

董发勤,代群威,饶瀚云,等.黄龙与黄石钙华微生物沉积作用比较研究[J].中国岩溶,2021,40(2):264-272.
DOI:10.11932/karst20210206

黄龙与黄石钙华微生物沉积作用比较研究

董发勤^{1,2},代群威^{1,2},饶瀚云^{1,3},王富东^{1,2},赵学钦^{1,2},蒋忠诚⁴,张强⁴,
李博文⁵,Alexander I.Malov⁶,Enrico Capezzuoli⁷,Augusto Auler⁸

(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. 西南科技大学生命科学与工程学院, 四川绵阳 621010; 4. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541000; 5. Department of Materials Science and Engineering, Michigan Technological University, Houghton 49931, MI USA; 6. Federal Center for Integrated Arctic Research RAS, 23 Severnoy Dviny Emb., Arkhangelsk, 163061, Russia; 7. Department of Earth Sciences, University of Florence, Firenze 50121, Italy; 8. Instituto do Carste, Rua Barcelona 240/302, Belo Horizonte, MG, 30360-260, Brazil)

摘要:本文通过调查黄龙风景区水体的环境地质特征与微生物群落结构及多样性,并与黄石公园对比分析,探讨了两种特殊地理环境下的微生物群落结构和多样性及其对钙华沉积的影响。结果表明:黄龙沟泉水属于地下冷泉,且景区内覆盖着大量植被,水体中有大量藻类和细菌;黄石公园猛犸象温泉区泉水属于地下热泉,植被覆盖率很低,泉水中微生物多为嗜热菌,藻类较少。黄龙与黄石钙华主要由方解石组成并且微生物参与了钙华的形成过程。微生物对钙华沉积的作用,主要分为模板作用、产物诱导作用和代谢调控作用,对比探讨了特殊地质环境下的微生物对钙华沉积的贡献,指出微生物沉积作用在钙华沉积过程中的重要性,可为黄龙钙华“黑化”防治提供理论依据。

关键词:钙华;微生物;黄龙自然风景区;黄石国家公园

中图分类号:Q938;P5122

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2021)02-0264-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

我国黄龙自然风景区位于青藏高原东部边缘,比邻四川盆地,是中国唯一保存完好的高原湿地,海拔约为3 500 m,总面积约为700 km²,外围保护地带面积为640 km²。景观主要集中于黄龙沟中,沟中到处可见钙华景观^[1-2]。而美国黄石国家公园横跨黄石高原,海拔约为2 000 m,占地约为8 983 km²,包含有世界上最大型的陆地温泉区,由世界上最大的火山加热^[3],共有12 000多处温泉、间歇泉和喷泉^[4]。位于黄石公园西北方向的猛犸象温泉区是世界上已探明

的最大的温泉碳酸盐沉积,其景观主要以石灰石台阶为主。

我国黄龙自然风景区与美国黄石公园存在着大量的钙华沉积台地。然而,他们的水文、地质和生物等环境存在着很大的差别:黄石公园猛犸象温泉区是典型的地热环境,以热水型钙华为主,泉水中含有大量细菌,藻类较少,植被覆盖率较低,是世界上第二大活跃的钙华沉积场所^[5];黄龙自然风景区为高寒环境,以冷水型钙华为主,景区被大量植被所覆盖,水中含有大量藻类和细菌。

对钙华的大量研究表明,钙华沉积受非生

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:2020-05-10

物因素(如岩溶水和地貌位置等)与生物因素(藻类、细菌等微生物和苔藓植物)的影响^[6],这些因素复杂的共同作用,使钙华沿着水流沉积。其中,微生物对钙华结构和形态等方面发挥着相当重要的作用。但在夏季时,黄龙水体中大量的藻类失去水的涵养后氧化变黑,导致钙华黑化,严重破坏钙华景观^[7]。

本文基于课题组长期以来对黄龙自然风景区钙华的研究,从环境地质特征和微生物群落结构及多样性对比分析了黄石与黄龙特殊地质环境下的微生物对钙华沉积的作用,并为黄龙钙华“黑化”防治提

供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

黄龙沟样品采集布置如图 1 所示,从黄龙景区海拔最高的转花泉群开始,随着海拔降低沿着钙华分布处和水流方向,采集水样和钙华样,样品采用无菌袋包装,采集样品的同时记录海拔等地理环境参数。

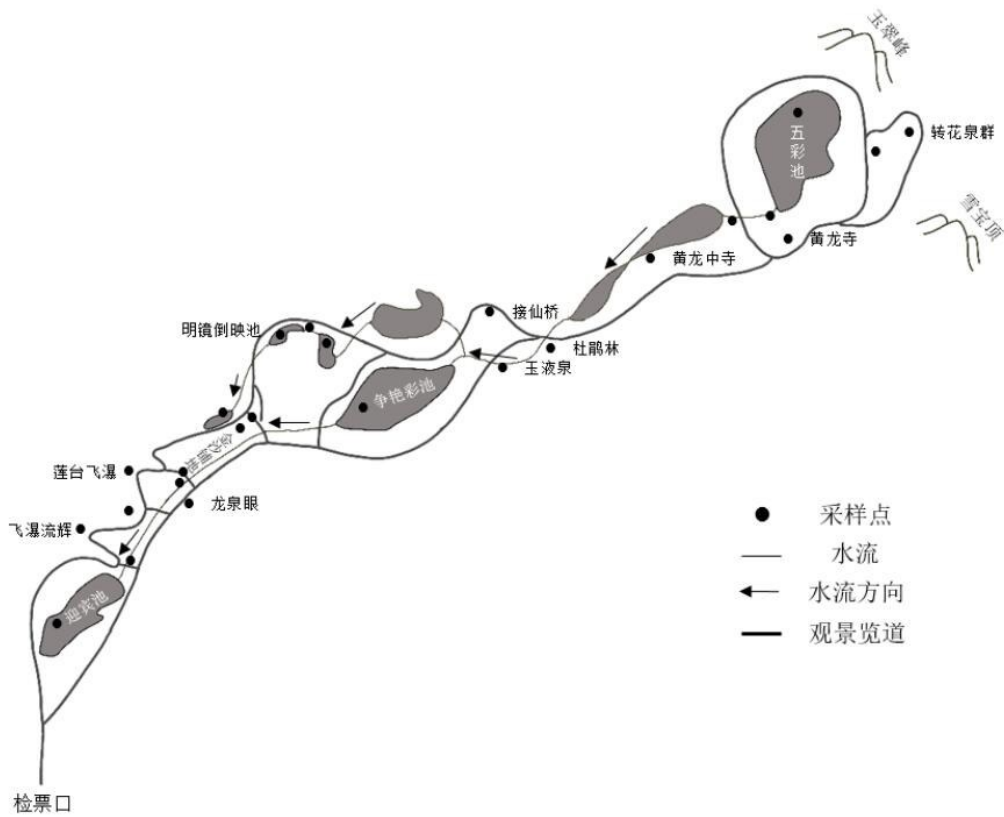


图 1 黄龙沟样品采集布置示意图
Fig. 1 Distribution of sampling points in Huanglonggou

1.2 水质分析

采用便携式水质测试仪现场测定温度(T)、酸碱度(pH)、电导率(Ec)、溶解氧(DO)和氧化还原电位(ORP);将水样过滤后,直接保存用于阴离子测试,酸化保存用于阳离子测试;HCO₃⁻现场滴定测试。所有待测样品低温保存,阳离子样品使用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-AES)测试,阴离子测试使用离子色谱仪(IC)测试。采样当天对其中HCO₃⁻,CO₃²⁻,SO₄²⁻等阴离子进行测试。Ca²⁺,Mg²⁺,K⁺等阳离子测试在实验室完成。

1.3 细菌数量测定

利用平板菌落计数法^[8]对各样品中的细菌数量进行测定,培养温度为 6 ℃

1.4 扫描电子显微镜观察

取部分钙华样在 40 ℃烘箱中干燥 24 h,采用西南科技大学分析测试中心的扫描电子显微镜(Ultra55, Carl zeissNTS GmbH, Germany)对钙华样进行表面形貌分析。

2 结果与讨论

2.1 环境地质特征对比

黄龙风景区的泉水海拔高(约为3 500 m),属于岩溶泉,是地下冷泉,泉眼处常年水温6℃左右,泉水中富含 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 等离子,含 SO_4^{2-} 和 Cl^- 较少。泉眼处及整个景区水流经过处,都覆盖着大量植被,水体中N、C元素含量丰富,除泉眼处pH值为6~7外,其他地方均在7.5~8.5之间,适宜普通微生物生长。相比之下,黄石公园的海拔较低(约为2 000 m),泉水主要属于地下热泉和间歇泉,水温多数在70℃以上,各泉间水质特性变化较大,所含阳离子主要是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 等,部分泉中 SO_4^{2-} 含量非常高,而一些泉水中 Cl^- 含量明显较高。而黄石公园水体特性决定其微生物多数为耐热、嗜硫类或嗜盐类微生物^[9]。

2.1.1 地质结构

黄龙风景区位于中国四川省雪宝顶区块,属高

原温带亚寒带季风气候,地表分布着石灰岩层、板岩和砂岩,并以碳酸盐岩为主,景区的钙华由于底部多暗河,气温较低。沉积形成的冷水型钙华主要由喀斯特作用形成^[10-11]。

黄石公园位于美国西部落基山脉的熔岩高原上,属高原山地气候,地热丰富,是极端地热环境。地表覆盖着一层火山熔岩,多属流纹岩,以硅酸盐岩为主,含硫量很高,并且由于降水量较多,盆地泉和湖泊众多,因此黄石多泉水和峡谷^[12]。

2.1.2 水质分析

(1)水质物理特性

如图2所示,总体来看,随着海拔降低,pH值逐渐增大,电导率逐渐减小。但黄龙风景区地表水随着泉水的加入会分成3个区间,水体pH值均为中性或弱碱性。每当泉水加入,水体pH值便会明显降低,电导率会明显增大。电导率与总离子浓度成正比,随着泉水加入,电导率突然增大,说明泉水中离子含量较高。

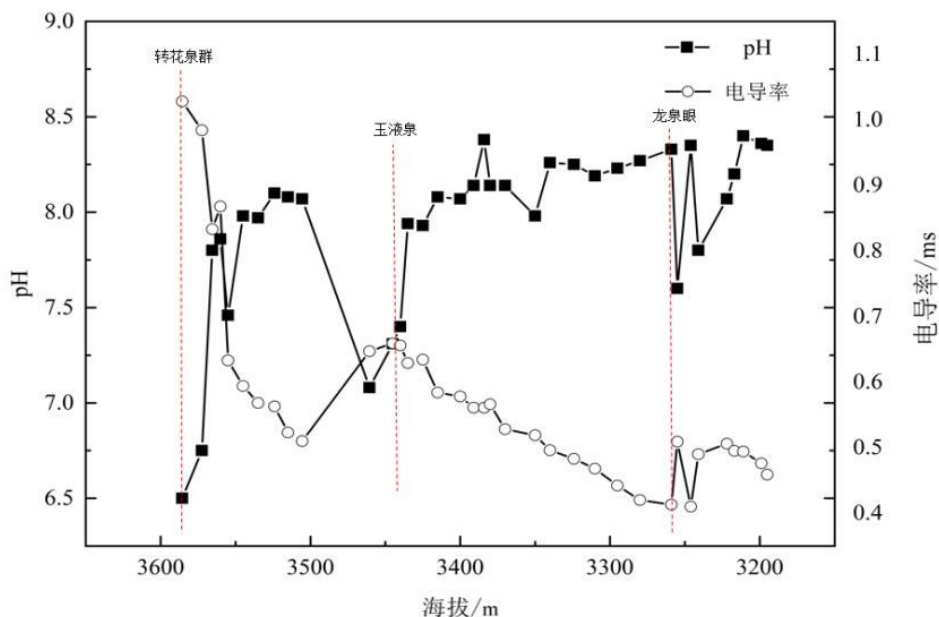


图2 黄龙沟水体pH电导率与随海拔变化趋势

Fig. 2 Variation trend of pH and conductivity with altitude in Huanglonggou water body

黄龙沟中的转花泉群、玉液泉和龙泉眼和黄石公园猛犸象温泉区的代表性温泉 Angel Terrace Spring 和 Canary Spring 的水质物理特性,如表1所示。结果表明黄龙风景区水体温度约为6℃,一般呈中性或弱碱性;Ball等^[13]测量了Angel Terrace Spring 和 Canary Spring 的相关水质物理特性数据,泉水温度高而

pH值呈弱酸性。

(2)水质离子含量

黄龙风景区水体中的离子浓度进行测试的结果表明:水体中的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度较高,大部分水质属 HCO_3^- -Ca型,少数属 HCO_3^- -Ca-Mg型;黄石泉水中的主要离子为 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} ,水质属于Ca-Na-

表 1 黄龙沟与猛犸象温泉区典型温泉水质物理特性对比

Table 1 Comparison of physical characteristics of water quality in typical hot springs between Huanglonggou and Mammoth Hot Spring area

采样点	海拔/m	T/℃	pH值	电导率/ms	Eh/mV	溶解氧/mg L ⁻¹
转花泉群	3 585.5	6.4	6.7	1.1	177.0	1.2
玉液泉	3 400.0	5.7	7.4	0.7	154.0	3.3
龙泉眼	3 255.0	6.7	8.1	0.5	209.0	3.6
Angel Terrace Spring ^[13]	2 025.0	73.5	6.4	2.2	−60.0	— — —
Canary Spring ^[13]	1 991.0	70.0	6.6	2.3	−1.0	— — —

HCO₃[−]-SO₄^{2−}型^[9]。

如图 3 所示,黄龙风景区的泉水 HCO₃[−]和 SO₄^{2−}浓

度随着海拔的降低而降低。但每当有其他泉水加入时,会使 HCO₃[−]和 SO₄^{2−}浓度变大。

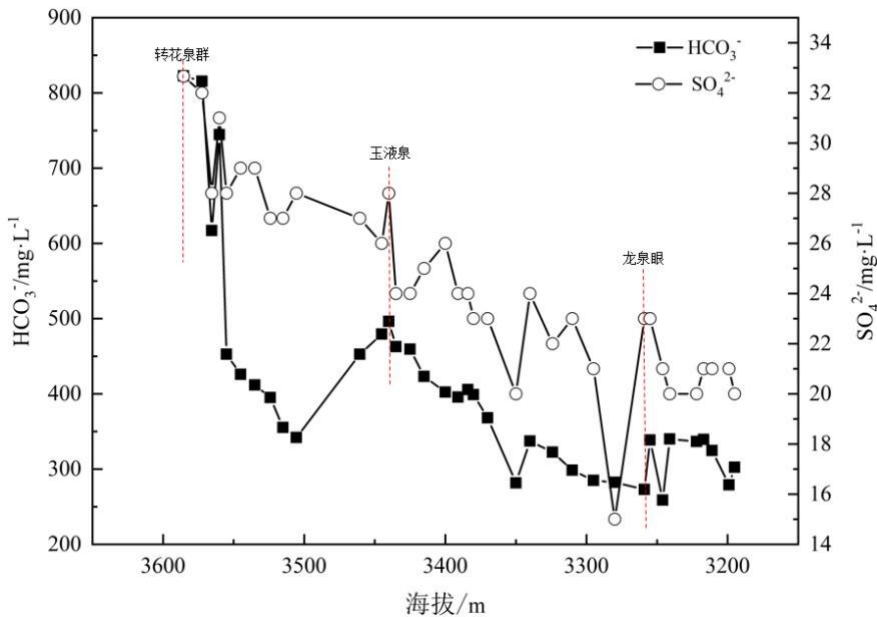


图 3 黄龙沟水体 HCO₃[−]与 SO₄^{2−}浓度随海拔变化趋势

Fig. 3 Variation trend of HCO₃[−] and SO₄^{2−} concentrations with altitude in Huanglonggou water body

如表 2 所示,Ball 等^[13]测量的黄石公园猛犸象温

泉区的两个代表性温泉 Angel Terrace Spring 和 Ca-

nary Spring 的各离子含量显示,泉水中的 HCO₃[−],SO₄^{2−},

Ca²⁺,Mg²⁺和 K⁺的离子浓度很高,且远远大于黄龙风景

区泉水中相应的离子浓度。

表 2 黄龙沟与猛犸象温泉区典型温泉水质离子含量对比

Table 2 Comparison of ion content of water quality in typical hot springs between Huanglonggou and Mammoth Hot Spring area

离子浓度/mg·L ⁻¹	HCO ₃ [−]	SO ₄ ^{2−}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Si ⁴⁺	K ⁺	Cl [−]
转花泉群	908.7	29.7	230.0	30.7	6.8	0.7	0.0
玉液泉	496.3	28.0	81.6	26.0	12.2	0.8	0.1
龙泉眼	335.3	20.0	100.2	18.9	3.9	0.4	0.0
Angel Terrace Spring ^[13]	782.0	546.0	316.0	73.4	51.0	50.2	163.0
Canary Spring ^[13]	709.0	564.0	298.0	74.3	50.0	42.9	163.0

2.2 微生物群落结构及细菌数量对比

不同的环境地质条件,会使微生物群落结构和多样性产生巨大差异。黄龙水体中发现了 14 个门类的细菌(以变形菌门为主),细菌数量在 1.0×10^4 CFU/mL 以上,同时鉴定出了 23 属 53 种淡水藻类(以硅藻为主)^[14-15],但是水体中所含大量的藻类易受环境变化的影响,产生水华或导致钙华“黑化”;猛犸象温泉中发现了 14 个门类以上的细菌(以产水菌门为主),细菌数量高达 1.8×10^6 CFU/mL,但藻类较少(以蓝藻为主)^[16]。

2.2.1 微生物群落结构

如表 3 所示,对比黄龙水体与猛犸象温泉中细菌门类。本课题组^[14-15]通过对黄龙水体的高通量测序及统计分析,得到了 5 429 个 OTUs,归属于 14 个门类,其中变形菌门是优势类群。Bruce^[16]在猛犸象温泉通过分子生物学技术,从水体中共得到了 654 个 OTUs,分属于 14 个门类,但是考虑到当时的技术限制,猛犸象温泉中的细菌门类数应该大于 14 个。

高温生境中的微生物群落通常仅由几种类型的微生物所控制^[17]。在温度与硫含量最高的泉眼处,产水菌门中的硫细菌(*Sulfurihydrogenibium yellowstonensis*)是绝对优势物种,细菌多样性较低;随着泉水流动,温度不断降低,产水菌分布逐渐减少,细菌多样性逐渐增大;中游水池中的细菌多样性最高,以 β -变形菌为主;在远坡处则以 α -变形菌为主^[16]。

从黄龙的水体中鉴定出 6 个门类的藻类^[15]:蓝藻门(Cyanophyta)、金藻门(Chrysophyta)、黄藻门(Xanthophyta)、裸藻门(Euglenophyta)、硅藻门(Bacillariophyta)和绿藻门(Chlorophyta),共 23 属 53 种淡水藻类。从鉴定出的藻类来看,硅藻占绝大部分,其次是绿藻和黄藻,蓝藻较少。但是,由于猛犸象温泉属于极端地热环境,大多数藻类不宜存活,所以藻类较少,发现的藻类主要以蓝藻为主。

2.2.2 细菌数量

在对黄龙水体的细菌数量监测中发现,随着海拔高度降低和水流延伸, HCO_3^- 浓度和 pH 值下降,细菌数量却未发生相应的变化。水体中的微生物数量均在 1.0×10^4 CFU/mL 以上,且水流缓慢的泉水和彩池中的细菌数量较滩流水体中的细菌数量略高。

Bruce^[16]对黄石公园猛犸象温泉细菌数量的测定结果表明,细菌数量会随着水体流动而发生变化。

表 3 黄龙水体与猛犸象温泉细菌门类统计分析^[14,16]

Table 3 Statistical analysis of bacteria in Huanglong water body and Mammoth Hot Spring area^[14,16]

细菌门类/地区	黄龙 水体	猛犸象 温泉
产水菌门(Aquificae)	—	✓
热微菌门(Thermomicrobia)	—	✓
网团菌门(Dictyoglomi)	—	✓
疣微菌门(Verrucomicrobia)	✓	—
衣原体门(Chlamydiae)	✓	—
异常球菌栖热菌门(Deinococcus—Thermus)	✓	—
变形菌门(Proteobacteria)	✓	✓
厚壁菌门(Firmicutes)	✓	✓
蓝藻门(Cyanobacteria)	✓	✓
拟杆菌门(Bacteroidetes)	✓	✓
芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)	✓	✓
放线菌门(Actinobacteria)	✓	✓
绿弯菌门(Chloroflexi)	✓	✓
浮霉菌门(Planctomycetes)	✓	✓
绿菌门(Chlorobi)	✓	✓
酸杆菌门(Acidobacteria)	✓	✓
螺旋体门(Spirochaetes)	✓	✓

在水流较平缓的地方,微生物细胞数量可达 1.8×10^6 CFU/mL,而在泉水流速较快的地方,细胞数量可达到 2×10^5 CFU/mL。

二者细菌结果的不同是由于黄石公园内的水流来源于热泉,水体在流动过程中 pH 值、温度、 HCO_3^- 及 SO_4^{2-} 等均发生较大变化,所以随水体的延伸各点的细菌数量有较大变化;而黄龙沟内的水体为连续水系,源头的细菌随流水而下,故各点所测得的细菌数量变化也不大。

2.3 钙华的矿物特征与钙华沉积的微生物作用

物理、化学与生物因素复杂的共同作用影响着钙华沉积,其中生物因素非常重要,微生物对钙华沉积的作用主要分为模板作用、产物诱导作用和代谢调控作用等^[18-19]。

不同地区的微生物的群落结构和多样性差异会导致钙华的结构和组成不同。黄龙景区水体中的藻类会分泌的胶质鞘或胶质柄,通过粘结、捕获等方式富集沉积 CaCO_3 细颗粒形成藻席(图 4a),藻席成层堆积和侧向延伸,与水文、地形等因素共同引导和控制

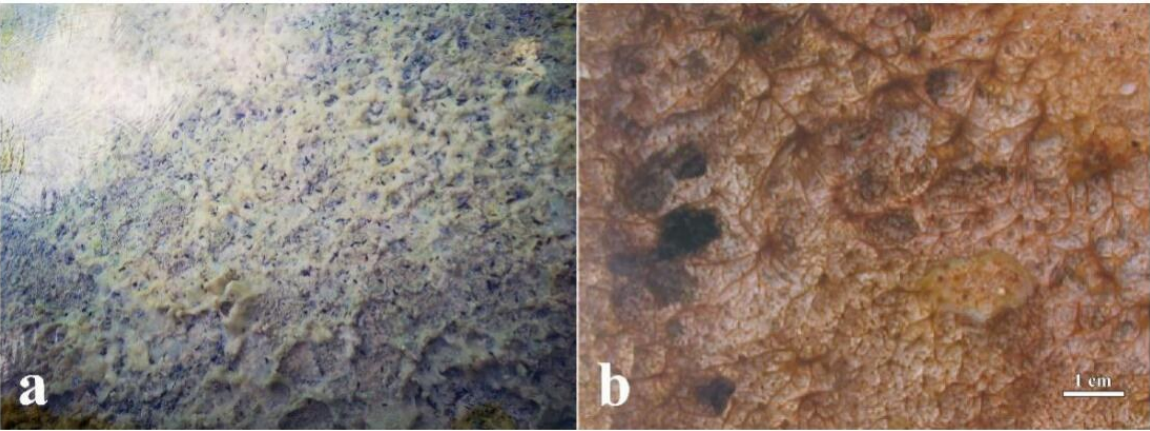


图 4 黄龙沟泉水中的藻席与猛犸象温泉中的微生物垫 a:藻席;b:微生物垫^[16]
Fig. 4 Algae mat in Huanglonggou spring water and microbial mat in Mammoth Hot Spring a: algal mat; b: microbial mat^[16]

钙华景观的形成^[20]。而猛犸象温泉中的细菌生长在微生物垫(microbial mats)中(图 4b),并呈现出各种各样的颜色和形状^[16],它们的生长速度甚至比钙华沉积的速度还要快^[4]。

2.3.1 钙华的矿物特征

黄龙钙华沉积速度相对缓慢,为0.43~4.7 mm/a^[21],主要是由方解石型碳酸钙和少量文石型碳酸钙组成,并且钙华中存在有机基团,表面有因微生物影响

而形成的沟槽和孔隙^[22]。通过扫描电镜观察黄龙钙华(图 5),发现硅藻参与了钙华的沉积。

黄石钙华沉积速度非常快,最快可达5 mm/d^[16],由一种独特的文石针和方解石晶体组合而成,但随着泉水从泉眼流出,顺流而下的过程中,钙华组成从文石为主转变为文石和方解石的混合物,再转变为方解石为主^[23-24]。同时,钙华中检测到的与产水菌和变形菌有关的基因序列,证实了微生物参与了黄石钙华的沉积^[25]。

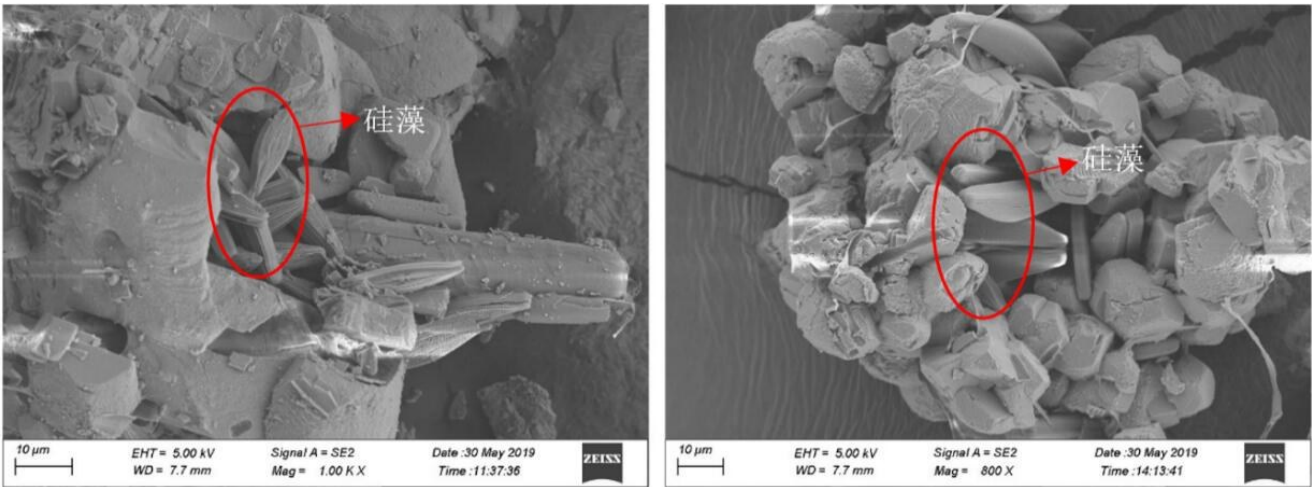


图 5 黄龙钙华扫描电镜观察
Fig. 5 Observation of Huanglong travertine by scanning electron microscope

2.3.2 钙华沉积的微生物作用

(1)代谢调控作用

生物代谢过程中的光合作用、呼吸作用、硝酸盐的吸收和代谢、细菌硫酸盐还原作用和古菌产甲烷作用等,通过改变水体中CO₂分压以及周围环境pH值,引发碳酸钙沉积^[26]。

黄龙风景区的水体中分布着大量的藻类和细菌,而它们的光合作用和呼吸作用会消耗或补充水体中的CO₂,调节大气和水体中的CO₂分压,影响钙华的沉积速率^[6]。蓝藻和其他光养生物被认为在光合作用过程中吸收了水中的二氧化碳,减小了水体中的CO₂分压,会增大钙华的沉积速率^[27]。但是水体中

所存在的细菌通过呼吸作用释放的 CO_2 会减缓钙华的沉积速率。通过调整 CO_2 分压,影响钙华沉积的方程式如下:



而黄石公园猛犸象温泉区由于水温较高,大多数常见微生物都无法在其泉水中存活,藻类较少,以蓝藻为主。在其泉眼处,大量特有的硫细菌(*Sulfurihydrogenibium yellowstonensis*)利用水体中存在的 HS^- 进行光合作用时,会提高周围微环境中的 pH 值,从而促进碳酸钙沉淀^[28],方程式如下:



(2) 产物诱导作用

微生物在生长的过程中产生的有机酸、蛋白质、糖类有机质,被称为胞外聚合物(Extracellular Polymeric Substances, EPS),可以诱导或抑制碳酸钙沉积,并改变晶体形貌。董发勤课题组^[29-32]研究表明, EPS 可以明显地改变钙华表面性质并影响碳酸钙沉积:从黄龙水体中分离得到的优势土著嗜冷细菌所分泌的柠檬酸过高会侵蚀方解石并溶解 Ca^{2+} ,抑制钙华沉积,并改变其形貌;但是, D-葡萄糖和 D-核糖会促进碳酸钙沉积。Okumura^[33]发现,由于 EPS 的钙结合能力,蓝藻生物膜的发育会抑制钙华的形成。有研究表明^[34-35], EPS 会导致周围环境带负电,从而吸引周围水体中带正电的金属离子,有利于碳酸钙沉积;不同的不饱和基团与生物分子自身结构,能够控制晶体产生不同的形貌。

(3) 模板调控作用

碳酸钙沉积发生在成核中心处,生物体表面突起、微生物细胞壁和 EPS 都能为碳酸钙提供成核及生长位点,从而捕捉、黏附或沉积碳酸钙颗粒^[26]。作为 EPS 的组成成分,蛋白质和多糖也会通过改变沉淀的活化能来改变 CaCO_3 成核速率^[36-37]。

黄龙风景区中的细菌和藻类众多,都可以作为碳酸钙沉积的模板,形成疏松多孔型钙华,扫描电镜下发现钙华中存在硅藻外壳(图 5)。黄石公园中的藻类虽然不多,但是细菌数量非常大,并且其微米尺度的天然模板作用,导致细菌必然会在不同程度上参与到钙华的沉积过程中。Bruce^[38]认为,由于钙华沉积速度非常快,微生物为了在这种快速结晶的环境中存活下来,必须迁移到结壳晶体的顶部,或者快速分裂并横向移动到新的底物上,在这过程中,以产水菌门细菌为主的微生物会形成微生物丝,通过模板调控作用形成微管钙华。同时,彭晓彤等^[39]也发

现,温泉中的蓝细菌细胞壁外或鞘层外的 EPS 可以提供成核位点。

3 结 论

黄龙风景区黄龙沟和黄石国家公园猛犸象温泉的环境地质、微生物群落结构和生物多样性差异很大,由此导致两地钙华的微生物沉积作用不同。

(1) 黄龙沟泉属地下冷泉,常年水温 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,含碳酸盐较高,硫酸盐及氯盐较低,钙华沉积速率慢。黄石公园猛犸象温泉区属于热泉,泉眼处水温在 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,含碳酸盐、硫酸盐、氯盐较多,钙华沉积速率很快;

(2) 黄龙水体中含有大量藻类和细菌,特别是大量的藻类会形成藻席,藻类的光合作用与呼吸作用都会影响着钙华的沉积速率,同时微生物的模板调控作用所形成的钙华多为疏松多孔型。而黄石公园热泉中,藻类较少,细菌较多,热泉型钙华沉积的微生物作用主要由细菌参与,以硫细菌为主的产水菌门细菌通过模板作用结合碳酸钙颗粒形成微管钙华;

(3) 黄龙冷泉与黄石热泉水体中的微生物可以通过代谢调控作用、产物诱导作用和模板调控作用影响着钙华的沉积,微生物在钙华沉积过程中发挥着重要作用;

(4) 黄龙风景区存在大量的藻类,藻类失去水的涵养死亡后,会导致钙华“黑化”。钙华“黑化”防治工作主要应以控制藻量和钙华沉积速率为主,应及时清理植物和人为污染物,并适时清理水体中过多的藻类。

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] 冯晨旭,董发勤,代群威,等. 黄龙钙华纹层石特征与成因分析[J]. 矿物学报, 2019, 39(1): 55-63.
- [3] Asangba A E. Microbial phylogenetic diversity preserved in facies-specific modern, recent, Holocene and Pleistocene hot-spring travertine deposits of Yellowstone and Turkey [D]. 2015.
- [4] Fournier R O. Geochemistry and dynamics of the Yellowstone National Park hydrothermal system [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1989, 17(1): 13-53.
- [5] Smith R B, Siegel L J. Windows into the Earth: the geologic

- story of Yellowstone and Grand Teton National Parks [M]. Oxford University Press, 2000.
- [6] 李永新, 田友萍, 李银. 四川黄龙钙华藻类及其生物岩溶作用[J]. 中国岩溶, 2011, 30(1):86-92.
- [7] 张金流. 黄龙钙华景观退化的人为和自然影响机理研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.
- [8] 李华. 平板菌落计数的改进方法[J]. 生物学通报, 2006, 41(1):51-51.
- [9] 孙仕勇, 王富东, 赵学钦. 四川黄龙钙华沉积剖面的矿物学特征及其指示意义[J]. 地球科学前沿(汉斯), 2016, 06(04): 283-290.
- [10] 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[C]//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. 北京: 中国矿物岩石地球化学学会, 2013.
- [11] 张金流, 唐淑. 黄龙自然风景区地表水流量减少原因初探[J]. 世界科技研究与发展, 2015, 37(6):688-691.
- [12] Guidry H S C S A . Deposition and diagenesis of Mammoth Hot Springs travertine, Yellowstone National Park, Wyoming, U.S.A.[J]. Canadian Journal of Earth sciences, 2003, 40(11):1515-1529.
- [13] Ball, J.W., McCleskey, et al. Water—chemistry data for selected springs, geysers, and streams in Yellowstone National Park, Wyoming, 2003—2005, U.S.[R]. Geological Survey Open—File Report, 2006.
- [14] 肖玉军. 黄龙风景区水体细菌多样性研究[D]. 四川农业大学, 2013.
- [15] 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.
- [16] Fouke B W. Hot-spring Systems Geobiology: abiotic and biotic influences on travertine formation at Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, USA [J]. Sedimentology, 2011, 58(1):170-219.
- [17] William P. Inskeep, Zackary J. Jay, Susannah Green Tringe, et al. The YNP Metagenome Project: Environmental Parameters Responsible for Microbial Distribution in the Yellowstone Geothermal Ecosystem[J]. Frontiers in Microbiology, 2013, 4:67-67.
- [18] Konhauser, K. Introduction to Geobiology [M]. London: Blackwell Publishing, 2007.
- [19] Ehrlich, H.L. and Newman, D.K. Geomicrobiology [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [20] 张存凯. 黄龙藻类群落结构分析及优势类群对碳酸钙沉积的影响[D]. 西南科技大学, 2017.
- [21] 刘再华, 袁道先, W.Dreybrodt, 等. 四川黄龙钙华的形成[J]. 中国岩溶, 1993(3):4-10.
- [22] 陈超. 生物有机质对黄龙钙华沉积和退化的影响研究[D]. 西南科技大学, 2018.
- [23] Fouke B W, Farmer J D, Marais D J D, 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.
- [24] Martín H G, Veysey J, Bonheyo G T, et al. Statistical evaluation of bacterial 16S rRNA gene sequences in relation to travertine mineral precipitation and water chemistry at Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, USA [M]//Geomicrobiology: Molecular and Environmental Perspective. Dordrecht: Springer, 2010.
- [25] Madigan, M.T., Martinko, J.M. and Parker, J. Brock. Biology of Microorganisms [M]. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2006.
- [26] 汪智军, 殷建军, 蒲俊兵, 等. 钙华生物沉积作用研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2019, 34(6):606-617.
- [27] Raven J A, Giordano M. Biomineralization by photosynthetic organisms: Evidence of coevolution of the organisms and their environment?[J]. Geobiology, 2009, 07(2): 140-154.
- [28] Martina Merz—Preiß, Riding R. Cyanobacterial tufa calcification in two freshwater streams: ambient environment, chemical thresholds and biological processes[J]. Sedimentary Geology, 1999, 126(1):103-124.
- [29] 陈超, 李琼芳, 张清明, 等. 低温环境下两种氨基酸对碳酸钙矿化影响的研究[J]. 高校地质学报, 2017, 23(4): 606-614.
- [30] 于璐嘉, 李琼芳, 陈超, 等. 黄龙嗜冷细菌两种胞外单糖对碳酸钙矿化影响[J]. 岩石矿物学杂志, 2018, 37(3): 497-504.
- [31] 李琼芳, 董发勤, 李骥言, 等. 柠檬酸对黄龙碳酸钙矿化影响的模拟实验研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(02): 294-300.
- [32] Li Q, Dong F, Dai Q, et al. Surface properties of PM2. 5 calcite fine particulate matter in the presence of same size bacterial cells and exocellular polymeric substances (EPS) of *Bacillus mucitiginosus* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(23):22429-22436.
- [33] Okumura T, Takashima C, Shiraishi F, et al. Processes Forming Daily Lamination in a Microbe—Rich Travertine Under Low Flow Condition at the Nagano—yu Hot Spring, Southwestern Japan [J]. Geomicrobiology Journal, 2013, 30(10):910-927.
- [34] 钟怡江, 文华国, 陈洪德, 等. 胞外聚合物在蓝细菌钙化过程中的作用及其地质意义[J/OL]. 沉积学报: 1—30 [2021—01—22]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.102>.
- [35] 钱江, 吴文涛, 周跃飞, 等. 硫酸盐还原菌对碳酸钙结晶过程的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(01):109-116.
- [36] Mann S. Biomineralization: principles and concepts in bioinorganic materials chemistry [M]. Oxford University Press on Demand, 2001.
- [37] Weiner S, Dove P M. An overview of biomineralization processes and the problem of the vital effect[J]. Reviews in mineralogy and geochemistry, 2003, 54(1):1-29.

- [38] Fouke B W, Bonheyo G T, Sanzenbacher B, et al. Partitioning of bacterial communities between travertine depositional facies at Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, USA[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 2003, 40(11): 1531-1548.
- [39] 彭晓彤, 周怀阳, 吴自军, 等. 热泉微生物的矿化作用和机制: 来自华南富硅热泉光合自养微生物席中的证据[J]. 科学通报, 2007, 52(1):89-99.

Comparative study on microbial deposition of travertine in Huanglong scenic area and Yellowstone National Park

DONG Faqin^{1,2}, DAI Qunwei^{1,2}, RAO Hanyun^{1,3}, WANG Fudong^{1,2}, ZHAO Xueqin^{1,2}, JIANG Zhongcheng⁴, ZHANG Qiang⁴, LI Bowen⁵, Alexander I. Malov⁶, Enrico Capezzuoli⁷, Augusto Auler⁸

(1. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Recycle, Ministry of Education, Mianyang, Sichuan 621010, China; 2. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 3. School of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 4. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004, China; 5. Department of Materials Science and Engineering, Michigan Technological University, Houghton 49931, MI USA; 6. Federal Center for Integrated Arctic Research RAS, 23 Severnoy Dviny Emb., Arkhangelsk, 163061, Russia; 7. Department of Earth Sciences, University of Florence, Firenze 50121, Italy; 8. Instituto do Carste, Rua Barcelona 240/302, Belo Horizonte, MG, 30360-260, Brazil)

Abstract This paper analyzes the environmental geological characteristics and microbial community of the water body in Huanglong scenic area. By comparing relevant studies in Yellowstone National Park, the effects of microbial communities on travertine deposition in two special geographical environments were discussed. By comparing Huanglonggou in Huanglong scenic area with the Mammoth Hot Spring area in Yellowstone National Park, it is found that Huanglonggou spring water belongs to underground cold spring with a lot of algae and bacteria, and the scenic area is covered with a lot of vegetation; While the spring water in Mammoth Hot Spring area belongs to underground hot springs with low vegetation coverage, and the microorganisms in the spring water are mostly thermophilic bacteria with few algae. In addition, the main components of Huanglong and Yellowstone National Park travertine both are calcite, and microorganisms are involved in the formation of travertine. The effect of microorganisms on travertine deposition is mainly divided into template effect, product induction effect and metabolic regulation effect. By comparing the effects of microorganisms on travertine deposition in special geographical environment, the importance of microbial deposition in travertine deposition process was pointed out, which could provide a theoretical basis for the prevention and control of "blackening" of travertine in Huanglong.

Key words travertine, microorganisms, Huanglong scenic area, Yellowstone National Park

(编辑 张玲)