。

研究发现水在黄龙钙华形成过程中起着关键性的媒介作用。在对黄龙钙华特性、成因及演变的研究中发现“水”是维系钙华存在的根本^[28-30]。唐淑等^[31]通过对黄龙景区多年水流量动态变化特征分析发现区内的补给水源无下降趋势,同时区内还有其它外源水补给,说明区内的水量是稳定和充裕的。但水体在向下游径流循环转化过程中,水量呈逐渐减少的状态。总之,学者对黄龙沟水的补给及其循环过程一致认为,构成黄龙沟景观水主要来源于大气降水、地表水及地下水的混合,而对景观形成起主要作用的是深层地下水。而关于九寨沟水的来源,前人的研究^[32-34]结果表明,九寨沟景区是一个独立的岩溶水文地质结构单元,大气降水是唯一的补给水源。

2.2 黄龙和九寨沟的环境地球化学研究现状

作者团队对雪宝顶流域内黄龙沟、张家沟、牟尼沟、九寨沟四个点的钙华沉积物进行观察(图2),其颜色以黄色和白色为主,具有层状、皮壳状和同心状结构,本课题组还在黄龙发现了混积层(图3),一般胶结较好,晶体形态呈微粒状、柱状结构^[35]。主要矿物相为方解石、石英等,主要化学成份为 CaCO_3 (90%左右)、 MgCO_3 (5%),平均密度为 $2.69 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,容重 $1.94 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ^[36]。

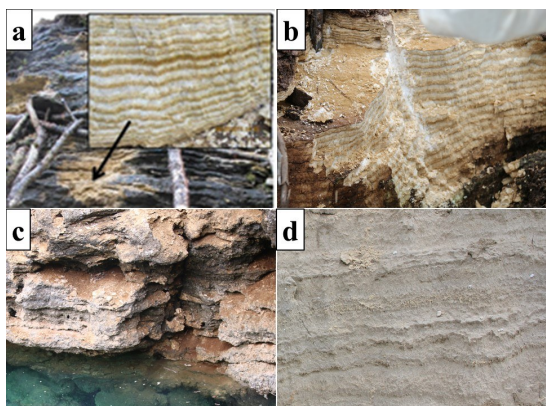


图2 钙华沉积:(a)黄龙沟;(b)张家沟;(c)牟尼沟;(d)九寨沟
Fig. 2 Accumulation layer of travertine: (a) Huanglonggou, (b) Zhangjiagou, (c) Munigou, (d) Jiuzhaigou

观察发现钙华的颜色会随季节发生改变,黄色主要出现在湿热的雨季,这可能是由于混入黏土所致;而在干冷的旱季,钙华的颜色呈现出纯净碳酸钙沉积的白色(图3)。刘再华等^[37]对钙华年层(白色亚层+黄色亚层=年层)微层元素的含量分析发现,黄色亚层中的U、P、Mg含量是白色亚层的2~5倍,而Fe、Al含量更高,达10倍以上。李刚^[6]通过对黄龙黑色、黄色和白色钙华的化学组分和有机含量的测定,发现C、Si、Fe等元素均匀分布在钙华中,随着钙华颜色由黑至白,钙华中的C/Si逐渐升高,Fe元素质量百分比也逐渐升高,其中黑色钙华的C/Si、Fe元素含量与藻席较为接近,推测钙华颜色的变化可能是由生物作用引起的。

目前,黄龙钙华景观主体处于青壮年期,黄龙核心景区水流改道与变迁,水循环转化段地表水严重漏失,导致部分钙华池干涸、变黑、开裂甚至坍塌(图4),极大地影响黄龙钙华景区的美感和观赏价值。而2017年发生在九寨沟的地震,使得九寨沟内诺日朗瀑布、火花海、熊猫海等核心世界自然遗产点受到严重损毁(图5)。地震后,沟内水化学环境、生物群

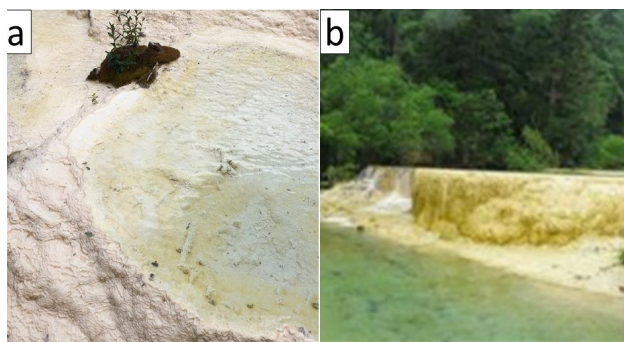


图3 (a)旱季时期钙华呈现出白色;(b)雨季时期钙华呈现出黄色
Fig. 3 a: Travertine presents a white color in dry season; b: Travertine presents a yellow color in rainy season

落发生改变,对九寨沟原本的钙华沉积作用产生了巨大影响。针对这些情况,学者们从水文地质等不同角度展开了对钙华景观演化和演变的研究,以提出一些景观保护与修复措施。



图4 黄龙钙华沉积区大面积黑化:(a)黄龙沟;(b)张家沟;(c)牟尼沟
Fig. 4 Extensive darkening in travertine deposition area: (a) Huanglonggou, (b) Zhangjiagou, (c) Munigou



图5 地震前(a,c)后(b,d)的九寨沟诺日朗瀑布和火花海景观
Fig. 5 Nuorilang Waterfall and Spark Sea in Jiuzhaigou before (a, c) and after (b, d) earthquake

3 钙华沉积的生物作用

关于钙华的成因,虽然学术界仍存在分歧,但所考虑的基本因子都是一样的,即非生物因子(岩溶水、地貌位置等)与生物因子(主要是蓝藻、硅藻等微

生物和苔藓植物)两大类。根据碳酸盐沉积过程中因生物作用与无机化学作用的主导因素不同,钙华可分为具有生物构造的多孔状较疏松的生物型灰华和致密、多具良好结晶并成层的结晶型灰华两类^[38]。研究表明藻类在钙华的形成过程中有重要作用。碳酸盐的生物沉积机理可归纳为光合同化作用、生物生态习性作用及生物钙化作用,钙华的生物成因主要是前两种方式。

3.1 影响钙华形成的生物类型

九寨沟-黄龙景区泉水各项指标均与地表水体有较大差异。黄龙水体中原核微生物有较高的物种和遗传多样性。水体中的藻类也极为丰富,多达23属,53种^[39]。细菌多样性指数(H)在2.628~3.323之间,丰度(S)在14~28之间。分别属于14个细菌类群,其中变形菌门是优势类群,其次是拟杆菌门和蓝细菌门。微生物参与且有利于钙华的形成过程。而九寨沟却拥有更多独特的原核微生物物种资源,高通量测序的结果显示,九寨沟和黄龙共有的原核OTUs占黄龙OTUs总数的93%,但只占九寨沟OTUs总数的38%,九寨沟原核微生物共55门、139纲、181目、329科、570属。其中主要的门包括变形菌门(Proteobacteria),厚壁菌门(Firmicutes)和蓝藻门(Cyanobacteria)。九寨沟的藻类多样性也极高,以诺日朗为代表,藻类有21门,38纲,59目,64科,72属,89种,远高于黄龙。但受地震损害暴露后的火花海湖底微生物多样性在短时间内急剧下降,表明九寨沟钙华湖泊为易受损害的生态脆弱区。

3.2 微生物在钙华形成中的作用

钙华水体中微生物具有庞大的生物量,因此微生物在钙华沉积过程的作用不可忽视。根据廖长君^[40]在水中放置玻璃片以获取原位沉积钙华的实验结果发现,生物的存在使得钙华沉积速率加快,但相比水流流速较快的渠道,生物对钙华沉积的影响在水流缓慢的地方才会更明显。课题组李骥言^[41-42]利用分离自黄龙水体中典型嗜冷菌,对其高产的胞外产物琥珀酸影响钙华沉积方面做了相应的研究,结果表明琥珀酸的加入抑制了碳酸钙的沉积,且抑制程度随浓度的升高而明显增强,琥珀酸对碳酸钙晶型和形貌的影响也受浓度的调控,表明细菌在一定程度上能够控制生物矿化过程。Sanchez Moral^[43]的研究认为细菌的活性在碳酸钙沉积的最初阶段起到了诱导沉积的作用,有机质和胞外聚合物能够调控

碳酸钙沉积。Kim^[44]探究了杜拉克温泉丝状藻垫中的碳酸钙沉积现象,大多数碳酸盐颗粒以聚合态形式存在,也有叠层结构穿插于微生物之间,形成包含有机物质的多孔枝状结构。本课题组孙仕勇^[45]研究发现嗜冷硅藻可能是生存在黄龙沟极端环境下的优势微生物,嗜冷硅藻的代谢作用会促进黄龙钙华在极端环境中的形成及溶解。在较为温暖的季节里嗜冷硅藻所产生的胞外聚合物会保护钙华免受碳酸氢根的蚀刻,并且在丰水期地表水重新流动时为钙华的沉积提供一个样板。李琼芳等^[20]对比研究了四川黄龙和美国黄石国家公园钙华沉积的微生物因素,认为微生物对黄石公园的钙华结构、形态等方面发挥着重要作用。

通过对钙华沉积区域藻类及微生物的研究发现,微生物参与了钙华的沉积,而藻类在钙华形成过程中所起的作用却不同,其在促进碳酸盐沉积的过程同时也具有侵蚀破坏钙华的作用,这就说明植物和微生物也参与了钙华退化过程。最新的调查发现,雪宝顶区块流域部分地区钙华退化速率超过了沉积速率,并且在水流下游地区退化现象尤为严重。因此,进行该区域典型嗜冷藻类及典型代谢产物和植物体在钙华沉积和退化过程中参与度的研究,在钙华退化保育方面显得尤为重要。

3.3 可见生物在钙华形成中的构筑作用

富含碳酸氢钙的地表水在流动过程中二氧化碳的逃逸造成了钙华结晶析出。水在流动过程中夹带钙华,当水量减少或流速降低时,被搬运的钙华沉积下来,形成钙华堆积区。Xie等^[46]的研究表明钙华坝上的真菌及菌丝可以直接为碳酸钙的结晶提供成核位点,如同方解石长出了“触角”一样,随时间的推移“触角”和晶体会一同成长变大。当菌丝上生长出足够大的方解石晶体时,就可决定了该区域内钙华的结构特征,每个晶体上存在的小孔表明菌丝促进了方解石形成,所形成的小晶体最终融合到整个钙华大坝的矩阵中。因此,真菌在钙华沉积过程中扮演“建筑师”的角色,这体现了钙华沉积过程中的生物建造作用。辜寄蓉等^[47]的研究认为,黄龙地区钙华堆积体是以钙华沉积为主的次生岩溶作用在原有冰川底碛的基础上形成的。王振荣等^[48]通过对钙华景观的地质与地貌分析得出,黄龙沟地表水径流过程中钙华逐渐堆积形成巨大的钙华堆积体,从而形成沟内壮观的景象,因此将钙华堆积地貌分为钙华滩、

钙华池和钙华瀑布。黄龙和九寨沟区域内植被茂盛,尤其是水中生长的灌木、水草以及倒塌在水中的树木能够为钙华的沉积提供良好的载体(图6)。同时,植物的根、茎、叶与碳酸盐沉积结晶颗粒、微生物等一起通过多样的构筑和钙质、硅质、泥质、铁质和铝质胶结作用形成尺寸各异钙华地质体和景观构造。钙华形态的构筑类型与特点主要有沉积充填构筑、堆积构筑、表层覆盖构筑、堆砌增高增厚构筑、附着生物构筑、岩矿-生物交叠构筑、结晶生长构筑等。

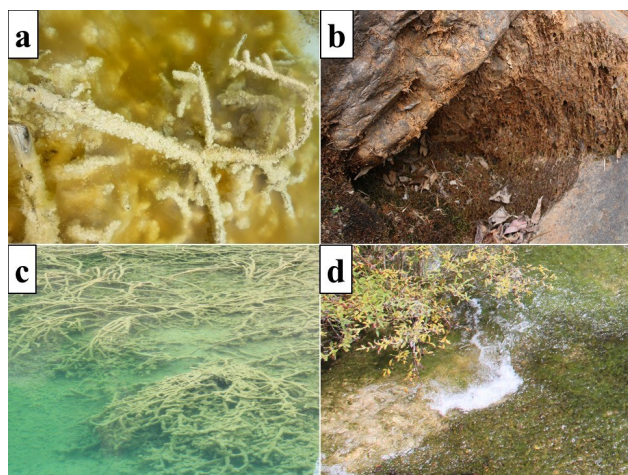


图6 钙华堆积:(a)黄龙沟;(b)张家沟;(c)牟尼沟;(d)九寨沟

Fig. 6 Travertine accumulation in Huanglong: (a) Huanglonggou, (b) Zhangjiagou, (c) Munigou, (d) Jiuzhaigou

作者团队^[49-53]研究了黄龙冷水型钙华沉积过程中微生物协同作用,对比分析了“8·8地震”后九寨沟钙华沉积演变过程,黄龙—九寨沟钙华相关的水化学特性、钙华物相、藻类与微生物群落、钙华沉积实验室模拟、钙华同位素组成变化等。结果表明,在冷水型钙华沉积过程中微生物协同参与了共沉积,主要沉积作用机制是通过微生物自身代谢作用促使钙离子分步结晶,包括自身躯体以及排泄物的矿物点核捕获、诱导与形成模板。还发现了微生物能诱导晶型形态变化,及同步引起晶体溶蚀或刻蚀现象。研究表明微生物作用对钙华成色具有一定影响:一是微生物的参与导致总有机碳含量的变化;二是微生物富集了部分有色元素,如镁、铝、铁、硫、磷等元素,被有机质转换而改变钙华成色。研究还查明钙华沉积退化的主控因素,即缺少富含钙离子的地下水涵养,导致藻类与水草和苔藓滋生,或导致钙华在高寒地区的抗风化能力大大减弱,反而促使微生物参与

风化作用,进而促进钙华往退化方向演变。

4 结论与展望

根据对雪宝顶区块流域内黄龙和九寨沟钙华的研究结果可得出以下结论:

(1)与美国黄石公园等地的热水型钙华不同,雪宝顶区块流域因其高原寒冷环境,所形成的钙华为冷水型钙华,表明该区域存在特有的钙华沉积机制;

(2)雪宝顶区块流域冷水型钙华的形成与演化是化学沉积-溶解作用、生物沉积与溶蚀作用等共同作用的结果;

(3)雪宝顶冷水型钙华在形成过程中,微生物协同参与了钙华的沉积与溶蚀过程:①通过微生物自身代谢作用促使钙离子分步结晶,包括自身躯体以及排泄物的矿物点核捕获、诱导与形成模板,促使钙华形成;②微生物能诱导晶型形态变化,及同步引起晶体溶蚀或刻蚀现象;

(4)除了微生物对钙华生成的促进作用,其他生物体如植物、藻类在钙华形成过程中也起到重要作用:①提供有机质,以供微生物生长代谢,间接促进钙华的形成;②碳酸钙结晶依托生物体骨架进行堆叠,为钙华生长提供模板,形成形状各异的钙华景观。

现有研究已经表明了生物作用对钙华形成的重要影响,但其在钙华形成中的贡献占比和促进力度、微生物群落分布、种类及数量对钙华沉积和形成钙华性质的影响尚不清楚;钙华在漫长的沉积过程所产生的环境变化,微生物群落会产生的一些适应性改变,如独特代谢途径和特异地球化学行为,这些还需要研究者进行更深层次的探索。

参考文献

- [1] 龚雪梅. 岷江上游植被生产力变化及其与气候和人类活动的关系研究[D]. 成都:成都信息工程大学,2018.
- [2] 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.
- [3] 韦跃龙,李成展,陈伟海,等. 广西岩溶景观特征及其形成演化分析[J]. 广西科学, 2018, 25(5): 465-504.
- [4] 伊然. 钙华梯田——瑰丽的自然奇观[J]. 石油知识, 2018 (4): 8-9.
- [5] 吴驰华,伊海生,惠博,等. 一种包覆颗粒沉积新类型: 鲕状泉华[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(11): 2406.
- [6] 李刚. 高原冷水环境黄龙典型硅藻的钙华复合沉积作用研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2018.

- [7] 李刚,董发勤,代群威,等. 黄龙钙华有机碳测定方法的对比研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2018, 37(1):152-160.
- [8] 董发勤,李琼芳,代群威,等. 黄龙风景区和黄石公园钙华形成环境对比研究[A]. //中国矿物岩石地球化学学会. 中国矿物岩石地球化学学会第14届学术年会论文摘要专辑[C]. 中国矿物岩石地球化学学会:2013:2.
- [9] Chafetz H S. Travertines; depositional morphology and the bacterially constructed constituents [J]. J Sediment Petrol, 2011, 54(1):289-316.
- [10] Jingan Chen, David Dian Zhang, Shijie Wang, et al. Factors controlling tufa deposition in natural waters at waterfall sites [J]. Sedimentary Geology, 2004, 166(3-4): 353-366.
- [11] O'Brien G R, Kaufman D S, Sharp W D, et al. Oxygen isotope composition of annually banded modern and mid-Holocene travertine and evidence of paleomonsoon floods, Grand Canyon, Arizona, USA [J]. Quaternary Research, 2017, 65(3):366-379.
- [12] 甘建军, 郑黎明. 四川九寨沟—黄龙核心景区景观地质环境和水循环系统研究[J]. 四川地质学报, 2007(1): 53-56.
- [13] 晏浩, 刘再华, 邓贵平, 等. 四川九寨沟景区钙华起源初探[J]. 中国岩溶, 2013, 32(1): 15-22
- [14] Feng L I, Dong X C. Intensification of Tectonic Movement since The Cenozoic and Its Effect on Geological Environment in Northwestern Yunnan, China [J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2000(1):1-9.
- [15] 李强, 戴亚南, 游省易, 等. 云南白水台钙华沉积成因及主要沉积类型研究[J]. 中国岩溶, 2002, 21(3):178-181.
- [16] Yesertener C, Elhatip H. Evaluation of Groundwater Flow by Means of Dye-Tracing Techniques, Pamukkale Thermal Springs, Western Turkey [J]. Hydrogeology Journal, 1997, 5(4):51-59.
- [17] 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.
- [18] 刘亚平. 云南省昌宁县鸡飞温泉成因及钙华形成浅析[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2009.
- [19] Fouke B W, Bonheyo G T, Sanzenbacher B L, et al. Partitioning of bacterial communities between travertine depositional facies at Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, U.S.A. [J]. Can. J. Earth Sci, 2003, 40: 1531-1548.
- [20] Li Q F, Dong F Q, Dai Q W, et al. The Microbial Factor of Travertine Deposition between Yellowstone National Park (YNP), USA and Huanglong Scenic, Sichuan [J]. Advanced Materials Research, 2012, 518: 136-139.
- [21] Shi Z J, Shi Z M, Yin G, et al. Travertine deposits, deep thermal metamorphism and tectonic activity in the Longmenshan tectonic region, southwestern China [J]. Tectonophysics, 2014: 156-163.
- [22] Golubic S, Campbell S E. Analogous microbial forms in recent subaerial habitats and in Precambrian cherts: Gloethece coerules, Geitler and Eosynechococcus moorei, Hofmann [J]. Precambrian Research, 1979, 8(3-4):201-217.
- [23] Henry S. Chafetz, Robert L. Folk. Travertines: Depositional Morphology and the Bacterially Constructed Constituents [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1984, 54(1): 289-316.
- [24] Inskeep W P, Rusch D B, Jay Z J, et al. Metagenomes from high-temperature chemotrophic systems reveal geochemical controls on microbial community structure and function [J]. PLoS ONE, 2010(5): 1-15.
- [25] 周绪纶. 关于四川黄龙钙华CO₂成因的讨论[J]. 四川地质学报, 2006, 26(3): 143-146.
- [26] 刘再华, 曹云, 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(2): 1-10.
- [27] 刘再华. 再论黄龙钙华的成因——回应周绪纶先生“黄龙钙华是热成因还是冷成因:高寒岩溶气源之一”一文[J]. 中国岩溶, 2008, 27(4): 388-390.
- [28] 刘再华, 田友萍, 安德军, 等. 世界自然遗产—四川黄龙钙华景观的形成与演化[J]. 地球学报, 2009, 30(6): 841-847.
- [29] 万新南, 杨菊, 程温莹, 等. 四川黄龙景区“源水”成因浅析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(1): 91-95.
- [30] 杨俊义, 万新南, 席彬, 等. 九寨沟黄龙地区钙华漏斗的特征与成因探讨[J]. 水文地质工程地质, 2004(2): 90-93.
- [31] 唐淑, 张清明, 台永东, 等. 黄龙景区多年水量动态变化情况调查分析[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(4): 209-210.
- [32] 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.
- [33] 尹观, 倪师军, 张其春. 氘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.
- [34] 甘建军, 刘民生, 黄润秋, 等. 九寨沟核心景区水循环系统研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(1):34-39.
- [35] 晏浩, 刘再华. 层状钙华及其地球化学指标的古气候/环境意义[J]. 第四纪研究, 2011, 31(1):88-95.
- [36] 姜泽凡, 刘艳梅, 胥良. 黄龙钙华景观形成及演化趋势研究[J]. 水文地质工程地质, 2008(1): 107-116.
- [37] 刘再华, 田友萍, 安德军, 等. 世界自然遗产——四川黄龙钙华景观的形成与演化[J]. 地球学报. 2009, 30(6): 841-847.
- [38] 代群威, 张清明, 党政, 等. 钙华天然海绵地质体多孔特性及其对水循环调节意义:以四川黄龙为例[J]. 矿物学报, 2019, 39(2):219-225.
- [39] 刘明学, 董发勤, 孙仕勇, 等. 黄龙钙华水体藻多样性及分布规律研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(1): 182-186.
- [40] 廖长君. 钙华沉积的生物效应[D]. 桂林:广西师范大学, 2006.
- [41] 李骥言, 李琼芳, 代群威, 等. 黄龙嗜冷细菌胞外琥珀酸组分对碳酸钙矿化的影响[J]. 岩石矿物学杂志, 2013, 32, (6), 773-781.
- [42] 李骥言, 李琼芳, 王建萍, 等. 2株分离自黄龙冷水型水体中土著细菌的胞外有机酸代谢组分分析[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(6):274-277.
- [43] Sanchez—Moral S, Portillo M C, Janices I, et al. The role of microorganisms in the formation of calcitic moonmilk deposits and speleothems in Altamira Cave [J]. Geomorphology, 2012,

- s 139-140(4):285-292.
- [44] Kim J, Kogure T, Yang K, et al. The Characterization of CaCO_3 in a Geothermal Environment: a SEM/TEM—EELS study[J]. *Clays & Clay Minerals*, 2012, 60(12):484-495.
- [45] Sun S, Dong F, Ehrlich H, et al. Metabolic Influence of Psychrophilic Diatoms on Travertines at the Huanglong Natural Scenic District of China[J]. *International journal of environmental research and public health*, 2014, 11(12):13084-13096.
- [46] Xie J, Strobel G, Xu W F, et al. Fungi as Architects of the Rimstone Dams in Huanglong, NSD, Sichuan, China[J]. *Microbial Ecology*, 2016:1-10.
- [47] 辜寄蓉, 范立学, 范晓. 基于灰色系统的黄龙钙华景观演化研究[J]. *中国地质*, 2007, 34(6):1148-1153.
- [48] 王振荣, 兰江华. 世界自然遗产黄龙钙华景观的地质分析[C]// 海峡两岸山地灾害与环境学术研讨会, 2009:1-8.
- [49] Dong F Q, Huang Z Y, Tan H B, et al. Effect of Additives on Calcium Sulfate Hemihydrate Whiskers Morphology from Calcium Sulfate Dehydrate and Phosphogypsum[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, 31(15):2037-2043.
- [50] Zhao X Q, Wang F D, Verheyden S, et al. Earthquake—related speleothem damages: observations from the 2008 Mw 7.9 Wenchuan, China[J]. *Geomorphology*, 2020, 358(2020):107130.
- [51] Pan L, Li Q F, Zhou Y, et al. Effects of different calcium sources on the mineralization and sand curing of CaCO_3 by carbonic anhydrase—producing bacteria [J]. *RSC Advances*, 2019, 9:40827-40834.
- [52] Wang F D, Dong F Q, Zhao X Q, et al. The large dendritic fissures of travertine dam exposed by Jiuzhaigou earthquake, Sichuan, southwestern China [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2018, 107(8):2785-2786.
- [53] Wang F D, Dong F Q, Zhao X Q, et al. The Lowest Boundary Age of Travertine in Dawanzhangjia Ravine, Huanglong, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2018, 92(2):879-880.

Biological effects on travertine forming in Xuebaoding drainage basin region

DONG Faqin^{1,2}, LI Gang^{1,2}, DAI Qunwei³, ZHOU Lin^{1,2}, WANG Fudong^{1,2}, ZHAO Xueqin^{1,2},
JIANG Zhongcheng⁴, ZHANG Qiang⁴, LI Bowen⁵, Enrico Capezzuoli⁶, Mike O'Driscoll⁷,
Anelka Plenkovic-Moraj⁸

(1. Key Laboratory of Waste Solid Treatment and Resource Recycle of Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 2. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 3. Fundamental Science on Nuclear Wastes and Environmental Safety Laboratory, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 4. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China; 5. Department of Materials Science and Engineering, Michigan Technological University, Houghton 49931, USA; 6. Department of Earth Sciences, University of Florence, Firenze 50121, Italy; 7. Department of Informed Industrial Mineral Forums & Research Ltd., Epsom KT17 4RH, UK; 8. Department of Biology, Faculty of Science, University of Zagreb, Rooseveltov trg 6, 10 000 Zagreb, Croatia)

Abstract Travertine not only has significantly ornamental value of landscape, but also has important research significance to determine the sedimentation law and environmental evolution of travertine and the role and contribution of environmental organisms in the same period. Based on the comparison of characteristics of typical travertine at home and abroad, this paper takes travertine in Huanglong and Jiuzhaigou region as examples to illustrate the sedimentation characteristics, environmental chemistry and biological effects of travertine in Xuebaoding drainage basin, and points out that the formation and evolution of cold water type travertine in Xuebaoding drainage basin are the results of the combined effects of chemical sedimentation-dissolution, biogeochemistry, biogenic sedimentation-dissolution, which are affected by non-biological and biological factors. In the formation process of cold-water travertine in Xuebaoding drainage basin, microorganisms participate in the sedimentation and dissolution process of travertine, promote the crystallization of calcium ions by metabolism, and induce the change of crystal form. Other organisms such as plants and algae either promote or accelerate the formation of travertine in an indirect way, or provide a template and volume for the growth of travertine.

Key words Xuebaoding drainage basin, travertine, sedimentary characteristics, biological effect, plant, microorganism

(编辑 张玲)