



青藏高原北羌塘新生代火山岩中的麻粒岩捕虏体

赖绍聪¹, 伊海生², 林金辉²

(1. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学 地质系, 陕西 西安 710069; 2. 成都理工大学 四川 成都 610059)

摘要: 北羌塘枕头崖地区新生代火山岩主要岩石类型为安山岩和英安岩类。其中, 安山岩在一定程度上显示了埃达克质火山岩的特征, 如高 Sr ($>1\,000 \times 10^{-6}$), $Sr/Y > 50$ 以及低 Yb ($<2 \times 10^{-6}$) 表明其应源于榴辉岩相的青藏高原加厚陆壳中下部 (>45 km 深度)。而英安岩类富集 LILE, 如 Rb, Ba, Th, U 和 K 等, 亏损 HFSE, 如 Ti, Nb, Ta 和 Sr 等, 尤其是 Sr 显著亏损, 表明其应源于斜长石稳定的麻粒岩相源区。该区新生代安山岩和英安岩中麻粒岩捕虏体可分为两种类型, 即二辉石麻粒岩和单斜辉石麻粒岩。二辉石麻粒岩平衡温度为 $783 \sim 818^\circ\text{C}$, 单斜辉石麻粒岩形成压力在 $0.845 \sim 0.858$ GPa 之间, 来源深度约为 $27.9 \sim 28.3$ km, 表明它们是来自青藏高原加厚陆壳中部的岩石样品, 代表了本区英安岩类火山岩的源区物质组成。

关键词: 麻粒岩捕虏体, 新生代火山岩, 北羌塘, 青藏高原

中图分类号: P588.3, P588.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)05-0423-10

Granulite xenoliths in Cenozoic volcanic rocks of north Qiangtang, Tibetan Plateau, and their geological significance

LAI Shao-cong¹, YI Hai-sheng² and LIN Jin-hui²

(1. National Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Cenozoic volcanic units in Zhentouya area of north Qiangtang are mainly andesite and dacite lavas. The andesite, to some extent, shows an adakitic compositional characteristics, such as high Sr ($>1\,000 \times 10^{-6}$), Sr/Y ratios >50 and low Yb contents ($<2 \times 10^{-6}$). Evidently plagioclase broke down in the andesitic magma source region under the p - T conditions of partial melting. Compared with the dacite series, it seems that partial melting of the lower part of the thickened eclogite-facies Tibetan crust was responsible for the generation of the andesitic magma. The dacite is characterized by enriched LILE such as Rb, Ba, Th, U and K, and depleted HFSE such as Ti, Nb, Ta and Sr. It is noteworthy that the dacite exhibits a relatively low Sr ($Sr < 660 \times 10^{-6}$), and this may imply that the plagioclase was still stable in the dacitic magma source region at the pressure and temperature of partial melting. Two-pyroxene granulite and clinopyroxene granulite xenoliths were discovered in the andesite and dacite volcanic rocks outcropped in north Qiangtang of central Tibetan Plateau. Based on electron microprobe analyses, the authors have concluded that the xenoliths provide constraints for the equilibrium temperatures of the two-pyroxene granulite, i. e., about 783 to 818°C as determined by two-pyroxene thermometry, and that the formation pressure of the clinopyroxene granulite should be about 0.845 to 0.858 GPa, equal to $27.9 \sim 28.3$ km in depth. It is indicated that these granulite xenoliths represent the samples derived from the middle part of the thickened Tibetan crust. This discovery is of great importance to the further

收稿日期: 2006-02-05; 修订日期: 2006-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40572050, 40272042); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助

作者简介: 赖绍聪(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 岩石学及地球化学专业, E-mail: shaocong@nwu.edu.cn

investigation of the components and thermal regime of the deep crust of Tibetan Plateau. Geochemistry of dacite and characteristics of granulite xenolith suggest that partial melting of the middle part of thickened Tibetan crust might have produced the primary dacite magma series.

Key words: granulite xenolith; Cenozoic volcanic rocks; north Qiangtang; Tibetan Plateau

麻粒岩是下地壳高温变质产物,目前出露在地表的麻粒岩大多是前寒武纪的麻粒岩,经历了长期复杂的变动,记录了不同阶段的变质历史(邵济安等,2000;韩庆军等,2000)。相比之下,以捕虏体形式存在的中新生代麻粒岩则更直接地反映了中新生代以来下地壳经历的热事件,它已经成为研究下地壳物质组成和热状态的直接证据和重要岩石探针(Gao *et al.*, 1998; Vander and McDonough, 1999; Hacker *et al.*, 2000; 邵济安等,2000;韩庆军等,2000)。

近年来,在喜马拉雅东、西构造结相继发现了麻粒岩及麻粒岩相的岩石(Yamamoto, 1993; Zhong and Ding, 1995; Liu and Zhong, 1997; Ding *et al.*, 2001; 李德威等,2002),为喜马拉雅深部地壳的研究提供了宝贵的实物资料。然而,由于种种原因,其中主要是由于自然地理环境的限制,使得在青藏高原北部新生代火山岩中找到并获取下地壳麻粒岩捕虏体成为一件十分困难的事。因此,关于青藏高原北部这一学科领域的研究还十分薄弱,仅在北羌塘太平湖地区有过报道(Hacker *et al.*, 2000)。笔者在青藏高原野外地质调查中,于北羌塘乌兰乌拉湖南侧新生代火山岩中发现了来自高原中部地壳的麻粒岩捕虏体。本文简要介绍了寄主火山岩的岩石学及地球化学特征,讨论了这些麻粒岩的主要矿物组成、形成温度和压力条件及其地质意义。

1 区域地质概况

羌塘—冈底斯位于青藏高原的核部,是我国目前研究程度相当低的地区之一,对该区研究具有重要意义。羌塘地区第三纪火山岩较为发育,主要见于羌北地层分区的新第三纪石坪顶组,在羌塘中央隆起带以及南羌塘很少出露。火山岩大多呈厚 50~200 m 的熔岩被覆盖在第三纪喷纳湖组(N_{1s})或侏罗纪雁石坪组(J_{2ys})之上,呈陆相中心式喷发的溢流火山岩。岩石类型以熔岩为主,偶见火山碎屑岩。这些火山岩与羌塘前第三纪沉积地层呈超覆关系,在火山中心呈侵入关系。

笔者最新的野外地质调查表明,在北羌塘乌兰乌拉湖南侧枕头崖地区广泛发育的新第三纪石坪顶组安山质-英安质火山熔岩(N_{2s}),主要呈岩流、岩被状不整合覆盖在渐新统沱沱河组(E_t)红色砂岩、砂砾岩之上。枕头崖一件火山岩样品曾获得 44.66 ± 0.87 Ma 的 K-Ar 年龄(郑祥身等,1996),林金辉等(2003)对本区桌子山、雅晓、乌兰乌拉山东、波涛湖等取样点采集的 7 件火山岩样品进行了系统的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素测年,获得其坪年龄分别为: 40.82 ± 0.97 Ma, 39.79 ± 1.45 Ma, 42.00 ± 1.31 Ma, 39.00 ± 2.06 Ma, 39.40 ± 0.79 Ma, 41.07 ± 0.80 Ma 和 40.91 ± 1.18 Ma, 据此认为,本区火山岩主体应形成于 45~39 Ma 之间,并集中在 40 Ma 左右的始新世。火山岩出露地区层简单(图 1),中侏罗统主要为紫色、杂色岩屑石英砂岩、粉砂岩、生物碎屑灰岩,底部含砾岩;上侏罗统下部为灰色生物碎屑灰岩,上部为紫红色岩屑砂岩、粉砂岩;白垩系主要为一套紫红色砂岩、粉砂岩、砾岩夹少量泥晶灰岩;第四系主要为洪积冲积层;区内还有少量喜山期超浅成流纹斑岩类出露。麻粒岩捕虏体主要见于枕头崖地区新生代英安岩和安山岩中(图 1)。

2 寄主火山岩岩相学及岩石地球化学特征

枕头崖地区含麻粒岩捕虏体的新生代火山岩主要由一套灰-灰褐色安山岩、英安岩组成,见有少量灰黑色块状、气孔状安山岩流。为一套典型的中酸性火山岩组合,未见玄武质岩石端员。该套火山岩自下而上大体可划分为两个火山喷发旋回(图 2),两个旋回之间见一层厚约 20~30 m 的火山角砾岩。第 I 喷发旋回以安山岩为主体,第 II 旋回则为英安质火山熔岩。安山岩类含斜长石、角闪石和黑云母斑晶,部分岩石中见有辉石斑晶,基质为半晶质结构,由微细粒维晶和火山玻璃组成,可见少量磷灰石和磁铁矿,岩石总体较新鲜,偶见长石的高岭土化和暗色矿物的轻微绿泥石化。英安岩类发育气孔、杏仁构造及斑状结构、无斑隐晶结构,斑状结构英安岩含有石英、角闪石、黑云母及斜长石斑晶,基质则为

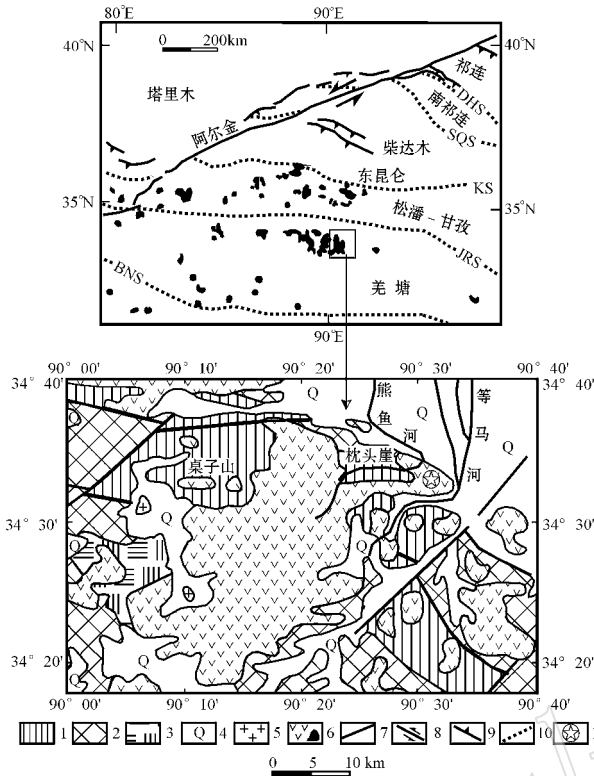


图 1 藏北羌塘地区新生代火山岩区域分布图

Fig. 1 Regional distribution of Cenozoic volcanic rocks in Qiangtang region, north Tibet

1—中侏罗统 2—上侏罗统 3—白垩系 4—第四系 5—酸性侵入岩 6—新生代火山岩及其形成年龄 7—断裂 8—走滑断裂 9—推覆构造 10—缝合带 11—麻粒岩取样位置 ;DHS—党河南山断裂 ;SQS—南祁连缝合带 ;KS—昆仑缝合带 ;JRS—金沙江缝合带 ;BNS—班公—怒江缝合带

1—Middle Jurassic ;2—Upper Jurassic ;3—Cretaceous ;4—Quaternary ;5—acidic intrusive rock ;6—Cenozoic volcanic rocks and their forming age ;7—fault ;8—strike-slip fault ;9—thrust structure ;10—suture belt ;11—sample location of granulite ;DHS—Danghe-Nanshan fault ;SQS—south Qilian suture belt ;KS—Kunlun suture belt ;JRS—Jinshajiang suture belt ;BNS—Bangong-Nujiang suture belt

交织结构和玻晶交织结构。

本区寄主火山岩化学成分及微量元素分析结果列于表 1 和表 2 中。从表中可以看到,安山岩 SiO_2 含量为 56.59%~60.74%, 平均 58.21% ; Al_2O_3 含量为 13.78%~17.66%, 平均 15.37% ; MgO 含量为 2.01%~6.10%, 平均 3.97% ; $Na_2O > 2.50%$ (2.50%~3.90%, 平均 3.03%) ; $Na_2O/K_2O = 0.58 \sim 1.39$ (平均 0.96)。英安岩 SiO_2 含量为 61.91%~63.46%, 平均 62.74% ; Al_2O_3 含量为 15.53%~17.28%, 平均 16.30% ; MgO 含量为 1.26%~1.82%, 平均 1.55% ; $Na_2O > 3.20%$ (3.20%~4.00%, 平均 3.48%) ; $Na_2O/K_2O = 0.86 \sim 1.18$

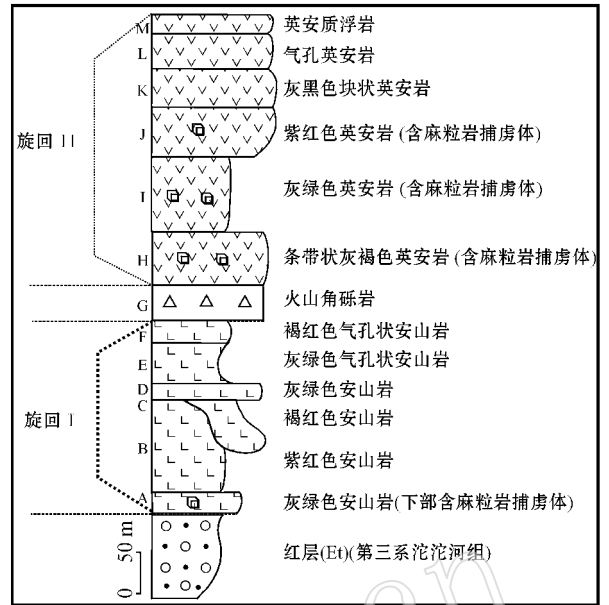


图 2 北羌塘枕头崖新生代火山岩柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of Cenozoic volcanic rocks distributed in Zhenyouya area, north Qiangtang region

(平均 0.95)。在 $(K_2O + Na_2O) - SiO_2$ 和 $K_2O - SiO_2$ 图解(图 3)中,本区寄主火山岩属于亚碱性高钾钙碱系列安山岩和英安岩类。

微量元素及稀土元素分析结果表明,本区安山岩类寄主火山岩富集 LILE,如 Cs、Rb、Ba、Th、U 和 Sr,亏损 HFSE,如 Ti、Nb 和 Ta。轻重稀土元素分异明显 ($La/Yb)_N = 20.46 \sim 46.36$ (平均 33.01),具弱负 Eu 异常, $\delta Eu = 0.72 \sim 0.84$ (平均 0.78)(图 4a、b)。安山岩质火山岩还显示了显著的埃达克质火山岩的性质(图 5),如高 Si ($> 1000 \times 10^{-6}$), $Sr/Y > 50$ 以及低 Yb ($< 2 \times 10^{-6}$),表明其应源于榴辉岩相的青藏高原加厚陆壳中下部 (> 45 km 深度)(Defant and Drummond, 1990, 1993)。

本区英安岩类寄主火山岩富集 LILE,如 Rb、Ba、Th、U 和 K 等,亏损 HFSE,如 Ti、Nb、Ta 和 Sr 等(图 4c), ($La/Yb)_N = 27.32 \sim 74.12$ (平均 63.47), $\delta Eu = 0.60 \sim 0.79$ (平均 0.66)。值得注意的是,本区英安岩 Sr 的显著相对亏损(图 4c)与安山岩类形成显著差别,说明它应源自斜长石稳定的麻粒岩相源区(Defant and Drummond, 1990, 1993)。

从 $La/Sm - La$ 和 $Zr/Sm - Zr$ 判别图(图 6)中可以清楚地看到,本区英安岩和安山岩类应分别来自不同的岩浆源区的局部熔融,而并非同源岩浆分离结晶的产物。

表 1 寄主安山岩常量($w_B/\%$)及微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 1 Major ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) analyses of the andesites

样号	P22H5	P10H5	P14H6	P11H6	P11H7	P7H4	P16H6	P10H6	P13H3	P12H5	P3H6
SiO ₂	56.59	56.65	57.43	57.53	57.68	57.94	58.56	58.59	58.98	59.57	60.74
TiO ₂	0.65	0.75	0.50	0.85	0.87	0.82	0.97	0.77	0.52	0.55	0.50
Al ₂ O ₃	15.31	14.21	14.21	14.75	14.21	13.78	15.09	15.31	17.50	17.06	17.66
Fe ₂ O ₃	2.60	1.80	6.93	1.80	1.62	1.00	2.50	1.50	1.15	1.10	1.40
FeO	2.90	3.50	1.97	3.60	2.68	3.60	3.00	3.10	3.05	3.00	3.50
MnO	0.13	0.03	0.16	0.12	0.06	0.01	0.10	0.04	0.14	0.01	0.34
MgO	6.10	5.31	4.57	3.66	3.33	4.62	3.87	2.68	4.31	3.26	2.01
CaO	5.45	5.03	4.56	4.13	4.73	4.25	3.68	4.63	4.43	4.88	2.80
Na ₂ O	3.30	2.60	3.30	2.60	2.60	2.80	2.50	2.80	3.70	3.90	3.20
K ₂ O	2.50	3.90	2.70	4.20	4.20	3.90	4.30	3.70	2.80	2.80	2.30
P ₂ O ₅	0.40	0.80	0.43	0.90	0.87	0.77	0.87	0.77	0.50	0.43	0.27
LOI	3.86	4.85	2.87	4.34	6.82	5.83	3.90	5.80	2.30	3.10	4.67
Total	99.79	99.43	99.63	99.48	99.67	99.32	99.34	99.69	99.38	99.66	99.39
Mg [#]	0.685	0.668	0.493	0.577	0.609	0.672	0.589	0.539	0.674	0.616	0.449
Li	34.9	42.6	21.2	16.3	15.7	18.1	16.0	15.3	14.0	16.0	10.5
Be	1.19	3.32	2.12	3.60	3.44	4.19	3.75	3.24	1.97	2.12	1.90
Sc	17.8	15.3	12.8	16.2	16.1	15.0	16.5	14.3	13.1	13.0	14.4
V	115	97.2	86.3	113	110	107	113	104	92.7	87.9	95.8
Cr	416	298	215	363	366	348	368	303	223	221	155
Co	39.8	29.8	34.9	35.8	33.5	36.0	37.6	35.6	32.9	38.7	51.7
Ni	232	196	115	206	230	220	211	163	112	117	85.8
Cu	25.9	38.9	14.1	52.6	47.0	41.1	60.2	36.3	15.9	17.0	17.1
Zn	54.8	79.4	56.8	74.2	94.2	66.8	83.4	55.7	57.9	54.0	66.5
Ga	12.4	13.3	14.0	14.2	13.3	13.4	13.7	14.4	15.2	14.5	14.9
Ge	1.21	1.54	1.18	1.45	1.25	1.48	1.36	1.13	1.30	1.26	1.07
As	17.1	13.8	18.3	15.9	13.6	15.3	27.9	13.6	15.5	7.33	36.6
Rb	82.9	184	98.7	219	221	197	223	197	82.8	103	120
Sr	1165	1379	1653	1548	1546	1611	1555	1476	1629	1554	1003
Y	17.6	18.6	13.9	21.9	22.5	21.2	23.1	20.5	14.5	14.3	19.6
Zr	181	303	221	344	362	344	363	340	227	228	147
Nb	8.90	13.4	10.3	14.2	14.5	14.4	15.2	14.3	10.3	9.95	7.71
Mo	1.67	0.664	1.59	0.654	0.916	0.821	0.807	1.20	1.38	1.21	1.61
Cd	0.097	0.199	0.120	0.144	0.197	0.178	0.158	0.153	0.121	0.14	0.200
In	0.031	0.048	0.029	0.044	0.056	0.044	0.049	0.043	0.040	0.033	0.023
Sn	2.19	4.12	2.84	3.76	4.75	3.95	3.79	4.00	2.71	3.00	2.19
Sb	1.15	1.11	0.811	1.61	1.43	1.71	1.34	1.09	0.747	1.72	0.556
Cs	3.08	2.62	3.99	3.39	3.29	3.94	3.30	4.09	3.64	3.26	8.67
Ba	1481	1641	1437	1806	1807	1627	1789	1753	1552	1441	1530
Hf	5.02	8.97	6.48	10.3	10.6	9.88	10.6	9.55	6.53	6.49	4.49
Ta	0.547	0.770	0.573	0.877	1.08	0.786	0.852	0.803	0.614	0.567	0.587
W	62.3	28.4	107	62.5	64.8	78.9	73.3	112	102	131	87.0
Tl	0.307	0.822	0.566	0.795	0.771	0.860	0.837	0.618	0.432	0.441	0.706
Pb	30.1	27.5	32.0	27.7	29.3	28.2	28.1	28.5	30.8	25.3	32.0
Bi	0.102	0.067	0.402	0.109	0.171	0.049	0.075	0.103	0.194	0.193	0.042
Th	17.6	18.2	21.1	19.7	19.6	18.5	19.3	19.3	21.7	20.8	13.0
U	3.57	3.54	4.16	3.79	3.78	3.45	3.54	3.57	4.24	4.42	3.94
La	57.5	70.7	70.1	74.4	74.1	69.1	74.6	74.7	76.6	71.8	43.3
Ce	108	138	133	152	152	139	148	147	143	136	84.7
Pr	11.0	14.8	13.2	16.4	16.8	15.5	16.1	16.0	14.1	13.5	9.07
Nd	41.0	56.6	48.5	62.6	64.2	59.1	61.2	59.3	51.0	48.8	33.3
Sm	7.16	9.15	7.30	10.4	10.5	9.38	10.1	9.49	7.74	7.24	5.89
Eu	1.61	2.10	1.66	2.21	2.37	2.27	2.30	2.10	1.73	1.76	1.42
Gd	5.19	6.78	4.95	7.66	7.58	6.74	7.52	6.91	5.49	5.14	4.60
Tb	0.660	0.784	0.596	0.924	0.993	0.837	0.951	0.885	0.653	0.591	0.586
Dy	3.26	3.96	3.01	4.58	4.60	4.13	4.66	4.02	3.05	3.02	3.31
Ho	0.633	0.679	0.492	0.762	0.795	0.727	0.805	0.694	0.500	0.500	0.634
Er	1.70	1.85	1.31	2.12	2.18	1.88	2.25	1.92	1.47	1.35	1.82
Tm	0.221	0.231	0.167	0.270	0.275	0.263	0.300	0.244	0.172	0.162	0.230
Yb	1.49	1.59	1.08	1.82	1.81	1.68	1.95	1.70	1.22	1.16	1.52
Lu	0.229	0.263	0.167	0.267	0.258	0.243	0.302	0.241	0.180	0.157	0.230

注: 常量元素由中国科学院地球化学研究所采用湿法分析, 微量元素由中国科学院地球化学研究所采用 ICP-MS 法分析。

表 2 寄主英安岩常量($w_B/\%$)及微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 2 Major($w_B/\%$) and trace elements($w_B/10^{-6}$) analyses of the dacites

样品	P4H	P25H1	P25H6	P1H5	P3H1	P2H4	P8H	P1H2	P2H9	P1H1	P24H3	P25H8
SiO ₂	61.91	62.24	62.31	62.43	62.76	62.83	62.86	62.94	62.96	63.03	63.20	63.46
TiO ₂	1.10	1.37	1.30	1.30	1.15	1.12	1.20	1.48	1.26	1.22	1.30	1.38
Al ₂ O ₃	16.40	15.53	16.62	17.06	17.28	16.18	15.75	16.18	16.48	16.40	15.75	15.96
Fe ₂ O ₃	2.21	2.20	1.90	1.45	1.40	1.85	1.65	1.40	1.50	1.45	2.73	1.80
FeO	3.19	2.50	3.50	3.25	3.20	3.51	3.55	3.20	3.50	3.49	2.27	2.90
MnO	0.06	0.14	0.13	0.12	0.08	0.10	0.05	0.12	0.07	0.13	0.08	0.12
MgO	1.55	1.26	1.62	1.52	1.61	1.66	1.51	1.52	1.82	1.54	1.61	1.42
CaO	4.09	4.88	3.41	2.61	2.97	3.08	3.85	3.08	2.76	3.14	3.13	3.28
Na ₂ O	3.50	3.40	3.30	4.00	3.20	3.50	3.30	3.40	3.31	3.40	3.90	3.50
K ₂ O	3.80	3.70	3.60	3.40	3.70	3.60	3.60	3.71	3.50	3.70	3.70	3.80
P ₂ O ₅	0.73	0.93	0.83	0.90	0.83	0.87	0.73	0.90	0.76	1.13	0.83	0.84
LOI	0.90	1.42	1.02	1.50	1.20	1.05	1.30	1.30	1.30	1.19	1.33	1.03
Total	99.44	99.57	99.54	99.54	99.38	99.35	99.35	99.23	99.22	99.82	99.83	99.49
Mg [#]	0.363	0.347	0.374	0.394	0.413	0.383	0.369	0.400	0.422	0.386	0.389	0.377
Li	22.9	21.0	23.4	19.0	22.6	16.1	19.4	20.5	18.6	22.6	23.6	21.4
Be	3.75	2.77	7.48	2.03	2.77	2.28	2.68	2.55	2.04	3.16	2.53	2.38
Sc	9.70	7.92	15.1	8.57	8.74	9.15	8.77	8.85	9.08	9.66	8.41	8.40
V	68.9	69.7	65.8	54.7	63.3	57.1	60.7	60.8	70.4	63.2	66.8	71.7
Cr	16.2	13.6	56.0	17.5	12.9	12.5	10.6	9.61	10.7	10.4	13.2	15.7
Co	32.6	18.2	75.6	29.1	38.7	18.7	24.0	25.7	30.7	50.8	38.0	61.9
Ni	9.42	6.81	9.13	10.2	6.85	6.99	5.37	6.20	7.14	8.02	6.05	7.71
Cu	8.09	7.12	28.8	9.38	18.9	12.7	11.3	13.9	15.6	12.4	10.7	9.49
Zn	117	111	118	106	115	92.0	112	121	107	116	130	121
Ga	20.6	18.7	23.3	20.5	20.0	21.1	18.6	23.7	20.5	21.5	19.6	19.6
Ge	1.54	1.45	3.38	1.48	1.67	1.57	1.51	1.50	1.47	1.45	1.65	1.66
As	7.66	856	204	74.8	5.51	4.22	4.65	54.9	0.074	68.5	26.1	206
Rb	179	163	176	162	179	182	171	183	178	168	168	172
Sr	611	617	630	505	558	526	550	545	554	539	647	634
Y	24.0	22.8	24.0	22.0	23.5	23.0	23.2	24.6	24.8	23.2	24.7	23.8
Zr	513	538	595	537	534	546	527	599	523	557	615	521
Nb	40.8	41.6	40.0	36.0	36.3	38.1	37.2	41.5	39.4	37.8	43.1	42.8
Mo	3.16	4.44	3.33	3.67	3.22	4.90	3.10	4.06	3.45	3.89	3.24	3.21
Cd	0.164	0.192	0.698	0.275	0.163	0.230	0.168	0.283	0.218	0.248	0.245	0.195
In	0.053	0.040	0.054	0.056	0.052	0.059	0.048	0.062	0.048	0.060	0.045	0.045
Sn	4.43	4.51	7.48	4.23	4.25	5.03	4.33	5.25	4.84	4.49	4.97	5.01
Sb	0.580	0.393	0.566	0.437	0.427	0.192	0.424	0.739	0.293	0.571	0.447	0.357
Cs	2.41	3.04	4.42	3.46	2.93	2.74	2.23	3.65	2.52	3.42	2.99	3.03
Ba	1633	1686	1715	1762	1646	1701	1548	1823	1630	1675	1750	1775
Hf	13.9	14.0	16.0	16.2	14.4	14.6	12.9	16.0	13.5	14.7	15.6	15.2
Ta	1.92	1.92	1.81	1.92	1.84	1.96	1.72	2.17	2.00	2.01	1.92	1.97
W	119	54.5	443	162	185	80.8	91.0	126	137	237	199	275
Tl	0.698	0.745	0.661	0.754	0.694	0.639	0.703	0.989	0.567	0.731	0.869	0.762
Pb	38.7	37.0	43.0	37.0	36.1	33.8	40.5	41.5	32.9	38.6	38.1	38.2
Bi	0.124	0.081	0.118	0.217	0.091	0.155	0.142	0.102	0.073	0.101	0.077	0.099
Th	33.4	33.1	29.9	31.4	30.6	35.7	31.7	34.0	31.8	30.1	34.7	33.4
U	4.19	4.12	3.59	3.83	3.99	4.33	4.00	3.92	4.17	3.85	4.13	3.97
La	129	132	146	142	135	140	129	156	132	142	145	146
Ce	223	246	271	176	222	258	235	272	224	256	247	256
Pr	25.4	26.3	27.1	26.1	26.5	26.3	24.6	29.6	25.5	27.9	28.4	28.2
Nd	91.4	93.7	93.3	94.0	92.7	88.3	87.5	103	88.9	96.6	99.9	102
Sm	13.8	13.7	12.4	14.1	13.9	13.0	13.8	15.1	14.1	14.3	15.0	15.2
Eu	2.57	2.76	3.00	3.05	2.55	2.77	2.39	2.98	2.66	2.76	2.83	2.83
Gd	9.66	10.0	9.87	11.3	10.1	10.5	9.68	11.2	10.5	10.3	10.8	10.6
Tb	1.09	1.13	1.10	1.29	1.18	1.21	1.13	1.28	1.23	1.21	1.28	1.20
Dy	5.33	5.02	5.33	5.44	5.19	5.71	4.95	5.56	5.43	5.45	5.29	5.55
Ho	0.835	0.798	0.904	0.812	0.811	0.885	0.846	0.842	0.832	0.832	0.860	0.882
Er	2.19	1.99	2.19	2.13	2.06	2.14	2.03	2.22	2.20	2.04	2.12	2.16
Tm	0.268	0.229	0.193	0.217	0.251	0.234	0.238	0.241	0.240	0.248	0.244	0.246
Yb	1.69	1.46	1.84	1.49	1.57	1.49	1.41	1.52	1.58	1.47	1.61	1.44
Lu	0.232	0.190	0.137	0.176	0.220	0.211	0.200	0.203	0.204	0.197	0.212	0.198

注：常量元素由中国科学院地球化学研究所采用湿法分析，微量元素由中国科学院地球化学研究所采用 ICP-MS 法分析。

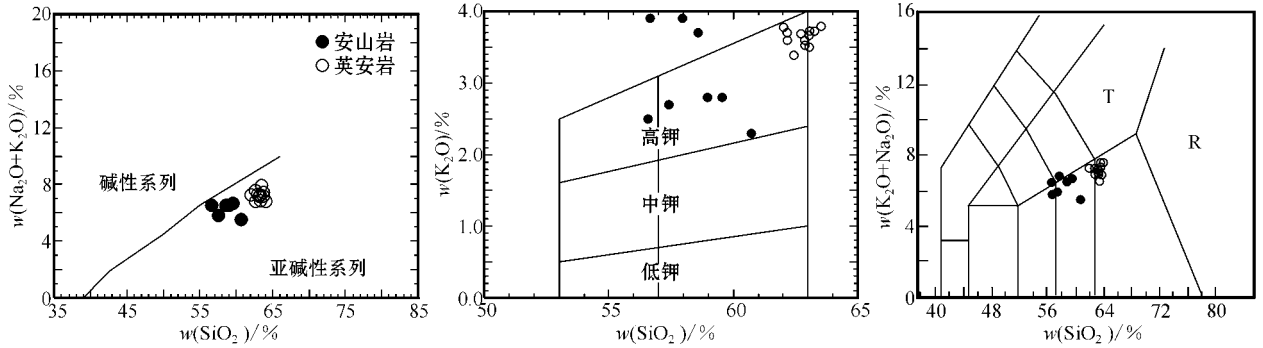


图 3 北美塘枕头崖新生代火山岩系列划分及 TAS 分类命名图解

Fig. 3 $(K_2O+Na_2O)-SiO_2$, K_2O-SiO_2 and TAS classification schemes for Cenozoic volcanic rocks

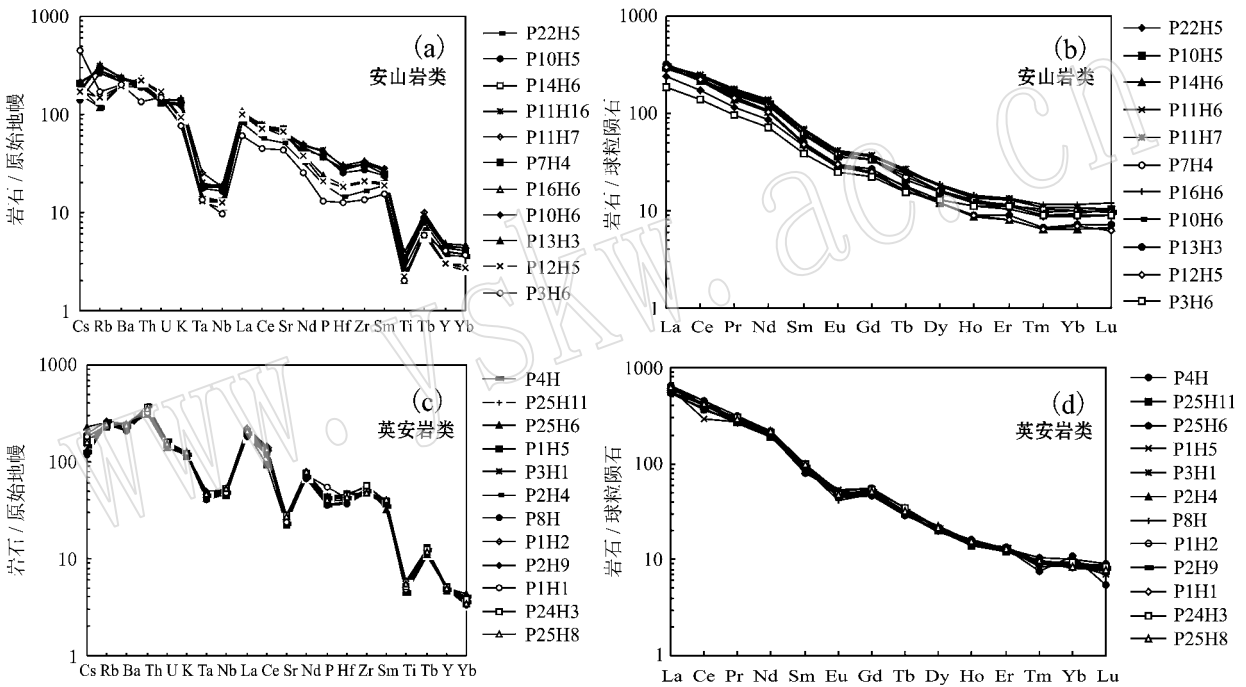


图 4 北美塘枕头崖新生代火山岩不相容元素原始地幔标准化配分图解及稀土元素球粒陨石标准化配分图解

Fig. 4 Primary mantle normalized trace element patterns and chondrite-normalized rare earth element patterns

3 麻粒岩岩相学特征及形成温压条件

笔者在北美塘枕头崖新生代火山岩第 I 旋回底部灰绿色安山岩和第 II 旋回灰褐、紫红色英安岩中均发现了数量较多的厘米级麻粒岩捕虏体(图 7a), 并见有颗粒粗大的透长石捕虏晶及少量石榴石捕虏晶。麻粒岩捕虏体呈褐红色或呈基性程度较高的灰黑色, 大小一般在 2~6 cm 之间, 最大可达 12 cm。常见块状构造(部分捕虏体具弱片麻状构造), 中细粒粒状变晶结构(图 7b)。麻粒岩捕虏体可分为二辉

石麻粒岩和单斜辉石麻粒岩两种主要类型: 二辉石麻粒岩主要矿物组合为斜方辉石+单斜辉石+斜长石+碱性长石+黑云母, 单斜辉石麻粒岩主要矿物组合为单斜辉石+斜长石+石英。

本文对 P2126H10 和 P2106H 两个典型的麻粒岩捕虏体进行了电子探针分析。结果(表 3)表明, P2126H10 为典型的二辉石麻粒岩, 主要组成矿物为单斜辉石+斜方辉石+斜长石+碱性长石+黑云母, 其中斜方辉石为无色-浅红色, 多色性明显, $Fs_{32.09-33.73}En_{64.92-66.64}Wo_{1.27-1.34}$, 属于典型的紫苏辉石种属。单斜辉石为浅绿色, $Fs_{27.40}En_{27.84}$

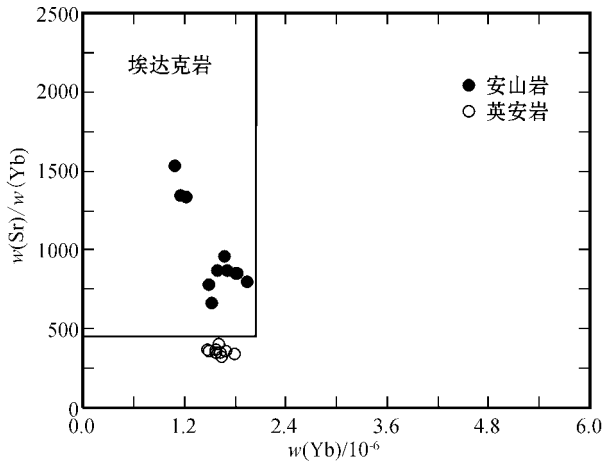


图 5 北羌塘枕头崖新生代火山岩 Sr/Yb - Yb 图解 (引自 Defant and Drummond, 1990)

Fig. 5 Sr/Yb - Yb diagram of Cenozoic volcanic rocks (from Defant and Drummond, 1990)

WO_{44.76} 属于次透辉石种属。黑云母为棕红色,富 Fe、Ti, Mg/(Mg + Fe*) (MF) > 0.5 (0.73~0.75), Ti > 0.3 (0.770 0~0.773 4), 属钛铁黑云母类。斜长石为他形粒状, An = 51.03~61.49, 属于拉长石种属。碱性长石中 Or 为 63.62, Ab 为 30.77, 为钠透长石。根据 Wood 和 Banno (1973) 的二辉石温度计, 得到该二辉石麻粒岩平衡温度为 783~818℃。

P2106H 中的捕虏体为典型的单斜辉石麻粒岩, 其矿物组合较为简单, 主要组成矿物为单斜辉石 + 斜长石 + 石英。其中, 单斜辉石, WO_{44.80~44.99} En_{33.19~33.34} Fs_{21.82~21.86}, 为次透辉石种属。斜长石 An = 50.88~65.90, 仍属拉长石类。

根据 Ellis (1980) 的单斜辉石-斜长石-石英组合地质压力计, 本文对 P2106H 中的单斜辉石麻粒岩捕虏体的形成压力进行了计算, 计算结果如下:

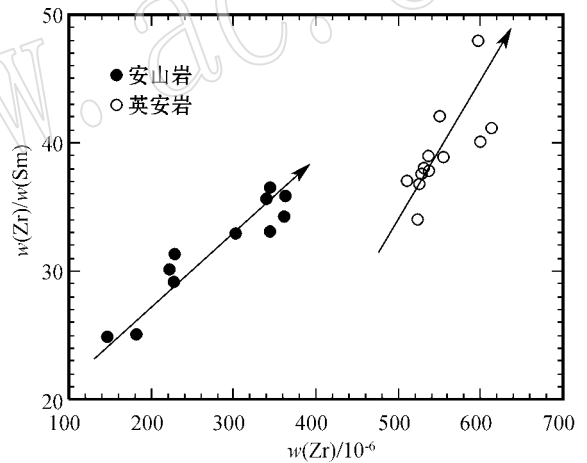
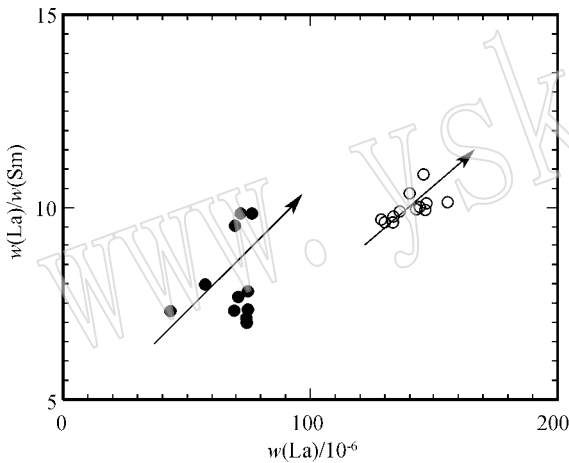


图 6 北羌塘枕头崖新生代火山岩 La/Sm - La 和 Zr/Sm - Zr 图解 (引自 Allegre and Minster, 1978)

Fig. 6 La/Sm - La and Zr/Sm - Zr diagrams for Cenozoic volcanic rock (from Allegre and Minster, 1978)

① 斜长石 (表 3 中 11、12 探针分析点平均值): Si⁴⁺ (0.956 1) Ti⁴⁺ (0.000 5) Al³⁺ (0.511 0) Fe³⁺ (0.007 4) Mg²⁺ (0.002 6) Mn²⁺ (0.000 4) Ca²⁺ (0.202 6) Na⁺ (0.136 0) K⁺ (0.012 2), 分子式为: (Na_{0.367}K_{0.033})_{1.4}Ca_{0.546}Fe_{0.02}Al_{1.378}Si_{2.578}O₈, 端员组成: Ab_{38.80}An_{57.70}Or_{3.50}。

② 单斜辉石 (表 3 中 9、10 探针分析点平均值): Si⁴⁺ (1.837) Ti⁴⁺ (0.012) Al^{3+(IV)} (0.163) Al^{3+(VI)} (0.034) Fe³⁺ (0.080) Fe²⁺ (0.346) Mg²⁺ (0.647) Mn²⁺ (0.017) Ca²⁺ (0.782) Na⁺ (0.080) K⁺ (0.000), 端员组成为: T_{Sch16.3}(Ac +

Jd)₈Hd_{36.6}Di_{39.20}。

③ 形成压力: 以 P2126H10 二辉石麻粒岩中二辉石温度计测温结果 (783~818℃) 为参考, 取 T = 1073 K, 则计算获得 ln K_d = -2.727, 单斜辉石麻粒岩捕虏体形成压力值为 0.842 GPa。根据 Ellis (1980) 文献中对计算结果的校正方法, 得到校正后的压力值为: p_{max} = 0.858 GPa (相当于 28.31 km 的深度), p_{min} = 0.845 GPa (相当于 27.90 km 的深度)。从而初步表明, 北羌塘枕头崖新生代火山岩中单斜辉石麻粒岩捕虏体的来源深度大约在 27~28 km 之间。

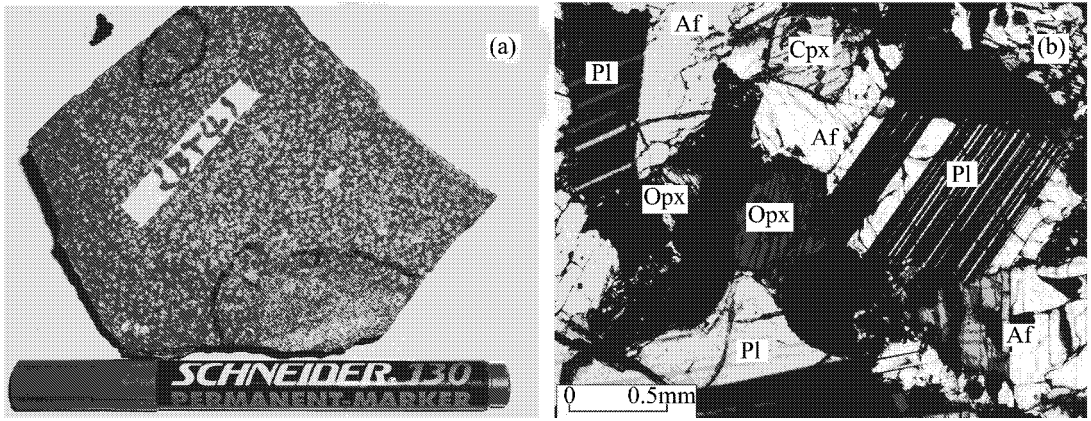


图 7 麻粒岩捕虏体手标本 (a) 及二辉石麻粒岩捕虏体镜下结构和矿物组合 (b 正交偏光)

Fig. 7 Photos of granulite samples (a) and structure, mineral assemblage of the two-pyroxene granulite in thin section under microscope (b crossed polarized)

Cpx—单斜辉石 ; Opx—斜方辉石 ; Pl—斜长石 ; Af—碱性长石
 Cpx—clinopyroxene ; Opx—orthopyroxene ; Pl—plagioclase ; Af—alkaline feldspar

表 3 北羌塘枕头崖地区新生代火山岩中麻粒岩捕虏体电子探针分析结果

Table 3 Electron microprobe analysis mineral in granulites from Cenozoic volcanic rocks, north Qiangtang region

样号 点号 矿物	P2126H10								P2106H				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Cpx	Opx	Opx	Pl	Pl	Af	Bi	Bi	Cpx	Cpx	Pl	Pl	Q
SiO ₂	51.20	49.26	51.30	54.26	54.91	64.82	36.51	35.33	47.63	48.15	57.87	57.04	99.53
TiO ₂	0.15	0.11	0.11	0.00	0.04	0.19	7.11	7.09	0.42	0.38	0.00	0.08	0.00
Al ₂ O ₃	1.01	2.30	2.81	30.61	29.45	19.24	15.56	16.50	4.12	4.59	26.01	26.09	0.03
Cr ₂ O ₃	0.03	0.08	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.18
FeO	16.40	21.64	21.55	0.27	0.13	0.88	10.50	11.47	13.31	13.23	0.51	0.55	0.00
MnO	0.70	0.80	0.94	0.00	0.01	0.00	0.06	0.16	0.51	0.56	0.00	0.05	0.06
MgO	9.35	25.22	23.27	0.14	0.09	0.14	17.32	17.40	11.36	11.32	0.13	0.08	0.19
CaO	20.91	0.67	0.67	11.61	10.89	1.13	0.06	0.00	21.42	21.16	11.93	10.79	0.00
Na ₂ O	0.45	0.07	0.04	2.89	3.19	3.42	0.46	0.44	1.17	1.00	3.09	5.34	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.76	0.88	10.75	8.97	8.98	0.00	0.00	0.49	0.66	0.02
NiO	0.00	0.02	0.00	0.07	0.18	0.00	0.00	0.03	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00
Total	100.20	100.17	100.68	100.61	99.79	100.63	96.55	97.40	100.04	100.38	100.04	100.68	100.01
[O]=	6	6	6	8	8	8	22	22	6	6	8	8	2
Si	1.9752	1.8471	1.9001	2.4270	2.4726	2.9402	5.2808	5.1023	1.8338	1.8397	2.5945	2.5621	0.9969
Al	0.0459	0.1016	0.1227	1.6137	1.5630	1.0288	2.6526	2.8085	0.1870	0.2067	1.3744	1.3812	0.0004
Ti	0.0044	0.0031	0.0031	0.0000	0.0014	0.0065	0.7734	0.7700	0.0122	0.0109	0.0000	0.0027	0.0000
Cr	0.0009	0.0024	0.0000	0.0000	0.0000	0.0018	0.0000	0.0000	0.0009	0.0000	0.0000	0.0000	0.0014
Fe	0.5291	0.6787	0.6675	0.0101	0.0049	0.0334	1.2701	1.3853	0.4286	0.4227	0.0191	0.0207	0.0000
Mn	0.0229	0.0254	0.0295	0.0000	0.0004	0.0000	0.0074	0.0196	0.0166	0.0181	0.0000	0.0019	0.0005
Mg	0.5376	1.4095	1.2847	0.0093	0.0060	0.0095	3.7340	3.7455	0.6519	0.6447	0.0087	0.0054	0.0028
Ca	0.8643	0.0269	0.0266	0.5564	0.5254	0.0549	0.0093	0.0000	0.8836	0.8662	0.5731	0.5193	0.0000
Na	0.0337	0.0051	0.0029	0.2506	0.2785	0.3009	0.1290	0.1232	0.0873	0.0741	0.2686	0.4651	0.0000
K	0.0000	0.0000	0.0000	0.0434	0.0506	0.6222	1.6551	1.6544	0.0000	0.0000	0.0280	0.0378	0.0003
Ni	0.0000	0.0006	0.0000	0.0025	0.0065	0.0000	0.0000	0.0035	0.0019	0.0000	0.0004	0.0000	0.0000
总计	4.0139	4.1004	4.0370	4.9131	4.9092	4.9988	15.512	15.612	4.1038	4.0831	4.8667	4.9961	1.0023
Wo	44.76	1.27	1.34						44.99	44.80			
En	27.84	66.64	64.92						33.19	33.34			
Fs	27.40	32.09	33.73						21.82	21.86			
An				51.03	61.49	5.61					65.90	50.80	
Ab				29.47	32.59	30.77					30.88	45.50	
Or				5.10	5.92	63.62					3.20	3.70	
Ca							1.86	0.00					
Mg							74.48	73.00					
Fe							25.33	27.00					

由西安地质矿产研究所电子探针室分析(2001)

4 地质意义讨论

上述初步分析资料表明,北羌塘枕头崖新生代火山岩 P2126H10 样品中的捕虏体,属于典型的二辉石麻粒岩相岩石,而 P2106H 中的捕虏体为单斜辉石麻粒岩,其来源深度较大,是直接来自青藏高原加厚陆壳中部的岩石样品。

寄主火山岩地球化学特征表明,本区安山岩类与英安岩类具有各自独立的岩浆源区。安山岩类显示了明显的埃达克岩属性,表明其源于青藏高原加厚陆壳下部榴辉岩相源区。而英安岩类显著的低 Sr ($Sr < 660 \times 10^{-6}$) 特征充分表明其源区应为斜长石稳定的麻粒岩相区。如前所述,本区英安岩和安山岩中的麻粒岩捕虏体形成压力为 0.845 ~ 0.858 GPa,相当于 27 ~ 30 km 的深度,在这一深度范围内,斜长石仍处在其稳定区间内。因此,有理由认为,本区英安岩类的原生岩浆应来源于约 30 km 深度的青藏高原加厚陆壳中部,麻粒岩捕虏体应代表了本区英安岩类的源区物质组成。

多年来,青藏高原特殊的双倍加厚陆壳性质,尤其是加厚陆壳中、下部的物质组成、热状态、局部熔融特征一直是围绕青藏高原深部地质研究的一个难题,并直接地制约着人们对高原形成演化、隆升机制、钾质-超钾质以及高钾钙碱岩系岩浆活动过程的理解和认识。目前,人们大多利用出露地表的基底变质岩系来推断高原上地壳的物质组成(Kapp *et al.*, 2000),利用壳源原生岩浆间接反演(赖绍聪等, 2001a, 2001b)、地球物理和地热测量来推断高原下地壳及上地幔的性质。至今为止,还没有建立在详细岩相学和微观结构基础上直接的高原中、下地壳和上地幔岩石学结构剖面,这主要是由于深源样品难以获得而造成的。显然,北羌塘枕头崖新生代火山岩中典型麻粒岩捕虏体的获得,提供了研究青藏高原特殊的加厚陆壳中部物质组成、矿物相态、地球化学模型和热状态的直接天然深源岩石探针,具有极为重要的研究价值。它将对深入了解青藏高原北部加厚陆壳的岩石学结构、中、下部地壳物质组成、相关关系、温度、压力条件,以及壳源岩石局部熔融机理等重大学术问题有所促进。

致谢:西北大学高山特聘教授帮助鉴定了本文薄片,青岛海洋大学李三忠教授、中国地质大学罗照

华教授帮助计算了麻粒岩形成压力,在此致谢。

References

- Allegre C J and Minster J F. 1978. Quantitative method of trace element behavior in magmatic processes[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 38: 1 ~ 25.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662 ~ 665.
- Defant M J and Drummond M S. 1993. Mount St Helens: potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc[J]. *Geology*, 21: 547 ~ 550.
- Ding L, Zhong D, Yin A, *et al.* 2001. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Nanche Barwa) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 192: 423 ~ 438.
- Ellis D J. 1980. Osumilite-sapphirine-quartz granulites from Enderby Land, Antarctica: P-T conditions of metamorphism, implications for garnet-cordierite equilibria and the evolution of the deep crust[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 74: 201 ~ 210.
- Gao S, Luo T C, Zhang B R, *et al.* 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 1959 ~ 1975.
- Hacker B R, Gnos E, Ratschbacher L, *et al.* 2000. Hot and dry deep crustal xenoliths from Tibet[J]. *Science*, 287: 2463 ~ 2466.
- Han Qingjun and Shao Ji'an. 2000. Mineral chemistry and metamorphic temperature-pressure of the granulite xenoliths from Mesozoic granulite in the Kalaqin area, Inner Mongolia[J]. *Earth Science*, 25(1): 21 ~ 26 (in Chinese with English abstract).
- Kapp P, Yin A, Manning C E, *et al.* 2000. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet[J]. *Geology*, 28: 19 ~ 22.
- Lai Shaocong and Liu Chiyang. 2001a. Enriched upper mantle and eclogite lower crust in north Qiangtang, Qinghai-Tibet plateau: petrological and geochemical evidence from the Cenozoic volcanic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 459 ~ 468 (in Chinese with English abstract).
- Lai Shaocong, Liu Chiyang and O'Reilly S Y. 2001b. Petrogenesis and its continental dynamics significance of the Neogene high-potassium calc-alkaline volcanic rocks association from north Qiangtang, Tibetan plateau[J]. *Science in China (D)*, 44(Supp.): 34 ~ 42 (in Chinese).
- Li Dewei, Liao Qun'an, Yuan Yanming, *et al.* 2002. Discovery of the basic granulite xenolith in the metamorphic rock series and its tectonic significance, middle part of the Himalaya orogenic belt[J]. *Earth Science*, 27(1): 80 (in Chinese).
- Liu Y and Zhong D. 1997. Petrology of high-pressure granulites from the eastern Himalayan syntaxis[J]. *J. Metamorphic Geol.*, 15: 451

~466.

Lin Jinhui, Yi Haisheng, Zhao Bing, *et al.*. 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and its significance of the Cenozoic volcanic rocks from Zuerkenwula mountains, north Tibet [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 23 (3): 31~39 (in Chinese with English abstract).

Shao Ji'an, Han Qingjun and Li Huimin. 2000. Discovery of the Mesozoic granulite xenoliths from the North China [J]. *Science in China (D)*, 30 (Supp.): 148~153 (in Chinese).

Vander Hilst R D and McDonough W F. 1999. *Composition, Deep Structure and Evolution of Continents* [M]. Elsevier, 342.

Wood B J and Banno S. 1973. Garnet orthopyroxene relationships in simple and complex systems [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 42: 109.

Yamamoto H. 1993. Contrasting metamorphic P-T-time paths of the Kohistan granulites and tectonics of the western Himalaya [J]. *J. Geol. Soc., London*, 150: 843~856.

Zheng Xiangshen, Bian Qiantao and Zheng Jiankang. 1996. Study on the Cenozoic volcanic rocks from Hoh Xil area, Qinghai Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12(4): 530~545 (in Chinese with English abstract)

Zhong D and Ding L. 1995. Discovered high-pressure granulite from Namjagabarwa area, Tibet [J]. *Chinese Science Bulletin*, 14: 1343~

1345.

附中文参考文献

韩庆军, 邵济安. 2000. 内蒙古喀喇沁地区早中生代闪长岩中麻粒岩捕虏体矿物化学及变质作用温压条件 [J]. *地球科学*, 25(1): 21~26.

赖绍聪, 刘池阳. 2001a. 青藏高原北羌塘榴辉岩质下地壳及富集型地幔源区 [J]. *岩石学报*, 17(3): 459~468.

赖绍聪, 刘池阳, O'Reilly S Y. 2001b. 北羌塘新第三纪高钾钙碱火山岩系的成因及其大陆动力学意义 [J]. *中国科学(D辑)*, 44(增刊): 34~42.

李德威, 廖群安, 袁晏明, 等. 2002. 喜马拉雅造山带中段核部杂岩中基性麻粒岩的发现及构造意义 [J]. *地球科学*, 27(1): 80.

林金辉, 伊海生, 赵兵, 等. 2003. 藏北祖尔肯乌拉山地区新生代火山岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年及其意义 [J]. *矿物岩石*, 23(3): 31~39.

邵济安, 韩庆军, 李惠民. 2000. 华北克拉通早中生代麻粒岩捕虏体的发现 [J]. *中国科学(D辑)*, 30(增刊): 148~153.

郑祥身, 边千韬, 郑健康. 1996. 青海可可西里地区新生代火山岩研究 [J]. *岩石学报*, 12(4): 530~545.

www.yyskw.com