

文章编号: 0258-7106 (2006) 03-0281-11

西藏搭格架热泉型铯矿床地质特征及形成时代^{*}

赵元艺¹, 聂凤军¹, 侯增谦², 李振清¹, 赵希涛³, 马志邦³

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

3 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘 要 文章在野外第四纪地质与地貌调查的基础上, 系统研究了搭格架矿床的地质特征, 并以 U 系法的全溶法和等时线法为主要手段, 查明了矿床的成矿时代。根据泉华在野外的分布特征, 将其分为 6 套。第 I 套为灰白色钙华; 第 II ~ VI 套为硅华, 主要矿物为胶状和粒状蛋白石。硅华在长马曲河流阶地的位置分别为: 第 II 套, T₅; 第 III 套, T₄; 第 IV 套, T₃; 第 V 套, T₂; 第 VI 套, T₂。泉华形成于 5 个阶段: 403 ~ 202 ka B. P.; 99 ka B. P.; 39 ~ 25 ka B. P.; 17 ~ 4 ka B. P.; 现代。

关键词: 地质学; 热泉型铯矿床; U 系法测年; 硅华; 搭格架; 西藏

中图分类号: P618.84

文献标识码: A

Geological characteristics and formation age of hot spring cesium deposit in Targejia area, Tibet

Zhao YuanYi¹, Nie FengJun¹, Hou ZengQian², Li ZhenQing¹, Zhao XiTao³ and Ma ZhiBang³

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037,

China; 3 Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China)

Abstract

The Targejia hot spring geyserite cesium deposit, located in Ang Ren County of Xigaze area, Tibet, is still very active. The size of this geyserite cesium deposit is very rare in China. The geyserite reserves of this deposit have reached the superlarge grade. In the opposite direction and in collision with each other, Indian and Eurasian plates produced the NS-trending rift valley. This deposit, located in the fracture of the Dajia Co-Dajiamang Co-Targejia NS-trending rift valley, is in a sheetlike high temperature (> 60 °C) area. There are two types of sinter in this ore district, namely, travertine and geyserite. The travertine is distributed in sandstone and conglomerate at the foot of the Dajia Mountain west of the spring. Geyserite is developed in the east and west of Changmaqu. The active fountain, however, is just located in the west of Changmaqu. According to the distribution land forms and characteristics, the sinter can be divided into six suites. The first suite is grayish white travertine. The others are geyserite, with the main mineral being the colloform and granular opal. The colors of the geyserite and the positions in Changmaqu are as follows: the second suite is brick red, pure white, grayish green, T₅; the third is brick red, T₄; the forth is grayish white, T₃; the fifth is grayish green, T₂; the sixth is grayish green and grayish yellow, T₂. According to the U series and the previous workers' ESR dating results, the sinter can be assigned to five formation stages: the first stage was 403 ~ 202 ka B. P., the second stage was 99 ka B. P., the third stage was 39 ~ 25 ka B. P., the forth stage was 17 ~ 4 ka B. P., and the fifth stage

^{*} 本文得到国家科技部 973 项目 2002CB412606 课题的资助

第一作者简介 赵元艺, 男, 1966 年生, 研究员, 从事矿床学、地球化学研究。E-mail: yuanyizhao2@sina.com

收稿日期 2005-12-12; 改回日期 2006-03-30。李岩编辑。

refers to modern time.

Key words: geology, hot spring type cesium deposit, U-series dating, geyserite, Targejia, Tibet

铯元素具有优良的光电特性和强烈的化学活动性,因此铯金属及其化合物具有独特的性能,故在多种技术领域,特别是军事等高科技领域中得到广泛应用(黄万抚等,2003)。自然界中独立的铯矿物主要有铯沸石、南平石、Rhodizite、铯锰星叶石和铯蛋白石(A、CT与C三种)等。已知的铯矿床有:①含铯伟晶岩矿床,代表性矿床为新疆阿尔泰与四川康定等地的铯矿床(董普等,2005);②碱性花岗岩型铯钽伴生铯矿,代表性矿床为湖南郴州、衡阳及江西宜春等地的铯矿床(董普等,2005);③碱性岩石风化沉积型铯钽伴生铯矿,代表性矿床为广东增城等地的铯矿床(董普等,2005);④含铯盐湖矿床,代表性矿床为西藏扎布耶(卤水中铯含量达50 mg/l,工业品位要求为10 mg/l)(郑绵平等,1995);⑤含铯温泉水、热卤水及其硅华矿床,以西藏的谷露、色米及本文的重点研究对象塔格架的铯矿床为代表,该类矿床中硅华的铯含量最高,迄今发现的含铯最高的硅华即为西藏塔格架的硅华(郑绵平等,1995)。

塔格架热泉型铯矿位于西藏日喀则地区昂仁县境内,海拔高度5 000 m。该热泉型铯矿为现今仍在活动的间歇喷泉,其主喷泉活动规模之大为中国所罕见。1982年郑绵平等(1995)在塔格架采集的硅华剖面样品中 w_{Cs} 高达 98×10^{-4} (Cs的工业品位要求: 4.7×10^{-4}),此后,郑绵平等曾对塔格架硅华铯矿的地质特征、生成机制和提铯技术等进行过探索,并估算其铯金属的资源量达14 459.42 t,换算为 Cs_2O 为15 326.76 t,达到了超大型矿床的规模。硅华中铯的赋存状态研究结果表明,Cs在硅华和硅凝胶中的含量与其中“结合水”的含量呈正比关系,硅华形成后随着时间的增加,硅凝胶逐渐发生缩水作用,硅华形成越早,含水量越少,其中的Cs随脱水而流失,据此推测Cs以 OCs^- 形式代替含结晶水的硅华中的 OH^- (郑绵平等,1995)。

总体来看,对该矿床的地质及地球化学的研究工作较为薄弱,考虑到该矿床为典型的现代热水成因,而其主要的赋矿围岩硅华为硅质岩的一种,因此,系统查明塔格架铯矿床产出的区域地质背景,不同阶段泉华的矿物组合,各阶段的成矿年龄、地球化学及同位素组成等特征,无论对提高现今热水成矿作用的研究水平,还是以将今论古原则探讨古代有

关硅质岩矿床的成因均有参考意义。

1 构造背景与区域热水活动

受印度—欧亚板块碰撞作用的影响,青藏高原发生过大面积隆升,两大板块的主碰撞带存在3种明显的构造:地壳双倍加厚、碰撞带东西两端有大型构造结(Yin et al., 2000)及碰撞后伸展引起的一系列横切印度—雅鲁藏布缝合带和班公湖—怒江缝合带的近SN向正断层系统(Tapponier et al., 1997; Molnar et al., 1978; Ni et al., 1978)(图1),其中SN向正断层系统在高原腹地主要体现为SN向裂谷和地堑盆地,这些地堑盆地不仅控制了藏南中新世钾质-超钾质火山活动和埃达克质含矿斑岩的时空分布,而且诱发了强烈的现代热水活动,构成了著名的喜马拉雅大型地热带(侯增谦等,2004;李振清等,2005)(图1)。因此NS向裂谷控制着现代热水活动的规模和分布范围。高原腹地较大的热水带有:当惹雍错—古错热水带、申扎—谢通门热水带、亚东—谷露热水带和桑日—错那热水带。高原腹地的热泉地表温度平面分布图(图2)显示,热泉主要分布在班公错—怒江缝合带之南,其中高于60℃的高温温泉呈片状分布,主要分布于狮泉河—玛旁雍错、塔格架、卡乌地热田、羊八井—当雄、古堆地热田等地,与双低速低阻尼层和高热流值存在的空间位置相互对应(李振清等,2005)。塔格架位于印度—欧亚板块碰撞所产生的打加错—打加芒错—塔格架NS向裂谷的南端。西藏泉华的电子自旋共振法(ESR)测年数据(侯增谦等,2001;2004)表明,热水活动在北部(羌塘地体)早,规模大;南部(拉萨地体)晚,规模小。关于西藏泉华的形成时间,不同的研究人员给出了不同的数据。例如郑绵平等(1995)在综合塔格架、谷露、色米3处硅华的形成年代的基础上,提出泉华形成于3个时期:第一期(69.0 ± 1.1)~早于(30.0 ± 6.7)万年,第二期(30.0 ± 6.7)~(2.0 ± 0.5)万年,第三期早于(1.5 ± 0.5)万年(还在继续中)。李振清(2002)根据西藏9处泉华(包括塔格架)的ESR年龄数据,给出了西藏泉华形成于4个时期:50~47万年、40~35万年、27~20万年和15万年以来。而侯增谦等(2001)则根据西藏7处泉华(包括塔格架)的ESR年龄,同

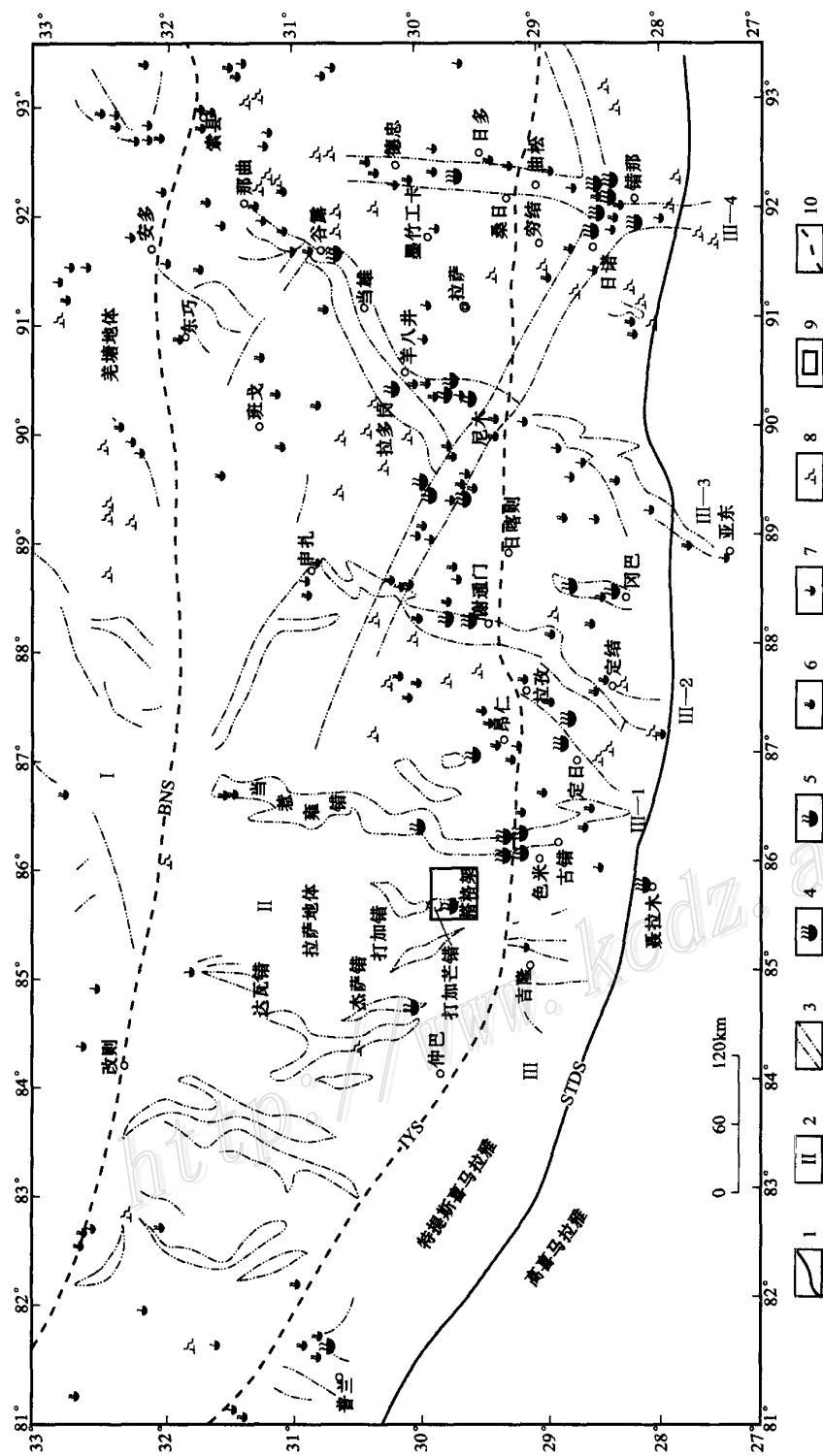


图 1 西藏高原山带 NS 向裂谷和裂陷带与热泉分布图(据侯增谦等, 2004; 李振清等, 2005; 在个别地名等方面有简化)

1—热水活动带边界断裂; 2—热水活动分区; 3—裂谷与地槽盆地; 4—沸泉; 5—热水爆炸; 6—热泉; 7—温泉; 8—热水显示; 9—研究区; 10—缝合带。IYS—印度-雅鲁藏布缝合带; BNS—班公湖-怒江缝合带; III-1—当惹雍错-古错热水带; III-2—申扎-谢通门热水带; III-3—亚东-谷露热水带; III-4—桑日-错那热水带

Fig. 1 NS-trending rift and distribution of hot springs in the Tibet plateau orogenic belt (after Hou et al., 2004; Li et al., 2005)

1—Boundary fault of the hot spring belt; 2—Zoning of the hot spring belt; 3—NS-trending rift and graben basin; 4—Boiling spring; 5—Hot spring outbreak, erupting geyser; 6—Hot spring; 7—Warm spring; 8—Hot spring demonstration; 9—Study area; 10—Suture zone. IYS—Indo-Yarlung Zangbo suture zone; BNS—Bangong-Nujiang suture zone; III-1—Dangrayum Co-Gu Co hydrothermal belt; III-2—Xainza-Xaitongmoin hydrothermal belt; III-3—Yadong-Gulu hydrothermal belt; III-4—Sangri-Cona hydrothermal belt

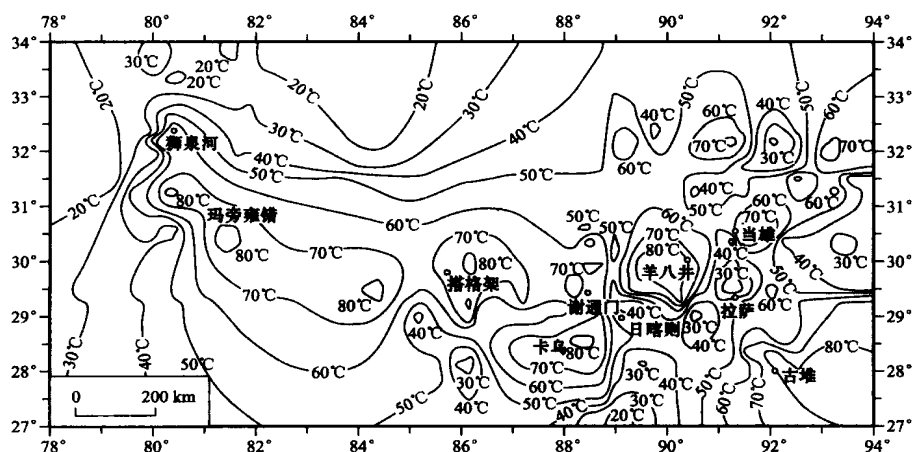


图 2 青藏高原地热泉温度平面分布图

图中温度等值线代表热泉的地表露头温度;数据据李振清等(2005)与佟伟等(1981)

Fig. 2 Surface temperature distribution of hot springs in Tibet plateau

Contour lines of temperature represent surface temperature of hot springs; Data from Li et al., 2005 and Tong et al., 1981

样给出了西藏泉华形成于 4 个时期:0.5 ~ 0.47 Ma B.P., 0.4 ~ 0.35 Ma B.P., 0.27 ~ 0.2 Ma B.P. 和小于 0.1 Ma B.P.。

2 搭格架铯矿地质特征

搭格架铯矿位于雅鲁藏布江支流的多雄藏布上游的一条 NW 向宽谷的东侧,该宽谷为一带状断陷盆地,盆地北部的两侧山地为大面积晚中生代酸性侵入体和火山岩体,在泉区附近为一套晚白垩世的复理石和类复理石建造。泉区西部的打加山山脚为晚更新世砂岩和砾岩互层,砾岩的砾石成分多为火山凝灰岩、酸性熔岩、石英斑岩和闪长玢岩等,在该套砂岩和砾岩中同时发育有较大规模的钙华。矿区有 NE、NS 与 NW 向 3 组断裂构造,搭格架最大间歇泉位于 3 条断裂的交汇点偏南处。

搭格架热泉位于小型外流湖打加芒错南端出口处及其南的河谷中。打加芒错则是古搭格架热泉沉积叠加于古冰川与冰水沉积物之上而形成的热泉-冰川堰塞湖。打加芒错通过长马曲(图 3)等河流流入雅鲁藏布江,故应属藏南外流区的一部分。长马曲将泉区分为东、西 2 部分,其中东部硅华分布面积较大,约占整个泉区的 70%,但现今仍在活动的喷泉规模均较小。西部硅华分布面积相对东部较小,但现今仍在活动的喷泉主要位于西部,其中现今规模最大的喷泉就位于西部的硅华台地上(图 4a),但据

笔者 2003 年和 2004 年的现场考察,其活动规模较有记录的 1975 年 8 月(佟伟等,1981;2000)明显变小,例如 1975 年 8 月汽水柱粗达 2 m,喷高约 20 m,但现今汽水柱粗仅约 1 m,喷高仅约 7 ~ 8 m。另外,笔者等有幸于 2003 年 8 月 3 日下午约 16:00 时见到了搭格架喷发周期约 1 天半的第 2 间歇喷泉喷发的壮观景象(图 4b、图 4c、图 4d)。

在长马曲河谷中,发育了 5 级河成阶地,其海拔高度分别为 12 m、10 m、7 m、5 m 和 2 m 左右,均由冲积砾石层组成。不同时期的搭格架热泉沉积就分布于长马曲河床 5 级阶地和打加峰东南、长马奴北的冈底斯冰期的冰碛物之上(图 5)。具有不同颜色与特征的搭格架热泉沉积或分布于冈底斯冰期冰碛物的外表或裂隙中,或覆于长马曲上游第五至第一级阶地及现代河床的不同部位(图 6),故可根据其分布的地貌部位和特征,将其划分为如下 6 套。

第一套泉华主要为钙华(图 4e),分布于打加峰东南、长马奴北冈底斯冰期冰碛物的外表或裂隙中,其外表呈角砾状、碎斑状结构,偶见后期硅华充填于钙华中。

第二套和第三套泉华主要为硅华,呈砖红色,分别分布于长马曲东岸的第五级阶地和西岸的第四级阶地,其矿物成分均为蛋白石,依蛋白石形态特征分为粒状与胶状两种,部分胶状蛋白石呈不规则状充填于空洞或孔隙中。

第四套泉华主要为硅华,分布于长马曲西南岸

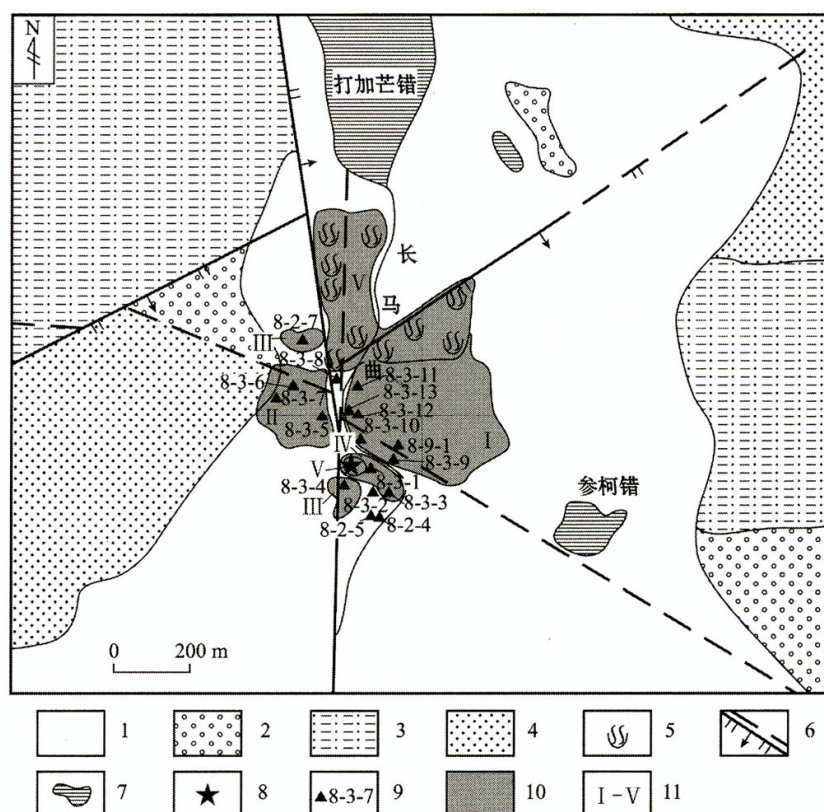


图 3 搭格架地热田地质简图(地质体界线据郑绵平等,1995;泉华分布范围由本文推测)

1—第四纪松散沉积物;2—第三纪砾岩;3—白垩纪砂岩及泥岩;4—侏罗纪砂岩;5—泉点;6—实测及推测断层;7—湖泊;8—主喷泉;
9—热水与泉华采样点及编号;10—泉华;11—泉华形成的 5 个阶段

Fig. 3 Sketch geological map of the geothermal field within the Targejia district (modified after Zheng et al. , 1995 ;

The distribution limits of the sinter inferred by this paper)

1—Quaternary loose sediments; 2—Tertiary conglomerate; 3—Cretaceous sandstone and argillite; 4—Jurassic sandstone; 5—Spring;

6—Measured and inferred fault; 7—Lake; 8—Main fountain; 9—Sampling site of hot spring and its serial number; 10—Sinter;

11—Distribution of five stages of sinter

主喷泉旁的第三级阶地之上,其矿物成分主要为蛋白石,另含大量陆源碎屑,其成分主要为石英和长石,含量(体积分数,下同)为 15%~50%;蛋白石多为粒状,约占 28%~50%;胶状蛋白石含量约为 20%~40%,多沿裂隙充填;磷石英含量<10%,多呈鳞片状,主要与胶状蛋白石共生;玉髓含量<5%,主要呈纤维状、放射状。

第五套泉华及其上的第六套泉华(即现代泉华)均主要为硅华,分布于长马曲西南岸主喷泉旁所在的第二级阶地之上(图 4f),其矿物成分主要为胶状与粒状蛋白石,其中胶状蛋白石占 70%。

3 矿床的形成时代

关于搭格架硅华的形成时代,郑绵平等(1995)曾给出了 4 个电子自旋共振(ESR)年龄数据[(0.62

± 0.18) ~ (40.33 ± 12.10) 10^4 a B. P.],李振清(2002)也给出了 1 个 ESR 年龄数据[(2.44 ± 0.58) 10^4 a B. P.].由于 ESR 年龄测定的影响因素较多,现有技术条件无法排除这些影响,因而其年龄格架“比较粗略,相对误差较大”(郑绵平等,1995)。本文在野外详细观察的基础上,利用 U 系法对搭格架热泉华的年代学进行了较为系统的研究。

3.1 泉华样品 U 系法年龄测定的依据

在地质作用过程中,U 元素无处不在,只是在不同的地质体中其含量不同而已。在碳酸盐样品中 U 与碳酸根形成铀酰络阴离子 $UO_2(CO_3)_4^{3-}$ 和 $UO_2(CO_3)_3^{3-}$,它们易溶于水并随水而迁移;由于 Th 易于水解、沉淀或被吸附在其他物质上,因而纯碳酸盐中的 Th 含量甚微,可忽略不计。除碳酸盐外,铀酰与磷酸盐、硫酸盐、氟化物和硅酸盐离子也形成可溶性络合物(Gascoyne,1992)。对于热泉华样品,由于形



图 4 西藏搭格架热泉及其沉积物照片

a. 主喷泉; b. 第二间歇泉; c. 第二间歇泉; d. 第二间歇泉; e. 砖红色钙华; f. 呈帘状分布的第六套硅华覆盖在台阶状的第五套硅华之上

Fig. 4 Photographs of fountains and their sediments from Dagejia, Tibet

a. The main fountain; b. The second geyser; c. The second geyser; d. The second geyser; e. Laterite travertine; f. Curtain-shaped geyserite of the sixth suite, covering the terrace-shaped geyserite of the fifth suite

成后非常坚硬, U 沉积于热泉华中后几乎没有被迁出的可能, 导致其可能处于封闭体系。但在样品形成初期引进了 ^{232}Th , 这样, 在计算样品年龄时就必

须对碎屑 Th 的污染进行校正。

从年龄测定意义出发, 笔者尝试把这类样品看作由 2 种组分组成, 即自生相的泉华物质和碎屑

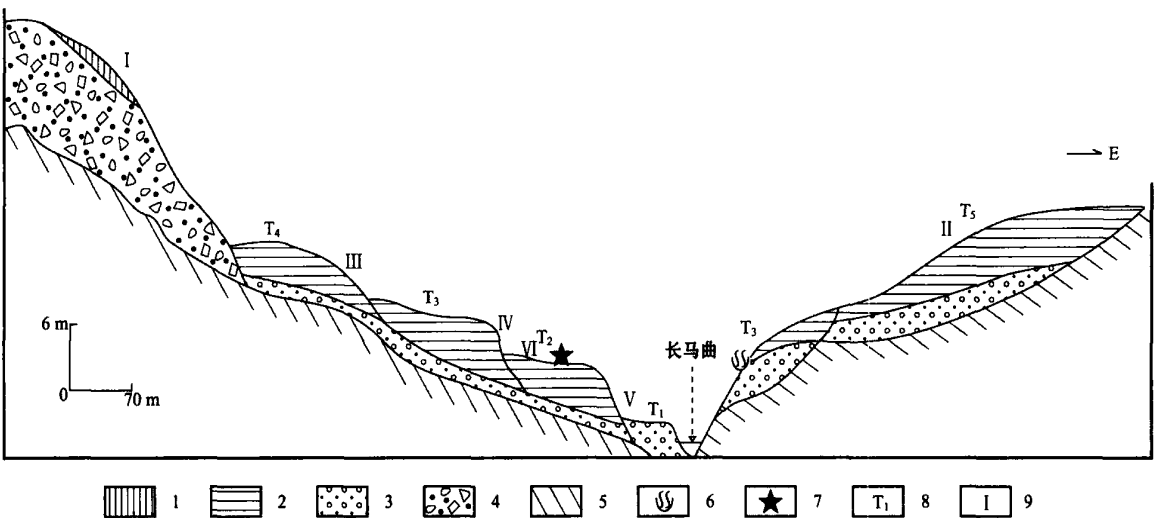


图 5 搭格架泉华分布示意图

1—钙华;2—硅华;3—冲积砂砾石;4—中更新世早期冰碛;5—基岩;6—间歇喷泉;7—主喷泉;8—河流阶地编号;9—泉华编号

Fig. 5 Simplified geological section showing sinter distribution of Targejia area

1—Travertine; 2—Geyserite; 3—Alluvial grit; 4—Early Middle Pleistocene moraine; 5—Base ment rock; 6—Geyser; 7—Main fountain; 8—Serial number of River terrace; 9—Serial number of sinter

套次	柱状图	接触关系	泉华颜色	矿物组成	位置	t/ka B.P.	
VI		整合	灰绿、灰黄色	胶状与粒状蛋白石, 胶状蛋白石约占70%	T ₂	现代	
V			灰绿色	胶状与粒状蛋白石, 胶状蛋白石约占70%	T ₂	(4.4 ± 3.4) (14.8 ± 2.5)	
IV		整合	灰白色	粒状蛋白石(28%~50%), 胶状蛋白石(20%~40%)	T ₃	(25.0 ± 3.9) (39.4 ± 1.9)	
III		不整合	砖红色	胶状、粒状蛋白石	T ₄	(29.9 ± 3.4) (99.1 ± 12.3)	
II			砖红色、纯白色、灰绿色	胶状、粒状蛋白石	T ₅	(201.9 ± 36) (255.1 ± 63.0)	
I			灰白色	方解石(?)		(36.7 ± 3.7) (39.6 ± 2.7)	

图 6 6 套泉华特征统计表

1—胶状蛋白石;2—粒状蛋白石;3—钙华;4—长马曲阶地编号

Fig. 6 Statistical table of six suites of sinter

1—Colloform opal; 2—Granular opal; 3—Travertine; 4—Serial number of Changmaqu terrace

相的泥质物质,并假定自生相代表泉华形成的年代,且保持了封闭体系。也就是说,在该相中不存在²³²Th,全部²³²Th均应来自碎屑相。那么从理论及数学关系上可以导出,所有数据点在²³⁰Th/²³²Th-²³⁴U/²³²Th和²³⁴U/²³²Th-²³⁸U/²³²Th等时线图(图7)中就应落在一条直线上。直线的斜率(²³⁰Th/²³⁴U和²³⁴U/²³⁸U)代表了去掉碎屑污染的泉华的同位素比值,或者说是年龄值。然后将其代入如下公式计算年龄(Ma et al.,2004):

$$\frac{{}^{230}\text{Th}}{{}^{234}\text{U}} = \frac{{}^{238}\text{U}}{{}^{234}\text{U}} (1 - e^{-\lambda_{230}t}) + \frac{\lambda_{230}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} \times [1 - e^{-(\lambda_{230} - \lambda_{234})t}]$$

式中, λ_{230} 和 λ_{234} 分别是 ${}^{230}\text{Th}$ 和 ${}^{234}\text{U}$ 的衰变常数, t 代表年龄。根据样品的 ${}^{230}\text{Th}/{}^{234}\text{U}$ 和 ${}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$ 比值可求得泉华的年龄。如果样品中的 U 含量太低, 则只用全溶样品的有关同位素比值来计算年龄; 反之, 则用等时线法计算。

3.2 实验方法与测年结果

3.2.1 实验方法

将野外采集的样品风干, 将混入的碎石颗粒弃去, 选择新鲜致密部分研磨至 100 目备分析。称取 30 g 样品置于 500 ml 烧杯中, 用 $c(\text{HNO}_3) = 0.1 \text{ mol/l}$ 的 HNO_3 淋取 30 min, 离心分离出其中的不溶物, 分为可溶相 (L) 和残渣相 (R), 另取全岩一份。残渣相和全岩分别用 $\text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{HClO}_4$ 全溶, 蒸干后以 $c(\text{HNO}_3) = 2 \text{ mol/l}$ 的 HNO_3 取出, 加入 ${}^{232}\text{U}$ - ${}^{228}\text{Th}$ 平衡示踪剂, 静置、过夜。U 和 Th 的分离与纯化在阴离子树脂交换柱 (Dowex1 $\times$ 8, 100 ~ 200 目, Cl^-) 上完成。其主要步骤为: 在样品溶液中加入 16 mg FeCl_3 作载体, 用 NH_4OH 调 pH 值至 7 ~ 8, U 和 Th 与 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 共沉淀。用 $c(\text{HCl}) = 8 \text{ mol/l}$ 的 HCl 取出沉淀物, 倾入阴离子交换柱 (10 $\times$ 1 cm)。Th 通过此柱, U 和 Fe 则被树脂吸附。用 $c(\text{NH}_4\text{NO}_3) = 8 \text{ mol/l}$ 的 NH_4NO_3 和 $c(\text{HNO}_3) = 0.1 \text{ mol/l}$ 的 HNO_3 洗去 Fe, $c(\text{HNO}_3) = 0.1 \text{ mol/l}$ 的 HNO_3 洗脱 U, 蒸干。将含 Th 的 HCl 溶液蒸至 < 20 ml, 加入 NH_4OH 共沉淀 Th 与 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。在 $c(\text{HNO}_3) = 7 \text{ mol/l}$ 的 HNO_3 中取出沉淀物倾入同一交换柱。用 $c(\text{HNO}_3) = 7 \text{ mol/l}$ 的 HNO_3 洗去 Al, 用 $c(\text{HNO}_3) = 8 \text{ mol/l}$ 的 HNO_3 洗脱 Th, 蒸干。经纯化的 U 和 Th 用

TTA 苯混合液萃取, 制备成 α 薄源备测量。U 和 Th 同位素的 α 谱测量是在国产 B-1221 型微机 4096 道 α 谱仪上完成的, 真空度约为 $(2 \sim 4) \times 1.33 \text{ Pa}$, 能量分辨率约为 35 ~ 50 keV。获得 U、Th 同位素的 α 谱后, 进行数据处理和可变本底及其他因子的校正 (马志邦等, 2002)。

3.2.2 测年结果

样品的 U 系法测年结果见表 1。总体来看, 无论是硅华还是钙华, 其 w_{U} 含量均为 $[(0.061 \pm 0.009) \sim (0.557 \pm 0.056)] \times 10^{-6}$ 。该批泉华样品的 U 含量经核工业地质研究所测试, 其结果与本文所测 U 含量基本一致, 因而可以确认泉华的 U 含量较低, 与郑绵平等 (1995) 给出的 $(0.266 \sim 8.339) \times 10^{-6}$ 相差较大。

由于部分泉华的 U 含量低, 用稀酸淋取时难于获得可测量的 U、Th 同位素比值, 但样品全溶后的 ${}^{230}\text{Th}/{}^{232}\text{Th}$ 比值变化在 3.72 ~ 14.50 之间。因此, 本次所测样品的年龄是假定被测试对象在久期平衡时的 $\text{Th}/\text{U} = 3.8$ 进行了校正之后所获得的 (Szabo et al., 1996; Shen et al., 2004)。Szabo 等采用稀酸淋滤法对美国内华达州 Pyramid 湖含碎屑泉华的 U 系年龄做了详细研究, 经等时线校正后得到了与其他方法所获得的年龄数据及地质背景吻合的结果。在被分析的数十个样品中, 有相当一部分样品的 ${}^{230}\text{Th}$ 相对 ${}^{234}\text{U}$ 过剩, 一些样品的 Th 含量极高, 达到 $(1140 \sim 3700) \times 10^{-6}$, ${}^{230}\text{Th}/{}^{234}\text{U}$ 比值最高达到 47。类似结果在美国加利福尼亚州的 Death Valley 也存在 (Ku et al., 1998)。而在坦桑尼亚 Natron 盆地湖中泉华的 ${}^{230}\text{Th}$ 为母体 ${}^{234}\text{U}$ 的 12 倍 (Hillaire-Marcel et al., 1986; Casanova et al., 1992)。本文中, 8-3-10-1 号样品的 ${}^{230}\text{Th}/{}^{234}\text{U}$ 比值为 1.826 ± 0.140 , 远大于平衡值 1.0, 有待今后进一步研究。如

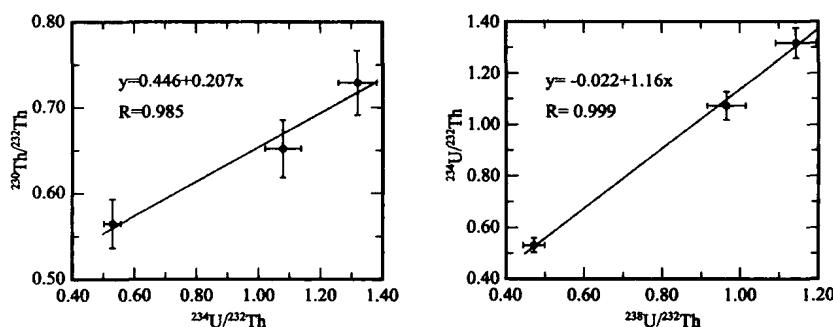


图 7 8-3-4-1 号泉华样品 ${}^{230}\text{Th}/{}^{232}\text{Th}$ 对 ${}^{234}\text{U}/{}^{232}\text{Th}$ 和 ${}^{234}\text{U}/{}^{232}\text{Th}$ 对 ${}^{238}\text{U}/{}^{232}\text{Th}$ 等时线图 (图中投点数据据表 1 及计算)

Fig. 7 ${}^{230}\text{Th}/{}^{232}\text{Th}$ - ${}^{234}\text{U}/{}^{232}\text{Th}$ and ${}^{234}\text{U}/{}^{232}\text{Th}$ - ${}^{238}\text{U}/{}^{232}\text{Th}$ isochron diagram of No. 8-3-4-1 sample

表 1 搭格架泉华 U 系法测年结果
Table 1 U-series dates of samples from the Targejia sinter

序号	样品编号	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$t/\text{ka B.P.}$	套次/类型
1a	8-3-7-1(1)	0.283 ± 0.015	0.149 ± 0.007	1.315 ± 0.084	10.250 ± 1.06	0.291 ± 0.023	36.7 ± 3.1	1/钙华
1b	8-3-7-1(2)	0.209 ± 0.008	0.026 ± 0.004	1.275 ± 0.062	12.130 ± 1.44	0.309 ± 0.018	39.6 ± 2.7	1/钙华
2	8-3-10-1	0.188 ± 0.015	1.789 ± 0.061	1.244 ± 0.123		1.826 ± 0.140		2/硅华
3	8-3-10-2	0.117 ± 0.010	0.308 ± 0.028	1.130 ± 0.127	6.480 ± 0.42	0.940 ± 0.108	201.9 ± 36.0	2/硅华
4	8-3-10-3	0.144 ± 0.007	0.660 ± 0.022	1.024 ± 0.085	3.720 ± 0.18	0.969 ± 0.055	$255.1 \pm 63.0/-41.5$	2/硅华
5	8-3-5-1	0.215 ± 0.012	0.035 ± 0.004	1.258 ± 0.093	14.500 ± 1.86	0.621 ± 0.048	99.1 ± 12.3	3/硅华
6	8-3-5-2	0.091 ± 0.005	0.052 ± 0.005	1.204 ± 0.085	6.360 ± 0.56	0.243 ± 0.026	29.9 ± 3.4	3/硅华
7	8-3-4-1			1.124 ± 0.063		0.207 ± 0.028	25.0 ± 3.9	4/硅华
	8-3-4-1 L	0.185 ± 0.008	1.182 ± 0.041	1.124 ± 0.063	0.564 ± 0.029	1.065 ± 0.060		
	R	0.275 ± 0.010	0.858 ± 0.034	1.117 ± 0.049	0.642 ± 0.033	0.596 ± 0.029		
	W	0.267 ± 0.008	0.701 ± 0.026	1.153 ± 0.042	0.738 ± 0.038	0.559 ± 0.026		
8	8-3-4-2	0.377 ± 0.013	0.202 ± 0.010	1.265 ± 0.051	7.100 ± 0.43	0.308 ± 0.013	39.4 ± 1.9	4/硅华
9	8-3-1-1			1.150 ± 0.114		0.041 ± 0.031	4.4 ± 3.4	5/硅华
	8-3-1-1 L	0.095 ± 0.007	0.167 ± 0.019	1.150 ± 0.114	0.809 ± 0.110	0.429 ± 0.063		
	R	0.557 ± 0.056	0.965 ± 0.045	1.055 ± 0.118	0.806 ± 0.075	0.455 ± 0.041		
	W	0.631 ± 0.062	1.686 ± 0.151	1.100 ± 0.143	0.572 ± 0.097	0.658 ± 0.093		
10	8-3-1-3			1.249 ± 0.043		0.128 ± 0.023	14.8 ± 2.5	5/硅华
	8-3-1-3 L	0.190 ± 0.007	0.432 ± 0.016	1.264 ± 0.061	0.929 ± 0.048	0.554 ± 0.028		
	R	0.189 ± 0.012	0.992 ± 0.030	1.240 ± 0.094	0.799 ± 0.032	1.125 ± 0.067		
	W	0.279 ± 0.014	0.940 ± 0.032	1.141 ± 0.067	0.867 ± 0.039	0.851 ± 0.044		

注：1~6 和 8 号样品年龄由全溶法测定并经铀钍久期平衡值 $\text{Th}/\text{U}=3.8$ 校正；1a 和 1b 为同一件样品测试两次的结果；7、9 和 10 号样品的年龄由等时线法测定；L—样品用 $c(\text{HNO}_3)=0.1\text{ mol/l}$ 的 HNO_3 淋取；R—样品用 $c(\text{HNO}_3)=0.1\text{ mol/l}$ 的 HNO_3 淋取后的残渣全溶；W—样品全溶。

果测定水体中的 U、Th 同位素比值,对于该地区部分样品的年代学研究将是很有意义的。

由表 1 可以看出,硅华样品的 U 系法年龄与野外同一套泉华中的上下层位关系基本一致,仅有第 5 号样品(样号 8-3-5-1)和第 6 号样品(样号 8-3-5-2)与野外划分的上下关系颠倒。对于钙华,将同一样品进行两次 U 系法测年(序号 1a 和 1b),测定结果分别为 $(36.7 \pm 3.1)\text{ ka B.P.}$ 和 $(39.6 \pm 2.7)\text{ ka B.P.}$,两者非常吻合,表明 U 系法测年结果有较好的重现性,其结果是可以接受的。

3.3 矿床的形成时代

搭格架第一套泉华(钙华)的 8-3-7-1 样品两次 U 系年龄测定结果分别为 $(36.7 \pm 3.1)\text{ ka B.P.}$ 与 $(39.6 \pm 2.7)\text{ ka B.P.}$ 。因此,这套钙华应形成于晚更新世晚期的末次冰期的间冰阶晚期,相当于深海氧同位素第 3 阶段(MIS 3),与第四套泉华(硅华)沉积的下部相当。

在最大间冰期中,长马曲形成了第五级河流阶地,第二套泉华(硅华)就堆积其上。由于长马曲该套硅华的 2 个测年样品(样号:8-3-10-2,8-3-10-3)的 U 系年龄测定结果分别为 $(201.9 \pm 36.0)\text{ ka B.P.}$ 与

$(255.1 \pm 63.0)/-41.5\text{ ka B.P.}$,故本区第二套泉华(硅华)形成于中更新世晚期的倒数第二次冰期,相当于深海氧同位素第 8~7 阶段(MIS 8~7)。这也反过来说明了长马曲的第五级阶地很可能形成于中更新世中期的大间冰期,相当于 MIS 13~9。

第三套泉华(硅华)的两个测年样品(8-3-5-1,8-3-5-2)的 U 系年龄测定结果分别为 $(99.1 \pm 12.3)\text{ ka B.P.}$ 与 $(29.9 \pm 3.4)\text{ ka B.P.}$,出现了明显的颠倒现象。根据与后述阶地及硅华的测年结果,暂时选择前者,故本区第三套泉华(硅华)形成于晚更新世早期的末次间冰期,相当于 MIS 5。这也反过来说明了长马曲的第四级阶地形成于中更新世晚期的倒数第二次冰期晚期或末次间冰期早期,相当于 MIS 6/5。

第四套泉华(硅华)的两个测年样品(8-3-4-1,8-3-4-2)的 U 系年龄测定结果分别为 $(25.0 \pm 3.9)\text{ ka B.P.}$ 与 $(39.4 \pm 1.9)\text{ ka B.P.}$,故本区第四套泉华(硅华)形成于晚更新世晚期的末次冰期间冰阶晚期至末次盛冰期早期,相当于 MIS 3~2。这也反过来说明了长马曲的第三级阶地形成于晚更新世中期的末次冰期早冰阶或间冰阶早中期,相当于 MIS 4/3。

第五套泉华(硅华)的两个测年样品(8-3-1-1,8-

3-1-3)的 U 系年龄测定结果分别为 (4.4 ± 3.4) ka B.P.与 (14.8 ± 2.5) ka B.P.。故本区第五套泉华(硅华)暂定为晚更新世末期的末次盛冰期与全新世即冰后期早期,相当于 MIS 2~1,长马曲第二级阶地则定为晚更新世晚期的末次冰期间冰阶晚期,相当于 MIS 3。由于长马曲第一级阶地主要在温泉分布区以外分布,在泉华覆盖区难以辨认,故只能根据一般分布规律,推测其属于全新世。

关于搭格架硅华年龄,郑绵平等(1995)所给出的 4 个 ESR 年龄数据分别是 $(0.62 \pm 0.18)10^4$ a B.P.、 $(1.7 \pm 0.51)10^4$ a B.P.、 $(8.21 \pm 2.46)10^4$ a B.P.和 $(40.33 \pm 12.10)10^4$ a B.P.,其中 $(0.62 \pm 0.18)10^4$ a B.P.为搭格架主喷泉溅落区硅华(可能相当于本文的第 6 套泉华)表层 0~10 cm 的年龄; $(1.7 \pm 0.51)10^4$ a B.P.为搭格架主喷泉泉华阶地下部相,为“老硅华”的顶部(可能相当于本文的第 5 套泉华)的年龄; $(8.21 \pm 2.46)10^4$ a B.P.为搭格架老硅华阶地上部的年龄; $(40.33 \pm 12.10)10^4$ a B.P.为老硅华阶地中部的年龄;李振清(2002)给出的搭格架主喷泉口 8 m 处硅华的 ESR 年龄为 $(2.44 \pm 0.58)10^4$ a B.P.,是否相当于本文的第四套泉华不得而知。但因它们的“老硅华”采样点的地貌部位不清,故只能作为本文讨论时的参考,难以对其可靠性加以评述。

与前人将搭格架泉华演化阶段仅由测年数据确定不同,本文系在较深入研究野外第四纪地质与地貌的基础上,再结合测年数据来确定泉华的形成阶段的。由本文泉华发育分期可以看出,搭格架地区硅华的形成可以初步划分为如下 5 个阶段:第一阶段为 $(255.1 + 63.0/-41.5) \sim (201.9 \pm 36.0)$ ka B.P.,第二阶段为 (99.1 ± 12.3) ka B.P.,第三阶段为 $(39.4 \pm 1.9) \sim (25.0 \pm 3.9)$ ka B.P.,第四阶段为 $(14.8 \pm 2.5) \sim (4.4 \pm 3.4)$ ka B.P.,第五阶段即现代。若将 U 系与 ESR 两种方法所测年龄结果综合考虑,则搭格架硅华发育的第一阶段为 403~202 ka B.P.,第二阶段为 99 ka B.P.左右,第三阶段为 39~25 ka B.P.,第四阶段为 17~4 ka B.P.,第五阶段即现代。并且在第 3 阶段硅华活动早期有一次钙华活动。与硅华的高温特征相比,钙华为中低温热流体活动的产物,反映出搭格架地热活动的脉动性。

在综合达格架等冈底斯热泉华热水活动规律的基础上,侯增谦等(2001)曾定性地指出,0.5 Ma 以来,青藏高原有两次 $[(0.37 \pm 0.05)$ Ma 和 0.1 Ma 以来]较大规模的快速隆升。可以看出,搭格架泉华的

测年结果第一阶段最老为 40.33×10^4 a B.P.,与侯增谦等(2001)的 0.5 Ma 相近;第二阶段 9.9×10^4 a B.P.与侯增谦等(2001)的 0.1 Ma 非常接近,故本次测年进一步支持了这两次隆升的划分,因而可以得出结论,搭格架铯矿的形成是高原挤压隆升的结果,反过来也说明泉华的精细年代学研究也可为高原隆升阶段的划分提供依据。

由铯在不同阶段硅华中的含量变化可知,硅华的铯含量在不同阶段有较大的差异,5 个阶段的 w_{Cs} 分别为 2.296×10^{-6} 、 2.582×10^{-6} 、 $2.214.1 \times 10^{-6}$ 、 2.038×10^{-6} 和 $3.282.31 \times 10^{-6}$ (赵元艺,2006),其中第二阶段相对较高,而第五阶段即现代泉华的铯含量最高。可能是由于硅华为非晶质水合二氧化硅,铯在其中以 OCs^- 的形式代替其中的 OH^- ,但随着时间的推移,非晶质二氧化硅逐渐向晶质方向转化,使硅华中的 OCs^- 流失而导致铯含量降低,此即铯含量在较早期的硅华中因“陈华和结晶”作用而降低(郑绵平等,1995),但在晚期的硅华中含量相对较高的原因。

4 结 论

搭格架位于印度—欧亚板块碰撞所产生的打加错—打加芒错—搭格架 NS 向裂谷的南端,为温度大于 60℃ 的呈片状分布的高温温泉区。矿区位于 NE、NS 及 NW 向 3 组断裂交汇处,分布有钙华与硅华 2 种泉华,钙华不含铯,硅华含铯。钙华分布于泉区西部的打加山山脚的砂岩和砾岩中,硅华发育于长马曲东、西两侧,但现今正在活动的喷泉主要位于其西侧。

根据泉华在野外的分布地貌和特征,将其划分为 6 套:第 I 套为灰白色钙华,第 II~VI 套为硅华,主要矿物为胶状和粒状蛋白石。硅华的颜色和在长马曲河流阶地的位置分别为:第 II 套,砖红色、纯白色和灰绿色,分布于 T_5 ;第 III 套,砖红色,分布于 T_4 ;第 IV 套,灰白色,分布于 T_3 ;第 V 套,灰绿色,分布于 T_2 ;第 VI 套,灰绿、灰黄色,分布于 T_2 。

泉华分为 5 个形成阶段,第一阶段形成年龄为 403~202 ka B.P.;第二阶段形成年龄为 99 ka B.P.;第三阶段形成年龄为 39~25 ka B.P.;第四阶段形成年龄为 17~4 ka B.P.;第五阶段形成年龄为现代。本文提供的搭格架泉华的形成时代比前人所给的更为精细,并且认为第二、五阶段为青藏高原 2

次较大规模的快速隆升的结果。

References

- Casanova J and Hillaire- Marcel C. 1992. Chronology and paleohydrology of late Quaternary high lake levels in the Manyara basin (Tanzania) from isotopic data (^{18}O , ^{13}C , ^{14}C , Th/ U) on fossil stromatolites [J]. *Quaternary Research*, 38: 205 ~ 226 .
- Dong P and Xiao R G. 2005. Cesium application and cesium(alkali metals) resource evaluation[J]. *China Mining Magazine*, 14(2): 30 ~ 34 (in Chinese with English abstract) .
- Gascoyne M. 1992. Geochemistry of the actinides and their daughters [A]. In: Ivanovich M and Harmon R S, ed. *Uranium-series disequilibrium: Application to earth, marine and environmental sciences* [C]. Oxford: Clarendon Press. 35 ~ 61 .
- Hillaire- Marcel C, Corro O and Casanova J. 1986. ^{14}C and Th/ U dating of Pleistocene and Holocene stromatolites from East Africa paleolakes [J]. *Quaternary Research*, 25: 312 ~ 329 .
- Hou Z Q, Li Z Q, Qu X M, Gao Y F, Hua L C, Zheng M P, Li S R and Yuan W M. 2001. The uplifting procdrses of the Tikean plateau since 0.5 Ma B. P: Evidence from hydrothermal activity in the Gangdise belt[J]. *Science in China (series D)*, 44(Supp): 35 ~ 44 (in Chinese) .
- Hou Z Q and Li Z Q. 2004. 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*, 78(4): 482 ~ 493 (in Chinese with English abstract) .
- Huang W F and Li X D. 2003. Applications and up-to-date development of extraction separation technology of Cs[J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 31(3): 18 ~ 20 (in Chinese with English abstract) .
- Ku T L, Luo S D, Lowenstein T K, Li J and Spencer R J. 1998. U-series chronology of lacustrine deposits in Death Valley, California [J]. *Quaternary Research*, 50: 261 ~ 275 .
- Li Z Q. 2002. Present hydrothermal activities during collisional orogenics of the Tibetan Plateau[D][dissertation for doctor degree]. Tutor: Hou Z Q. CAGS. 19 ~ 20 (in Chinese with English abstract) .
- Li Z Q, Hou Z Q, Nie F J and Meng X J. 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 ~ 76 (in Chinese with English abstract) .
- Ma Z B, Zhao X T, Zhu D G and Wu Z H. 2002. U-series chronology of lacustrine deposits from the Nam Co lake, north Tibet plateau[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23: 311 ~ 316 (in Chinese with English abstract) .
- Ma Z B, Wang Z H, Liu J Q, Yuan B Y, Xiao J L and Zhang G P. 2004. U-series chronology of sediments associated Late Quaternary fluctuations, Balikun Lake, northwestern China[J]. *Quaternary International*, 121: 89 ~ 98 .
- Molnar P and Tapponier P. 1978. Active tectonics of Tibet[J]. *J. Geophys. Res.*, 83: 5361 ~ 5375 .
- Ni J and York J. 1978. Late cenozoic tectonics of the Tibetan plateau [J]. *J. Geophys. Res.*, 83: 5377 ~ 5384 .
- Shen G J, Gao X, Zhao J X and Kenneth C D. 2004. U-series dating of locality 15 at Zhoukoudian, China, and implications for hominid evolution[J]. *Quaternary Research*, 62: 208 ~ 213 .
- Szabo B J, Bush C A and Benson L V. 1996. Uranium-series dating of carbonate (tufa) deposits associated with Quaternary fluctuations of Pyramid Lake, Nevada[J]. *Quaternary Research*, 45: 271 ~ 281 .
- Tapponier P and Molnar P. 1977. Active faulting and tectonics of China [J]. *J. Geophys. Res.*, 82: 2905 ~ 2930 .
- Tong W, Liao Z J, Liu S B, Zhang Z F, You M Z and Zhang M T. 2000. Thermal springs in Tibet[M]. Beijing: Science Press. 45 ~ 49 (in Chinese) .
- Tong W, Zhang M T, Zhang Z F, Liao Z J, You M Z, Zhu M X, Guo G Y and Liu S B. 1981. Geothermics in Tibet[M]. Beijing: Science Press. 46 (in Chinese) .
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Ann. Rev. Earth & Planet. Sci.*, 28: 211 ~ 280 .
- Zhao Y Y, Nie F J, Hou Z Q, Li Z Q, Zhao X T and Ma Z B. 2006. Geochemical studies on the hot spring typed cesium deposit in the Targejia of Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 25(in press) .
- Zheng M P, Wang Q X, Duo J, Liu J, Ping C W J and Zhang S C. 1995. A new type of hydrothermal deposit-cesium-bearing geyserite in Tibet[M]. Beijing: Geol. Pub. House: 110 (in Chinese with English abstract) .

附中文参考文献

- 董 普, 肖荣阁. 2005. 铯盐应用及铯(碱金属)矿产资源评价[J]. *中国矿业*, 14(2): 30 ~ 34 .
- 侯增谦, 李振清, 曲晓明, 高永峰, 华力臣, 郑绵平, 李胜荣, 袁万明. 2001. 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)*, 31(增刊): 27 ~ 33 .
- 侯增谦, 李振清. 2004. 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*, 78(4): 482 ~ 493 .
- 黄万抚, 李新冬. 2003. 铯的用途与提取分离技术研究现状[J]. *稀有金属与硬质合金*, 31(3): 18 ~ 20 .
- 李振清. 2002. 青藏高原碰撞造山过程中的现代热水活动[D][学位论文]. 指导老师: 侯增谦. 中国地质科学院. 19 ~ 20 .
- 李振清, 侯增谦, 聂凤军, 孟祥金. 2005. 藏南上地壳低速高导层的热质与分布: 来自热水流体活动的证据[J]. *地质学报*, 79(1): 68 ~ 76 .
- 马志邦, 赵希涛, 朱大岗, 吴中海. 2002. 西藏纳木错湖相沉积的铯系年代学研究[J]. *地球学报*, 23(4): 311 ~ 316 .
- 佟 伟, 章明陶, 张知非, 廖志杰, 由懋正, 朱梅香, 过国颖, 刘时彬. 1981. 西藏地热[M]. 北京: 科学出版社. 46 .
- 佟 伟, 廖志杰, 刘时彬, 张知非, 由懋正, 章铭陶. 2000. 西藏温泉志[M]. 北京: 科学出版社. 45 ~ 49 .
- 赵元艺, 聂凤军, 侯增谦, 李振清, 赵希涛, 马志邦. 2006. 西藏搭格架热泉型铯矿床地球化学[J]. *矿床地质*, 25(待刊) .
- 郑绵平, 王秋霞, 多 吉, 刘 杰, 平措旺杰, 张苏春. 1995. 水热成矿新类型——西藏铯硅华矿床. 北京: 地质出版社. 110 .