

# 青藏高原钙华沉积属性特征及其地质意义

牛新生<sup>1</sup>, 郑绵平<sup>1</sup>, 刘喜方<sup>1</sup>, 齐路晶<sup>2</sup>

1. 中国地质科学院矿产资源研究所; 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

2. 防灾科技学院, 三河 065201

**摘要** 钙华分为大气成因钙华和热成因钙华两类, 不仅具有景观价值, 而且具有重要的科研价值。青藏高原广泛发育热成因钙华, 主要形成于泉水和湖泊环境中。青藏高原钙华的形成主要与高原内部的热水活动有关, 而热水活动则受控于印度大陆碰撞俯冲所引起的伸展作用和区域大断裂的走滑拉分作用。钙华不仅记录高原的古气候学信息, 同时也是区内大多数盐湖矿床成矿过程记录者, 但是已有的研究尚不足以充分解读这些信息。形成热成因钙华的 CO<sub>2</sub> 一般来自地热过程或地壳深部, 其成因机制因时因地而异, 远比大气成因钙华更加复杂, 并不是所有热成因钙华都记录有古气候信息, 因此, 只有在充分明确热成因钙华成因机制的基础上, 方可重建其古气候和盐湖矿床学信息。

**关键词** 青藏高原; 钙华; 古气候; 盐湖矿床

钙华又称石灰华(travertine 或 tufa), 是一种陆相碳酸盐沉积物, 围绕渗漏、泉眼或沿着溪流、河流形成, 偶尔出现于湖泊中, 由方解石或文石组成, 有一定的晶间空隙, 常具有在渗流环境或较浅潜水环境中形成的铸模孔隙或格架孔隙<sup>[1]</sup>。钙华往往形成瑰丽的自然景观, 带给人们美的享受, 同时还广泛地应用在建筑、艺术、农业、医学和工业领域。

钙华的研究和应用具有悠久的历史, 远自两千多年以前, 东西方国家都已有钙华的发现和认识<sup>[1]</sup>。20世纪以来, 随着技术方法的不断进步以及多学科交叉发展的促进, 各国学者对钙华的认识逐步深化。一是各种更精确的测试仪器和更有效的方法技术得到应用, 碳、氢、氧、锶等同位素分析技术, 以及钙华的沉积学、矿物学、地球化学成为钙华的最主要研究手段和方式<sup>[2-5]</sup>; 二是对钙华的成因有了更科学的认识, 地质学家分别从正演<sup>[3,6-8]</sup>和反演<sup>[9-10]</sup>两个角度, 先后提出钙华的多种成因模式, 即河流与湖泊环境钙华成因模式<sup>[11]</sup>、沼泽钙华成因模式<sup>[12]</sup>、泉水钙华成因模式<sup>[13]</sup>、淡水泉钙华成因模式<sup>[8]</sup>。

近年来, 对钙华的深入研究使其应用范围更加广泛, 并日益凸显其独特性和不可替代性, 主要体现在4个方面: 首先, 钙华沉积是古气候、古环境信息记录的良好载体, 且分辨

率可以达到年变化甚至月变化, 因而被广泛地用来解读古气候信息<sup>[14-19]</sup>; 第二, 钙华是新构造活动的重要标志, 是地震特别是古地震信息的重要来源<sup>[20-22]</sup>; 第三, 钙华研究在环境保护方面发挥了积极作用<sup>[7,23-24]</sup>; 第四, 为比较行星学研究提供了参照物<sup>[25-26]</sup>。青藏高原是中国钙华沉积分布的重要区域之一, 这些钙华具有重要的科研价值。

## 1 钙华沉积的分布与类型

青藏高原的钙华分布比较广泛, 高原的东部边缘和腹地均有钙华的报道与研究。青藏高原东部边缘的钙华分布自北东向南西成带状分布, 沿线钙华点有神仙池、黄龙、牟尼沟、玉龙溪、白水台等, 都是闻名遐迩的地质旅游景观, 其中, 以云南白水台和四川黄龙钙华较为著名, 白水台素有“仙人梯田”的称誉, 黄龙钙华则被誉为“圣地仙境, 人间瑶池”; 高原内部的钙华分布点有扎布耶、当雄错、昂拉仁错、多格错仁、治多县城西、聂拉木科亚河岸、尼玛县荣玛乡、堆龙德庆县邱桑乡、杂多县巴茸巴空峡谷以及青藏公路沿线的多处钙华点。青藏高原部分钙华点和裂隙盆地/拉分盆地分布如图1所示。

收稿日期: 2016-11-20; 修回日期: 2016-12-26

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41402076); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(K1413)

作者简介: 牛新生, 博士, 高级工程师, 研究方向为碳酸盐岩沉积学, 电子信箱: xsh\_niu@foxmail.com

引用格式: 牛新生, 郑绵平, 刘喜方, 等. 青藏高原钙华沉积属性特征及其地质意义[J]. 科技导报, 2017, 35(6): 59-64; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.06.006



图1 青藏高原部分钙华点和裂陷盆地/拉分盆地分布<sup>[39]</sup>

Fig 1. Locations map of travertines and rift basin/pull-apart basin in Qinhai-Tibetean Plateau

钙华的形成环境和条件比较复杂,可以出现于泉水、河流、沼泽、湖泊等环境中,地质学家为此提出了多种沉积模式,但是,自然环境中,由于泉水、河流、沼泽和湖泊等环境彼此互相联系、互相依存,很多时候无法准确判断钙华的具体成因,也就无法提出统一的钙华沉积模式。就青藏高原来说,钙华的形成主要与泉水和湖泊等水体联系紧密,并因此而形成绚丽多姿的钙华景观,本文择其典型代表进行论述。

高原东部边缘,云南白水台和四川黄龙钙华是典型的泉水钙华沉积体系。白水台位于云南香格里拉县三坝乡纳西族自治县,是白水河上游南岸三角山体北麓一个由钙华沉积形成的台地,也是一个仍在沉积形成中的钙华沉积体。白水台钙华体自下而上由多阶小台地组成,类似于多级梯田,每一级台地由最外缘的钙华坝和钙华坝所围限的钙华池组成,来自泉口的地下水流从上至下,逐阶漫过每一阶钙华坝。黄龙钙华位于四川松潘县岷山主峰雪宝顶北侧黄龙沟,其沉积特征与白水台类似,钙华沉积体也是由钙华坝和钙华池层层累积而成,进而形成色彩斑斓的钙华梯池。

在高原内部,钙华主要有泉水钙华体系和湖泊钙华体系两种类型,本文择其典型代表当雄错钙华和多格错仁钙华进行介绍。

当雄错钙华位于西藏尼玛县文部乡当雄错盐湖周缘,这里既有泉水钙华沉积,也有湖泊钙华沉积。泉水钙华沉积主要分布在当雄错盐湖南部曲热白玛沟,这里见有规模较大叠层状钙华出露,钙华露头长约50 m,宽约20 m,高约15 m,沿沟呈NW向分布,与时代较早的古钙华呈不整合接触,沟中钙华顶部古泉口仍保存完好,部分钙华纹层极细,可达mm级,为古钙华。在湖区南岸7 km处的曲热白玛沟沟口南侧,目前仍有大股温泉涌出,形成散布的片状水流,泉口水温52℃,出露钙华面积40~50 m<sup>2</sup>,钙华层仍在不断形成中。此外,在当雄错湖区南部,见有3条链条状展布的钙华“墙”,状若城墙,规模宏大,绵延数百米至1 km以上,如图2(a)(b)所示。根据钙华“墙”和湖泊阶地的位置初步判断,此类钙华形成于湖泊环境中。

多格错仁钙华分布于西藏双湖县多格错仁湖泊南缘及其以南的部分地区,为典型的泉水钙华体系,最主要的钙华沉积相为钙华丘和裂脊。区内钙华丘极为发育,整体呈北西—南东向排列,其高度为0.5~10 m以上,一般呈对称的穹顶状或倒锥状,如图2(c)(d)所示,泉口直径为0.2~5 m以上,钙华丘底部直径为0.5~10 m以上。区内钙华丘多呈红褐色,薄层状,层面围绕泉口呈倒扣的锥面,层壳间孔隙、孔洞发育,钙华丘往往出现迁移特征,表现为较大的泉丘不再活动,而从旁侧又有相对较小的泉丘形成。裂脊是区内另一种主要的钙华沉积相,区内见有两条钙华裂脊,走向大致为南东—北西方向,高者长约上百米,宽约数十米,高约数十米,现已停止发育,矮者长约200 m,宽约18 m,高度自西北向东南方向降低,裂脊线的东南端,仍有线状泉眼排列发育,反映裂脊自西北向东南的迁移形成过程。一般认为钙华裂脊的发育,取决于断裂的渐进式扩张作用,是地壳持续拉长和裂脊内部高静水压力活动结果。

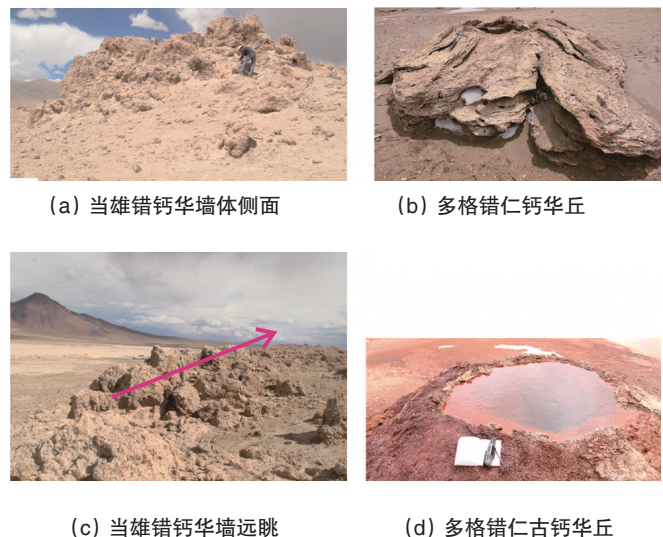


图2 当雄错和多格错仁钙华景观

Fig 2. Landscape of Tangqungmai and Dogai Coring area

## 2 青藏高原钙华的成因类别与地质背景

基于形成钙华的CO<sub>2</sub>的来源不同,一般可将钙华分为两类,即大气成因钙华(meteogene travertine)和热成因钙华(thermogene travertine)。前者主要起因于土壤和大气来源CO<sub>2</sub>的脱气作用,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常较低,一般为-12‰~2‰。后者则起因于来自地壳内部甚至地壳下部热成因CO<sub>2</sub>的脱气作用,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值常较高,一般为-1‰~10‰<sup>[1,27]</sup>。国内也有学者分别将这两类钙华称之为表生钙华和内生钙华<sup>[28]</sup>。

### 2.1 钙华的成因类别

据已有的报道和研究,无论是青藏高原东部边缘的钙华,还是高原内部的钙华,大部分属于热成因钙华,也即内生钙华。

高原东部边缘,业已测得四川黄龙泉水中CO<sub>2</sub>气体的 $\delta^{13}\text{C}$ 为-6.8‰,与深部来源或大气成因的 $\delta^{13}\text{C}$ 基本吻合,而不同于土壤生物成因的CO<sub>2</sub>,结合泉水中CO<sub>2</sub>分压是大气的数百倍,是土壤CO<sub>2</sub>的数十倍,因此认为黄龙钙华系统中的CO<sub>2</sub>可能是深部岩浆起源及灰岩遇到高温分解产生的CO<sub>2</sub>的混合物<sup>[7]</sup>,具有热成因性质。据报道,白水台钙华也具有热成因性质<sup>[28]</sup>。

高原内部,多格错仁地区13块钙华样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 结果表明,这些钙华具有较高 $\delta^{13}\text{C}$ ,13块样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 从2.6‰至11.7‰,平均为8.6‰,是典型热成因钙华<sup>[29]</sup>。当雄错钙华也具有与多格错仁钙华相似的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布特征,根据笔者2015年在当雄错盐湖周围采集的古代钙华 $\delta^{13}\text{C}$ 的测定结果(表1),平面随机分布的5个样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 为4.2‰~6.8‰,平均为5.4‰,略低于多格错仁钙华的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,但仍相对较高,表明当雄错钙华的热成因性质。扎布耶钙华的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 均大于0‰,22块钙华样品 $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 平均值为2.8‰<sup>[30]</sup>,尼玛县荣玛乡钙华的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 更高,平均为7.49‰<sup>[31]</sup>,这些证据表明,扎布耶钙华和荣玛钙华也均属于热成因钙华。

表1 当雄错钙华的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 值  
Table 1  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$  of travertine samples

钙华点	样品编号	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}/\text{‰}$
当雄错	DXC010-1	6.8
当雄错	DXC013-2	4.9
当雄错	DXC015-2	4.2
当雄错	DXC018-2	6
当雄错	DXC019-3	5.1

注:碳同位素测试仪器为MAT-253,使用磷酸法测定,由核工业地质研究院测试完成。

### 2.2 钙华形成的地质背景

青藏高原广泛发育的热成因性质钙华是由其地质背景所决定的。首先,受印度大陆俯冲碰撞的影响,青藏高原不断隆升,多条板块缝合带、断裂带切割高原,使得青藏高原成为中国地热活动特别发育的地区之一,也是全球地热活动异常的区域之一;高原内部各种热水活动如温泉、热泉、沸泉、

水热爆炸等极为发育,据统计有600~700余处<sup>[32-33]</sup>,钙华则是这些水热活动的重要遗存和物质记录;印度大陆强烈的碰撞俯冲后产生的伸展作用,导致高原内部出现了一系列横切主碰撞带的近NS向的断裂系统和地堑<sup>[34-37]</sup>,并严格控制了高原内部的热水和钙华沉积,而EW向断裂强烈的走滑活动又形成了EW向的拉分盆地<sup>[39]</sup>,从图1可以看出,高原内部的钙华点大部分都分布于NS向的裂谷/地堑平盆地系统或EW向的拉分盆地。其次,西藏地热流体绝大多数地热流体含有CO<sub>2</sub>,这些气体具有岩浆热源和深循环两种类型,在此情况下,由水热活动沉积所形成的钙华自然具有热成因的属性<sup>[33]</sup>。最后,高原东部边缘发育的黄龙至白水台一线的钙华带则与板块边缘的活动断裂有关,地球深部的CO<sub>2</sub>可通过断层向地表释放<sup>[40]</sup>,并在合适的水文地质条件下,参与并最终形成了热成因钙华。

## 3 青藏高原钙华沉积的研究应用

目前,对青藏高原钙华的科学研究的科学重建和盐湖矿床学方面。

近年来,对青藏高原钙华的古气候学研究主要聚焦于高原东部边缘的白水台钙华和黄龙钙华。对白水台钙华的研究显示,钙华可以提供有价值的年际甚至季节尺度的气候变化信息,钙华的 $\delta^{18}\text{O}$ 与降雨量有着较好的线性负相关关系<sup>[41]</sup>,薄的钙华微层及其低 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值形成于温暖湿润的雨季,反映了较高的降雨条件,反之反映干旱的气候条件<sup>[42-43]</sup>。对黄龙钙华的研究显示,在慢速流系统中,钙华的碳氧同位素呈负相关关系,而在快速流系统中,钙华的碳氧同位素呈正相关关系;池水环境形成的钙华的氧同位素可以用于重建温度,而滩流环境沉积的钙华的碳同位素可以用于重建降雨量<sup>[44]</sup>。

与白水台钙华和黄龙钙华相比,青藏高原内部钙华的古气候学研究相对较少,但更具代表性。对西藏荣玛钙华的研究发现,与白水台钙华不同,荣玛钙华的 $\delta^{18}\text{O}$ 受温度和降雨量影响,与温度、降雨量具有较好的正相关性,并据此可以推测区内35.87 ka以来的温度和降雨变化<sup>[31]</sup>。国外学者根据青藏高原早全新世发育的高位古湖岸线钙华,重建了同时期古降水和季风信息,认为早全新世青藏高原中部的130个封闭古湖泊系统的扩张呈现出强烈的东西差异,其中高原西部古湖面积扩张了约4倍,而东部地区仅2倍左右<sup>[45]</sup>。

盐湖矿床方面,地质调查工作发现,高原内部的多个盐湖矿床伴随有钙华的发育,如扎布耶盐湖、当雄错盐湖、昂拉仁错盐湖、多格错仁盐湖等,这种现象有其内在的必然联系。西藏的扎布耶盐湖周边和湖中大量分布有热成因钙华群,钙华中Li的平均含量都为100  $\mu\text{g/g}$ 以上,这是因为温泉水所携带的Li、Cs等元素,一部分保存在钙华之中,另一部分随泉水汇入到盐湖中<sup>[30]</sup>。根据笔者对西藏当雄错盐湖现代温泉和钙华的研究,温泉与钙华都具有较高的Li、B含量,当雄

错盐湖附近的“南温泉”泉水的Li<sup>+</sup>、B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量分别达8.5 mg/L和263.8 mg/L,而据20个钙华样品的分析数据,钙华中Li含量的平均值为42.37 μg/g,最高为155 μg/g,钙华中B含量的平均值为52.93 μg/g,最高值为223 μg/g,温泉中高含量的Li、B显著对应钙华中Li、B的高含量特征。多格错仁盐湖也具有类似的情况,在地质历史时期,温泉水持续不断地向盐湖供给成矿物质,而钙华则是这种成矿过程的忠实记录者。即是说,钙华继承和保留了古流体的部分化学组分(包括Li在内)和同位素信息<sup>[4]</sup>,这些信息可以用来重建古流体的地球化学和年代学特征,进而可以深入揭示盐湖矿床的地质成矿过程。因此,青藏高原的盐湖钙华具有十分重要的盐湖矿床学意义。

#### 4 结论

总结近年来青藏高原钙华的科学研究工作,与上世纪相比,虽然取得不小的进步,但是以钙华为研究对象的研究工作仍然欠缺,特别是在高原内部。展望未来,高原特有热成因钙华所记录的丰富地质信息亟待探索。

1) 以往利用钙华来重建古气候或水文地质条件主要集中于大气成因钙华(或称表生钙华),此类方法技术和应用比较成熟。热成因钙华多与地球深部构造活动有关,形成过程中受到来自深部的CO<sub>2</sub>气体等物质成分的影响,不能简单套用大气成因钙华的应用模式,因此,需要从钙华的成因属性、机制和区域地质背景等方面综合解析钙华的古气候信息。

2) 古流体(古泉水)、成矿盐湖和钙华均是青藏高原碰撞隆升的产物,钙华不仅具有丰富的成矿物质信息,同时也具有可靠的年龄信息,从钙华的角度去综合解读高原地区盐湖矿床的地质成矿过程,是一个全新的角度和窗口。

3) 青藏高原广泛的水热活动造就了高原钙华的复杂性和多样性,钙华的沉积速率、δ<sup>13</sup>C和δ<sup>18</sup>O指代的气候环境意义因时因地而异,通过研究钙华的成因机制,可以极大地丰富钙华研究的内容,进一步揭示高原内部的构造、地震、古气候等地质信息。

#### 参考文献(References)

- [1] Pentecost A. Travertine[M]. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2005: 11-18.
- [2] Freytag P, Plet A. Modern freshwater microbial carbonates: The phormidium stromatolites (tufa-travertine) of Southeastern Burgundy (Paris basin, France)[J]. *Facies*, 1996, 34: 219-238.
- [3] 戴亚南, 刘再华. 响水河钙华形成的水化学特征与碳稳定同位素研究[J]. *热带地理*, 2003, 23(4): 324-328.  
Dai Yanan, Liu Zaihua. Hydrochemical features and carbon isotopes in a calcite-precipitating river in Xiaoqikong, Guizhou[J]. *Tropical Geography*, 2003, 23(4): 324-328.
- [4] Lavrushin V Y, Kuleshov V N, Kikvadze O E. Travertines of the Northern Caucasus[J]. *Lithology and Mineral Resources*, 2006, 41(2): 137-164.
- [5] Kele S, Demény A, Siklósy Z, et al. Chemical and stable isotope composition of recent hot-water travertines and associated thermal waters, from Egerszalók, Hungary: Depositional facies and non-equilibrium fractionation[J]. *Sedimentary Geology*, 2008, 211: 53-72.
- [6] 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.  
Li Qiang, Dai Yanan, You Shengyi, et al. Study on the feature of tufa deposits in Baishuitai, Yunnan[J]. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(3): 178-181.
- [7] 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.  
Liu Zaihua, Yuan Daoxian, He Shiyi, et al. Origin and forming mechanisms of travertine at Huanglong ravine of Sichuan[J]. *Geochemical*, 2003, 32(1): 1-10.
- [8] Shvartsev S L, Lepokurova O E, Kopylova Y G. Geochemical mechanisms of travertine formation from fresh waters in southern Siberia[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2007, 48: 659-667.
- [9] Pache M, Reitner J, Arp G, et al. Geochemical evidence for the formation of a large Miocene "travertine" mound at a sublacustrine spring in a soda lake(Wallenstein Castle Rock, Noerdlinger Ries, Germany)[J]. *Facies*, 2001, 45: 211-230.
- [10] Das S, Mohanti M. Sedimentology of Holocene tufa carbonate in Orissa state, India[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2005, 20(1): 8-13.
- [11] Golubie S. Cyclic and noncyclic mechanisms in the formation of travertine[J]. *Verhandlungen-Internationale Vereinigung fuer Theoretische und Angewandte Limnologie*, 1969, 17: 956-961.
- [12] Buccino G, D'Argenio B, Ferreri V, et al. The travertines in the lower Tanagro Valley (Campania); geomorphological, sedimentological and geochemical study[J]. *Bollettino della Societa Geologica Italiana*, 1978, 97(4): 617-646.
- [13] 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.
- [14] Matsuoka J, Kano A, Oba T, et al. Seasonal variation of stable isotopic compositions recorded in a laminated tufa, SW-Japan[J]. *Earth Planet Science Letters*, 2001, 1912(1): 31-44.
- [15] Kano A, Kawai T, Matsuoka J, et al. High-resolution records of rainfall events from clay bands in tufa[J]. *Geology*, 2004, 32: 793-796.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Gao J, Zhou X, Fang B. U-series dating of the travertine depositing near the Rongma hot springs in northern Tibet, China, and its paleoclimatic implication[J]. *Quaternary International*, 2013, 298: 98-106.
- [19] Pustovoytov K, Riehl S, Hilger H H, et al. Oxygen isotopic composition of fruit carbonate in Lithospermeae and its potential for paleoclimatic research in the Mediterranean[J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 71 (3-4): 258-268.
- [20] Brogi A, Capezzuoli E. Travertine deposition and faulting: The fault-related travertine fissure-ridge at Terme S. Giovanni, Rapolano Terme (Italy)[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(4): 931-947.
- [21] De Filippis L, Anzalone E, Billi A, et al. The origin and growth of a recently-active fissure ridge travertine over a seismic fault, Tivoli, Ita-

- ly[J]. *Geomorphology*, 2013, 195: 13–26.
- [22] Temiz U, Gökten Y E, Eikenberg J. Strike-slip deformation and U/Th dating of travertine deposition: Examples from north Anatolian fault zone, Bolu and Yeniçay basins, Turkey[J]. *Quaternary International*, 2013, 312: 132–140.
- [23] 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.  
Liu Zaihua, Tian Youping, An Dejun, et al. Formation and evolution of the travertine landscape at Huanglong, Sichuan, one of the world natural heritages[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(6): 841–847.
- [24] 张金流, 刘再华. 世界遗产——四川黄龙钙华景观研究进展与展望[J]. *地球与环境*, 2010, 38(1): 78–87.  
Zhang Jinliu, Liu Zaihua. Progress and future prospect in research on the travertine landscape at Huanglong, Sichuan: A world's heritage site [J]. *Earth and Environment*, 2010, 38(1): 78–87.
- [25] Allen C C, Albert F G, Chafetz H S. Microscopic physical biomarkers in carbonate hot springs: Implications in the search for life on Mars [J]. *Icarus*, 2000, 147: 49–67.
- [26] Pellicer X M, Linares R, Gutiérrez F. Morpho-stratigraphic characterization of a tufa mound complex in the Spanish Pyrenees using ground penetrating radar and trenching, implications for studies in Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 388: 197–201.
- [27] Pentecost A. British travertines: A review[J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 1993, 104(1): 23–29.
- [28] 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.  
Liu Zaihua. Research progress in paleoclimatic interpretations of tufa and travertine[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(23): 2229–2239.
- [29] 牛新生, 刘喜方, 陈文西. 西藏多格错仁南岸钙华地球化学特征与钾盐地质意义[J]. *沉积学报*, 2013, 31(6): 1031–1040.  
Niu Xinsheng, Liu Xifang, Chen Wenxi. Travertine in south bank of Dogai Coring, Tibet: Geochemical characteristics and potash geological significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(6): 1031–1040.
- [30] 赵元艺, 崔玉斌, 赵希涛. 西藏扎布耶盐湖钙华岛钙华的地质地球化学特征及意义[J]. *地质通报*, 2010, 29(1): 124–141.  
Zhao Yuanyi, Cui Yubin, Zhao Xitao. Geological and geochemical features and significance of travertine in travertine-island from Zhabuye salt lake, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(1): 124–141.
- [31] 覃建勋, 韩鹏, 车晓超, 等. 利用荣玛地区温泉钙华 $\delta^{18}\text{O}$ 及微量元素重建西藏全新世以来古气候[J]. *地学前缘*, 2014, 21(2): 312–322.  
Qin Jianxun, Han Peng, Che Xiaochao, et al. Resuming the Holocene paleoclimate using  $\delta^{18}\text{O}$  and trace elements of travertine in Rongma area, Tibet[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(2): 312–322.
- [32] 侯增谦, 李振清, 曲晓明, 等. 0.5 Ma 以来的青藏高原隆升过程——来自冈底斯带热水活动的证据[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(增刊 1): 27–33.  
Hou Zengqian, Li Zhenqing, Qu Xiaoming, et al. Uplift processes of the Tibetan Plateau since 0.5 Ma: Evidence from hydrothermal activity in Gangdese belt[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2001, 31( Suppl 1): 27–33.
- [33] 赵平, 谢鄂军, 多吉, 等. 西藏地热气体的地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2002, 18(4): 539–550.  
Zhao Ping, Xie Ejun, Dor Ji, et al. Geochemical characteristics of geothermal gases and their geological implications in Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(4): 539–550.
- [34] Tapponnier P, Molnar P. Active faulting and tectonics of China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82: 2905–2930.
- [35] Molnar P, Tapponnier P. Active tectonics of Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83: 5361–5375.
- [36] Ni J, York J. Late Cenozoic tectonics of the Tibetan plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83: 5377–5384.
- [37] 侯增谦, 李振清. 印度大陆俯冲前缘的可能位置: 来自藏南和藏东活动热泉气体 He 同位素约束[J]. *地质学报*, 2004(4): 482–493.  
Hou Zengqian, Li Zhenqing. Possible location for underthrusting front of the Indus Continent: Constraints from Helium isotope of the geothermal gas in southern Tibet and eastern Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004 (4): 482–493.
- [38] 李振清, 侯增谦, 聂风军, 等. 藏南上地壳低速高导层的性质与分布: 来自热水流体活动的证据[J]. *地质学报*, 2005, 79(1): 68–77.  
Li Zhenqing, Hou Zengqian, Nie Fengjun, et al. Characteristic and distribution of the partial melting layers in the upper crust: Evidence from active hydrothermal fluid in the south Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(1): 68–77.
- [39] 中国地质大学(武汉)地质调查研究院. 青藏高原及邻区第四纪地质与地貌图说明书[R]. 武汉: 中国地质大学地质调查研究院, 2010.  
Geological Survey of China University of Geosciences. The instruction of Quaternary geological and geomorphologic map of Qinghai-Tibetan Plateau and its adjacent area[R]. Wuhan: Geological Survey of China University of Geosciences, 2010.
- [40] 刘再华, Yoshimura K, Inokura Y, 等. 四川黄龙沟天然水中的深源  $\text{CO}_2$  与大规模的钙华沉积[J]. *地球与环境*, 2005, 33(2): 1–10.  
Liu Zaihua, Yoshimura K, Inokura Y, et al. Deep-source  $\text{CO}_2$  in natural waters and its role in extensive tufa deposition in the Huanglong ravines, Sichuan, China[J]. *Earth and Environment*, 2005, 33(2): 1–10.
- [41] 孙海龙, 刘再华, 吕保樱, 等. 云南白水台雨水线及钙华 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节和空间变化特征[J]. *地球化学*, 2008, 37(6): 542–548.  
Sun Hailong, Liu Zaihua, Lü Baoying, et al. Meteoric water line and spatiotemporal change in  $\delta^{18}\text{O}$  of the travertine in Baishuitai area[J]. *Geochimica*, 2008, 37(6): 542–548.
- [42] 刘再华, 张美良, 游省易, 等. 碳酸钙沉积溪流中地球化学指标的空间分布和日变化特征: 以云南白水台为例[J]. *地球化学*, 2004, 33(3): 269–278.  
Liu Zaihua, Zhang Meiliang, You Shengyi, et al. Spatial and diurnal variations of the geochemical indicators in a calcite-precipitating stream—Case study of Baishuitai, Yunnan[J]. *Geochimica*, 2004, 33(3): 269–278.
- [43] 刘再华, 李红春, 游镇烽, 等. 云南白水台现代内生钙华微层的特征及其古气候重建意义[J]. *地球学报*, 2006, 27(5): 479–486.  
Liu Zaihua, Li Hongchun, You Zhenfeng, et al. Thickness and stable isotopic characteristics of modern seasonal climate controlled sub-annual travertine laminae in a travertine-depositing stream at Baishuitai, Southwest China: Implications for paleoclimate reconstruction[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, 27(5): 479–486.
- [44] 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]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2014, 125: 34–48.
- [45] Hudson A M, Quade J. Long-term east-west asymmetry in monsoon rainfall on the Tibetan Plateau[J]. *Geology*, 2013, 41: 351–354.

## Sedimentary property and the geological significance of travertines in Qinghai-Tibetan Plateau

NIU Xinsheng<sup>1</sup>, ZHENG Mianping<sup>1</sup>, LIU Xifang<sup>1</sup>, QI Lujing<sup>2</sup>

1. MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

2. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China

**Abstract** The Travertines may be divided into two groups, the meteogene travertines and the thermogene travertines, with not only a landscape value, but also a scientific research value. We have a wide distribution of the travertines in the Qinghai-Tibetan Plateau, mainly in springs and in the lacustrine environment. The formation of travertines is related with the hydrothermal activity in the interior of the Qinghai-Tibetan Plateau, controlled by the crust extensional activity caused by the subduction of the Indian continent and the strike-slip pull-apart process of regional faults. The travertines provide records of the paleoclimatic information and the ore-forming processes of the saline lake deposits. However, a good interpretation of the information of travertines remains a research issue. Generally, the carrier CO<sub>2</sub> of the thermogene travertines originates from the thermal processes or even from the processes below the Earth's crust. The genetic mechanism of the thermogene travertines is related with the time and the location and is more complex than that of the meteogene travertines. Not all travertines keep records of the paleoclimatic information. So, it is on the basis of understanding the genetic mechanism of the travertines that one may rebuild the information of the paleoclimate and the lake deposits.

**Keywords** Qinghai-Tibetan Plateau; travertines; paleoclimate; lake deposits

(责任编辑 韩星明)