

西藏谷露热泉型铯矿床年代学及意义

赵元艺¹⁾, 赵希涛²⁾, 马志邦²⁾, 邓坚¹⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037;

2) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029

内容提要: 谷露间歇喷泉位于西藏那曲地区那曲县谷露乡西北的桑曲西岸, 海拔 4700~4750 m, 现今仍在强烈活动中, 其以硅华为主的泉华沉积形成了热泉型中型硅华铯矿床, 属印度-亚洲陆陆碰撞效应的产物。本文根据野外第四纪地质与地貌的系统调查研究, 将硅华分为南、北两区共 5 套沉积。由泉胶砾岩组成的第 I 套硅华下伏于南区大硅华台地之下, 并越过桑曲而延伸至河东, 构成倒数第二次冰期(爬然冰期)冰水沉积的基座。第 II 套硅华组成南区的大硅华台地。由泉胶砾岩组成的第 III 套硅华下伏于北区硅华台地之下, 也越过桑曲延伸至河东, 构成末次冰期(拉曲冰期)冰水沉积的基座。第 IV 套硅华构成北区硅华台地, 已被一东西向小沟分为南、北两个小片, 均由数列小的硅华锥组成。第 V 套硅华则为现今仍在活动和堆积的硅华锥。根据 9 个样品的 U 系法测年结果, 并参考野外地貌与第四纪地质研究结果, 可将这 5 套硅华的铯矿床的形成, 划分为如下 5 个阶段: 第 1 阶段虽暂缺年龄数据, 但可按地貌部位和地层层序, 判断其堆积于倒数第三次冰期(宁中冰期)以后, 很可能为 0.5~0.4 Ma BP 之间的大间冰期早中期; 第 2 阶段为 0.38~0.25 Ma BP, 相当于大间冰期晚期至爬然冰期早期; 第 3 阶段为 0.22 Ma BP 前后的爬然冰期早期; 第 4 阶段为 108.6~17.2 ka BP 的晚更新世的末次间冰期晚期至拉曲冰期; 第 5 阶段为 5.3 ka BP 的全新世中期以来。由老到新, 各期泉华的 SiO₂ 含量呈现出明显的降低趋势, 而铯含量则呈升高趋势, 是随着矿石中 SiO₂ 有序度的降低而其他成分被保留在晶格中所致。

关键词: 热泉型铯矿床; U 系法测年; 硅华; 谷露; 西藏

西藏高原现今仍在活动的热泉, 不仅景色秀美迷人, 而且是重要的热水资源。在部分热水中, 含有较高含量的 B、Li、Cs 和 K 等元素, 则是西藏特种盐湖的重要物质来源之一, 同时有些热水的元素含量甚至达到了矿床的要求, 如谷露与搭格架等热泉型铯矿床。

关于谷露及邻区泉华(包括硅华与钙华)的形成时代, 陈以健等(1992)曾给出 9 个 ESR 年龄数据。侯增谦等(2001)与李振清(2002)也曾给出了 1 个 ESR 年龄数据。后者还对拉多岗与羊八井热泉沉积物分别给出了 1 个 ESR 年龄数据。吴中海等(2004)则对温泉盆地的泉华给出了 3 个 U 系法年龄和 1 个 ESR 年龄。由于 ESR 年龄测定的影响因素较多, 并且有关的技术条件无法排除, 因而其“比较粗略, 相对误差较大”(郑绵平等, 1995)。本文选择那曲地区的谷露热泉型铯矿床为主要研究对象, 在野外详细观察的基础上, 利用 U 系法并结合前人

的研究成果, 对其泉华的年代学进行较为系统的研究, 不仅能为谷露铯矿床成矿作用的时代与分期提供可靠依据, 而且作为地壳深部构造活动重要标志之一的水热活动也可作为恢复印度与亚洲两个大陆的碰撞作用的历史提供较为精细的晚近年代学依据。

1 西藏热泉活动的时空分布

因印度-欧亚板块的相向移动和碰撞, 使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及碰撞后伸展引起的一系列横切 W-E 向印度-雅鲁藏布缝合带和班公湖缝合带的近 N-S 向正断层系统。其中, N-S 向正断层系统在高原腹地主要体现为 N-S 向裂谷和地堑盆地(侯增谦等, 2004; 李振清等, 2005)。这些地堑盆地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。高原腹地较大的热水带有: 亚东-谷露热水带、当惹雍错-古错热水带、申扎-

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40672066、40302028)、国土资源部百人计划项目、中国地质科学院矿产资源研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(编号 K0809)和科技部“973”项目(编号 2002CB412606)资助成果。

收稿日期: 2008-12-09; 改回日期: 2009-07-24; 责任编辑: 周健。

作者简介: 赵元艺, 男, 1966 年生。研究员, 从事矿床学与地球化学研究。Email: yuanyizhao2@sina.com。

谢通门热水带和桑日-错那热水带。高原腹地的热泉地表温度的平面分布图显示,热泉主要分布在班公错-怒江缝合带之南,温度大于 60°C 的高温温泉呈片状分布,主要分布于羊八井-当雄、狮泉河-玛旁雍错、搭格架和卡乌古堆等地热田,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)。在这些热水活动地区,部分形成了赋存于硅华中的热泉型铯矿床。

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)根据西藏谷露、搭格架和色米 3 处硅华的 ESR 年龄,给出了硅华形成于 3 个时期:第一期 $690 \pm 11 \sim > 300 \pm 67$ ka,第二期 $300 \pm 67 \sim 20 \pm 5$ ka,第三期 $> 15 \pm 5.4$ ka(还在继续中)。李振清(2002)根据西藏 9 处泉华(包括羊八井-谷露盆地)的 ESR 年龄数据,给出了西藏泉华形成于 4 个时期: $500 \sim 470$ ka、 $400 \sim 350$ ka、 $270 \sim 200$ ka 和 150 ka 以来。而侯增谦等(2001)则根据西藏 7 处泉华(包括谷露盆地)的 ESR 年龄,同样给出了西藏泉华形成于 4 个时期: $500 \sim 470$ ka、 $400 \sim 350$ ka、 $270 \sim 200$ ka 和 100 ka 以来。吴珍汉等(2005)根据谷露盆地中的泉华沉积物的测年资料,给出了该区泉华主要形成于 $482 \sim 375$ ka BP, 231 ka BP, $106 \sim 94$ ka BP, $41.2 \sim 12.2$ ka BP 以及全新世 5 个阶段。然而,这些泉华的分期往往仅是年龄数据的统计结果,因缺乏地质与地貌特征而难以确切地指出各期泉华体的分布与特征。笔者在野外第四纪地质与地貌和岩石学特征研究的基础上,结合 U 系法与前人的 ESR 测年结果,曾将西藏搭格架热泉型铯矿床划分为不同类型与特征的 6 套泉华,分属于如下 5 个成矿阶段: $403 \sim 202$ ka BP, 99 ka BP, $39 \sim 25$ ka BP, $17 \sim 4$ ka BP 与现代(赵元艺等, 2006a, 2006b)。这一成果不仅比前人的更为精细,而且在野外更容易进行识别。

2 谷露热泉区第四纪地质与地貌特征

谷露间歇喷泉位于那曲县谷露乡中部,海拔 $4700 \sim 4750$ m 左右,青藏公路和铁路由泉区东侧 2 km 处通过。雅鲁藏布江源头之一的桑曲在谷露谷地西侧由北向南穿过泉区,地表硅华体主要分布于桑曲西岸的谷底与斜坡上。泉区近桑曲源头,多条支流在此汇聚而形成沼泽与小草丘地,只有局部地段形成规模很小、高度只有 1 m 左右一级阶地,夹于两侧的冰水扇间(图 1)。桑曲在当雄、林周与嘉黎三县的交界处附近汇入热振藏布后再流经林周县,并在墨竹工卡

县汇入雅鲁藏布江的主要支流拉萨河。

近南北向或北北东向延伸的谷露宽谷是上新世至早更新世强烈活动的地堑型裂谷。在裂谷南段或西南段的北侧或西北侧,中更新世早期(其 ESR 年龄在 $700 \sim 500$ ka BP 间)的宁中冰期是念青唐古拉山西段规模最大的冰期,在当雄-羊八井地区形成了巨大的山麓冰川,现今保存为高出谷地或盆地 $200 \sim 300$ m 的巨大的山麓冰碛平台。而中更新世晚期(其 ESR 年龄在 $300 \sim 130$ ka BP 间)的爬然冰期和晚更新世($70 \sim 10$ ka BP 间)的拉曲冰期,则表现为山脉各支谷中已经伸入盆地或刚刚伸出谷口的规模较小和很小的山谷冰川(赵希涛等, 2002)。而位于裂谷北段和念青唐古拉山穿越裂谷的泉区附近,西北侧的主要堆积物为来自西念青唐古拉山北段的加杜峰(山顶海拔高程 6088 m)东侧支谷查弄的后两次冰期的规模很小的侧碛,仅在山麓斜坡上局部保存宁中冰期的冰水砾石层;桑曲以东则为来自谷地以东的念青唐古拉山几条支谷——董新、桑思和胆布的后两次冰期冰水堆积,其外形和特征与洪积物非常相似;而泉区北侧则为桑曲源头及各支流汇聚而形成的沼泽与小草丘地(图 1)。

谷露谷地东、西两侧的念青唐古拉山,出露的前第四纪地层主要为晚侏罗世的拉贡塘组砂板岩,仅在西侧出露有新近纪的花岗岩,其形成时代约为 11 Ma(和钟铎等, 2007)。仍在活动的北东向九子拉-当雄断裂由泉区穿过。

沿念青唐古拉山前大断裂出露一系列热水活动点,谷露间歇泉是其东北端活动较强的一个,发育的热水活动有间歇喷泉、沸泉、温泉、地热蒸汽等。泉区主要由南、北两个泉华台地组成(图 2;图版 I-A, B)。位于北区现今正在活动的间歇喷泉是一个大的泉华丘,由几列高出地面 $5 \sim 10$ m 的泉华锥组成(图版 I-D),但其规模与高度远不如其南侧已大部死亡的泉华丘,后者高出紧邻的桑曲 $15 \sim 50$ m(图版 I-B)。泉区出露的主要为硅华,部分硅华中铯含量达到工业品位的要求,为热泉型铯矿床;在桑曲河的东岸见有矿物成分为天然碱等的盐华(图版 I-F)。从谷露采集的 29 件硅华样品中,铯的含量变化范围为 $33.7 \sim 2286 \mu\text{g/g}$,其中有 15 件样品的铯含量超过工业品位(500×10^{-6})的要求。据估算谷露的铯资源量为 969.02 t,达到中型铯矿的规模要求。热田的沸泉最高温度达 85°C , $\text{pH} = 8.5 \sim 9$,最大流量为 0.4 L/s(郑绵平等, 1995)。热田内的间歇喷泉、沸泉等主要热泉口均产于北东向裂隙带中(图版 I-E)。

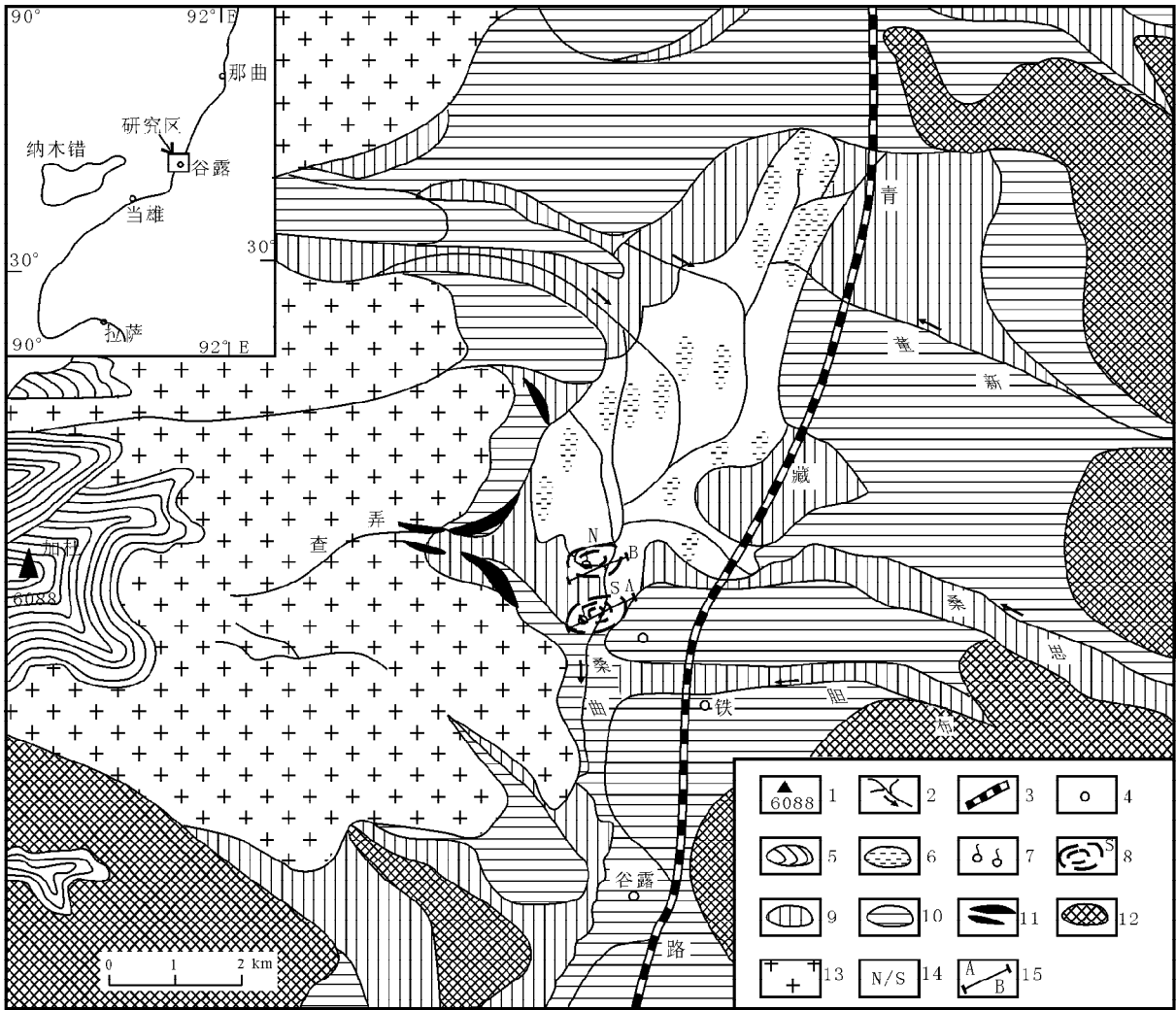


图 1 谷露热泉型铯矿床地质图

Fig. 1 Sketch geological map of geothermal field occurring within the Gulu district

1—山峰及其高程;2—河流;3—铁路;4—居民点;5—现代冰川;6—沼泽地;7—温泉;8—泉华分布范围;9—末次冰期(拉曲冰期)冰水沉积;10—倒数第二次冰期(爬然冰期)冰水沉积;11—拉曲与爬然冰期冰碛;12—晚侏罗世的拉贡塘组砂板岩;13—新近纪花岗岩;14—泉华分布范围编号(N—北部,S—南部);15—剖面线(B—北部,A—南部)

1—Mountain peak and its elevation; 2—rive; 3—railway; 4—residential area; 5—existing glacier; 6—marshland; 7—hot spring; 8—sinter hill distribution scope; 9—glaciofluvial deposit of the Last Glaciation period (Laqu glacial period); 10—glaciofluvial deposit of penultimate glacial period (Paran glacial period); 11—moraine of Laqu and Paran glacial period; 12—sandslate of Lagongtang Formation in Late Jurassic; 13—Neogene granite; 14—No. of sinter hill distribution (N—north part; S—south part); 15—section line (B—north part, A—south part)

3 泉华的特征、年龄测定及矿床的形成阶段

3.1 泉华的特征与样品

具有不同颜色与特征的硅华主要分布于桑曲西岸的南北两区(图 1),两区相隔 300~400 m。根据其野外分布的地貌部位和特征,可将其划分为如下 5 套。

第一套硅华(图 2 中 I),分布于南区最大的泉

华台地之下,主要由泉华胶结的砾石层即泉胶砾岩所组成(图版 I-C)。砾石粒径多在 0.5~5 cm 间,磨圆度中等,显然来自桑曲或其支沟的河流或冰水堆积物。在台地东南、横穿桑曲的小桥边,该套泉胶砾岩组成拔河 1~2 m 的“阶地”,它穿过桑曲河底(桑曲在此形成急滩),向东与东北方向延伸到河东岸,构成爬然冰期与拉曲冰期冰水扇的基底。

第二套硅华(图 2 中 II),构成南区最大的泉华台地,分布在桑曲谷底及其西侧的斜坡上,大部直接

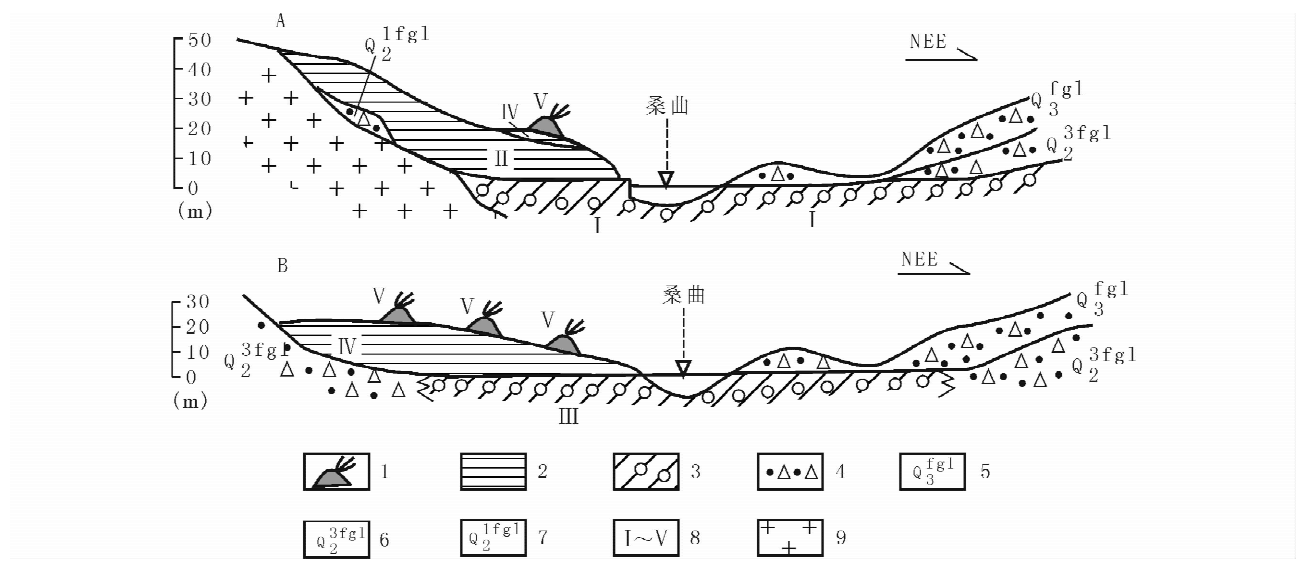


图 2 谷露热田地质剖面图(剖面在地表的位置见图 1)

Fig. 2 Geological sections of Gulu geothermal field(the location of sections shows in Fig. 1)

1—硅华锥;2—硅华台地;3—泉胶砾岩;4—冰水沉积;5—拉曲冰期冰水沉积;6—爬然冰期冰水沉积;7—宁中冰期冰水沉积;8—I~V套泉华编号;9—新近纪花岗岩

1—Geyserite pyramid; 2—geyserite platform; 3—conglomerate cemented by sinter; 4—glaciofluvial deposit; 5—glaciofluvial deposit of Laqu glacial period; 6—glaciofluvial deposit of Paran glacial period; 7—glaciofluvial deposit of Ningzhong glacial period; 8—numbers of the 5 suites sinter; 9—Neogene granite

与基岩接触,仅西缘覆盖于宁中冰期的冰水砾石层之上。该台地呈东西向延伸,长约 150~200 m,宽约 100~150 m,前缘高出桑曲 15~20 m,后缘高出桑曲约 50 m,除台地北部有 6~7 个现今仍有微小水热活动、直径仅 1 m 左右的小泉华锥外,目前没有活动的喷泉。硅华外表为灰色。主要矿物有玉髓:含量为 35%±,隐晶质,无色透明,呈纤维状集合体,部分呈纤维球状集合体;方石英:含量为 50%~60%左右,隐晶质,无色透明,无一定形态边界,见有全消光蛋白石过渡而来的特征;蛋白石:含量为 8%左右,均质性。另有约 5%的陆源碎屑物,其大小不等,分布不均匀,多集中在一起,呈断续条带状分布于蛋白石中。为隐晶质结构、致密块状构造及多孔状构造(空洞占据的空间约 2%~3%)。

第三套硅华(图 2 中Ⅲ),分布于北区的泉华台地之下,主要由泉华胶结的砾石层即泉胶砾岩所组成。砾石粒径多在 0.5~5 cm 间,磨圆度中等,显然也来自桑曲或其支沟的河流或冰水堆积物。该套泉胶砾岩既组成拔河 1 m 左右的阶地,也穿过桑曲河底(也形成急滩),向东与东北方向延伸到河东岸,并构成拉曲冰期冰水扇的基底。

第四套硅华(图 2 中Ⅳ),主要为由多列泉华锥组成的北区的泉华台地,又被一条东西走向的小沟

分隔为南、北两部分。南区大泉华台地北部的几个小泉华锥应与这套硅华同期形成。该套泉华的矿物成分为蛋白石,根据颜色将蛋白石分为灰黄色与无色两种。在灰黄色蛋白石中,含有较多的硅藻生物,而无色的蛋白石,则干净透明,没有生物出现。在这套硅华中含有大量的陆源碎屑物,主要成分为石英、长石及少量的白云母,主要分布于蛋白石中或角砾状蛋白石之间。呈角砾状与多孔状构造(孔洞占据的空间约 10%~15%),非晶质与硅藻生物结构。

第五套硅华(图 2 中Ⅴ)属于现代温泉沉积物,为现今仍在活动的泉水沉积物,其外表呈浅褐色。蛋白石呈胶状、似流纹状。含有硅藻生物化石(约占 20%)。同时,硅华中含有少量的陆源碎屑物(含量约 1%),主要成分为石英、碳酸盐及少量的白云母。呈多孔状构造(孔洞占据的空间约 10%~12%),非晶质与硅藻生物结构。

在仔细研究上述各套泉华的分布与特征的基础上,除第一套泉华尚未取得分析结果外,其他 4 套泉华共采集了 9 件代表性样品进行 U 系法年龄测定(表 1)。

3.2 U 系法测年及结果

泉华特别是硅华的测年技术是比较复杂的,对所测得的数据需要根据相关情况进行一定的校正方

表 1 谷露地区泉华的 U 系法测年结果

Table 1 U-series data of sinter samples from the Gulu area

样品 编号	U($\times 10^{-6}$)	Th($\times 10^{-6}$)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	校正同位素比值 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U};$ $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	年龄(ka)	资料来源
K-20-17	1.418	1.068					$17.2\pm 5.2^*$	陈以健等,1992
K-20-21	0.2	1.832					$17.2\pm 5.2^*$	陈以健等,1992
K-20-18	1.362	9.215					$22.1\pm 6.6^*$	陈以健等,1992
GL-5	2.680 ± 0.091	0.383 ± 0.012	1.039 ± 0.020	4.143 ± 0.136	0.182 ± 0.004		22.8 ± 1.2	本文
GL-1(1)	0.120 ± 0.014	0.043 ± 0.003	1.314 ± 0.093	2.583 ± 0.224	0.212 ± 0.019		25.4 ± 2.6	本文
GL-1(2)	0.044 ± 0.004	0.016 ± 0.001	1.441 ± 0.108	23.118 ± 2.359	0.237 ± 0.020		29.0 ± 2.8	本文
GL-10 a	0.172 ± 0.009	0.325 ± 0.017	1.110 ± 0.068	1.135 ± 0.077	0.642 ± 0.040	$1.067\pm 0.038;$ 0.297 ± 0.024	38.6 ± 3.1	本文
GL-10 b	0.982 ± 0.046	2.139 ± 0.098	1.090 ± 0.063	0.987 ± 0.060	0.655 ± 0.039			
GL-10 c	0.512 ± 0.025	1.387 ± 0.059	1.134 ± 0.068	0.958 ± 0.055	0.760 ± 0.045			
K-20-16	2.934	5.935					$41.6\pm 12.5^*$	陈以健等,1992
GL-6 a	0.054 ± 0.007	0.028 ± 0.003	1.208 ± 0.010	2.713 ± 0.245	0.379 ± 0.033	$1.241\pm 0.037;$ 0.372 ± 0.016	49.6 ± 3.1	本文
GL-6 b	0.139 ± 0.007	0.265 ± 0.011	1.192 ± 0.072	0.677 ± 0.042	0.359 ± 0.022			
GL-6 c	0.141 ± 0.018	0.209 ± 0.013	1.061 ± 0.085	0.953 ± 0.087	0.441 ± 0.028			
K-20-19	0.481	12.298					$94.1\pm 28.2^*$	陈以健等,1992
K-20-15	1.646	2.213					$103.4\pm 31^*$	陈以健等,1992
5	0.94	1.48					$106\pm 21^*$	侯增谦等,2001
GL-7 a	0.031 ± 0.004	0.076 ± 0.006	1.183 ± 0.200	1.294 ± 0.140	0.884 ± 0.101	$1.236\pm 0.063;$ 0.651 ± 0.061	108.6 ± 17.8	本文
GL-7 b	0.055 ± 0.005	0.194 ± 0.013	1.141 ± 0.129	0.926 ± 0.085	0.950 ± 0.097			
GL-7 c	0.043 ± 0.007	0.272 ± 0.012	1.099 ± 0.119	0.684 ± 0.046	1.297 ± 0.122			
GL-2 a	0.151 ± 0.013	0.672 ± 0.047	1.271 ± 0.096	0.764 ± 0.053	0.892 ± 0.057	$1.227\pm 0.059;$ 0.910 ± 0.037	218.7 ± 28.9 /23.7	本文
GL-2 b	0.123 ± 0.008	0.567 ± 0.029	1.248 ± 0.109	0.730 ± 0.055	0.895 ± 0.074			
GL-2 c	0.074 ± 0.007	0.357 ± 0.021	1.267 ± 0.102	0.698 ± 0.060	0.890 ± 0.063			
K-20-13	0.296	0.583					$231.1\pm 69.3^*$ 248.0 ± 88.5 /48.7	陈以健等,1992
GL-28	0.138 ± 0.011	0.043 ± 0.004	1.037 ± 0.104	9.232 ± 0.874	0.909 ± 0.64		>350	本文
GL-29	0.157 ± 0.009	0.157 ± 0.009	1.067 ± 0.068	3.483 ± 0.020	1.082 ± 0.057			本文
K-20-20	0.908	2.324					$375.2\pm 112.5^*$	陈以健等,1992
K-20-14	0.2	1.211					$482.7\pm 144.8^*$	陈以健等,1992

注:样品编号中有(1)、(2)者表示同一样品的重复分析;样品编号后加有 a、b、c 者为同一样品的等时线法测年结果。GL-1(1)、GL-1(2)、GL-5、GL-28 和 GL-29 样品的年龄是假定其在久期平衡时 Th/U=3.8 进行校正获得的。年龄右上角标*者为 ESR 年龄;其余均为 U 系法年龄。

能得到与地质事实相符合的年龄数据(Hillaire-Marcel et al. , 1986; Casanova & Hillaire-Marcel, 1992; Szabo et al. , 1996; Ku et al. , 1998; Shen et al. , 2004)。对泉华样品(包括硅华与钙华)的 U 系法测年的依据及方法见有关文献(马志邦等, 2002; Ma Zhibang et al. , 2004; 赵元艺等, 2006a, 2006b), 有关样品的 U 系法测年结果与其他作者的有关年龄数据如表 1 所示。

由表 1 可以看出,对于同一样品进行两次 U 系法测年结果较为吻合,例如,样号 GL-1(1)和 GL-1(2),测定结果分别为 25.4 ± 2.6 ka 和 29.0 ± 2.8 ka;而样号 NZ-6(1)和 NZ-6(2),测定结果分别为

67.5 ± 5.9 ka 和 61.7 ± 3.8 ka, 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。

另外,从野外产状与测年结果(表 1)看,对泉华样品所测 U 系法年龄大小绝大多数与野外同一套泉华中的上下层位关系基本一致。仅有样品 GL-1 与 GL-2 的测年结果与野外划分的上下关系相矛盾。在野外, GL-1 位于 GL-2 的底部,从沉积顺序看, GL-1 应形成于 GL-2 之前, GL-1 年龄应比 GL-2 老。但是, GL-1 的测年结果为 25.4 ± 2.6 ka 或 29.0 ± 2.8 ka, 而 GL-2 的为 $218.7\pm 28.9/23.7$ ka, 二者正好上下颠倒。这可能是由于 GL-1 形成后受后期的热水活动影响而变得年轻所致,这一点可以

从铯含量较高得到证实。

3.3 矿床的形成阶段

热泉特别是喷泉的泉水,与河水不但在温度与成分上不同,其流动与堆积机理也明显不同。河流的沉积作用只能在河床与河漫滩上进行,一旦河流下切,原先的河床与河漫滩沉积便被相对抬高,后来的河流沉积再也不能堆积于其上,于是便成为河流阶地。这种堆积与切割过程多次轮回所造成的多级河流阶地,具有阶地愈高年龄愈老的规律。而热泉和喷泉则不同,它可以在河谷中下部的不同地貌部位上同时出现,既可以在河床上,也可以在不同高度的河流阶地上,还可以在基岩斜坡或其他成因的沉积物上。例如笔者研究过的搭格架地区,现代喷泉、热泉和喷气孔,既可出现在长马曲河边,长马曲的 5 级河流阶地上,也可出现在打加峰东南麓、小沟长马奴北的冈底斯冰期的冰碛物之上,且具有穿时的特点(赵元艺等, 2006a;2006b)。因此,我们在讨论谷露热泉华的时代、分期与演化时,既要遵循河流沉积的堆积规律,又要考虑热泉华沉积自身的特点来加以具体的分析。

根据野外观察与 U 系法测年结果(表 2,图 2),谷露地区硅华的形成可分为 5 个阶段:第一阶段为形成南部区硅华台地下伏的第一套硅华——水下泉胶砾岩形成时期,目前尚未获得我们自己的年龄数据。第二阶段为形成南部区的第二套硅华台地的堆积时期,其两件样品(GL-29 号和 GL-28 号样品)的 U 系年龄分别为 >350 ka 和 $248.0 \pm 88.5/48.7$ ka。第三阶段为形成北部区的第三套硅华体的水下泉胶砾岩台地,其 U 系样品(GL-2 号样品)的年龄测定结果为 $218.7 \pm 28.9/23.7$ ka。第四阶段为形成北部区的南、北两个硅华台地的数列突出于水下泉胶砾岩台地之上的一个个硅华锥,也包括南部区的六七个小硅华锥。我们测定了同一硅华锥不同部位和不同硅华锥的 U 系年龄,所获年龄分别为 108.6 ± 17.8 ka (GL-7 号样品), 49.6 ± 3.1 ka (GL-6 号样品)和 22.8 ± 1.2 ka (GL-5 号样品),以及 38.6 ± 3.1 ka (GL-10 号样品)。第五阶段为现代泉华形成时期,其活动以北部区为主。

据此,谷露地区硅华的形成同样可划分为 5 个阶段:第一阶段时间虽然不明,但根据层位关系可判断其为倒数第三次冰期即宁中冰期以后,很可能为 $0.5 \sim 0.4$ Ma BP 之间的大间冰期早中期;第二阶段为 $0.38 \sim 0.25$ Ma BP,相当于大间冰期晚期至爬然冰期早期;第三阶段为 0.22 Ma BP 前后的爬然冰期中期;第四阶段为 $108.6 \sim 17.2$ ka BP 的晚更新

世(末次间冰期与拉曲冰期);第五阶段为 5.3 ka BP 的全新世中期以来。

表 2 西藏谷露与搭格架热泉沉积年代(ka BP)对比
Table 2 Correlation of ages (ka BP) between Gulu and Targejia hot spring cesium deposits

成矿阶段	搭格架	谷露
1	403~202	500~400
2	99.1	380~250
3	39~25	220
4	17~4	108.6~17.2
5	现代	5.3 至今

表 3 谷露第二至五阶段 SiO₂ 与 Cs 含量统计表
Table 3 Contents of SiO₂ and Cs from stage 2 to stage 5 in Gulu deposits

样品编号	形成阶段 (样品数)	SiO ₂ (%)		Cs($\times 10^{-6}$)	
		含量	阶段平均	含量	阶段平均
GL-25	第二阶段 (5)	96.53	92.67	33.7	277.2
GL-26		93.48		65.5	
GL-27		91.79		257	
GL-28		90.21		800	
GL-29		92.23		230	
GL-1	第三阶段 (4)	92.39	91.42	476	440.3
GL-2		91.47		417	
GL-3		89.99		476	
GL-4		91.83		392	
GL-5	第四阶段 (13)	89.23	88.53	439	497.6
GL-6		92.44		157	
GL-7		93.01		135	
GL-8		72.11		240	
GL-9		82.53		164	
GL-10		87.34		1027	
GL-12		90.12		534	
GL-13		89.75		749	
GL-14		91.05		626	
GL-15		92.88		373	
GL-16		92.28		500	
GL-17		89.66		684	
GL-18		88.50		841	
GL-11	第五阶段 (7)	88.30	87.91	580	1085.4
GL-19		89.22		1141	
GL-20		88.64		936	
GL-21		88.49		1024	
GL-22		88.17		1063	
GL-23		90.63		568	
GL-24		81.89		2286	

注:样品分析由核工业地质研究院完成,测定方法与依据为 GB/T14506.28-93 硅酸盐岩石化学分析方法 X 射线荧光光谱法,测试仪器为飞利浦 PW2404X 射线荧光光谱仪。

4 谷露热泉活动的地质意义

4.1 青藏高原的隆升对热泉型铯矿床的制约

在青藏高原,热泉型铯矿床受 N—S 裂谷控制

(侯增谦等,2001;李振清等,2005),例如谷露铯矿床位于亚东-谷露南北向裂谷,而搭格架铯矿床位于搭架错-搭架芒错南北向裂谷。该裂谷系统是高原受南北向印度板块与欧亚板块的挤压所导致的東西向拉张所致。从热泉活动的强度与年代看,热水活动具有南(指班公湖—怒江以南)强北(指班公湖—怒江以北)弱,南晚北早的特点(郑绵平等,1995;侯增谦等,2001)。目前已获得的硅华最老的年龄为500 ka(侯增谦等,2001),而青藏高原的初始隆升的年龄(Harrison et al., 1995; Blisniuk et al., 2001; 吴珍汉等,2007)远早于谷露热泉的初始活动时代(500 ka),因此与高原的隆升相比,热泉活动显得非常的年轻,并且热泉活动主要受断层和深部过程控制(吴珍汉等,2005;郑绵平等,2007),似乎难以将二者联系起来。对此,笔者推测有3种可能,第一,高原隆升初期由于所受应力较小,地壳的热膨胀程度较低,地表水下渗能到达的部位没有发生岩浆熔融或岩浆熔融的程度不足以使铯、锂等稀散碱金属元素得以足够富集(郑绵平等,1983,2007),当然也就没有热泉型铯矿床的形成,导致此类矿床仅形成于陆陆碰撞的晚期,即热泉型铯矿床形成于第四幕(郑绵平等,1995)。第二,高原隆升到一定阶段后就有热泉型铯矿床的形成,由于后来高原的差异性隆升使这种矿床被剥蚀掉,导致现今无法发现更古老的热泉型铯矿床。第三,目前尚未发现更古老的热泉型铯矿床,以后有可能发现。总之,如果对一个具体的热泉型铯矿床来说,其形成受构造与深部岩浆活动的控制,但从宏观角度看,构造与深部岩浆活动为高原隆升所致。因此,从源头上来说,西藏的热泉型铯矿床的形成受控于高原的隆升过程,西藏的地热活动与高原的隆升有因果关系(佟伟等,1981)。

4.2 谷露热水活动与区域热泉活动的对比

在综合谷露等西藏热泉华热水活动基础上,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 ± 0.05 Ma和0.1 Ma以来)较大规模的快速隆升,该认识并得到青藏高原相关地区沉积的响应。可以看出,谷露泉华的测年结果第一阶段最老为0.5 Ma BP,相当于大间冰期早中期,与侯增谦等(2001)确定的0.5 Ma是一致的;第二阶段($0.38 \sim 0.25$ Ma BP)即相当于大间冰期晚期至爬然冰期早期的热泉活动与侯增谦等确定的第一次较大规模的快速隆升的时期0.37 Ma基本一致。而第四阶段($106.8 \sim 17.2$ ka BP)的晚更新世与第五阶段(自5.3 ka BP的全新世中期以来)的热水活动

与侯增谦等确定的第二次较大规模的快速隆升的时期0.1 Ma基本一致。因此,谷露热泉活动的年代学研究结果进一步支持了这两个隆升阶段的划分。据此,可以得出结论:谷露铯矿的形成是高原挤压隆升的结果,反过来也说明了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。

4.3 谷露硅华与搭格架硅华形成时代的对比

根据笔者等的研究结果(赵元艺等,2006a, 2006b),搭格架地区的硅华构成了打加芒错出口处长马曲的不同阶地,因而可划分为不同的形成阶段。根据我们所采集的不同阶段的泉华样品的矿物岩石学研究和U系法年龄测定结果,泉华在野外可划分为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,构成第五级阶地(T5);第Ⅲ套,砖红色,构成T4;第Ⅳ套,灰白色,构成T3;第Ⅴ套,灰绿色,构成T2下部;第Ⅵ套,灰绿、灰黄色,构成T2上部。根据U系法年龄测定并参考前人的ESR测年结果,上述泉华可分为5个形成阶段:第一阶段为 $255.1 \pm 63.0 / -41.5 \sim 201.9 \pm 36.0$ ka BP,形成了第Ⅱ套泉华;第二阶段为 99.1 ± 12.3 ka BP左右,形成了第Ⅲ套泉华的早期部分;第三阶段为 $39.4 \pm 1.9 \sim 25.0 \pm 3.9$ ka BP,形成了第Ⅳ套泉华;第四阶段为 $14.8 \pm 2.5 \sim 4.4 \pm 3.4$ ka BP,形成了第Ⅴ套泉华;第五阶段即现代,正形成第Ⅵ套泉华。在第三阶段硅华活动早期,还有一次钙华活动。

因此,与搭格架相比,谷露铯矿床的成矿作用开始要早,持续时间也长;总体看来,尽管搭格架与谷露二者之间的成矿地质背景不同,但二者之间有着基本一致的演化历史。

4.4 谷露不同成矿阶段Cs含量的演化特征

由 SiO_2 与铯在第二至五阶段硅华中的含量变化统计结果(表3)可知,硅华的 SiO_2 与铯含量在4个阶段有较大的差异,由早到晚,4个阶段的 SiO_2 的含量分别为92.67%、91.42%、88.53%和87.91%;与此相对应,铯含量分别为 277.2×10^{-6} 、 440.3×10^{-6} 、 497.6×10^{-6} 和 1085.4×10^{-6} 。可以看出,随着时间由早到晚的变化, SiO_2 呈现出明显的降低趋势,而铯含量则呈升高趋势。其中第二至第四阶段的铯平均含量已经低于铯的工业标准(500×10^{-6}),显示出可能已由矿变为“非矿”。这是由于硅华为非晶质水合二氧化硅即蛋白石,铯在其中以 OCs^- 的形式代替其中的 OH^- ,但随着时间的推移,蛋白石

晶格从无序(opal-A)向有序(opal-CT)转变过程中, SiO₂ 矿物晶格的有序度相应提高,即所谓的“陈化”和结晶作用(佟伟等,1981;郑绵平等,1995),使杂质成分包括 Cs 被从 SiO₂ 的晶格中剔除所致(周永章等,2006;赵元艺等,2008)。这样将导致在早期的硅华中铯的含量相对较低,而 SiO₂ 的含量相对较高。

5 结论

(1)根据硅华在野外的分布特征,可将其分为 5 套。由泉胶砾岩组成的第 I 套硅华下伏于南区大硅华台地之下,并越过桑曲延伸至河东,构成爬然冰期与拉曲冰期冰水沉积的基座。第 II 套硅华组成南区的大硅华台地。也由泉胶砾岩组成的第 III 套硅华下伏于北区硅华台地之下,也越过桑曲延伸至河东,构成拉曲冰期冰水沉积的基座。第 IV 套硅华构成北区硅华台地,已被一东西向小沟分为南、北两个小片,均由数列小的硅华锥组成。南区大硅华台地北部的 6~7 个小的硅华锥应与其相当。第 V 套硅华则为现今仍在活动和堆积的硅华锥。

(2)根据 9 个样品的 U 系法测年结果,并参考野外第四纪地质的研究结果,可将这 5 套硅华的铯矿床的形成,划分为如下 5 个阶段:第一阶段堆积于倒数第三次冰期即宁中冰期以后,可能为 500~400 ka BP 之间的大间冰期早中期;第二阶段为 380~250 ka BP,相当于大间冰期晚期至爬然冰期早期;第三阶段为 220 ka BP 前后的爬然冰期早期;第四阶段为 108.6~17.2 ka BP 的晚更新世的末次间冰期晚期至拉曲冰期;第五阶段为 5.3 ka BP 的全新世中期以来。谷露铯矿的形成是高原挤压隆升的结果,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。

(3)随着时间的推移, SiO₂ 含量呈现出明显的降低趋势,而铯含量呈升高趋势。这是由于蛋白石晶格从无序(opal-A)向有序(opal-CT)转变过程中,随着 SiO₂ 矿物晶格的有序度的提高,即所谓的“陈化”和结晶作用,使杂质成分包括 Cs 被从 SiO₂ 的晶格中剔除所致。

致谢:野外样品采集期间得到樊兴涛同志的帮助,年龄测试过程中得到钱作华高工的协助,硅华中 SiO₂ 与 Cs 的测试工作由夏晨光与张彦辉同志完成,特致谢意。

参 考 文 献

陈以健,高钧成,冯锦江,郑绵平,多吉.1992.藏南的热水活动历史初

探.水文地质工程地质,19(5):18~21.

和钟铎,杨德明,王天武.2007.冈底斯带谷露中新世花岗岩地球化学特征及构造环境.吉林大学学报(地球科学版),37(1):31~37.

侯增谦,李振清,曲晓明,高永丰,华力臣,郑绵平,李胜荣,袁万明.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.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.地质学报,(4):482~493.

李振清,侯增谦,聂凤军,孟祥金.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.地质学报,79(1):68~76.

李振清.2002.青藏高原碰撞造山过程中的现代热水活动.中国地质科学院博士学位论文,19~20.

马志邦,赵希涛,朱大岗,吴中海.2002.西藏纳木错湖相沉积的铀系年代学研究.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,过帼颖,刘时彬.1981.西藏地热.北京:科学出版社,1~167.

吴珍汉,胡道功,吴中海,赵希涛,王薇,刘琦胜,叶培盛,周春景,王连捷,彭华,周春景.2005.青藏高原中段活动断层及诱发地质灾害.北京:地质出版社,149~173.

吴珍汉,吴中海,胡道功,叶培盛,周春景.2007.青藏高原渐新世晚期隆升的地质证据.地质学报,81(5):577~587.

吴中海,叶培盛,刘琦胜,吴珍汉,胡道功,赵希涛,周春景.2004.青藏高原中部温泉盆地西缘的晚新生代正断层作用.地震地质,26(4):658~675.

赵希涛,吴中海,朱大岗,胡道功.2002.念青唐古拉山脉西段第四纪冰川作用.第四纪研究,22(5):424~433.

赵元艺,聂凤军,侯增谦,李振清,赵希涛,马志邦.2006a.西藏搭格架热泉型铯矿床地质特征及年代学.矿床地质,25(3):281~291.

赵元艺,赵希涛,马志邦.2006b.西藏搭格架热泉型铯矿床年代学研究.岩石学报,22(3):717~724.

赵元艺,韩景仪,郭立鹤,钱作华,周永章,聂凤军,李振清.2008.西藏搭格架热泉型铯矿床矿物学与矿石组构特征及地质意义,岩石学报,24(3):519~530.

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,1~110.

郑绵平,刘喜方,赵文.2007.青藏高原盐湖的构造地球化学和生物学研究.地质学报,81(12):1698~1708.

郑绵平,刘文高,向军,蒋忠惕.1983.论西藏的盐湖.地质学报,(2):184~194.

周永章,付伟,杨志军,聂凤军,何俊国,赵元艺,李振清,胡朋,石贵永,李文.2006.雅鲁藏布江缝合带及藏南地区硅质岩微组构特征及其地质意义.岩石学报,22(3):742~750.

Blisniuk M P, Hacker R B, Glodny J, Ratschbacher L, Bi Siwen, Wu Zhenhan, McWilliams O M, Calvert A. 2001. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Ma ago. Nature, 412: 628~632.

Casanova J, Hillaire-Marcel C. 1992. Chronology and paleohydrology of late Quaternary high lake levels in the Manyara basin (Tanzania) from isotopic data (¹⁸O, ¹³C, ¹⁴C, Th/U) on fossil stromatolites. Quaternary Research, 38: 205~226.

Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, Lovera O M. 1995. Activation of the Nyainqentanghla shear zone: implications for uplift of the southern Tibetan Plateau. *Tectonics*, 14(3): 658~676.

Hillaire-Marcel C, Corro O, Casanova J. 1986. ¹⁴C and Th/U dating of Pleistocene and Holocene stromatolites from East Africa paleolakes. *Quaternary Research*, 25: 312~329.

Ku T L, Luo S D, Lowenstein T K, et al. 1998. U-series chronology of lacustrine deposits in Death Valley, California. *Quaternary Research*, 50: 261~275.

Ma Zhibang, Wang Zhenhai, Liu Jiaqi, Yuan Baoyin, Xiao Jule,

Zhang Guoping. 2004. U-series chronology of sediments associated Late Quaternary fluctuations, Balikun Lake, northwestern China. *Quaternary International*, 121(1): 89~98.

Shen G J, Gao X, Zhao J X, et al. 2004. U-series dating of Locality 15 at Zhoukoudian, China, and implications for hominid evolution. *Quaternary Research*, 62: 208~213.

Szabo B J, Bush C A, Benson L V. 1996. Uranium-series dating of carbonate (tufa) deposits associated with Quaternary fluctuations of Pyramid Lake, Nevada. *Quaternary Research*, 45: 271~281.

**Chronology of the Gulu Hot Spring Cesium Deposit
in Nagqu, Tibet and It Geological Significance**

ZHAO Yuanyi¹⁾, ZHAO Xitao²⁾, MA Zhibang²⁾, DENG Jian¹⁾

1) *Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing*, 100037;

2) *Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing*, 100029

Abstract

Gulu hot spring is located on the west bank of Sangqu river, Gulu town, Nagqu county of Tibet . The elevation is about 4700~4750 m a. s. l. . It is still intensely activating. Consisted mainly by geyserite, the sinter formed a medium scale hot spring type Cs-deposit. It is the result of collision of Indian and Eurasian plates. On the basis of investigating the characteristics of the geology and geomorphology, this paper divided the sinter into, south and north areas, 5 suites. Suite 1 is located in the south area and under the big geyserite platform. It cut across the Sangqu river and reaches its east bank and formes the fluvioglacial platform of the Penultimate Glacial Period (Paran Glacial Period). Suite 2 consists of the big geyserite platform of the south area. Consists of conglomerate cemented by sinter, Suite 3 located under geyserite platform of the north area and cut across the Sangqu river and reaches the east bank too. Which Consists of the fluvioglacial platform of the Last Glaciation (Laqu Glacial Period) of the late Late Pleistocene. Suite 4 Consists of the geyserite platform of the north area and is divided into, south and north, two small parts separated by a small ditch. Everyone of the two parts consisted by several geyserite pyramids. Suite 5 consists of the geyserite pyramids that modern activating. According to nine U-series dates from Gulu geyserite and the characteristics of the geology and geomorphology, this paper divided Gulu Cs-deposit into five stages. Stage 1, although We have not get the dates temporarily, according to the position of geomorphology and stratigraphic sequence, which can be inferred that it is deposit after Ningzhong glacial period, maybe the early-middle stage of the largest International period (about 0.5~0.4 Ma). Stage 2 is 0.38~0.25 Ma BP. It is correspond from the late stage of the largest International period to the early stage of Paran glacial period. Stage 3 is about 0.22 Ma BP which is the early stage of Paran glacial period. Stage 4 is 108.6~17.2 ka BP that is formed from late stage of the Last Glaciation to the Laqu glacial period. Stage 5 is from 5.3 ka BP, to the present. From early to late stage, the content of SiO₂ gradually falls, while contents of Cs rise. The reason is that impurity components are not expelled from crystals with the falling degree of SiO₂ ordering.

Key words: hot spring type Cs-deposits; U-series dating; geyserite; Gulu; Tibet



A. 正在活动的喷泉。

B. 南部区已经休眠的硅华台地。

C. 桑曲河及南部区泉胶砾岩。

D. 北部区正在活动的喷泉。

E. 北部区正在活动的喷泉。

F. 桑曲河流东岸的盐华(白色部分,矿物成分为天然碱等)。