

# 青藏高原北羌塘新生代火山岩黑云母地球化学及其岩石学意义\*

赖绍聪<sup>1</sup> 伊海生<sup>2</sup> 刘池阳<sup>1</sup> S. Y. O'Reilly<sup>3</sup>

1. 西北大学大陆动力学教育部重点实验室, 西北大学地质系, 西安 710069;

2. 成都理工学院, 成都 610059;

3. National Key Center for the Geochemical Evolution and Metallogeny of Continents, Macquarie University, Sydney NSW 2109, Australia

**摘要** 分析了北羌塘半岛湖新第三纪玻基粗面安山岩中黑云母的常量、微量及稀土元素特征。结果表明, 黑云母均属钛铁黑云母类, 富集大离子亲石元素 Ba 以及 Sc, Ti, V, Cr, Co, Ni 等铁族元素, 而相对亏损 Th, U, Pb 等亲石元素。轻稀土强烈富集, 轻重稀土分异显著, 但 Eu 亏损并不严重, 暗示原始岩浆来源于一个基性岩质的、相当于榴辉岩矿物相(斜长石相缺失)的源区类型。

**关键词** 黑云母 常量及微量元素 新生代火山岩 北羌塘

青藏高原新生代火山岩中专题性和深入的矿物学研究非常薄弱<sup>[1,2]</sup>, 特别是造岩矿物痕量元素和稀土元素的精确测定结果以及对造岩矿物痕量及稀土元素富集规律、演化趋势和特征的专题研究还属空白。本文利用电子探针和激光探针剥蚀系统(LA-ICP-MS)对北羌塘新第三纪玻基粗面安山岩中的黑云母进行了主元素和微量、稀土元素的系统分析测定, 并重点讨论了黑云母类型及其微量和稀土元素特征, 从中获得了一些有价值的地质地球化学信息。

## 1 区域地质背景

羌塘北部新第三纪火山岩较为发育, 在自色哇、雅根错-多尔索洞错-太平湖-多格错仁, 兹格丹错-尕尔-祖尔肯山-西金乌兰湖-雁石坪等地均有分布, 主要是在羌北地层分区中, 且主要见于新第三纪石坪顶组。这些火山岩产状为熔岩被, 与下伏的地层呈明显的角度不整合接触关系, 覆盖在新第三纪喷纳湖组(N<sub>1s</sub>)或侏罗纪雁石坪组(J<sub>2ys</sub>)之上。因此, 羌北分布的新第三纪火山岩是呈陆相中心式喷

发的溢流火山岩。近年来, 国内外学者已就青藏高原新生代火山岩作了大量研究, 识别出超钾质、钾玄岩系和高钾钙碱岩系 3 个火山岩系列, 并对超钾质和钾玄岩系的岩石地球化学、同位素特征进行了深入探讨<sup>[3-7]</sup>。本文对北羌塘新第三纪玻基粗面安山岩中黑云母痕量及稀土元素的系统研究将有助于推动该区火山岩研究工作。

## 2 样品及分析方法

样品取自北羌塘半岛湖。岩石呈灰褐色, 十分新鲜, 斑状结构, 块状构造。斑晶成分主要为斜长石(15%), 碱性长石(5%), 角闪石(3%), 黑云母(3%)。岩石基质具玻质结构, 仅见少量斜长石针状微晶, 光性反应不明显。依据薄片观察结果, 并结合其全岩 SiO<sub>2</sub>(64.82%), K<sub>2</sub>O(6.48%)和 Na<sub>2</sub>O(3.44%)含量, 定名为玻基粗面安山岩。

将岩石磨制成标准激光探针片(厚约 100 μm), 镜下观察, 拍摄 1:8 薄片表面结构及斑晶矿物分布图像, 选定待测斑晶矿物颗粒; 数码显微镜录入待测点坐标, 激光探针分析(使用 PE 公司的 E-

2001-06-25 收稿, 2001-08-15 收修改稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 40072029)、国土资源部 I46C002001(乌兰乌拉湖)1:25 万区域地质调查项目(批准号: 20001300009281)及澳大利亚 GEMOC 国家重点实验室资助

E-mail: shaocong@pub.xaonline.com

lan6100-LA-ICP-MS), 电子探针对应点分析(使用法国 SX50); 利用电子探针获得的矿物主元素含量值对相应点激光探针分析结果进行校正, 最终获得被测矿物常量及微量、稀土元素分析结果. 实验工作均在 Macquarie 大学 GEMOC 国家重点实验室完成.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 主元素特征及黑云母类型划分

云母族矿物的成分通式可用  $X\{Y_{2-3}[Z_4O_{10}]$

$(OH)_2\}$  表示, 阳离子可分为 X, Y, Z 三组<sup>[8]</sup>. 本区黑云母主元素电子探针分析结果及晶体化学计算结果(表 1)表明, 它们应属于三八面体 2:1 型层状硅酸盐矿物. 邓万明在对可可西里新生代火山岩黑云母研究中<sup>[1]</sup>, 提出按晶体结构中 Mg, Fe, Ti 的阳离子数和比值对其进行进一步划分:  $Mg/(Mg + Fe)(Mg^{\#}) > 0.05$ ,  $Ti > 0.30$  为钛铁黑云母;  $Mg^{\#} < 0.50$ ,  $Ti < 0.30$  且  $Fe > 1.50$  为富铁黑云母;  $Mg^{\#} < 0.50$ ,  $Ti < 0.30$  而  $Fe < 1.50$  为铁黑云母. 若按此标准, 则本区黑云母均为钛铁黑云母.

表 1 北羌塘半岛湖新第三纪粗面安山岩黑云母电子探针分析结果

(w/%)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO <sub>2</sub>	36.56	36.75	35.32	36.60	36.58	36.69	35.86	37.33	36.66	35.23
TiO <sub>2</sub>	5.05	5.31	5.24	5.08	4.81	4.90	5.08	3.60	5.17	5.13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.57	13.44	14.20	13.37	13.42	13.45	13.81	13.87	13.38	13.89
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.12	0.03	0.00
FeO	17.13	16.64	17.09	16.85	16.20	16.33	16.89	12.29	17.34	17.56
MnO	0.38	0.34	0.23	0.35	0.30	0.29	0.27	0.20	0.27	0.38
MgO	13.24	13.51	12.79	13.36	13.48	13.61	13.19	16.99	12.88	12.84
CaO	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.50	0.49	0.44	0.53	0.47	0.54	0.54	0.38	0.50	0.50
K <sub>2</sub> O	9.20	9.32	8.96	9.17	9.40	9.35	9.20	9.57	9.18	9.02
NiO	0.02	0.00	0.01	0.03	0.04	0.00	0.05	0.05	0.00	0.04
H <sub>2</sub> O <sup>a)</sup>	3.37	3.79	3.36	3.37	3.38	3.39	3.36	3.50	3.36	3.32
总量	99.03	99.64	97.65	99.76	99.21	99.63	99.31	99.36	99.76	98.93
[O] =	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Si	5.529	5.535	5.421	5.546	5.569	5.557	5.470	5.586	5.560	5.414
Al <sup>IV</sup>	2.419	2.386	2.569	2.389	2.408	2.401	2.483	2.414	2.392	2.516
Ti <sup>IV</sup>	0.052	0.079	0.010	0.065	0.023	0.042	0.047	—	0.048	0.070
Ti <sup>VI</sup>	0.522	0.522	0.595	0.514	0.528	0.516	0.536	0.405	0.542	0.593
Al <sup>VI</sup>	—	—	—	—	—	—	—	0.032	—	—
Cr	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.014	0.004	0.000
Fe	2.167	2.096	2.194	2.136	2.063	2.069	2.155	1.538	2.199	2.257
Mg	2.985	3.033	2.926	3.018	3.059	3.073	2.999	3.789	2.912	2.941
Ca	0.002	0.003	0.002	0.002	0.000	0.003	0.000	0.002	0.002	0.000
Mn	0.049	0.043	0.030	0.045	0.039	0.037	0.035	0.025	0.035	0.050
Na	0.147	0.143	0.131	0.156	0.139	0.159	0.160	0.110	0.147	0.149
K	1.775	1.791	1.754	1.773	1.826	1.807	1.790	1.827	1.776	1.768
Ni	0.002	0.000	0.001	0.004	0.005	0.000	0.006	0.006	0.000	0.005
总计	15.648	15.636	15.632	15.645	15.658	15.666	15.681	15.748	15.615	15.694
Mg <sup>#</sup>	0.58	0.59	0.57	0.59	0.60	0.60	0.58	0.71	0.57	0.57

注: 表中数据是在澳大利亚 Macquarie 大学 GEMOC 国家重点实验室测定; a) 为根据黑云母晶体化学式中标准配比关系估算的挥发份含量; — 表示据晶体化学计算结果及元素优先占位规则, 该位无原子占位; [O] = 22 表示晶体化学计算以 22 个氧为基础

#### 3.2 黑云母微量及稀土元素特征

(1) Rb, Sr 和 Ba. Rb 是典型的亲岩分散稀碱元素, Sr 和 Ba 是碱土金属族分散元素. 激光探针(LA-ICP-MS)分析获得的半岛湖玻基粗面安山岩中黑云母的痕量及稀土元素结果(表 2)表明, 本区黑云母中 Rb 和 Ba 含量分别在  $(279 \sim 583) \times 10^{-6}$  (平均  $397 \times 10^{-6}$ )

和  $(1677 \sim 13704) \times 10^{-6}$  (平均  $6570 \times 10^{-6}$ ) 之间变化, 均高于黑云母赋存母岩(玻基粗面安山岩)中 Rb( $228 \times 10^{-6}$ )和 Ba( $678 \times 10^{-6}$ )的含量值. 尤其是 Ba 元素, 其富集度近 10 倍. 而黑云母中 Sr 的含量( $(127 \sim 580) \times 10^{-6}$ , 平均  $278 \times 10^{-6}$ ) 却远低于全岩中的 Sr 含量( $1164 \times 10^{-6}$ ). 这说明, 由于黑云母晶体结构中

X组阳离子广泛的K, Ca与Rb, Ba的类质同像替代, 而使得黑云母成为粗安岩中除长石类富K, Ca矿物外, 另一重要的Rb尤其是Ba的富集矿物相。

(2) U, Th和Pb. U, Th, Pb均为亲石(亲氧)元素, 在岩浆岩中U, Th与K关系密切. Pb主要是以类质同像形式置换K<sup>+</sup>. 本区黑云母中U((0.18~8.88) × 10<sup>-6</sup>, 平均1.20 × 10<sup>-6</sup>), Th

((0.36~44.96) × 10<sup>-6</sup>, 平均10.61 × 10<sup>-6</sup>)和Pb((5.55~88.92) × 10<sup>-6</sup>, 平均25.94 × 10<sup>-6</sup>)均明显低于全岩的U(14.46 × 10<sup>-6</sup>), Th(72.19 × 10<sup>-6</sup>)和Pb(98.52 × 10<sup>-6</sup>)含量(表2). 这说明, 尽管黑云母晶体结构中X组阳离子存在K<sup>+</sup>的占位, 并可产生与K<sup>+</sup>相关的类质同像替代, 但黑云母并不是粗面安山岩中U, Th, Pb的富集矿物相。

表2 北美塘半岛湖新第三纪粗面安山岩黑云母激光探针分析结果 (w/10<sup>-6</sup>)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sc	10.07	8.82	10.16	6.64	9.95	10.68	10.69	9.84	11.15	9.45	3.22
Ti	27188	27161	27689	14180	26577	28118	26917	25197	26645	20618	2158
V	214.50	191.57	234.81	120.41	225.52	250.67	212.60	212.43	223.20	305.78	14.46
Cr	36.06	101.47	84.07	10.44	57.94	102.25	11.98	13.58	9.55	293.74	26.43
Co	38.89	36.38	40.97	18.87	38.83	40.43	39.44	39.88	34.60	39.67	2.11
Ni	42.50	37.81	42.01	14.71	39.86	43.72	33.56	36.17	38.02	238.45	2.61
Ga	23.95	28.25	23.75	23.24	25.26	28.25	26.48	27.42	21.86	18.61	18.46
Rb	433.95	582.77	429.91	335.24	374.49	390.56	476.88	368.66	279.09	295.03	228.34
Sr	178.34	196.92	240.50	244.58	312.72	289.30	127.11	185.06	427.46	579.83	1164
Y	3.22	13.23	8.91	13.29	13.93	13.07	2.18	0.54	4.66	11.06	2.19
Zr	22.75	21.03	23.20	189.40	20.81	21.99	18.64	20.87	21.37	48.32	282.29
Nb	44.33	41.14	44.06	42.73	42.35	46.03	47.98	43.39	37.35	22.01	36.49
Ba	8345	5167	7822	1677	6335	8915	2102	3780	7856	13704	678.31
Hf	0.74	0.54	0.77	5.12	0.74	0.63	0.75	0.66	0.54	1.28	8.12
Pb	37.82	88.92	29.08	53.00	8.59	10.31	11.86	7.90	6.40	5.55	98.52
Th	1.17	0.64	1.26	44.96	5.85	5.16	0.79	0.36	2.34	43.55	72.19
U	0.32	0.35	0.25	8.88	0.56	0.64	0.18	0.28	0.22	0.35	14.46
La	13.93	8.29	4.78	86.58	69.63	72.87	7.97	2.07	31.28	89.18	158.01
Ce	90.01	823.80	85.20	141.22	134.51	149.47	20.85	7.22	55.38	104.97	262.94
Pr	3.15	2.49	1.38	13.57	14.47	16.35	1.88	0.34	5.71	16.48	30.26
Nd	12.59	6.59	5.65	45.96	59.23	67.72	6.94	2.13	24.83	55.97	97.13
Sm	1.89	1.48	1.74	4.03	10.50	9.65	1.49	2.45	3.64	8.92	14.27
Eu	0.67	0.58	0.46	0.89	1.49	1.39	0.61	0.53	1.06	1.31	2.99
Gd	1.99	1.92	1.35	3.48	4.95	6.48	1.86	1.69	1.55	4.67	10.11
Dy	0.96	1.72	1.09	2.86	3.03	2.70	1.03	1.15	0.98	1.93	5.10
Ho	0.18	0.37	0.21	0.66	0.41	0.48	0.20	0.19	0.19	0.32	0.92
Er	0.75	1.06	0.76	1.23	1.01	1.22	0.86	0.84	0.88	0.97	2.41
Yb	1.13	2.29	1.08	1.18	1.06	0.72	1.26	1.28	0.90	0.73	2.19
Lu	0.16	0.25	0.17	0.21	0.16	0.13	0.20	0.20	0.16	0.18	0.31
δEu	1.05	1.05	0.88	0.71	0.55	0.51	1.12	0.75	1.17	0.56	0.72
(La/Yb) <sub>N</sub>	8.84	2.60	3.17	52.63	47.12	72.60	4.54	1.16	24.93	87.63	51.75
(Ce/Yb) <sub>N</sub>	22.13	99.93	21.91	33.24	35.25	57.67	4.60	1.57	17.09	39.94	33.35

注: 表中序号11为玻基粗面安山岩全岩ICP-MS分析结果; 其余均为黑云母激光探针分析结果. 由Macquarie大学GEMOC国家重点实验室分析测定(1999)

(3) Zr, Hf和Nb. Zr, Hf和Nb在岩浆岩中均易形成独立矿物相, 也常可进入辉石、角闪石、黑云母等造岩矿物中<sup>[9]</sup>. 本区黑云母中Zr((18.64~189.40) × 10<sup>-6</sup>, 平均40.84 × 10<sup>-6</sup>)和Hf((0.54~5.12) × 10<sup>-6</sup>, 平均1.18 × 10<sup>-6</sup>), 均明显低于粗面安山岩全岩的Zr(282.29 × 10<sup>-6</sup>), Hf(8.12 × 10<sup>-6</sup>)含量. 而黑云母中Nb((22.01~47.98) × 10<sup>-6</sup>, 平

均41.14 × 10<sup>-6</sup>)含量与全岩中Nb(36.49 × 10<sup>-6</sup>)接近, 相差不大. 这说明Zr, Hf和Nb的地球化学性质决定了它们可以类质同像的形式进入黑云母等铁镁硅酸盐矿物, 但黑云母并非本区粗面安山岩中Zr, Hf和Nb的主要富集矿物相。

(4) Sc, Ti, V, Cr, Co和Ni. 该组元素是典型的铁族元素, 各类造岩矿物中以链状硅酸盐铁族

元素含量最高,其次是层状硅酸盐<sup>[9]</sup>.本区黑云母中 Sc, Ti, V, Cr, Co 和 Ni 的含量值均明显高于母岩(粗面安山岩)中同一元素的含量值(表2).从而说明,在中酸性岩石中,黑云母类铁镁矿物乃是铁族元素的最重要富集矿物相.

(5) 稀土元素.本区黑云母中稀土元素较为富集(表2),稀土总量平均为  $258 \times 10^{-6}$ .轻重稀土比变化在 2.50~40.47 之间,平均为 13.45;相应的  $(La/Yb)_N$  平均为 30.52,  $(Ce/Yb)_N$  平均为 33.33,说明黑云母具有轻稀土强烈富集的元素地球化学特征.值得注意的是,本区黑云母  $\delta Eu$  变化大,在 0.51~1.17 之间,平均为 0.84, Eu 亏损不强,且部分颗粒具正 Eu 异常.

岩石中稀土元素 Eu 的富集与亏损主要取决于含钙造岩矿物的聚集和迁移,而这又受造岩作用的条件制约<sup>[10]</sup>.含钙的造岩矿物主要有偏基性的斜长石,磷灰石和含钙辉石,这类矿物中  $Ca^{2+}$  的离子半径与  $Eu^{2+}$ ,  $Eu^{3+}$  相近,且与  $Eu^{2+}$  电价相同,故晶体化学性质决定了 Eu 主要以类质同像的形式进入斜长石、磷灰石、单斜辉石等造岩矿物.已有的研究表明<sup>[11]</sup>,由于黑云母中 Ca 含量甚微,因而常见 Eu 的强烈亏损状态.然而,本区黑云母中 Eu 亏损并不强烈,部分颗粒中还显示了 Eu 的弱富集状态,这明显不同于正常的黑云母晶体化学性质和元素富集规律<sup>[11]</sup>,黑云母的这一显著特征与本区火山岩全岩的稀土地球化学完全吻合<sup>[12]</sup>,显然与本区高钾钙碱火山岩系特殊的源区类型、构造环境和岩浆起源过程有关.表明原始熔体中 Eu 丰度值较高,岩浆源区缺失斜长石相(相当于榴辉岩质).

#### 4 结论

北羌塘半岛湖新第三纪粗面安山岩中黑云母均

属钛铁黑云母.矿物晶体结构中较强烈地富集了 Sc, Ti, V, Cr, Co, Ni 等铁镁元素,以及 Ba 和 Rb 等大离子亲石元素,而较明显地相对亏损 Th, U, Pb 和 Sr 等不相容元素.本区黑云母稀土元素富集,轻重稀土分异明显,但 Eu 亏损并不显著,且部分颗粒中还显示了 Eu 的弱富集状态,它指示了本区火山岩起源于一个基性岩质的、相当于榴辉岩矿物相(斜长石相缺失)的加厚陆壳底部的源区类型.

#### 参 考 文 献

- 1 邓万明.青藏高原北部新生代板内火山岩.北京:地质出版社,1998. 1
- 2 赖绍聪.青藏高原新生代火山岩矿物化学及其岩石学意义.矿物学报,1999,19(2):236
- 3 赖绍聪.青藏高原北部新生代火山岩成因机制.岩石学报,1999,15(1):98
- 4 邓万明,等.青藏高原新生代火山活动与高原隆升关系.地质论评,1999,45(增刊):952
- 5 赖绍聪,等.青藏高原北缘火山作用与构造演化.西安:陕西科学技术出版社,1996. 1
- 6 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. Journal of Petrology, 1999, 40(9): 1399
- 7 王碧香,等.青藏羌塘盆地中新生代火山岩同位素地球化学特征及其意义.地质论评,1999,45(增刊):946
- 8 王 濮,等.系统矿物学(中册).北京:地质出版社,1984. 431
- 9 刘英俊,等.元素地球化学.北京:科学出版社,1984. 50
- 10 王中刚,等.稀土元素地球化学.北京:科学出版社,1989. 133
- 11 李昌年.火成岩微量元素岩石学.武汉:中国地质大学出版社,1991. 30
- 12 赖绍聪,等.青藏高原北羌塘榴辉岩质下地壳及富集型地幔源区.岩石学报,2001,17(3):459