

囊谦盆地新生代高钾岩浆岩的地球化学特征： 岩石成因及其构造意义

程锦, 夏斌, 张玉泉

(中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 位于青藏高原东缘的囊谦高钾岩浆岩 (37.5 ~ 38.3 Ma) SiO_2 含量 49.9% ~ 66.6%, 富集 LREE 和 LILE (K, Rb, Sr, Ba, Th), 亏损 HREE 和 HFSE (Nb, Ta, Ti 等), 在微量元素蛛网图上 Nb, Ta, Ti 显示负异常。囊谦富钾岩浆岩的 Sr-Nd 同位素变化范围窄 ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70425 \sim 0.70548$, $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.51256 \sim 0.51273$), 显示出 EM I 富集趋势。通过对囊谦高钾岩石的元素和同位素地球化学的研究, 认为其源区同时受到了因俯冲而进入地幔的地壳物质及蚀变洋壳析出流体的改造和交代作用。这套钾质岩石的形成是受到了特提斯洋俯冲消减, 进而印度大陆与欧亚大陆碰撞, 以及之后发生的岩石圈由挤压转为拉张并由此产生的软流圈上涌等一系列动力体系的控制。

关键词: 钾质岩浆岩; 地球化学特征; 岩石成因; 构造意义

中图分类号: P595; P597 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1552(2008)03-0382-10

0 引言

高钾岩浆活动是壳-幔相互作用的产物, 对于研究和了解地幔组成与演化、地幔不均一性、壳幔相互作用以及恢复古构造环境等具有很重要的意义。青藏高原是印度大陆与亚洲大陆碰撞结合的产物, 在整个青藏高原及周边地区广泛发育有碰撞后高钾岩浆活动, 形成了大量的高钾岩浆岩。这些高钾岩石在空间和物质上记录了印度-欧亚板块的碰撞过程及碰撞后的陆内变形历史 (潘桂堂等, 1990; 孙鸿烈和郑度, 1998; 潘裕生和孔祥儒, 1998)。它在岩石类型及元素和同位素地球化学特征等方面与中国东部新生代岩浆活动完全不同, 显示出其独特的成岩背景和成岩机制 (Amaud *et al*, 1992; Tumer *et al*, 1993, 1996; Chung *et al*, 1998; Miller *et al*, 1999)。

前人对青藏高原及邻区新生代高钾岩浆活动开展大量研究工作, 尤其是高原北部的羌塘、可可西里、昆仑带以及高原东缘 (比如: Amund *et al*,

1992; Tumer *et al*, 1996; Chung *et al*, 1998; Miller *et al*, 1999; 邓万明, 1993; 邓万明和孙宏娟, 1998; 邓万明等, 1998, 2001; 丁林等, 1999; 张玉泉等, 2000; Wang *et al*, 2001), 并且对其火山岩的成因提出了一些理论模式。不过到目前为止对该地区高钾岩石的成因模式尚未形成一个较为统一的认识。青藏高原东北缘发育有新生代盆地, 盆地内广泛出露高钾岩浆岩。本文选择研究程度相对较低、位于藏东横断山北段的囊谦盆地内高钾岩石为研究对象, 对研究区典型高钾岩石开展系统的元素和同位素地球化学研究, 据此探讨其岩石成因及其动力学机制, 并在前人研究基础上提出一些新认识。

1 区域地质概况

囊谦盆地位于青海省东南部玉树地区, 属横断山北段。盆地呈近南北向延伸, 长逾 50 km, 东西宽 8 ~ 15 km, 澜沧江断裂带从区内穿过。该区是青藏高原东西向构造带与横断山南北向构造带的交汇部

收稿日期: 2008-01-21; 改回日期: 2008-03-03

第一作者简介: 程锦 (1975-), 女, 博士生, 助研, 地球化学专业。Email: chengjin@gig.ac.cn

位。控制盆地的边界断裂均为北西 - 南东走向, 东侧以一条逆冲断层与晚三叠世灰岩接触, 西侧的石炭 - 二叠纪灰岩被第三系角度不整合覆盖, 为一基底向东倾斜的不对称窄条状走滑拉分盆地 (图 1)。盆地沉积地层为早第三纪红层, 盆地四周石炭系 - 二叠系主要为灰岩和砂岩, 三叠系由砂岩、页岩、泥灰岩和煤层组成。盆地内的火山岩均呈规模较小的岩株、岩瘤、岩墙等产出, 一般仅数百米长, 数十米宽, 少数超过两公里。形态多为长条状或浑圆形, 成群产出, 广布较广, 与红层大都呈侵入接触关系, 也有的顺层出现。火山活动具早期爆发和晚期溢流喷发旋回特点。早期以火山碎屑岩类为主, 主要分布在盆地东侧, 呈下第三系红层夹层; 晚期火山活动主要为粗面岩类以及浅成侵入的钾长斑岩、二长斑岩和煌斑岩类。前人对该区岩浆岩做过初步的年代学研究, 高精度 Ar-Ar 同位素定年的结果, 全岩或单矿物黑云母的表面年龄在 (37.5 ~ 38.3) ± 0.2 Ma 的范围内 (张会化, 2004)。

2 岩石学特征

囊谦盆地高钾岩浆岩的岩石组合比较复杂, 岩性的空间变化大。主要为浅成侵入岩和火山岩类, 包括正长斑岩、二长斑岩和粗面岩, 其次为玄武岩、霞辉岩和煌斑岩等岩类。岩石大多比较新鲜, 局部有碳酸盐化, 普遍含透辉石斑晶。

正长斑岩: 岩石深灰色或灰绿色, 斑状结构。斑晶主要是透辉石、正长石、黑云母, 大小 (0.5 ~ 0.7) × (1 ~ 1.5) cm² 居多, 含量少于 5%, 基质由黑云母、透辉石、正长石等组成; 二长斑岩: 岩石灰白色, 斑状结构。斑晶主要是钾长石、透辉石、黑云母和石英, 含量在 10% 左右, 基质成分同斑晶; 粗面岩: 岩石灰白色或灰紫色, 具粗面结构。斑晶主要由黑云母 (5% ~ 8%) 和角闪石 (6%) 等组成, 基质由钾长石、黑云母和角闪石等组成; 玄武岩: 岩石灰黑色, 具斑状结构, 斑晶透辉石大小一般在 0.3 ~ 0.8 mm, 含量在 3% 左右, 基质由透辉石、长石等组成; 煌斑岩: 岩石灰色, 具斑状结构。斑晶由黑云母、钾长石和透辉石等组成, 大小一般在 0.2 ~ 0.5 mm, 含量在 3% ~ 5% 之间, 基质比较细, 矿物组成同斑晶; 霞辉岩: 岩石灰黑色, 等粒结构, 造岩矿

物由透辉石、黑云母、钾长石和霞石等组成。

3 分析方法

全岩主、微量元素和 Sr-Nd 同位素组成分析均在中国科学院广州地球化学研究所元素与同位素重点实验室完成。主元素和微量元素分析分别采用 Varian Vista 全谱直读等离子体光谱 (ICP-AES) 和 Perkin-Elmer ELAN 6000 ICP-MS 等离子体质谱 (ICP-MS) 分析, 标样为 BCR-1, 大部分元素的分析精度优于 3%, 具体的分析流程参阅文献 (刘颖等, 1996)。Sr-Nd 同位素分析采用 Micromass 多接收器等离子体质谱 (MC-ICP-MS) 测定, NBS987 标样 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710265 ± 12, LaJolla ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.511862 ± 10。整个过程中 Sr 空白含量低于 5 × 10⁻¹⁰ g, Nd 空白低于 5 × 10⁻¹¹ g, ⁸⁶Sr/⁸⁷Sr = 0.1194, ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219。⁸⁷Rb/⁸⁶Rb, ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 比值分别用 ⁸⁶Sr/⁸⁷Sr = 0.1194, ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 校正 (梁细荣等, 2003)。主 - 微量元素和 Sr-Nd 同位素分析结果分别列于见表 1 和表 2。

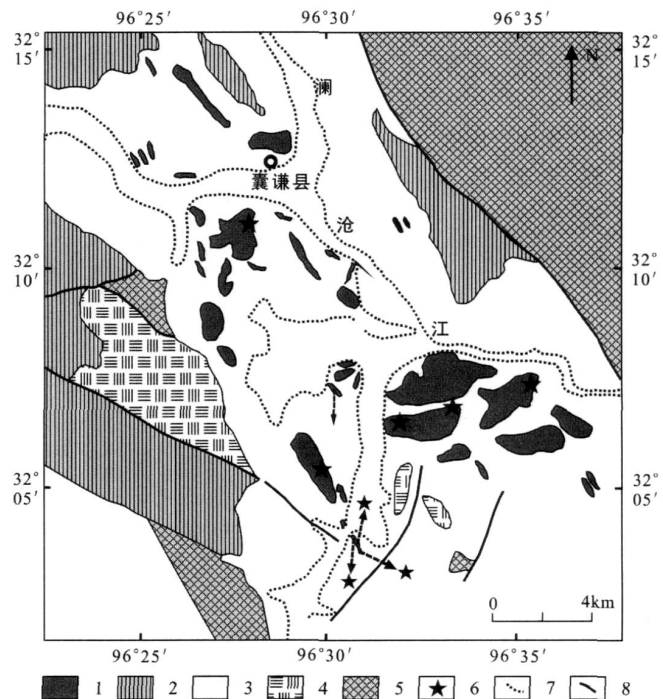


图 1 囊谦新生代盆地及岩浆岩分布地质简图

(据潘桂堂等, 1990 和囊谦县幅地质图修改)

- 1 - 早第三纪火山岩; 2 - 石炭系; 3 - 第三系; 4 - 二叠系;
- 5 - 三叠系; 6 - 采样点; 7 - 河流; 8 - 断层

Fig 1 Schematic geological map showing distribution of Cenozoic igneous rocks in the Nangqian basin, Qinghai Province

表 1 囊谦盆地新生代高钾岩浆岩的主元素 (%)和微量元素 (μg/g)分析结果

Table 1 Major (%) and trace (ug/g) element data for the Cenozoic high-K igneous rocks in Nangqian basin

样号	NQ3-2	NQ3-3	NQ3-4	NQ4-2	NQ4-3	NQ4-4	NQ4-6	NQ4-7	NQ4-8	NQ6-1	NQ6-2	NQ6-4	NQ7-1	NQ7-3	NQ7-4	NQ13-1	NQ13-2	NQ13-4
岩石名称	玄武岩	玄武岩	玄武岩	煌斑岩	煌斑岩	煌斑岩	二长斑岩	二长斑岩	二长斑岩	霞辉岩	霞辉岩	霞辉岩	正长斑岩	正长斑岩	正长斑岩	粗面岩	粗面岩	粗面岩
SiO ₂	56.83	57.10	55.87	50.29	50.78	50.60	66.20	66.36	66.55	49.86	50.71	51.84	56.03	55.90	56.95	61.72	61.73	61.91
Al ₂ O ₃	12.91	13.31	12.83	11.87	12.01	12.00	15.51	15.55	15.56	10.42	11.29	13.24	16.14	15.90	16.09	16.18	16.18	16.24
CaO	6.36	5.72	6.41	9.51	10.02	9.68	1.55	2.00	1.75	11.18	10.64	8.15	4.42	4.75	5.92	3.71	3.46	3.54
Fe ₂ O ₃	6.04	5.60	6.21	7.32	7.10	7.13	3.06	3.07	3.23	6.66	6.78	8.16	5.79	5.60	5.28	4.42	5.32	4.57
K ₂ O	3.69	3.76	3.76	4.56	4.70	5.23	5.50	5.57	5.60	5.76	6.21	4.62	6.18	6.11	5.76	4.21	4.97	4.91
MgO	8.37	7.97	8.32	9.64	9.69	9.70	1.32	1.43	1.47	10.20	8.99	6.69	4.08	3.97	3.64	2.51	2.56	2.53
MnO	0.08	0.07	0.09	0.11	0.10	0.12	0.05	0.05	0.04	0.10	0.10	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.06	0.05
Na ₂ O	3.44	3.47	3.50	2.63	2.20	1.80	4.99	5.02	4.97	1.38	1.86	3.65	3.32	3.48	3.80	5.22	4.12	4.73
P ₂ O ₅	0.52	0.48	0.54	1.19	1.22	1.21	0.32	0.32	0.34	1.57	1.39	1.24	0.48	0.49	0.48	0.45	0.44	0.45
TiO ₂	0.80	0.75	0.82	1.10	1.08	1.05	0.44	0.42	0.45	1.33	1.25	1.53	0.76	0.77	0.75	0.66	0.65	0.65
LOI	1.49	1.49	1.39	1.60	1.69	2.04	0.60	0.52	0.44	0.91	0.69	0.75	2.86	2.41	1.55	0.44	0.59	0.60
Total	100.54	99.72	99.74	99.81	100.57	100.56	99.53	100.31	100.40	99.39	99.93	99.96	100.13	99.47	100.30	99.57	100.09	100.18
K ₂ O + Na ₂ O	7.13	7.23	7.26	7.19	6.89	7.03	10.49	10.60	10.57	7.14	8.07	8.27	9.50	9.59	9.56	9.43	9.09	9.64
K ₂ O/Na ₂ O	1.07	1.08	1.08	1.74	2.14	2.90	1.10	1.11	1.13	4.17	3.33	1.26	1.86	1.75	1.52	0.81	1.20	1.04
Sc	12.5	11.2	12.7	17.3	16.7	14.9	3.45	3.58	3.66	18.7	18.0	13.9	10.4	10.0	10.6	6.29	5.74	5.77
Ti	4836	4842	4755	7008	6545	5902	2629	2578	2737	8800	8926	11106	4500	4443	4810	4343	4001	3838
V	104	78.0	96.7	122	124	112	39.9	46.2	50.5	133	141	189	123	108	117	87.9	78.6	90.1
Cr	497	414	447	335	322	290	24.5	23.6	27.7	453	354	169	140	129	131	33.5	34.6	30.1
Mn	580	572	663	875	833	857	389	304	270	819	779	688	584	610	623	414	410	328
Co	26.1	25.7	27.6	34.7	34.1	32.0	7.45	7.06	7.18	30.4	28.3	27.7	15.3	16.5	15.4	12.3	15.6	12.0
Ni	262	237	232	245	257	220	16.4	14.3	17.1	98.1	82.6	47.4	36.2	36.5	34.6	29.3	34.2	26.6
Cu	21.2	38.4	14.5	9.76	9.78	11.0	8.97	12.3	8.54	107	80.3	46.7	32.6	27.5	31.3	37.2	34.1	35.4
Zn	63.6	82.8	68.8	104	113	108	25.1	29.2	24.5	92	99.2	87.1	76.6	68.0	82.1	55.3	62.3	39.6
Ga	17.5	17.8	16.7	17.5	18.9	16.3	22.5	22.6	22.5	18.2	17.6	21.9	20.6	21.3	21.3	21.7	20.5	21.1
Ge	1.03	1.12	1.04	1.34	1.32	1.26	1.11	1.13	1.12	1.42	1.45	1.32	1.23	1.30	1.04	1.04	0.97	0.94
Rb	104	110	103	89.7	88.7	95.2	138	164	154	114	105	98.9	129	108	131	101	162	122
Sr	2040	1966	2196	2289	2569	2270	2146	2418	2231	3403	3342	3391	1720	1904	2777	2251	2509	2357
Y	20.5	19.5	20.0	32.4	32.5	30.0	16.4	17.4	18.0	26.1	25.5	28.2	23.9	23.8	25.1	18.7	19.0	16.9
Zr	316	304	328	457	482	433	302	354	331	589	570	985	388	384	378	327	316	312
Nb	14.0	13.9	14.1	20.8	21.5	19.0	26.4	26.2	27.1	22.0	21.1	27.8	24.2	22.9	22.9	13.3	15.5	14.5
Cs	2.30	2.57	2.53	7.43	4.43	4.70	3.22	4.32	3.64	1.83	2.29	1.36	9.02	5.56	9.51	1.51	3.3	2.15
Ba	1331	1296	1389	2508	2507	2550	1699	1863	1803	3653	3540	3670	2518	1628	1831	1782	1943	1848
Hf	7.84	7.82	8.27	11.8	12.3	11.2	8.36	9.26	8.90	15.3	15.4	20.9	9.05	8.92	8.94	8.14	7.99	7.86
Ta	0.93	1.03	0.97	1.07	1.12	1.03	1.91	1.86	1.90	1.21	1.16	1.46	1.72	1.68	1.68	1.16	1.18	1.16
Pb	19.1	28.0	24.2	29.3	36.8	41.6	45.5	90.3	27.4	97.5	48.6	41.6	52.3	54.2	65.5	72.3	21.5	23.7
Th	12.5	13.5	12.9	14.6	15.3	13.9	33.5	33.1	32.9	17.8	18.9	21.8	34.1	33.8	35.1	21.5	19.7	19.0
U	3.94	4.31	3.97	3.43	3.77	3.86	5.71	8.15	6.56	4.51	4.38	4.85	8.61	7.90	8.64	3.52	5.26	4.64
Zr/Nb	22.53	21.77	23.13	21.97	22.38	22.81	11.43	13.53	12.19	26.71	26.92	35.44	16.03	16.80	16.53	24.55	20.37	21.43
Nb/La	0.19	0.19	0.18	0.17	0.19	0.15	0.22	0.22	0.23	0.15	0.14	0.20	0.17	0.16	0.16	0.17	0.14	0.17
Th/La	0.17	0.19	0.16	0.12	0.13	0.11	0.28	0.28	0.28	0.12	0.13	0.16	0.25	0.24	0.24	0.27	0.18	0.22
La	307.13	303.80	331.05	510.13	486.50	531.65	507.17	498.31	494.51	622.36	621.94	579.32	585.23	586.92	609.70	334.81	460.76	357.47
Ce	227.61	230.56	257.52	427.78	415.20	451.14	363.24	361.60	363.73	500.65	500.65	499.35	454.58	446.24	469.61	247.88	349.35	266.67
Pr	174.32	173.89	192.53	351.05	356.00	352.95	259.79	253.68	261.26	395.26	380.84	402.63	330.63	334.11	337.16	195.79	240.53	212.32
Nd	139.19	135.80	146.21	292.72	297.00	285.87	174.30	176.02	182.23	305.14	299.57	322.70	238.97	241.54	243.68	153.70	182.12	162.40
Sm	65.49	63.60	70.46	145.16	149.15	142.16	69.93	71.70	72.42	146.73	138.37	146.99	107.19	107.71	109.15	67.39	76.93	70.78
Eu	42.60	44.00	45.43	102.33	105.40	99.81	45.05	45.33	47.98	92.76	95.09	100.48	65.41	68.72	74.97	43.40	48.93	43.93
Gd	31.01	30.03	31.97	69.34	71.24	65.94	26.87	28.70	28.20	62.82	59.42	66.37	44.09	44.70	51.00	28.07	31.07	28.95
Tb	22.75	23.02	23.85	44.79	46.04	43.07	18.37	17.81	19.97	41.98	40.61	44.63	31.40	31.93	33.45	21.68	23.24	21.68
Dy	15.52	15.09	17.39	27.81	29.21	28.54	12.92	13.53	14.30	24.50	24.03	25.94	20.36	20.67	20.84	14.01	14.68	14.33
Ho	12.61	12.77	13.18	21.29	21.47	20.72	9.96	10.55	11.15	17.08	17.14	19.40	15.32	15.78	16.13	11.57	12.00	11.15
Er	10.62	10.50	11.78	17.21	18.11	16.89	9.21	9.17	9.64	13.98	13.22	15.06	13.61	13.57	13.73	9.54	10.14	9.60
Tm	10.27	10.47	10.86	15.45	15.57	14.94	8.27	8.78	8.98	11.25	11.22	12.67	12.82	12.24	12.51	9.84	9.41	9.18
Yb	9.08	9.08	9.84	13.14	13.76	12.81	7.59	8.19	8.39	9.24	9.33	10.58	10.83	10.89	11.41	8.64	8.51	7.98
Lu	9.41	9.06	9.49	13.31	13.15	12.40	7.80	8.27	8.43	8.54	8.98	10.47	10.71	10.67	11.22	8.74	8.70	8.27
REE	321.82	320.69	352.81	610.90	601.92	625.92	475.17	473.24	477.85	687.84	681.66	688.05	601.07	598.41	621.53	348.57	460.76	371.73
LREE	306.14	305.32	336.05	580.90	570.85	596.67	461.89	459.30	463.58	661.78	656.57	660.17	580.10	577.21	598.78	334.26	445.51	357.31
HREE	15.68	15.37	16.77	30.01	31.06	29.25	13.28	13.94	14.27	26.06	25.09	27.88	20.97	21.20	22.76	14.32	15.25	14.42
(La/Yb) _N	32.08	31.74	31.92	36.83	33.55	39.37	63.36	57.74	55.89	63.94	63.25	51.94						

表 2 囊谦盆地新生代高钾岩浆岩的 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 2 Sr-Nd isotopic data for the Cenozoic high-K igneous rocks in Nangqian basin

样号	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(±2)	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	Nd(t)
NQ-3-2	0.15424	0.704245	0.704162	0.079487592	0.512684	1.46
NQ-3-3	0.162067	0.705246	0.705159	0.080700231	0.512664	1.06
NQ-4-2	0.165182	0.705128	0.705039	0.078731798	0.512671	1.21
NQ-4-3	0.080685	0.705192	0.705149	0.095266772	0.512733	2.35
NQ-4-6	0.07515	0.705203	0.705163	0.091504639	0.512631	0.37
NQ-4-7	0.069715	0.705311	0.705273	0.09024355	0.512681	1.35
NQ-6-1	0.179743	0.704822	0.704725	0.088862724	0.512572	-0.77
NQ-6-2	0.136697	0.704990	0.704917	0.088346241	0.512610	-0.03
NQ-7-1	0.11288	0.705477	0.705417	0.088738928	0.512563	-0.95
NQ-7-3	0.107444	0.705420	0.705362	0.086855071	0.512577	-0.66
NQ-13-1	0.154876	0.705325	0.705242	0.083683939	0.512610	0.01
NQ-13-2	0.124093	0.705189	0.705122	0.086351543	0.512615	0.08

注: (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 比值和 Nd(t) 值用 t=38Ma 校正。

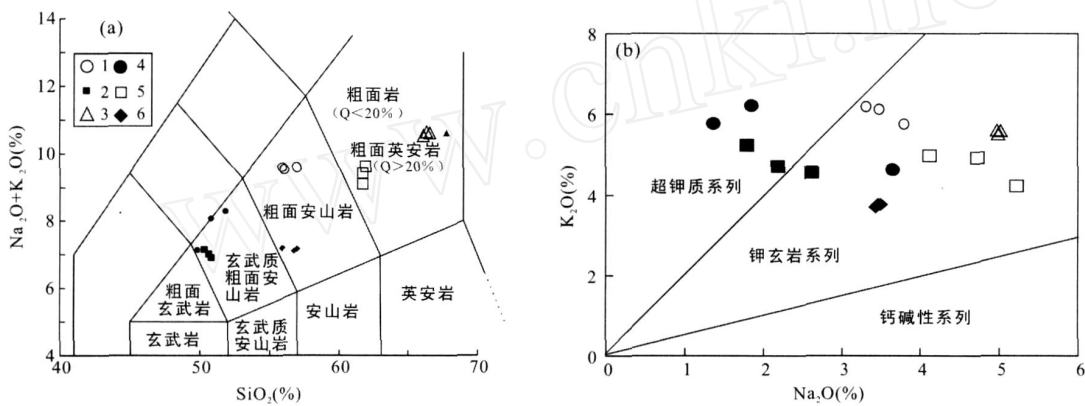


图 2 囊谦盆地新生代高钾岩浆岩的 TAS 岩石分类图解 (a) 和 K₂O-Na₂O 图解 (b)

1 - 正长斑岩; 2 - 煌斑岩; 3 - 二长斑岩; 4 - 霞辉岩; 5 - 粗面岩; 6 - 玄武岩

Fig 2 TAS classification diagram (a) and K₂O vs Na₂O plot (b) for the Cenozoic high-K igneous rocks in Nangqian basin

4 结 果

4.1 主 - 微量元素

囊谦盆地 18 个高钾岩石样品的主 - 微量元素分析结果列于表 1。从表中可以看出样品具有变化较大的 SiO₂ (49.86% ~ 66.55%), 高钾 (K₂O/Na₂O > 1, K₂O = 3.69% ~ 6.21%), 高 Al₂O₃ (10.42% ~ 16.24%), 相对低 TiO₂ (0.42% ~ 1.53%) 和 P₂O₅ (0.32% ~ 1.57%), 明显富碱 (K₂O + Na₂O = 6.89% ~ 10.60%) 的特征。从 TAS 图 (图 2a) 可见, 研究区新生代高钾岩石样品均落入碱性系列范围, 成分从玄武质粗面安山岩到粗面岩。其中 6 个样品落入粗面岩和粗面英安岩区 (NQ4-6, NQ4-7, NQ4-8, NQ13-1, NQ13-2 和 NQ13-4); 6 个样品点落入

粗面安山岩区 (NQ3-2, NQ3-3, NQ3-4, NQ7-1, NQ7-3 和 NQ7-4); 其余 6 个样品点落入玄武质粗面安山岩区。样品总碱量 (K₂O + Na₂O) 较高, 多为 8% ~ 10%, 平均总碱量为 8.59%, 除 1 个样品外 (NQ13-1), 其余样品 K₂O/Na₂O > 1。除 4 个样品 (NQ6-1, NQ6-2, NQ4-3 和 NQ4-4) K₂O/Na₂O = 2.14 ~ 4.17, 属于超钾质系列 (图 2b), 其余 14 个样品的 K₂O/Na₂O = 0.81 ~ 1.86 属于钾玄质碱性系列 (图 2b)。研究区岩浆岩成分变化范围大: 高钾岩浆从原始的成分到高演化的成分 (MgO: 10.20% ~ 1.32%, Cr: 24.5 ~ 497.3 μg/g, Ni: 14.36 ~ 262.9 μg/g); SiO₂ 从不饱和到饱和, 依据岩石的主要成分可将样品划分为 3 类: 第一类为基性程度较高的霞辉岩、煌斑岩和玄武岩, SiO₂ 分别为 49.86% ~ 51.84%、50.29% ~ 50.78% 和 55.87%

~57.10%; 第二类为中性岩类包括粗面岩和正长斑岩, SiO_2 分别为 61.72% ~ 61.91% 和 55.90 ~ 56.95%; 第三类为较酸性的二长斑岩类, SiO_2 为 66.20% ~ 66.55%。

在主元素协变图上显示, SiO_2 与 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 和 P_2O_5 具有负相关关系, 与 Al_2O_3 呈弱的正相关关系 (图 3), 表明有橄榄石、单斜辉石和磷灰石的分离结晶, 但没有明显的斜长石分离结晶 (李献华等, 2002)。

囊谦高钾岩浆岩相容元素 Cr (23.7 ~ 497.3 $\mu g/g$) 和 Ni (14.4 ~ 262.9 $\mu g/g$) 的含量相对较低, 但明显高于受俯冲流体改造的岛弧火山岩 (Bailey, 1981)。无论是基性岩类还是酸性岩类都具有相对

较高的稀土元素总含量 ($REE = 320.69 \sim 688.05 \mu g/g$), 在球粒陨石标准化图解中 (图 4a), 表现出相似的 LREE 富集右倾型配分模式, 轻重稀土分异明显 ($La/Yb)_N = 32.64 \sim 72.85$), 轻稀土富集 ($LREE = 305.32 \sim 660.17 \mu g/g$), 无明显的 Eu 异常 ($Eu = 0.95 \sim 1.06$)。在微量元素蛛网图上 (图 4b), 所有样品富集大离子亲石元素 (LILE), 明显亏损 Nb-Ta 等高场强元素 (HFSE), 和形成于与俯冲带相关的高 K/Ti-低 Ti 钾质岩石非常类似, 而明显不同于板内低 K/Ti-高 Ti 钾质岩 (Rogers, 1992)。其不相容元素比值 $Zr/Nb = 11.43 \sim 35.44$, $Nb/La = 0.14 \sim 0.23$, $Th/La = 0.11 \sim 0.28$ 。

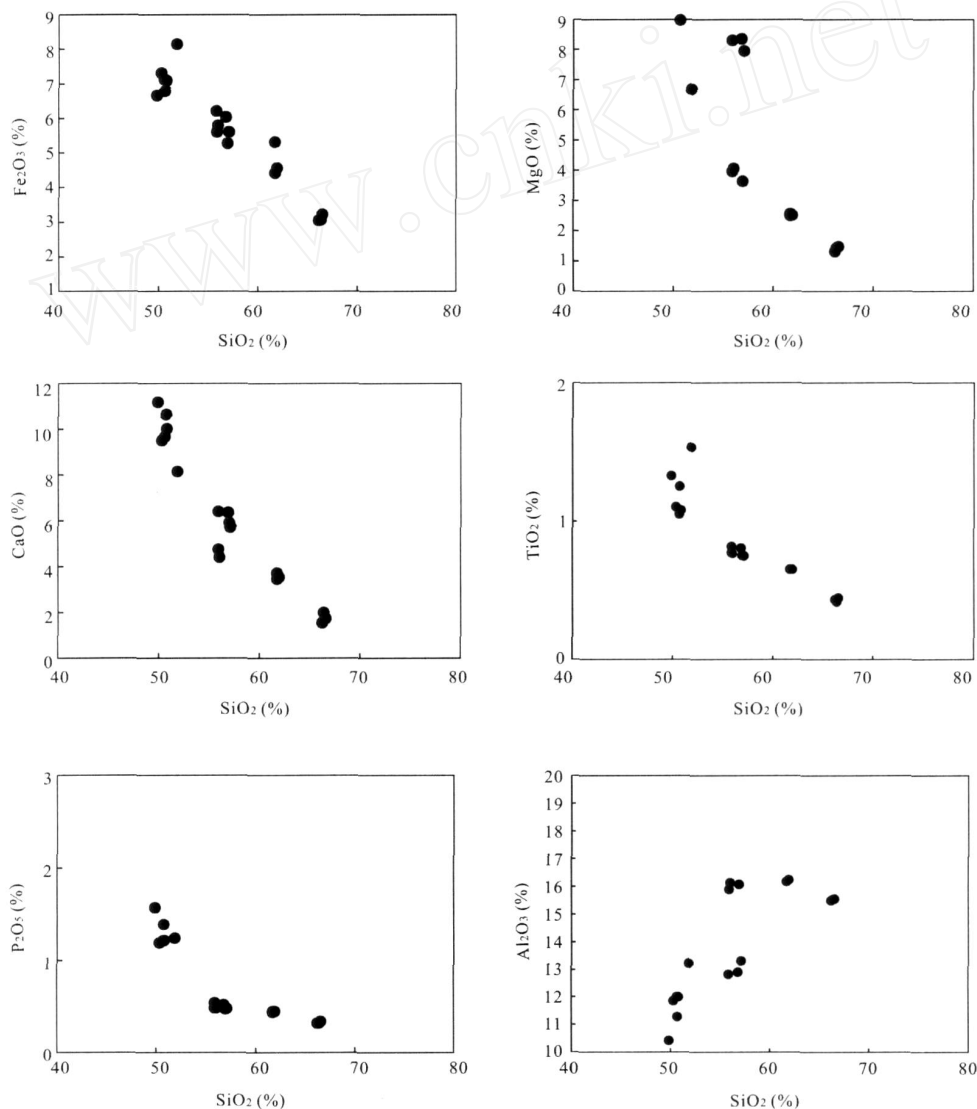


图 3 囊谦盆地新生代高钾岩浆岩的 Harker 图解

Fig 3 Harker-type oxides vs SiO_2 diagrams for the Cenozoic high-K igneous rocks in Nangqian basin

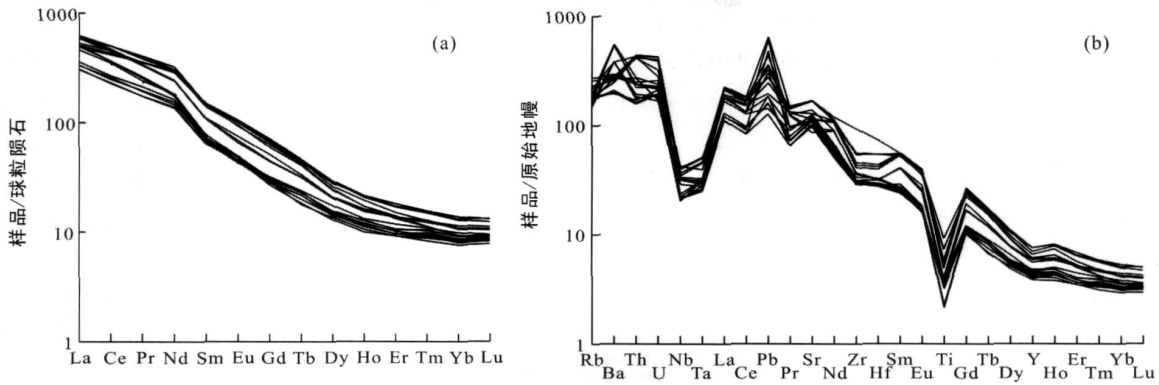


图 4 囊谦高钾岩浆岩的稀土分布图 (a) 和不相容元素蛛网图 (b)

Fig 4 Chondrite-normalized REE diagrams and Primitive mantle-normalized incompatible trace element spidergrams for the Cenozoic high-K volcanic rocks in Nangqan basin

4.2 Sr-Nd 同位素

囊谦高钾岩浆岩的 Sr-Nd 同位素组成列于表 2。从表中可知样品具有变化范围窄的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.70425 ~ 0.70548), 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.51256 ~ 0.51273) 同位素组成, 其对应的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $_{\text{Nd}}(t)$ 分别为 0.704162 ~ 0.705417 和 -0.95 ~ -2.35。从同位素组成看, 无论是基性程度较高的煌斑岩类还是酸性的二长斑岩类, 其 Sr-Nd 同位素集中于同一区域很小的范围内。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $_{\text{Nd}}(t)$ 图解上 (图 5), 绝大多数样品落在 OB 的范围, 显示出 EM I 富集趋势, 明显不同于藏北新生代

的钾质火山岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.705926 \sim 0.709209$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512166 \sim 0.512461$, 据丁林等, 1999) 和滇西新生代富碱斑岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.705488 \sim 0.706871$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512333 \sim 0.512336$, 据赵欣等, 2004) 的同位素组成, 但与洱海高钾岩浆岩和藏东高钾火山岩的变化范围接近。

5 讨论

5.1 地壳混染

本区富钾岩浆岩明显富集 LREE 和 LILE, 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值相对较高, $_{\text{Nd}}(t)$ 较低, Nb-Ta 等 HFSE 明显亏损, 并且所测样品中几种微量元素比值与大陆地壳更接近 (表 3), 这些特征暗示其在岩浆演化过程中可能受到地壳物质的混染。因此有必要查明微量元素和同位素的这种特征是何种因素引起, 即是岩浆的源区富集所致还是岩浆上升过程中遭受了地壳混染所致。在 $\text{SiO}_2 - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $\text{SiO}_2 - _{\text{Nd}}(t)$ 图解上未显示出 Sr-Nd 同位素含量与相应样品 SiO_2 含量之间有明显的线性演化关系, 以及不相容元素比值 ($\text{Zr}/\text{Nb} = 11.43 \sim 35.44$, $\text{Nb}/\text{La} = 0.14 \sim 0.23$, $\text{Th}/\text{La} = 0.11 \sim 0.28$) 都表明囊谦盆地新生代钾质岩石在其岩浆演化的过程中并未受到地壳物质的明显混染, 其富集 LREE、LILE 和 Sr-Nd 同位素组成的特征可能是其源区特征的反映。

5.2 地幔源区特征

在青藏高原及滇西地区都广泛分布有富钾岩浆岩, 这些富钾岩浆岩具有相似的微量元素地球化学特征即富集 LILE, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, LREE 元素强烈富集, 而 HREE 元素亏损。目前的研究普遍认为通过深俯冲作用, 洋壳和陆壳的物质

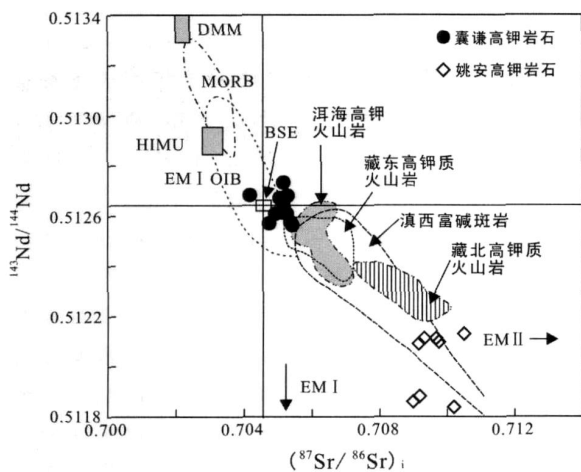


图 5 囊谦盆地新生代高钾岩浆岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图 (藏北高钾火山岩数据引自丁林等, 1999; 滇西富碱斑岩数据引自赵欣等, 2004; 藏东高钾火山岩数据引自张玉泉等, 2000; 洱海高钾岩浆岩数据引自谢应雯等, 1999)

Fig 5 Nd-Sr isotopic diagram for the Cenozoic high-K igneous rocks in Nangqan basin

表 3 囊谦盆地新生代高钾岩浆岩微量元素比值

Table 3 Trace element ratios for the Cenozoic high-K igneous rocks in Nangqian basin

	Zr/Nb	La/Nb	Ba/Nb	Ba/Th	Rb/Nb	K/Nb	Th/Nb	Th/La	Ba/La
囊谦火山岩平均值	20.917	5.694	109.065	111.129	6.067	106077.6	1.099	0.197	19.008
原始地幔	14.8	0.94	9	77	0.91	323	0.117	0.125	9.6
大陆地壳	16.2	2.2	54	124	4.7	1341	0.44	0.204	25
N-MORB	30	1.07	1.7~8.0	60	0.36	210~350	0.025~0.071	0.067	4
E-MORB			4.9~8.5			205~230	0.06~0.08		
HMU O B	3.2~5.0	0.66~0.77	4.9~6.9	49~77	0.35~0.38	77~179	0.078~0.101	0.107~0.133	6.8~8.7
EM1 O B	4.2~11.5	0.86~1.19	11.4~17.8	103~154	0.88~1.17	213~432	0.105~0.122	0.107~0.128	13.2~16.9
EM O B	4.5~7.3	0.89~1.09	7.3~13.3	67~84	0.59~0.85	248~378	0.111~0.157	0.122~0.163	8.3~11.3

注:引自孙宏娟和邓万明,1999

进入地幔,俯冲物质析出流体对地幔岩石的交代作用导致富钾岩石具特殊地球化学特征。同时这些地区新生代富钾岩浆岩的 Sr/Nd 、 Pb 同位素特征大体上均接近 EM 端员(邓万明,1993;丁林等,1999;朱弟成等,2003;张玉泉等,2000;赵欣等,2004;邓万明和孙宏娟,1998;吴开兴等,2004;朱丽等,2005),这也被认为是大陆地壳物质进入上地幔再循环的结果,因为大陆地壳物质的组成特征($^{87}Sr/^{86}Sr > 0.710$, $^{143}Nd/^{144}Nd < 0.512$, $^{206}Pb/^{204}Pb = 15.8 \sim 19.2$)对于 EM 端员的形成最为理想(邱检生等,2003)。

与藏南、藏北及滇西地区分布的富钾岩浆岩相比,囊谦新生代富钾岩浆岩的($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i值相对较低, $Nd(t)$ 值较高。在($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i- $Nd(t)$ 相关图上,样品点分布于原始地幔、富集地幔及 MORB 各端元之间(图 5),反映其岩浆源区应包括原始地幔和富集地幔等不同端员的混合,岩浆源区经历了多次富集事件的影响(邱检生等,2003)。囊谦富钾岩石的微量元素组成特征与滇西洱海富钾岩石极为相似,不相容元素和稀土元素的配分形式都显示基本一致的趋势。在 Sr/Nd 同位素组成上,囊谦高钾岩石靠近 BSE 成分点,而洱海高钾岩石沿地幔演化线向右下方偏移,靠近富集地幔成分区。丁林等(1999)在研究藏北鱼鳞山超钾质火山岩和拉嘎拉钠质火山岩时认为,超钾质火山岩的 Sr/Nd 同位素组成更靠近富集地幔区,其源区可能是在基性钠质火山岩源区的基础上由陆壳物质进一步交代富集的产物。洱海东部富钾岩浆岩的 K-Ar 为年龄 29~37Ma(谢应雯和张玉泉,1995),与囊谦盆地富钾岩浆岩(Ar-Ar 年龄(37.5~38.3)±0.2Ma,据张会化,2004)是在相同的时代范围内形成的,以及两个地区富钾岩浆岩的微量元素组成特征极为相似,这些表明它们应形

成于相似的岩浆源区和构造环境,并且具有相同或相近的成因机制。而 Sr/Nd 同位素组成的差别则可能意味着源区交代富集程度的不同,关于这一点将在下一节有所讨论。

5.3 地幔富集机制

囊谦新生代高钾岩石富集 LILE 和 LREE,亏损 HFSE 和 HREE,以及高的 Al_2O_3 (10.42%~16.24%)含量、低 TiO_2 (0.42%~1.53%)、Nb 和 Ta 负异常、低 Ce/Pb (2~10)、高 Ba/La (12~27) 等特征,表明其源区可能受到俯冲带流体的交代作用(黄德志等,2001)。而来自俯冲洋壳或沉积物释放的流体交代大陆岩石圈地幔而使壳幔物质发生混合与交换,这一地质过程可能经历了长时期的历史(Nelson, 1992)。

利用微量元素和同位素比值可以有效鉴别与俯冲有关岩浆源区的交代组分来源(Hawkesworth *et al*, 1997a, 1997b)。俯冲洋壳脱水析出流体具有低的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ (~0.7035) 值和高的 Ba/Th 值 (~ > 170) (Hawkesworth *et al*, 1997a, 1997b)。囊谦新生代富钾岩浆岩与俯冲洋壳释放流体相比有较高的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和低的 Ba/Th 值,与俯冲陆壳释放流体相比也有较低的 Ba/Th 值(图 6)。囊谦高钾岩浆岩和洱海高钾岩浆岩的样品点都落在俯冲洋壳释放流体与俯冲陆壳释放流体成分趋势之间,只是洱海高钾岩浆岩更靠近陆壳释放流体方向,这表明两岩浆源区同时受到因俯冲脱水洋壳和陆壳释放流体的改造,只是洱海高钾岩浆岩在更大程度上受到俯冲陆壳及其析出流体的混染和交代作用,这可能是导致囊谦高钾岩浆岩与洱海高钾岩浆岩 Sr/Nd 同位素组成差别的原因。因此洋壳及深海沉积物因俯冲而进入地幔参与成岩过程可能是导致囊谦新生代岩浆岩具有异常地球化学特征的主要原因。

6 构造背景及成因模式

岩浆岩的类型及地球化学特点决定于其源区及形成过程,而源区及成岩过程与其形成的构造环境密切相关(赵振华, 2007)。Muller等(Muller *et al*, 1992)将钾质火山岩的构造背景分为 5 类:大陆弧、后碰撞弧、初始洋弧、晚期洋弧和板内。其中板内钾质火山岩的形成过程没有明显的俯冲事件,但岩浆源区受到过古俯冲事件的影响。其余 4 种构造环境钾质火山岩的形成与俯冲作用都有密切联系。因此钾质火山岩的形成是直接或间接的俯冲作用的产物。形成于早第三纪的囊谦高钾岩浆岩,其产生的构造背景应属于后碰撞弧,即特提斯洋完全消减俯冲完毕、印度与亚洲大陆碰撞之后的构造环境(赵志丹等, 2003)。

据部分学者研究认为(莫宣学等, 2007),印度板块与欧亚板块约在 65Ma 开始碰撞,完成碰撞的时间在 40~45Ma 左右,大致从 40~45Ma 开始青藏高原进入后碰撞期。两大陆块发生碰撞后,青藏高原进入隆升和大规模的陆内变形时期,地壳急剧缩短,岩石圈加厚。位于青藏高原东缘的囊谦地区与三江古特提斯构造区相邻,在晚二叠世-早三叠世经历了特提斯洋的闭合,即发生了洋壳向陆壳的俯冲。在洋壳消减的过程中,一部分海水、大洋沉积物及海沟壳源物质与俯冲洋壳物质被带入下插的地幔楔内,蚀变洋壳和俯冲沉积物析出含水流体或熔体对地幔物质发生交代改造作用,形成富钾的交代富集地幔源区(图 7)。

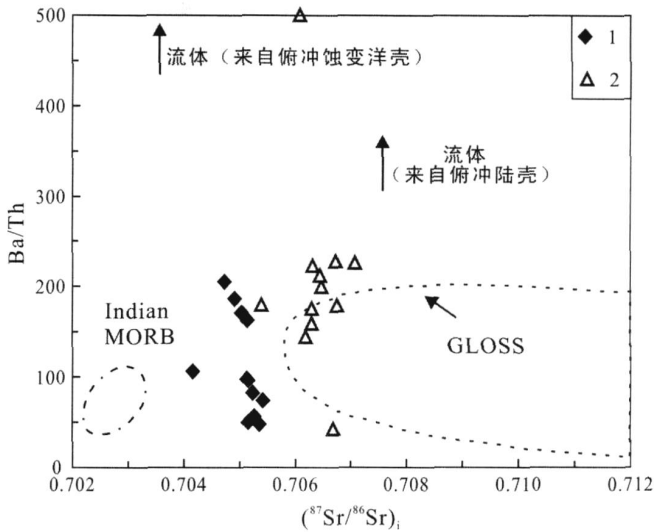


图 6 囊谦盆地新生代火山岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ -Ba/Th 关系图 (底图据 Guo *et al*, 2005)

1 - 囊谦高钾火山岩; 2 - 洱海高钾火山岩 (洱海高钾岩石数据引自朱炳泉等, 1992)

Fig 6 Ba/Th vs $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram for the Cenozoic high-K volcanic rocks in Nangqian basin

到了第三纪,青藏高原以及三江地区随着山脉的强烈隆生作用,地球动力学环境发生了重大的改变,即由挤压转为引张,或由板块汇聚转换为板块离散(张玉泉和谢应雯, 1995;李兴振等, 2002;王义昭等, 2000)。厚而重的岩石圈底部由于受到拉张而发生拆沉作用,引起热而轻的软流圈上升(丁林等, 1999)。残留的富集地幔在碰撞后的伸展构造背景下,由于软流圈上涌的作用,发生部分熔融而形成了囊谦和洱海高钾岩浆活动(图 7)。

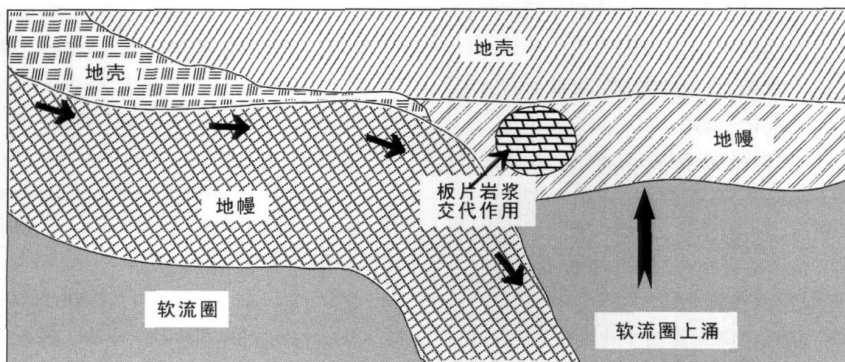


图 7 囊谦新生代高钾岩浆岩成因模式图

Fig 7 Diagenetic model for the Cenozoic high-K igneous rocks in Nangqian basin

参考文献 (References):

- 邓万明. 1993. 青藏北部新生代钾质火山岩微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学研究. 岩石学报, 9(4): 379 - 387.
- 邓万明, 孙宏娟. 1998. 青藏北部板内火山岩的同位素地球化学与源区特征. 地学前缘, 5(4): 307 - 317.
- 邓万明, 孙宏娟, 张玉泉. 2001. 囊谦盆地新生代钾质火山岩成因岩石学研究. 地质科学, 36(3): 304 - 318.
- 邓万明, 黄萱, 钟大赉. 1998. 滇西金沙江北段的富碱斑岩及其与板内变形的关系. 中国科学 (D 辑), 28(2): 111 - 117.
- 丁林, 张进江, 周勇, 邓万明, 许荣华, 钟大赉. 1999. 青藏高原岩石圈演化的记录: 藏北超钾质及钠质火山岩的岩石学与地球化学特征. 岩石学报, 15(3): 408 - 421.
- 黄德志, 高俊, 戴塔根. 2001. 俯冲带流体作用的地球化学示踪. 地学前缘, 8(3): 131 - 140.
- 李献华, 周汉文, 韦刚健, 刘颖, 钟孙霖, 罗清华, 李季喆. 2002. 滇西新生代超钾质煌斑岩的元素和 Sr-Nd 同位素特征及其对岩石圈地幔组成的制约. 地球化学, 31(1): 26 - 34.
- 李兴振, 江新胜, 孙志明, 沈敢富, 杜德勋. 2002. 西南三江地区碰撞造山过程. 北京: 地质出版社, 192 - 193.
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 刘颖. 2003. 用 MC-ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值. 地球化学, 32(1): 91 - 96.
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 25(6): 552 - 558.
- 莫宣学, 赵志丹, 周肃, 董国臣, 廖忠礼. 2007. 印度 - 亚洲大陆碰撞的时限. 地质通报, 26(10): 1240 - 1244.
- 孙宏娟, 邓万明. 1999. 囊谦盆地新生代钾质火山岩岩石地球化学特征. 地质评论, 45(增刊): 959 - 965.
- 潘桂堂, 王培生, 徐耀荣. 1990. 青藏高原新生代构造演化. 北京: 地质出版社, 32 - 70.
- 潘裕生, 孔祥儒. 1998. 青藏高原岩石圈结构演化和动力学. 广州: 广州科学技术出版社, 1 - 428.
- 孙鸿烈, 郑度. 1998. 青藏高原形成演化与发展. 广州: 广州科学技术出版社, 1 - 230.
- 邱检生, 徐夕生, 蒋少涌. 2003. 地壳深俯冲与富钾火山岩成因. 地学前缘, 10(3): 191 - 200.
- 王义昭, 李兴林, 段丽兰, 黄志勋, 崔春龙. 2000. 三江地区南段大地构造与成矿. 北京: 地质出版社, 109 - 112.
- 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 张乾, 彭建堂. 2004. 滇西上地幔铅同位素演化模式及滇西富碱斑岩铅同位素组成的诠释. 地球学报, 25(2): 263 - 270.
- 谢应雯, 张玉泉. 1995. 云南洱海东部新生代岩浆岩岩石学. 岩石学报, 11(4): 423 - 433.
- 谢应雯, 张玉泉, 钟孙霖, 李献华. 1999. 云南洱海东部新生代高钾碱性岩浆岩痕量元素特征. 岩石学报, 15(1): 75 - 82.
- 张玉泉, 谢应雯, 李献华, 邱华宁, 赵振华, 梁华英. 2000. 青藏高原东部钾玄岩系岩浆岩同位素特征: 岩石成因及其构造意义. 中国科学 (D 辑), 30(5): 493 - 498.
- 张玉泉, 谢应雯. 1995. 横断山区花岗岩地球化学. 北京: 科学出版社, 169 - 170.
- 赵欣, 喻学惠, 莫宣学, 张瑾, 吕伯西. 2004. 滇西新生代富碱斑岩及其深源包体的岩石学和地球化学特征. 现代地质, 18(2): 217 - 228.
- 赵志丹, 莫宣学, Sebastien Normade, Paul R Renne, 周肃, 董国臣, 王亮亮, 朱弟成, 廖忠礼. 2003. 青藏高原拉萨地块碰撞后超钾质岩石的时空分布及其意义. 岩石学报, 22(4): 787 - 794.
- 张会化. 2004. 金沙江 - 红河构造带北段新生代高钾岩浆活动的 Ar-Ar 热年代学和地球化学研究. 见: 中国科学院研究生院学位论文.
- 赵振华. 2007. 关于微量元素构造环境判别图解使用的有关问题. 大地构造与成矿学, 31(1): 92 - 103.
- 朱炳泉, 张玉泉, 谢应雯. 1992. 滇西洱海东第三纪超钾质碱性火成岩系的 Nd-Sr-Pb 同位素特征与西南大陆地幔演化. 地球化学, 21(3): 201 - 212.
- 朱弟成, 潘桂堂, 莫宣学, 段丽萍, 廖忠礼, 王立全. 2003. 青藏高原及邻区新生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素特征. 沉积与特提斯地质, 23(3): 1 - 11.
- 朱丽, 张会化, 王江海, 解广轰. 2005. 西藏芒康盆地新生代高钾火山岩的主元素和同位素地球化学研究. 大地构造与成矿学, 29(4): 502 - 511.
- Amaud N O, Vidal Ph, Tapponnier P, Matte P and Deng W M. 1992. The high K_2O volcanism of northwestern Tibet: Geochemistry and tectonic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 111: 355 - 367.
- Bailey J C. 1981. Geochemical criteria for a refined tectonic discrimination of orogenic andesites. *Chemical Geology*, 32: 139 - 154.
- Chung S L, Lo C H, Lee T Y, Zhang Y, Xie Y, Li X, Wang K L and Wang P L. 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Ma ago. *Nature*, 394: 769 - 773.
- Guo Z F, Hertogen J, Liu J Q, Pasteels P, Boven A, Punzalan L, He H Y, Luo X J and Zhang W H. 2005. Potassic magmatism in Western Sichuan and Yunnan Provinces, SE Tibet, China: Petrological and geochemical constraints on petrogenesis. *Journal of Petrology*, 46: 33 - 78.
- Hawkesworth C J, Turner S P, McDermott F, Peate D W and Van Calsteren P. 1997a. U-Th isotopes in arc magmas: Implications for element transfer from the subducted crust. *Science*, 276: 551 - 555.
- Hawkesworth C J, Turner S P, Peate D W, McDermott F and Van Calsteren P. 1997b. Elemental U and Th variations in island arc rocks: Implications for U-series isotopes. *Chemical Geology*, 141: 1 - 15.

- cal Geology*, 139: 207 - 221.
- Miller C, Schuster R, Klö zli U, Frank W and Purtscheller F. 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic activities in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis *J Petrol*, 40: 1399 - 1424.
- Muller D, Rock N M S and Groves D L. 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks from different tectonic settings: A pilot study. *Mineral Petrology*, 46: 259 - 289.
- Nelson D R. 1992. Isotopic characteristics of potassic rocks: Evidence for the involvement of subducted sediments in magma genesis *Lithos*, 28: 403 - 420.
- Tumer S, Hawkesworth C, Liu J, Rogers N, Kelley S and Van Calsteren P. 1993. Timing of Tibetan up lift constrained by analysis of volcanic rocks *Nature*, 364: 50 - 53.
- Tumer S, A maud N, Hawkesworth C, Liu J, Rogers N, Kelley S and Van Calsteren P. 1996. post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts *J Petrol*, 37: 45 - 71.
- Wang J H, Yin A, Harrison TM, Grove M, Zhou J Y, Zhang Y Q and Xie G H. 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone. *Earth Planet Sci Lett*, 188: 123 - 133.
- Rogers N W. 1992. Potassic magmatism as a key to trace-element enrichment processes in the upper mantle *J Volcan Geother Res*, 50: 85 - 99.

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE CENOZOIC POTASH-RICH VOLCANIC ROCKS IN NANGQIAN BASIN: PETROGENESIS AND TECTONIC IMPLICATIONS

CHENG Jin, XIA Bin and ZHANG Yuquan

(CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: The high-K igneous rocks (37.5 ~ 38.3 Ma) in the Nangqian area are distributed along the edge of eastern Tibetan Plateau, of which SiO_2 contents range from 49.9% to 66.6%. The high-K igneous rocks are characterized by enrichment in LREE and LILE (K, Rb, Sr, Ba, Th) and depletion in HREE and HFSE (Nb, Ta, Ti). From a primitive normalized spidergram, the trend of distinctly negative anomalies of Nb, Ta, Ti can be seen. Sr-Nd isotope ratios for potassic igneous rocks in the Nangqian area changes in a narrow scope ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70425 \sim 0.70548$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.51256 \sim 0.51273$), showing the trend of EM1 enrichment. Depending on the study on the element and isotope for Nangqian high-K igneous rocks, we think that formation of the mantle source for the rock is related to modification and metasomatism by fluids from dehydration of the subducted continental crust and oceanic crust, and the high-K igneous rocks in the Nangqian area were generated through a series of geodynamical processes: the subduction and consumption of the Tethyan ocean, Indo-Asian continental collision, the transition in stress state of lithosphere from compression to extension since the Tertiary and upwelling of the asthenosphere.

Keywords: high-K igneous rocks; geochemical characteristics; petrogenesis; tectonic implications