

青海可可西里地区新生代火山岩研究*

On the Cenozoic Volcanic Rocks in Hoh Xil District, Qinghai Province

郑祥身 边千韬

Zheng Xiangshen and Bian Qiantao

(中国科学院地质研究所 北京 100029)

(*Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029*)

郑健康

Zheng Jiankang

(青海省区调综合地质大队 西宁 810029)

(*Regional Geological Surveying Party, Bureau of Geology and Mineral Resources of
Qinghai Province, Xining, 810029*)

摘 要 可可西里新生代火山岩主要出露在昆南断裂以南和东经 $92^{\circ}30'$ 以西的区域内, 基本沿近东西走向的大型逆冲-走滑断裂带分布, 可分为渐新世、中新世两期。渐新世熔岩的斑晶矿物组合为拉长石-透辉石-顽火辉石, 中新世熔岩的为中长石-次透辉石 (包括少量透辉石、普通辉石)-古铜辉石。总体而言这些火山岩富碱高钾 ($K_2O > 3\%$, $K_2O/Na_2O > 1$), 普遍富集大离子亲石元素, 稀土元素含量很高并且轻重稀土比值很大。渐新世火山岩为高钾钙碱性系列, 中新世岩石属于钾玄岩系。前者的微量元素和稀土元素的含量以及轻重稀土比均低于后者。所有岩石均具有较高的 Sr 同位素 (> 0.707) 和相对较低的 Nd 同位素 (< 0.5124) 组成, 表现出源区曾受到年轻地壳的影响。高钾钙碱性岩系和钾玄岩系的岩石是大陆碰撞造山后期岩浆作用的产物。始新世以来, 随着该区由碰撞、挤压作用发展到出现走滑, 应力环境由挤压转变为张性, 导致依次喷发高钾钙碱性岩系熔岩和钾玄岩系熔岩, 在岩浆演化过程中这两个岩系则沿相同的趋势发展。

* 本文于1996年5月9日收到, 1996年9月23日改回。

本文为中国科学院重大科研项目的成果之一。

第一作者简介: 郑祥身 男 1947年出生 副研究员 岩石学专业

Abstract The Cenozoic volcanic rocks in Hoh Xil district of Qinghai province are obviously controlled by tectonic setting and distributed roughly in the range with the north boundary of Kunnan Fault and the eastern limit of $92^{\circ}30'$ east longitude. The volcanic rocks can be subdivided into two groups, Eocene and late Miocene, with geological and isotope chronological evidences. Petrographical studies show that the lavas are basically porphyritic and with different phenocryst associations; labradorite-diopside-enstatite in Eocene lavas, anisidine-salite (including few diopside, augite)-bronzite in Miocene rocks. Generally speaking, all rocks with high content of alkali of $K_2O > 3\%$ and $K_2O/Na_2O > 1$, are enriched in LILE and with high abundance of REE, high ratio of LREE/HREE. Eocene lavas belong to high-K Calc-alkaline (HK-CA) series and those of Miocene to shoshonite (SHO) series. The HK-CA rocks have lower content of REE and LREE/HREE ratio than SHO. The Cenozoic volcanic rocks have higher $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratio (> 0.707) and lower $^{143}Nd/^{144}Nd$ ratio (< 0.5124), implying the enriched mantle feature affected by young crust. Above petrochemical and geochemical features suggest that the Cenozoic volcanic rocks were formed in a back-collision tectonic environment, and both HK-CA and SHO series magmas should be considered to be generated at the late stage of collision process, that is, when the collision changed from compression then to strike-slip movement, the magma of SHO series occurred following the HK-CA melt.

主题词 新生代 火山岩 高钾钙碱性岩系 钾玄岩系 青海省 可可西里

Key words: Cenozoic volcanic rock; High-K calc-alkaline series; Shoshonite series; Qinghai Province; Hoh Xil

分类号: P588.14

Classific. Code: P588.14

1 前言

青海可可西里指位于青藏公路以西、唐古拉山和东昆仑山之间的地区,平均海拔约5000m,以前从未进行过系统的综合科学考察,地质资料十分匮乏。近年来,随着青藏高原科学考察和研究的深入,有关可可西里周边地区(包括藏北、昆仑山、喀喇昆仑和青海)岩浆活动的研究成果也陆续有所发表,特别是中英青藏高原综合地质考察队对拉萨至格尔木沿线出露的深成岩、火山岩和蛇绿岩进行了系统的研究(金成伟等1990;Pearce和梅厚钧1990;邓万明和Pearce1990),对岩浆作用中的同位素地球化学行为进行了探讨(许荣华等1990),这些对开展青海可可西里地区岩浆岩的研究起到了先导和促进的作用。在1990年可可西里地区综合科学考察时,笔者对区内第三纪的火山岩进行了重点调查并系统采集了标本,并通过室内进行的各种分析和测试,获取了大量资料和数据,因此对该区第三纪火山作用提出了新的认识。

2 新生代火山岩的分布和产状

可可西里地区新生代岩浆活动十分强烈,火山岩和侵入岩均很发育。火山岩主要产在昆南断裂以南和东经 $92^{\circ}30'$ 以西的区域内,并明显受构造所控制。根据火山岩的地理分布和地质

产状,并与藏北火山岩(邓万明 1989)对比,初步在可可西里地区划分出二个新生代火山岩区,其界线大致为西金乌兰断裂(图1)。

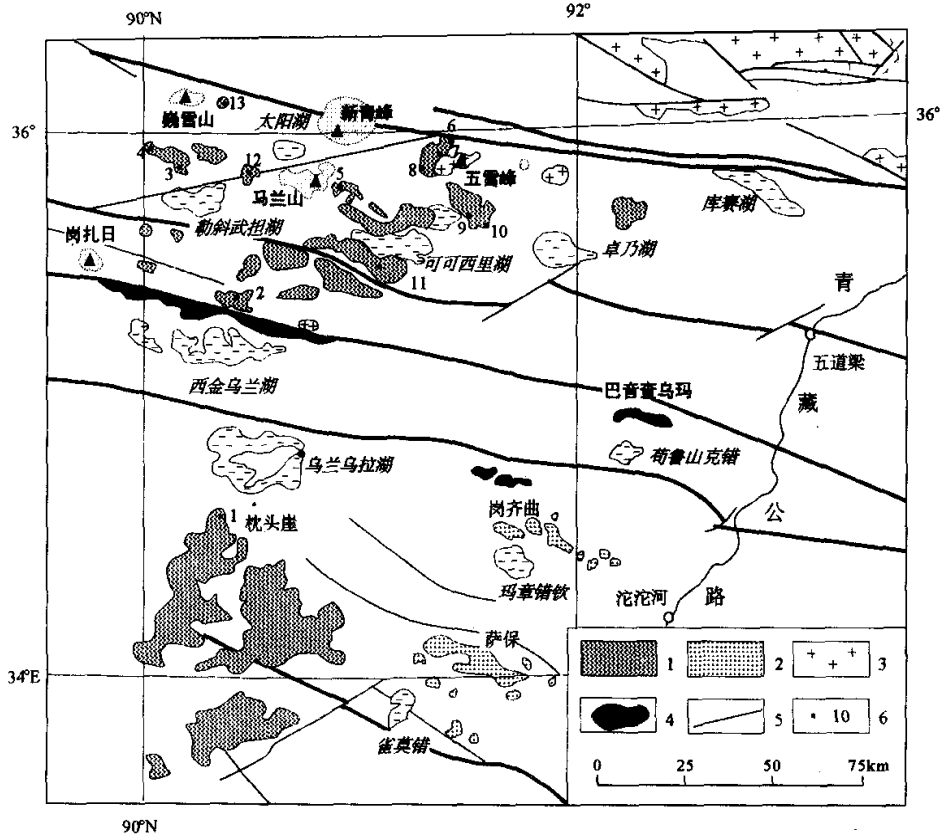


图1 可可西里地区新生代火山岩分布及采样位置图

图例:1. 新生代火山岩; 2. 第三纪碱性侵入岩; 3. 中生代以前的侵入岩; 4. 蛇绿岩; 5. 断裂; 6. 新生代火山岩观测点及编号. 图中编号: 1. 枕头崖; 2. 双头山; 3. 黑驼峰; 4. 黑钢头; 5. 乱沟山; 6. 洪水河; 7. 五雪峰; 8. 春进沟; 9. 可北湖; 10. 卓乃湖西; 11. 橄榄白榴岩产地; 12. 勒斜武担湖分水岭; 13. 平顶山

Fig. 1 Sketch map showing the distribution and sampling location of the Cenozoic volcanic rocks in Hoh Xil region

乌兰乌拉湖以南大面积分布的熔岩向西与西藏境内强日玛查、多格错、奔月湖一带的熔岩共同构成了南部新生代火山岩区。该区可见大面积的熔岩盖在中上侏罗统砂页岩之上,被剥蚀后形成桌状山、平顶山等残留地貌,也可见到孤立的熔岩丘。枕头崖(图1,点1)露头

的下部黑灰色粗安岩的 K-Ar 全岩年龄为 $44.66 \pm 0.97\text{Ma}$ (表 1, KY3-1), 上部为深灰色粗安岩, 其底部有时具球粒构造, 含有较多的斜长石斑晶, 并偶见砂岩捕虏体, 顶部是具流动构造的黑色气孔状粗安岩, K-Ar 年龄为 $4.27 \pm 0.14\text{Ma}$, 属晚中新世(表 1, KY3-6)。

表 1 可可西里地区第三纪火山岩 K-Ar 年龄测定结果

Table 1 K-Ar dating result of the Tertiary volcanic rocks from Hoh Xil district

样品号	岩石名称	产地	K(%)	$^{40}\text{Ar}(\text{mol/g})$	$^{40}\text{Ar}^*(\%)$	表面年龄 (Ma) $\pm 1\sigma$
KY2-2	黑云正长岩	岗齐曲	3.48	2.495×10^{-10}	57.20	40.88 ± 1.30
KY2-12	石英正长岩	岗齐曲	4.33	2.891×10^{-10}	86.80	38.09 ± 0.56
KY3-1	粗安岩	枕头崖	2.27	1.780×10^{-10}	95.04	44.66 ± 0.87
KY3-6	粗安岩	枕头崖	3.23	2.395×10^{-11}	56.21	4.27 ± 0.14
KY6-14	粗安岩	黑锅头	2.70	8.597×10^{-11}	71.49	18.27 ± 0.34
KY7-1	黑曜岩	分水岭	3.09	1.130×10^{-11}	46.05	2.11 ± 0.03
KY7-15	粗安岩	乱沟山	2.87	8.522×10^{-11}	69.65	17.04 ± 0.34
KY8-22	粗安岩	五雪峰	3.02	1.119×10^{-10}	89.17	21.24 ± 0.28
KY9-1	粗安岩	可北湖	2.77	1.187×10^{-10}	86.59	24.55 ± 0.37
KY9-4	石英斑岩	卓乃湖	3.24	6.725×10^{-11}	85.79	11.93 ± 0.19

注: 样品产地见图 1。国家地震局地质研究所李大明以全岩稀释法测定, 采用常数为: $^{40}\text{K}/\text{K}=1.167 \times 10^{-4}\text{mol/mol}$, $\lambda=5.543 \times 10^{-10}/\text{a}$, $\lambda_{\beta}=0.581 \times 10^{-10}/\text{a}$, $\lambda_{\epsilon}=4.962 \times 10^{-10}/\text{a}$ 。上角 * 号为放射性 ^{40}Ar 。

西金乌兰断裂以北新生代火山岩集中在可可西里山、勒斜武担湖、五雪峰一带(图 1), 与西藏境内向阳湖、银波湖等地的新生代火山岩一起构成北岩区。熔岩主要呈岩被产出, 剥蚀后为孤立的方山和尖山, 盖在早白垩世的红色砂岩、巴颜喀拉山群砂板岩、早第三纪紫红色-肉红色砂岩之上。熔岩以黑灰色细-中粒半晶质块状粗安岩为主, 常含有气孔和黑色或紫色的石英捕虏晶。K-Ar 同位素年龄从 $17.04 \pm 0.34\text{Ma}$ 到 $24.55 \pm 0.37\text{Ma}$ (表 1), 属中新世。在卓乃湖西看到(图 1, 点 10), 潜火山岩相的灰白色石英斑岩($11.93 \pm 0.19\text{Ma}$, 表 1, KY9-4)侵入在灰黑色粗安岩质熔岩($24.55 \pm 0.37\text{Ma}$, 表 1, KY9-1)中, 并含有 20% 左右棱角状一次棱角状粗安岩碎屑, 此外, 在勒斜武担湖去太阳湖的分水岭(图 1, 点 12)的一锥状熔岩丘上采到了黑曜岩、粒状钠闪碱流岩、块状碱流岩等, K-Ar 年龄仅为 $2.11 \pm 0.03\text{Ma}$ (表 1, KY7-1)。据此推测新生代火山作用的末期岩浆朝酸性成分演化。

3 岩相学和主要造岩矿物特征

3.1 熔岩

南岩区渐新世黑灰色粗安岩主要为黑灰色致密块状, 具微晶细斑结构。斑晶包括斜长石、透辉石和顽火辉石, 均以自形晶为主。基质由细小的长粒状中长石和细小的辉石颗粒、少量铁质细粒组成细晶质交织结构。长石斑晶以拉长石居多, An 组分明显高于其它层位火山岩中的长石。中新世熔岩包括灰、深灰色块状粗安岩和气孔状灰黑色粗安岩两类。前者为斑状结构, 基质具交织结构, 斑状结构及假球粒结构, 流动构造。斑晶以中长石为主, 尚有镁质透辉石和顽火辉石, 以及少量角闪石。后者含有拉长石、普通辉石和古铜辉石斑晶, 以及个别

石英捕虏晶。基质具交织结构、微晶结构，少量为玻晶交织结构。

北部中新世黑、黑灰色粗安岩为块状构造，气孔构造较发育，具斑状结构，斑晶包括中-拉长石、正长石、透辉石、古铜辉石、镁-镁铁闪石或镁铁闪石、富镁黑云母等。基质由长石、辉石和角闪石或黑云母、铁质颗粒构成间粒结构，交织结构，玻晶交织结构等。有的熔岩中含有花岗岩岩屑和圆球状的石英捕虏晶，表明岩浆与围岩发生了强烈的混合，捕虏并消化了围岩物体。

此外，在可可西里湖南大约 12km 处（图 1，点 11）发现了呈残留岩被状盖在白垩系砂岩之上的橄榄白榴岩，岩石为深灰色，斑状结构，流动构造和气孔构造发育。主要斑晶包括自形粒状的橄榄石、白榴石及少量普通辉石，基质矿物主要为普通辉石，往往带有霓石的边。

3.2 潜火山岩

黑锅头（图 1，点 4）火山锥中心充填有粗安质-流纹质玢岩。岩石为灰白-浅灰色，块状构造，粗粒少斑结构，斑晶为多呈浑圆状的斜长石和辉石。基质包括斜长石、填隙状石英、它形细-微粒的辉石、角闪石等。岩石中含有大量黑-黑灰色粗安岩角砾和石英捕虏晶。在卓乃湖西露头上看到的潜火山岩为石英斑岩，它捕虏有砾径达十数厘米的黑色-黑灰色粗安岩岩块。岩石呈斑状结构，石英、更长石斑晶总量达 30%，尚有少数铁叶云母和电气石斑晶。

勒斜武担湖北的黑曜岩基本由火山玻璃组成，仅见到个别细小的长石和辉石捕虏晶屑。碱流岩等可呈粉、灰、棕、黑灰等不同颜色，细粒-粗粒结构或斑状结构，含有斑晶、捕虏晶或晶屑，包括石英、电气石、黑云母、长石等。基质多为玻质，有的具流纹构造。

总之，可可西里不同时代和不同产状火山岩的岩相学特征有所区别。渐新世粗安岩的斑晶矿物组合为拉长石-透辉石-顽火辉石，中新世粗安岩的为中长石-次透辉石（包括少量透辉石、普通辉石）-古铜辉石，潜火山岩的则是更长石-普通辉石-古铜辉石。

4 火山岩的岩石化学和地球化学

对可可西里调查区内 11 个火山岩露头上（位置见图 1）的 41 个新生代火山岩标本用 XRF 法分析了氧化物含量，以 INAA 法测定了其中 28 个样品的稀土元素和微量元素丰度。

4.1 氧化物的相关变化及岩石系列

渐新世（表 2，序号 1-2）和中新世（表 2，序号 3-16）两期岩石的化学成分表现出一定的差异。总体上看基本是中性-中酸性岩， SiO_2 含量由 55.98% 至 67.54%，碱含量较高，尤其 K_2O 含量大多在 3% 以上。只有橄榄白榴岩比较特殊，其 SiO_2 含量仅约 44%， K_2O 达到 6.83%，并含有很高的 Sr 和 Ba 元素。进一步对比发现，在同样 SiO_2 水平上，渐新世熔岩的碱含量稍低，且 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 1$ ，中新世熔岩中 K_2O 含量一般高于 Na_2O 含量。按照 Le Maitre (1982) 提出的判别钠质岩和钾质岩的标准 ($\text{Na}_2\text{O} - 1.5 > \text{K}_2\text{O}$ 为钠质， $\text{Na}_2\text{O} - 1.5 < \text{K}_2\text{O}$ 为钾质)，两期岩石均属于钾质火山岩。这套熔岩富碱高钾的性质表明它们同新疆南部和西藏北部的新生代火山岩（邓万明，1991a, b）具有岩石化学上的相似性。潜火山岩的 SiO_2 含量一般在 70% 以上，碱含量也相对略低，但同样具有 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ 的特点。采用国际地科联推荐的

火山岩碱-硅分类图 (TAS 图, Le Maitre et al. 1989) 对上述火山岩进行投影的结果表明, 熔岩以粗安岩为主, 潜火山岩落在流纹岩区, 笼统地命名为碱流岩质流纹岩。

岩石的分异指数 (DI) 和 SiO_2 含量呈明显的正相关关系, 岩石普遍具有富碱高钾 ($\text{K}_2\text{O} > 3\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$) 的特点是钾玄岩系的重要特征。在 Peccerillo and Taylor (1976) 关于造山系列火山岩的 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图上 (图 2), 渐新世熔岩和大多数潜火山岩的投影点分布在高钾钙碱性系列的范围, 中新世熔岩完全属于钾玄岩系 (图 2)。

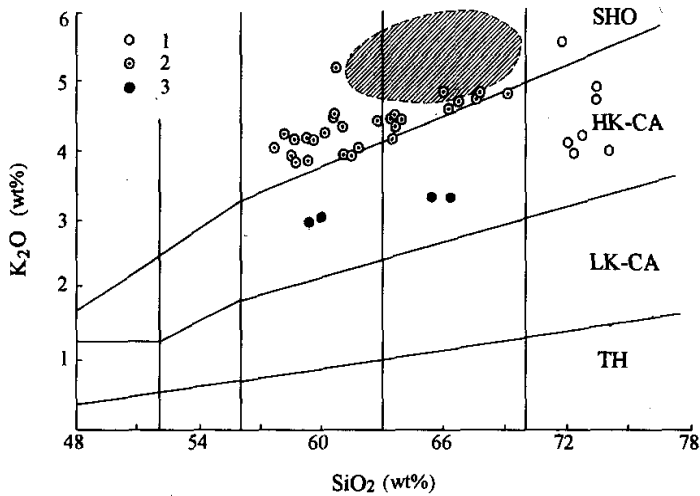


图 2 区分岩石系列的 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解 (据 Peccerillo and Taylor 1976)

TH 为拉斑玄武岩系; LK-CA 为低钾钙碱性岩系; HK-CA 为高钾钙碱性岩系; SHO 钾玄岩系; 1. 潜火山岩;

2. 晚期熔岩; 3. 早期 (渐新世) 熔岩; 阴影区为岗齐曲石英正长岩的范围

Fig. 2 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagram showing the subdivision of the Cenozoic volcanic rocks from Hoh Xil region (after Peccerillo and Taylor 1976)

从图 3 明显地看出, 渐新世和中新世两期, 即高钾钙碱性岩系和钾玄岩系的岩石化学成分有明显差异, 岩石化学演化特点也有所不同: 随着岩石中 SiO_2 含量的增高, 前者 TiO_2 含量略低且变化较小, 后者有较高的 TiO_2 含量并呈明显下降的趋势; 前者 CaO 含量略高于后者; 前者总碱量略低但具明显增加的趋势, 后者含有较高的碱元素却变化较小。两个系列岩石中 MgO 含量变化也不同, 高钾钙碱性岩系岩石的 MgO 含量高于钾玄岩系岩石并随 SiO_2 增高而急剧下降, 后者的下降趋势较缓 (图 3f)。潜火山岩的 SiO_2 含量很高, 是岩浆演化后期的成分特点, 尤其卓乃湖西含有粗安岩捕虏体的石英斑岩 (KY904), 可能代表了区域上岩浆演化末期阶段的产物 (表 1, KY904; 图 2)。橄榄白榴岩中 SiO_2 含量仅约 45%, 明显区别于上述各处所见岩石, 而且 K_2O 含量高; P_2O_5 含量也很高, 可能代表区内新生代熔岩的初始成分。

表2 可可西里地区第三纪火山岩化学成分(wt%)及CIPW标准分子
Table 2 Major composition (wt%) and CIPW norms of the Tertiary volcanic rocks from Hoh Xil region

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
样品编号	KY301	KY302	KY305	KY510	KY607	KY616	KY617	KY715
岩石名称	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩
产地	1	1	1	2	3	4	4	5
SiO ₂	65.09	57.22	61.72	60.31	57.33	58.17	60.14	59.05
TiO ₂	0.5	0.66	1.72	1.27	1.6	1.46	1.25	1.89
Al ₂ O ₃	15.26	14.27	14.69	14.86	15.32	15.37	15.78	15.63
Fe ₂ O ₃	0.32	2.21	2.87	1.27	4.12	5.45	0.1	3.79
FeO	3.16	3.46	2.77	3.95	2.77	2.24	5.64	2.2
MnO	0.09	0.24	0.11	0.12	0.1	0.12	0.1	0.08
MgO	3.06	4.55	1.65	2.34	2.49	3.1	2.87	1.8
CaO	3.98	7.21	4.09	4.86	5.67	5.21	4.55	4.86
Na ₂ O	4.21	3.41	3.58	4.02	4.25	3.5	3.63	3.91
K ₂ O	3.24	2.82	4.32	3.9	4.15	3.77	3.83	4.16
P ₂ O ₅	0.19	0.32	0.75	0.72	1	0.81	0.66	1.11
烧失量	0.31	3.36	1.54	1.89	0.66	0.48	1.59	1.35
总量	99.41	99.73	99.81	99.51	99.46	99.68	100.14	99.83
Q	14.67	7.74	16.36	10.03	5.68	10.2	9.12	11.44
Or	12.96	17.29	25.97	23.15	24.83	22.5	22.96	24.98
Ab	35.83	29.94	30.82	34.18	36.42	29.91	31.17	33.62
An	13.25	15.88	11.45	11.04	10.6	15.24	15.68	13.02
Di-Wo	2.24	7.97	1.76	3.54	4.71	2.31	1.19	1.72
-En	1.3	5.46	1.48	1.95	3.6	1.65	0.54	1.47
-Fs	0.83	1.87	0.06	1.45	0.62	0.45	0.64	0.03
Hy-En	6.37	6.3	2.71	3.91	2.68	6.15	6.71	3.09
-Fs	4.07	2.16	0.11	2.9	0.46	1.68	7.88	0.05
Il	0.95	1.3	3.32	2.42	3.08	2.8	2.41	3.65
Ap	0.44	0.77	1.77	1.68	2.35	1.9	1.55	2.61
Mt	0.47	3.32	4.18	1.85	4.96	5.21	0.15	4.31
序号	9	10	11	12	13	14	15	16
样品号	KY732	KY810	KY817	KY902	KY806	KY709	KY904	2GS2
岩石名称	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	石英粗安岩	碱流岩	石英斑岩	橄榄白榴岩
产地	13	8	7	9	6	12	10	11
SiO ₂	64.3	62.32	62.47	59.54	66.05	72.32	72.86	44.27
TiO ₂	0.83	1.02	1.06	1.46	0.87	0.14	0.08	1.29
Al ₂ O ₃	15.54	14.99	15.46	15.14	15.52	14.72	15.05	12.58
Fe ₂ O ₃	2.03	1.74	3.52	2.26	2.23	0	0.35	6.46
FeO	1.27	2.81	1.59	3.35	0.79	1.38	0.54	1.49
MnO	0.07	0.1	0.05	0.1	0.04	0.1	0.12	0.15
MgO	1.42	2.53	1.77	2.55	0.99	0.14	0.11	7.08
CaO	3.16	4.14	4.15	4.78	2.79	0.77	0.51	10.73
Na ₂ O	3.66	3.73	3.63	3.52	3.3	3.72	4.58	3.79

续表 2

序号	9	10	11	12	13	14	15	16
样品号	KY732	KY810	KY817	KY902	KY806	KY709	KY904	2GS2
岩石名称	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	石英粗安岩	碱流岩	石英斑岩	橄榄白榴岩
产地	13	8	7	9	6	12	10	11
K ₂ O	4.73	4.21	4.32	4.23	4.6	4.79	3.91	6.83
P ₂ O ₅	0.41	0.5	0.55	0.8	0.34	0.35	0.27	2.53
烧失量	2.86	1.89	1.25	2.19	2.35	1.03	1.17	1.72
总量	100.34	99.98	99.82	99.92	100	99.46	99.55	98.92
Q	17.82	13.73	15.56	11.6	23.32	30.84	30.91	-
Or	28.68	25.36	25.92	25.57	27.85	28.75	23.48	5.06
Ab	31.78	32.17	31.19	30.47	28.81	31.98	39.39	-
An	12.32	11.95	13.33	13.32	11.91	1.56	0.78	-
Di-Wo	0.43	2.36	1.64	2.34	-	-	-	28.57(Di)
-En	0.35	1.61	1.25	1.62	-	-	-	4.75(Ac)
-Fs	0.02	0.57	0.22	0.53	-	-	-	3.07(Ol)
Hy-En	3.28	4.82	3.23	4.88	2.53	0.35	0.28	14.46(Ne)
-Fs	0.18	1.7	0.57	1.58	-	2.53	0.81	27.68(Lc)
Il	1.62	1.97	2.04	2.84	1.69	0.27	0.15	2.45
Ap	0.97	1.18	1.29	1.9	0.81	0.82	0.64	5.86
Mt	2.55	2.57	3.74	3.35	2.22	-	0.52	1.55
C	-	-	-	-	1.01	2.9	3.05	-

注: 序号16的资料由邓万明提供, 其余均由中国科学院地质研究所的杨玉华、卢敬祥、叶珍久、曹杰等用XRF方法分析, 表中产地的编号同图1。

4.2 微量元素和稀土元素特征

可可西里地区的熔岩普遍表现出选择性地富集大离子亲石元素(如Th、Sr、Ba、La、Ce等)的特点(表3)。大多数标本中Sr元素的含量均超过800 $\mu\text{g/g}$, 个别样品里达到1200 $\mu\text{g/g}$ 以上, 橄榄白榴岩的Sr含量更高至3000 $\mu\text{g/g}$ 以上; Ba一般高于1200 $\mu\text{g/g}$, 最大值大于2200 $\mu\text{g/g}$, 而橄榄白榴岩的Ba含量则超过4000 $\mu\text{g/g}$ 。所有岩石中K元素含量均很高, Sr、Ba与K同步富集。然而, 钾玄岩系和高钾钙碱性岩系的微量元素含量特征又有所区别。前者几乎所有元素的含量均高于后者(图4), 最明显的是Nb和Ta元素的丰度十分不同。前者的Nb平均含量约为35 $\mu\text{g/g}$ (22个样平均), Ta元素含量在1~3 $\mu\text{g/g}$ 之间; 而后的Nb含量平均为4 $\mu\text{g/g}$, Ta含量仅为0.4 $\mu\text{g/g}$ 左右。与熔岩类相比, 潜火山岩微量元素更有很大的区别, 其低场强元素Sr、Ba的含量仅是熔岩的几分之一, 过渡族金属元素如Cr、Co和Sc的含量也很低, 但U、Rb、Ta等元素均数倍乃至数十倍于熔岩。显然, 这同岩浆的分异有关。从图4可以看到, 大离子亲石元素的富集显示出碰撞后的构造环境特点。从渐新世到中新世以来, 这些元素富集程度又有所增大, 似乎是碰撞造山之后岩浆作用不断发展的一种反映。

调查区内熔岩的稀土元素含量很高, 轻重稀土比值很大(表3), 球粒陨石(Boynton 1984)标准化的稀土配分模式(图5)表现强烈右倾斜, 所有的岩石均没有明显的Eu异常。从表3看到, 高钾钙碱性熔岩的稀土元素含量相对较低, $\Sigma\text{REE}=171.68\mu\text{g/g}$, 轻重稀土比略低

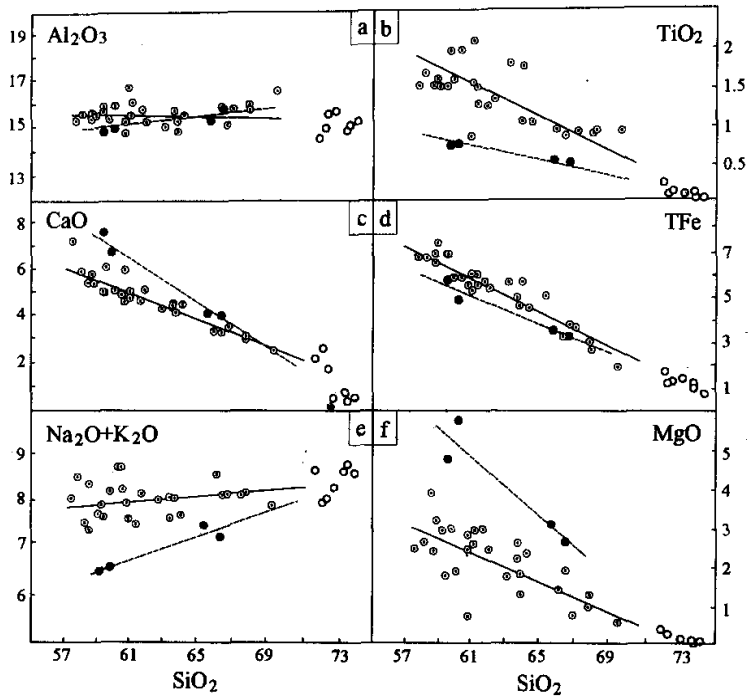


图3 火山岩主量元素的相关变化

图例同图2

Fig. 3 Major composition variation diagram

($(La/Lu)_N=35.5$)。钾玄岩系的熔岩，稀土含量非常高， ΣREE 变化在 $346.68\sim 591.03\mu g/g$ 之间，一般高于 $400\mu g/g$ ，平均值达到 $480.6\mu g/g$ (20个样)，轻重稀土比 $(La/Lu)_N=50$ 左右 (20个样)，明显高于前者。尽管橄榄白榴岩的 ΣREE 高到 $700\mu g/g$ 之上，但其轻重稀土比仍在 $50\sim 57$ 之间，与其它钾玄岩系岩石的比值基本一致；在图5上，球粒陨石标准化后的配分曲线接近平行于其它岩石的曲线，显示出同源的特征。在这些样品中，调查区东，如洪水河、五雪峰以及可北湖等地的熔岩，轻稀土和中稀土之比 (La/Sm) 相对来讲更高，达到12以上，其余熔岩的比值一般小于10 (表3)。潜火山岩的稀土总量很低，表现与熔岩基本相似的稀土元素特征，特别 La/Sm 比值与熔岩一致，但 $(La/Yb)_N$ 值往往较低，而且曲线上出现了明显的Eu负异常，暗示岩浆演化过程中斜长石的分离结晶作用。

表3 可可西里地区第三纪火山岩稀土元素和微量元素含量($\mu\text{g/g}$)
 Table 3 The concentration of rare earth and trace elements of Tertiary volcanic rocks from Hoh Xil region ($\mu\text{g/g}$)

序号	1	2	3	4	5	6
样品编号	KY301	KY305	KY616	KY617	KY715	KY806
产地	1	1	4	4	5	6
岩石名称	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	石英粗安岩
La	50.9	144	125	101	157	125
Ce	95.9	302	251	202	274	203
Nd	35.3	105	93.8	72.7	102	75.9
Sm	5.22	15.5	13.3	11.2	18.4	9.62
Eu	1.26	2.95	3.04	2.65	3.81	2.07
Tb	0.486	1.26	0.796	0.756	1.84	0.792
Yb	1.05	2.07	1.99	2.24	2.21	1.01
Lu	0.149	0.289	0.312	0.36	0.297	0.143
Σ	190.27	573.07	489.24	392.91	559.56	417.54
La/Sm	9.75	9.29	9.40	9.02	8.53	12.99
(La/Lu) _N	35.5	51.8	41.6	29.1	54.9	90.8
Sr	881	648	906	816	1240	731
Rb	134	170	118	132	115	213
Ba	1240	1800	1610	1330	2130	1590
U	4.7	4.17	3.91	4.64	3.39	5.1
Th	21.7	35.6	20.2	16.8	20.2	54.5
Ta	0.434	1.95	2.11	2.03	2.56	1.01
Nb*	3	37	32	27	60	28
Zr	158	388	200	185	252	171
Hf	5.03	35.6	8.91	7.83	11.1	9.75
Y*	21	28	27	26	32	23
Sc	9.86	7.94	13	13.2	10.5	5.45
Cr	116	8.32	98.9	83.3	10.4	44.3
Co	14.6	11.1	21.6	19.1	14.8	6.77
Ni	68.3	42	120	46.4	41	31

序号	7	8	9	10	11	12
样品编号	KY810	KY817	KY902	2GS2	KY904	KY709
产地	8	7	9	11	10	12
岩石名称	粗安岩	粗安岩	粗安岩	橄榄白榴岩	石英斑岩	碱流岩
La	130	140	144	186	11	17.3
Ce	210	220	240	349	20.8	36
Nd	69.3	76.3	95.5	132	9.18	16.2
Sm	10.7	11.6	14.6	24.8	1.54	3.36
Eu	2.25	2.47	3.08	6.55	0.172	0.305
Tb	1.03	1.09	1.27	2.76	0.21	0.338
Yb	1.73	2.11	1.63	3.41	0.67	0.516
Lu	0.261	0.269	0.262	0.388	0.102	0.068
Σ	425.27	453.84	500.34	704.91	743.6	74.08
La/Sm	12.15	12.07	9.86	7.50	7.14	5.15
(La/Lu) _N	51.7	54.1	57.1	50	11.2	26.4
Sr	802	995	1020	30.26	86.1	113
Rb	192	176	150	110	954	723

续表 3

序号	7	8	9	10	11	12
样号	KY810	KY817	KY902	ZGS2	KY904	KY709
产地	8	7	9	11	10	12
岩石名称	粗安岩	粗安岩	粗安岩	橄榄白榴岩	石英斑岩	碱流岩
Ba	1420	1440	1860	39.23	67.2	169
U	6.33	5.51	5.42	4.76	8.71	32
Th	46.8	46	31.1	20.2	5.52	19
Ta	1.61	1.46	1.97	2.64	15.8	6.51
Nb	25	28	29	61.2	41	34
Zr	179	210	221	276	83.6	152
Hf	9.2	9.26	11.2	10.9	1.41	2.81
Y	18	30	28	39	31	19
Sc	8.2	9.01	8.59	12.4	1.15	2.21
Cr	45.5	44	22.4	147	3.69	2.87
Co	15.5	11.5	15.3	30.6	0.746	1.75
Ni	36.3	36.8	37.6	87.4	34.4	29.5

注：上角 * 号的元素用 XRF 方法测定，其余由中科院高能物理研究所应用部韩松、黄忠祥、贾秀勤、董金泉以 INAA 方法测定。

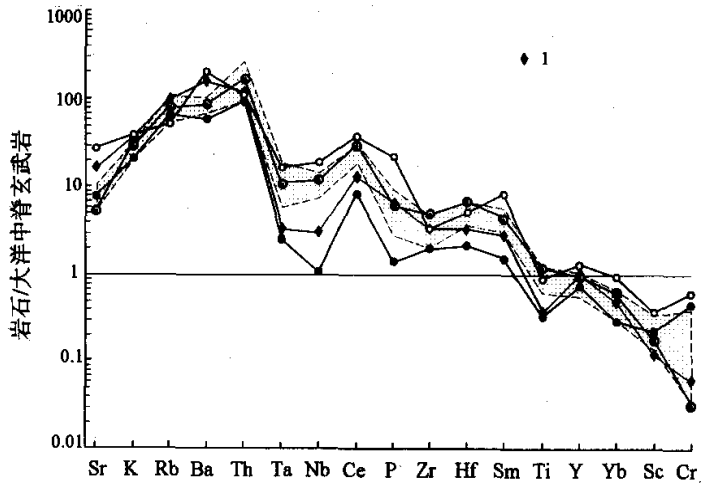


图 4 火山岩 MORB 标准化的微量元素

1. 橄榄白榴岩，阴影为晚期熔岩的含量范围；其余图例同图 2

Fig. 4 Spider diagram showing the MORB-normalized trace element composition

4.3 Sr、Nd 同位素组成特点

有选择地测定了部分代表性样品的 Sr 和 Nd 同位素成分 (表 4)。从表中可以看到，岩石

均具有较高的 Sr 同位素组成 (>0.707) 和相对较低的 Nd 同位素组成 (<0.5124)，与可可西里周围地区如泉水沟钾玄岩、于田南普鲁的熔岩、阿什库勒等地新生代富钾的火山岩 (见邓万明 1991b) 以及云南腾冲中新世高钾钙碱性系列火山岩的相应组成 (朱炳泉等 1983; 谢广衰等 1992) 基本一致，亦同意大利罗卡曼芬拉钾质火山岩 (Carter 1978) 的相应组成十分相似。在 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 对 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图上 (图 6)，可可西里火山岩的同位素组成均处在富集地幔的象限内，而且随着 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的逐渐增加 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值有所降低，表现出与“地幔列阵” (Mantle array) 反向发展，远离全球估计值 (BSE) (Zindler and Hart 1986) 向 EM I 富集地幔演化的趋势。在图中还有一个岗齐曲石英正长岩的投影点，它和枕头崖渐新世熔岩的同位素组成完全一致。图上所有投影点均落在低 Nd 高 Sr 的壳源区内，但更靠近上地壳或年轻地壳的区域 (图 6) (DePaolo and Wasserburg 1979)，这可以理解为可可西里新生代火山岩的源区可能曾受到年轻地壳物质的影响。

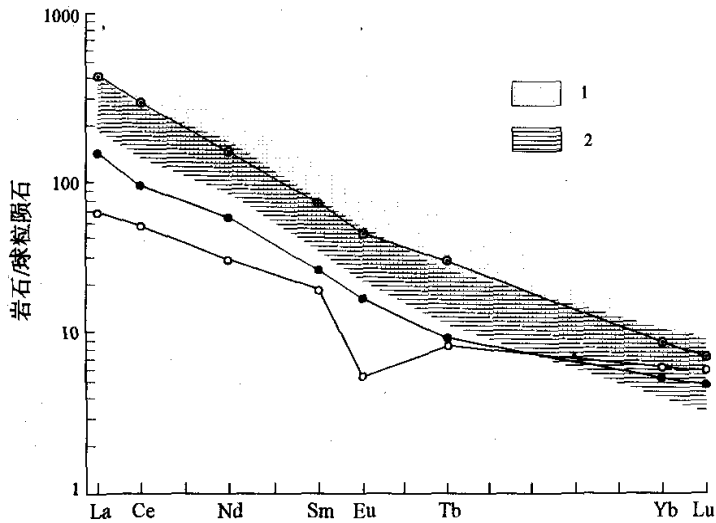


图 5 新生代火山岩稀土元素配分图

1. 晚期熔岩范围；2. 岗齐曲石英正长岩范围；其余图例同图 2

Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution pattern

5 新生代岩浆活动的构造环境分析

钾玄岩系岩石比高钾钙碱系列岩石更加富集大离子亲石元素，代表了碰撞后环境中岩浆演化的趋势 (图 4, 5)。为了确定可可西里新生代火山岩形成的构造环境，使用了 Ti-Zr-Y

表4 可可西里地区第三纪火山岩 Sr、Nd 同位素比值

Table 4 Sr, Nd isotope ratio of the Tertiary volcanic rocks from Hoh Xil district

样品号	岩石	产地	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
KY2-2	黑云正长岩	岗齐曲	0.707270±0.000012	0.512406±0.000027
KY3-1	粗安岩	枕头崖	0.707235±0.000023	0.512427±0.000021
KY3-6	粗安岩	枕头崖	0.709499±0.000029	0.512270±0.000012
KY6-14	粗安岩	黑锅头	0.708014±0.000030	0.512364±0.000009
KY7-15	粗安岩	乱沟山	0.707663±0.000017	0.512370±0.000010
KY8-22	粗安岩	五雪峰	0.707126±0.000015	0.512409±0.000029

注：表中数据由张剑波在中国科学院地质研究所分析。

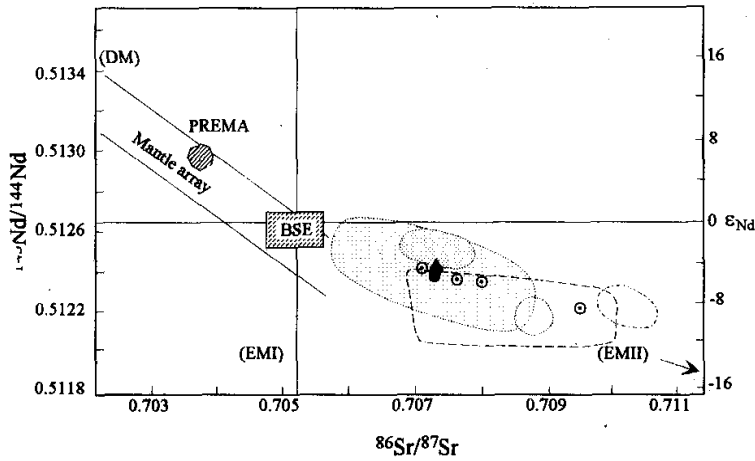


图6 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 相关图

DM 为亏损地幔；BSE 为整个硅酸盐地区；EM I 和 EM II 为富集地幔；PREMA 为常见地幔成分 (Zindler and Hart 1986)；点阴影区域为云南腾冲中新世高钾钙碱性系列火山岩，其中颜色更深者为高钾熔岩区 (谢广袁等 1992)；

点 线区为意大利罗卡曼芬拉钾质火山岩 (Carter 1978)；虚线区为阿什库勒富钾火山岩 (Deng 1992)；其余

图例同图 2

Fig. 6 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope correlation diagram (Zindler and Hart 1986)

(Wood 1980) 和 Th-Hf-Ta (Pearce and Cann 1973) 判别图 (图 7)。在这两个图上，高钾钙碱性系列熔岩和钾玄岩系列岩石均落在碰撞后环境的范围。结合前述 MORB 标准化的微量元素配分曲线，可以认定本区新生代火山岩均是在碰撞后环境形成的。

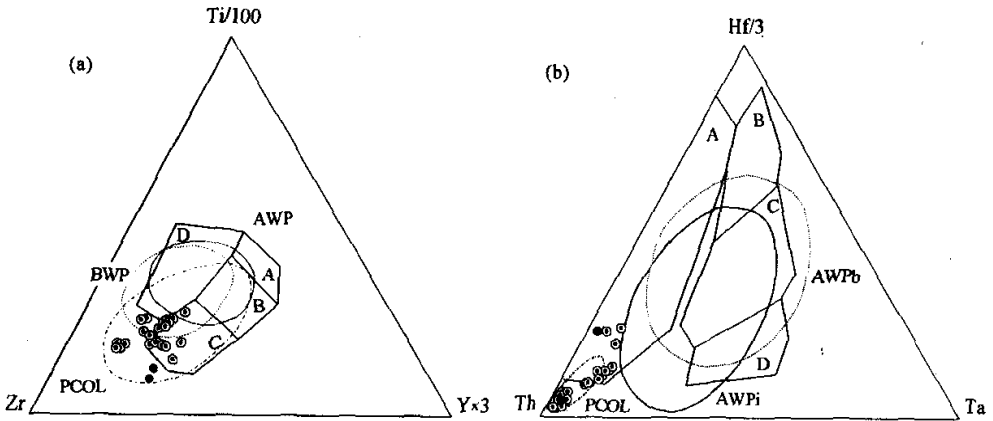


图 7 确定火山岩的构造环境的 Ti-Zr-Y(a)和 Th-Hf-Ta(b)图解(据 Pearce and Cann 1973; Wood 1980 Pearce 和梅厚钧 1990)

a 图：D 为板内玄武岩区；B 为洋中脊玄武岩区；A 和 B 为岛弧拉斑玄武岩区；B 和 C 为钙碱玄武岩区；AWP 为正常大陆岩石圈玄武岩；BWP 为弧后变薄了的大陆岩石圈玄武岩；PCOL 为碰撞后构造背景的玄武岩；b 图：C 和 D 为板内玄武岩区；B 和 C 为洋中脊玄武岩区；A 为火山弧玄武岩区；AWPb 为变薄大陆岩石圈基性岩；AWPi 为变薄大陆岩石圈中性岩区；PCOL 为碰撞后构造背景的玄武岩区；其余图例同图 2

Fig. 7 Ti-Zr-Y (a) and Th-Hf-Ta (b) diagrams for distinguishing the tectonic settings of volcanic rocks

关于钾玄武岩系的成因有不同的解释。邓万明 (1991a, b) 在研究了新南藏北的第三纪钾玄武质火山岩之后认为，钾玄武岩是一个独立的岩浆系列，它们的形成受到塔里木地体和青藏高原之间陆内碰撞和消减作用的制约。对于岛弧-大陆边缘造山环境中常常出现的钾玄武岩组合，有些学者则认为他们是岛弧岩浆演化过程中岛弧拉斑系列经过低钾钙碱性和高钾钙碱性系列演化而成 (Gill 1970; Jackes and White 1972)。可可西里地区新生代火山岩既有钾玄武岩系岩石也有高钾钙碱系列岩石存在，这与青藏高原其它地区分布的新生代火山岩有所不同。而且从形成时代来看，高钾钙碱系列岩石为老第三纪，钾玄武岩是新第三纪，在时间上是连续的；由于他们同处在碰撞后的构造环境，因此上述两种观点都不足以给出完满的解释。

综合可可西里地区新生代以来构造岩浆活动的全过程考虑，不能不看到伴随青藏高原的隆升，在老第三纪熔岩喷发的同时，区内尚有较强侵入活动发生。这就是近南北向分布于从岗齐曲向南到雀莫错一带的一系列小岩株状或小岩体状的碱性浅成侵入岩 (石英正长岩)，它们同样具有很高的钾含量，在 K_2O-SiO_2 图上同样位于钾玄武岩系的范围 (图 2)，微量元素、稀土元素和 Sr、Nd 同位素特征均同钾玄武岩质熔岩基本相同 (图 4, 5, 6)，显示了两之间具有密切的成因联系。

可可西里地区位于青藏高原的腹地,始新世喜马拉雅山运动时,新特提斯沿雅鲁藏布江缝合带闭合、印度板块与欧亚板块碰撞,导致本区强烈构造运动,造成宽缓褶皱的白垩系与上覆第三系之间的不整合接触,并出现大量冲断及走滑断裂(边千韬等 1992)。研究区内的数条近东西向大型逆冲走滑断裂在此期构造运动中形成或者早期断裂重新活动。在陆块近南北向碰撞、挤压和缩短过程中,陆块本身会出现近南北的张裂构造并逐渐转变为北北东向的拉分盆地构造,因而可能导致地幔物质发生减压重熔,生成的岩浆进一步同化地壳物质形成一套富钾的岩浆。特别在两个地块之间发生大规模走滑运动造成的次级张性断裂及其断裂交叉复合部位,更容易使上地幔重熔形成的岩浆上涌和喷出。从青藏高原周边发育的新生代火山岩看,云南腾冲产出的中新世高钾钙碱性系列火山岩被认为产在以挤压应力为主的碰撞带环境中(朱炳泉等 1983)。对比可可西里地区,老第三纪只有少量高钾钙碱性系列熔岩出现,它们可能与腾冲中新世火山岩一样,是在挤压应力作用下地幔物质发生重熔并沿少数断裂交汇部位喷出的。而同期主要出露的与钾玄岩性质基本相同的高钾富碱浅成侵入岩,它们在区域上具有近南北向带状分布的特点(张以弗 1994),显然受到在南北向挤压作用下出现的近南北走向的张性构造所控制。始新世造山运动后,可可西里和青藏高原一起发生缓慢隆升,此时近南北向的挤压作用已转变为近东西向的走滑运动,应力得以释放,除了区域上近南北向张性构造(地堑)外,在走滑断裂的两侧还产生一系列拉张构造,包括拉分盆地和张性断裂,应力环境已转变为以张性为主,这时更有利于钾玄岩系岩浆的形成和喷出。中新世以来在可可西里大面积钾玄岩质熔岩出现,正是在这样的构造背景下产生的。

由此看来,可可西里地区高钾钙碱性岩系和钾玄岩系的岩石均是大陆碰撞造山后期岩浆作用的产物。新生代可可西里地区主要发育数条近东西走向的大型逆冲-走滑断裂和近南北向的伸展构造带,火山岩基本沿断裂带分布。始新世以来,随着该区由碰撞、挤压作用发展到出现走滑,应力环境由挤压转变为张性,依次导致高钾钙碱性岩系和钾玄岩系的岩浆喷出,在岩浆演化过程中这两个岩系则沿相同的趋势发展。

致谢 感谢在艰苦的考察工作中对作者给予指导、帮助和关心的可可西里综合科学考察队的领导和全体同甘共苦的同事,特别要向张以弗先生、沙金庚博士、叶建青副研究员等致以诚挚的谢意。感谢为本研究进行各种测试的人员。感谢岩石圈构造演化开放研究实验室给予的部分资助。

参 考 文 献

- 邓万明. 1989. 西藏阿里地区北部新生代火山岩兼论陆内俯冲作用, 岩石学报, (3): 1~11
- 邓万明. 1991a. 中昆仑造山带钾玄岩质火山岩的地质、地球化学和时代, 地质科学, (3): 201~213
- 邓万明. 1991b. 新南藏北碰撞后的高钾火山作用, 岩石圈构造演化开放研究实验室年报(1989-1990), 中国科学技术出版社, 85~89
- 邓万明和 J A Pearce. 1990. 拉萨至格尔木(1985)和拉萨至加德满都(1986)的蛇绿岩. 见: 中-英青藏高原地质综合科学考察队, 青藏高原地质演化. 北京: 科学出版社, 218~241
- 边千韬, 郑祥身. 1992. 青海可可西里地区构造特征与构造演化. 见: 常承法和徐贵忠主编, 大陆岩石圈构造与资源. 北

- 京: 海洋出版社, 19~32
- 许荣华, N B W Harris, C L Lewis, C J Hawkesworth, 张玉泉. 1990. 拉萨至格尔木的同位素地球化学. 见: 中-英青藏高原地质综合科学考察队, 青藏高原地质演化. 北京: 科学出版社, 282~302
- 朱炳泉等. 1983. 印度与欧亚板块东部碰撞边界-腾冲火山岩的 Nd-Sr 同位素与微量元素研究, 地球化学, (1): 1~14
- 金成伟, N B W Harris, 许荣华, C L Lewis. 1990. 拉萨至格尔木的深成岩. 见: 中-英青藏高原地质综合科学考察队, 青藏高原地质演化. 北京: 科学出版社, 141~173
- 谢广亮, 刘丛强, 增田彰正, 清水洋. 1992. 青藏高原周边地区新生代火山岩的地球化学特征. 见: 刘若新主编, 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社, 400~427
- 张以弗和郑健康 (编著). 1994. 青海可可西里及邻区地质概论. 北京: 地震出版社, 177
- Pearce J A 和梅厚钧. 1990. 拉萨至格尔木的火山岩, 中-英青藏高原地质综合科学考察队, 青藏高原地质演化. 北京: 科学出版社, 174~205
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare Earth elements; Meteorite studies, in: Henderson P. ed., Rare Earth Element Geochemistry, Elsevier, Amsterdam, 94
- Carter S R, Evensen N M, Hamilton P S and O'Nions R K. 1978. Continental volcanics derived from enriched and depleted source regions, Nd and Sr isotope evidence, Earth Planet. Sci. Lett., 37: 401~408
- Deng Wanning. 1992. Dellemant compensation melting—A formation model of magmas during A-type subduction; As exemplified by the Quaternary volcanism in North Tibet
- DePaolo D J and Wasserburg G J. 1979. Petrogenetic mixing models and Nd-Sr isotopic patterns, Geochim. Cosmochim. Acta, 43: 615~627
- Gill J B. 1970. Geochemistry of Viti Levu, Fiji, and its evolution as an island arc, Contrib. Mineral. Petrol., 27: 179~203
- Jakes P and White A J R. 1972. Major and trace element abundances in volcanic rocks of orogenic areas. Bull. Geol. Soc. Am., 83: 29~40
- Le Maitre R W (ed.). 1982. Numerical petrology; statistical interpretation of geochemical data. Elsevier, Amsterdam
- Le Maitre R W, Batoman P, Dudek A, Keller J Le, Bas M J, Sabie P A, Schmid R Sørensen, H Streekeisen, A Wooleley, A R and Zaetti B (eds.). 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms; Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Blackwell Scientific Publications, Oxford
- Pearce J A. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth C J and Norry M J eds. Continental Basalts and Mantle Xenoliths, 230-249. Shiva, Orpington (London) and Birkhauser Boston, Cambridge, Massachusetts
- Pearce J A and Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. Earth Planet. Sci. Lett. 19: 290~300
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. Contrib. Mineral. Petrol., 58: 63~81
- Wood D A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. Earth Planet. Sci. Lett., 50: 11~30
- Zindler A and Hart S R. 1986. Chemical geodynamics. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 14: 493~571