

蒋忠诚,代群威,董发勤,等. 国内外钙华岩溶景观的研究进展与展望[J]. 中国岩溶, 2021, 40(1): 4-10.
DOI: 10. 11932/karst20210101

国内外钙华岩溶景观的研究进展与展望

蒋忠诚¹, 代群威², 董发勤², 张强¹, 党政³, 汪智军¹, 刘凡¹

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004; 2. 西南科技大学环境与资源学院, 四川绵阳 621010; 3. 西南科技大学应用技术学院, 四川绵阳 621010)

摘要: 利用计量学软件 Citespace 处理分析 2008—2020 年间国内外文献, 揭示钙华研究在基于同位素技术的钙华成因、钙华景观特点及地貌演化、钙华生物成因和钙华景观退化等方面取得的重要研究进展, 阐明了全球钙华景观的分布、特点、物质组成、成因类型及典型钙华景观退化的现状和原因, 推动了钙华自然遗产景观的保护及钙华研究的国际合作。目前, 急需加强钙华内生动力与外生动力的复合作用、微生物对钙华沉积的耦合作用、钙华景观退化的微观结构表现等方面的基础研究及钙华景观生态修复保育关键技术的研发。

关键词: 钙华; 岩溶景观; 自然遗产; 研究进展; 展望

中图分类号: P642.25 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2021)01-0004-07 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

钙华(tufa), 又称石灰华(calcareous tufa), 是在地表由岩溶水沉积的大孔隙性次生碳酸钙, 有的可堆积成巨大的台地^[1], 在世界各地广泛分布^[2], 很多成为举世闻名的地表岩溶沉积景观, 如中国黄龙、九寨沟和白水台钙华, 土耳其棉花堡钙华, 美国黄石公园猛犸象温泉钙华, 克罗地亚普利特维采湖钙华等^[3-10], 由于其景观奇特壮观秀丽, 往往成为世界自然遗产地和著名风景名胜。近年来, 随着知名钙华景区旅游压力的增大, 钙华景观保护问题越来越受人关注, 吸引了众多学者从事钙华的研究与保护, 2021年2月成立了“世界钙华自然遗产研究与保护联盟(WAT-World Allian for Research and Conversation of Tufa/Travertine Natural Heritage)”, 钙华研究成为国际岩溶研究新的发展方向。

本文利用计量学软件 Citespace 处理分析 2008—

2020 年间国内外文献, 梳理出钙华研究领域的知识结构和研究趋势(图1), 图中每个节点关键词代表一个研究方向, 节点年轮的大小和厚度分别代表了研究方向的出现频次和数量, 对图中节点的大小及相互联系进行聚类可以确定该领域的研究趋势和知识结构^[11]。

基于 WOS 核心库和 CNKI 数据库的研究趋势, 前期钙华的国内外研究可归纳为 4 个方面(图1): (1) 基于同位素技术的钙华成因研究(I); (2) 钙华景观特点及其地貌演化研究(II、III 和 IV); (3) 钙华生物成因研究(V 和 VI); (4) 钙华景观退化研究(VII)。

1 基于同位素技术的钙华成因探究

钙华的形成是岩溶水体中 CO₂ 脱气反应的伴生产物, 脱气过程的方程式为 $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3(\text{g})$, 这一过程已在国际上形成共识^[7]。对

基金项目: 国际地球科学计划(IGCP661); 国家自然科学基金面上项目(41571203, 41973053)

第一作者简介: 蒋忠诚(1962—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 岩溶生态学。E-mail: jzhongcheng@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期: 2020-11-30

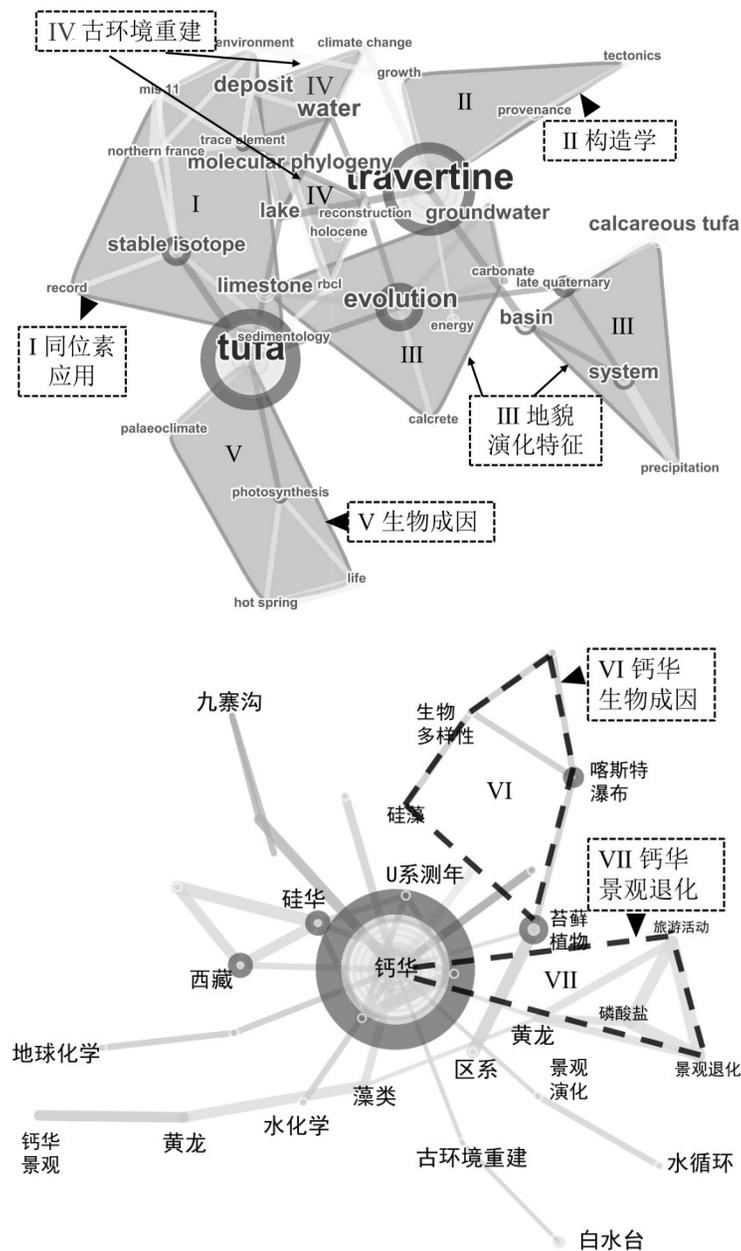


图 1 钙华知识域变化和趋势

Fig. 1 Map showing changes of knowledge domain and research tendency of tufa/travertine

于脱气过程,研究者往往注重判断水体中 HCO_3^- 来源,以期进行泉眼和钙华分类。早期研究中地质学家主要通过沉积区域的地质条件来判断钙华成因,现代主要通过碳的稳定同位素技术来判定。在地质构造活跃的山区,深层幔源 CO_2 通过断裂构造上升到岩溶系统,溶解围岩在泉水中产生大量 HCO_3^- ,脱气后形成钙华。这类钙华(travertine)为内生成因,其碳稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于地幔来源区间的 $-4\text{‰} \sim -11\text{‰}$ ^[12],在刘再华等^[13]对黄龙沟泉水 HCO_3^- 来源的研究中,由黄龙转花泉水中 CO_2 气体的

碳稳定同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (-6.8‰) 介于地幔来源区间而确定 HCO_3^- 来源于深层 CO_2 。在地质条件比较稳定的山区,没有深层幔源 CO_2 的输入,岩溶水中的 CO_2 主要来自大气和土壤,土壤生物成因的 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -25‰ (变动范围为 $-16\text{‰} \sim -28\text{‰}$)^[12],溶蚀碳酸盐岩形成泉水中的 HCO_3^- 和地表钙华,这类钙华(tufa)为表生成因^[7,10,14-15]。

Pentecost, Robert 和 Capezuoli 等^[7,9-10]认为,深层 CO_2 来源的另外一个特征与泉水温度有关,例如,意大利亚平宁山脉分布的钙华泉眼温度超过 $20\text{ }^\circ\text{C}$,美

国黄石公园的钙华泉眼水温在70℃以上^[16],中国西藏和云南也分布着众多热泉钙华^[17-18]。此外,内生成因岩溶水中的CO₂分压高,钙华沉积速率大,一般高于10 mm·a⁻¹,例如,在印度尼西亚Pancuran Pitu的大型钙华丘,日均沉积速率为0.43 mmol⁻¹·cm⁻²·d⁻¹^[19],存在沉积过程中受生物因素控制较弱,有较高沉积速率,多形成较好的层状结构,原生孔隙度较低,生物含量较低,矿物成分多为方解石、文石。区别于热成因钙华,表生成因钙华沉积过程可能受生物因素主控,沉积速率较低,原生孔隙度普遍较高,多含有丰富的大型、微型植物和无脊椎动物残体,矿物成分多为方解石^[10]。

2 钙华景观特点及地貌演化研究

泉流钙华的沉积从岩溶泉眼开始,由于上升泉中HCO₃⁻浓度较高,形成囱状堆积体;随后泉水沿河道向下游运移,在此期间,由于下游地形环境因素的差异,钙华沉积形成的堆积地貌产生差异,如高原山地常发生泥石流、滑坡等地质灾害,形成大小不一的堰塞湖,在此基础上形成了湖坝景观。另外,在地形起伏情况下,钙华在坎地形成堆积坝体,不断加高加厚,形成池坝景观;在一些坝体或者地势陡变区域,往往发育着瀑布和梯级叠瀑景观;下游及地势平缓地区,分布着各类冲积扇,形成湖泊沼泽等景观^[7-8,20]。钙华形成受地形影响,在地质活动的推动下,对地形地貌造成不同程度的改造^[7,10,21-23]。

钙华在欧洲伊比利亚半岛、亚平宁半岛、巴尔干半岛和小亚细亚半岛的岩溶地区广泛分布^[24-28],如意大利中部沿亚平宁山脉^[23]和西班牙东北部伊比利亚山脉^[24-26]广泛发育着钙华堆积体。山地往往存在大量的海相碳酸盐岩,为岩溶发育提供了丰富的物质基础,而山区多分布在季风气候,周期性降水保证了钙华的运移和沉积。Pedley等^[26]分析西班牙Rio Tajuña峡谷边缘处丘陵区的泉流线和钙华成因,提出了泉流、沼泽、河流和湖泊4类钙华沉积模型,其中泉流钙华往往随流线沿坡度沉积,沼泽类钙华在坡度下端沉积。Marta Vázquez-Urbez等^[27]调研伊比利亚山脉北部地区的峡谷钙华出露层,发现河道范围内的钙华岩层出现6种断面,分别对应着漫流式、叠坡式、池塘式3种水力条件,这些都是峡谷区域钙华堆积体的标志形貌,另外,生物作用造成叠瀑或梯式池群的产生。Eva De Boever等^[29]对比土耳其Denizli盆

地的第四纪钙华地质体与美国黄石公园的梯田式钙华池群,发现钙华堆积地貌在相似水力和地形条件下相似。

钙华景观受地质灾害和人类活动的影响很大,“8.8”九寨沟地震造成景区部分钙华核心遗产点受到严重损毁^[30-32]。黄龙景区在超负荷旅游压力下,地表水下渗过快,水质污染,导致钙华景观失水退化,局部出现大量钙华变黑现象^[33-34],甚至被媒体报道称“黄龙变黑龙”,钙华的修复保育引起全世界关注。

3 钙华生物成因研究

20世纪70年代以来,部分学者^[7,35-36]已经开始对岩溶河道周围的堆积体进行生物样本采集,对其形态的描述中多提到样品边缘存在生物模板。钙华水体中微生物具有庞大的生物量,因此,生物在钙华沉积过程的作用不可忽视^[37-42]。

李骥言等^[43]发现黄龙水体中嗜冷菌产生的琥珀酸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。Kim等^[44]发现黄石公园中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。Sun等^[45]认为在温暖季节里硅藻所产生的胞外聚合物会保护钙华免受HCO₃⁻的蚀刻,并且为钙华的沉积提供样板。

Xie等^[46]提出真菌在钙华沉积过程中扮演“建筑师”的角色,坝壁附着真菌及其菌丝诱导碳酸钙结晶并提供成核位点,就像方解石长出了“触角”一样,随着时间的推移“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本区域内钙华坝的结构特征。每个晶体上存在的小孔表明菌丝促进方解石形成,所形成的小晶体最终融合到整个钙华大坝的矩阵中。

代群威等^[47]提出了钙华天然海绵地质体概念,强化钙华在自然沉积与地下溶蚀过程中,形成的多孔性地质结构及其对循环的调节功能。钙华天然海绵地质体包括微观空隙、可视孔隙和大型孔隙,其中微观空隙主要由硅藻体产生,其有数量较大的纳米级孔道[100 nm×(100~500)nm],这些生物纳米级格栅孔道大量存在于钙华体中,起到很好的渗透水、净化水作用;可视孔隙是由藻类和植物与钙华共生沉积所形成,有较好的含水、透水、蓄水、排水功能。

4 钙华景观退化研究

钙华是自然界演化的产物,其产生与消亡对应着地质演化的不同阶段,一般情况下,钙华堆积体发育后期多以水道改变为诱因而逐步停止生长或因溶蚀风化而消亡^[23]。

对九寨沟和黄龙沟钙华演化研究中发现,水流改道和水化学性质的改变是钙华景观寿命变化的关键^[48-52],在稳定的水循环和水化学基础上,钙华景观存在溶蚀和沉积的平衡,多数情况下,钙华景观生长速率大于溶蚀速率。胥良等^[3]对黄龙沟景区钙华沉积区的研究发现,多数景观处于沉积发育区。近年来,黄龙沟景区出现了部分黑化和干涸彩池群,而多年来黄龙沟补给水源无下降趋势^[53],同时区内还有其他外源水补给,说明区内的水量是稳定和充裕的。但水体在向下游地表、地下径流循环转化的过程中,水量呈逐渐减少的状态,这个与钙华地质体特殊的“海绵”结构有关。代群威等^[47]通过多年的实地踏勘和物探技术,从钙华孔隙结构分析了黄龙沟地表水向下游运移过程中的漏失原因,提出了不同尺寸孔径的孔隙结构对应着透水、持水和排水功能。

水化学中营养物质浓度的增加是钙华景观受损的另一标志^[54-61]。由于旅游开发,景区内人流量增大,人为活动产生的N、P类物质增多,水体富营养化程度呈升高趋势。由于水体富营养化,水中生物群落发生变化,部分藻类种群数量迅猛上升,而藻类的过度繁殖会覆盖钙华基底,对景观美学价值造成直观影响^[55],另外,藻类参与钙华沉积,藻群过度繁殖会减弱新生钙华的胶结,使得新生钙华层空隙广泛发育,导致钙华易风化脱落^[56-58]。张金流等^[59]通过研究旅游期间水化学中N、P类物质浓度变化与藻类的响应,认为人为源的营养物质的进入导致藻类过量生长,造成景观受损。乔雪等^[60-61]认为九寨沟的大气质量与钙华退化存在关联性,大气环境中含N、S元素的物质沉积会影响水体水化学性质和营养物质浓度,造成钙华景观的受损。

5 研究展望

5.1 内生与外生成因的复合沉积

国际上将钙华分为内生钙华和外生钙华两种类型,并通过测试钙华碳同位素、水中二氧化碳浓度、泉水温度、钙华沉积速度等指标予以区分,但中国的

黄龙、中甸等地的钙华,除碳同位素指标值落在二氧化碳地幔来源的区间外,水中二氧化碳浓度、泉水温度、钙华沉积速度等指标^[13,62]均没有达到内生钙华的指标,由此导致了黄龙等地钙华究竟是内生钙华还是外生钙华的争议,这也体现出中国大型钙华形成的特殊性。既然黄龙等地钙华存在内生钙华和外生钙华两种成因类型的形成条件,它们就可能是一种复合类型,通过揭示内生动力与外生动力条件的共同作用,更能准确揭示黄龙、九寨沟钙华的成因及特点。即使是内生钙华成因,受地壳运动和地质构造变化的影响,二氧化碳的来源及岩溶水循环规律也会发生变化,导致钙华沉积速率和特点发生变化,此时需要强化外生钙华的沉积作用来修复和保育钙华景观。

5.2 微生物与钙华沉积的耦合作用

生物的向光性驱动钙华向光沉积,但钙华沉积对生物过程的影响机制研究较少,如此难以揭示生物过程和钙华物理化学过程的协同机制,并准确估算各自的贡献。因此,需要开展地表水化学、钙华矿物学与微生物群落结构特征的相关性研究,探讨不同钙华海绵地质体中微生物群落特点及其与钙华沉积和溶蚀的行为;应以硅藻、丝状藻为重点,从生物—钙华共沉积序列演化方面,研究微生物对钙华沉积的双向调控行为,并研究高钙环境下存在硅藻壳体的Si/Ca置换行为及藻体生物特性变化;针对钙华边石坝、滩流,分析高钙环境对微生物群落结构的构建影响,研究特殊藻席层的形成对水体元素的快速淋滤行为,探讨其对边石坝钙华沉积的调控机制。微电极原位观测技术在研究“液—生—固”界面的钙华沉积过程方面具有重要应用前景。

5.3 钙华景观退化的微观结构表现

钙华具有3种重要微观结构:孔隙结构、晶体结构和纹层结构,对其形成已有研究报道,主要是微生物所造成^[63],钙华天然海绵地质体概念更强调了钙华微观结构的作用。但对于钙华退化的微观结构表现及机制缺乏研究,其是否是环境导致微生物退化或死亡所致?钙华退化时,微观结构改变到什么程度,景观才变黑、变沙?因此,要研究钙华的孔隙相、钙华颗粒相、生物相构成特征及堆砌方式,研究其物相、力学特性和透水、吸水、持水特征以及导致微观结构变化的因素、动力条件和机制。

5.4 钙华景观生态修复保育关键技术

随着地壳活动和旅游等人类活动的增强,钙华景观退化形势严峻,急需探索黄龙等典型钙华退化景观生态保育和修复综合技术,形成钙华景观生态保育与修复技术体系,研发裂缝/漏斗修补、坝体边坡修筑、滩流彩池降渗等各类钙华体生物可再生钙华修复材料及关键技术,并研究钙华修复材料在富含 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 水体自然环境下的晶须生长特性及修复材料自增强过程,开发钙华景观碳—水—钙—微生物协调发展以及岩溶水系统管理及综合调控模型。

6 结 语

钙华作为岩溶沉积物,在国内外广泛分布,景观奇特秀丽,是世界重要的自然遗产和旅游风景区,钙华研究已成为岩溶领域新的研究方向。通过多学科交叉研究,在基于同位素技术的钙华成因、钙华景观特点及地貌演化、钙华生物成因和钙华景观退化研究等方面取得重要进展,基本阐明了钙华景观的分布、特点、物质组成、成因类型,以及典型钙华景观退化的现状及原因,促进了钙华的国际合作研究和钙华自然遗产景观的保护。为促进钙华退化景观的生态修复与保育,目前急需加强钙华内生动力与外生动力的复合作用、微生物对钙华沉积的耦合作用、钙华景观退化的微观结构表现等方面的基础研究,以及钙华景观生态修复保育关键技术的研发。

参考文献

[1] 袁道先主编.岩溶学词典[M].北京:地质出版社,1988.

[2] 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.

[3] 胥良,姜泽凡,李前银,等.黄龙钙华景观演化特征及保护措施探讨[J].地质灾害与环境保护,2007,18(4):79-84.

[4] 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

[5] 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.

[6] Pentecost A. Travertine[M]. Berlin:Springer Berlin, 2005.

[7] 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第14届学术年会论文摘要专辑》,2013.

[8] Pedley H M. Classification and environmental models of cool freshwater tufas [J]. Sedimentary Geology, 1990, 68(1): 143-154.

[9] Pedley M. Tufas and travertines of the Mediterranean region: a testing ground for freshwater carbonate concepts and developments[J]. Sedimentology, 2009, 56(1):221-246.

[10] Capezuoli E, Gandin A, Pedley M. Decoding tufa and travertine (fresh water carbonates) in the sedimentary record: The state of the art[J]. Sedimentology, 2014, 61(1):1-21.

[11] Chen Chaomei, Hu Zhigang, Liu Shengbo, et al. Emerging trends in regenerative medicine: a scientometric analysis in citespace[J].Expert Opinion on Biological Therapy, 2012, 12(5): 593-608.

[12] Craig H. The geochemistry of the stable carbon isotopes [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1953, 3:53-92.

[13] 刘再华,袁道先,何师意,等.地热 CO_2 —水—碳酸盐岩系统的地球化学特征及其 CO_2 来源:以四川黄龙沟、康定和云南中甸下给为例[J].中国科学(D辑:地球科学),2000,30(2): 209-214.

[14] 刘再华.表生和内生钙华的气候环境指代意义研究进展[J].科学通报,2014,59(23): 2229-2239.

[15] 周绪纶.关于四川黄龙钙 CO_2 成因的讨论[J],四川地质学报,2006,26(3):143-146.

[16] Ball J W, Mccelskey R B, Nordstrom D K, et al. Water-chemistry data for selected springs, geysers, and streams in Yellowstone National Park, Wyoming, 2003—2005, US [R]. Geological Survey Open—File Report, 2006.

[17] 汪智军,殷建军,袁道先.钙华在第四纪研究中的应用:以青藏高原为例[J].科学通报,2018,63(11): 1012-1023.

[18] Brian Jones. Review of aragonite and calcite crystal morphogenesis in thermal spring systems [J]. Sedimentary Geology, 2017, 354:9-23.

[19] Okumura T, Takashima C, Shiraishi F, et al. Textural transition in an aragonite travertine formed under various flow conditions at Pancuran Pitu, Central Java, Indonesia [J]. Sedimentary Geology, 2012, 265:195-209.

[20] Brogi Andrea, Liotta Domenico, Capezuoli Enrico, et al. Travertine deposits constraining transfer zone neotectonics in geothermal areas: An example from the inner Northern Apennines (Bagno Vignoni-Val d' Orcia area, Italy) [J]. Geothermics, 2020, 85.

[21] Viles H A, Taylor M P, Nicoll K, et al. Facies evidence of hydroclimatic regime shifts in tufa depositional sequences from the arid Naukluft Mountains, Namibia [J]. Sedimentary Geology, 2007, 195(1):39-53.

[22] Andrews J E, Brasier A T. Seasonal records of climatic change in annually laminated tufas: Short review and future prospects [J]. Journal of Quaternary Science, 2005, 20(5): 411-421.

[23] Marcelle Marques Erthal, Enrico Capezuoli, Alessandro Mancini, et al. Shrub morpho-types as indicator for the water flow energy-Tivoli travertine case (Central Italy) [J]. Sedimentary Geology, 2017, 347:79-99.

[24] Pedley M, Juan Antonio González Martín, Salvador Ordóñez Delgado, et al. Sedimentology of Quaternary perched spring-

- line and paludal tufas; criteria for recognition, with examples from Guadalajara Province, Spain[J]. *Sedimentology*, 2003, 50(1):23-44.
- [25] Álvaro Rodríguez-Berriguete, Ana María Alonso-Zarza. Controlling factors and implications for travertine and tufa deposition in a volcanic setting [J]. *Sedimentary Geology*, 2019, 381: 13-28.
- [26] Huerta P, Armenteros I, Merino Tomé, Oscar, et al. 3-D modelling of a fossil tufa outcrop. The example of La Pea del Manto (Soria, Spain)[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 333: 130-146.
- [27] Marta Vázquez-Urbez, Arenas C, Pardo G. A sedimentary facies model for stepped, fluvial tufa systems in the Iberian Range (Spain): the Quaternary Piedra and Mesa valleys [J]. *Sedimentology*, 2012, 59(2):502-526.
- [28] Claes H, Soete J, Van Noten K, et al. Sedimentology, three-dimensional geobody reconstruction and carbon dioxide origin of Pleistocene travertine deposits in the Ballk area (south-west Turkey)[J]. *Sedimentology*, 2015, 62(5):1408-1445.
- [29] Boever E D, Foubert A, Lopez B, et al. Comparative study of the Pleistocene Cakmak quarry (Denizli Basin, Turkey) and modern Mammoth Hot Springs deposits (Yellowstone National Park, USA) [J]. *Quaternary International*, 2017, 437: 129-146.
- [30] Han L, Cheng J, An Y, et al. Preliminary Report on the 8 August 2017 Ms 7.0 Jiuzhaigou, Sichuan, China, Earthquake [J]. *Seismological Research Letters*, 2018, 89(2A):557-569.
- [31] 李志强, 李亦纲, 林均岐. 四川九寨沟7.0级地震灾害特点分析[J]. *中国应急救援*, 2017(5): 4-7.
- [32] Wang W, Chen H, Xu A, et al. Analysis of disaster characteristics and emergency response of the Jiuzhaigou earthquake [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18(6): 1771-1783.
- [33] 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, 35(1):107-111, 116.
- [34] 张金流, 王海静, 董立, 等. 世界遗产—四川黄龙钙华景观退化现象、原因及保护对策分析[J]. *地球学报*, 2012, 33(1): 111-120.
- [35] Chafetz H S, Folk R L. Travertines: depositional morphology and the bacterially constructed constituents [J]. *JOURNAL OF SEDIMENTARY PETROLOGY*, 1984, 54:289-316.
- [36] Pedley H M. Freshwater (phytoherm) reefs: The role of biofilms and their bearing on matine reef sedimentation [J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 79(1-4):255-274.
- [37] Pedley M, Rogerson M, Middleton R. Freshwater calcite precipitates from in vitro mesocosm flume experiments: a case for biomediation of tufas. [J]. *Sedimentology*, 2010, 56(2): 511-527.
- [38] Perri E, Manzo E, Tucker M E. Multi-scale study of the role of the biofilm in the formation of minerals and fabrics in calcareous tufa [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 263-264: 16-29.
- [39] Berrendero E, Arenas C, Mateo P, et al. Cyanobacterial diversity and related sedimentary facies as a function of water flow conditions: Example from the Monasterio de Piedra Natural Park (Spain) [J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 337:12-28.
- [40] Arp G, Wedemeyer N, Reitner J. Fluvial tufa formation in a hard-water creek (Deinschwanger Bach, Franconian Alb, Germany) [J]. *Facies*, 2001, 44(1):1-22.
- [41] 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.
- [42] Bissett A, Beer D D, Schoon R, et al. Microbial mediation of stromatolite formation in karst water creeks [J]. *Limnology & Oceanography*, 2008, 53(3):1159-1168.
- [43] 李骐言, 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.
- [44] Jin-Wook Kim, Toshihiro Kogure, Sang-tae Kim, et al. The Characterization of CaCO₃ in a Geothermal Environment: a SEM/TEM-EELS study [J]. *Clays and Clay Minerals*, 2012, 60(5): 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*, 2017, 73(1):1-10.
- [47] 代群威, 党政, 彭启轩, 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.
- [48] Wang H, Liu Z, Zhang J, et al. Spatial and temporal hydrochemical variations of the spring-fed travertine-depositing stream in the Huanglong Ravine, Sichuan, SW China [J]. *Acta Carsologica*, 2010, 39(2):247-259.
- [49] 石岩. 黄龙水环境特征与钙华景观演化趋势研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2005.
- [50] 朱静. 黄龙钙华沉积速率及景观演化研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- [51] 杨俊义. 九寨沟黄龙地区景观钙华的特征与成因探讨 [D]. 成都: 成都理工大学, 2004.
- [52] 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.
- [53] Wang L, Pan Y, Cao Y, et al. Detecting early signs of environmental degradation in protected areas: An example of Jiuzhaigou Nature Reserve, China [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 91:287-298.
- [54] Liu J. Ecological Degradation in Protected Areas: The Case of Wolong Nature Reserve for Giant Pandas [J]. *Science*, 2001, 292(5514):98-101.
- [55] 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.
- [56] 陈超. 生物有机质对黄龙钙华沉积和退化的影响研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.

- [57] Zhang J , Wang H , Liu Z , 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.
- [58] 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.
- [59] 张金流,王海静,刘再华. 旅游活动对黄龙景区磷酸盐浓度和水藻生长的影响[J]. *地球学报*, 2011, 32(4):463-468.
- [60] Qiao X , Du J , Kota S H , et al. Wet deposition of sulfur and nitrogen in Jiuzhaigou National Nature Reserve , Sichuan, China during 2015-2016: Possible effects from regional emission reduction and local tourist activities [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 233:67-77.
- [61] Qiao X , Tang Y , Jaffe D , et al. Surface ozone in Jiuzhaigou National Park, eastern rim of the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(5):687-696.
- [62] 胥良,姜泽凡. 基于钙均衡估算黄龙钙华沉积速率的探讨[J]. *中国岩溶*, 2007, 26(2):132-136.
- [63] 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.

Review of research progress and prospect of tufa/travertine karst landscape at home and abroad

JIANG Zhongcheng¹, DAI Qunwei², DONG Faqin², ZHANG Qiang¹, DANG Zheng³,

WANG Zhijun¹, LIU Fan¹

(1. *Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamic, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China*; 2. *School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China*; 3. *School of Applied Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China*)

Abstract A scientometric analysis in Citespace software on the published papers of tufa/ travertine researches at home and abroad from 2008—2020 shows that, some researches of tufa/travertine such as, formation causes of tufa/travertine based on isotope technology, landscape features and geomorphologic evolution of tufa/travertine, biological causes of tufa/travertine and landscape degeneration of tufa/travertine have gotten important progresses. Moreover, the distribution, landscape features, material composition, formation types and situation and causes of typical tufa/travertine in the world have been well clarified, which push forward the conversation and international co-operation of tufa/travertine natural heritage as well as the protection of tufa/travertine natural heritage landscapes . At present, some important basic researches such as mutual processes between earth thermal dynamics and surface dynamics, coupling processes between microorganism and tufa/travertine deposition, as well as micro structures of tufa/travertine degeneration should be strengthened urgently. Meanwhile, the key technology of ecological rehabilitation and conservation of tufa/travertine should be developed.

Key words tufa/travertine, karst landscape, natural heritage, research progress, prospect

(编辑 黄晨晖)