

西藏南部羊应乡后碰撞火山岩⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄及其地质意义^{*}

周 肃^{1,2} 莫宣学¹ 赵志丹¹ 邱瑞照³ 张双全¹ 郭铁鹰⁴

1. 中国地质大学“岩石圈构造、深部过程及探测技术”教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学地学实验中心, 北京 100083;
3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 4. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074

摘要 通过西藏羊应乡地热田 4 个高钾火山岩样品进行的快中子⁴⁰Ar/³⁹Ar 阶段升温定年结果, 并结合其岩石地球化学研究数据, 确定该地热田后碰撞火山作用发生在(10.73±0.09)~(11.40±0.11)Ma 之间, 形成与加厚下地壳, 构造环境与岩石圈地幔减薄有关. 通过对青藏高原南部冈底斯地区新近纪火山岩同位素年龄的展布的进一步分析, 认为后碰撞高钾火山岩在该区广泛存在, 并有由西向东逐渐年轻趋势.

关键词 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年 后碰撞火山岩 羊应乡地区 西藏南部

后碰撞作用是板块构造学说中整个造山旋回的一个阶段, 火山作用是后碰撞过程中的一个重要地质构造事件^[1], 对板块构造活动过程完整性以及火山岩与板块构造的联系有着非常重要的意义^[2]. 青藏高原是现代后碰撞作用的例证, 后碰撞火山岩从 50 Ma 延续至今, 其分布范围和活动时代的迁移以及火山岩的某些特征可能提供印度-亚洲造山带岩石圈深部热状态和成分结构演化以及碰撞后板内变形和高原隆升等重要信息. 因此, 对青藏高原后碰撞火山作用的研究已成为国际地学界关注的热点科学问题之一^[3~7].

青藏高原后碰撞火山岩主要集中在北部羌塘、昆仑和可可西里地区, 中外地质学家对其进行了长时间深入研究, 提出了几种不同的后碰撞高钾火山岩的成因机制, 并建立了青藏高原岩石圈演化模型. 主要包括: (1) 印度大陆岩石圈往北和塔里木板块短距离的向南消减, 大断裂和雅鲁藏布、班公

湖、金沙江、昆仑缝合带重新活动, 使地壳受到东西向和北西西向的伸展和拉张变形, 来自“壳-幔混合层”部分熔融从而诱发火山活动^[3,4,8], 该模式要求不同年龄火山岩带与断裂的活动时代相似; (2) 由于加厚岩石圈重力不稳导致大部分地幔岩石圈对流减薄或拆离, 使陆下岩石圈富集地幔源的低度部分熔融^[5,6,9,10]. 钾质、超钾质岩石最早出现的 13 Ma 被作为指示岩石圈地幔减薄, 青藏高原在伸展机制下海拔开始增高的时间^[10]. 在这种模式下, 火山活动的时间应该与伸展作用同时或略早.

西藏南部冈底斯带后碰撞火山岩出露范围不大, 其规模远小于同带的古近纪钙碱性火山岩(林子宗火山岩), 因此, 过去研究得不多, 资料比较零星. Coulon 等^[11]在冈底斯中段麻江地区(Maquiang)发现了流纹英安岩单矿物⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄为 10.1~15.8 Ma; Arnund 等^[4]报道了冈底斯西段狮泉河中-酸性火山岩的 K-Ar 年龄为 16~20 Ma;

2004-01-29 收稿, 2004-05-21 收修改稿

* 中国地质大学“岩石圈构造、深部过程及探测技术”教育部重点实验室开放课题(编写: 2003009)、国家重点基础研究发展规划(2002CB412600, G1998040800)、国家自然科学基金(批准号: 40103003)、国土资源部重点基金项目(9501101-3)、国土资源部青藏专项计划(200101020401)、中国地质调查项目(200113900069-5)和国家自然科学基金重大项目(批准号: 402340481)资助

最近几年这方面工作得到了加强, 取得了不少新进展. 马润则等^[12]在西部扎布耶茶卡得到钾质-超钾质火山岩的 K-Ar 年龄为 $(15.8 \pm 0.3) \sim (15.9 \pm 0.3)$ Ma; Ding 等^[13]在冈底斯带中部文部、查孜地区获得约 23, 13 和 8 Ma 的钾质、超钾质火山岩的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄. Speicer 等^[14]在中部南木林测得英安岩 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 为 $(14.03 \pm 0.37) \sim (15.25 \pm 0.40)$ Ma; Miller 等^[7]通过对青藏高原南部后碰撞火山岩的研究, 发现该区后碰撞超钾质和钾质火山岩 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄在 18 ~ 25 Ma, 高钾钙碱性火山岩在 16 ~ 17 Ma, 提出俯冲板片拆离作用为其可能的成因模型. 即随着消减的大洋板片的破裂, 热软流圈上涌, 与上覆板块的地幔岩石圈接触, 其引起的热扰动导致洋壳俯冲(可能含有古老沉积物)和更早的事件过程中已交代且含水的地幔岩石圈内的熔融, 该模式认为这种拆离可能在约 25 Ma 以前开始. 这一模型得到一些新的研究成果支持^[15, 16]. 这些研究显示出西藏南部冈底斯带火山岩的活动时代不仅与高原北部羌塘、昆仑和可可西里地区不同, 而且在该带不同区段也存在差异, 青藏高原后碰撞火山岩的形成可能是一个相当复杂的过程, 其岩石圈可能存在更复杂的演化动力学机制.

出露于西藏南部冈底斯中段羊应乡地热田的火山岩可能属于后碰撞岩浆岩, 但对其形成时代的认识还存在重大差异. 拉萨幅区域地质调查报告(1: 100 万)^[17]和西藏区域地质志^[18]将其归入林子宗火山岩, 时代归属为晚白垩世晚期-始新世. 李家振等^[19]获得的火山岩 K-Ar 年龄为 9.05 ~ 11.53 Ma; 张双全^[1]根据区域火山岩特征将其从林子宗火山岩中分出, 归入冈底斯岩浆带中段北支后碰撞岩浆岩. 为更多地了解青藏高原南部后碰撞火山岩的时空框架, 本文对羊应乡火山岩进行了快中子 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段升温定年分析, 结合其地球化学数据及区域火山岩年龄数据, 进一步探讨了其地质意义.

1 区域地质背景与样品岩石学特征

西藏当雄羊应乡地热田位于拉萨市西约 80 km, 中尼公路和罗朗曲西侧, 北面距著名的羊八井热田

约 55 km. 羊应乡热田位于近 NE 向地堑式羊八井断陷盆地的最南端^[20]. 周边地区出露的地层主要为中、新生界, 地热田内出露的地层以火山岩为主, 西北部夏息果附近及中部地区有少量老第三系出露, 其他则为第四系堆积物. 火山岩以陆相喷发的火山熔岩、潜火山岩及火山碎屑岩为主, 出露面积 $\sim 10 \text{ km}^2$, 呈南北向展布. 区内没有复杂的褶皱构造, 断层比较发育, 火山岩地层主要为一单斜地层, 总体倾向南北, 局部转向东北, 倾向一般为 $30^\circ \sim 40^\circ$, 受断裂影响倾角可达 60° 以上^[21].

沿火山活动规模最大的卜杰木沟和恰拉改沟采集同位素测年样品 4 件(图 1). 其中: Y-1-1 和 Y-2 样品为粗面岩, 少斑状结构, 致密块状构造, 斑晶主要为斜长石和单斜辉石, 粒径多为 0.2 ~ 0.5 mm, 少数可达 1 mm; 基质矿物有黑云母、斜长石、单斜辉石和少量碱性长石, 黑云母有明显暗化. 副矿物以磷灰石为主, 含量较多. Y-3 为石英粗面岩, 岩石呈肉红色, 可见流纹构造; Y-4 为灰白色次火山岩, 多斑石英粗面岩, 斑晶为石英、钾长石和黑云母; Y-3 和 Y-4 样品的斑晶都占 50% 以上, 斑晶为中-酸性斜长石、细粒石英、透长石和少量黑云母, 基质由微斜长石组成, 形成不典型的粗面结构, 大部分斜长石受后期蚀变影响和碱质交代形成假象和碱性长石的亮边. 透长石比较新鲜, 发育有较好的卡式双晶, 但也常见有熔蚀结构. 黑云母多色性明显, 由棕黄-棕褐色, 多数已暗化. 火山岩属钾玄岩系列^[1].

2 实验技术及结果

2.1 实验技术

新鲜岩石样品破碎后, 经重选、磁选和手选分选出透长石、黑云母单矿物. 清洗数次, 烘干后包装. 在中国原子能科学研究院进行快中子照射. 照射参数 J 用北京房山花岗闪长岩黑云母(ZBH-25, 133.2 Ma ^[22])进行测定. 样品 Y-1-1 照射快中子注量为 $1.86 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$, 时间为 7.97 h; 其余样品快中子注量 $2.4 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$. 时间为

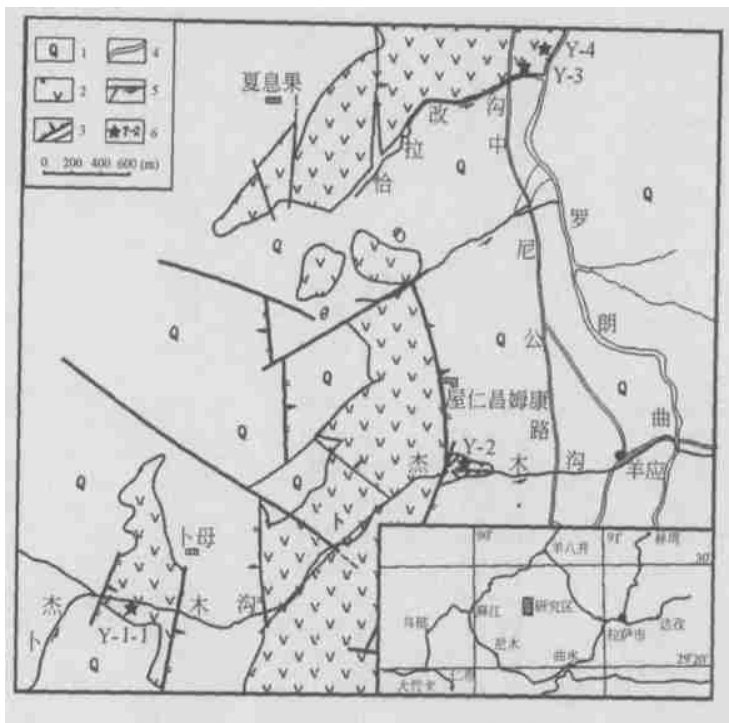


图 1 西藏当雄羊应乡新生代火山岩分布图

(据文献 [19] 简化, 插图为区域位置图)

1. 坡积洪积冰积物; 2. 火山熔岩及火山碎屑岩; 3. 断层及地质界线; 4. 公路; 5. 河流、水系; 6. 采样地点及编号

10.07 h. 样品用阶段升温法进行分析. 所有样品的熔样、纯化和质谱分析均由第一作者在中国地质大学(北京)地学实验中心 MM 5400 质谱仪上完成. 在 1500 °C 空白水平为 ^{40}Ar : 9×10^{-15} mol, ^{39}Ar : 9×10^{-17} mol.

2.2 结果及讨论

火山岩样品各阶段氩同位素比值及视年龄计算

结果列于表 1, 年龄图谱和等时线年龄如图 2.

选自 Y-1-1 样品的透长石阶段升温年龄图谱在低温阶段及高温阶段出现较高视年龄, 形成轻微下凹的马鞍形年龄谱, 显示样品可能存在过剩氩影响(图 2(a)). 根据研究, 马鞍形年龄谱的最小视年龄接近样品结晶年龄^[22], 因此将其鞍底坪年龄(11.40 ± 0.11)Ma(^{39}Ar 占总析出量 77.4%)作为火山作用的时间.

表 1 火山岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段升温定年结果

样品	阶段	温度/°C	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$V(^{39}\text{Ar})/\text{pL}$	$^{39}\text{Ar}\%$	表观年龄($\pm 1\sigma$)/Ma
Y-1-1 ¹⁾	1	500	562.1494	1.748862	0.29114	0.34	0.39	71.9 ± 8.3
	2	700	102.4945	0.287298	0.18473	0.52	0.59	28 ± 15
	3	800	12.0909	0.014633	0.20705	7.72	8.72	12.53 ± 0.21
	4	900	8.4489	0.004814	0.18610	25.11	28.36	11.34 ± 0.20
	5	1000	8.2725	0.004381	0.28167	24.19	27.32	11.27 ± 0.21
	6	1100	8.5938	0.004878	0.20973	19.20	21.69	11.54 ± 0.17
	7	1200	11.3278	0.008436	0.13590	6.81	7.69	14.23 ± 0.20
	8	1500	17.7592	0.017692	0.23893	4.66	5.26	20.16 ± 0.29

样品	阶段	温度/°C	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$V(^{39}\text{Ar})/\text{pL}$	$^{39}\text{Ar}\%$	表观年龄($\pm 1\sigma$)/Ma
Y-2 ²⁾	1	550	697.3695	0.446393	0.16086	0.07	0.04	864±61
	2	700	299.0242	0.984860	0.05570	0.21	0.12	16±12
	3	800	87.2752	0.285139	0.01998	0.51	0.28	5.9±2.2
	4	900	27.3595	0.083188	0.01911	1.59	0.88	5.43±0.25
	5	1000	18.5286	0.050238	0.02069	3.58	1.97	7.20±0.12
	6	1100	7.2626	0.006703	0.03044	30.25	16.67	10.32±0.14
	7	1160	7.3838	0.006725	0.03123	17.11	9.42	10.54±0.14
	8	1220	7.1752	0.005913	0.03185	18.22	10.04	10.60±0.15
	9	1300	6.9510	0.004775	0.03247	55.03	30.32	10.82±0.15
	10	1500	7.3270	0.006118	0.03363	54.93	30.27	10.78±0.15
Y-3 ³⁾	1	500	564.0207	1.863847	0.14244	0.0214	0.07	35±87
	2	700	36.3202	0.112848	0.02001	2.36	1.23	7.95±0.50
	3	800	17.5211	0.046797	0.02367	7.20	3.76	9.87±0.17
	4	900	6.9477	0.009704	0.03099	12.88	6.72	10.91±0.16
	5	1000	5.8282	0.005682	0.03212	27.76	14.48	11.09±0.16
	6	1100	5.4122	0.004233	0.03201	36.13	18.85	11.12±0.16
	7	1200	5.2500	0.003577	0.03192	75.09	39.17	11.21±0.16
	8	1300	7.6568	0.011119	0.03352	20.84	10.87	11.67±0.18
	9	1500	12.0052	0.025284	0.03572	9.30	4.85	12.12±0.18
Y-4 ⁴⁾	1	500	133.8239	0.432875	0.01880	0.38	0.09	13.80±8.8
	2	700	20.8301	0.058146	0.01277	5.26	1.29	8.53±0.20
	3	800	12.9485	0.025965	0.00664	17.57	4.31	12.32±0.18
	4	900	5.5966	0.002268	0.00407	68.32	16.77	11.51±0.16
	5	1000	5.4921	0.002681	0.00591	60.96	14.96	10.98±0.16
	6	1100	5.4216	0.002788	0.00839	65.13	15.99	10.74±0.15
	7	1200	5.3850	0.002554	0.00884	95.87	23.53	10.82±0.15
	8	1300	5.2842	0.002193	0.01006	84.34	20.70	10.83±0.15
	9	1500	10.9180	0.020887	0.02129	9.58	2.35	11.09±0.16
Y-4 ⁵⁾	1	550	86.1232	0.276178	0.02043	0.67	0.16	10.3±3.1
	2	650	26.6170	0.081345	0.01714	1.92	0.47	5.90±0.42
	3	750	15.8389	0.039177	0.01048	3.80	0.93	9.75±0.19
	4	850	11.7046	0.022212	0.00698	18.33	4.47	11.75±0.17
	5	950	5.4515	0.002210	0.00425	67.44	16.43	10.97±0.16
	6	1050	5.2187	0.002221	0.00683	60.35	14.70	10.43±0.15
	7	1150	5.1736	0.002386	0.00917	55.73	13.57	10.22±0.14
	8	1250	5.0601	0.001946	0.00974	89.98	21.92	10.26±0.15
	9	1500	5.5640	0.003481	0.01292	112.29	27.35	10.37±0.15
MJ-13 ⁶⁾	1	550	315.8951	0.978997	0.11540	0.25	0.06	54±120
	2	650	167.8808	0.500259	0.10386	0.75	0.17	41±10
	3	750	27.1590	0.068800	0.10759	3.98	0.88	14.09±0.25
	4	850	12.8247	0.025800	0.08642	15.91	3.53	10.74±0.16
	5	930	6.0498	0.002938	0.02547	32.94	7.32	10.69±0.15
	6	1010	5.7539	0.001760	0.09404	36.15	8.03	10.81±0.15
	7	1090	5.5178	0.000938	0.09404	53.80	11.95	10.82±0.15
	8	1180	5.8152	0.001725	0.08900	61.01	13.55	10.95±0.15
	9	1280	6.8330	0.004529	0.08480	166.62	37.00	11.34±0.16
	10	1500	7.7476	0.004733	0.08576	78.96	17.53	13.10±0.19

1) 透长石, 样品重: 0.4 g, $J=0.0008959$; 2) 透长石, 样品重: 0.18 g, $J=0.0010863$; 3) 透长石, 样品重: 0.12 g, $J=0.0014872$; 4) 透长石, 样品重: 0.22 g, $J=0.0013000$; 5) 黑云母, 样品重: 0.23 g, $J=0.0012726$; 6) 斜长石, 样品重: 0.38 g, $J=0.0011475$

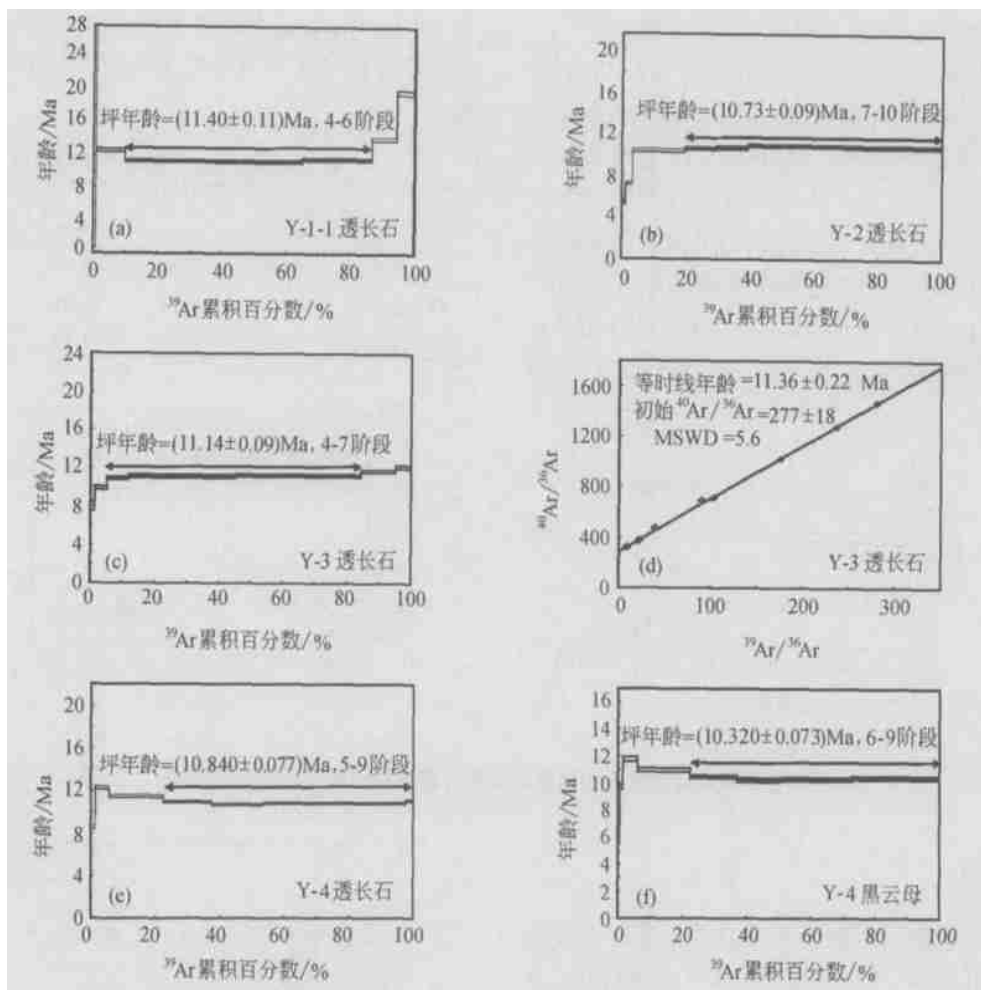


图 2 西藏羊应乡火山岩阶段升温年龄图谱

(加黑线段为用于计算坪年龄的阶段) 及等时线年龄图 (加黑点为用于等时线年龄数据点) (误差为 2σ)

Y-2 样品的阶段升温年龄图谱在 (10.68 ± 0.08) Ma (^{39}Ar 占总析出量 80.1%) 构成了一个很好的年龄坪, 代表了火山岩的形成年龄 (图 2(b)). 低温阶段出现较低的表现年龄可能表明样品有少量氩丢失, 但 ^{39}Ar 析出所占百分比不大, 不具地质意义.

样品 Y-3 的阶段升温年龄图谱形成的坪年龄为 (11.08 ± 0.08) Ma (^{39}Ar 占总析出量 79.2%). 高温和低温阶段产生的视年龄与坪年龄不一致, 可能与样品矿物表面及内部氩的存在形式有关 (图 2(c)). 在低温下可能有些氩丢失, 高温阶段可能由于样品中氩析出系统在高温下空白增加, 放射成因氩占总氩析出的比例减小, 因而年龄误差增大所致. 但这些不一致年龄所包括的 ^{39}Ar 占总氩析出的百分比都不大, 构成年龄坪的数据点所对应的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$

$^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线年龄为 (11.29 ± 0.24) Ma, $\text{MSWD} = 1.9$, 初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为 283 (图 2(d)), 与 Nier 值基本一致^[23], 表明样品不含过剩氩, 坪年龄数据可信度高, 坪年龄结果能够代表火山岩的喷发年龄.

Y-4 样品的黑云母 (图 2(f)) 与透长石 (图 2(g)) 单矿物阶段升温年龄图谱相似, 在低温阶段 ($550 \sim 950^\circ\text{C}$) 均显示表现年龄先降低后抬升的模式, 这可能是由于矿物表面氩保存不好引起. 但总体上这部分 ^{39}Ar 析出占总析出量的比例不大 (约为 22%), 不影响坪年龄的可靠性. 黑云母坪年龄为 (10.32 ± 0.07) Ma (^{39}Ar 占总析出量 77.75%), 透长石坪年龄为 (10.89 ± 0.05) Ma (^{39}Ar 占总析出量 77.75%), 黑云母年龄略低于透长石年龄, 分别代表这两种单

矿物在它们的 K-Ar 体系封闭后至今的年龄。

为检验实验室分析结果, 将样品 Y-2, Y-4 送至美国伯克利年代学中心 (Berkeley Geochronology Center) 用激光熔样方法在 MAP 215 质谱仪上进行了分析, 结果如表 2^[24]。两个实验室的坪年龄误差在 0.7%~5.6% 之间。另外, 我们重新采集并测试了 Coulon 在 1986 年研究过的西藏麻江地区火山岩样品, 得到 (10.81 ± 0.05) Ma 的年龄结果 (图 3), 与 Coulon 分析的样品 T323, T324 结果 $(10.5 \pm 0.4$

和 10.1 ± 0.2 Ma) 在误差范围内一致^[11]。因此, 本实验室分析结果与国外同类实验室结果可以相互对照。

表 2 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄结果对照表

样品号	矿物	美国伯克利年代学中心 ^[25]		本文		相对偏差/%
		坪年龄	2 σ	坪年龄	2 σ	
Y2	透长石	10.65	0.03	10.73	0.09	0.7
Y4	透长石	10.73	0.16	10.84	0.08	1
Y4	黑云母	10.92	0.20	10.32	0.07	5.6

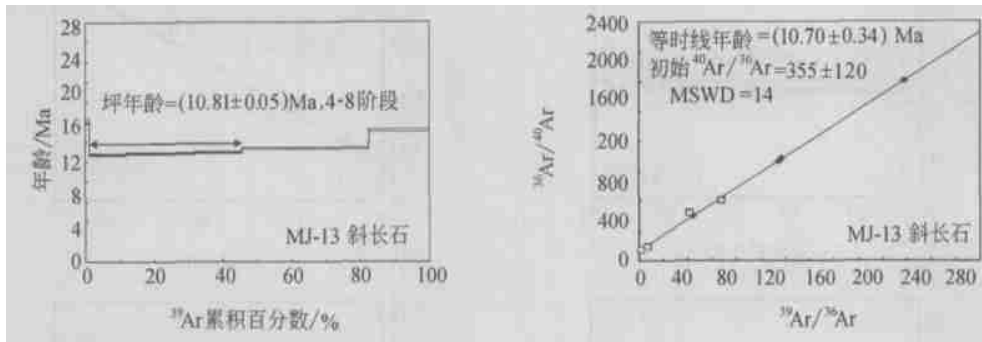


图 3 西藏麻江地区火山岩样品阶段升温年龄图谱及等时线年龄图

3 地质意义

上述结果表明, 西藏南部羊应乡地区存在新近纪后碰撞火山活动, 时间为 10.73~11.40 Ma。次火山岩稍晚, 在 10.32~10.84 Ma。这些高钾火山岩的球粒陨石稀土标准配分特征与工作区西部麻江地区 (Maqiang)^[11] 钾质钙碱性熔岩及更西部的 (Gegar 和 Manasarower) 高钾钙碱性火山岩^[7] 相似, 与冈底斯带广泛分布的古近纪林子宗群火山岩相比重稀土更亏损, 且无负钫异常¹⁾, 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7121$ ^[19], 表明其形成于加厚的下部地壳 ($> 65 \text{ km}$ ^[25])。西藏南部冈底斯带现有碰撞后钾质、超钾质岩石大都位于南北向裂谷 (地堑) 中, 其产出与南北向裂谷有密切的联系。裂谷被认为是大陆碰撞之后地壳加厚、高原大规模隆升并达到相当高度之后发生重力垮塌进而出现东西向伸展构造的主要标志^[26], 或者代表了岩石圈地幔减薄之后快速隆升的结果^[9]。但是, 也有人认为这些南北向裂谷中发育的正断层未必与高原隆升有关^[27, 28]。本研究获得

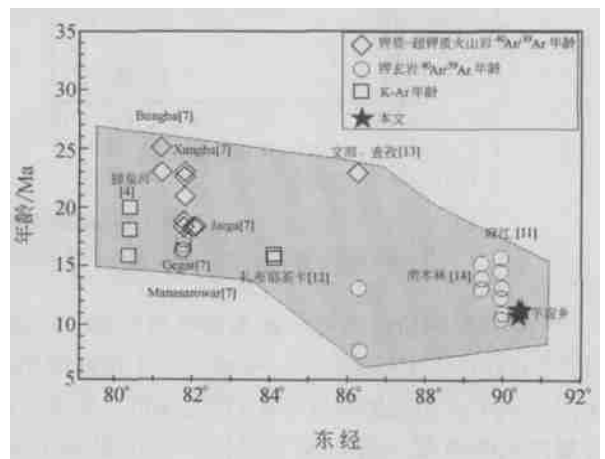


图 4 青藏高原后碰撞火山岩年龄分布图

的火山岩年龄与 11.01 Ma 的羊八井盆地西侧念青唐古拉花岗岩体中粗粒黑云母花岗岩的成岩年龄 (SHRIMP U-Pb 法)^[29] 一致, 早于该区地堑边缘正断层的年龄 ($(8 \pm 1) \text{ Ma}$ ^[30]), 因此, 我们倾向于认为羊应乡钾质火山岩的形成与岩石圈地幔减薄有关。在青藏高原南部, Thakkola 地堑边缘正断层年

龄为 $11\text{Ma}^{[31]}$; 双湖地堑边缘正断层为 $13.5\text{Ma}^{[32]}$; 拉萨地块南北走向的岩墙年龄大均在 $18 \sim 13\text{Ma}^{[33, 34]}$. 由此估计地壳东西向拉伸的时间范围是: $18 \sim 8\text{Ma}^{[29]}$. 因此, 羊应乡的火山岩活动是高原岩石圈在这一新阶段演化的重要结果. 火山岩在盆地内的空间展布也与这样的构造背景一致.

综合已有的青藏高原南部冈底斯带后碰撞高钾火山岩的研究结果可以看出(图 4), 后碰撞钾质火山岩不仅在区域上广泛存在, 而且在形成时间上似乎存在由西向东逐渐迁移的趋势.

致谢 致谢: 文中部分成果为第一作者的博士论文内容, 罗修泉、李大明、戴耀谟、刘敦一研究员曾给予指导、帮助并提出有益建议, 特此谢忱.

参 考 文 献

- 1 Liegeois J.P. Some words on the post-collisional magmatism. *Lithos* 1998, 45: XV-XVII
- 2 肖庆辉. 花岗岩构造环境判别方法. 见肖庆辉, 等著, 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 2002. 12~52
- 3 邓万明. 西藏阿里北部的新生代火山岩——兼论陆内俯冲. *地质学报, 岩石学报*, 1989, 3: 1~11
- 4 Arnaud N.O., et al. The high K₂O volcanism of northwestern Tibet: Geochemistry and tectonic implications. *Earth Planet Sci Lett* 1992, 111: 351~367
- 5 丁林, 等. 藏北超钾质火山岩的岩石学与地球化学特征: 高原岩石圈演化的记录. *岩石学报*, 1999, 15(3): 408~421
- 6 Turner S., et al. Post-collision, Shoshonitic Volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for Convective Thinning of the Lithosphere and the Source of Ocean Island Basalts. *Journal of Petrology*, 1996, 37: 45~71
- 7 Miller C., et al. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. *J Petrol*, 1999, 40(9): 1399~1424
- 8 Tapponnier P., et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science* 2001, 294: 1671~1677
- 9 England P., et al. Extension during continental convergence with application to the Tibetan Plateau. *J Geophys Res* 1989, 94(175): 61~69
- 10 Turner, S. et al. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis volcanic rocks. *Nature* 1993, 364: 50~53
- 11 Coulon C., et al. Mesozoic and Cenozoic volcanics rocks from central and southern Tibet ³⁹Ar-⁴⁰Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance. *Earth and Planetary Science Letters*

- 1986, 79: 281~302
- 12 马润则, 等. 西藏措勤地区发现第三纪富钾岩浆岩. *地质通报*, 2002, 21(11): 728~731
- 13 Ding L., et al. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction. *Journal of Petrology*, 2003, 44: 1833~1865
- 14 Spicer R.A., et al. Constant elevation of southern Tibet over the past 15 million years. *Nature* 2003, 421: 622~624
- 15 Maléo G., et al. A slab breakoff model for the Neogene thermal evolution of south Karakorum and south Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 195: 45~58
- 16 Kohn M.J., et al. Petrologic case for Eocene slab breakoff during the Indo-Asian collision. *Geology*, 2002, 30: 591~594
- 17 西藏自治区地质矿产厅. 中华人民共和国区域地质调查报告(1: 200, 000)拉萨幅(地质部分). 北京: 地质出版社, 1990. 22~148
- 18 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区区域地质志. 中华人民共和国地质矿产部地质专报一区域地质, 第 31 号. 北京: 地质出版社, 1993, 237~238
- 19 李家振, 等. 西藏当雄羊应乡地热田新生代火山岩特征及其成因探讨. *现代地质(中国地质大学研究生院学报)*, 1992, 6(1): 96~109
- 20 富云莲, 等. ⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年龄及 Ar 同位素比值测定见同位素地质样品分析方法(DZ/T 0184, 8-1997). 北京: 标准出版社, 1997. 62~69
- 21 李家振, 等. 西藏羊应乡地热田形成特点及评价探讨. *现代地质(中国地质大学研究生院学报)*, 1994, 8(1): 49~56
- 22 Lanphere M.A., et al. Identification of excess ⁴⁰Ar/³⁹Ar age spectrum technique. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976, 32: 141~148
- 23 Nier A.O. A redetermination of the relative abundance of the isotopes of carbon, nitrogen, oxygen, argon, and potassium. *Phys Rev* 1950, 77: 789~793
- 24 Nomade S., et al. Miocene potassic and ultrapotassic volcanism in the Lhasa block: Spatial trends and geodynamic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 221: 227~243
- 25 邓晋福, 等. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 1996. 22~
- 26 Molnar P., et al. Active tectonics of Tibet. *J Geophys Res*, 1978, 85: 5361~5375
- 27 McCaffery R., et al. Role of oblique convergence in the active deformation of the Himalaya and southern Tibet plateau. *Geology*, 1998, 26: 691~694
- 28 Yin A., et al. Significant late Neogene east-west extension in northern Tibet. *Geology*, 1999, 27: 787~790
- 29 刘琦胜, 等. 念青唐古拉花岗岩锆石离子探针 U-Pb 同位素测年. *科学通报*, 2003, 48(20): 2170~2175
- 30 Harrison T.M., et al. Activation of the Nyainqentanghla shear zone:

- Implications for uplift of the southern Tibetan Plateau. *Tectonics* 1995, 14: 658~676
- 31 Garzione C N, et al. High times on the Tibetan Plateau: Paleoelevation of the Thakkola graben, Nepal. *Geology*, 2000, 28: 339~342
- 32 Blisniuk P M, et al. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago. *Nature* 2001, 412: 628~632
- 33 Williams H, et al. Age and composition of dikes in Southern Tibet: New constraints on timing of east-west extension and its relationship to postcollisional volcanism. *Geology*. 2001, 29(4): 339~342
- 34 Coleman M E, et al. Evidence for Tibet plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension. *Nature*, 1995, 374: 49~52

神经科学与行为科学 1993—2003 年被引频率位列前 20 位的期刊

排序	期刊名称	论文数	总被引	平均被引
1	Nature	1057	147318	139.37
2	Science	850	116677	137.27
3	Annu Rev Neurosci	257	32370	125.95
4	Trends Neurosci	920	63125	68.61
5	Neuron	3007	201399	66.98
6	Proc Nat Acad Sci USA	2789	151083	54.17
7	Prog Neurobiol	647	27168	41.99
8	Ann Neurol	2570	92563	36.02
9	J Neurosci	10103	352740	34.91
10	Curr Opin Neurobiol	864	29978	34.70
11	Brain	1845	59427	32.21
12	Nat Neurosci	1034	32209	31.15
13	J Cerebr Blood Flow Metabol	1623	40490	24.95
14	J Neuropathol Exp Neurol	1176	26346	22.40
15	J Neurochem	6776	142668	21.05
16	Neurology	8135	165493	20.34
17	Pain	2402	48726	20.29
18	J Comp Neurol	5338	103827	19.45
19	J Neurophysiol	6268	117829	18.80
20	Arch Neurol	2015	36576	18.15

(摘自《英语科技论文撰写与投稿》)