

严飞,董发勤,代群威,等.气候变化背景下钙华退化影响因素及其保育措施研究进展[J].中国岩溶,2021,40(1):166-170.
DOI:10.11932/karst20210118

气候变化背景下钙华退化影响因素 及其保育措施研究进展

严飞¹,董发勤²,代群威³,李琼芳¹,王富东³,曾嘉¹,曹芹¹,杨刚¹

(1. 西南科技大学生命科学与工程学院, 四川 绵阳 621010; 2. 固体废物处理与资源化省部共建教育重点实验室, 四川 绵阳 621010; 3. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘要:为厘清黄龙钙华退化受气候变化调控规律,探究影响钙华沉积的生物与非生物因素对气候变化产生的响应,通过对钙华相关研究的专著及文献进行分析,从直接影响气候变化的水文因素和大气二氧化碳浓度出发,探索其对钙华退化的影响,表明水文过程及气候变化引起的极端事件是导致钙华退化的主要原因:(1)适宜的气候加速钙华沉积,极端的气候则会引起钙华退化;(2)气候变化主要是通过影响极端降水导致钙华退化,如干旱使钙华裸露受风化侵蚀而洪涝灾害使钙华受冲刷或被稀释效应影响;(3)全球变暖导致藻类大量富集,亦会破坏钙华。在钙华保育过程中,一方面应避免因极端气候事件对钙华的破坏,并在其发生时因势利导,缓解其负面效应对钙华的影响,另一方面提倡节能减排,抵御区域二氧化碳浓度升高导致的藻类大面积滋生,以便更好地保护钙华景观。

关键词:钙华;气候变化;退化;保育;可持续发展

中图分类号:P642.25 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2021)01-0166-05 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

钙华是以碳酸钙为主要成分的沉积物,由地下水或地表水中CO₂的逸出导致水中碳酸氢钙过饱和而沉积^[1]。根据钙华沉积时CO₂的来源,将其分为大气成因钙华(meteogene travertine或travertine)和热成因钙华(thermogene travertine或tufa)^[2-3];根据钙华沉积的地形,可将其分为地表泉华、洞穴钙华、湖相沉积钙华;根据钙华沉积的水动力条件,可将其分为瀑华、泉华、滩华;按钙华沉积的形态分为层状钙华和带状钙华等。早在1901年Branner^[4]就描述过,在水

流动过程中CO₂逸出导致了钙华的沉积。直到2003年Elyahyaoui等^[5]发现通过对钙华地质测年可以探索地质构造变化的系列问题,之后各国学者对钙华的研究逐渐增多,包括沉积特征^[6]、地球化学^[7-8]、同位素研究与测年^[9-10]、藻类微生物^[11-12]等。国内外的研究资料主要集中在利用钙华测年以及对古气候和古环境的重建。近年来国外有些研究正在探索哪种气候下更适于钙华沉积。例如:Kampman等^[13]对犹他州135 ka形成的方解石矿脉的研究表明,在冰川期至间冰期的过渡期,即气候开始变暖后约100~2 000年钙华急剧生长;土耳其和意大利现有钙华年龄数据

基金项目:四川省科技计划(2020YFS0020);国家自然科学基金项目(41671244);西南科技大学学生创新基金项目(19ycx0072)

作者简介:严飞(1996—),男,硕士研究生,研究方向:生态学方向。E-mail:optibeeyf@163.com。

通信作者:杨刚(1983—),男,博士,副研究员,湿地生态学与全球变化生态学方向。E-mail:yanggang903@163.com。

收稿日期:2020-09-20

表明,层状钙华主要在温暖潮湿的时期沉积,而带状钙华则在干燥寒冷时期沉积^[14];Ricketts等^[15]编制了一个包含1 649个已发表钙华年龄的全球数据集,数据分析表明钙华沉积在时间上受全球或区域尺度气候变化调节。国内关于钙华对气候变化的响应研究较少。

近年来,由于气候变化和人为活动的影响,黄龙景区钙华有退化趋势,具体表现为钙华变黑、彩池干涸、藻类富集及沉积减缓。其退化会直接改变钙华生态系统的结构和功能,如变黑之后的钙华将丧失观赏性并且不再具有记录气候环境的功能。因此,本文的目的是在厘清钙华退化与气候变化关系的基础上,探究影响钙华沉积的生物与非生物因素对气候变化产生响应,并从气候变化引起的水文条件 and 水中二氧化碳含量变化出发,详细讨论钙华退化的影响因素并提出保护建议。

1 钙华的非生物与生物成因及其对气候变化的响应

钙华沉积速率较快,一般为每年1 mm至2 cm,二十一世纪之前大多研究认为钙华沉积受非生物影响,岩溶水环境和气候环境决定钙华的沉积。根据意大利托斯卡纳南部的两个采石场的证据,Bill等^[16]认为钙华矿层是由波动的同成岩矿脉侧向生长受限引起的体积膨胀造成的褶皱形成。Paulo等^[17]通过地貌制图解释了在阿尔加维中部形成钙华的地方与泉水位置密切耦合,特别是在泉水和河流的邻近位置形成了不同的钙华沉积体系。他们从地貌图中还得出,河流坡度与钙华沉积之间也存在关系,即水流量大、坡度低更易形成瀑布钙华。除此之外,1980年以来的大量研究都得出钙华沉积是由非生物因素影响的^[18]。

随着人们对钙华沉积作用的深入了解,认为钙华沉积是生物与非生物因素共同作用的结果。Rodriguez等^[19]研究了一个火山沟壑中的栖息和河流钙华化石系统,总结出在微生物生长速率大于沉淀速率、水流动能不超过微生物所能承受的最大值时,钙华沉积作用以生物成因为主;如果沉淀速率超过微生物生长速率或水流动能超过微生物所能承受的最大值时,钙华沉积作用以非生物成因为主。生物对钙华沉积的影响主要是通过原核生物、真核藻类、苔藓植物及无脊椎动物等参与沉积作用发生。国内外许多关于钙华沉积的模拟实验研究都证明生物在钙

华沉积中具有重要作用^[12, 20]。如室内模拟实验表明,无菌水流仅靠CO₂脱气作用,难以发生碳酸钙沉积,而改变实验条件,在水流底部放置微生物膜后却能产生大量的碳酸钙沉淀^[21-22]。本课题组对九一黄钙华的生物成因进行了大量研究,2013年发现,水体中藻类等微生物的诱导、胶结对钙华沉积生长过程具有不可忽视的作用^[23];2015年发现柠檬酸对碳酸钙的结晶速率、晶型和形貌具有一定的影响和调控作用^[24];2017年对黄龙高寒冷水型钙华沉积地貌环境中的嗜冷微生物研究发现,在特定模拟环境条件下,L-苯丙氨酸和L-半胱氨酸均能促进碳酸钙的沉积,L-半胱氨酸,除诱导并促进方解石型碳酸钙的合成外,还可以诱导文石型碳酸钙的合成^[25]。Suchy等^[26]在捷克共和国波西米亚 Chlupacova 溶洞的钙华样品中确定了细菌标记物的存在,表明除藻类外,细菌可能也有助于钙华沉积。

无论是生物因素还是非生物因素,钙华沉积作用都与水文条件和气候变化密切相关。适宜的水文条件和气候条件会加速钙华沉积,而极端的水文条件和气候条件,如极端降雨和气候骤变,则会导致钙华停止生长。一方面,降雨量的大小会通过改变地下水、湖泊或泉水的水文水化学改变钙华的沉积速度;另一方面,大量温室气体——二氧化碳的排放导致的全球气候变暖,水温升高导致藻类大面积滋生,从而影响钙华沉积。所以我们推断钙华的退化都是发生在特定的气候背景下,这一假设可以用历史上钙华发生退化的时期与彼时的古气候进行比较并得到验证。

2 气候变化导致的钙华退化

自然条件下钙华的颜色多以黄色为主色调,剖面有褐—白相间混合堆积纹层。近年来,黄龙钙华颜色由黄或白转黑、钙华彩池干涸、藻类大面积滋生,这些变化极大地影响了黄龙钙华景观的观赏价值。钙华退化是多方面原因叠加造成的,气候变化在其中起到了至关重要的作用。气候变化主要通过改变钙华沉积过程中的水文水化学、生物微藻来影响钙华累积^[27]。

2.1 气候变化影响的水文水化学与钙华沉积

唐宇宏等^[28]对贵州马岭河瀑布钙华进行研究发现水流强弱即水动力大小会影响钙华的沉积,在中等程度(浸润或流动)水流干扰作用下,钙华藻类群

落在瀑布钙华形成过程中以沉积作用为主,在强(冲刷)或弱(潮湿)水流干扰作用下,则以溶蚀作用为主。Lopez 等^[7]研究了大西洋泉水钙华与断层之间的关系,发现断层渗透水的增多、排水量的增加、喷口和河道的泉水流量波动频率增高都会对二氧化碳脱气、生物发育、沉积物侵蚀与迁移产生影响。高竞等^[29]对沉积钙华和不沉积钙华做了对比研究,认为热水型钙华沉积的水化学条件是:文石和方解石饱和指数是否达到饱和状态是钙华沉积的基础, HCO_3^- 百分含量较高时,尤其是 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的浓度当量接近或很好匹配时,钙华最易沉淀。曹乐等^[30]对巴丹吉林沙漠湖泊水中的水化学条件测试发现,湖泊本身 Ca^{2+} 含量很低,本不具备钙华沉积的条件,但对地下水的测试发现,地下水含有较高浓度的 Ca^{2+} ,所以钙华得以沉积。由此提出咸淡水混合效应是巴丹吉林沙漠湖泊钙华形成的重要原因,同时存在湖水蒸发浓缩作用使碳酸钙沉淀。

可见,水流强度和水化学对钙华的形成至关重要。严锐等^[31]对全球气候变暖背景下近 30 年来气候的变化进行了研究,发现夏、秋季的降水在 2 000 年以来年际变化率显著变大,导致更容易出现极端的旱涝事件。降水过强导致的洪涝灾害发生,引起洪水对钙华的强力冲刷,同时会稀释水质,降低了钙华沉积所需的二氧化碳和钙离子浓度;另外,气候干旱引起的水量减少会导致钙华裸露,使其遭受风化作用侵蚀。同时气候变化还会导致区域水资源分布不平衡^[32-34],降水的不平衡势必改变钙华的沉积过程。

2.2 气候变化影响生物微藻与钙华沉积过程

钙华水体中藻类等生物物种丰富,并受季节、温度、水量等环境因素影响,表现出种群的周期性演替。藻类在钙华沉积过程中具有加速和减少孔隙形成的双向调控作用,直接影响钙华的微观孔隙结构和渗水性,是钙华天然海绵地质体渗水性的重要调控因素。参与钙华沉积的有卵囊藻、硅藻、苔藓、蓝藻和丝状真核生物等^[35]。根据生物矿化的机理推测微藻类使钙华沉积的机理为:首先, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等被藻类细胞壁富集,然后在局部 HCO_3^- 影响下沉积,最后藻类死亡后残体及附着的 CaCO_3 一起沉淀。全球气候变暖导致水中藻类加速生长,大面积滋生的藻类死亡后将致使钙华退化,表现为钙华颜色变黑^[36-37]。藻类的大量繁殖及代谢产生的有机酸可降低水体 pH,从而加快钙华溶解^[38]。此外,旅游活动引起的大气污染物溶解于水中,导致水中的氮磷浓度增加,促

进了硅藻的繁殖,加速了钙华的退化^[39]。

可见,气候变化改变了水体的理化性质、营养物质,促使藻类的繁殖,影响着钙华的沉积过程。全球气候变暖会增加二氧化碳在水中的溶解度,理论上会增强钙华沉积,但同时藻类微生物也会因二氧化碳浓度和温度的增加大量繁殖,从而致使钙华退化。

3 气候变化背景下钙华保育措施

钙华是不可替代的生态资源。因其结构奇巧、色彩炫丽及具有极高的科研价值受到广泛关注。因此,国内外学者正积极地寻找对其保护方法,以达到可持续利用钙华的目的。

3.1 人工开沟抵御极端降水,调控水中钙华沉积所需离子,保护钙华

水是钙华沉积的源泉,但极端降水却不利于钙华的沉积,抵御极端降水是保护钙华的重要举措。因此,需要人工开沟以应对极端气候变化(旱涝灾害),同时建立钙华环境监测网络,对钙华的沉积速率、水动力及水体中钙离子和溶解二氧化碳浓度、环境温度、尤其是降水量等相关指标进行实时监测,在需要时进行人工干预以达到保护的目的。如监测到有暴雨来临时,关闭钙华沟的阀门,使用人工沟泄洪,减少洪水对钙华的冲刷侵蚀,旱季来临时,在钙华沟上游人工灌水防止因缺水钙华暴露于空气中。监测到其他会使钙华退化的指标时进行合理调控。

3.2 提倡节能减排,减少温室气体排放

全球气候变暖及钙华周边区域废物、废水、废气的排放造成水体碳氮磷的浓度大量升高,为藻类的疯长提供了条件。藻类的繁殖代谢排放有机酸使水源酸性增加,增强了 Ca^{2+} 的溶解,藻类生长大量吸收水中溶解二氧化碳,降低 Ca^{2+} 的沉积速率,藻类大量死亡造成钙沉积变黑。所以应大力提倡节能减排的生活方式,并对污染物的排放进行实时监测,减少有机污染物排放。同时还应加强钙华分布区及周边区域的环境保护,禁止毁林开荒等破坏生态系统稳定的行为,以达到控制藻类疯长、保护钙华的目的。

4 展 望

钙华广泛分布于陆地生态系统中,钙华的沉积过程与当时的气候环境密切相关。钙华景区风景秀

丽极具旅游价值和经济价值。前人对影响钙华沉积的水动力、水文水化学、微生物及地质断层等因素探究较多,本文从气候变化与钙华形成的关系角度阐述了钙华沉积及退化原因,提出以下建议:

(1)适宜的气候条件可加速钙华沉积。气候变化主要是通过影响降水来改变钙华的沉积过程。另外,全球变暖可通过改变藻类及微生物的繁殖过程来影响钙华发育;

(2)在钙华保育过程中,一方面应避免人为引起极端气候事件的发生并在其发生时因势利导,缓解其负面效应对钙华的影响,另一方面提倡节能减排,抵御区域二氧化碳浓度升高导致的藻类大面积滋生,以便更好地保护钙华景观;

(3)在后续对钙华的相关研究中,应关注钙华沉积过程中二氧化碳的溢出及其对区域环境的影响;

(4)钙华沉积记录了大量的古气候数据,通过钙华沉积记录与气候事件的耦合关系,揭示钙华沉积与特定的古气候事件的联系,以便理解钙华沉积的周期性,在不同的气候背景下,对它们实施不同的保育措施。

参考文献

- [1] 曾振宇,晏浩,孙海龙,等.云南白水台钙华池出入口水化学和 $\delta^{13}\text{C}$ (DIC)昼夜变化的影响因素及水生光合作用影响比例的计算[J].中国岩溶,2016,35(6):605-613.
- [2] Capezzuoli 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.
- [3] Ford TD, Pedley HM. A review of tufa and travertine deposits of the world[J]. Earth-Science Reviews, 1996, 41(3-4): 117-175.
- [4] Branner JC. The origin of travertine falls and reefs[J]. Science (New York, NY), 1901, 14(344): 184-185.
- [5] Elyahyaoui A, Zarki R, Chiadli A. A method for the rapid radiochemical analysis of uranium and thorium isotopes in impure carbonates[J]. Applied radiation and isotopes: including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine, 2003, 58(1): 119-124.
- [6] 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.
- [7] Lopez B, Camoin G, Ozkul M, et al. Sedimentology of coexisting travertine and tufa deposits in a mounded geothermal spring carbonate system, Obruktepe, Turkey[J]. Sedimentology, 2017, 64(4): 903-931.
- [8] 李其林,王云,赵慈平,等.云南省香格里拉市下给和天生桥温泉水化学和逸出气 CO_2 释放特征变化[J].地震研究,2019,42(3):320-329,455.
- [9] Uysal IT, Unal IE, Shulmeister J, et al. Linking CO_2 degassing in active fault zones to long-term changes in water balance and surface water circulation, an example from SW Turkey[J]. Quaternary Science Reviews, 2019, 214: 164-177.
- [10] Karabacak V, Uysal IT, Mutlu H, et al. Are U-Th Dates Correlated With Historical Records of Earthquakes? Constraints From Coseismic Carbonate Veins Within the North Anatolian Fault Zone[J]. Tectonics, 2019, 38(7): 2431-2448.
- [11] 李永新.藻类在黄龙钙华景观中的作用[J].安徽农业科学,2011,39(9):5433-5435,5449.
- [12] 王龙,Latif K, Riaz M,等.微生物碳酸盐岩的成因、分类以及问题与展望:来自华北地台寒武系微生物碳酸盐岩研究的启示[J].地球科学进展,2018,33(10):1005-1023.
- [13] Kampman N, Burnside N M, Shipton Z K, et al. Pulses of carbon dioxide emissions from intracrustal faults following climatic warming[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(5): 352-358.
- [14] De Filippis L, Faccenna C, Billi A, et al. Plateau versus fissure ridge travertines from Quaternary geothermal springs of Italy and Turkey: Interactions and feedbacks between fluid discharge, paleoclimate, and tectonics[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 123: 35-52.
- [15] Ricketts J W, Ma L, Wagler A E, et al. Global travertine deposition modulated by oscillations in climate[J]. Journal of Quaternary Science, 2019, 34(7): 558-568.
- [16] Billi A, Berardi G, Gratier J P, et al. First records of syn-diagenetic non-tectonic folding in quaternary thermogene travertines caused by hydrothermal incremental veining[J]. Tectonophysics, 2017, 700: 60-79.
- [17] Guerreiro P, Cunha L, Ribeiro C. Central Algarve karst system tufa-related dynamics, Portugal[J]. Journal of Maps, 2016, 12(sup1): 108-114.
- [18] Alçiçek MC, Alçiçek H, Altunel E, et al. Comment on "First records of syn-diagenetic non-tectonic folding in Quaternary thermogene travertines caused by hydrothermal incremental veining" by Billi et al. Tectonophysics 700-701 (2017) 60-79[J]. Tectonophysics, 2017, 721: 491-500.
- [19] Rodríguez-Berriguete A, María Alonso-Zarza A. Controlling factors and implications for travertine and tufa deposition in a volcanic setting[J]. Sedimentary Geology, 2019, 381: 13-28.
- [20] Dupraz C, Reid RP, Braissant O, et al. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 96(3): 141-162.
- [21] Rogerson M, Pedley HM, Wadhawan JD, et al. New insights into biological influence on the geochemistry of freshwater carbonate deposits[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2008, 72(20): 4976-4987.
- [22] Shiraishi F, Bissett A, de Beer D, et al. Photosynthesis, respiration and exopolymer calcium-binding in biofilm calcification (Westerhfer and deinschwanger creek, germany)[J]. Geomicrobiology Journal, 2008, 25(2): 83-94.
- [23] 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]//王德滋.中国矿物岩石地球化学学会

- 第14届学术年会. 南京: 高校地质学报, 2013: 95-96.
- [24] 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(2): 294-300.
- [25] 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.
- [26] Suchy V, Zacharias J, Tsai H C, et al. Relict Pleistocene calcareous tufa of the Chlupacova sluj Cave, the Bohemian Karst, Czech Republic; A petrographic and geochemical record of hydrologically-driven cave evolution [J]. Sedimentary Geology, 2019, 385: 110-125.
- [27] 欧阳慧子. 青藏高原南部全新世早—中期气候变化: 墨竹工卡钙华碳氧同位素记录[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- [28] 唐宇宏, 潘鸿. 贵州马岭河瀑布钙华藻类群落特征及生物岩溶作用[J]. 中国岩溶, 2013, 32(3): 280-286.
- [29] 高竞. 地下水钙华沉积的水化学影响因素和热水钙华微层的气候环境指示意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- [30] 曹乐, 聂振龙, 刘学全, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊钙华的水化学成因[J]. 中国沙漠, 2017, 37(5): 1026-1034.
- [31] 严锐, 董瑞, 龙园, 等. 全球气候变暖背景下水城县近30a气温与降水变化的新特征[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(3): 5-12.
- [32] 曲迎乐, 高晓清, 陈文, 等. 近50年来我国东、西部地面气温和降水变化对比的初步分析[J]. 高原气象, 2008, 2008(3): 524-529.
- [33] 赵传成, 王雁, 丁永建, 等. 西北地区近50年气温及降水的时空变化[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 385-390.
- [34] 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势[J]. 高原气象, 1999(4): 465-476.
- [35] Tran H, Rott E, Sanders D. Exploring the niche of a highly effective biocalcifier: calcification of the eukaryotic microalga *Oocardium stratum* Nageli 1849 in a spring stream of the Eastern Alps[J]. Facies, 2019, 65(3): 3-7.
- [36] 张金流, 鲍祥. 黄龙风景区水生藻类生长影响因素研究[J]. 世界科技研究与发展, 2015, 37(5): 519-521.
- [37] Simsek S, Günay G, Elhatip H, et al. Environmental protection of geothermal waters and travertines at Pamukkale, Turkey[J]. Geothermics, 2000, 29(4-5): 557-572.
- [38] Winsborough BM. Diatoms and Benthic Microbial Carbonates [M]. Berlin/Heidelberg: Springer, 2000.
- [39] Lixia L. Factors affecting tufa degradation in jiuzhaigou national nature reserve, Sichuan, China[J]. Water, 2017, 9(9): 702.

Influencing factors of the degradation of travertine and its conservation measures under the background of climate change

YAN Fei¹, DONG Faqin², DAI Qunwei³, LI Qiongfang¹, WANG Fudong³, ZENG Jia¹, CAO Qin¹,
YANG Gang¹

(1. School of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 2. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Utilization Jointly Established by the Ministry of Education, Mianyang, Sichuan 621010, China; 3. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract In order to clarify the regulation of travertine degradation by climate change and explore how the biological and abiotic factors that affect travertine deposition respond to climate change, this paper analyzes the monographs and literatures related to travertine, explores the impact of hydrological factors and atmospheric carbon dioxide concentration that directly affect climate change on travertine degradation, and obtains the hydrological process and climate change index. The extreme events are the main reasons for the degradation of travertine, (1) Suitable climate accelerates the deposition of travertine, and extreme climate will cause the degradation of travertine; (2) Climate change mainly affects extreme precipitation to cause the degradation of travertine, such as drought makes the travertine exposed and eroded by weathering, while flood makes the travertine eroded or diluted; (3) Global warming leads to algae bloom. In addition, it will destroy travertine. In the process of travertine conservation, on the one hand, extreme climate events should be avoided and the negative effects should be mitigated when they occur. On the other hand, energy conservation and emission reduction should be advocated to resist the large-scale breeding of algae caused by the increase of regional carbon dioxide concentration, so as to achieve the purpose of sustainable utilization of travertine.

Key words travertine, climate change, degradation, conservation, sustainability development

(编辑 张玲)