

引用格式: 王晟, 吕同艳, 吴中海, 等, 2023. 藏南裂谷区晚第四纪泉华的 ESR 测年适用性研究 [J]. 地质力学学报, 29 (2): 276–289. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023016

Citation: WANG S, LYU T Y, WU Z H, et al., 2023. Research on the applicability of electron spin resonance dating of the late Quaternary sinter deposits in the rift valley, southern Tibet [J]. Journal of Geomechanics, 29 (2): 276–289. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023016

藏南裂谷区晚第四纪泉华的 ESR 测年适用性研究

王 晟^{1,2,3}, 吕同艳^{2,3,4}, 吴中海^{2,3,4}, 白玛多吉^{5,6}, 叶 强^{5,7}, 尼玛次仁⁵,
沙龙滨¹

WANG Sheng^{1,2,3}, LYU Tongyan^{2,3,4}, WU Zhonghai^{2,3,4}, BAIMA Duoji^{5,6}, YE Qiang^{5,7}, NIMA Ciren⁵,
SHA Longbin¹

1. 宁波大学地理与空间信息技术系, 浙江 宁波 315211;
2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
4. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100081;
5. 西藏地质调查院, 西藏 拉萨 850000;
6. 西藏自治区地质矿产勘查开发局地热地质大队, 西藏 拉萨 850000;
7. 西藏自治区地质矿产勘查开发局区域地质调查大队, 西藏 拉萨 851400

1. Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;
2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
3. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;
4. Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China;
5. Xizang Institute of Geology Survey, Lhasa 850000, Tibet, China;
6. Geothermal and Geological Team, Geology and Mineral Exploration and Development of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, Tibet, China;
7. Regional Geological Survey Team, Geology and Mineral Exploration and Development of Tibet Autonomous Region, Lhasa 851400, Tibet, China

Research on the applicability of electron spin resonance dating of the late Quaternary sinter deposits in the rift valley, southern Tibet

Abstract: Sinters in the rift valleys of southern Tibet, including silica sinter and travertine deposits, are the products of hydrothermal activity under regional tectonic movement. Their formation age is significant for studying hydrothermal activity history in this region. Electron spin resonance (ESR) dating is a practical dating method for determining the age of silica sinter and travertine deposits. However, silica sinter's ESR signals vary due to the complex composition. Meanwhile, these ESR signals are mixed, superimposed, and interfere with each other, affecting the ESR signal's measurement. Furthermore, ESR dating has been applied less in travertine samples in southern Tibet, which is not conducive to a comprehensive understanding of the hydrothermal activity history in southern Tibet. Studying the applicability of ESR dating of southern Tibetan silica sinter and travertine deposits

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221644); 国家自然科学基金面上项目 (41877443, 42176226); 国家自然科学基金地方联合基金 (U2002211-04)

This research is financially supported by the China Geological Survey Project (Grant DD20221644), the General Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41877443 and 42176226), and the National Natural Science Foundation of China-Local Government United Fund (Grant U2002211-04).

第一作者: 王晟 (1997—), 男, 在读硕士, 地理学专业. E-mail: Brucewooo@163.com

通讯作者: 吕同艳 (1980—), 女, 博士, 副研究员, 从事第四纪地质与年代学研究. E-mail: lvtongyan@mail.cgs.gov.cn

收稿日期: 2022-02-10; 修回日期: 2022-04-10; 责任编辑: 吴芳

helps obtain accurate ESR ages. It lays the chronologic foundation for researching tectonic activities in these rift valleys. This research applied ESR dating to the silica sinter and travertine deposits collected separately from the Targejia thermal field area and the Xiakangjian hot spring area, located in the Ngri-Xigaze area in southern Tibet. We performed ESR dating tests, including how to choose ESR signals, the effect of additional doses, and the thermal stability of ESR signals in travertine. Based on these tests, relatively accurate, reliable ESR ages of silica sinter and travertine were obtained. The results show that: According to the ESR dating results, the silica sinter samples collected from the fourth and third terrace of the Targejia geothermal field were formed at 177 ± 20 and 81 ± 16 ka, respectively, and the travertine deposits collected from the floodplain and first terrace of the Xiakangjian hot spring were formed at 106 ± 32 ka and 264 ± 26 ka, respectively. In terms of irradiation dose, sinter samples collected from southern Tibet respond well to irradiation dose in the range of 0~7680 Gy; In terms of temperature, silica sinter samples are less affected by closure temperature, and the thermal behavior of the ESR signal at $g = 2.0034$ of travertine in southern Tibet is stable in the range of 20 °C ~ 250 °C that is suitable for ESR dating. Regarding mineral structure, The travertine in southern Tibet has better mineral purity and crystallinity; thus, the ESR age results are relatively accurate.

Keywords: ESR Dating; sinter; silica sinter; travertine; Southern Tibet; g -value; Quaternary

摘 要: 藏南裂谷区泉华(硅华和钙华)是受区域构造运动控制的水热活动产物,其形成年代对研究该区域水热活动历史有着重要意义。电子自旋共振(ESR)测年法是一种测定泉华年龄的有效测年手段。但存在硅华样品成分复杂,其 ESR 测年信号具有混合叠加、相互干扰的现象,影响 ESR 信号的读取;且应用 ESR 测年法对藏南的钙华样品研究较少,不利于全面掌握藏南水热活动历史等问题。因此对藏南泉华样品 ESR 测年适用性的研究将有助于指导藏南地区泉华 ESR 测年的准确性,同时为开展区域构造活动研究提供扎实的年代学基础。该文选取藏南阿里—日喀则地区搭格架热田区的硅华样品和夏康坚温泉区的钙华样品,开展了泉华样品的 ESR 信号选取和附加剂量影响、钙华 ESR 信号热稳定性探究,进而得到相对准确的泉华发育年代。研究结果表明:搭格架热田区第三、四级阶地处硅华分别形成于 81 ± 16 ka、 177 ± 20 ka,夏康坚温泉区河漫滩和第一级阶地处的钙华分别沉积于 106 ± 32 ka、 264 ± 26 ka。辐照剂量方面,藏南泉华样品在 0~7680 Gy 范围内对人工附加剂量响应良好;温度方面,硅华受封闭温度影响较小,钙华 $g = 2.0034$ 心信号在 20~250 °C 范围具有良好的稳定性,适合 ESR 测年。矿物结构方面,藏南钙华的矿物纯度、结晶程度较好,ESR 年龄结果相对准确。

关键词: ESR 测年; 泉华; 硅华; 钙华; 藏南; g 值; 第四纪

中图分类号: P533; P542; P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 02-0276-14

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023016

0 引言

电子自旋共振(electron spin resonance, ESR)测年法是第四纪地质年代学的重要测试方法之一(Grün, 1989, 1991, 1997; Ikeya, 1993; Rink et al., 2007)。其测年对象广泛,包括含石英的沉积物、化石、盐类以及断层物质等;测年范围较大,可覆盖距今 2.5 Ma 以来的第四纪时期(刘春茹等, 2011; 韩非等, 2022)。ESR 测年法在骨骼、牙齿、石器方面的应用解决了考古方面一系列重要年龄问题(Rink et al., 2007);对冰碛物、石英脉、断层泥 ESR 年龄的测定丰富了对当地构造活动的认识(高璐等, 2011; Choi et al., 2015; Yi et

al., 2016);对河流、海岸沉积物中石英的 ESR 测年为区域古气候和古环境演变建立了可靠的年代框架(Li et al., 2022; 禚宇添等, 2022)。

泉华是 ESR 测年主要的对象之一。泉华主要包括硅华与钙华。硅华是高温温泉和间歇泉喷出的热水所沉淀出的二氧化硅沉积物;钙华是富含重碳酸钙的泉水上升至地表时因水温下降、水分蒸发、二氧化碳气体逸出而沉淀形成的碳酸钙沉积物(王潇, 2018)。ESR 测年法已成功应用于中亚、东亚多地泉华的年龄测定,并得到了可靠年龄结果(黄培华等, 1986; Wieser et al., 1993; 郑绵平等, 1995; 刘星, 1998; Engin et al., 1999; 侯增谦等, 2001)。然而,如何应用 ESR 测年方法对泉华样品进行准确地测年,仍然面临着技术方法

上存在的一些难题和挑战。首先, 泉华样品成分复杂, 各成分中的顺磁电子或空穴在 ESR 波谱中表现为不同朗德 g 因子 (g 值) 的信号。样品的 ESR 波谱是多种复杂信号相互混合的结果。如何消除干扰信号、选择可靠的测年心是准确进行泉华 ESR 测年的前提。碳酸盐是钙华主要的矿物成分, 然而与洞穴中形成的碳酸盐相比, 钙华虽具有相似的 ESR 波谱线型, 却附加了许多有机自由基信号。这些信号主要为周围植物根系、细菌和苔藓造成碳酸盐结晶产生的, 并形成了波谱中 $g = 2.0045$ 心附近的宽信号 (Grün, 1989)。Grün et al. (1988) 通过实验分析, 认为 $g = 2.007$ 可以尝试作为钙华样品的测年心。然而, 钙华 ESR 测年心的研究仍然匮乏且缺少定论。其次, 附加剂量会直接影响 ESR 信号剂量响应曲线, 甚至使 ESR 信号产生饱和现象, 进而影响等效剂量值的估算。李新秀等 (2022) 研究了云南剑川盆地钙华 ESR 信号对不同人工辐照剂量率的响应特征, 表明在小剂量率人工辐照下, 钙华样品中的 $g = 2.0006$ 心、 $g = 2.004$ 心、 $g = 2.0057$ 心 ESR 信号强度较高, 且拟合的等效剂量值较稳定。然而, 附加剂量对钙华等效剂量的影响研究仍有待进一步深入。此外, 高温会对 ESR 样品中部分测年心的信号稳定性产生影响, 进而影响 ESR 测年的准确性。对硅华各测年心进行的热稳定性实验结果表明, 硅华样品在 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下加热 30 min 时, $g = 2.0106$ 心、有机自由基心 ($g = 2.00145$ 、 $g = 2.003$ 、 $g = 1.9915$) 和较年轻硅华样品的 E' 心 ($g = 2.0005$) 的 ESR 信号会完全消失, 而以结晶石英为主的较老硅华样品 E' 心的 ESR 信号在加热到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 却会出现增强, 且在 $460\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时才完全消退 (Grün et al., 1988; Chen et al., 1993)。同为水热活动产物的钙华样品其 ESR 信号的热稳定性如何, 是否影响 ESR 测年的准确性? 此类与测年准确性密切相关的问题都需要开展进一步的研究。

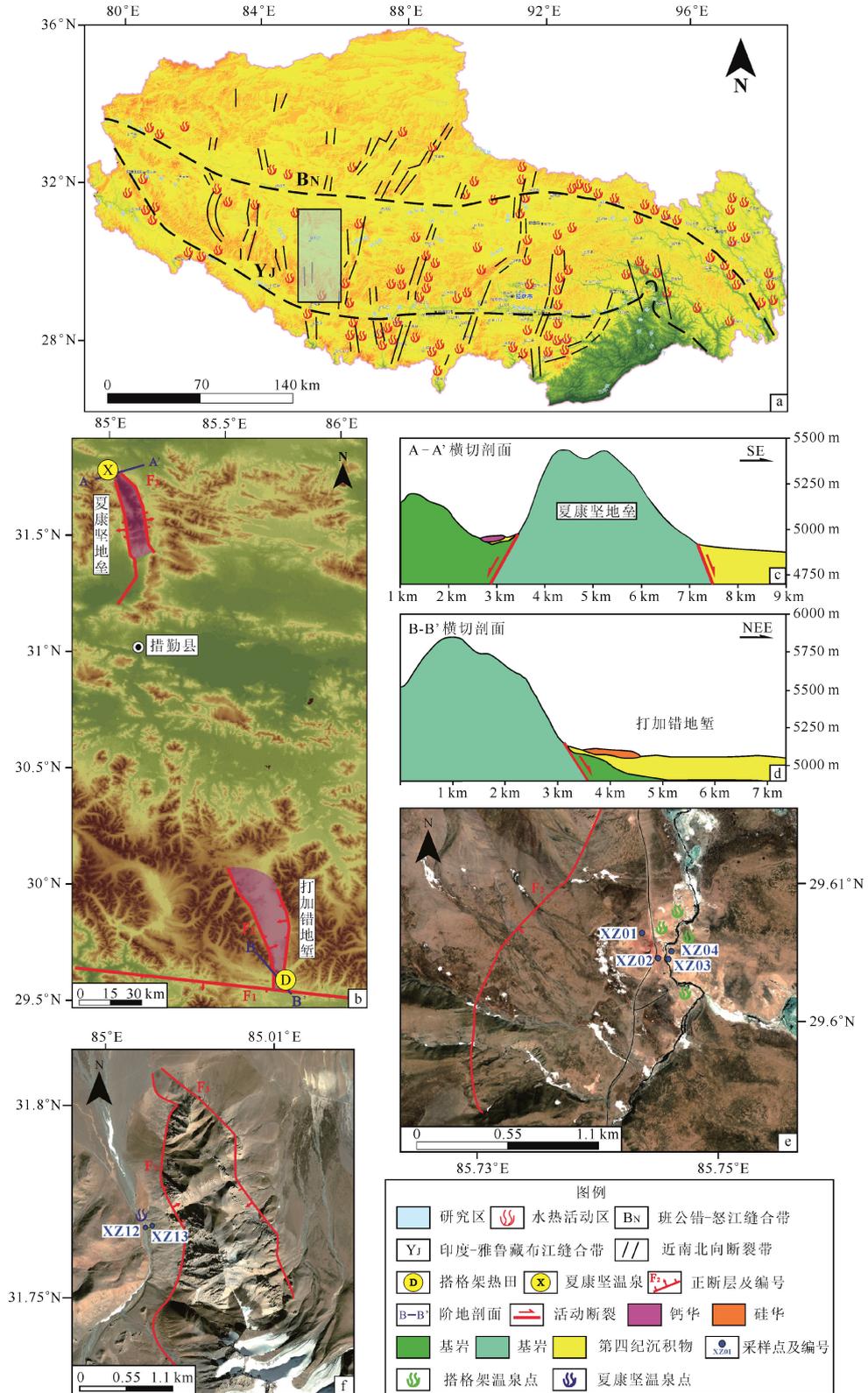
中国陆地的地热泉华主要分布于青藏高原地区。中生代以来, 青藏高原在印度板块与亚欧大陆板块的剧烈碰撞拼接中形成, 并伸展引起了一系列横切印度-雅鲁藏布江缝合带和班公湖-怒江缝合带的南-北向地堑与正断层系统 (侯增谦等, 2001; Zhao et al., 2011; 卞爽等, 2021; 哈广浩和吴中海, 2021)。这些近南北向正断层系统诱发了强烈的现代水热活动构成了当今的青藏高原水热

带 (李振清等, 2005; 侯增谦等, 2006; 潘桂棠等, 2006), 西藏泉华的沉积分布与水热活动分布基本一致。随着水热活动温度和外界环境中气温、气压、湿度等变化, 泉华在不同时期的形成速度、沉积厚度和规模均有差异, 记录了地质历史时期的水热活动变化 (王绍令, 1992; 何俊国等, 2007; 牛新生等, 2017; 文华国等, 2019; 游雅贤等, 2019; Qiu et al., 2022)。因此, 准确地测定泉华形成年代是厘定区域水热活动的首要问题。

尽管已有学者应用 ESR 测年方法对西藏泉华的形成时代开展了一定研究, 并初步建立了西藏泉华演化的时间框架 (陈以健等, 1992; Chen et al., 1993; 郑绵平等, 1995; 侯增谦等, 2001; 李振清, 2002; 赵元艺等, 2010)。然而, 在已有研究对藏南泉华的 ESR 测年实验中, 对测试条件的分析和检验较少, ESR 测年法对该类样品的适用性缺乏实验验证。此外, 钙华作为广泛分布于藏南水热活动区的沉积物, 测定其年代对区域水热活动史研究具有重要意义, 但现有对钙华 ESR 测年研究和应用均较少。因此, 文章以冈底斯-拉萨地块中西部为研究区, 分别选取藏南阿里-日喀则地区打加错地堑南端的搭格架热田和夏康坚地垒西北端夏康坚温泉的泉华样品开展 ESR 测年研究。在明确各样品矿物成分的基础上, 通过开展一系列条件实验, 探讨人工辐照剂量对泉华 ESR 测年的影响, 分析钙华的 ESR 测年心特征和热稳定性, 结合已有硅华研究结果, 从而进一步厘定藏南泉华沉积的年代, 并讨论 ESR 测年法对藏南泉华样品的适用性。此项研究一方面为泉华测年研究提供方法上的借鉴, 另一方面丰富了藏南裂谷区泉华发育年龄数据, 为探讨该区域水热活动特点提供年代学依据。

1 研究区概况与样品采集

青藏高原自古生代以来历经了多期次强烈构造变形, 由 4 条近东西向展布的缝合带及分隔而成的 5 个地块组成 (潘裕生和方爱民, 2010)。冈底斯-拉萨地块位于班公湖-怒江缝合带与印度-雅鲁藏布江缝合带之间 (图 1a), 正断层和地堑式断陷盆地在此处广泛发育, 并有水热区围绕分布 (图 1a、1b)。搭格架热田区与夏康坚温泉区的泉华沉积均位于正断层附近, 是裂谷区受正断层活动控



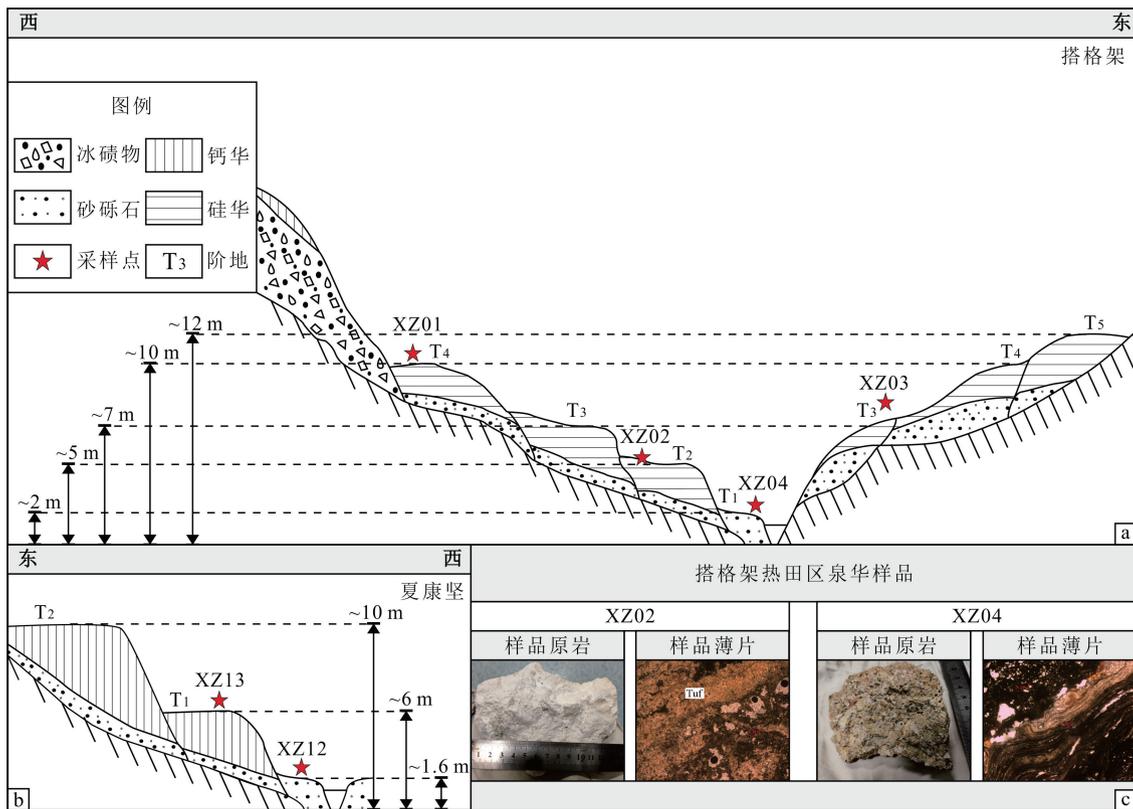
a—研究区地理位置 (据侯增谦等, 2001 修改); b—夏康坚地垒和打加错地堑位置; c—夏康坚地垒横切剖面; d—打加错地堑横切剖面; e—搭格架热田区采样点位置; f—夏康坚温泉区采样点位置

图 1 研究区位置与典型剖面及采样点分布
 Fig. 1 Location of the study area and the distribution of the stypical profiles and sampling sites
 (a) The location of study area (modified from Hou et al. , 2001); (b) The location of the Xiakangjian horst and the Dajiacuo graben;
 (c) The cross-section of the Xiakangjian horst; (d) The cross-section of the Dajiacuo graben; (e) Sampling sites in the Targejia geothermal field; (f) Sampling sites in the Xiakangjian hot spring

制的热水活动结果 (图 1c、1d)。沿打加错裂谷发育多级硅华沉积阶地, 沿夏康坚地堑正断层则广泛发育钙华沉积。

位于搭格架热田区 (85.75°E; 29.61°N) 和夏康坚温泉区 (85.01°E; 30.77°N) 的泉华分布及采样点位置如图 1 和图 2 所示。南端地热显示区为西藏自治区日喀则市昂仁县搭格架热田, 海拔 4970~5140 m。构造上, 其处于打加错南面正断层 (F₂) 形成的南北向小型地堑盆地边缘 (图 1e), 南临帮德嘎-拉马野加断裂 (F₁; 图 1b), 属佩枯错-打加错裂谷北段。

搭格架热泉出露于打加错湖南端出口及流出的长马曲河河谷中, 在河谷两侧发育有 5 级阶地 (T1—T5) (图 2a)。结合野外考察及已有研究对搭格架热田区泉华沉积位置和沉积序列的划分 (赵元艺等, 2006), 分别在 T1、T2、T3、T4 阶地采集硅华样品 (图 2a)。硅华样品 XZ01 采自河西岸山前断层北侧 T4 阶地的泉华高台顶部。硅华样品 XZ02 采自山前断层南侧的 T2 阶地的泉华台地顶部。硅华样品 XZ03 采自河东岸 T3 阶地的泉华台地, 并于 T1 阶地的泉华台地上喷泉附近采集得到硅华样品 XZ04。



a—搭格架热田区河谷阶地剖面与采样点分布 (据赵元艺等, 2006 修改); b—夏康坚温泉区河谷阶地剖面与采样点分布; c—搭格架热田区部分硅华样品及其镜下照片 (Tuf 为凝灰岩)

图 2 搭格架、夏康坚泉华分布与采样示意图

Fig. 2 The distribution of silica sinter and travertine deposits in the Targejia and Xiakangjian areas and the sampling sites

(a) The valley terrace profile and sampling sites in the Targejia geothermal field (modified from Zhao et al., 2006); (b) The valley terrace profile and sampling sites in the Xiakangjian hot spring; (c) The travertine samples collected from the Targejia geothermal field and their microscope slices

北端地热显示区为位于西藏自治区阿里地区改则县洞错乡境内的夏康坚温泉 (图 1f), 海拔约 4500 m。构造上, 其位于夏康坚地堑西侧, 仲巴-达雄裂谷北端。受正断层影响 (F₃), 夏康坚地堑断块山西侧形成的帚状正断层组在此收敛, 切割了更新世、全新世的冰碛物和坡积物, 表现出明显的多期活动特征 (陶晓风等, 2004)。温泉发源

自夏康坚雪山西侧山谷东侧的冲积物, 无明显泉口, 泉区沿山谷分布并发育阶地。河漫滩处泉华台地拔河约 1.6 m, T1 阶地处泉华台地拔河约 6 m, T2 阶地处泉华拔河约 10 m。分别在河漫滩、T1 阶地泉华台地顶部采集钙华样品 XZ12、XZ13 (图 1f, 图 2b)。

2 ESR 样品的制备与测试

2.1 样品的制备

首先挑选相对纯净的样品, 选 50 g 左右的样品进行研磨, 筛选粒径为 125~212 μm 的颗粒。然后将硅华和钙华样品进行不同的处理。硅华样品: 使用 10% 盐酸浸泡 24 小时, 去除可能存在的碳酸盐, 并用 40% 的氢氟酸浸泡 40 min 去除样品中掺杂的长石矿物, 然后用 10% 的盐酸和去离子水洗净, 放入温度为 40 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中烘干待用。钙华样品: 用浓度为 10% 的盐酸浸泡 3 min 左右, 以去除在研磨样品过程中产生的不稳定的 ESR 信号。随后用蒸馏水冲洗样品至中性并在 40 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干。将已烘干的样品称重 2 g, 分为 10 等份。各样片中 1 份留作天然剂量样品, 其余等份送至中国原子能研究院接受 ^{60}Co 源辐照, 辐照剂量为 30 Gy/min, 各等份的总辐照剂量分别为 201 Gy、407 Gy、788 Gy、1354 Gy、1961 Gy、2835 Gy、3680 Gy、5239 Gy、7084 Gy。

2.2 泉华的矿物组成分析

泉华样品的纯度和结晶程度直接影响 ESR 测年的准确度。样品中的杂质可以形成不稳定的顺磁中心, 对测年心产生干扰, 进而影响年龄测试 (Grün, 1989)。而矿物结晶程度的差异则表明晶体的晶格缺陷不同, 直接影响 ESR 信号贮藏与释放特征, 决定了 ESR 信号剂量增长曲线。因此, 在开展泉华 ESR 测年实验前, 应首先对样品的成分和显微结构进行分析。

X 射线衍射测试对样品矿物成分的测试结果表明, 在硅华的 4 个样品中, XZ01、XZ03 的石英含量占样品矿物总量的 99%, 2 个样品的纯度较高。但 XZ02、XZ04 的矿物成分比较混杂。XZ02 中的结晶程度较差, 且可能含有 SiO_2 的类质同相杂质; XZ04 中结晶石英样品仅占样品矿物总量的 82.8%, 另有 17.2% 的斜长石混杂其中。在钙华的 XZ12、XZ13 两个样品中, 方解石含量均占样品矿物总量的 99%, 主要成分为碳酸钙, 样品较为纯净。

针对测试中出现的 XZ02、XZ04 样品成分混杂的状况, 对其进行岩矿薄片鉴定以进一步分析其矿物成分 (图 2c)。鉴定结果表明, XZ02 中硅华的主要成分为非晶质胶质含水氧化硅的混合物, 约占硅华总量的 85%, 结晶度较差, 且存在混入

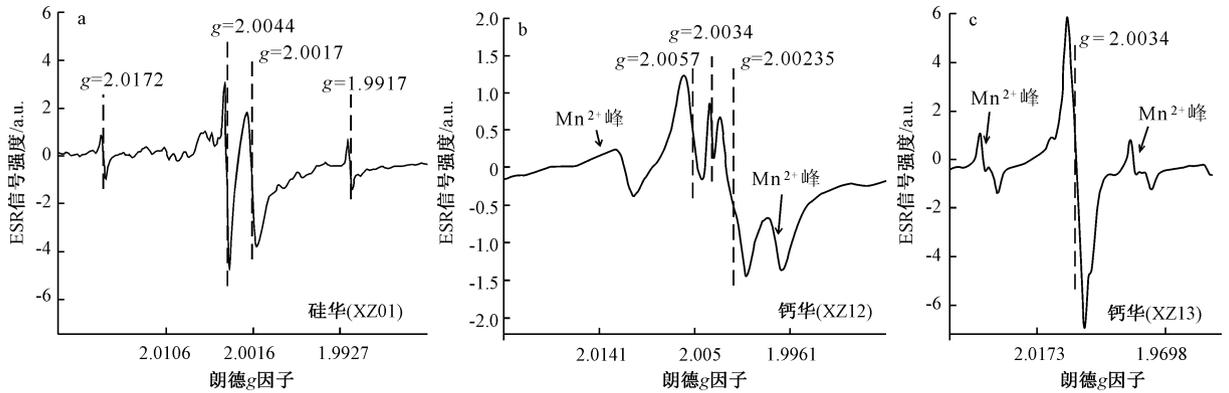
蛋白质中的泥质杂质; 样品 XZ04 硅华同样由非晶质胶质含水氧化硅混合物沉积凝结形成, 但结晶度较好, 石英晶体含量约占总量的 82.8%, 其余为杂质。

上述测试结果表明, 在藏南阿里一日喀则地区采集的所有泉华样品中, 钙华样品整体纯净度较好。但两个硅华样品中出现了矿物成分混杂, 杂质过多的状况。

2.3 样品的测试和 ESR 测年信号的选取

藏南硅华与钙华样品的典型 ESR 波谱如图 3 所示。在硅华样品图谱中存在 4 个可观测的顺磁中心, 分别为 $g = 2.0172$ 心、 $g = 2.0044$ 心、 $g = 2.0017$ 心及 $g = 1.9917$ 心 (图 3)。然而, 除 $g = 2.0017$ 心之外的其他顺磁中心信号均由样品中无法除尽的有机质产生 (Grün, 1989)。因此选取 $g = 2.0017$ 心作为硅华样品的测年心 (Chen et al., 1993)。钙华样品的 ESR 波谱可分为两类, 一类以 XZ12 样品为代表, 其 ESR 波谱中主要可观测到 3 种信号 (图 3), 分别是由 HCO_3^{2-} 产生的 $g = 2.0034$ 心信号, 由自由基产生的宽信号 ($g = 2.00235$), 以及与旋转的 SO_2 自由基相关的 $g = 2.0057$ 心信号 (Serway and Marshall, 1967; Grün, 1989; Pirouelle et al., 2007)。另一类样品以 XZ13 为代表, 在其 ESR 波谱中, $g = 2.0034$ 心信号是唯一可以被稳定观察并测试的信号 (图 3)。在以往的钙华样品测试中, 发现 $g = 2.0057$ 心在样品附加剂量大于 5000 Gy 时出现了 ESR 信号的饱和现象, 与之相较, $g = 2.0034$ 心的信号分辨率高且稳定, 强度随样品附加剂量增加而增大 (Cass et al., 1974; Hennig and Grün, 1983)。 $g = 2.0006$ 心也是钙华样品测年中常用的测年心, 但在所有钙华样品中均被 $g = 2.00235$ 心的信号掩盖, 无法准确测量。因此, 选取 $g = 2.0034$ 心作为藏南钙华的 ESR 测年心。

样品的等效剂量值 (equivalent dose, D_e) 测试在中国地质科学院地质力学研究所 ESR 测年实验室完成。ESR 信号测量使用附加剂量法, 使用仪器为 Bruker EMXplus-6/1 谱仪。硅华样品的测试参数为: 室温, 中心磁场 3348 G, 扫场时间 10.24 s, 微波功率 1 mW, 微波频率 9.371 GHz, 转换时间常数 4.03 ms, 时间常数 0.01 ms, 调制幅度 1 mT, 调制频率 100 kHz。钙华样品的测试参数为: 室温, 中心磁场 3380 G, 扫场时间 10.49 s, 微波功



a—硅华样品 ESR 波谱图；b—钙华样品 (XZ12) ESR 波谱图；c—钙华样品 (XZ13) ESR 波谱图

图 3 代表性泉华样品电子自旋共振 (ESR) 波谱图

Fig. 3 Typical ESR resonance spectra of silica sinter and travertine samples

(a) The ESR spectrum of the silica sinter sample; (b) The ESR spectrum of the travertine sample (XZ12); (c) The ESR spectrum of the travertine sample (XZ13)

率 0.2 mW, 微波频率 9.371 GHz, 转换时间常数 5.33 ms, 时间常数 0.01 ms, 调制幅度 1 mT, 调制频率 100 kHz。各样品的 ESR 信号强度为其在谐振腔内经 3 个不同方向测量所得信号之均值。使用最小二乘法对样品的 ESR 信号随剂量增长的曲线进行拟合, 该曲线与 X 轴负轴的交点即为样品的 D_0 。

环境剂量率主要是指样品在埋藏过程中单位时间内受到样品本身、周围环境中放射性核素产生的 α 粒子、 β 射线和 γ 射线以及宇宙射线的影响所吸收的剂量。实验室主要根据样品中 U、Th、K 含量、样品的含水率、粒径、埋深和海拔高度来计算样品的环境剂量率 (Aitken, 1985)。U、Th、K 含量的测量工作在北京核工业地质研究所分析测试中心完成, U、Th 含量使用等离子体质谱仪测试完成, K 含量使用荧光法测试完成。宇宙射线主要是根据样品的埋深和所在的经纬度推导得来 (Prescott and Hutton, 1994)。因采集的样品主要为岩石样品, 含水率按 5% 估算。

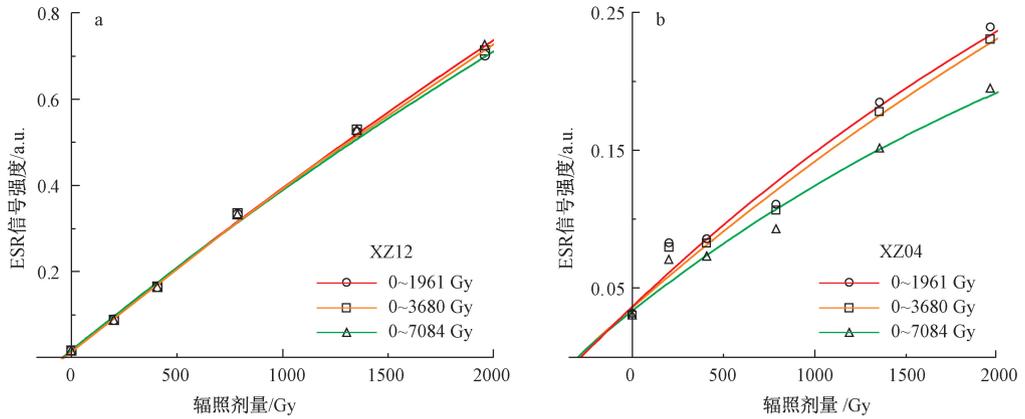
2.4 人工辐照剂量对泉华 ESR 年龄信号的影响

在使用附加剂量法进行 ESR 测年的过程中, 选用合适的辐照剂量是准确测定样品年龄的重要因素。相较于地质环境中微弱的自然剂量率, 受到 ^{60}Co 源 30 Gy/min 的长时间辐照可能会对受测样品产生辐射损伤, 同时, 高附加剂量易造成 ESR 信号饱和, 导致年龄错估的现象 (Euler and Kahan, 1987; Lawless et al., 2005; Duval and Guilarte, 2015)。为了检验辐照剂量在拟合 D_0 值时

产生的影响, 所有泉华样品均进行附加剂量测试。

对泉华样品附加不同剂量 (201 Gy、407 Gy、788 Gy、1354 Gy、1961 Gy、2835 Gy、3680 Gy、5239 Gy、7084 Gy) 的辐照, 在相同的测试条件下, 测量 ESR 信号强度。使用最小二乘法, 对附加剂量为 200 ~ 7084 Gy、200 ~ 3680 Gy、200 ~ 1961 Gy 时 ESR 信号随剂量增长生成的曲线进行拟合, 并计算各样品在不同附加剂量下拟合得到的 D_0 值。在实验前, 为避免因样品 ESR 信号在附加剂量下达到饱和从而影响 D_0 值的估算, 检测所有样品对不同附加剂量的响应特征。在该检测中, 微波功率设定为 0.2 mW (所有样品在此功率下 ESR 信号未出现功率饱和现象)。测试结果表明, 所有样品的信号强度在 0 ~ 7084 Gy 的范围内以稳定的增长速率随辐照剂量的增加而增大, 并未出现 ESR 信号的饱和现象。

钙华样品 XZ12 具有较好的结晶度和纯净度; 硅华样品 XZ04 的结晶程度较好, 但样品内部混有部分矿物杂质。两样品对采样位置的环境均具有一定代表性, 其在不同附加剂量下 ESR 信号生长曲线的拟合状况如图 4 所示。由图可见, XZ12 受附加剂量的影响较小, 虽拟合曲线的斜率随附加剂量增大略有减小, 但仍保持相似的增长趋势。XZ04 在不同附加剂量时的拟合曲线差异较大。当附加剂量达到 7084 Gy 时, 拟合曲线的线型与其他附加剂量产生了较大的差别 (图 4)。综上所述, 当附加剂量超过 3680 Gy, 高人工辐照会对西藏泉华样品造成辐射损伤, 从而造成了拟合曲线斜率



a—样品 XZ12 在不同辐照剂量下的信号强度拟合; b—样品 XZ04 在不同辐照剂量下的信号强度拟合

图 4 样品在不同辐照条件下的 ESR 信号强度拟合

Fig. 4 ESR signal intensity fitting of samples under different irradiation conditions

(a) The ESR signal intensity fitting of the sample XZ12 under different irradiation conditions; b—The ESR signal intensity fitting of the sample XZ04 under different irradiation conditions

的减小和 D_e 值的减小。

各泉华样品在不同附加剂量下求取的 D_e 值见表 1。作为评价剂量响应曲线拟合效果的重要参数, 曲线的拟合优度参数 (R^2) 越接近 1, 表明拟合效果越好, 得到的等效剂量越准确。不论附加剂量上限为 1961 Gy 或增加到 3680 Gy、7084 Gy, 西藏的泉

华样品的 R^2 均大于 0.96 (表 1)。统计结果表明, 对各泉华样品而言, 不同附加剂量下求取的 D_e 值均具有较好的实验可信性。对于各样品不同附加剂量下的 D_e 值而言, 除 XZ04 样品在附加剂量为 7084 Gy 时的 D_e 值超出 1961 Gy 时约 15%, 其他样品在不同附加剂量下的 D_e 值变化均不超过 10%。

表 1 西藏泉华样品在不同附加剂量下的 D_e 值与 R^2 参数

Table 1 The D_e value and R^2 of the samples from the Tibetan travertine deposits in different additional doses

样品名称	D_e (0~7084 Gy)	R^2	D_e (0~3680 Gy)	R^2	D_e (0~1961 Gy)	R^2
XZ01	207±18	>0.99	203±21	>0.99	190±21	>0.99
XZ02	181±30	>0.99	172±49	>0.99	136±55	>0.98
XZ03	44±10	>0.99	42±8	>0.99	37±4	>0.99
XZ04	258±60	>0.99	278±86	>0.98	299±162	>0.96
XZ12	42±10	>0.99	38±11	>0.99	39±11	>0.99
XZ13	105±9	>0.99	103±6	>0.99	90±5	>0.99

相对其他样品而言, XZ04 样品在不同辐照剂量下的变化并不一致。在其他样品因过大剂量导致的辐照损伤而出现 D_e 值增加时, XZ04 的 D_e 值反而减小。由此可见, 不同的泉华样品对人工辐照的响应并不相同。造成这一问题的原因并不是唯一的, 其既可能由辐照过程中附加剂量不均一造成, 也可能是杂质矿物晶体对高附加剂量响应产生的干扰。解决这一问题还需进一步的深入研究。

藏南泉华样品 D_e 值对附加剂量的响应, 是藏南泉华 ESR 测年适用性评价的重要依据。上述研究表明, 西藏泉华样品受附加剂量变化的影响比较小, 但影响力仍然存在。在此次实验中, 当附加的辐照剂量大于 3680 Gy 时会造成 D_e 拟合值较

大幅度的变化。因此, 在人工辐照强度稳定的前提下, 此次 ESR 测年实验选用 0~3680 Gy 的附加剂量对样品进行辐照并据此拟合等效剂量。

2.5 钙华 ESR 测年心信号的热稳定性研究

泉华沉积于地热活动频繁区域, 在其形成过程中可能长期受地热活动影响。而泉华中顺磁中心的 ESR 信号在一定温度下会发生衰退。因此, 检验泉华样品测年心在高温环境下 ESR 信号的稳定性, 是泉华 ESR 测年中必须要开展的研究。该研究选取纯度较高的钙华样品作为研究对象, 对 XZ12 样品的 $g = 2.0034$ 心进行热稳定性实验。实验使用马弗炉, 对 XZ12 的天然样品进行退火。退火温度分别为 20 °C、50 °C、100 °C、150 °C、200 °C、250 °C、300 °C 和 350 °C。各温度下加热

样品 15 min, 而后使用 ESR 谱仪对样品信号进行测试, 测量 $g = 2.0034$ 心的 ESR 信号强度。XZ12 样品在 50 °C、250 °C 和 350 °C 时的 ESR 波谱如图 5 所示。

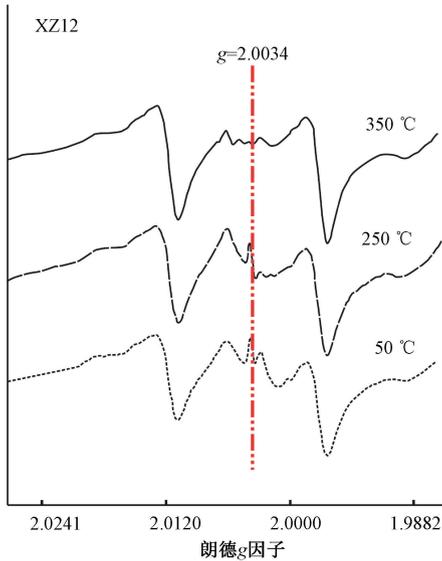


图 5 XZ12 在不同加热温度下的 ESR 波谱
Fig. 5 ESR resonance spectra of the sample XZ12 at different heating temperature

对 XZ12 样品的退火实验结果如图 6 所示。当退火温度在 20~100 °C 之间时, 该 ESR 心信号较稳定; 且当退火温度超过 150 °C, ESR 信号强度仍保持稳定; 温度由 150 °C 升至 200 °C 时, $g = 2.0034$ 心 ESR 信号开始增长; 继续升温至 250 °C 时, ESR 信号开始趋于稳定或减小; 温度超过 250 °C, $g = 2.0034$ 心的信号强度开始迅速下降; 当退火温度达到 350 °C 时, XZ12 样品信号已基本消退。

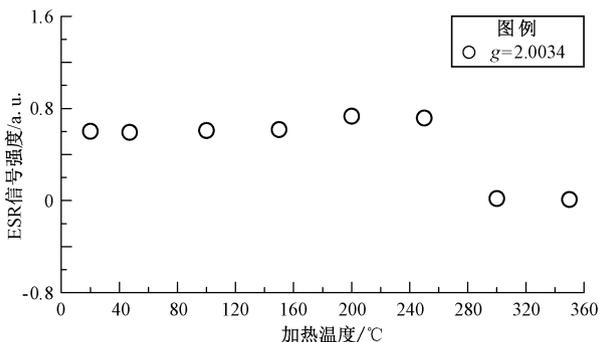


图 6 加热后 $g = 2.0034$ 心 ESR 信号变化特征
Fig. 6 The variation of ESR intensity of $g = 2.0034$ after heating

实验结果表明, 当退火温度在 20~150 °C 时, $g = 2.0034$ 心始终保持着稳定的 ESR 信号强度 (图 6)。在超过 150 °C 后, 该心的 ESR 信号强度在

200~250 °C 虽有小幅增长, 但增长幅度很小。

上述实验对已有藏南泉华 ESR 测年研究中涉及较少的钙华样品进行了 $g = 2.0034$ 心 ESR 信号的稳定性研究。研究结果表明, $g = 2.0034$ 心在温度为 20~150 °C 均具有相对稳定的 ESR 信号。

3 结果与讨论

在对所有泉华样品进行 ESR 测试的过程中, 各样品中的 ESR 谱线均具有很高的分辨率。测年心清晰可辨。同时, 发现取自搭格架热田区的硅华样品 (XZ01—XZ04) 和取自夏康坚温泉区的钙华样品 (XZ12、XZ13) 均具有较小的年剂量率。在谷露地区, Chen et al. (1993) 在泉华台地上采集的样品同样具有低年剂量率的特征。这表明, 较低的年剂量率可能是藏南泉华样品的 ESR 特征之一。

样品 ESR 年龄测试结果见表 2。采集于搭格架热田的样品年龄为 $(441 \pm 130) \sim (81 \pm 16)$ ka; 采自夏康坚温泉的样品年龄为 $(264 \pm 26) \sim (106 \pm 32)$ ka。藏南硅华和钙华样品的年龄主要分布在中更新世早期至晚更新世早期。该结果表明, 藏南阿里—日喀则地区的水热活动在中更新世早期至晚更新世早期持续活跃, 水热活动区不断形成泉华沉积。其与已报道的泉华发育年代相符 (侯增谦等, 2001; 李振清, 2002)。从层序关系上观察, 采集自夏康坚温泉 T1 阶地处的样品 XZ13 的 ESR 年龄为 264 ± 26 ka, 采集自河漫滩处的 XZ12 年龄则为 106 ± 32 ka, 两个夏康坚温泉样品的沉积年龄与其沉积位置相对应, 符合新老沉积层序。样品 XZ01 采集自搭格架泉口西侧 T4 阶地处, 其年龄为 177 ± 20 ka; 采集自 T3 阶地的 XZ03 年龄为 81 ± 16 ka; 采集自 T2 阶地的 XZ02 与 T1 阶地的 XZ04 其 ESR 年龄分别为 441 ± 130 ka 与 300 ± 71 ka。根据阶地发育的一般规律, T3、T4 阶地的发育时间较 T1、T2 阶地应早的多。但在此次测试中, T1、T2 阶地泉华 ESR 年龄较 T3、T4 阶地更老, 出现了 ESR 年龄与沉积层序不符的现象。

以上分析表明, 钙华样品的 ESR 年龄能够正确反映出采样位置的沉积层序; 搭格架 T3、T4 阶地硅华样品的 ESR 年龄能够准确反映出沉积层序, 但 T1 和 T2 阶地处采集的硅华样品 ESR 年龄却与沉积位置存在较大的误差。

表 2 泉华样品 ESR 测年数据

Table 2 ESR dating results of the silica sinter and travertine samples

样品编号	经纬度	样品类型	U/ ($\mu\text{g/g}$)	Th/ ($\mu\text{g/g}$)	K/ %	等效剂量/ Gy	年剂量率/ (Gy/ka)	ESR 年龄/ ka
XZ01	85.75°E 29.60°N	硅华	0.655	3.85	0.549	203±21	1.15±0.05	177±20
XZ02	85.75°E 29.60°N	硅华	0.280	0.222	0.096	172±49	0.39±0.03	441±130
XZ03	85.75°E 29.60°N	硅华	0.089	0.442	0.267	42±8	0.52±0.03	81±16
XZ04	85.75°E 29.61°N	硅华	0.355	2.340	0.424	278±86	0.86±0.04	300±71
XZ12	85.01°E 31.77°N	钙华	0.364	0.279	0.039	38±11	0.36±0.03	106±32
XZ13	85.01°E 31.77°N	钙华	0.610	0.140	0.018	103±6	0.39±0.03	264±26

硅华的演化过程是非晶质的蛋白石逐渐转化为晶质方英石、鳞石英, 最后转化为晶质 α 石英的过程 (陈以健等, 1992)。XZ04 样品采集于 T1 阶地热泉泉口附近, 此处泉华沉积年龄较其他阶地应最年轻, 矿物成分应主要为演化初始阶段的非晶质蛋白石。但岩矿鉴定分析表明, XZ04 结晶程度良好, 出现了较多的石英晶体。该硅华样品的演化程度应是非晶质蛋白质向晶质方英石转变的较晚阶段, 与采集地硅华演化阶段不符。除杂质在该样品 ESR 测试中可能造成的影响, 该现象的出现亦有可能是此样品在采集地并非首次沉积。其既可能是区域构造活动导致高层阶地沉积物迁移的结果, 也可能是该区多期次水热活动所致。其中, XZ04 样品是多期水热活动的产物这一推测的可能性较大。硅华是地下热水在高压下涌出地表后的沉积产物, 但并非仅在地表沉积。张森琦等 (2020) 研究指出, 断裂破碎带和构造裂隙带等热流体上升通道的围岩和近地表处也有泉华沉积。因此, XZ04 样品中晶体部分可能是前期水热活动的产物。其在形成后沉积于热流体上升通道处, 并随新一期水热活动冲出地表并沉积于 T1 阶地。

已有研究对搭格架 T2 阶地的矿物分析统计表明, 沉积的硅华中胶状蛋白石约占总量的 70% (陈以健等, 1992; 赵元艺等, 2006)。因此, 搭格架热田 T2 阶地处发育的硅华沉积物应处于由非晶质蛋白质向晶质方英石转变的较早阶段。通过对比, 发现采集于 T2 阶地的 XZ02 样品的硅华演化程度与该处其他硅华沉积的演化程度相符, 因此该样品应属原地沉积的泉华样品 (赵元艺等,

2006)。在此基础上, 推测 XZ02 样品 ESR 年龄的错判应归因于样品中的杂质。岩矿鉴定分析表明, 泥质碎屑等杂质在 XZ02 样品中所占比例很大, 在没有完全清除此部分 ESR 信号的情况下, 会对目标沉积物的测年造成影响。因此, XZ02 样品的 ESR 信号应是硅华和杂质 ESR 信号的叠加, 年龄亦因此产生错估。

根据以上 ESR 条件实验与年代分析结果, 对藏南裂谷区泉华的 ESR 测年适用性进行讨论。

首先, 温度是泉华样品 ESR 测年必须考虑的关键因素。一方面, 温度影响泉华 ESR 测年的“计时零点”。在泉华的沉积过程中, 只有组成矿物的温度低于其 ESR 封闭温度时, 样品的 ESR 信号才开始积累, 此时即为 ESR 测年的“计时零点” (Ikeya, 1993)。对该区硅华样品矿物成分的分析表明, 研究中采集的硅华样品以石英为主要矿物。其石英的 ESR 封闭温度约为 49~82 °C (邱登峰等, 2018)。然而, 在搭格架热田地区, 热泉泉水温度约为 67~86.5 °C (王鹏, 2013)。该区硅华在冷却沉淀前, 其主要矿物成分在高温作用下应较少产生 ESR 信号, 直至喷出冷却后才开始积累, 故基本具备进行 ESR 测年的封闭温度条件。然而, 沉积于距热泉喷口较近位置的硅华沉积仍可能持续受热泉高温影响 (游雅贤等, 2019), 继而影响 ESR 信号的积累。因此, 在对热泉泉口处采集的硅华样品进行 ESR 测年时, 测得的年龄结果可能难以反映其真实沉积年代。另一方面, 温度影响样品沉积过程中 ESR 信号的稳定性。在样品的沉积过程中, 沉积环境温度的升高势必影响其 ESR 信号的稳定性, 较大的信号波动将影响 ESR 年龄

的准确性。藏南钙华沉积区热泉泉口温度约 52 ℃ (牛新生等, 2017), 而在夏康坚温泉钙华沉积的退火实验中, 钙华的 $g=2.0034$ 心在 20~150 ℃ 的温度下加热 15 min, 依然能够保持相对稳定的 ESR 信号。因此, 该测年心在钙华形成过程中, 其 ESR 信号因环境温度变化而发生波动的可能性较小, 适合进行 ESR 测年。

此外, 样品 ESR 信号对辐照剂量的响应是评价该样品 ESR 测年适用性的重要因素。部分泉华样品对附加剂量的响应较差, 在低剂量辐照下, 出现了附加剂量增大而 ESR 信号却不随之增强的剂量饱和现象 (Mahmud et al., 2014); 部分因较高的人工辐照剂量率对晶格造成的破坏而对 D_e 值拟合产生影响 (李新秀等, 2022)。此次研究中, 对藏南泉华样品的附加剂量实验表明, 所有样品接受的人工辐照剂量在相差近 1 倍、3 倍 (1961 Gy、3680 Gy、7084 Gy) 的情况下, 其产生的 ESR 信号生长曲线均具有相似的增长趋势 (图 4)。同时, 不同附加剂量下各样品生长曲线的 R^2 均大于 96%, 相应的 D_e 值变化量未超出原值的 15%。由此可见, 藏南泉华样品在测试过程中均未出现 ESR 信号饱和现象, 且在附加剂量为 7680 Gy 时依然能保持良好的拟合效果、得到较稳定的年龄结果。根据该实验结果, 假设环境剂量率达到研究中出现的最大值 1.15 Gy/ka, 藏南泉华的 ESR 测年上限可达 6.5 Ma。因此, 应用 ESR 法测定较老藏南泉华样品年龄具有一定的可行性。

同时, 矿物成分及结晶程度亦对泉华的 ESR 测年造成影响。对钙华样品而言, 结晶程度差的钙华可能在其内部构成开放系统, 使 U 和其他放射性元素发生迁移, 进而对 ESR 测年造成影响 (Ikeya, 1993)。此外, 水热作用形成的钙华在周围植物根系、细菌和苔藓的影响下, 常形成波谱中 $g=2.0045$ 心附近的宽信号, 对测年心的辨识造成不便 (Grün, 1989)。此次研究中, 藏南钙华样品的 X 射线衍射测试结果表明, 结晶程度良好的方解石是样品矿物的主要成分。采集的钙华样品在沉积过程中应较少受到重结晶作用和放射性元素迁移对其 ESR 累积信号的影响, 测年结果相对准确。同时, 西藏高寒的气候环境抑制了植物和细菌的生长, 减弱了有机自由基等杂质对 ESR 光谱的影响, 亦减轻了对 ESR 测试的干扰。在此次 ESR 测试中, 各钙华样品 ESR 波谱及测年心信号

均清晰可辨。对硅华样品而言, 在其形成过程中, 热水介质中物质的快速沉积和矿物的快速生长使得杂质难以排到晶体之外 (王江海等, 1998), 导致准确测定硅华年龄变得极为困难。对 ESR 年龄结果与样品矿物成分测试结果的综合分析表明, 杂质较少、较纯净的硅华样品更能实现对其 ESR 年龄的准确测定, 而矿物成分混杂的样品在 ESR 年龄测定时出现了测定年龄不准确的问题。

4 结论

通过对藏南裂谷中晚第四纪泉华样品的一系列 ESR 测年及条件实验, 并结合岩矿分析等方法得到的样品矿物特性, 对藏南泉华 ESR 测年的适用性进行分析, 可得到以下主要认识。

(1) 通过 ESR 测年法在藏南阿里一日喀则地区测得的泉华沉积样品年龄分布于中、晚更新世。其中, 搭格架热田区 T3、T4 阶地的硅华沉积分别形成于 177 ± 20 ka、 81 ± 16 ka; 夏康坚温泉区河漫滩和 T1 阶地处的钙华沉积分别沉积于 106 ± 32 ka、 264 ± 26 ka。

(2) 藏南泉华样品具有一定的 ESR 测年适用性。一方面, 藏南硅华在形成过程中受 ESR 封闭温度影响较小, 藏南钙华 $g=2.0034$ 心信号在 20~250 ℃ 范围具有良好的稳定性; 另一方面, 藏南泉华样品的 ESR 信号对 7680 Gy 范围内的人工附加剂量响应良好, 对该区较老泉华样品的 ESR 测年具有一定适用性。

(3) 藏南钙华样品矿物结晶度、纯度较好, ESR 测年结果相对准确; 硅华样品杂质较多、沉积过程复杂, 对 ESR 测年准确性造成影响。

致谢: 在撰写过程中得到了 ESR 测年专家 Williams J. Rink 和第四纪地质学专家孙继敏研究员的指导, 两位匿名审稿人对本文提供了宝贵的修改意见, 在此一并致以衷心的感谢!

References

- AITKEN M J, 1985. Thermoluminescence dating [M]. London: Academic Press.
- BIAN S, YU Z Q, GONG J F, et al., 2021. Spatiotemporal distribution and geodynamic mechanism of the nearly NS-trending rifts in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (2): 178-194. (in Chinese with English abstract)
- CASS J, KENT R S, MARSHALL S A, et al., 1974. Electron spin

- resonance absorption spectrum of HCO_3^{2-} molecule-ions in irradiated single-crystal calcite [J]. *Journal of Magnetic Resonance* (1969), 14 (2): 170-181.
- CHEN Y, GAO J, FENG J, 1993. ESR dating of geysersites from intermittent geyser sites on the Tibetan Plateau [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 44 (1-2): 207-213.
- CHEN Y J, GAO J C, FENG J J, et al., 1992. A preliminary study on the history of hydrothermal activities occurred in Southern Tibetan [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 19 (5): 18-21, 24. (in Chinese with English abstract)
- CHOI P Y, HWANG J H, BAE H, et al., 2015. Kinematics and ESR Ages for Fault Gouges of the Quaternary Jingwan Fault, Dangjin, western Korea [J]. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 36 (1): 1-15.
- DUVAL M, GUILARTE V, 2015. ESR dosimetry of optically bleached quartz grains extracted from Plio-Quaternary sediment; evaluating some key aspects of the ESR signals associated to the Ti-centers [J]. *Radiation Measurements*, 78: 28-41.
- ENGIN B, GÜVEN O, KÖKSAL F, 1999. Thermoluminescence and electron spin resonance properties of some travertines from Turkey [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 51 (6): 729-746.
- EULER F K, KAHAN A, 1987. Radiation effects and anelastic loss in germanium-doped quartz [J]. *Physical Review B*, 35 (9): 4351-4359.
- GAO L, YIN G M, LIU C R, et al., 2011. ESR dating of fault gouge from the eastern Liupanshan piedmont fault zone [J]. *Nuclear Techniques*, 34 (2): 121-125. (in Chinese with English abstract)
- GRÜN R, SCHWARCZ H P, FORD D C, et al., 1988. ESR dating of spring deposited travertines [J]. *Quaternary Science Reviews*, 7 (3-4): 429-432.
- GRÜN R, 1989. Electron spin resonance (ESR) dating [J]. *Quaternary International*, 1: 65-109.
- GRÜN R, 1991. Potential and problems of ESR dating [J]. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 18 (1-2): 143-153.
- GRÜN R, 1997. Electron spin resonance dating [M] // TAYLOR R E, AITKEN M J. *Chronometric dating in archaeology*. New York: Springer; 217-260.
- HA G H, WU Z H, 2021. Discussion of the seismogenic structure of the 1901 $M 6\frac{3}{4}$ Nyemo earthquake [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (2): 218-229. (in Chinese with English abstract)
- HAN F, XIAO P, LI M Q, et al., 2022. Establishment of the standardized growth curves for ESR dating of fossil teeth [J]. *Quaternary Sciences*, 42 (5): 1401-1409. (in Chinese with English abstract)
- HE J G, ZHOU Y Z, NIE F J, et al., 2007. Petrologic and geochemical characteristics of the hydrothermal chert in Southern Tibet and its geological significance [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 26 (1): 74-81. (in Chinese with English abstract)
- HENNIG G J, GRÜN R, 1983. ESR dating in quaternary geology [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2 (2-3): 157-238.
- HOU Z Q, LI Z Q, QU X M, et al., 2001. Uplift processes of the Tibetan Plateau since 0.5 Ma: evidence from hydrothermal activity in Gangdese belt [J]. *Science in China (Series D)*, 31 (S1): 27-33. (in Chinese)
- HOU Z Q, ZHAO Z D, GAO Y F, et al., 2006. Tearing and dischronal subduction of the Indian Continental Slab: evidence from cenozoic gangdese volcano-magmatic rocks in South Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (4): 761-774. (in Chinese with English abstract)
- HUANG P H, PENG Z C, JIN S Z, et al., 1986. Study on the age determination of Quaternary materials by electron spin resonance (ESR) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 31 (6): 453-455. (in Chinese)
- IKEYA M, 1993. *New applications of electron spin resonance: dating, dosimetry and microscopy* [M]. Singapore: World Scientific.
- LAWLESS J L, CHEN R, LO D, et al., 2005. A model for non-monotonic dose dependence of thermoluminescence (TL) [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 17 (4): 737-753.
- LI X X, LIU C R, JI H, et al., 2022. Response characteristics of travertine ESR signal to different artificial irradiation dose rates [J]. *Quaternary Sciences*, 42 (5): 1443-1449. (in Chinese with English abstract)
- LI Y W, WEI C Y, LI C A, et al., 2022. Application and evaluation of multiple-centres ESR dating of Pliocene-Quaternary fluvial sediments: a case study from the Zhoulao core from the Jiangnan Basin, middle Yangtze River basin, China [J]. *Quaternary Geochronology*, 70: 101297.
- LI Z Q, 2002. Present hydrothermal activities during collisional orogenics of the Tibetan Plateau [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract)
- LI Z Q, HOU Z Q, NIE F J, et al., 2005. 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*, 79 (1): 68-77. (in Chinese with English abstract)
- LIU C R, YIN G M, GAO L, et al., 2011. Research advances in ESR geochronology of quaternary deposits [J]. *Seismology and Geology*, 33 (2): 490-498. (in Chinese with English abstract)
- LIU X, 1998. ESR dating and its geological significance of travertine in the stone forest, Yunnan province [J]. *Carsologica Sinica*, 17 (1): 9-14. (in Chinese with English abstract)
- MAHMUD H H, MANSOUR A, EZZ-ELDIN F M, 2014. Generation and bleaching of E' -centers induced in $\alpha\text{-SiO}_2$ by γ -irradiation [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 302 (1): 261-272.
- NIU X S, ZHENG M P, LIU X F, 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)
- PAN G T, MO X X, HOU Z Q, et al., 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (3): 521-533. (in Chinese with English abstract)

- PAN Y S, FANG A M, 2010. Formation and evolution of the Tethys in the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Geology*, 45 (1): 92-101. (in Chinese with English abstract)
- PIROUELLE F, BAHAIN J J, FALGUÈRES C, et al., 2007. Study of the effect of a thermal treatment on the D_E determination in ESR dating of speleothems [J]. *Quaternary Geochronology*, 2 (1-4): 386-391.
- PRESCOTT J R, HUTTON J T, 1994. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations [J]. *Radiation Measurements*, 23 (2-3): 497-500.
- QIU D F, YUN J B, LIU Q Y, et al., 2018. The current research status and prospects of quartz electron spin resonance dating in geology [J]. *Chinese Journal of Geology*, 53 (2): 749-764. (in Chinese with English abstract)
- QIU S B, WANG F D, DONG D Q, et al., 2022. Sedimentary evolution of the Dawan travertines and their geological environmental significance, Huanglong, China [J]. *The Depositional Record*, 8 (1): 251-265.
- RINK W J, BARTOLL J, SCHWARCZ H P, et al., 2007. Testing the reliability of ESR dating of optically exposed buried quartz sediments [J]. *Radiation Measurements*, 42 (10): 1618-1626.
- SERWAY R A, MARSHALL S A, 1967. Electron spin resonance absorption spectra of CO_3^- and CO_3^{3-} molecule-ions in irradiated single-crystal calcite [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 46 (5): 1949-1952.
- TAO X F, LIU D Z, ZHU L D, et al., 2004. Tectonic landform characteristics and formation mechanism of Xiakangjian Jokul in Tibet, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31 (2): 129-132. (in Chinese with English abstract)
- WANG J H, 1998. Continental hydrothermal sedimentation: a case study of Yunnan Province [M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- WANG P, 2013. Study on modern geochemical processes and CO_2 source and sink relationship of small watershed of typical hydrothermal area in Southern Tibet collision orogenic belt [D]. Chongqing: Southwest University. (in Chinese with English abstract)
- WANG S L, 1992. Palaeosinters and its significance, Qing-Xizang Plateau [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 19 (4): 29-31. (in Chinese with English abstract)
- WANG X, 2018. The geochemical characteristic and indicating meaning of sinters in the Yangyi geothermal field, Tibet [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract)
- WEN H G, LUO L C, LUO X T, et al., 2019. Advances and prospects of terrestrial thermal spring travertine research [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37 (6): 1162-1180. (in Chinese with English abstract)
- WIESER A, GÖKSU H Y, REGULLA D F, et al., 1993. ESR and TL dating of travertine from Jordan: complications in paleodose assessment [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 44 (1-2): 149-152.
- XUAN Y T, ZHAN W H, YAO Y T, et al., 2022. Testing of quartz ESR dating for the marine strata on the northwestern coast of Hainan Island [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 42 (3): 123-132. (in Chinese with English abstract)
- YI C L, BI W L, LI J P, 2016. ESR dating of glacial moraine deposits: some insights about the resetting of the germanium (Ge) signal measured in quartz [J]. *Quaternary Geochronology*, 35: 69-76.
- YOU Y X, WEN H G, ZHENG R C, et al., 2019. Advances and prospects of the terrestrial geothermal siliceous sinter research [J]. *Geological Science and Technology Information*, 38 (1): 68-81. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG S Q, WU H D, ZHANG Y, et al., 2020. Characteristics of regional and geothermal geology of the Reshuiquan HDR in Guide County, Qinghai Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 94 (5): 1591-1605. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO W J, KUMAR P, MECHIE J, et al., 2011. Tibetan plate overriding the Asian plate in central and northern Tibet [J]. *Nature Geoscience*, 4 (12): 870-873.
- ZHAO Y Y, NIE F J, HOU Z Q, et al., 2006. Geological characteristics and formation age of hot spring cesium deposit in Targejia area, Tibet [J]. *Mineral Deposits*, 25 (3): 281-291. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO Y Y, ZHAO X T, MA Z B, et al., 2010. Chronology of the Gulu hot spring cesium deposit in Nagqu, Tibet and its Geological Significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 84 (2): 211-220. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG M P, WANG Q X, DUO J, et al., 1995. A new type of hydrothermal deposit-cesium-bearing geyserite in Tibet [M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)

附中文参考文献

- 卞爽, 于志泉, 龚俊峰, 等, 2021. 青藏高原近南北向裂谷的时空分布特征及动力学机制 [J]. *地质力学学报*, 27 (2): 178-194.
- 陈以健, 高钧成, 冯锦江, 等, 1992. 藏南的水热活动历史初探 [J]. *水文地质工程地质*, 19 (5): 18-21, 24.
- 高璐, 尹功明, 刘春茹, 等, 2011. 六盘山东麓断裂层泥 ESR 测年研究 [J]. *核技术*, 34 (2): 121-125.
- 哈广浩, 吴中海, 2021. 西藏尼木 1901 年 $M 6\frac{3}{4}$ 地震的发震构造探讨 [J]. *地质力学学报*, 27 (2): 218-229.
- 韩非, 肖萍, 李梦琪, 等, 2022. 化石电子自旋共振 (ESR) 测年等效剂量标准生长曲线的构建 [J]. *第四纪研究*, 42 (5): 1401-1409.
- 何俊国, 周永章, 聂凤军, 等, 2007. 西藏南部热水沉积硅质岩岩石学和地球化学特征及地质意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 26 (1): 74-81.
- 侯增谦, 李振清, 曲晓明, 等, 2001. 0.5Ma 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)*, 31 (S1): 27-33.
- 侯增谦, 赵志丹, 高永丰, 等, 2006. 印度大陆板片前缘撕裂与分段俯冲: 来自冈底斯新生代火山-岩浆作用证据 [J]. *岩石学报*, 22 (4): 761-774.
- 黄培华, 彭子成, 金嗣昭, 等, 1986. 电子自旋共振法 (ESR) 测定第四纪物质年龄的研究 [J]. *科学通报*, 31 (6): 453-455.
- 李新秀, 刘春茹, 姬昊, 等, 2022. 钙华 ESR 信号对不同人工辐照剂量率的响应特征 [J]. *第四纪研究*, 42 (5): 1443-1449.
- 李振清, 2002. 青藏高原碰撞造山过程中的现代热水活动 [D]. 北

- 京: 中国地质科学院.
- 李振清, 侯增谦, 聂凤军, 等, 2005. 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, 79 (1): 68-77.
- 刘春茹, 尹功明, 高璐, 等, 2011. 第四纪沉积物 ESR 年代学研究进展 [J]. 地震地质, 33 (2): 490-498.
- 刘星, 1998. 云南石林地区钙华的 ESR 测年及其地质意义 [J]. 中国岩溶, 17 (1): 9-14.
- 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.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等, 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化 [J]. 岩石学报, 22 (3): 521-533.
- 潘裕生, 方爱民, 2010. 中国青藏高原特提斯的形成与演化 [J]. 地质科学, 45 (1): 92-101.
- 邱登峰, 云金表, 刘全有, 等, 2018. 石英电子自旋共振 (ESR) 的地质研究现状与展望 [J]. 地质科学, 53 (2): 749-764.
- 陶晓风, 刘登忠, 朱利东, 等, 2004. 西藏阿里地区夏康坚雪山构造地貌特征及其形成机制 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 31 (2): 129-132.
- 王江海, 1998. 陆相热水沉积作用: 以云南地区为例 [M]. 北京: 地质出版社.
- 王鹏, 2013. 藏南碰撞造山带典型水热区现代地球化学过程与小流域 CO₂ 源、汇关系研究 [D]. 重庆: 西南大学.
- 王绍令, 1992. 青藏高原古泉华及其意义 [J]. 水文地质工程地质, 19 (4): 29-31.
- 王潇, 2018. 西藏羊易地热田泉华地球化学特征及其指示意义 [D]. 北京: 中国地质科学院.
- 文华国, 罗连超, 罗晓彤, 等, 2019. 陆地热泉钙华研究进展与展望 [J]. 沉积学报, 37 (6): 1162-1180.
- 禚宇添, 詹文欢, 姚衍桃, 等, 2022. 海南岛西北部更新世海相地层的石英 ESR 测年探讨 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 42 (3): 123-132.
- 游雅贤, 文华国, 郑荣才, 等, 2019. 陆地热泉硅华研究进展与展望 [J]. 地质科技情报, 38 (1): 68-81.
- 张森琦, 吴海东, 张杨, 等, 2020. 青海省贵德县热水泉干热岩体地质-地热地质特征 [J]. 地质学报, 94 (5): 1591-1605.
- 赵元艺, 聂凤军, 侯增谦, 等, 2006. 西藏搭格架热泉型铯矿床地质特征及形成时代 [J]. 矿床地质, 25 (3): 281-291.
- 赵元艺, 赵希涛, 马志邦, 等, 2010. 西藏谷露热泉型铯矿床年代学及意义 [J]. 地质学报, 84 (2): 211-220.
- 郑绵平, 王秋霞, 多吉, 等, 1995. 水热成矿新类型: 西藏铯硅华矿床 [M]. 北京: 地质出版社.