

青藏北羌塘新第三纪玄武岩单斜辉石地球化学

赖绍聪,秦江锋,李永飞

(西北大学 大陆动力学教育部重点实验室/地质学系,陕西 西安 710069)

摘要:目的 通过玄武岩中单斜辉石成分及微量元素地球化学的研究,探讨岩浆源区性质及其大陆动力学意义。方法 利用电子探针和激光探针剥蚀技术,分析了北羌塘半岛湖新第三纪粗面玄武岩中单斜辉石斑晶的常量、微量及稀土元素特征。结果 单斜辉石主要为透辉石和顽透辉石种属,是玄武岩浆上升过程中逐步结晶的产物;矿物中富集 Rb, Sr, Ba, Zr, Hf, Nb 和 Th, U, Pb, 并存在 Sc, Ti, V 等铁族元素的低度富集,稀土元素总量平均 857×10^{-6} ,轻重稀土分异显著,轻稀土强烈富集,无明显铈异常。结论 单斜辉石是玄武质岩石中痕量及稀土元素的重要赋存矿物相。

关键词:单斜辉石;常量及微量元素;新生代火山岩;北羌塘;青藏高原

中图分类号: P591.1; P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-274 (2005)05-0611-06

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、同位素特征和岩石成因进行了深入探讨^[1-12]。然而,青藏高原新生代火山岩中专题性和深入的矿物学研究工作非常薄弱,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十分欠缺^[13,14]。本文利用电子探针和激光探针剥蚀系统(LA-ICP-MS),对北羌塘新第三纪粗面玄武岩中的单斜辉石进行了主元素和微量、稀土元素的系统分析测定,并重点讨论了单斜辉石类型及其微量和稀土元素特征,这将有助于推动该区的火山岩研究工作。

1 地质背景及样品分析方法

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—祖尔肯乌拉山—西金乌兰湖—雁石坪等地均有分布,主要见于羌北地层分区的新第三纪石坪组。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,火山岩呈厚 50 ~ 200 m 的熔岩被覆盖在第三系喷呐湖组(N_1s)或侏罗纪雁石坪组(J_2ys)之上,为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,或在火山中心呈侵入关系。

样品取自北羌塘半岛湖。岩石呈深黑色,斑状结构,块状构造,气孔发育,新鲜无蚀变。斑晶矿物主要有橄榄石(5%)、斜方辉石(5%~7%)、单斜辉石(5%)。岩石基质具典型的间粒结构,不规则排列的斜长石长条状微晶组成的间隙中,充填若干粒状辉石颗粒以及磁铁矿等副矿物小颗粒。根据镜下观察并结合样品全岩化学成分分析结果($SiO_2 = 48.25\%$, $Na_2O + K_2O = 6.38\%$),定名为粗面玄武岩。

全部实验工作均在 Macquarie 大学 GEMOC 国家重点实验室完成。使用 PE 公司 Elan 6100-ICP-MS 仪器 + Merchantek LUV266 型激光探针。激光探针 Forward RF 发生功率为 1 080 W; Nebuliser 气流量为 Ar 1.09 (L/min) + He 0.85 (L/min); 激光波长为 UV266 nm; 测试所用外标为 NIST610 玻璃,内标元素为 Ca (由电子探针分析提供); 测定元素检测限

收稿日期: 2004-03-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40272042, 40072029); 教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目; 澳大利亚 GEMOC 国家重点实验室资助项目

作者简介: 赖绍聪(1963-),男,四川安岳人,西北大学教授,博士生导师,从事岩石学及地球化学研究。

采用泊松计数统计值 (Poisson counting statistics), 即 $2.3x$ 平方根 (或 $2x$ 背景计数值)。

2 主元素特征及单斜辉石类型

辉石族矿物的主要化学成分可用通式 XYZ_2O_6 表示。其中: Z 位由 Si 和 Al 占据; Y 位 (即 M_1 位) 通常由 Mg, Fe^{2+} , Mn, Al, Fe^{3+} , Cr^{3+} , Ti^{4+} 和 V^{3+} 占据; X 位 (即 M_2 位) 的主要占位离子为 Ca, Mg, Fe^{3+} , Mn, Na 和 Li。一般根据辉石中 X 位, 即晶体结构中 M_2 位主要阳离子种类的不同而将辉石族矿物划分为 3 类^[15]: M_2 为 Li 的辉石 锂辉石; M_2 主要为 Na 的辉石, 如硬玉和霓石; M_2 主要为 Ca, Mg, Fe 的辉石。其中, 最重要的是顽火辉石 ($Mg_2Si_2O_6$) 铁辉石 ($FeSi_2O_6$) 系列和透辉石 ($CaMgSi_2O_6$) 钙铁辉石 ($CaFeSi_2O_6$) 系列。它们构成了 CaMg, CaFe 和 MgFe 的成分梯形。

本区单斜辉石电子探针分析结果列于表 1。从表 1 可看出: 单斜辉石 SiO_2 50.77% ~ 53.52%, 平均 52.88%; $FeO(T)$ 3.73% ~ 6.11%, 平均 4.80%; MgO 15.279% ~ 17.47%, 平均 16.68%; CaO 21.15% ~ 23.33%, 平均 22.48%; 基本不含钠或含钠很低 (0.17% ~ 0.55%, 平均 0.30%), 属典型的透辉石 ($CaMgSi_2O_6$) 钙铁辉石 ($CaFeSi_2O_6$) 系列。在 CaMg-CaFe-Mg-Fe 的辉石成分梯形中 (见图 1), 本区单斜辉石投影点大多位于透辉石区内, 少数投影点跨入顽透辉石区。

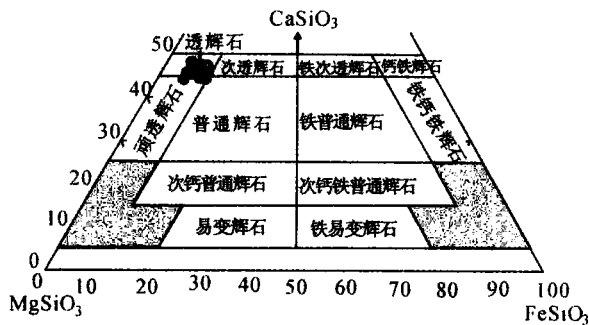


图 1 辉石分类的 CaMg-CaFe-Mg-Fe 成分梯形

Fig 1 The CaMg-CaFe-Mg-Fe classification diagram for the pyroxene

透辉石中 Al_2O_3 含量一般 1% ~ 3%, TiO_2 含量通常不超过 1%, Al^{3+} 既可代替 M_1 中的 Mg 和 Fe, 亦可代替硅氧四面体中的 Si^{4+} ^[15]。本区单斜辉石 Al_2O_3 (1.13% ~ 3.48%, 平均 1.81%) 和 TiO_2 (0.22% ~ 1.04%, 平均 0.51%) 与岩浆岩类透辉石化学成分特征一致。

在辉石中, Al 的配位与温压关系密切, 具有重要的标型意义。即高温低压条件下有利于 Al 在四次配位中代替 Si, 而低温高压条件下有利于 Al 在六次配位中代替其他阳离子。然而, 在岩浆结晶分异的演化过程, 是六次配位 Al 增加的过程, 由地幔到地壳是 Al 由六次配位向四次配位转化的过程^[16]。本区单斜辉石中 Al^{IV} 为 0.028 1 ~ 0.119 9, 平均 0.059 1, 而 Al^{VI} 为 0.000 0 ~ 0.043 1, 平均 0.019 3, 表明本区粗面玄武岩中的单斜辉石斑晶是幔源玄武岩岩浆在由深部向浅部运移过程中逐步结晶的产物。在单斜辉石 Al^{IV} 对 Al^{VI} 图解中 (见图 2), 本区单斜辉石投影点位于残留地幔附近, 表明粗面玄武岩岩浆为地幔橄榄岩局部熔融的产物。

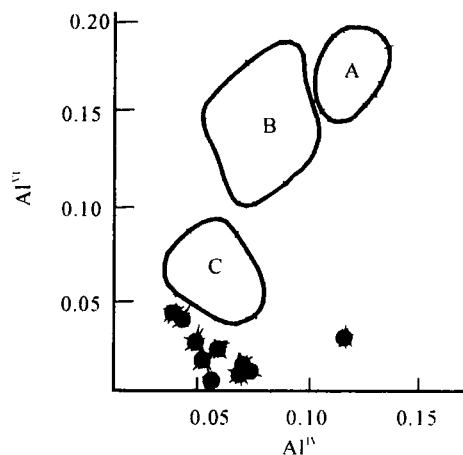


图 2 单斜辉石 Al^{IV} - Al^{VI} 图解

Fig 2 The Al^{IV} - Al^{VI} diagram for the clinopyroxene

3 单斜辉石微量元素特征

3.1 Rb, Sr, Ba, U, Th, Pb, Zr, Hf 和 Nb

单斜辉石 XYZ_2O_6 化学组成中 Mg, Fe 为一完全类质同象系列, 组成中次要类质同像代替的主要有 Mg, Fe^{2+} , Mn, Al, Fe^{3+} , Cr^{3+} , Ti^{4+} , V^{3+} , Na 和 Li 等。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, 它们在岩浆岩中不易形成独立矿物, 大多与钾和钙呈类质同像替代关系^[17]。分析结果表明: 本区单斜辉石中 Sr 和 Ba 含量分别为 2.318×10^{-6} ~ 5.453×10^{-6} (平均 3.750×10^{-6}) 和 3.412×10^{-6} ~ 4.968×10^{-6} (平均 4.086×10^{-6}), 明显高于单斜辉石赋存母岩 (粗面玄武岩) 中 Sr (2.520×10^{-6}) 和 Ba (2.565×10^{-6}) 的含量值; 单斜辉石中 Rb 的含量 (47.97×10^{-6} ~ 119.92×10^{-6} , 平均 78.40×10^{-6}) 同样明显高于全岩中 Rb 的含量 (38.27×10^{-6}) (见表 1)。尽管火成岩类岩石中 Rb, Sr 和 Ba 主要应富集于碱性长石、斜长石等富 K, Ca 矿物

相中^[17],但对于玄武质岩石而言,K₂O含量通常较低,碱性长石仅作为次要矿物存在,N₂O主要参与基性斜长石的组成,而岩石中的CaO则主要存在于基性斜长石和高钙含量的单斜辉石中。正是由于单斜辉石晶体结构中X位存在Ca的占位,并可产生Rb,Sr和Ba的类质同像替代,从而使单斜辉石成为玄武岩中(除长石类矿物外)另一重要的Rb,Sr和Ba富集矿物相。

表 1 单斜辉石斑晶电子探针(%)及激光探针(×10⁻⁶)分析结果

Tab 1 Electron probe(%) and LA - ICP - MS analyses results(×10 ⁻⁶) of the clinopyroxene phenocryst											
分析号	Cpx01	Cpx02	Cpx03	Cpx04	Cpx05	Cpx06	Cpx07	Cpx08	Cpx09	Cpx10	全岩 *
SiO ₂	52.60	53.42	52.70	52.52	50.77	53.52	53.43	53.35	53.16	53.32	
TD ₂	0.41	0.34	0.67	0.61	1.04	0.24	0.22	0.46	0.48	0.61	
Al ₂ O ₃	1.73	1.80	1.88	1.97	3.48	1.64	1.67	1.48	1.13	1.34	
C ₂ O ₃	0.62	0.69	0.12	0.11	0.11	0.04	0.00	0.80	0.42	0.23	
FeO	3.86	4.10	5.05	4.76	5.54	6.11	5.99	3.73	4.42	4.40	
MnO	0.05	0.14	0.10	0.11	0.04	0.14	0.09	0.05	0.14	0.14	
MgO	17.13	17.47	16.38	16.51	15.27	16.11	16.71	17.08	17.13	17.00	
CaO	22.73	21.95	22.99	23.14	23.33	21.15	21.63	22.29	22.79	22.83	
Na ₂ O	0.25	0.30	0.22	0.21	0.24	0.55	0.55	0.30	0.17	0.21	
K ₂ O	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	
ND	0.02	0.00	0.03	0.04	0.00	0.08	0.00	0.07	0.03	0.09	
Total	99.47	100.28	100.16	99.99	99.81	99.61	100.34	99.69	99.89	100.23	
[O] =	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Si	1.935 8	1.945 5	1.934 2	1.930 0	1.880 1	1.971 9	1.956 7	1.954 0	1.950 8	1.949 8	
Ti	0.011 4	0.009 2	0.018 5	0.016 8	0.028 9	0.006 7	0.006 1	0.012 7	0.013 3	0.016 8	
Al ^{IV}	0.064 2	0.054 5	0.065 8	0.070 0	0.119 9	0.028 1	0.043 3	0.046 0	0.048 9	0.050 2	
Al ^{VI}	0.010 8	0.022 8	0.015 5	0.015 2	0.031 8	0.043 1	0.028 8	0.017 9	0.000 0	0.007 5	
Cr	0.017 9	0.019 8	0.003 6	0.003 1	0.003 3	0.001 1	0.000 0	0.023 3	0.012 1	0.006 6	
Fe	0.118 7	0.124 9	0.155 0	0.146 2	0.171 4	0.188 1	0.183 3	0.114 2	0.135 7	0.134 6	
Mn	0.001 5	0.004 4	0.003 0	0.003 3	0.001 1	0.004 3	0.002 6	0.001 6	0.004 5	0.004 2	
Mg	0.939 8	0.948 4	0.896 1	0.904 5	0.842 7	0.884 7	0.912 3	0.932 5	0.937 1	0.926 6	
Ca	0.896 2	0.856 5	0.903 9	0.911 1	0.925 5	0.834 7	0.848 6	0.874 8	0.895 9	0.894 2	
Na	0.017 8	0.021 2	0.015 4	0.015 1	0.017 1	0.039 3	0.039 1	0.021 3	0.012 1	0.014 9	
K	0.000 6	0.000 1	0.000 8	0.000 5	0.000 3	0.000 8	0.000 2	0.000 0	0.000 0	0.001 1	
Ni	0.000 7	0.000 0	0.001 0	0.001 1	0.000 0	0.002 4	0.000 0	0.002 1	0.001 0	0.002 6	
Sum	4.015 5	4.007 3	4.012 9	4.016 8	4.022 2	4.005 3	4.020 9	4.000 4	4.011 4	4.009 3	
Mg [#]	0.888 0	0.884 0	0.852 5	0.860 8	0.831 0	0.825 0	0.833 0	0.891 0	0.873 0	0.873 0	
Wo	0.46	0.44	0.46	0.46	0.48	0.44	0.44	0.46	0.46	0.46	
En	0.48	0.49	0.46	0.46	0.43	0.46	0.47	0.49	0.48	0.47	
Fs	0.06	0.06	0.08	0.07	0.09	0.10	0.09	0.06	0.07	0.07	
种属	透辉石	顽透辉石	透辉石	透辉石	透辉石	顽透辉石	顽透辉石	透辉石	透辉石	透辉石	
Sc	16.50	18.45	20.46	21.49	27.95	20.19	35.45	23.61	18.92	21.04	19.85
Ti	9327	10224	9213	8643	8436	10001	9878	9532	7837	9863	7373
V	196.84	245.73	212.82	233.52	196.70	231.85	228.38	235.74	184.18	222.73	158.00
Cr	145.93	116.21	53.76	275.36	321.62	115.50	425.22	63.53	82.91	182.90	455.40
Co	29.16	149.32	31.27	46.88	26.29	77.64	47.39	27.52	32.77	70.95	32.90
Ni	187.44	1893.6	104.11	185.28	135.78	576.24	303.52	104.42	163.39	502.16	212.70
Ga	13.36	59.65	19.81	5.90	18.13	30.79	21.60	26.42	20.89	23.71	14.37
Rb	89.62	119.92	89.27	64.31	47.97	66.10	54.68	85.80	67.21	99.14	38.27
Sr	2318	4052	2953	2368	4107	3923	3921	4720	3685	5453	2520
Y	28.70	32.95	27.16	28.36	32.30	36.95	35.61	36.29	25.10	36.70	26.48
Zr	375.54	540.07	558.30	453.37	553.07	586.70	581.55	781.87	584.66	649.43	334.20
Nb	19.16	22.56	21.58	25.57	18.56	25.20	24.25	27.47	18.89	25.42	18.14
Ba	3697	4968	3412	3587	3873	3745	4403	4742	3493	4952	2565
Hf	11.77	13.20	11.46	16.55	13.43	13.63	13.85	17.21	13.18	16.50	7.95
Pb	51.70	88.12	70.66	63.91	67.10	80.75	69.32	89.79	77.31	108.81	54.76
Th	31.70	23.50	24.07	32.76	26.96	32.88	31.69	41.15	30.43	34.89	21.45
U	5.88	5.96	5.39	6.03	6.67	7.63	7.15	9.09	7.77	8.78	4.76
La	197.00	216.84	144.54	220.30	157.95	219.25	204.70	231.78	148.96	218.50	120.00
Ce	304.58	454.62	298.82	343.70	304.03	415.55	415.61	439.75	275.48	433.66	222.80
Pr	42.27	45.44	30.95	34.88	33.22	46.16	45.65	45.44	32.44	44.20	29.41
Nd	180.56	158.26	118.32	130.26	135.79	176.04	185.67	188.92	110.22	159.90	112.90
Sm	21.92	27.95	21.26	23.66	18.31	26.34	28.56	39.83	24.53	26.80	18.70
Eu	5.65	5.80	4.31	5.96	6.00	7.41	8.11	4.47	5.71	8.71	5.23
Gd	14.80	13.00	14.80	14.57	15.93	17.96	17.87	11.77	14.69	17.62	13.19
Dy	7.22	9.17	5.91	8.42	7.81	8.33	8.81	7.83	6.80	8.11	5.80
Ho	1.29	1.20	0.66	1.39	1.34	1.18	1.39	1.59	1.25	1.38	0.97
Er	2.42	2.19	2.52	3.02	3.50	3.97	2.47	5.81	3.81	5.07	2.32
Yb	3.55	4.37	3.84	5.05	4.87	4.53	3.45	8.68	5.81	4.63	1.86
Lu	0.51	0.47	0.57	0.68	0.67	0.96	0.55	1.10	0.89	0.92	0.26
Eu	0.90	0.81	0.70	0.91	1.05	0.98	1.02	0.49	0.85	1.15	0.97
Ce	0.78	1.31	1.28	0.87	1.20	1.18	1.25	1.20	1.14	1.25	0.89

注:全岩 * 为粗面玄武岩全岩 ICPMS 分析结果; SiO₂ - ND 为单斜辉石电子探针分析结果; Sc - Lu 为单斜辉石激光探针 (LA-ICPMS) 分析结果; 由澳大利亚 Macquarie 大学 GEMOC 国家重点实验室分析。

U, Th, Pb 均为亲石 (亲氧) 元素, 在岩浆岩中 U, Th 与 K 关系密切^[17]。火成岩中 Pb 主要以类质同像形式出现。由于 Pb^{2+} 的离子半径 ($1.18 \times 10^{-10} \sim 1.32 \times 10^{-10} m$) 与 Sr^{2+} ($1.12 \times 10^{-10} \sim 1.27 \times 10^{-10} m$), Ba^{2+} ($1.34 \times 10^{-10} \sim 1.43 \times 10^{-10} m$), K^{+} ($1.33 \times 10^{-10} m$) 相近, 因此 Pb^{2+} 可以在许多造岩矿物的晶格中置换上述离子^[17]。分析结果表明: 本区单斜辉石中 U ($5.39 \times 10^{-6} \sim 9.09 \times 10^{-6}$, 平均 7.04×10^{-6}), Th ($23.50 \times 10^{-6} \sim 41.15 \times 10^{-6}$, 平均 33.15×10^{-6}) 和 Pb ($51.70 \times 10^{-6} \sim 108.81 \times 10^{-6}$, 平均 76.75×10^{-6}) 略高于粗面玄武岩全岩的 U (4.76×10^{-6}), Th (21.45×10^{-6}) 和 Pb (54.76×10^{-6}) 含量, 但差别不大 (见表 1)。这说明玄武质岩石相对于酸性和碱性岩石而言, 其 U, Th, Pb 丰度较低^[17], 而单斜辉石也并非粗面玄武岩中 U, Th, Pb 的主要富集矿物相。

Zr, Hf 和 Nb 在岩浆岩中均易形成独立矿物相, 如锆石、铌钽矿物等, 也可进入造岩矿物中, 如辉石、角闪石、黑云母等^[17]。本区单斜辉石中 Zr ($375.54 \times 10^{-6} \sim 781.87 \times 10^{-6}$, 平均 566.46×10^{-6}), Hf ($11.46 \times 10^{-6} \sim 17.21 \times 10^{-6}$, 平均 14.08×10^{-6}) 和 Nb ($18.56 \times 10^{-6} \sim 25.57 \times 10^{-6}$, 平均 22.87×10^{-6}) 均高于粗面玄武岩全岩的 Zr (334.20×10^{-6}), Hf (7.95×10^{-6}) 和 Nb (18.14×10^{-6}) 含量, 但相差不大, 富集度 (元素矿物中丰度/元素岩石中丰度) 仅 1.3 ~ 1.8。由此说明, Zr, Hf 和 Nb 在玄武岩中有两种不同的富集趋势, 一是以类质同像形式进入辉石等暗色矿物中, 并形成低度富集; 二是形成少量的锆石、铌钽矿等独立矿物相。

3.2 Sc, Ti, V, Cr, Co 和 Ni

该组元素是典型的铁族元素, 在岩浆岩中通常富集于超基性和基性岩中。在单斜辉石的晶体结构中, Ti^{4+} , V^{3+} , Cr^{3+} 均是 Y 位的重要占位离子之一, Sc 和 Co, Ni 又可以类质同像的形式取代 Ti, Fe 和 Mg, 从而在单斜辉石中形成一定程度的富集^[17]。然而, 尽管 Ti, Cr 可以类质同像替代单斜辉石中的 Fe 和 Mg, 但由于 Ti, Cr 在岩浆岩中极易形成独立矿物相, 因而在造岩矿物中 Ti, Cr 仅在链状硅酸盐中含量较高, 其次是层状硅酸盐, 而在架状和岛状硅酸盐中含量均较低。本区单斜辉石中 (见表 1) Sc, Ti, V, Cr, Co 和 Ni 的含量值变化较大, 但其平均值 (分别为 22.41×10^{-6} , 9.295×10^{-6} , 218.85×10^{-6} , 178.29×10^{-6} , 53.92×10^{-6} , 415.59×10^{-6}) 除 Cr 明显偏低外, 其他元素大多略高于母岩 (粗面玄武岩) 中同一元素的含量值。这说明铁族元素在玄武

质岩石中除形成独立的副矿物 (如钛铁矿、铬铁矿、钒钛磁铁矿等) 外, 还可以类质同像形式进入单斜辉石等富铁镁的暗色矿物相中, 并形成低度富集。

为了便于对比, 我们以粗面玄武岩全岩痕量元素含量为标准值, 将单斜辉石中痕量元素进行标准化。结果表明: 配分曲线总体呈较为平直的曲线, 除 Cr 有明显的相对亏损以及 Co, Ni 变化较大外, 其他元素均呈程度不同的低度相对富集状态 (见图 3)。尤其是重稀土元素 Yb 呈较显著的相对富集状态, 自左向右由 Rb 至 Y, 随着不相容性的降低, 元素的相对弱富集程度并无显著变化。这表明单斜辉石中富含丰富的痕量元素, 是玄武质岩石中不相容元素的重要富集矿物相。

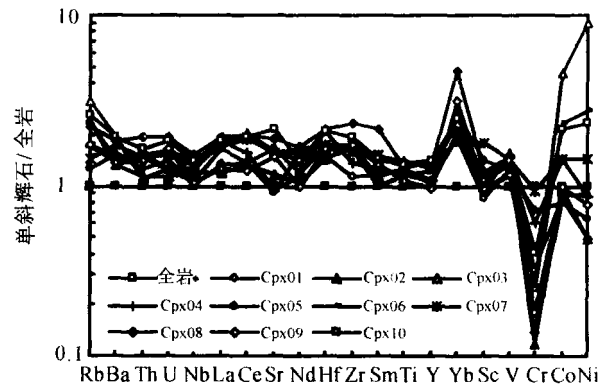


图 3 单斜辉石痕量元素全岩标准化配分型式

Fig 3 Rock-normalized trace element distributions

3.3 稀土元素

表 1 分析结果表明: 本区单斜辉石中稀土元素较为富集, 稀土总量 $656 \times 10^{-6} \sim 1023 \times 10^{-6}$, 平均 857×10^{-6} ; 轻重稀土比 9.87 ~ 14.35, 平均 12.05; 相应的 $(La/Yb)_N$ 为 27 ~ 43 (平均 31), $(Ce/Yb)_N$ 为 13 ~ 33 (平均 22), 说明单斜辉石具有轻稀土强烈富集的元素地球化学特征。

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。含钙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+} 的电价相同, 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^[18]。本区单斜辉石 Eu 变化较大 ($0.49 \sim 1.15$, 平均 0.94), 总体上不显示明显的 Eu 异常。

从图 4 稀土元素球粒陨石标准化配分型式中可看出: 本区粗面玄武岩中单斜辉石稀土配分曲线总体呈右倾负斜率轻稀土强烈富集型配分型式; Eu 处平滑, 基本无异常; 稀土元素自 Ho 至 Lu, 曲线转变

为右倾负斜率,重稀土部分有明显的上翘现象。为了便于对比,我们在图 4 中列出了对应的粗面玄武岩的全岩稀土配分曲线,可以看到本区单斜辉石的稀土配分曲线与其赋存母岩(粗面玄武岩)的稀土配分曲线在轻稀土和中稀土部分完全吻合,不同之处是粗面玄武岩不存在重稀土的上翘现象。

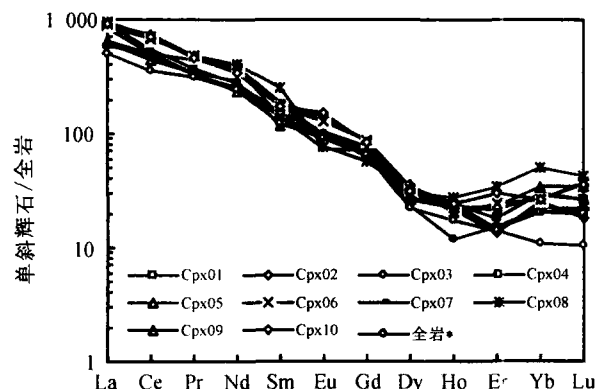


图 4 单斜辉石稀土元素球粒陨石标准化配分型式

Fig 4 Chondrite-normalized rare earth element distributions

控制矿物稀土配分的因素应主要来自 3 个方面^[18]: 矿物的结晶构造是否允许某些稀土离子进入; 是否有离子半径适合的元素可置换; 给定结晶构造位置键力和电荷是否有利,离子半径是否适合。除此而外,母岩浆的地球化学性状以及矿物结晶时的物化条件也是决定矿物稀土配分的重要因素。本区单斜辉石中 X 位和 Y 位 Mg, Fe, Ca 的占位,以及 Ti, Rb, Sr, Ba 的较强富集和 Th, U, Zr, Hf, Sc 等元素的低度富集,均有利于稀土元素的广泛类质同像。然而,母岩浆中较高的稀土丰度 ($REE = 559.92 \times 10^{-6}$) 及 Eu 不亏损的地球化学模型,又为单斜辉石捕获稀土元素提供了物质条件,从而造成本区单斜辉石中稀土总量高、强烈富集轻稀土、Eu 不亏损的特殊稀土配分型式。

4 结 论

北羌塘半岛湖新第三纪粗面玄武岩中单斜辉石斑晶属典型的透辉石-钙铁辉石系列,在辉石成分梯形图中主要位于透辉石区内,其 Al^{IV} 和 Al^{VI} 相对量比关系表明它们为粗面玄武岩浆上升过程中逐步结晶形成,玄武岩浆为地幔橄榄岩局部熔融的产物。本区单斜辉石中富含 Rb, Sr, Ba, Th, U, Pb, Zr, Hf 及 Sc, Ti, V 等微量元素,均呈不同程度的相对富集状态,表明单斜辉石是玄武岩中重要的微量元素赋存

矿物相。正是由于单斜辉石中 Ca, Mg, Fe 的占位,以及 Rb, Sr, Ba, Zr, Ti, V, Sc 等一系列元素的相对富集,为稀土元素的广泛类质同像替代提供了前提条件,从而造成单斜辉石中稀土总量高、轻稀土强烈富集、Eu 不亏损等特定的地球化学特征。

参考文献:

- [1] 邓万明. 青藏高原北部新生代板内火山岩 [M]. 北京:地质出版社, 1998. 1-168.
- [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 [J]. 矿物学报, 1999, 19(2): 236-244.
- [3] 赖绍聪. 青藏高原北部新生代火山岩成因机制 [J]. 岩石学报, 1999, 15(1): 98-104.
- [4] 刘嘉麟. 中国火山 [M]. 北京:科学出版社, 1999. 53-135.
- [5] 邓万明, 孙宏娟. 青藏北部板内火山岩的同位素地球化学与源区特征 [J]. 地学前缘, 1998, 5(4): 307-317.
- [6] 邓万明, 孙宏娟. 青藏高原新生代火山活动与高原隆升关系 [J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 952-958.
- [7] 赖绍聪, 邓晋福, 赵海玲. 青藏高原北缘火山作用与构造演化 [M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1996. 1-120.
- [8] 杨德明, 李 才, 和钟华, 等. 西藏尼玛宋我日火山岩岩石化学特征与构造环境 [J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 972-977.
- [9] TURNER S, ARNAUD N, L U J, *et al* Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan plateau: implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts [J]. Journal of Petrology, 1996, 37(1): 45-71.
- [10] MILLER C, SCHUSTER R, KLOTZ I U, *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]. Journal of Petrology, 1999, 40(9): 1399-1424.
- [11] ARNAUD N O, V DAL P, TAPPONNIER P, *et al* The high K_2O volcanism of northwestern Tibet: geochemistry and tectonic implications [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1992, 111: 351-367.
- [12] UGO P. Shoshonitic and ultrapotassic post collisional dykes from northern Karakorum (Sinkiang, China) [J]. Lithos, 1990, 26: 305-316.
- [13] 赖绍聪, 伊海生, 刘池阳, 等. 青藏高原北羌塘新生代高钾钙碱岩系火山岩角闪石类型及痕量元素地球化学 [J]. 岩石学报, 2002, 18(1): 17-24.
- [14] 赖绍聪, 伊海生, 刘池阳, 等. 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 [J]. 自然科学进展, 2002, 12(3): 311-314.
- [15] 王 濮, 潘兆麟, 翁玲宝. 系统矿物学. 中册 [M]. 北京:地质出版社, 1984. 266-373.

- [16] 陈光远,孙岱生,殷辉安.成因矿物学与找矿矿物学 [M].重庆:重庆出版社,1987. 222-287. 北京:科学出版社,1989. 133-246
- [17] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等.元素地球化学 [M].北京:科学出版社,1984. 50-372. (编辑 张银玲)
- [18] 王中刚,于学元,赵振华,等.稀土元素地球化学 [M].

Trace element geochemistry and classification of the clinopyroxene in Cenozoic trachybasalt from north Qiangtang area, Tibetan Plateau

LA I Shao-cong, Q N Jiang-feng, LI Yong-fei

(Key Laboratory of Continental Dynamics, Ministry of Education, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: **Aim** According to the research on the major and trace element compositions of the clinopyroxenes in the basalt from the studied area, to discuss the feature of the magma source region and its significance of the continental dynamics. **Methods** Based on the electron microprobe (EMP) and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometric (LA-ICPMS) analyses, the major and trace element features of clinopyroxenes in the Cenozoic trachybasalt from north Qiangtang are reported. **Results** The data indicate that the clinopyroxenes belong to diopside series, being resulted from the crystallization of the trachybasaltic magma system during its raising process. The clinopyroxenes exhibit Rb, Sr, Ba, Zr, Hf, Nb, Th, U, Pb and Sc, Ti, V enrichment. Especially, the clinopyroxenes show strong enrichment in rare earth elements ($REE = 857 \times 10^{-6}$), but no remarkable Eu anomaly. **Conclusion** It implies that clinopyroxene is a significant trace and rare earth element-bearing mineral phase.

Key words: clinopyroxene; major and trace elements; Cenozoic volcanic rock; northern Qiangtang; Tibetan Plateau

(上接第 610 页)

Sedimentary characteristics and distribution of oil and gas in Chang 6 in the Yanchang Oilfield

LI Yu-hong^{1,2,3}, ZHANG Hua-an⁴, WEI Xian-yang³,
WU Fu-li⁴, MENG Xiang-zhen⁴

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China; 4. Yanchang Petroleum Administration Bureau, Yan'an 717208, China)

Abstract: **Aim** To understand the sedimentary characteristics of reservoir, oil-gas distribution and control factors in order to guide the exploration for oil field; **Methods** Synthetic studies on the sequence development and its relationship with the oil-gas distribution using sedimentary facies and division of the sequence stratigraphy. **Results** Dividing the micro-sedimentary facies of oil field and understanding the distribution characteristics of sand bodies; Dividing bedding sequence and revealing the development of sequences and its relationship with the oil-gas distribution; **Conclusion** The main reservoir of oil field is the distributary channel sand bodies developed on the delta plain of the low stand system tract formed by the alluvial sequences. The distributary channel sand bodies under the water developed at the delta front in the high stand tract of lake facies sequences also is the important reservoir.

Key words: Yanchang Oilfield; Chang 6; sedimentary facies; system tract