

王富东,赵学钦,董发勤,等.青藏高原东缘九寨沟高寒钙华分类与命名[J].中国岩溶,2021,40(1):112-124.
DOI:10.11932/karst20210112

青藏高原东缘九寨沟高寒钙华分类与命名

王富东¹,赵学钦¹,董发勤²,ENRICO Capezzuoli³,Alexander I. Malov⁴,
杜杰⁵

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 国土资源利用研究所, 四川 绵阳 621010; 2. 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; 3. Department of Earth Science, University of Firenze, Firenze 50121, Italy; 4. N. Laverov Federal Centre for Integrated Arctic Research of Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk 163000, Russia; 5. 四川九寨沟国家级风景名胜区九寨沟国家级自然保护区管理局, 四川 九寨沟 623407)

摘要:九寨沟钙华景观不仅有着独特的旅游与美学价值,在古气候、古灾害、古地震/活动构造、高原隆升以及人类世等研究中也提供重要的地质档案。无论从旅游与科普的角度,还是从科学研究出发,开展钙华分类研究必然是前提、也是基础。基于地球系统科学理论,从物质来源到沉积环境,分析了无机和有机对钙华沉积的控制因素,按照相(分为亚相、微相)、类(分为大类、亚类)的沉积特征对钙华进行了分类,划分依据是:沉积环境决定了水动力条件与生物参与度,进而形成了千变万化的钙华沉积形态,最终架构了丰富多彩的钙华景观。所划分的结构一成因类型对“九寨沟式钙华”的科学研究有重要指导意义;从旅游与科普角度开展的钙华地貌一形态分类,可为大众旅游、科普以及管理部门提供更高的辨识度及生态保育参考。

关键词:青藏高原东缘;九寨沟;高寒钙华;岩石分类;沉积环境

中图分类号:P642.25 **文献标识码:**A

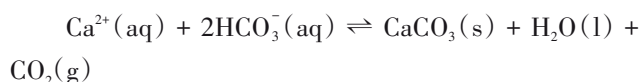
文章编号:1001-4810(2021)01-0112-13 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

钙华(Travertine)又名石灰华(Tufa)^[1-2],是指在地表或溶洞内由岩溶水、泉、河、湖沉积形成的次生碳酸盐岩^[3],通常发育在第四纪时期,属典型的陆相或非海相碳酸盐沉积岩^[2,4]。钙华因发育年际层以及其特殊的产出背景与生物矿化,逐渐被当作古水文、古地震、古气候以及构造活动、冰川过程、高原隆升与地貌演化、人类活动(人类世——Anthropocene)、甚至是生命起源等研究的地质档案^[5-11],这足显对其研究的潜在意义。

钙华的化学沉积机制可由以下化学式表达,即为气—水—固三相的平衡反应:



式中:正反应为CO₂溢出,即CaCO₃达到饱和并析出晶体,是吸热反应;逆反应为CO₂溶入水中成酸性,CaCO₃被溶解,是放热反应。在此过程中水化学、温度效应、压力效应、生物效应和水动力效应协同控制着钙华的沉积^[1,12-14]。反应式中重要参数——CO₂的来源是识别钙华成因类型的重要指标,并被分为内生来源和表生来源^[15]。内生来源指的是深部变质脱

基金项目:国家自然科学基金项目(41973053,41672206,41877288,41572035);中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室开放基金(LED2019B05);中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金(19zd3105);中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金(SKLLQG1620);四川省住房和城乡建设厅应急先导性科研项目(18zd320507)

第一作者简介:王富东(1982—),男,副教授,博士,主要从事矿物与岩石地球化学等方面的研究。E-mail:wolfdongswust@163.com。

收稿日期:2020-09-20

CO₂和幔源组分,表生来源指的是大气或土壤成因的CO₂来源。研究表明黄龙钙华的气体来源属于前者,而九寨沟钙华则属于后者^[16-17]。不同来源的CO₂溶入地下水导致pH下降而开始了其在碳酸盐岩地层中的溶蚀历程,最终在构造薄弱处或不同地层界面与脆弱面处出露泉水,进而沉积出千姿百态的钙华景观。在此过程中无机作用和有机作用的协同是决定其形态的关键^[1, 18-19]。九寨沟钙华也遵循着这样的化学、物理与生物作用沉积机制,它涵盖了大气圈、生物圈与岩石圈的相互作用,必须运用地球系统科学理论加以认识^[20]。

九寨沟钙华为世界上海拔最高(2 200~2 900 m)的植被—环温—河流型钙华的典型例子^[17, 21],与典型冰缘岩溶冷水型黄龙钙华(泉水平均温度5℃)^[22]相比,其河水温度更高(8.3~14.8℃),但地表水体Ca²⁺、HCO₃⁻总体含量不高,Ca²⁺含量除夏莫泉群外(100.3 mg·L⁻¹),其他彩池水体均在74 mg·L⁻¹以下;同样,除夏莫泉群外,彩池或湖泊水体中HCO₃⁻浓度均在255 mg·L⁻¹以下^[23]。因钙华中的矿物结晶所需组分(如Ca²⁺、HCO₃⁻)含量相对只有黄龙五彩池水体的1/3左右,因而被认为属于退化类型钙华。但我们或许忽视了九寨沟的水动力条件和生物参与度,若给予其足够的沉积时间,就能有新生钙华体的架构^[17],这是因为现今水体中的Ca²⁺浓度比地质历史期低,所以沉积速率也相对较慢。从日则沟—树正沟的钙华体量来看(所有湖、瀑、坝均由钙华组成,诺日朗瀑布坝高就达到25 m),地质历史时期其水体Ca²⁺、HCO₃⁻浓度应与现在有所差异,才能形成自沟口至藏马龙里延伸30 km的各类型钙华体^[24]。

对钙华地貌—形态分类研究,钙华分类是基础。在钙华分类研究时,因钙华沉积控制因素较多,涉及到各圈层间的紧密联系,因此,不同学者会侧重于某一方面对其进行分类命名,从而导致没有一种分类方案能被大家普遍接受。为更加深入地认识钙华体的成因,并为钙华生态保育与持续繁衍提供科学依据,开展钙华的分类研究是必要的,也是能否开展相关科学研究的前提与基础。

1 钙华分类现状

河流型钙华沉积机制与沉积模式的研究由来已久,特别是国外已建立起了一些钙华沉积划分方案^[1-4, 25-26]。国内相关学者也对九寨沟钙华进行过划

分,主要是以钙华地貌特征、钙华沉积形态学与钙华成因等为划分依据^[15, 25, 27-28],并提出了“九寨沟式钙华”沉积模式^[28]。但由于诸多因素控制与影响着钙华的沉积,形成了千变万化的钙华体,再加上极其复杂的地质与环境变化,提出既科学合理又系统的钙华分类绝非易事。

钙华研究领域里往往热衷于按CO₂来源对其进行成因分类^[1-2, 15]。根据这一指标将钙华分为大气成因钙华(tufa)和热成因钙华(travertine)两大类:前者起因于大气和土壤的CO₂脱气作用,δ¹³C值通常较低(-12‰~2‰),而后者主要起因于来自深部地幔或变质成因的CO₂,其δ¹³C值相对较高(-1‰~10‰)。此类划分在钙华大类分类上非常实用,特别是那些构造成因的热泉型钙华^[11, 29-32]。但这样的分类对于那些无法提取到气体样本的研究点来讲,可能不具备普适性,特别是那些已经停止沉积的古钙华^[2, 33],仅从钙华体沉积物来界别也就没那么适用。尽管包裹体气体成分的测定为不错的选择^[34],但往往会局限在结晶致密的碳酸盐岩层,而从水体的碳同位素来讲,也可能会存在多解性。

在地质学里对三大岩类的分类往往都尽量地落脚到成因分类上,因为这是认识各类岩石生成的科学原理和形成规律,最为本质^[35-37]。对于钙华的成因分类,如下问题的存在可能会给分类带来困难:①控制钙华体形成的因素是多因协同的,物理—化学和生物因素的耦合作用最常见,例如,九寨沟大型湖坝坝顶发育的微型彩池、湖中产出的钙华礁,均是无机与有机协同作用的产物;②按CO₂来源的成因分类,九寨沟属于表生成因钙华,那么亚类又该怎样去划分?这样一来会导致千姿百态的钙华体只能停留在大类上去认识;③钙华体形成过程是动态的,其沉积环境是变迁的,例如,盆华^[28]演化到一定阶段会成为瀑华或滩华,那就不能以现在看到的瀑华而忽略了内在的盆华,甚至是未来演变的方向。

岩溶领域里往往从形态学、结晶学以及成因的角度去划分所研究的对象^[38-40]。其中形态学分类是一种最直观又易被普通大众所接受的方法,因而大多钙华体形态的命名均来源于其外部形态特征,如钙华彩池、钙华滩、钙华瀑布、钙华漏斗等^[27-28]。形态分类的不足是同一种形态可能是多种成因的耦合。例如,彩池的边石坝是类似瀑布溢流与生物的协同作用的结果,而有些大型的瀑布坝顶又产出有千奇百态的微型彩池,其是多因素协同作用的结果。

结晶学分类是根据钙华矿物组成的结晶结构与构造特征来划分其类型,这也是岩石学里最为熟知的结构—成因分类^[41]。钙华的矿物成分以方解石为主,含少量文石和白云石以及其他微量杂质^[2]。纯度较好的钙华可根据其所含的方解石和白云石,无论在色率与灰度上均容易识别。但富含有机质或生物碎屑的钙华在矿物成分与结晶度上给识别带来了困难,因为粉晶衍射(XRD)成分测定结果还是方解石,几乎测定不出其他黏土矿物,导致肉眼识别较为困难。另一方面,大量的植物碎屑、苔藓、水草、藻、原核生物体等的参与^[3, 26, 42],导致矿物结晶度叠置与重复,形成无规律可循的钙华集合体^[17]。因此,矿物成分的单一和矿物组构的无规律性都限制了按结晶学分类这一方案。

地貌—形态分类主要注重观赏性或者美学价值^[40, 43]。同时,地貌—形态分类是从宏观整体形貌特征上加以拟物、拟人与拟神话,甚至追逐神态的韵味^[27]。这对旅游价值有着极高的宣传与神秘化,更能抓住游客的心灵诉求,但从科学本质来讲,其过于注重主观性,少了自然本质属性。例如,原本是钙华礁,只因浸没在湖里而被冠以“卧龙”、“双龙”;又如珍珠滩瀑布,喷溢的水体犹如珠帘挂壁^[28]而得名。另一方面,地貌—形态分类中,大类钙华之中就含有多种亚类型钙华,如诺日朗瀑布钙华,是彩池钙华、淋滤钙华、洞穴钙华、帽状钙华的组合物^[44]。因而景观分类上更注重整体性,而对内部组成关注不够。

2 钙华划分依据与分类方案

到目前为止,对于九寨沟钙华的分类尚未提出一套最完美的岩石学分类方案。如前所述,形态学

划分方法是命名景观的主要依据,因为形态上像什么便取之,人们一看便知,易于理解。但形态往往不能反映其本质成因。按CO₂来源的成因分类只会把钙华认识局限在大类上,更多的亚类就无法再进行分类下去,况且又有很多相似的钙华体,成因却千差万别。结晶学分类则解决不了形态与成因方面的本质属性,只因矿物成分的单一,以及色率与灰度的交替都为肉眼识别与规律性带来难度。尽管如此,本文认为在钙华沉积过程中,水化学是先决条件,水动力是钙华沉积调控主因^[45-46],生物参与起着协同作用^[18, 47],因而可以从3个维度去认识九寨沟钙华,即沉积环境与沉积物特征、结构—成因以及地貌—形态。

本文遵循“从宏观到微观,通过微观研究再反过来认识整体”的思路,提出沉积环境的宏观维度——沉积相,再根据水动力条件为主要划分依据,结合生物作用,进一步划分亚相。同样也根据水动力条件和生物作用,从形成的钙华矿物结构构造划分出钙华类型。本分类方案中,各沉积环境与沉积相不存在与单一岩石类型的对应关系,无论哪一种亚相均包含了两种或两种以上的水动力条件和生物作用。这样的划分方案在表生钙华特别是环温—河流型钙华中更加实用,因为该类钙华水体里有效结晶组分含量低,生物参与更加明显。

因而本文提出的九寨沟钙华分类方案是:先将其定义为陆生碳酸盐岩沉积相,即陆相碳酸盐岩,再根据不同沉积环境进一步划分出亚相,亚相之下再根据水动力条件和生物作用进一步分为若干微相。微相当中的钙华不具有单一钙华类,往往都是多种类型钙华交替叠置架构,各自的特征也因水动力条件和生物参与度而变化(表1)。

表1 九寨沟钙华分类与沉积特征

Table 1 Classification and sedimentary characteristics of travertine in Jiuzhaigou valley

相	亚相	微相	水动力	重力水与生物 协同沉积作用	钙华与沉积特征	实例
陆生 碳酸 盐岩/ 陆相	河流型	彩池 钙华	溢流与 片流	边石坝沉积	自底到顶藻席、水草钙华、植物碎屑钙华,结壳状钙华沉积。随着彩池深度的增加具有韵律式沉积特征;边石坝外侧往往随着薄层片流与水草、藻类共结成钙华膜,与边石坝整体形成斜层理;在干冷季节,水层更薄没有生物的稳定植时还可以形成纹层钙华	箭竹海彩池、熊猫瀑布到五花海段彩池、金玲海彩池、各湖坝顶面彩池、诺日朗瀑布北
			底流	池盆沉积	钙华砂、植物碎屑钙华与生物骨架钙华;水平层理或无层理,质地疏松,具有透水性	北西侧彩池、盆景滩彩池

续表

相	亚相	微相	水动力	重力水与生物 协同沉积作用	钙华与沉积特征	实例
	河道钙华		径流	河床沉积	结壳状钙华,薄层钙华膜;附着在河道砾石、原木与枯木之上,钙华量与水流量成反比,与流速成正比,生物共沉积作用较弱;激流、边滩溅水在石板、树枝、树根上后易形成结壳钙华、绒毛状钙华或纹层钙华	泉水的出口段,湖与瀑布的转换段
			滩流	坡面沉积	藻席钙华、草席钙华以及苔藓钙华;顺着水流具有席状产出,多孔但具备一定致密度	珍珠滩、盆景滩
		瀑布钙华	泄流	钙华帽沉积	帽状钙华、席状钙华、盾状钙华,瀑状钙华;顺着水草、植物根须、树枝、苔藓、藻类帽状沉积,形状会跟随生物生长方向而改变,并在内侧弧湾悬空,延伸良好者可以弧形延至数米并与坝/坡底连接,进而悬空形成洞穴;生物体与钙华共沉积强烈者会不断加积冒进,最终因重力不稳坍塌	熊猫海瀑布、珍珠滩瀑布、诺日朗瀑布,各叠瀑瀑顶
			溅流	钙华锥沉积	结壳钙华、钙华碎屑、钙华球,钙华龟背石,钙华珠;飞溅的水在瀑底形成钙华结壳以及冲碎的前生钙华碎块,溅出的水花在边缘处形成钙华龟背石,钙华球与钙华珠	各瀑布、叠瀑瀑底
	湖泊型	湖坝钙华	溢流	钙华坝沉积	结壳钙华、亮晶层状钙华、植物碎屑钙华、藻钙华;大多韵律式沉积,颜色上出现明暗交替;中间穿插有有机泥炭层,或腐泥层	各湖坝
		滨/浅湖钙华	浪流	钙华滩沉积	砂屑钙华、泥钙华、植物碎屑钙华、藻钙华	各湖泊周缘
			潜流	钙华礁沉积	藻席钙华、草席钙华、生物模板钙华	卧龙海、双龙海、火花海等湖滨
		深湖钙华	底流	钙华泥沉积	细粒钙华砂、钙华泥,具有明暗相间的水平层理,偶尔夹杂有泥炭层	各湖泊湖底
	沼泽型		面流/潜流	沼泽钙华沉积	褐、黑色钙华泥、钙华砂、钙华碎屑,沉积有大量植物遗体,局部含煤线与泥炭层	天鹅湖、芳草海;箭竹海、镜海、犀牛海后缘
	洞穴型	穴华	滴水	石笋/石钟乳类沉积	顺苔藓、水草等悬挂的、断续运动的滴水作用下形成,具有中空而外层致密特征	各钙华瀑布、钙华坝体内,钙华台地
			流水	溅流水沉积	由悬挂式滴水或流水在落差条件下形成溅水,沉积出皮壳与结晶钙华,其内部具有同心环状,半径有序,部分还有纹层特征	中

3 九寨沟钙华结构—成因分类

尽管钙华沉积成因由多因素控制,无论从Ca²⁺浓度、水动力条件、生物协同作用、坡度、温度以及日照等都会不同程度影响着钙华沉积^[12-14, 17, 21, 48-50]。但在九寨沟水质Ca²⁺浓度偏低的条件下,无疑水动力条件和生物协同作用是钙华沉积作用的主控因素^[21, 51]。因而也可以根据这两者因素的侧重点,从岩石与岩相学角度对钙华进行分类。这样的结构成因分类是包含在沉积相当中的,且更具有岩相学的侧重点,这对野外辨识钙华体有着更直观作用。

九寨沟钙华沉积中水动力条件以重力水为主,具体到各个沉积环境中会产生不同的水流形态(表1),不同水流形态相应地会结合外部因素促成不同的钙华沉积结构构造。在这方面,刘再华、陈敬安等联合国外学者已开展了水动力实验相关工作^[32, 46-47, 52-54],获得了经典的水动力沉积机理认识,这些认识主要是从水流边界薄层效应上来解释的。尽管没有说明怎样的水力条件会产出什么类型的钙华,但结合九寨沟自身钙华沉积产出特征,可以辨识出如下水力条件与生物协同作用促成的钙华类型,其大类上分为3类:孔状钙华、致密钙华、碎屑钙华(表2,图1)。

表2 九寨沟钙华结构—成因分类简表

Table 2 Brief scheme of structure-genesis classification of travertine in Jiuzhaigou valley

成因	大类	亚类	基本类说明
生物成因 (易于生物定植的水力条件)	孔状钙华	苔藓类钙华	根据苔藓的种类以及组合、形态可以进一步划分
		水草类钙华	以模板为主,根据根、枝、叶形状以及叠置情况而定
		藻类钙华	以模板作用沉积的藻席钙华以及胞外分泌物捕获的碎屑复合沉积
		微生物残骸钙华	富含菌类、有孔虫等残骸钙华
		植物碎屑钙华	树干、根、枝、叶碎屑钙华
无机成因 (水力条件弱,薄层效应最佳)	致密钙华	纹层钙华	结晶钙华,褐、白色亚层交替产出
		模板与结壳钙华	具有植物完整模板,无机作用下钙华能连续生长
		洞穴类钙华	在滴水、渗水、溅水作用下慢速结晶形成,形态各异
综合成因 (有机与无机协同)	碎屑钙华	砂屑钙华	颗粒达砂粒级以上,含一定成分的砂屑
		泥屑钙华	颗粒在泥级以下,含泥质成分
		生物碎屑钙华	含生物、植物碎屑

3.1 孔状钙华

孔状钙华的沉积与生物作用密切相关,包括苔藓类、水草类、藻类、微生物残骸以及植物碎屑等(图2)。正因为这些生物的协同作用导致水动力千变万化,加速了不同尺度上絮流进程^[2, 13],促成钙华沉淀。

从产出的占比来看,日泽沟到树正沟沟系钙华体整体均由孔状钙华建构(图1),这与黄龙钙华有着明显区别,同时也说明了九寨沟钙华生物作用更强烈,特别是植物类的参与^[17, 21]。从产出的空间位置来看,彩池、湖泊、滩流、瀑布大多均由孔状钙华组成,只是不同的地理位置因为适宜生长与滞留不同生物体而在具体成分上有所差异。但这些不同景观中的孔状钙华不是单一的,往往是过渡的,或者是所有类型的统一。例如,彩池边石坝因为拦滞有树枝、树叶和滋生的藻类残体,会以这些生物的残体为地垫,形成模板多孔钙华组合体(图2a,图2b);滩流的地方会以水草和藻类为模板形成孔状钙华(图2d);瀑布因为更适宜生长苔藓而形成苔藓模板多孔钙华;湖泊坝体的架构则是孔状藻席钙华、植物碎屑模板孔状钙华、层状多孔结壳钙华韵律式沉积(图2c)。

3.2 致密钙华

致密钙华可从3个方面去认识:一是无生物参与作用的纹层钙华,二是生物模板中的结晶、结壳致密钙华,三是洞穴类钙华(图3)。

纹层钙华中往往生物遗迹较少,其在薄层水动力条件下形成,且水体有着持续供给能力,此过程中

蒸发作用也起着协同作用^[55-58]。再者,纹层钙华的另一水动力条件还需满足更加快速的水力薄层效应^[46-47, 54]。九寨沟沉积钙华主沟系中的纹层钙华发育较少,主要发育在钙华台地和钙华扇中,如藏马龙里钙华台地、甲里甲泉钙华扇以及剑岩钙华扇(图1,图3b)。纹层钙华由白色和褐色层方解石组成,白色层厚度往往比褐色层宽,方解石结晶良好,呈柱状排列,并且具有定向生长特征。白色和褐色层被解释为不同水文条件的响应,是季节交替的代理,通常被用来解释古气候与古环境变迁^[56-61]。

另一致密钙华是模板与结壳钙华。如结壳状钙华(图3a)、植物碎屑模板钙华等。此类钙华发育普遍,但体量上来讲,相比生物模板形成的孔状钙华,占比≤15%,从产出的空间位置上来看,各个沉积环境中均产出有(图1,表2)。例如,彩池边石坝的外缘水动力较薄、藻类滋生较少时会形成结壳状钙华(图3c);河道中结壳状钙华发育也比较常见,如砾石、树干与树根上(图3a)均有产出;湖坝中植物碎屑和藻类残体模板钙华较为多见;瀑布钙华中在水动力较弱的地方也会产出苔藓模板致密钙华。

洞穴钙华结构构造上为有规律形状的钙华,是在滴水、渗水、溅水作用下慢速结晶形成的^[1, 45]。从诺日朗瀑布崩塌的坝体中可以发现很多顺着水草滴滤的黄白色结晶致密钙华(图3c),形状如同竹笋或笋根,这是水体沿水草、草根慢慢滴滤而成,其机制类似钟乳石的形成。溃决的火花海坝体中发育的洞穴钙华揭露了坝体构筑中存在的洞穴钙华形成过程

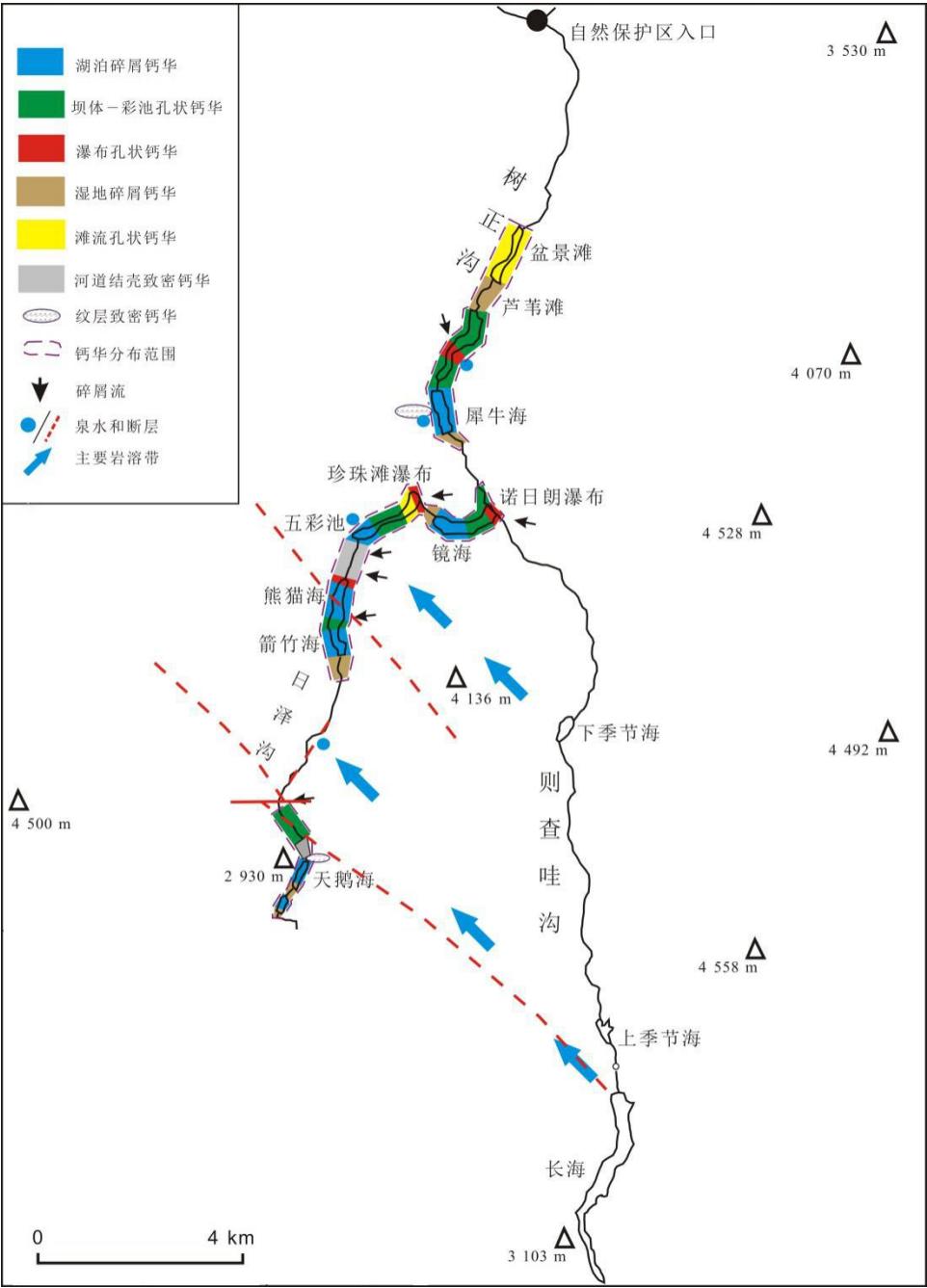


图 1 九寨沟沉积环境与钙华分布图(修改自文献[17])

Fig. 1 Sedimentary environment and travertine distribution of Jiuzhaigou valley (modified after [17])

(图 3d),除了沿着裂隙分布的纹层钙华外,还发育很多结壳状、龟背石状、穴珠状、球状钙华。另外,根据前人文献报告记载,藏马龙里钙华台地里还发育钙华中的石钟乳和石笋^[62]。

3.3 碎屑钙华

碎屑钙华是九寨沟钙华里不应忽略的组成部分,成分上为钙华碎屑或方解石颗粒。按目前的研究程度无法像碎屑岩中的粒径、分选性来给予严格

定义或分类。但从本次研究情况来看,其主要由前期已形成的钙华破碎后形成,或水动力条件不能连续成分补给,进而多质点成核却无法连续生长的那些钙华颗粒(图 4)。由于密度和颗粒的差异,这些钙华颗粒往往被九寨沟丰富的水量搬运和迁移。

碎屑钙华的产出特征展现出多位置多空间里均存在现象,河床湾流流水变缓处经常淤积有被风化破碎后的碎屑钙华,河流冲积的漫滩也是一重要堆积位置。湖泊后缘的沼泽处经常大量淤积有上游钙



图2 多孔状钙华野外产出特征

Fig. 2 Field characteristics of porous structures of tufa

a. 火花海钙华 b. 诺日朗瀑布钙华 c. 熊猫海钙华 d. 珍珠滩瀑布钙华



图3 致密钙华野外产出特征

Fig. 3 Field characteristics of dense tufa

a. 高瀑布河道钙华 b. 犀牛海西侧纹层钙华 c. 诺日朗瀑布滴滤钙华 d. 火花海洞穴钙华

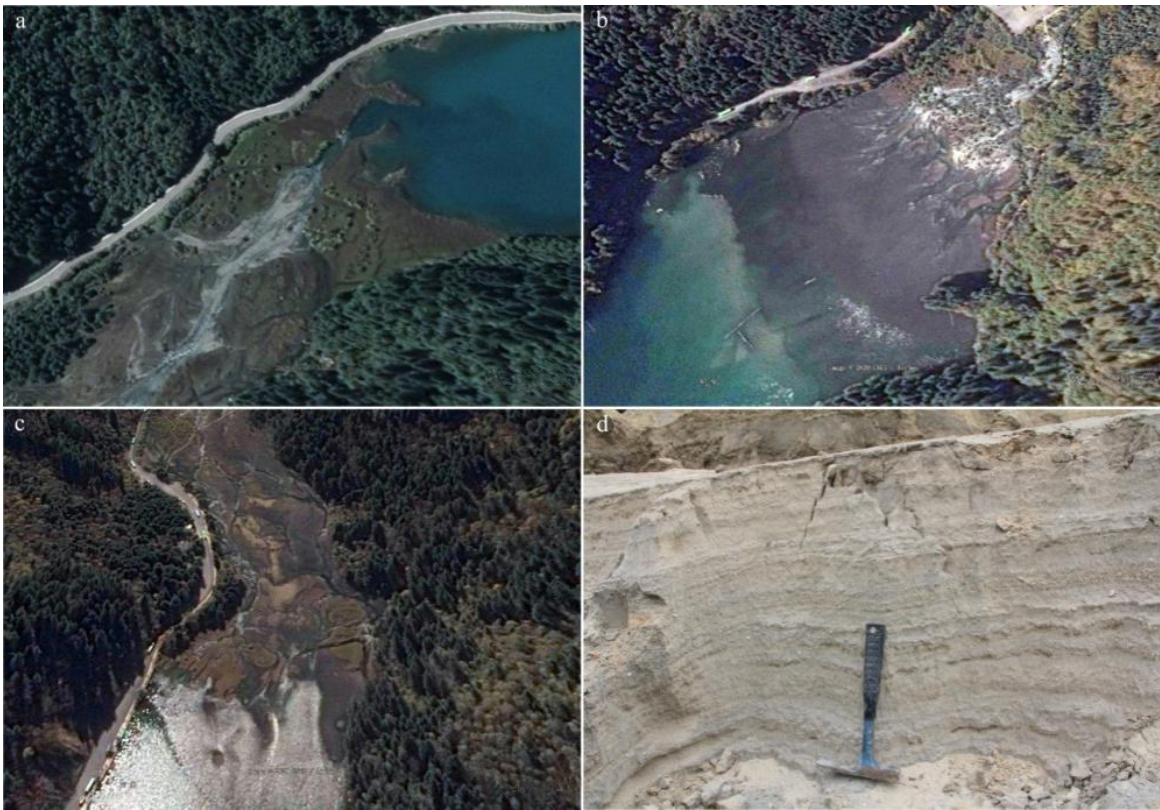


图 4 碎屑钙华野外产出特征

Fig. 4 Field characteristics of clastic tufa

a. 犀牛海后缘沼泽 b. 镜海后缘沼泽 c. 箭竹海后缘沼泽 d. 火花海湖相碎屑钙华, 具有水平层理

华体被破碎后冲积而来的碎屑钙华,如箭竹海、镜海、犀牛海后缘^[63](图 4a,图 4b,图 4c)。尽管芳草海、天鹅湖与芦苇滩沼泽化比上述湖泊后缘强烈,但它们当中的重要物质组成也是钙华碎屑。

各类湖泊和彩池中的碎屑钙华是整个钙华碎屑分布中占比最大的,这在火花海溃堤后展现得淋漓尽致^[64](图 4d)。彩池中的碎屑钙华会随着水体深度变化而变化,池水较浅时可能以生物碎屑钙华为主,但池水较深时生物碎屑量相对减少。湖泊和彩池的差异是水深和藻类丰富度问题,相应地湖水大于一定深度后,藻类不再滋生,湖底转换为湖泊透光层颗粒沉淀的堆积,而较浅的湖泊,如五花海,湖底碎屑钙华是藻类与微生物协同作用形成的钙华颗粒。深水型湖泊底部往往形成一定分选性的碎屑钙华,钙华泥、钙华砂具有韵律式沉积,这可能与湖底潜流有关。

4 九寨沟钙华地貌—形态分类

九寨沟是世界自然文化遗产,素来有着“九寨归来不看水”的美誉,因而从旅游与科普角度来讲,钙

华地貌—形态分类对大众和管理部门更有意义。按沉积环境进行分类,景区的主要景观由湖相、瀑布相、滩流相、洞穴相 4 大类地貌类型组成,为钙华分类的主类标准(表 3)。

湖泊:在沉积环境中,钙华沉积体拦蓄径流成湖。

瀑布:岩溶于水于高低落差较大处沉淀形成钙华体,与水系相结合形成壮观的瀑布景观。

斜坡:岩溶水在斜坡河道面呈片状流动而形成了一种具有流态的钙华滩流景观。

洞穴:在钙华沉积过程中,钙华体内部发育成空洞,形成钙华洞穴景观。

根据沉积地点分类(亚类):

在所处沉积大环境下,景观钙华主要依托于地质微地形进行沉积活动,主要沉积点集中于:坝体、堤埂、岛礁、生物、池底、崖瀑、岩体、滩流、洞穴 9 类沉积点,为景观钙华分类的亚类标准(表 3)。

坝体钙华:钙华沉积过程中,水位逐渐升高,表层水变薄,钙华沉积加速,沉积体高度升高,逐渐形成筑坝。

表3 九寨沟钙华地貌—形态分类表

Table 3 Landscape-morphological classification of tufa in Jiuzhaigou valley

沉积 沉积 地貌 地点		沉积形态钙华
九 寨 沟 钙 华 地 貌	坝体	纹层钙华、海绵钙华、蜂窝钙华、球粒钙华、肾状钙华、晶洞钙华、丛状钙华、板状钙华、年轮钙华、蠕状钙华、维管钙华、沙化钙华、泥质钙华、堡状钙华
	堤埂	海绵钙华、蜂窝钙华、球粒钙华、肾状钙华、板状钙华、年轮钙华、蠕状钙华、维管钙华、泥质钙华、堡状钙华
	湖泊 岛礁	海绵钙华、蜂窝钙华、球粒钙华、蠕状钙华、维管钙华、泥质钙华、堡状钙华
	生物	纹层钙华、维管钙华、年轮钙华、板状钙华
	池底	纹层钙华、海绵钙华、蜂窝钙华、球粒钙华、肾状钙华、板状钙华、年轮钙华、蠕状钙华、维管钙华、沙化钙华、泥质钙华、钙华木、堡状钙华
	崖瀑	丛状钙华、维管钙华
	瀑布 岩体	年轮钙华、球粒钙华
斜坡 滩流		纹层钙华、海绵钙华、板状钙华、维管钙华、堡状钙华
洞穴 洞穴		维管钙华、钟乳钙华

堤埂钙华:岩溶水流动过程中随水位和水流速的影响,钙华沉积形成堤埂,进一步加速沉积形成坝体。

岛礁钙华:岩溶于水于初始地形斜坡上流动受阻而形成的具有岛礁状结构的钙华堆积体。

生物钙华:指水流经生物残骸体或植物碎屑后产生薄层效应形成的钙华。

池底钙华:于海子、彩池等底部沉积形成钙华沉积体。

崖瀑钙华:岩溶于水于边坡陡坎处形成突出形沉淀,表面具有流线、流纹及流涛等流水形态的钙华体,与彩池、湖泊景观相伴而生。

岩体钙华:指钙华在发育过程中依附于环境中本有的岩石进行沉积,形成岩石和钙华沉积体复合的覆岩钙华体。

滩流钙华:岩溶水在较为平缓的坡面流动,在脱气作用的影响下形成具有鱼鳞、水波纹状等流态的钙华。

洞穴钙华:钙华沉积过程中,顶部沉积速率大于底部生长速率,因其上部生长过快而形成的空洞为原生洞穴;钙华沉积体发生重溶蚀作用,地下水的冲刷搬运作用,形成的空洞为次生洞穴。

根据沉积形态特征分类(微类):

因景观钙华沉积条件各不相同,所得钙华沉积体形态各异。根据景观钙华表观相貌特征,对钙华按沉积特征进行分类:纹层钙华、海绵钙华、蜂窝钙华、球粒钙华、肾状钙华、晶洞钙华、丛状钙华、板状

钙华、年轮钙华、蠕状钙华、维管钙华、沙化钙华、钟乳钙华、泥质钙华、钙华木、堡状钙华 16 个微类(表3)。

纹层钙华:外观呈灰白/米白不规则状,由深—浅色层交替组成的钙华沉积体。根据其形状可以分为水平层状、弧层状、年轮层状、圈层状。

海绵钙华:外观呈浅黄/黄色不规则状。该类钙华主要由藻类、树枝、落叶等结合 CaCO₃ 快速沉积所得。

蜂窝钙华:外观呈浅黄色,具有较多直立孔洞。该类钙华主要以植物根须及高级维管植物等为模板沉积所得。

球粒钙华:外观呈灰/灰白色不规则球状。根据其外观形状可以分为圆球状、皮壳状、豆状。该类钙华在岩溶水力冲刷作用下,形成表面粒径不一的球粒状集合体。

肾状钙华:外观呈浅褐色不规则状肾状。该类钙华主要依附于池底或边壁的岩石或植物枝干沉积所得。

晶洞钙华:外观呈灰/黄褐色不规则状,内部与外部有明显分层,外部为胆状不平整,内部为不规则球粒状集合体。该类钙华主要依附于坝体或沥水洞内部所生长的植物或岩石沉积所得。

丛状钙华:外观呈黄褐色条状、规则密集排列。该类钙华主要依附于在瀑布周围生长的苔藓、水草或其他高等维管植物为模板在水动力与生物模板共同作用下长期沉积形成。

板状钙华:外观呈黑/黑棕色板状。该类钙华主要依附于海子底部的苔藓、地衣为生物模板,长期沉积所得。

年轮钙华:外观呈弧形层状结构,中心处有小直径的圆形孔洞,深—浅色层交替出现呈圆弧状向外扩散、纹路清晰。该类钙华主要以植物枝干等为模板,在水力和风化交替作用下长期堆积形成。

蠕状钙华:外观呈黄/褐色,表面生长大量葡萄状球粒。该类钙华以所处环境植物根茎、水草、苔藓为模板,在水力及生物共同作用下沉积形成。

维管钙华:外观因沉积时期及沉积环境不同,表现颜色与形状各异。该类钙华以环境中植物体(树枝、树叶、树根等)为沉积模板,形成内部为植物体、外部为钙华体的复合结构体。

沙化钙华:外观呈黑/土黄色沙状。该类钙华生长区域和植被区域重叠,在枯水期钙华易在沙化和腐化共同作用下形成。

钟乳钙华:外观呈灰白/褐黄色不规则柱状。该类钙华主要发现于洞穴中,其形成与富含 HCO_3^- 的下渗水有关, CaCO_3 沉积形成管状或柱形石钟状。

泥质钙华:该类钙华主要为岩溶水在静水环境中形成的一类钙华泥状物质。

钙华木:该类钙华主要以沉积环境中的植物枝干为沉积模板,在沉积过程中附着植物体外部或沿植物体内部逐步渗入,形成钙华与植物树干沉积复合体。

堡状钙华:外观呈黄褐色,疏松多孔。该类钙华中植物参与沉积痕迹明显,表面散布细小植物痕迹,在水力与生物共同作用下沉积形成。

5 结 语

(1)九寨沟钙华属于世界上海拔最高的植被—环温—河流型典型钙华,在岩溶学里被称为冰缘岩溶钙华,这也指明了其与冰川作用有着千丝万缕的关系^[34, 65],并且有望能指代青藏高原东缘的深部地质过程^[66],因而钙华类型的划分及其与冰碛物关系的解剖,有助于认识该地区的冰川作用。尽管九寨沟钙华也称为钙华,但从其 CO_2 来源来讲,英文术语用的是tufa,中文翻译成“石灰华、泉华”,这更能表明气源为表部来源,非深部属性,因而从大类上限制了九寨沟钙华的生物岩溶性质。除此之外,tufa更能显示出生物作用的参与,这也是和中文术语不同的地方,但也不建议用“石灰华”来替代九寨沟钙华,因为石

灰华缺失了结晶学的概念,这反过来也说明了对钙华的分类学研究的必要性。宏观尺度来看,九寨沟钙华属于陆生河流型钙华,是与海相碳酸盐岩对比研究的重要地质体;

(2)钙华的生物过程往往被认为与生物改变水动力条件、生物代谢诱导碳酸钙沉淀或微生物的酸性胞外聚物质(EPS)提供晶体成核位点、悬浮颗粒被微生物丝和/或黏性EPS捕获/结合有关,生物模板是最直观的表现形式,因而才形成多孔、甚至是疏松的钙华体。这些生物的参与作用暗示了碳酸钙的高成核率,包括扰动成核^[67],相应的扰动又阻断了结晶生长的持续性,因而也就缺少了纹层状的致密钙华,反而碎屑类钙华得以增多。彩池边石坝或湖、瀑坝体往往在枯水期覆满了钙华碎屑,待到丰水期时,这些碎屑大量涌入湖中或沼泽地中,故而成为湖相和沼泽相钙华的重要来源。因此,在钙华分类中,生物作用是重要考虑的因素;

(3)温差、日照、寒冻、雨量、雪霜、风力大小以及水动力条件等均调节着生物群落,同时也主导着碳酸钙沉淀的化学式向右进程。化学沉积机制中的气—水—固三相的平衡反应才是钙华沉积的本质,生物和物理作用只不过是促进该反应向正反应方向发展的因素。但有一条轴线是:生物作用最终会转变为物理机制,加之物理本身作用,最终促成钙华化学沉积。多孔疏松钙华与生物作用有关,而致密钙华大多与物理作用更加紧密;

(4)本文从沉积环境的宏观维度,先从 CO_2 来源角度将九寨沟钙华分为陆相表生岩溶钙华,再根据水动力条件为主要划分依据,结合生物作用,进一步划分亚相,进而划分出以水动力条件为主导的若干钙华类型。同样也根据水动力条件和生物作用,从形成的钙华矿物结构构造划分出钙华的岩石学类型。同时,从科普与旅游角度,给出了钙华地貌—形态分类。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Pentecost A. Travertine[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2005:1-445.
- [3] Pedley H M. Classification and environmental models of cool freshwater tufas [J]. Sedimentary Geology, 1990, 68 (1): 143-154.

- [4] 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.
- [5] Sembroni A, Molin P, Soligo M, et al. The uplift of the Adriatic flank of the Apennines since the Middle Pleistocene: New insights from the Tronto River basin and the Acquasanta Terme Travertine (central Italy)[J]. *Geomorphology (Amsterdam, Netherlands)*, 2020, 352.
- [6] 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.
- [7] Gradzinski M, Wroblewski W, Dulinski M, et al. Earthquake-affected development of a travertine ridge[J]. *Sedimentology*, 2014, 61(1): 238-263.
- [8] Kokh S N, Sokol E V, Deev E V, et al. Post-Late Glacial calcareous tufas from the Kurai fault zone (Southeastern Gorny Altai, Russia)[J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 355: 1-19.
- [9] Priestley S C, Karlstrom K E, Love A J, et al. Uranium series dating of Great Artesian Basin travertine deposits: Implications for palaeohydrogeology and palaeoclimate [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 490: 163-177.
- [10] Meyer M C, Aldenderfer M S, Wang Z, et al. Permanent human occupation of the central Tibetan Plateau in the early Holocene[J]. *Science*, 2017, 355(6320): 64-67.
- [11] Liu Z H, Li H C, You C F, et al. Thickness and stable isotopic characteristics of modern seasonal climate-controlled sub-annual travertine laminae in a travertine-depositing stream at Baishuitai, SW China: implications for paleoclimate reconstruction[J]. *Environmental Geology*, 2006, 51(2): 257-265.
- [12] Rainey D K, Jones B. Abiotic versus biotic controls on the development of the Fairmont Hot Springs carbonate deposit, British Columbia, Canada[J]. *Sedimentology*, 2009, 56(6): 1832-1857.
- [13] 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.
- [14] Akihiro K, Tomoyo O, Chizuru T, et al. Geomicrobiological properties and processes of travertine [M]. Springer, Singapore, 2019: 1-176.
- [15] 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.
- [16] Liu Z, Tian Y, An D, et al. Formation and evolution of the travertine landscape at Huanglong, Sichuan, one of the World Natural Heritages[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 1(3): 176-191.
- [17] Lugli S, Tang Y, Reghizzi M, et al. Seasonal pattern in the high-elevation fluvial travertine from the Jiuzhaigou National Nature Reserve, Sichuan, Southwestern China[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2017, 87(3): 253-271.
- [18] Pentecost A. Algal and bryophyte flora of a Yorkshire (U. K.) hill stream: A comparative study approach using biovolume estimations[J]. *Archiv Fur Hydrobiologie*, 1991, 121: 181-201.
- [19] Pentecost A. The quaternary travertine deposits of Europe and Asia Minor[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1995, 14(10): 1005-1028.
- [20] 汪品先, 田军, 黄恩清, 等. 地球系统与演变[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 1-565.
- [21] Florsheim J L, Ustin S L, Tang Y, et al. Basin-scale and travertine dam-scale controls on fluvial travertine, Jiuzhaigou, southwestern China [J]. *Geomorphology*, 2013, 180-181: 267-280.
- [22] Wang H J, Yan H, Liu Z H. Contrasts in variations of the carbon and oxygen isotopic composition of travertines formed in pools and a ramp stream at Huanglong Ravine, China: Implications for paleoclimatic interpretations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 125: 34-48.
- [23] 党政, 任锦海, 安超, 等. 7.0级地震对九寨沟核心景观和水化学影响[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(2): 186-192.
- [24] 周绪伦, 刘民生. 九寨沟早期钙华体的岩溶作用与湖瀑景观的形成[J]. *四川地质学报*, 2012, 32(3): 333-338.
- [25] Pentecost A, Zhang Z. A review of Chinese travertines [J]. *Cave and Karst Science*, 2001, 28(1): 15-28.
- [26] Claes H, Marques Erthal M, Soete J, et al. Shrub and pore type classification: Petrography of travertine shrubs from the Ballik-Belevi area (Denizli, SW Turkey)[J]. *Quaternary International*, 2017, 437: 147-163.
- [27] 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: 1-65.
- [28] 朱学稳, 周绪伦. 岷山岩溶区的灰华沉积[J]. *中国岩溶*, 1990, 9(3): 56-70.
- [29] Chafetz H S, Guidry 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.
- [30] Uysal I T, Feng Y, Zhao J X, et al. U-series dating and geochemical tracing of late Quaternary travertine in co-seismic fissures[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 257(3-4): 450-462.
- [31] 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.
- [32] Wang Z J, Meyer M C, Hoffmann D L. Sedimentology, petrography and early diagenesis of a travertine-colluvium succession from Chusang (southern Tibet)[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 342: 218-236.
- [33] Wang F, Dong F, Zhao X, et al. The lowest boundary age of travertine in Dawanzhangjia Ravine, Huanglong, China [J].

- Acta Geologica Sinica—English Edition, 2018, 92 (2): 879-880.
- [34] El Desouky H, Soete J, Claes H, et al. Novel applications of fluid inclusions and isotope geochemistry in unravelling the genesis of fossil travertine systems[J]. *Sedimentology*, 2015, 62 (1): 27-56.
- [35] 贺同兴, 卢良兆, 李树勋, 等. 变质岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1980: 1-254.
- [36] 邱家骧. 岩浆岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 1-340.
- [37] 刘宝君. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1980: 1-497.
- [38] Ford D C, Williams P. Karst hydrogeology and geomorphology[M]. Chichester: Wiley, 2007: 1-562.
- [39] Hill C F P. Cave mineral of the world [M]. The National Speleological Society, USA, 1997: 1-463.
- [40] Lowe D J, Waltham A. A dictionary of karst and caves [M]. London Pagefast Ltd.; British Cave Research Association, U. K, 2002: 1-40.
- [41] 桑隆康, 马昌前, 王国庆, 等. 岩石学(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 1-620.
- [42] Gandin A, Capezzuoli E, Pedley M. Travertine: Distinctive depositional fabrics of carbonates from thermal spring systems [J]. *Sedimentology*, 2014, 61(1): 264-290.
- [43] 朱学稳. 洞穴钟乳石类的分类方案[J]. 中国岩溶, 2005, 24 (3): 169-174.
- [44] Gradziński M, Bella P, Holúbek P. Constructional caves in freshwater limestone: A review of their origin, classification, significance and global occurrence [J]. *Earth—Science Reviews*, 2018, 185: 179-201.
- [45] Chen J, Zhang D D, Wang S, et al. Factors controlling tufa deposition in natural waters at waterfall sites[J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 166(3-4): 353-366.
- [46] 刘再华, W. Dreybrodt. 方解石沉积速率控制的物理化学机制及其古环境重建意义[J]. 中国岩溶, 2002, 21(4): 252-257.
- [47] Shiraishi F, Morikawa A, Kuroshima K, et al. Genesis and diagenesis of travertine, Futamata hot spring, Japan[J]. *Sedimentary Geology*, 2020, 405: 105706.
- [48] Della Porta G, Capezzuoli E, De Bernardo A. Facies character and depositional architecture of hydrothermal travertine slope aprons (Pleistocene, Acquasanta Terme, Central Italy) [J]. *Marine and petroleum geology*, 2017, 87: 171-187.
- [49] Jones B. Review of calcium carbonate polymorph precipitation in spring systems[J]. *Sedimentary geology*, 2017, 353: 64-75.
- [50] Mohammadi Z, Capezzuoli E, Claes H, et al. Substrate geology controlling different morphology, sedimentology, diagenesis and geochemistry of adjacent travertine bodies: A case study from the Sanandaj—Sirjan zone (western Iran)[J]. *Sedimentary Geology*, 2019, 389: 127-146.
- [51] Liu L. Factors Affecting Tufa Degradation in Jiuzhaigou National Nature Reserve, Sichuan, China [J]. *Water*, 2017, 9 (9): 1-15.
- [52] Dreybrodt W, Buhmann D, Michaelis J, et al. Geochemically controlled calcite precipitation by CO₂ outgassing: Field measurements of precipitation rates in comparison to theoretical predictions[J]. *Chemical Geology*, 1992, 97(3): 285-294.
- [53] Liu Z, 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 et Cosmochimica Acta*, 1995, 59 (15): 3087-3097.
- [54] 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.
- [55] Kano A, Matsuoka J, Kojo T, et al. Origin of annual laminations in tufa deposits, southwest Japan [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 191(2): 243-262.
- [56] Kato H, Amekawa S, Kano A, et al. Seasonal temperature changes obtained from carbonate clumped isotopes of annually laminated tufas from Japan: Discrepancy between natural and synthetic calcites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 244: 548-564.
- [57] Koltai G, Spötl C, Luetscher M, et al. The nature of annual lamination in carbonate flowstones from non-karstic fractures, Vinschgau (northern Italy) [J]. *Chemical geology*, 2017, 457: 1-14.
- [58] Liu Z H, Sun H L, Lu B Y, et al. Wet-dry seasonal variations of hydrochemistry and carbonate precipitation rates in a travertine-depositing canal at Baishuitai, Yunnan, SW China: Implications for the formation of biannual laminae in travertine and for climatic reconstruction [J]. *Chemical Geology*, 2010, 273 (3-4): 258-266.
- [59] Mohammadi Z, Claes H, Capezzuoli E, et al. Lateral and vertical variations in sedimentology and geochemistry of sub-horizontal laminated travertines (Çakmak quarry, Denizli Basin, Turkey)[J]. *Quaternary International*, 2020, 540: 146-168.
- [60] Yan H, Liu Z, Sun H. Effect of in-stream physicochemical processes on the seasonal variations in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values in laminated travertine deposits in a mountain stream channel [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 202: 179-189.
- [61] Matsuoka J, Kano A, Oba T, et al. Seasonal variation of stable isotopic compositions recorded in a laminated tufa, SW Japan [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192(1): 31-44.
- [62] 四川省地矿局成都水文地质工程地质队. 九寨沟核心景区水循环系统研究专题报告[R]. 成都, 2006: 1-158.
- [63] Du J, Qiao X, Zhang M, et al. Wetlands in the Jiuzhaigou World Natural Heritage site of south-west China: classification and recent changes [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2018, 69(5): 677.
- [64] Wang F, Dong F, Zhao X, 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.
- [65] Jódar J, González-Ramón A, Martos-Rosillo S, et al. Snow-melt as a determinant factor in the hydrogeological behaviour of high mountain karst aquifers: The Garcés karst system, Central Pyrenees (Spain)[J]. Science of The Total Environment, 2020, 748: 141363.
- [66] Wang F, Dong F, Enrico C, et al. Is the travertine on the eastern margin of the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau as a surface rock record of the Lower Crustal Channel Flow?[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2019, 93 (supp. 2): 141-142.
- [67] Sun J, Sobolev Y I, Zhang W, et al. Enhancing crystal growth using polyelectrolyte solutions and shear flow[J]. Nature, 2020, 579: 73-79.

Classification of Alpine-type travertine in Jiuzhaigou valley on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau

WANG Fudong¹, ZHAO Xueqin¹, DONG Faqin², ENRICO Capezzuoli³, Alexander I. Malov⁴, DU Jie⁵

(1. School of Environment and Resource/Institute of Land and Resources Utilization, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 2. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Recycle, Ministry of Education, Mianyang, Sichuan 621010, China; 3. Department of Earth Science, University of Firenze, Firenze 50121, Italy; 4. N. Laverov Federal Centre for Integrated Arctic Research of Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk 163000, Russia; 5. Jiuzhaigou National Nature Reserve Administration, Jiuzhaigou, Sichuan 623407, China)

Abstract The travertine in Jiuzhaigou valley not only has unique tourism and aesthetic values, but also plays an important role in geological archives for the study of paleo-climate, paleo-hazards, paleo-earthquake/active structures, plateau uplift and the Anthropocene. Whether from the perspective of tourism, science popularization, or scientific research, classification research on tufa is the premise and foundation. In this article, based on the theory of earth system science, we analyze the controlling factors of inorganic and organic from the source of travertine material to the depositional environment, and classify it according to facies, classes and subclasses of sedimentary morphology. The criterion for the classification is that the depositional environment determines the hydrodynamic conditions and the degree of biological participation, which in turn forms the ever-changing tufa deposition geomorphology, and finally constitutes a colorful travertine landscape. The structure-genesis types of tufa divided herein have important guiding significance for the genetic research of "Jiuzhaigou-type travertine". Meanwhile, this article also makes a landscape-morphological classification of tufa from the perspective of tourism and science popularization, which provides a higher degree of identification and ecological conservation data for mass tourism, science popularization and management departments.

Key words eastern margin of the Tibet plateau, Jiuzhaigou valley, Alpine-type travertine, classification, sedimentary environment

(编辑 黄晨晖)