

美国西尔斯盐湖钙华研究综述

李瑞琴^{1,2}, 刘成林¹, LOWENSTEIN T K³

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 3. 纽约州立大学宾汉姆顿分校, 地质科学与环境研究系, 纽约 13902)

摘要: 钙华具有重要的科研价值。美国加利福尼亚州西尔斯湖内北部、中部和西南部广泛发育钙华丘, 丘状体的高度从几厘米至45 m不等, 通常高度为5~12 m。钙华丘内存在4种沉积相, 分别为多孔海绵状钙华沉积相、结壳状钙华沉积相、柱状钙华沉积相和薄层结壳状钙华沉积相。从时空分布来讲, 钙华呈两种沉积层序, 分别为多孔海绵状钙华沉积相-结壳状钙华沉积相-薄层结壳状钙华沉积相-多孔海绵状钙华沉积相和多孔海绵状钙华沉积相-柱状钙华沉积相-薄层结壳状钙华沉积相-多孔海绵状钙华沉积相。这些钙华主要由方解石和文石组成, 从微观尺度来讲, 主要由纳米球晶体和棒状晶体组成, 被解释为是微生物作用活动的结果。钙华沉积相中 $\delta^{13}\text{C}$ 的测定结果均为正值, 表明西尔斯湖钙华属于热成因钙华。对西尔斯湖钙华主要沉积类型及沉积成因的讨论, 可以为我国钙华研究提供对比参考资料。

关键词: 西尔斯湖; 钙华; 沉积类型; 沉积成因

中图分类号: P588.24⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)05-0965-12

A review on the tufa research in the Searles Salt Lake, USA

LI Rui-qin^{1,2}, LIU Cheng-lin¹ and LOWENSTEIN T K³

(1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Department of Geological Sciences and Environmental Studies, State University of New York at Binghamton, New York 13902, USA)

Abstract: Tufa has a scientific research value. There are wide distributions of the tufa mounds in the north, middle and southwest of Searles Lake, California, USA. The tufa mounds range from a few centimeters to 45 m in height, and most are 5 to 12 m high. There are four tufa facies can be identified from the mounds, including porous spongy tufa facies, nodular tufa facies, columnar tufa facies and finely-laminated crusts tufa facies. In terms of temporal distribution, there are two sequences of tufa deposition, including porous spongy tufa facies to nodular tufa facies to finely-laminated crusts tufa facies to porous spongy tufa facies and porous spongy tufa facies to columnar tufa facies to finely-laminated crusts tufa facies to porous spongy tufa facies. These tufa mounds mainly consist of calcite and aragonite. On the microscopic scale, these tufa facies dominantly make up nano-spheres and rod-like crystals, interpreted to be the activities of microorganism, such as bacterial. The values of $\delta^{13}\text{C}$ in the tufa facies were measured, and the results were positive, proving that the tufa of Searles Lake is the thermogene tufa. The discussion on the main sedimentary types and genesis of tufa in Searles Lake can provide comparative reference for the

收稿日期: 2020-08-14; 接受日期: 2021-04-21; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(KK2005); 青海省自然科学基金(2019-ZJ-917); 全国矿产资源国情调查与综合评价项目(DD20190606)

作者简介: 李瑞琴(1987-), 女, 博士生, 主要研究方向为水文地球化学计算机模拟、地球化学、资源综合利用, E-mail: 1601110551@pku.edu.cn; 通讯作者: 刘成林(1963-), 研究员, 博士生导师, 主要从事沉积矿床研究工作, E-mail: liuchengl@263.net。

study of tufa in China.

Key words: Searles Lake; tufa; sedimentary characteristics; sedimentary genesis

Fund support: Special Project for Basic Scientific Research Business Expenses of Central Public Welfare Scientific Research Institutes (KK2005); Natural Science Foundation of Qinghai Province, China (2019-ZJ-917); National Mineral Resources Investigation and Comprehensive Evaluation (DD20190606)

钙华,又称为石灰华,是一种主要由碳酸钙矿物(方解石、文石)组成的沉积物,广泛分布于陆地环境中(Pentecost, 1995; Ford and Pedley, 1996; Pentecost and Zhang, 2001; Bridge and Demicco, 2008; 牛新生等, 2017; 汪智军等, 2018)。英文 travertine 和 tufa 均被翻译为钙华, travertine 是一般致密状的钙华, tufa 是多孔隙海绵状的钙华(Pentecost, 2005; Neuendorf *et al.*, 2005; Bridge and Demicco, 2008; Jones and Renaut, 2010)。由于钙华沉积是古气候、古环境信息记录的良好载体,且分辨率可达到年、季、月尺度,因而被广泛用来研究古气候环境信息(Chafetz and Laurence, 1991; Matsuoka *et al.*, 2001; Kano *et al.*, 2004; Andrews and Brasier, 2005; Liu Zaihua *et al.*, 2010; Guo and Chafetz, 2014)。钙华还能够提供绝对的沉积年代(Andrews, 2006; 刘再华, 2014; 汪智军等, 2018)。对钙华的研究在环境保护方面也发挥了重要作用(Freytet and Verrecchia, 1999; Janssen *et al.*, 1999; 刘再华等, 2016; 汪智军等, 2018)。同时钙华沉积是构造活动和地热活动的重要标志,能够为该类研究提供详实的信息(Hancock *et al.*, 1999; Brogi *et al.*, 2009; 汪智军等, 2018)。因此,钙华具有重要的科研价值。

西尔斯湖位于美国加利福尼亚州,是一座干盐湖,因富含大量的盐类矿物,尤其是天然碱、硫酸钾、硼酸而闻名(Smith, 1979)。同时西尔斯湖还分布了大量钙华。几十年来,关于西尔斯湖的研究侧重于天然碱、硼酸等盐类沉积方面,有关西尔斯湖钙华沉积研究鲜少看到。截至目前为止,关于西尔斯湖钙华沉积的研究最早可追溯到 Scholl (1960)对部分大型钙华进行的描述,但是并未深入探求钙华成因。之后 Guo 和 Chafetz (2012, 2014)对西尔斯湖的钙华进行了详细的描述与分类,并探究了部分钙华成因。

在我国包括西藏、云南、广西、贵州和四川等在内的一些地方也分布有许多钙华(李强等, 2002; 王智慧等, 2008; 牛新生等, 2017; 李刚等, 2018; 王振耀, 2019),但大多数还缺乏系统的研究。西尔斯

湖属于第四系盐湖,其类型与我国青海、西藏地区的众多盐湖类似。2020年1月份笔者对西尔斯湖钙华沉积进行了野外考察,本文以美国加利福尼亚州西尔斯湖钙华为对象,讨论其主要沉积类型及沉积成因,以期为我国钙华研究提供对比参考资料。

1 地质背景

西尔斯湖位于加利福尼亚州莫哈韦沙漠,距洛杉矶 270 km,为一典型内陆干盐湖,盐湖盆地为北向展布的地堑盆地,长近 19 km,最宽处 13 km,现存面积约为 105 km²(图 1)。西尔斯湖被数个山脉所环绕,西面是阿格斯山脉(海拔 2 695 m)和斯潘格勒山(海拔 1 011 m),南面为岩熔山(海拔 1 392 m),东面和北面为斯莱特山脉(海拔 1 583 m)(Smith, 1965, 2009)。湖区海拔高度为 495.12 m,属典型的干旱沙漠气候,昼夜温差大,地表温度范围在 -12.2℃~47.8℃,年平均温度为 19.1℃(Smith, 1979),年平均降雨量约为 100 mm(Smith, 2009),年平均蒸发量约为 1~2 m(Benson *et al.*, 1990)。

西尔斯湖是一个残留湖,出露地层主要为第四系,主要包括圣诞峡谷组(Christmas Canyon Formation)和西尔斯湖组(Searles Lake Formation),钙华沉积主要在西尔斯湖组,详细岩性特征见图 2。

在更新世晚期(雨量变化甚大的地质时期),尤其在气候较湿润的时期,上游的古欧文斯湖溢流进入中国湖;当中国湖的水位达到海平面 715 m 以上时,会溢流进入西尔斯湖;当西尔斯湖的水位达到最高海拔 690 m 以上时,从下游向东溢流进入帕纳斯特湖(图 1)。此时,西尔斯湖与欧文斯湖、中国湖、帕纳斯特湖及死亡谷的曼利湖呈链状排列(图 1)。由于大气降水、地表径流和冰雪溶水,使得西尔斯湖定期呈现深水湖,最大湖深达 200 m(Guo and Chafetz, 2012)。经过相当长的时间以后,随着气候的变化,西尔斯湖成了这些湖泊中的最后一个,沉积和结晶了大量碳酸盐、硫酸盐和硼酸盐等。

根据西尔斯湖周围山坡上的湖岸线、湖泊沉积

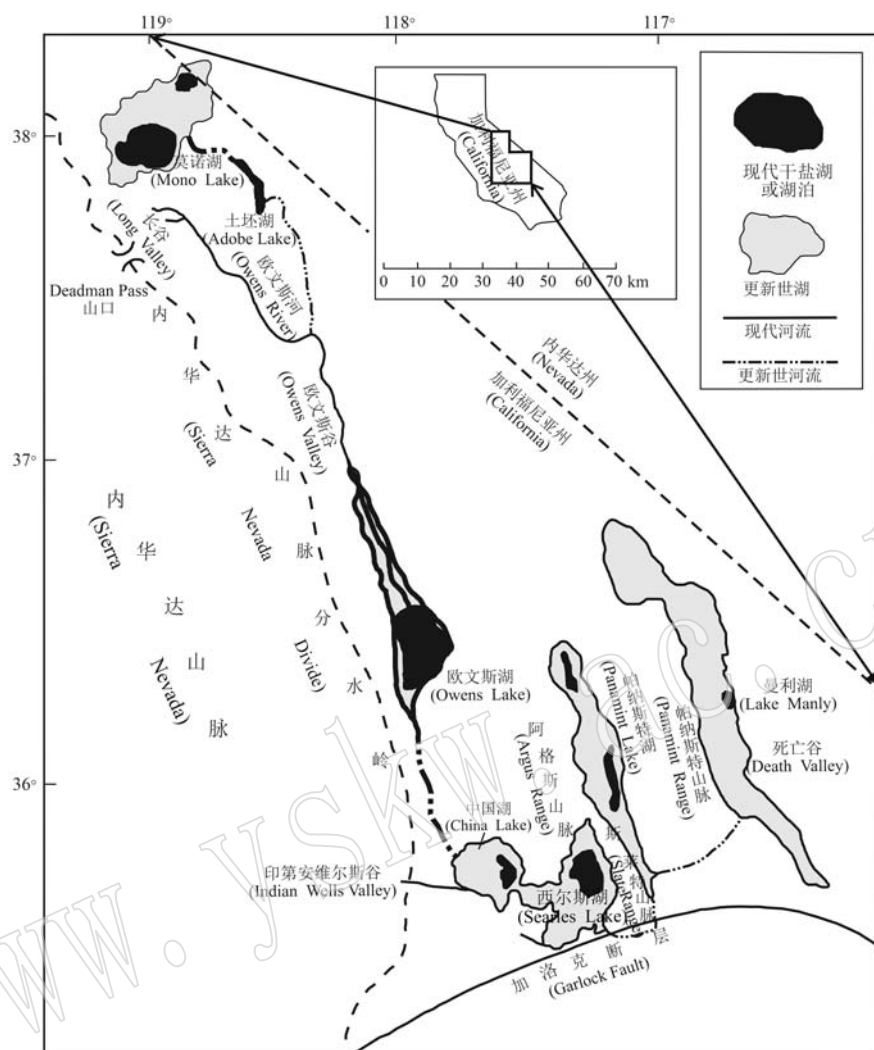


图1 西尔斯湖位置图[据 Hay 和 Guldman(1987)、David 等(2010)]

Fig. 1 Location of Searles Lake (modified from Hay and Guldman, 1987; David *et al.*, 2010)

物和岩芯样品,识别出了两个重要的晚更新世洪积湖泊,分别对应于内华达山脉的塔霍(Tahoe)和蒂奥加(Tioga)两个冰川阶段。塔霍(Tahoe)冰川阶段年龄大约在公元前10万年至3.2万年;蒂奥加(Tioga)冰川阶段年龄大约在公元前2.5万年至1万年(Flint and Gale, 1958; Lin *et al.*, 1998; Guo *et al.*, 2012, 2014)。在这两个重要的洪积阶段,出现大量的钙华沉积。

2 钙华沉积的分布

在西尔斯湖内钙华分布比较广泛,其沉积分布特征与加洛克(Garlock)断层有关的裂缝密切相关,钙华内部多见泉眼、泉孔和泉口。总体上,西尔斯湖

钙华沉积大致沿以下走向呈带状分布: $N \cdot 65^{\circ}W$, $N \cdot 50^{\circ}W$, $N \cdot 30^{\circ}W$, $N \cdot 55^{\circ}E$ 和 $N \cdot 65^{\circ}E$, 总体划分为三大区,分别位于西尔斯湖的北部、中部和西南部(图3)(Scholl, 1960; Guo *et al.*, 2012, 2014)。这些钙华多呈丘状,高度范围在0.3~45 m之间,通常为3~12 m高(Scholl, 1960)。

北部和中部钙华沉积年龄约在公元前2.5万年至1万年之间,相对年轻,受风化作用影响相对弱,原生晶体结构相对易识别,更具研究价值。西南部的钙华相对较老,年龄约在公元前10万年至3.2万年之间,因此西南部钙华沉积风化相对严重,其原生晶体结构与蚀变晶体结构变得难以区分。在西南部钙华丘极为发育,这些钙华丘高大壮观、形态各异,成了著名的地质旅游景观(图4)。

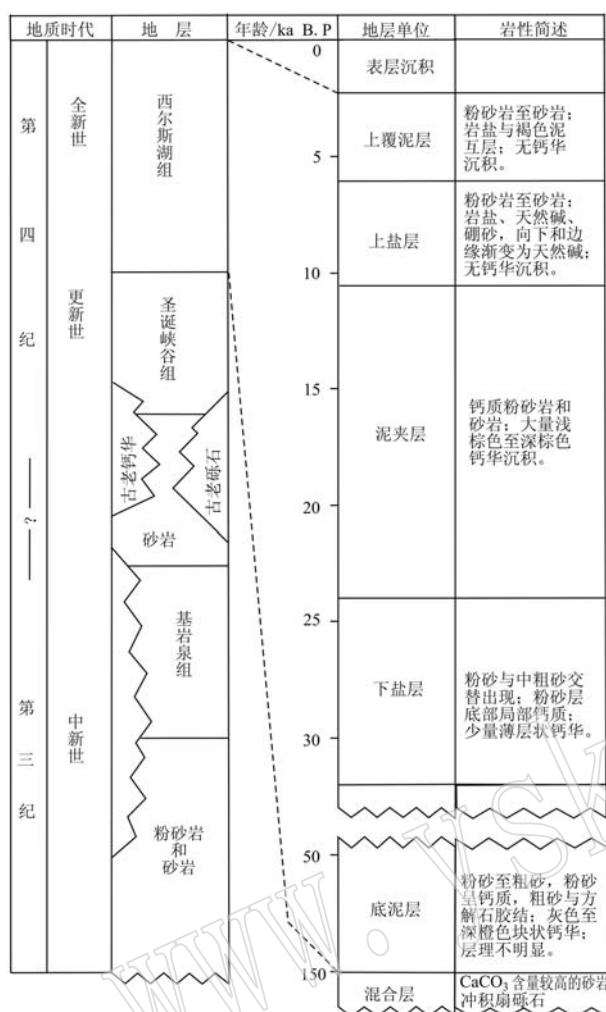


图2 西尔斯湖地层柱状图(据 Smith, 2009)

Fig. 2 Stratigraphic column of the Searles Lake (modified from Smith, 2009)

3 钙华沉积特征

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,如泉水钙华、河流障钙华、沼泽钙华和湖泊钙华等(Pedley, 1990)。但是,自然环境中,由于泉水、河流、沼泽、湖泊等环境彼此相互联系、相互依存,很多时候不能用一种沉积模式概括。就西尔斯湖来说,钙华的形成主要与泉水和湖泊等水体紧密联系。沉积相是沉积环境的记录,是生成环境、生成条件和其特征的总和,根据在西尔斯湖野外所见的大量剖面,这些钙华多具孔状、柱状、结节状和薄层状等结构特征。Guo等(2012, 2014)根据这些结构特征将西尔斯湖钙华划分为4个沉积相,

分别为多孔海绵状钙华沉积相(P)、结节状钙华沉积相(N)、柱状钙华沉积相(C)和薄层结壳状钙华沉积相(L)。多孔海绵状钙华沉积相又可细分为位于丘状体的最里面部分(P1)和最外层部分(P2)。在西尔斯湖内,钙华沉积呈两种层序,分别为多孔海绵状钙华(P1)-结节状钙华(N)-薄层结壳状钙华(L)-多孔海绵状钙华(P2)和多孔海绵状钙华(P1)-柱状钙华(C)-薄层结壳状钙华(L)-多孔海绵状钙华(P2)(图5)。

完整的沉积层序如图5所示,但受风化作用影响,野外观察中发现,能完整保存下来该沉积层序的钙华丘较少,尤其在北部和西南部分布区。多数情况下,是P2直接覆盖在P1上,极端情况下只能见到P1,钙华丘周围堆积着大量受侵蚀的湖相沉积物,形成碎屑裙,经常在这些碎屑裙中发现结节状或柱状碎片。

3.1 多孔海绵状钙华沉积相

在西尔斯湖的北部、中部和西南部分布着大量多孔海绵状的钙华丘,孔隙度高达30%~40%。从时空分布上来讲,多孔海绵状钙华沉积相分别位于丘状体的最里面部分(P1)和最外层部分(P2)(图6a)。通常P1在泉孔附近水下堆积,构成钙华丘的核心,其高度在几厘米至40 m之间不等。在西南部和北部,由于风化作用影响,大部分P1暴露在外面,受侵蚀较严重;中部地区,P1部分相对保存完好。P2位于钙华丘的最外层,其最大厚度可达10 m,由于露头较好,也经历了相当强的风化作用。多孔海绵状钙华沉积相多由高度不规则的孔隙结构组成,局部可见垂直堆积的层流结构,其边缘向上倾斜(图7),这可能是在来自泉孔的地下水从上至下流动过程中沉积形成的。我国云南白水台和四川黄龙也常见这种垂直方向上层层累积的钙华特征,且其规模更大,推测云南白水台和四川黄龙这种垂直方向上层层累积的钙华,其形成原因与西尔斯湖多孔海绵状钙华类似,可能是在来自泉孔的地下水从上至下流动过程中沉积形成的。

在西尔斯湖内,受风化作用影响,常缺失结节状钙华沉积相、柱状钙华沉积相或薄层结壳状钙华沉积相,通常P2直接覆盖在P1上(图5a)。

3.2 结节状钙华沉积相

结节状钙华沉积相主要分布在西尔斯湖的北部。根据野外露头,可以明显看到结节状钙华沉积相与P1呈突变接触,该沉积相由结节结构的沉积物

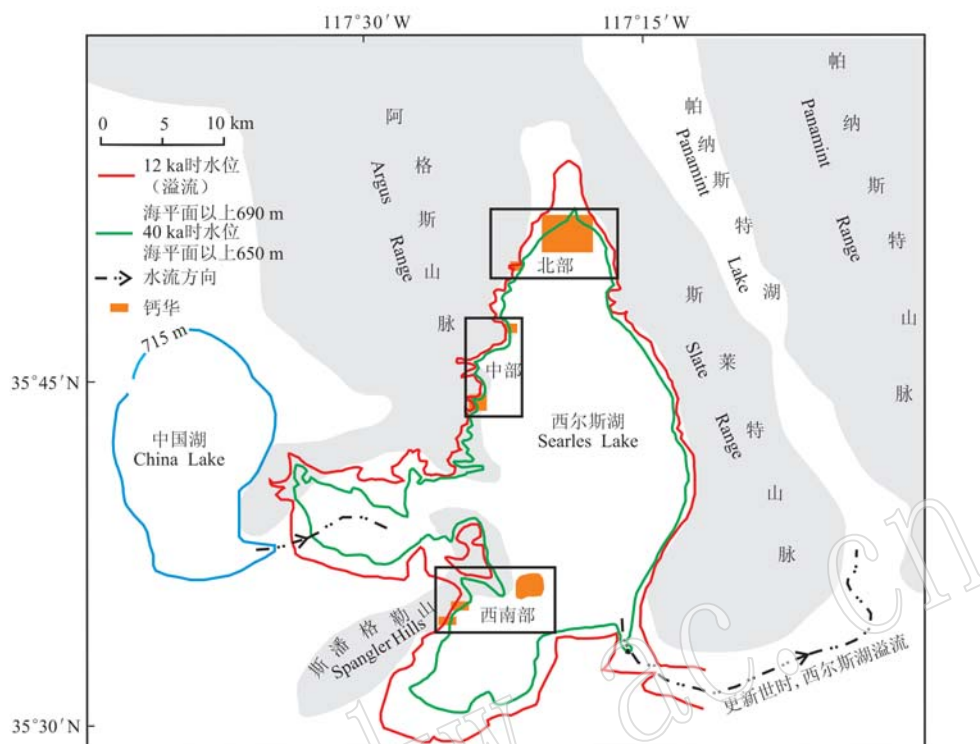


图 3 西尔斯湖钙华沉积分布图[地理底图据 David 等(2010), 钙华区域据 Scholl(1960)、Guo 等(2012, 2014)]

Fig. 3 Distribution of tufa deposition in Searles Lake (geographical map modified from David *et al.*, 2010, tufa area from Scholl, 1960; Guo *et al.*, 2012, 2014)



图 4 西尔斯湖西南部钙华沉积景观

Fig. 4 The tufa sedimentary landscape in the southwest of Searles Lake

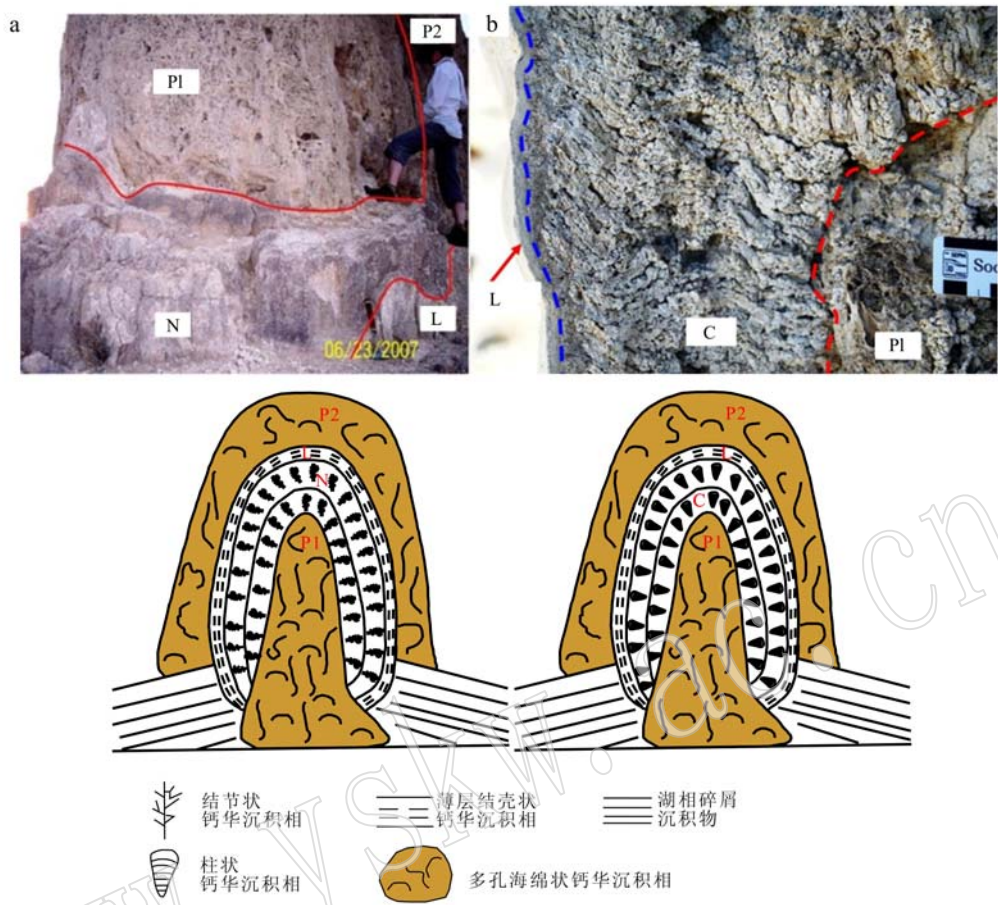


图 5 西尔斯湖钙华沉积层序[据 Guo 等(2012)]

Fig. 5 The sedimentary sequences of tufa at Searles Lake (Guo *et al.*, 2012)

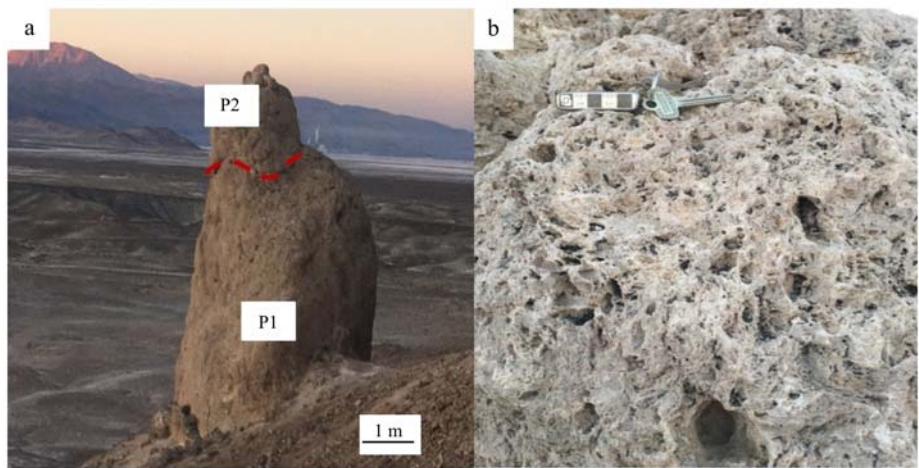


图 6 西尔斯湖多孔海绵状钙华沉积相

Fig. 6 Porous tufa facies at Searles Lake

组成(图 8b 可以看到明显的结节颗粒),通常每个钙华丘中含 5 至 7 个世代,每代的厚度在 6~14 cm 之间(图 8)。由内层至最外层,结节状结构特征越来

越显著。据 Guo 等(2012)薄片镜下鉴定、X 衍射粉晶衍射分析以及扫描电镜分析显示,这些结节状结构可能是生物作用的结果。在我国的众多钙华沉积



图 7 西尔斯湖多孔海绵状钙华沉积相中的层状结构
Fig. 7 The sub-horizontally laminated structure in the porous tufa facies at Searles Lake

点均发现了生物作用的踪迹。生物作用能对钙华微相结构和地球化学特征产生重要影响, 弄清与钙华相关的生物种类以及不同生物所形成的钙华结构, 将有助于解释古钙华沉积记录。西尔斯湖结节状结

构钙华, 可能是生物作用的结果。Guo 等 (2012, 2014) 对西尔斯盐湖结节状钙华进行了详细描述, 可以为我国相关钙华研究提供参考。

3.3 柱状钙华沉积相

柱状钙华沉积相主要分布在中部地区, 通常覆盖在 P1 上, 二者呈突变接触 (图 9a), 或直接沉积在基岩上 (图 9b)。在该沉积相中, 柱状钙华沉积物垂向上呈叠层状堆积 (图 9c), 通常 5~7 层, 由于共生作用或受湖相沉积物和碳酸盐胶结物的影响, 相邻层之间的边界不明显, 每层厚度在 0.5~3 cm 之间, 水平方向上由中心向外呈放射状排列 (图 9d)。

薄片镜下鉴定、X 衍射粉晶衍射分析以及扫描电镜分析显示, 柱状沉积相是由微柱状叠层石组成, 尺寸达微米级, 该沉积相可能是生物作用的结果 (Guo *et al.*, 2012)。

3.4 薄层结壳状钙华沉积相

在西尔斯湖的北部和中部地区, 偶见薄层结壳状钙华沉积相, 它们或覆盖在结节状沉积相上或覆

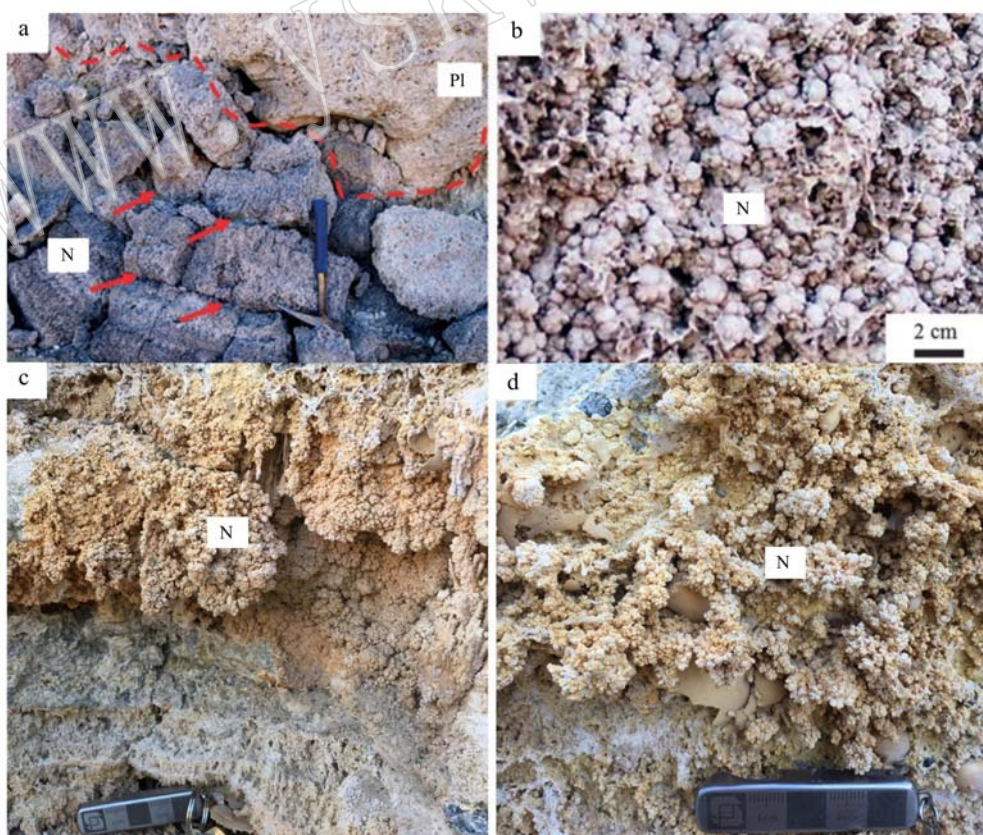


图 8 西尔斯湖结节状钙华沉积相 [a 和 b 据 Guo 等 (2012)]

Fig. 8 Nodular tufa facies at Searles Lake (a and b from Guo *et al.*, 2012)

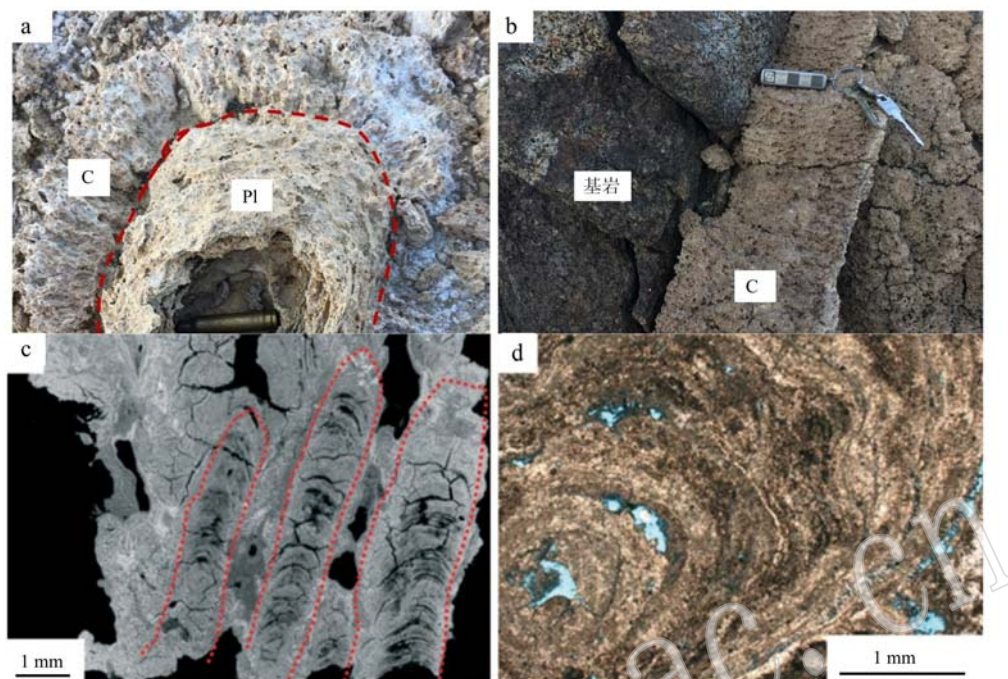


图9 西尔斯湖柱状钙华沉积相[c和d据Guo等(2012)]

Fig. 9 The columnar tufa facies at Searles Lake (c and d from Guo *et al.*, 2012)

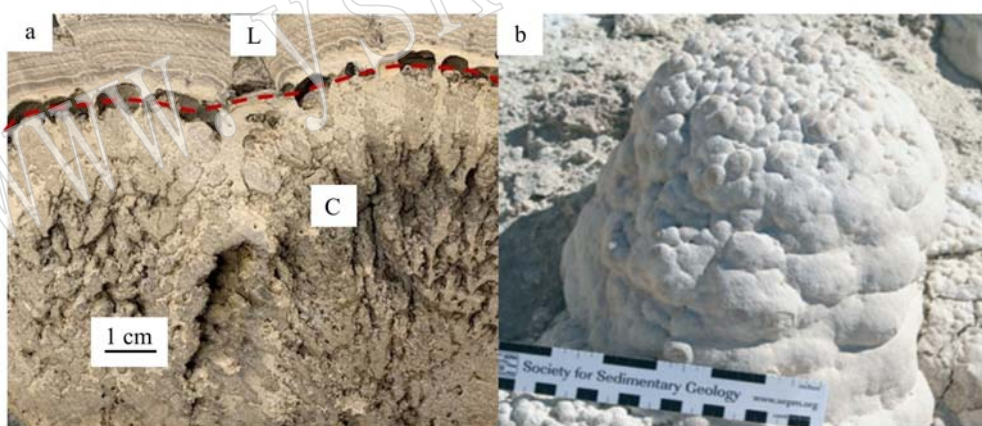


图10 西尔斯湖薄层结壳状钙华沉积相[b据Guo等(2012)]

Fig. 10 Finely-laminated crusts tufa facies at Searles Lake (b from Guo *et al.*, 2012)

盖在柱状沉积相上(图10a、10b)。在北部地区,这些薄层状结构的厚度通常在0.5~4 cm之间,中部地区的相对薄,平均厚度大约为0.5 cm。

Guo等(2012)解释为这些薄层结壳结构是当湖面水位下降到钙华丘高度以下时,在压力作用下,地下水通过泉孔继续向上涌,在重力作用下从钙华丘顶端向下流动,形成散布的片状水流,沉积为薄层结壳结构。

不同的钙华晶体类型和形态,包括树枝状晶体、纳米球

4 西尔斯湖钙华沉积相微相特征

受沉积环境和沉积过程控制,钙华通常具有各种不同的沉积形态和结晶构造。钙华微岩相结构及其形态能指示特定的钙华沉积过程。Guo等(2012)对西尔斯湖钙华沉积的微岩相进行了研究,指出西尔斯湖钙华主要由方解石和文石组成,识别出了不晶体、棒状晶体、文石胶结物、方解石胶结物等(图

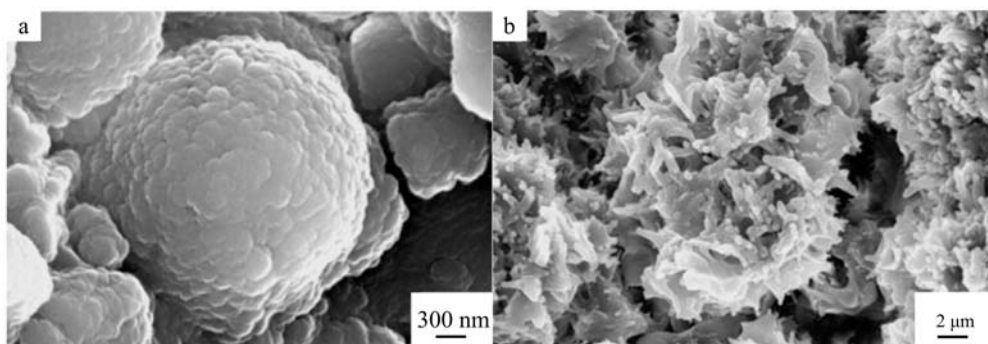


图 11 西尔斯湖钙华沉积微岩相[据 Guo 等(2012)]

Fig. 11 The microstructure of tufa facies at Searles Lake (Guo *et al.*, 2012)

a—纳米球晶体; b—棒状晶体

a—nano-spheres crystals; b—rod-like crystals

11), 部分钙华受蚀变作用影响, 表现在溶解、重结晶、亮晶泥晶化等方面。

经过进一步研究确定这些微尺度和纳米尺度的沉积形态是生物作用导致的(Guo *et al.*, 2012)。其他研究表明这些纳米球晶体是纳米级的球形细菌作用的结果(Folk, 1993, 1994, 1995; Folk and Lynch, 2001; Cavalazzi *et al.*, 2007; Zhou and Chafetz, 2009), 棒状晶体是杆状或线状细菌作用的结果(Loisy *et al.*, 1999; Benzerera *et al.*, 2003; Cavalazzi *et al.*, 2007)。我国贵州马脚冲瀑布钙华沉积环境中可观察到大量棒状晶体(王智慧等, 2008), 应该也是生物作用的结果。

5 钙华沉积成因

钙华成因的分类方法有多种, 主要是基于形成钙华的 CO_2 来源划分, 一般分为大气成因钙华和热成因钙华。大气成因钙华主要起因于土壤和大气来源 CO_2 的脱气作用, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常较低, 一般为 $-12\text{‰} \sim 2\text{‰}$, 热成因钙华起因于来自地壳内部热成因的脱气作用, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常较高, 一般为 $-1\text{‰} \sim +10\text{‰}$ (刘再华, 2014; 牛新生等, 2017; 杜磊等, 2020), 有国内学者分别将之称为表生成因和内生成因。

Guo 等(2014)对西尔斯湖的各钙华沉积相进行了 $\delta^{13}\text{C}$ 的测定, 结果显示 P1 中 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 $+1.68\text{‰}$, 柱状钙华沉积相中 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 $+4\text{‰}$, 结节状钙华沉积相中 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 $+4.2\text{‰}$, 薄层结壳状钙华沉积相中 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 $+4.1\text{‰}$, P2 中

$\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 2‰ 。由于西尔斯湖钙华的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均为正值, 因此属于热成因钙华, 同时受生物作用影响。这与西尔斯湖的地质背景密切相关。在西尔斯湖的南部边缘存在一条长达 250 km 的加洛克断裂, 湖内存在与该断裂有关的裂缝、裂隙, 更新世时期该区地热活动异常, 热水活动如温泉极为发育, 这些热液流体来自地层深部, 受岩浆热源和深循环影响, 含有 CO_2 , 自然使得西尔斯湖的钙华沉积具有热成因属性。野外考察时, 发现钙华丘内普遍存在泉孔、泉眼和泉口(图 12)。但现在没有活热泉存在。

更新世晚期, 雨水充沛, 来自上游的欧文斯河河水经中国湖补给西尔斯湖, 该水体呈碱性, 富含大量 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} (Guo *et al.*, 2012)。此时加洛克断裂构造活动强烈, 深层地下水以热泉的形式涌出, 来自地球深部的热泉水, 富含 Ca^{2+} 。泉水和湖水混合在一起, HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 与 Ca^{2+} 结合, 形成碳酸盐矿物, 生物活动作用促使溶液对方解石或文石过饱和, 引起碳酸钙沉积析出, 形成钙华(Guo *et al.*, 2012)。

6 结论与建议

6.1 结论

(1) 更新世晚期, 西尔斯湖沉积了大量钙华丘, 这些丘状体表现出了 4 种沉积相, 分别为多孔海绵状钙华沉积相、结壳状钙华沉积相、柱状钙华沉积相和薄层结壳状钙华沉积相。从时空分布来讲, 呈现出两种沉积层序, 分别为多孔海绵状钙华沉积相-结壳状钙华沉积相-薄层结壳状钙华沉积相-多孔海绵状钙华沉积相和多孔海绵状钙华沉积相-柱状钙华

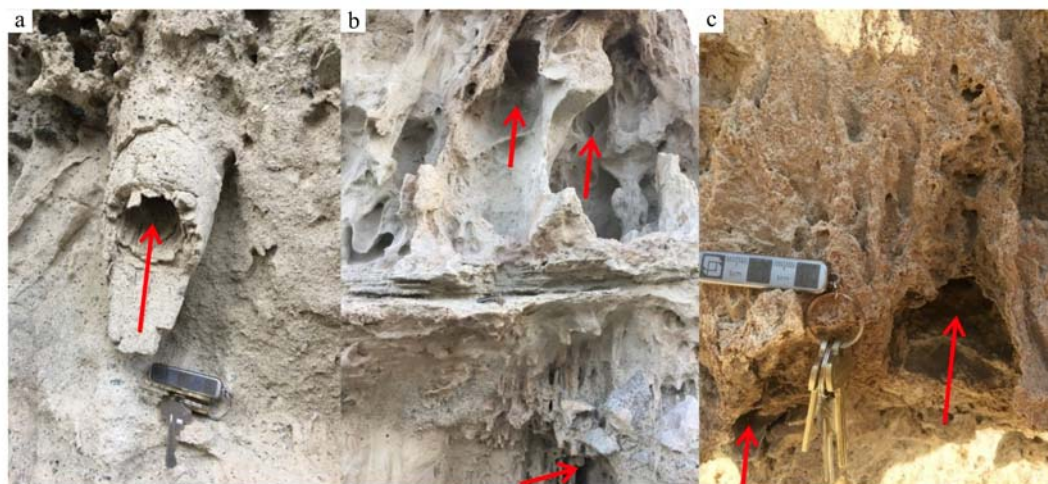


图 12 西尔斯湖钙华丘内热泉活动证据

Fig. 12 The evidence of hot springs at Searles Lake

沉积相-薄层结壳状钙华沉积相-多孔海绵状钙华沉积相。

(2) 西尔斯湖钙华主要由方解石和文石组成,微相分析表明其内部具有各种不同的沉积形态和结晶构造,包括树枝状晶体、纳米球晶体、棒状晶体、文石胶结物、方解石胶结物等,部分钙华受蚀变作用影响,表现在溶解、重结晶、亮晶泥晶化等方面。这些微尺度和纳米尺度的沉积形态和结晶构造是微生物作用所致。

(3) 在西尔斯湖内,钙华的形成主要与泉水和湖泊等水体紧密联系。钙华沉积相中 $\delta^{13}\text{C}$ 值均为正值,证明西尔斯湖钙华属于热成因钙华。

6.2 建议

钙华沉积受地质背景、气候、生物、水的物理化学性质等多种因素控制。受不同沉积环境和沉积过程控制,钙华通常具有不同的沉积形态。西尔斯湖的钙华为古钙华,对其沉积相、微相及其形态组合的研究揭示了其沉积过程和沉积环境。西尔斯湖属于第四纪盐湖,其类型与我国青藏高原的众多盐湖类似。在我国青藏高原及其边缘(云南白水台和四川黄龙)钙华分布比较广泛,贵州马脚冲瀑布也分布有钙华沉积,并且青藏高原部分地区还存在时代较早的古钙华,研究其沉积过程和沉积环境,能够为当地古气候重建提供可靠信息,同时对全球古气候重建的规律和可能的机制提供新的科学支撑。但目前国内学者利用钙华重建古气候时侧重于 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的相关研究,利用详细的岩相学分析钙华的沉积过程、沉积环境、沉积成因的研究相对较少,因此建议

加强对钙华沉积岩相学特征的深入研究。

致谢 感谢美国地质调查局 Adam Hudson 博士、麻省理工学院 David McGee 教授、纽约州立大学宾汉姆顿分校 Kristian J. Olson 博士在野外工作中提供的帮助与支持,是他们带笔者考察了西尔斯湖北部、中部和西南部的钙华沉积相;感谢审稿专家为本文提出了宝贵的修改意见。

References

- Andrews J E and Brasier A T. 2005. Seasonal records of climatic change in annually laminated tufas: Short review and future prospects[J]. *Journal of Quaternary Science*, 20(5): 411~421.
- Andrews J E. 2006. Palaeoclimatic records from stable isotopes in riverine tufas: Synthesis and review[J]. *Earth-Science Review*, 75: 85~104.
- Benson L V, Curry D R, Dorn R L, *et al.* 1990. Chronology of expansion and contraction of four great basin lake systems during past 35 000 years[J]. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 78: 241~286.
- Benzerer K, Menguy N, Guyot F, *et al.* 2003. Nanobacteria-like calcite single crystals at the surface of the Tathouine meteorite[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(13): 7 438~7 442.
- Bridge J and Demicco R. 2008. *Earth Surface Processes, Landforms and Sediment Deposits*[M]. New York: Cambridge University Press.
- Brogi A and Capezzuoli E. 2009. Travertine deposition and faulting: The

- fault-related travertine fissure-ridge at Terme S. Giovanni, Rapolano Terme (Italy)[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 931~947.
- Cavalazzi B, Barbieri R and Ori G G. 2007. Chemosynthetic microbialites in the Devonian carbonate mounds of Hamar Laghdad (Anti-Atlas, Morocco)[J]. *Sedimentary Geology*, 200: 73~88.
- Chafetz H S and Lawrence J R. 1991. Microenvironmental controls on mineralogy and habit of CaCO_3 precipitates: An example from an active travertine system[J]. *Sedimentology*, 38: 107~126.
- David S, Steven B, Claire W, *et al.* 2010. Natural systems evidence for the alteration of clay under alkaline conditions: An example from Searles Lake, California[J]. *Applied Clay Science*, 47(1~2): 72~81.
- Du Lei, Wen Huaguo, Luo Lianchao, *et al.* 2020. Terrestrial hot-spring travertines: An important window into paleoclimate reconstruction[J/OL]. *Geology in China*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200723.1308.002.html>(in Chinese with English abstract).
- Flint R F and Gale W A. 1958. Stratigraphy and radiocarbon dates at Searles Lake, California[J]. *American Journal of Science*, 256: 689~714.
- Folk R L. 1993. SEM imaging of bacterial and nano-bacteria in carbonate sediments and rocks[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 63: 990~999.
- Folk R L. 1994. Interaction between bacteria, nano-bacteria and mineral precipitation in hot springs of central Italy [J]. *Géographie Physique Quaternaire*, 48: 233~246.
- Folk R L. 1999. Nannobacteria and the precipitation of carbonate in unusual environments[J]. *Sedimentary Geology*, 126: 47~55.
- Folk R L and Lynch L F. 2001. Organic matter, putative nanno-bacteria and the formation of ooids and hardgrounds[J]. *Sedimentology*, 48: 215~229.
- Ford T D and Pedley H M. 1996. A review of tufa and travertine deposits of the world[J]. *Earth Science Review*, 41: 117~175.
- Freytet P and Verrecchia E P. 1999. Calcitic radial palisadic fabric in freshwater stromatolites diagenetic and recrystallized feature or physicochemical sinter crust[J]. *Sedimentary Geology*, 126: 97~102.
- Guo X and Chafetz H S. 2012. Large tufa mounds, Searles Lake, California[J]. *Sedimentology*, 59: 1 509~1 535.
- Guo X and Chafetz H S. 2014. Trends in $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values in lacustrine tufa mounds: Palaeohydrology of Searles Lake, California[J]. *Sedimentology*, 61: 221~237.
- Hay R I and Guldman S G. 1987. Diagenetic alteration of silicic ash in Searles Lake, California[J]. *Clays and Clay Minerals*, 35: 449~457.
- Hancock P L, Chalmers R M L, Altunel E, *et al.* 1999. Travertines: Using travertines in active fault studies[J]. *Journal of Structural Geology*, 21: 903~916.
- Janssen A, Swennen R, Podoor N, *et al.* 1999. Biological and diagenetic influence in recent and fossil tufa deposits from Belgium[J]. *Sedimentary Geology*, 126: 75~95.
- Jones B and Renaut R W. 2010. Calcareous spring deposits in continental settings[A]. Alonso-Zarza A M and Tanner L H. Carbonates in Continental Settings: Facies, Environments, and Processes[C]. *Dev. Sedimentol.*, 61: 177~224.
- Li Gang, Dong Faqin, Dai Qunwei, *et al.* 2018. A comparative study of the method for determining organic carbon of travertine in Huanglong [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(1): 152~160 (in Chinese with English abstract).
- Li Qiang, Dai Yanan, You Shengyi, *et al.* 2002. Study on the feature of tufa deposits in Baishuitai, Yun Nan [J]. *Carsologica Sinica*, 21(3): 178~181 (in Chinese with English abstract).
- Lin J C, Broecker W S, Hemming S R, *et al.* 1998. A reassessment of U-Th and ^{14}C ages for late-glacial high-frequency hydrological events at Searles Lake, California[J]. *Quaternary Research*, 49(1): 11~23.
- Liu Zaihua. 2014. Research progress in paleoclimatic interpretations of tufa and travertine[J]. *Chinese Science Bulletin*, 59: 2 229~2 239 (in Chinese).
- Liu Zaihua, Sun Hailong, Lu Baoying, *et al.* 2010. 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*, 273: 258~266.
- Liu Zaihua, Sun Hailong, Yan Hao, *et al.* 2016. Tufa/Travertine Investigation [M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Loisy C, Verrecchia E P and Dufour P. 1999. Microbial origin for pedogenic micrite associated with a carbonate paleosol (Champagne, France)[J]. *Sedimentary Geology*, 126: 193~204.
- Matsuoka J, Kano A, Oba T, *et al.* 2001. Seasonal variation of stable isotopic compositions recorded in a laminated tufa, SW Japan[J]. *Earth Planet Science Letters*, 192: 31~44.
- Neuendorf K K E, Mehl J P and Jackson J A. 2005. Glossary of Geology (5th Edn)[M]. American Geologic Institute, Alexandria, Virginia, 779.

- Pedley H M. 1990. Classification and environmental models of cool fresh-water tufas[J]. *Sedimentary Geology*, 68: 143~154.
- Kano A, Kawai T, Matsuoka J, *et al.* 2004. High-resolution records of rainfall events from clay bands in tufa[J]. *Geology*, 32: 793~796.
- Pentecost A. 1995. The quaternary travertine deposits of Europe and Asia Minor[J]. *Quat. Sci. Rev.*, 14: 1 005~1 028.
- Pentecost A. 2005. *Travertine*[M]. Berlin: Springer, 445.
- Pentecost A and Zhang Z. 2001. A review of Chinese travertines[J]. *Cave Karst Sci.*, 28: 15~28.
- Niu Xinsheng, Zheng Mianping, Liu Xifang, *et al.* 2017. Sedimentary property and the geological significance of travertines in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Science Technology Review*, 35 (6): 59~64 (in Chinese with English abstract).
- Scholl D W. 1960. Pleistocene algal pinnacles at Searles Lake, California [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 30: 414~431.
- Smith G I. 1965. Geology of Searles Lake—A guide to prospecting for buried continental salines, in second symposium on salt[J]. *North Ohio Geological Society*, 1: 167~180.
- Smith G I. 1979. Subsurface stratigraphy and geochemistry of Late Quaternary evaporates, Searles Lake, California [A]. *U. S. Geological Survey Professional Paper* 1 043 [C]. 130.
- Smith G I. 2009. Late Cenozoic geology and lacustrine history of Searles Valley, Inyo and San Bernardino Counties, California [A]. *U. S. Geological Survey Professional Paper* 1 727 [C]. 115.
- Wang Zhihui, Zhang Chaohui and Li Jianhua. 2008. Biodiversity of microorganisms from a tufa fan in Guizhou Province, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(4): 670~675 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhijun, Yin Jianjun and Yuan Daoxian. 2018. Possibilities and problems associated with travertines and tufas in Quaternary studies: A case of the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 63 (11): 1 012~1 023 (in Chinese).
- Wang Zhenyao. 2019. Behavior of Element Cd in Weathering Pedogenesis of Carbonate Rocks in Karst Area of Longzhou Guangxi [D]. Nanning Normal University (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jie and Chafetz H S. 2009. Biogenic caliches in Texas: The role of organisms and effect of climate[J]. *Sedimentary Geology*, 222: 207~225.

附中文参考文献

- 杜磊, 文华国, 罗连超, 等. 2020. 陆地热泉钙华: 重建古气候历史信息重要载体[J/OL]. *中国地质*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200723.1308.002.html>
- 牛新生, 郑绵平, 刘喜方, 等. 2017. 青藏高原钙华沉积属性特征及其地质意义[J]. *科技导报*, 35(6): 59~64.
- 李刚, 董发勤, 代群威, 等. 2018. 黄龙钙华有机碳测定方法的对比研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 37(1): 152~160.
- 李强, 戴亚南, 游省易, 等. 2002. 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*, 21(3): 178~181.
- 刘再华. 2014. 表生和内生钙华的气候环境知道意义研究进展[J]. *科学通报*, 59: 2 229~2 239.
- 刘再华, 孙海龙, 晏浩, 等. 2016. *钙华探秘*[M]. 北京: 科学出版社.
- 王智慧, 张朝晖, 李建华. 2008. 石灰华扇(tufa fan)沉积物中的微型生物多样性[J]. *沉积学报*, 26(4): 670~675.
- 汪智军, 殷建军, 袁道先. 2018. 钙华在第四纪研究中的应用: 以青藏高原为例[J]. *科学通报*, 63(11): 1 012~1 023.
- 王振耀. 2019. 广西龙州喀斯特地区碳酸岩风化成土作用中Cd元素的行为研究[D]. 南宁师范大学.