

专题研究·

东天山八大石早二叠世二长花岗岩中闪长质包体的特征、锆石定年及其地质意义

汪传胜^{1,2} 张遵忠² 吴昌志¹ 唐俊华² 邵毅² 刘四海¹ 冯慧¹ 雷如雄¹

(1. 南京大学 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学 地球科学系, 江苏南京 210093;
2. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 江苏南京 210007)

摘要: 东天山八大石黑云母二长花岗岩中广泛发育闪长质包体。闪长质包体与寄主花岗岩在矿物组合上不同, 但两者中同类矿物的种属相似。与寄主花岗岩相比, 闪长质包体的 Fe、Mg、Ti、Ca 含量较高, 而 Na、K、Si 的含量较低; 富 HREE、Sr, 贫 Ba、Th、Hf、Zr。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄显示闪长质包体与寄主花岗岩在形成时间上非常接近(分别为 301 ± 1 Ma 和 298 ± 2 Ma), 表明两者均形成于早二叠世。闪长质包体和寄主花岗岩具有正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($+4.15$ 和 $+3.06$) 较低的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) ($0.704\,12$ 和 $0.704\,75$) 和相近的模式年龄(t_{DM}) (812 Ma 和 944 Ma)。暗示其母岩浆来自新元古代时从亏损地幔分离出来的初生地壳源区。综合岩石学、地球化学和同位素等方面的研究, 笔者认为八大石闪长质包体属于同源包体, 为寄主花岗岩同源母岩浆经结晶分异作用形成的早期产物。

关键词: 闪长质包体 同源包体 二长花岗岩 结晶分异 东天山

中图分类号:P588.12⁺1; P597

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2009)04-0299-17

Petrologic characteristics, zircon geochronology of dioritic enclaves in Early Permian Badashi monzogranite of East Tianshan Mountains and their geological implications

WANG Chuan-sheng^{1,2}, ZHANG Zun-zhong², WU Chang-zhi¹, TANG Jun-hua², SHAO Yi²,
LIU Si-hai¹, FENG Hui¹ and LEI Ru-xiong¹

(1. State Key Laboratory for Mineral Deposit Research, Nanjing University; Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. East China Geoexploration & Development Bureau for Nonferrous Metals of Jiangsu Province, Nanjing 210007, China)

Abstract: Dioritic enclaves are widely distributed in Badashi biotite-monzogranite of the East Tianshan Mountains. These dioritic enclaves and their host granite are different in mineral association, but species of the same mineral within them are similar to each other. In comparison with the host granite, the dioritic enclaves are higher in Fe, Mg, Ti, Ca and richer in HREE, Sr, but lower in Na, K, Si and poorer in Ba, Th, Hf, Zr. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating gave ages of 301 ± 1 Ma and 298 ± 2 Ma for the dioritic enclaves and their host granite, respectively, indicating their Early Permian emplacement. The dioritic enclaves and their host granite have positive in $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($+4.15$ and $+3.06$) values and relatively low ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) ($0.704\,12$ and $0.704\,75$) with fairly similar model ages (t_{DM}) (812 Ma and 944 Ma, respectively). It is suggested that the dioritic enclaves and

收稿日期: 2009-03-01; 修订日期: 2009-05-17

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411301-4, 2001CB409802) 国家自然科学基金资助项目(40472042, 40672040, 40603008)

作者简介: 汪传胜(1971-)博士生, 从事岩石学、矿床学和地球化学研究 E-mail: wangesah@126.com。

their host granite were derived from the same parental magma that resulted from partial melting of the Neoproterozoic depleted-mantle-sourced juvenile crust. Petrologic, geochemical and isotopic studies prove that the Badashi dioritic enclaves are autoliths and the earlier products generated by crystal fractionation of the host granite parental magma.

Key words: dioritic enclave; autolith; monzogranite; crystal fractionation; East Tianshan Mountains

花岗岩中闪长质包体的研究对寄主花岗岩的物质来源、演化、上侵及定位事件的判别具有重要意义。人们对闪长质包体的成因机制已有广泛的研究概括起来有如下 4 种类型:①重熔残留体 (restite) 源区岩石经过部分熔融留下的耐熔物质残留体,能指示岩浆的物质来源 (Chappell *et al.*, 1987; Chappell and White, 1991; Waught *et al.*, 2001; 王德滋等, 1992; 庞保成, 2001); ②不混溶包体 (immiscible enclave): 长英质岩浆和镁铁质岩浆混合时未被完全消化的产物 (Vernon, 1983; Didier and Ferrand, 1987; Didier and Barbarin, 1991; Barbarin and Didier, 1992; Elburg, 1996; Silva *et al.*, 2000; 刘成东等, 2002; 杨策等, 2006; 张旗等, 2007); ③同源包体 (autolith): 包括堆积体 (cumulates) 和淬火 (骤冷) 包体 (quenched enclave), 分别指岩浆早期结晶相或边缘相构成的“刚性包体”, 与岩浆分离结晶作用有关, 从成因意义上讲, 堆晶体与析离体 (schlieren) 相当, 析离体则指岩浆分异作用过程中暗色矿物相对集中凝结成团块等, 与堆积体相比, 其范围要小些 (Didier, 1973; 徐夕生等, 1988; 杜杨松, 1994; 周金城等, 1994; 李宗怀等, 2004; 陈荣等, 2005); ④捕掳体 (xenolith): 岩浆上侵和侵位过程中侵吞围岩残留下来的物质 (Boulton and Gasquet, 1995; Maas *et al.*, 1997)。

在新疆和其他地区, 闪长质包体广泛发育在寄主花岗岩中, 如东准噶尔也布山花岗岩和西准噶尔庙儿沟二长花岗岩 (李宗怀等, 2004)、桂东北姑婆山里松花岗岩 (朱金初等, 2006)、葡萄牙中部 Nelas 黑云母花岗岩 (Silva *et al.*, 2000) 等皆含有包体。笔者在东天山八大石二长花岗岩中亦发现了大量的灰黑色闪长质包体, 包体的结构、构造、成分特征如何? 它的成因机制怎样? 它与寄主花岗岩如何伴生在一起, 成因上有何联系? 等等, 目前尚不完全清楚。本文将对八大石闪长质包体和寄主花岗岩进行系统的岩相学、地球化学和同位素年代学对比研究, 以便探讨八大石包体的成因机制以及它与寄主花岗岩的成因联系和地质意义。

1 地质概况

八大石花岗岩岩体位于新疆哈密市东北面约 50 km 处, 呈岩基状产出 (图 1)。研究区属于东天山哈尔里克晚古生代岛弧带的东段 (马瑞士等, 1993; Gu *et al.*, 1999)。其南为吐(鲁番)-哈(密)地块, 其北为西伯利亚板块南缘的库兰喀孜干岛弧。在哈尔里克岛弧和库兰喀孜干岛弧之间为克拉麦里-麦钦乌拉断裂带, 其中分布有一条呈 NW 走向的蛇绿岩带, 蛇绿岩带中硅质岩的放射虫化石年龄为泥盆纪和早石炭世 (舒良树等, 2003)。在克拉麦里山南侧的上石炭统下部发现厚达 1 600 m 具有磨拉石特征的粗粒碎屑岩 (BGMRX, 1999), 同时, 该研究区晚石炭世之前的地层受到强烈的褶皱变形, 表明板块主碰撞的时间可能为早石炭世末—晚石炭世初 (李锦轶, 2004), 主碰撞后该区进入挤压-伸展转折阶段 (310~285 Ma, 顾连兴等, 2006)。

八大石花岗岩岩体长约 50 km, 宽约 20 km, 出露面积约 800 km², 其长轴方向与区域构造线基本一致 (图 1)。八大石花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +3.06 \epsilon_{\text{Nd}}(0) = +0.82 ({}^{87}\text{Sr} / {}^{86}\text{Sr}) = 0.70475$, 模式年龄 $t_{\text{DM}} = 944$ Ma, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 298 ± 2 Ma (汪传胜等, 2009), 为新疆东北部哈尔里克区晚古生代碰撞后的岩浆活动产物 (顾连兴等, 2006)。花岗岩呈不规则状侵入于泥盆系浅海相灰绿、灰色中基性、中酸性火山岩、火山碎屑岩及正常碎屑岩和石炭系浅海-滨海相和海陆交互相黄绿、灰绿色火山碎屑岩和正常碎屑岩夹中酸性火山岩及较早侵位的石英闪长岩围岩 (锆石 U-Pb 年龄为 316 ± 3 Ma, 孙桂华等, 2005) 中, 花岗岩岩体后来又被较晚侵入的呈东西走向的灰黑色辉绿岩墙 (产状 $15^\circ \angle 80^\circ$) 所穿插。

八大石闪长质包体广泛分布在寄主花岗岩中, 并无定向排列, 包体体积较小, 一般直径为 2~10 cm, 形状各异, 如球形、椭圆形、纺锤形、次棱角状等, 与寄主岩的界线比较模糊, 甚至见到斜长石斑晶跨两者之间 (图 2a, 2b)。另外, 笔者在八大石村旁

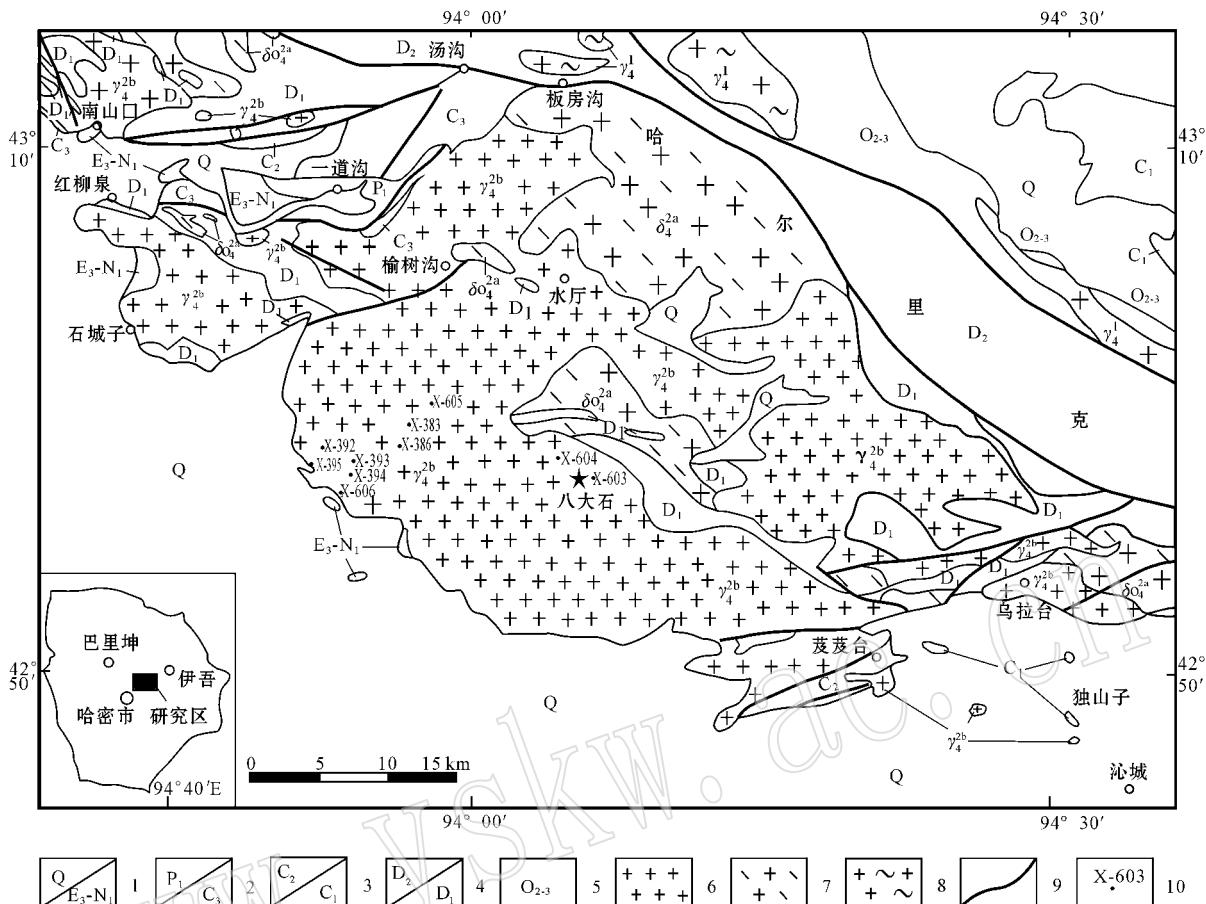


图1 八大石岩体地质略图 [据新疆地质局(1967)^①、新疆地质矿产局第六地质大队(1984)^②修编]

Fig. 1 Geological sketch map of the Badashi plutons (modified after Xinjiang Bureau of Geology, 1967^①; No. 6 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, 1984^②)

1—第四系和第三系；2—下二叠统和上石炭统；3—中石炭统和下石炭统；4—中泥盆统和下泥盆统；5—中-下奥陶统；6—晚古生代二长花岗岩；7—晚古生代石英闪长岩；8—早古生代花岗岩；9—断裂；10—采样点及编号，其中X-392、X-393、X-394、X-603和X-606为包体样品编号；X-383、X-386、X-395和X-604为寄主花岗岩样品编号

1—Quaternary and Tertiary; 2—Lower Permian and upper Carboniferous; 3—Middle and Lower Carboniferous; 4—Middle and Lower Devonian; 5—Middle and Lower Ordovician; 6—Late Palaeozoic monzogranite; 7—Late Palaeozoic quartz diorite; 8—Early Palaeozoic granite; 9—fault; 10—sampling point and its serial number; X-392, X-393, X-394, X-603 and X-606 are serial number of enclave samples, whereas X-383, X-386, X-395 and X-604 are serial number of host samples

发现相对集中且个体较大的包体，前人已经证实这类包体为寄主花岗岩岩浆在侵位过程中捕获石英闪长岩围岩而形成的捕掳体（新疆地质局，1967^①；邹长兴，1984；褚强，1988），本文对其不再讨论。

2 岩相学特征

包体为灰黑色闪长岩（图2c、2e），细粒-细中粒

结构，矿物主要由斜长石（72%~78%）、角闪石（13%~18%）、黑云母（2%~8%）、石英（2%~4%）组成。副矿物包括磁铁矿、榍石、磷灰石、锆石等，其总量小于3%，其中磷灰石呈短柱状。寄主花岗岩为灰色、灰白色、浅肉红色二长花岗岩（图2d、2f），中粒似斑状花岗结构，矿物主要由斜长石（26%~40%）、钾长石（22%~38%）、石英（24%~38%）、黑云母（1%~5%）组成，部分样品含有角闪石，少量副矿物

① 新疆维吾尔自治区地质局. 1967. 地质矿产图伊吾幅（1:20万）说明书.

② 新疆地质矿产局第六地质大队. 1984. 新疆哈密岩浆岩图（1:50万）.

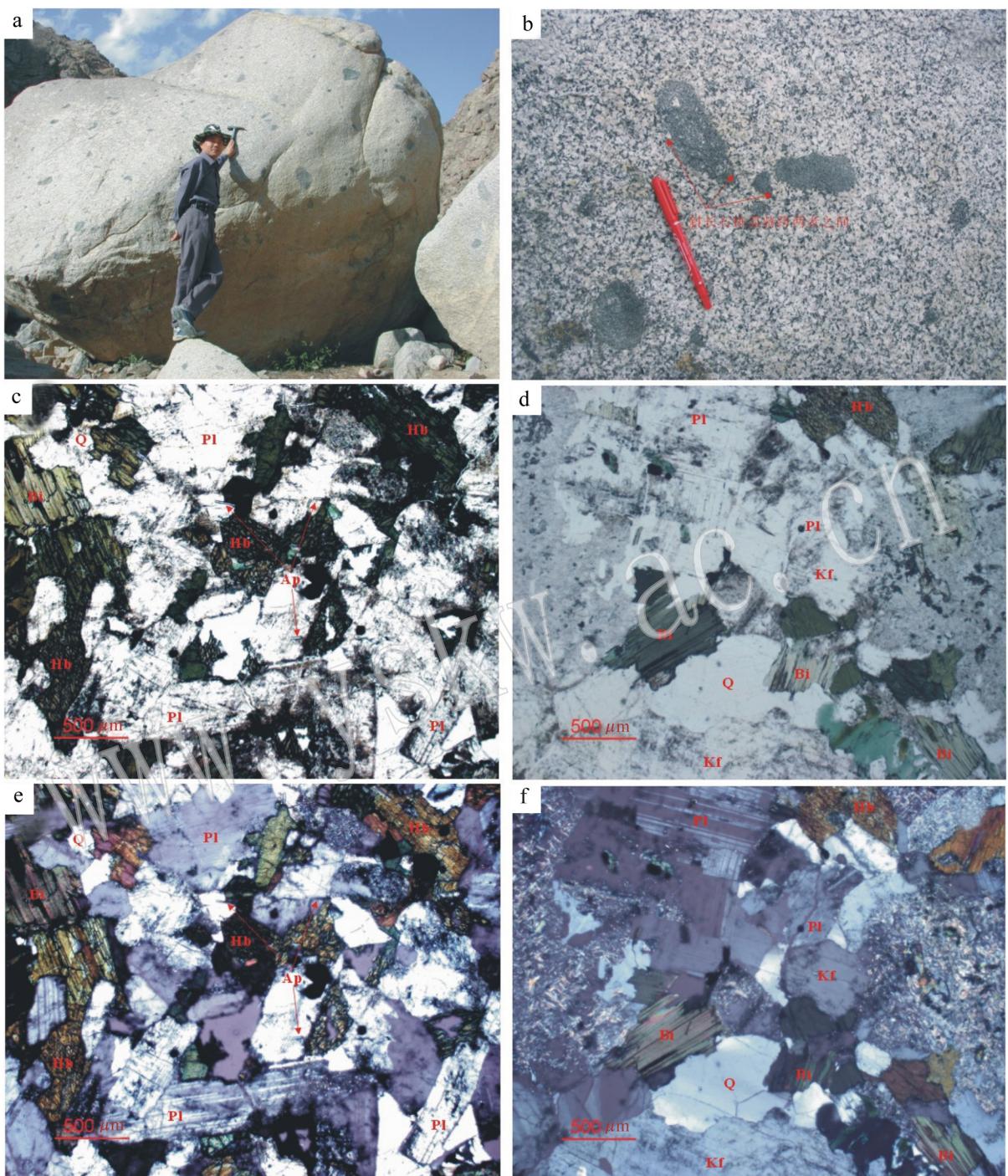


图 2 八大石闪长质包体的野外和镜下照片

Fig. 2 Field photos and micrographs of Badashi dioritic enclaves

a—寄主花岗岩中的闪长质包体; b—包体与寄主岩界线不明, 斜长石斑晶跨两者之间; c—闪长质包体照片, 单偏光; d—寄主花岗岩照片, 单偏光; e—闪长质包体照片, 正交偏光; f—寄主花岗岩照片, 正交偏光; Hb—普通角闪石; Bi—黑云母; Pl—斜长石; Kf—钾长石; Q—石英; Ap—磷灰石

a—dioritic enclaves in host granite; b-transitional contact between enclaves and host granite, with plagioclace phenocryst straddling their boundary; c—microphotograph of dioritic enclave, plane-polarized light; d—microphotograph of host granite, plane-polarized light; e—microphotograph of dioritic enclave, cross-polarized light; f—microphotograph of host granite, cross-polarized light; Hb—amphibole; Bi—biotite; Pl—plagioclase; Kf—alkali feldspar; Q—quartz; Ap—apatite

为磁铁矿、钛磁铁矿、榍石、磷灰石和锆石等。斑晶粒径2.5~7.0 mm,其量不超过30%,主要为灰白色斜长石和浅肉红色钾长石。基质粒径0.2~1.2 mm。与寄主花岗岩相比,闪长质包体中角闪石、黑云母等暗色矿物和斜长石含量较多,石英含量很少,不含钾长石,包体颜色较深,矿物颗粒较小。

主要造岩矿物斜长石、角闪石和黑云母的特征如下:

斜长石 包体中斜长石为板状或长柱状自形-半自形晶,粒径0.3~1.0 mm,牌号 An_{29-34} ,为更-中长石(表1),见正环带构造,部分受到绢云母化。寄主花岗岩中斜长石为柱状或板状自形-半自形晶,在基质中粒径0.5~1.2 mm,斑晶粒径3.5 mm左右,牌号 An_{20-38} ,多为更长石,少量为中长石(表1)聚片双晶发育,双晶纹细而密,环带少见,大部分受到绢云母化。

表1 八大石闪长质包体和寄主花岗岩中斜长石成分电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of plagioclases from the Badashi dioritic enclaves and their host granites

岩体名称	样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total	Ab	An	Or
闪长质包体	X-394-1	62.90	0.00	25.03	0.03	0.00	0.00	5.79	7.82	0.12	0.00	101.68	70.4	28.8	0.8
	X-394-2	60.26	0.02	26.07	0.13	0.02	0.01	6.98	7.80	0.12	0.00	101.40	66.4	32.9	0.7
	X-394-3	61.56	0.00	25.06	0.22	0.00	0.01	5.97	8.05	0.18	0.03	101.10	70.2	28.8	1.0
	X-394-4	61.85	0.02	25.45	0.16	0.00	0.00	5.81	7.60	0.11	0.01	101.00	69.9	29.5	0.7
	X-394-5	61.09	0.00	25.58	0.11	0.00	0.01	6.45	7.05	0.00	0.00	100.29	66.4	33.6	0.0
寄主花岗岩	X-383-1	60.71	0.01	25.83	0.20	0.00	0.00	6.27	6.92	0.26	0.01	100.20	65.5	32.8	1.7
	X-383-2	61.28	0.01	25.77	0.22	0.00	0.00	5.94	6.71	0.34	0.00	100.27	65.7	32.1	2.2
	X-383-3	60.16	0.00	26.58	0.24	0.00	0.00	6.32	6.76	0.12	0.00	100.17	65.4	33.8	0.8
	X-383-4	58.86	0.00	26.75	0.13	0.00	0.00	6.85	6.09	0.24	0.00	98.92	60.7	37.7	1.6
	X-386-5	60.98	0.01	24.80	0.16	0.00	0.00	5.64	7.51	0.25	0.04	99.39	69.6	28.9	1.5
	X-386-6	64.54	0.02	23.68	0.01	0.00	0.00	4.01	8.62	0.17	0.06	101.11	78.8	20.3	1.0

注 矿物化学成分由南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室 JEOL JXA-8800M型电子探针仪分析,测试条件为:加速电压15 kV,束流10 nA,特征峰测量时间10 s,背景测量时间5 s,数据采用ZAF方法修正,表2和表3的测试方法与表1相同。

角闪石 电子探针分析结果列于表2。包体中角闪石为柱状自形-半自形晶,粒径0.4~1.0 mm,多色性较明显(N_g =蓝绿色, N_p =浅绿色或黄色),角闪石式解理发育,根据国际角闪石分类命名法(IMA-CNMMN,1997),为铁角闪石。寄主花岗岩中角闪石为柱状自形晶,粒径0.2~0.6 mm,多色性较明显(N_g =蓝绿色, N_p =黄色),可见角闪石式解理,为铁角闪石。与寄主花岗岩中角闪石相比,包体中角闪石富镁和钙,贫铝和钠,均为铁角闪石。

黑云母 电子探针分析结果列于表3。包体中黑云母呈0.8~1.2 mm的半自形鳞片状,多色性明显(N_g =深褐色或草绿色, N_p =黄色),在黑云母分类图解(图3)中,主要为镁质黑云母,少量为铁质黑云母。寄主岩中黑云母呈0.2~1.0 mm的半自形鳞片状,多色性明显(N_g =草绿色或暗褐色, N_p =浅黄色)部分发生绿泥石化,在黑云母分类图解(图3)中,主要为铁质黑云母,少量为镁质黑云母。与寄主花岗岩中黑云母相比,包体中黑云母富镁,贫铁和钛。

3 地球化学

3.1 实验技术

主量元素由南京大学现代分析中心采用VF320单道荧光光谱仪(XRF)测定,分析精度优于5%,分析方法采用熔融制片法,电压40 kV,电流60 mA;其中 Fe_2O_3 和FeO由南京大学地球科学系中心实验室采用湿法测定,分析精度优于0.5%。工作条件为 $105\pm2^{\circ}C$ 恒温条件下烘干2 h,置于干燥器中0.5 h后称样,用碱熔法测 Fe_2O_3 ,用酸溶法测FeO。

微量元素由南京大学成矿作用国家重点实验室采用ICP-MS分析(Finnigan Element 2),分析精度优于10%,样品制作程序为:将研磨好的样品50 mg加入1 mL HF加热到150°C蒸至近干除硅,加1 mL HF和0.6 mL HNO₃,密封后置于190°C烘箱内加热96 h到样品完全分解后,蒸至近干,除去部分HF,再加入1 mL HNO₃,加热蒸至近干,重复2次,加热5 h

表2 八大石闪长质包体和寄主花岗岩中角闪石成分电子探针分析结果

 $w_B / \%$

Table 2 Electron microprobe analyses of amphiboles from the Badashi dioritic enclaves and their host granites

岩体名称 点号	闪长质包体						寄主花岗岩	
	X-394-1	X-394-2	X-394-3	X-394-4	X-394-5	X-394-6	X-386-1	X-386-2
SiO ₂	45.34	45.89	44.60	44.74	46.19	45.78	45.13	44.39
TiO ₂	1.36	1.31	1.28	1.46	1.19	1.06	1.54	1.61
Al ₂ O ₃	7.96	7.88	7.73	8.44	7.50	7.91	7.92	8.39
FeO*	17.11	16.81	19.42	18.03	18.18	17.73	19.29	18.54
MnO	0.23	0.30	0.25	0.28	0.30	0.27	0.41	0.25
MgO	11.56	11.20	10.06	10.86	11.82	10.95	10.19	10.39
CaO	11.80	11.70	11.66	11.91	11.40	12.04	10.98	10.91
Na ₂ O	1.27	1.18	1.01	1.17	1.27	1.29	1.67	1.73
K ₂ O	0.66	0.64	0.69	0.65	0.56	0.59	0.52	0.54
P ₂ O ₅	0.02	0.03	0.02	0.04	0.00	0.08	0.02	0.00
Total	97.31	96.94	96.73	97.57	98.42	97.72	97.66	96.74
T Si ⁴⁺	7.17	7.24	7.13	7.07	7.23	7.20	7.13	7.07
T Al ³⁺	0.83	0.76	0.87	0.93	0.77	0.80	0.87	0.93
C Al ³⁺	0.65	0.71	0.59	0.64	0.62	0.67	0.60	0.64
C Ti ⁴⁺	0.16	0.15	0.15	0.17	0.14	0.13	0.18	0.19
C Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C Mg ²⁺	0.05	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.10	0.06
C Fe ²⁺	2.26	2.22	2.60	2.38	2.38	2.33	2.55	2.47
C Mn ²⁺	1.55	1.50	1.36	1.45	1.57	1.46	1.36	1.40
B Mg ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B Fe ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B Mn ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B Ca ²⁺	2.00	1.98	2.00	2.02	1.91	2.03	1.86	1.86
B Na ⁺	0.00	0.02	0.00	0.00	0.09	0.00	0.14	0.14
A Na ⁺	0.39	0.34	0.31	0.36	0.30	0.39	0.37	0.40
A K	0.13	0.13	0.14	0.13	0.11	0.12	0.10	0.11

矿物种属

铁角闪石

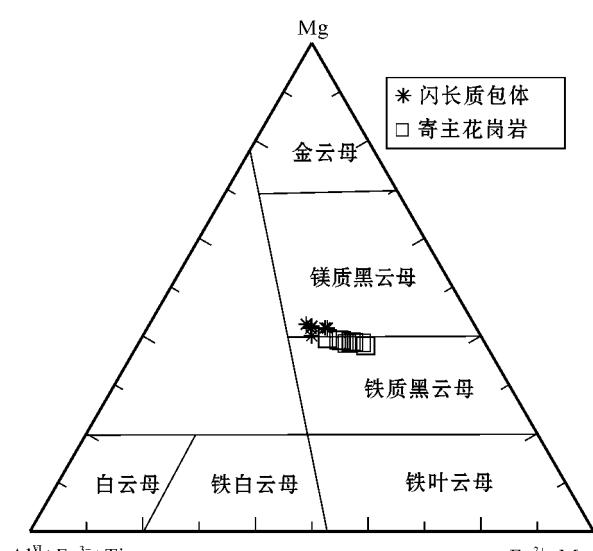
注 FeO* 为全铁, 角闪石分子式中离子系数以 23 个氧原子计算, 其中 Fe³⁺ 与 Fe²⁺ 按 Schumacher(1997) 方法计算。

图3 八大石闪长质包体和寄主花岗岩中黑云母的分类图解(据 Foster, 1960)

Fig. 3 Classification of biotites from the Badashi dioritic enclaves and their host granites (after Foster, 1960)

浸出样品, 然后将溶液转移到 50 mL 容量瓶中, 加入 1 mL 的 500 ppb 内标溶液, 稀释至 50 mL, 待测, 具体分析方法见 Qi 等(2000)。

Rb-Sr、Sm-Nd 同位素组成分析在中国科学院地质和地球物理研究所同位素地球化学实验室进行, 详细分析流程见黄首等(1990)和侯增谦等(2005), 测量仪器为德国 Finnigan 公司 MAT-262 热电质谱计。实验测定 NBS987 Sr 标样中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710\ 226 \pm 12$ (2σ), 标准化值采用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.119\ 4$; BCR-2 岩石标样中 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\ 513 \pm 7$ (2σ) 标准化值采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721\ 9$ 。Rb-Sr 和 Sm-Nd 的全流程本底分别为 100 pg 和 50 pg 左右。

为了获得定年用的锆石, 将野外采集的重砂样品先破碎, 后漂洗, 再烘干, 最后经过重磁分选出锆石后, 在双目镜下挑选无色透明、晶形较好、无包裹体的颗粒, 镶嵌于环氧树脂中抛光, 使锆石内部暴露, 再依次进行阴极发光显微照相及 LA-ICP-MS 分析。锆石阴极发光显微照相在中国科学院广州地化

表3 八大石闪长质包体和寄主岩中黑云母成分电子探针分析结果

 $w_B/\%$

Table 3 Electron microprobe analyses of biotites from the Badashi dioritic enclaves and their host granites

岩体名称 点号	闪长质包体						寄主花岗岩							
	X-394-1	X-394-2	X-394-3	X-394-5	X-394-6	X-394-4	X-383-1	X-383-3	X-383-4	X-386-6	X-386-7	X-383-2	X-386-5	X-386-8
SiO ₂	36.25	37.39	37.21	36.90	37.32	36.93	35.88	35.49	35.71	35.98	36.05	35.90	35.95	35.43
TiO ₂	3.06	2.99	2.87	2.40	2.57	2.70	4.03	4.29	4.65	4.42	4.13	4.28	4.64	4.24
Al ₂ O ₃	14.89	15.50	15.25	15.88	15.43	15.41	14.38	14.49	14.58	14.18	13.71	14.54	14.44	13.83
FeO*	20.17	20.51	20.13	20.57	20.74	21.00	23.15	22.00	23.42	23.08	23.00	22.80	22.84	23.47
MnO	0.14	0.16	0.20	0.11	0.22	0.12	0.14	0.19	0.18	0.20	0.24	0.17	0.25	0.32
MgO	10.86	11.04	11.24	11.06	11.14	10.64	8.69	8.87	8.62	8.97	8.97	9.07	9.02	9.05
CaO	0.07	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.09	0.07	0.12	0.03	0.08	0.05	0.11	0.08	0.08	0.14	0.11	0.13	0.13	0.17
K ₂ O	8.70	9.09	9.53	9.02	9.35	9.42	8.24	8.73	9.08	9.22	8.45	9.02	8.71	9.26
P ₂ O ₅	0.00	0.01	0.12	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Total	94.23	96.80	96.66	95.96	96.88	96.26	94.65	94.14	96.33	96.20	94.65	95.89	95.97	95.79
Si ⁴⁺	5.76	5.78	5.75	5.75	5.76	5.75	5.80	5.74	5.67	5.71	5.82	5.70	5.72	5.64
Al ³⁺	2.24	2.22	2.25	2.26	2.24	2.25	2.20	2.26	2.33	2.30	2.18	2.30	2.28	2.36
Al ³⁺	0.55	0.61	0.53	0.66	0.57	0.58	0.53	0.51	0.40	0.35	0.43	0.42	0.42	0.24
Ti ⁴⁺	0.37	0.35	0.33	0.28	0.30	0.32	0.49	0.52	0.56	0.53	0.50	0.51	0.56	0.51
Fe ³⁺	0.74	0.72	0.96	0.83	0.94	0.93	0.42	0.53	0.68	0.79	0.52	0.72	0.56	1.03
Fe ²⁺	1.94	1.93	1.64	1.85	1.74	1.81	2.71	2.45	2.43	2.27	2.58	2.31	2.48	2.09
Cr ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn ²⁺	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04
Mg ²⁺	2.57	2.55	2.59	2.57	2.56	2.47	2.09	2.14	2.04	2.12	2.16	2.15	2.14	2.15
Ba ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca ²⁺	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ⁺	0.03	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05
K ⁺	1.77	1.79	1.88	1.79	1.84	1.87	1.70	1.80	1.84	1.87	1.74	1.83	1.77	1.88
FM	0.43	0.43	0.39	0.42	0.40	0.42	0.56	0.53	0.54	0.52	0.54	0.52	0.54	0.49
矿物种属	←	镁质黑云母	→ ←				铁质黑云母	→ ←			镁质黑云母	→		

注 FeO* 为全铁 黑云母的化学成分先用郑巧荣(1983)方法计算得到 Fe₂O₃ 含量 ,再用 MinPet 2.0 计算其结构式 ,FM=(Fe³⁺ + Fe²⁺) / (Mg²⁺ + Fe³⁺ + Fe²⁺),为铁镁指数。

所同位素与地球化学重点实验室阴极发光仪上完成 ,定年在西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室进行 ,所用质谱仪为 PerkinElmer/SC IEX 公司带有动反应池 (Dynamic reaction cell 缩写为 DRC) 的四级杆 ICP-MS Elan6100DRC ,该仪器可在标准模式和 DRC 模式下运行 本研究在标准模式下进行。具体分析流程和方法见顾晟彦等(2006)和梁细荣等(2000)的文章。锆石 U-Pb 年龄测定采用国际标准锆石 91500 作为外标校正方法 (Wiedenbeck *et al.* , 1995) ,每隔 4、5 个样品分析点测 1 次标准 ,保证标准和样品的仪器条件完全一致。在 20 次锆石分析前后各测 2 次 NIST SRM610 ,以²⁹S(锆石中 SiO₂ 的含量为 32.8%)作为内标 测定锆石中 U、Th 和 Pb 的含量。样品的同位素比值采用 GLITTER (ver4.0 Macquarie University) 程序 ,年龄计算及谐和图的

绘制采用 Isoplot (ver2.49) (Ludwig ,1991) 完成。

3.2 主量元素

闪长质包体主量元素含量、CIPW 标准矿物计算结果及主要岩石化学参数列于表 4 ,另外引用了 5 个寄主花岗岩的化学成分 (汪传胜等 ,2009) ,以便于比较。为了加强研究结论的可靠性 ,在应用主量元素做图时采用了新疆地质矿产局第六地质大队 (1984)、邹长兴(1984)和汪传胜等(2009)的八大石寄主花岗岩数据 28 个。

闪长质包体 SiO₂ 含量为 52.68%~55.20% ,表现为中基性 ;K₂O + Na₂O 的含量为 5.68%~6.45% ,碱性指数 NK/A 为 0.51~0.58 ;铝饱和指数 (A/CNK) 为 0.74~0.78 ;碱度率 A.R 为 1.61~1.78 ,表现为钙碱性铝不饱和 ;铁镁指数 FM 中等 ,为 0.52~0.62 ;分异指数 DI 较低 ,为 46.3~53.1 ,

① 新疆地质矿产局第六地质大队 . 1984. 新疆哈密地区岩浆岩岩石化学成分及查氏数字特征表。

表4 八大石闪长质包体和寄主花岗岩主量元素含量($w_B/\%$)、CIPW 标准矿物及主要岩石化学参数

Table 4 Major element contents ($w_B/\%$), CIPW normative minerals and main petrochemical parameters of the Badashi dioritic enclaves and their hosting granites

岩体名称 样品编号	闪长质包体					寄主花岗岩				
	X-392	X-393	X-394	X-603	X-606	X-383	X-386	X-395	X-604	X-605
SiO ₂	52.68	53.22	53.46	55.20	53.16	68.48	68.33	61.92	65.72	68.47
TiO ₂	1.03	0.99	1.08	1.18	1.07	0.42	0.44	0.67	0.63	0.43
Al ₂ O ₃	16.61	16.55	17.31	16.39	17.55	14.44	14.63	16.06	15.32	14.53
Fe ₂ O ₃	3.94	3.63	4.01	2.34	3.35	1.23	1.43	2.41	1.44	0.82
FeO	5.13	5.31	5.61	6.56	5.21	3.77	2.79	3.58	3.85	3.40
MnO	0.20	0.20	0.19	0.21	0.18	0.09	0.11	0.10	0.12	0.08
MgO	4.42	4.49	3.48	2.92	3.67	1.14	1.16	2.24	1.48	0.96
CaO	6.94	7.68	6.98	6.59	7.49	3.17	3.22	4.77	4.01	3.06
Na ₂ O	4.69	4.04	4.89	4.41	4.63	3.91	3.96	4.16	4.36	3.99
K ₂ O	1.48	1.65	1.30	2.04	1.55	2.66	2.72	2.38	2.14	3.04
P ₂ O ₅	0.22	0.23	0.31	0.32	0.23	0.12	0.13	0.19	0.15	0.10
LOI	1.55	1.42	1.01	0.78	1.13	0.35	0.68	0.93	0.58	0.94
Total	98.89	99.40	99.64	98.93	99.24	99.77	99.60	99.42	99.81	99.82
Q	0.00	1.54	0.65	2.85	0.00	25.33	25.58	15.09	20.32	24.32
Or	8.99	9.96	7.80	12.29	9.35	15.82	16.26	14.29	12.76	18.18
Ab	40.72	34.84	41.91	37.97	39.89	33.24	33.83	35.70	37.14	34.10
An	20.41	22.57	21.71	19.22	22.93	14.04	14.23	18.36	16.00	12.86
D(Wo)	5.70	6.24	4.83	5.09	5.68	0.45	0.48	①90	1.32	0.79
D(En)	3.69	3.93	2.81	2.33	3.39	0.16	0.22	1.10	0.56	0.27
D(Fs)	1.61	1.92	1.79	2.72	1.98	0.30	0.26	0.72	0.77	0.55
Hg(En)	6.40	7.53	6.01	5.11	5.52	2.71	2.71	4.59	3.17	2.16
Hg(Fs)	2.80	3.67	3.83	5.98	3.22	5.10	3.19	3.00	4.33	4.50
Mt	5.87	5.37	5.90	3.46	4.95	1.79	2.10	3.55	2.10	1.20
Il	2.01	1.92	2.08	2.28	2.07	0.80	0.85	1.29	1.21	0.83
Ap	0.49	0.51	0.69	0.71	0.51	0.26	0.29	0.42	0.33	0.22
A/CNK	0.76	0.74	0.78	0.76	0.77	0.96	0.96	0.89	0.91	0.94
ALK	6.17	5.68	6.19	6.45	6.18	6.57	6.68	6.54	6.50	7.03
NK/A	0.56	0.51	0.55	0.58	0.53	0.65	0.65	0.59	0.62	0.68
A.R	1.71	1.61	1.68	1.78	1.66	2.19	2.20	1.91	2.01	2.33
FM	0.52	0.52	0.60	0.62	0.56	0.71	0.66	0.59	0.66	0.71
DI	49.71	46.34	50.35	53.11	49.24	74.38	75.68	65.08	70.21	76.61

注: Q—石英; Ab—钠长石; Or—钾长石; An—钙长石; D(Wo, En, Fs)—分别指透辉石中硅灰石、顽火辉石和正铁辉石的组分; Hg(En, Fs)—分别指紫苏辉石中顽火辉石和正铁辉石的组分; Mt—磁铁矿; Il—钛铁矿; Ap—磷灰石; A/CNK = $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$, mol; ALK = $Na_2O + K_2O (w_B/\%)$; NK/A = $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$, mol; A.R = $(Al_2O_3 + CaO + ALK)/(Al_2O_3 + CaO - ALK)$ (Wright, 1969); FM = $(Fe^{3+} + Fe^{2+})/(Mg^{2+} + Fe^{3+} + Fe^{2+})$; DI 为分异指数 X-383、X-386、X-395、X-604 和 X-605 均引自汪传胜等 (2009), 其他数据为本文资料, 表 5 和表 7 的数据来源与此表相同。

表明岩浆分异程度较低。寄主花岗岩 SiO₂ 含量为 61.92%~68.48%, 表现为中酸性; K₂O + Na₂O 的含量为 6.50%~7.03%, 碱性指数 NK/A 为 0.59~0.68, 铝饱和指数(A/CNK)为 0.89~0.96, 碱度率 A.R 为 1.91~2.33, 表现为钙碱性铝准饱和; 铁镁指数(FM)中等, 为 0.59~0.71; 分异指数 DI 较高, 为 65.1~76.6, 表明岩浆分异程度较高。包体和寄主岩的 CIPW 标准矿物计算结果与镜下鉴定基本相似。与寄主花岗岩相比, 闪长质包体中 Fe、Mg、Ti、Ca 等主要造岩元素的含量更为富集, Na、K、Si 等元素的含量较低, 暗示包体中铁镁质矿物的含量较高,

长英质矿物的含量较低。

从氧化物协变图解(图 4)可以看出, 八大石包体和寄主岩的氧化物样品投影点构成一条明显间断的演化趋势曲线, 其 K₂O 的含量与 SiO₂ 的含量呈正相关, Al₂O₃、CaO、FeO^T(将 Fe³⁺ 和 Fe²⁺ 全部换算成 Fe²⁺)、MgO、TiO₂ 和 P₂O₅ 的含量与 SiO₂ 的含量呈负相关, 但 Na₂O 含量与 SiO₂ 呈弱负相关, 表明镁铁质矿物、斜长石、榍石和磷灰石等矿物的分离结晶在岩浆分异演化过程中起着重要作用。

3.3 稀土元素

由表 5 和图 5 可知, 八大石闪长质包体 ∑REE、

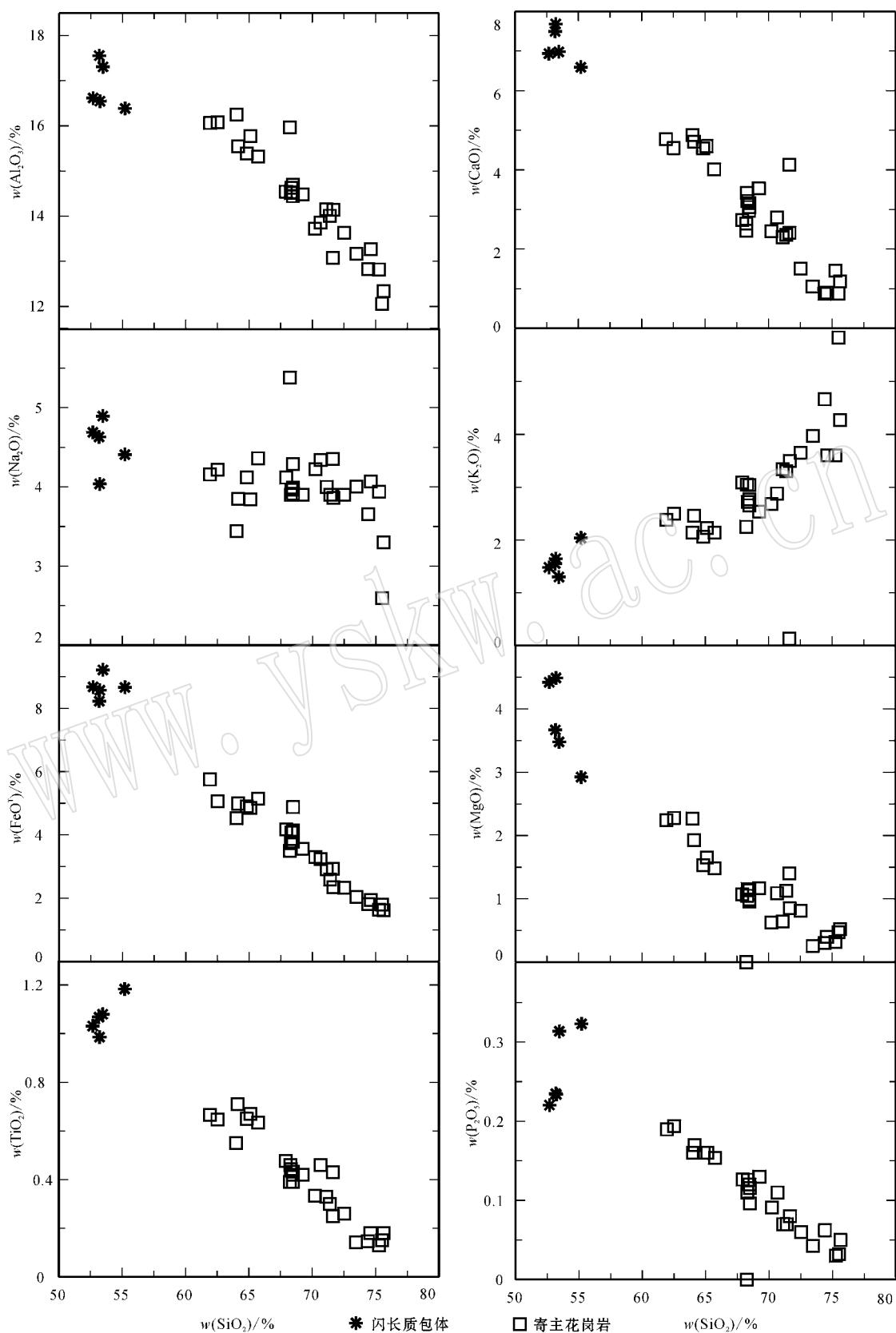


图 4 八大石闪长质包体与寄主花岗岩主要氧化物含量与 SiO_2 含量协变图解

Fig. 4 Covariant diagram of the main oxides versus SiO_2 for the Badashi dioritic enclaves and their host granites

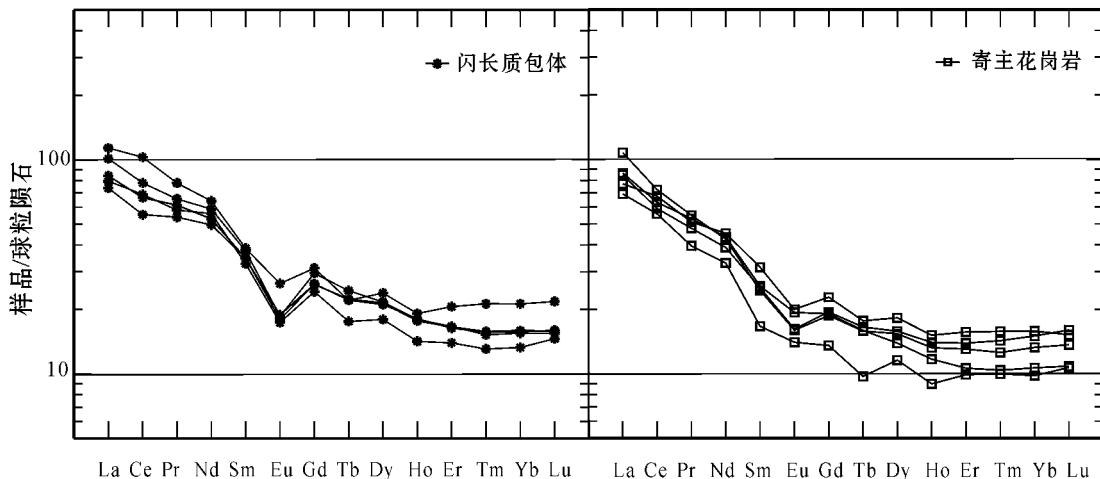


图 5 八大石闪长质包体和寄主花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式(标准化数据引自 Boynton ,1984)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of the Badashi dioritic enclaves and their host granites(chondrite values from Boynton , 1984)

表 5 八大石闪长质包体和寄主花岗岩稀土元素和微量元素分析数据

Table 5 Rare earth element and trace element contents of the the Badashi dioritic enclaves and their hosting granites

岩体名称 样品编号	闪长质包体					寄主花岗岩				
	X-392	X-393	X-394	X-603	X-606	X-383	X-386	X-395	X-604	X-605
La	26.08	22.83	31.35	35.15	24.61	33.36	26.22	26.78	23.87	21.39
Ce	53.71	44.77	62.89	82.92	55.60	58.41	47.68	50.97	54.43	45.03
Pr	7.48	6.58	8.00	9.49	7.10	6.69	5.82	6.45	6.23	4.82
Nd	31.73	29.76	35.30	38.46	33.63	25.46	23.27	26.06	27.11	19.71
Sm	6.74	6.77	7.31	7.51	6.37	4.77	4.91	5.00	6.12	3.25
Eu	1.39	1.32	1.37	1.94	1.28	1.17	1.19	1.42	1.47	1.03
Gd	6.78	6.82	7.64	8.08	6.28	4.84	5.03	4.93	5.89	3.50
Tb	1.06	1.05	1.16	1.05	0.83	0.75	0.78	0.75	0.84	0.46
Dy	6.90	6.79	6.98	7.69	5.79	4.95	5.08	4.47	5.87	3.73
Ho	1.27	1.30	1.29	1.38	1.02	0.95	1.01	0.84	1.09	0.64
Er	3.48	3.43	3.50	4.33	2.93	2.74	2.92	2.23	3.29	2.08
Tm	0.51	0.51	0.49	0.69	0.42	0.41	0.46	0.34	0.51	0.32
Yb	3.34	3.29	3.24	4.44	2.78	2.77	3.13	2.23	3.30	2.05
Lu	0.51	0.52	0.50	0.70	0.47	0.44	0.52	0.35	0.49	0.34
Σ REE	151.0	135.7	171.0	203.8	149.1	147.7	128.0	132.8	140.5	108.35
Σ LREE	127.1	112.0	146.2	175.5	128.6	129.9	109.1	116.7	119.2	95.22
Σ HREE	23.9	23.7	24.8	28.3	20.5	17.8	18.9	16.1	21.3	13.13
(La/Sm) $_{\text{CN}}$	2.4	2.1	2.7	2.9	2.4	4.4	3.4	3.4	2.5	4.15
(Gd/Yb) $_{\text{CN}}$	1.6	1.7	1.9	1.5	1.8	1.4	1.3	1.8	1.4	1.38
(La/Yb) $_{\text{CN}}$	5.3	4.7	6.5	5.3	6.0	8.1	5.6	8.1	4.9	7.05
δ Eu	0.62	0.59	0.55	0.76	0.61	0.74	0.73	0.86	0.74	0.93
Rb	69.53	79.95	44.98	57.86	70.59	82.04	87.08	73.73	59.56	103.19
Ba	191.19	339.32	178.56	544.24	260.95	670.19	679.68	544.68	622.75	781.77
Th	5.69	1.22	4.04	5.31	2.93	10.55	10.67	8.41	6.97	9.27
U	1.72	1.16	1.97	1.52	1.33	1.57	1.66	3.10	1.71	1.90
Ta	0.54	0.78	0.83	0.82	0.68	0.65	0.80	0.53	0.71	0.60
Nb	8.09	7.92	10.16	10.07	9.62	6.89	7.35	6.66	8.13	6.47
Sr	394.48	430.92	443.80	344.36	404.94	240.27	252.18	385.45	287.43	224.26
Hf	4.54	3.81	5.39	4.51	5.03	5.68	5.71	8.05	6.71	4.13
Zr	159.13	137.03	211.28	175.34	218.31	185.28	193.81	296.04	277.09	171.38
Y	30.63	31.77	31.47	39.77	29.94	24.02	27.31	20.76	32.46	19.63
Zr/Hf	35.0	35.9	39.2	38.9	43.4	32.6	34.0	36.8	41.3	41.50
Nb/Ta	15.0	10.1	12.3	12.2	14.2	10.6	9.1	12.6	11.5	10.77
Rb/Sr	0.18	0.19	0.10	0.17	0.17	0.34	0.35	0.19	0.21	0.46
Rb/Ba	0.36	0.24	0.25	0.11	0.27	0.12	0.13	0.14	0.10	0.13

Σ LREE 和 Σ HREE 的含量 ($\times 10^{-6}$) 分别为 135.7~203.8, 112.0~175.5 和 20.5~28.3, $(La/Sm)_{CN}$, $(Gd/Yb)_{CN}$ 和 $(La/Yb)_{CN}$ 分别为 2.1~2.9, 1.5~1.9 和 4.7~6.5, δEu 为 0.55~0.76。寄主花岗岩 Σ REE, Σ LREE 和 Σ HREE 的含量 ($\times 10^{-6}$) 分别为 108.4~147.7, 95.2~129.9 和 13.1~21.3, $(La/Sm)_{CN}$, $(Gd/Yb)_{CN}$ 和 $(La/Yb)_{CN}$ 分别为 2.5~4.4, 1.3~1.8 和 4.9~8.1, δEu 为 0.73~0.93。与寄主花岗岩相比, 闪长质包体的稀土元素总量较高, 富重稀土元素, 轻重稀土元素分馏较强, 配分曲线均为右倾, 镨均为低~弱负异常。八大石寄主花岗岩的稀土元素特征与我国华南同熔型花岗岩类似(徐克勤等, 1989)。

3.4 微量元素

由表 5 和图 6 可知, 闪长质包体和寄主花岗岩的标准化曲线基本相似, 均富 Rb 及 U, Hf, Zr 等高场强元素(HFSE), 而贫 Ta, Nb, Sr, Ti 等。包体中

Rb 和 Ba 的含量 ($\times 10^{-6}$) 分别为 44.98~79.95 和 178.58~544.24, Th, U, Hf 和 Zr 的含量 ($\times 10^{-6}$) 分别为 1.22~5.69, 1.16~1.97, 3.81~5.39 和 137.03~218.31, 亏损元素 Ta, Nb 和 Sr 的含量 ($\times 10^{-6}$) 分别为 0.54~0.83, 7.92~10.16 和 344.36~443.80, Nb/Ta 和 Zr/Hf 分别为 10.1~15.0 和 35.0~43.4, Rb/Sr 为 0.10~0.19。寄主岩中 Rb 和 Ba 含量 ($\times 10^{-6}$) 分别为 59.56~103.19 和 544.68~781.77, Th, U, Hf 和 Zr 的含量 ($\times 10^{-6}$) 分别为 6.97~10.67, 1.57~3.10, 4.13~8.05 和 171.38~296.04, 亏损元素 Ta, Nb 和 Sr 含量 ($\times 10^{-6}$) 分别为 0.53~0.80, 6.47~8.13 和 224.26~387.43, Nb/Ta 和 Zr/Hf 分别为 9.1~12.6 和 32.6~41.5, Rb/Sr 为 0.10~0.14。包体与寄主岩中各种微量元素的含量比较接近, Nb/Ta, Zr/Hf 和 Rb/Sr 相差不大, 但包体富 Sr, P, Ti, 贫 Ba, Th, Hf, Zr。

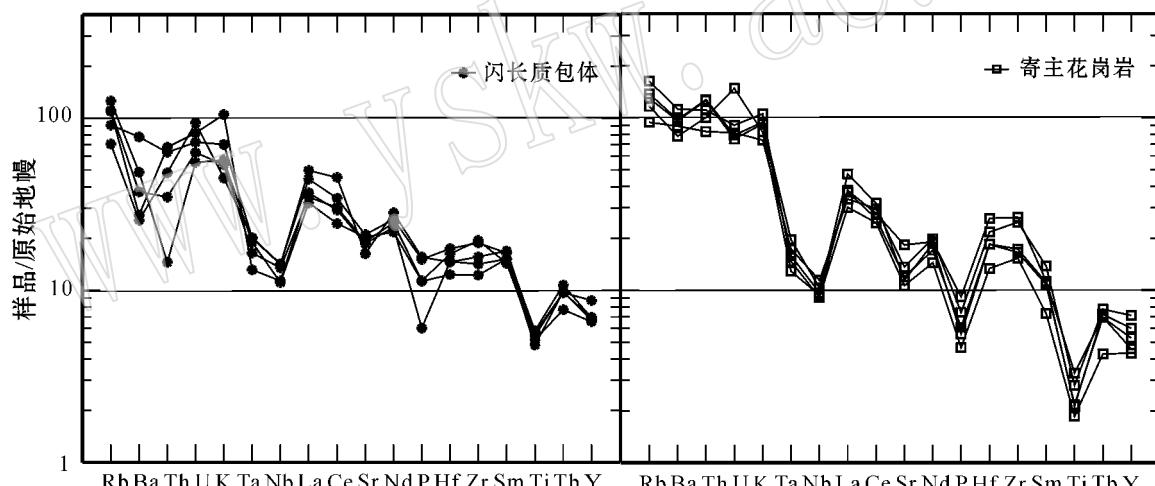


图 6 八大石闪长质包体和寄主花岗岩微量元素原始地幔标准化曲线(原始地幔数据引自 McDonough 等, 1992)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized patterns of trace elements for the Badashi dioritic enclaves and their host granites
(after McDonough *et al.*, 1992)

4 同位素特征

4.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试及结果

本文测定了闪长质包体中 12 个单颗粒锆石, 共 12 个点, 其测点位置见图 7, 分析数据见表 6。从阴极发光照片(图 7)上可看出闪长质包体中锆石均具清晰的韵律环带结构, 表明为岩浆成因(吴元保等, 2004)。从表 6 中可看出包体中锆石的 U 和 Th 含量

分别为 $96 \times 10^{-6} \sim 437 \times 10^{-6}$ 和 $23 \times 10^{-6} \sim 310 \times 10^{-6}$, Th/U 比值介于 0.24~0.75 之间, 仅 1 个样品的 Th/U 小于 0.4, 同样指示其岩浆成因(一般 $Th/U > 0.4$, Rubatto and Gebauer, 2000)。

当 $^{206}Pb/^{204}Pb \geq 200$ (年轻锆石) 或 ≥ 3000 (年老锆石) 时, 可不进行普通 Pb 校正(梁细荣等, 2000)。本文包体中锆石的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 为 36~146, 不符合此条件, 所以对 ^{204}Pb 都进行了校正。对于形成于前寒武纪的锆石, 一般采用锆石的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 定年, 而对

表 6 八大石闪长质包体(X-603)中锆石 U-Pb 分析结果

Table 6 U-Pb isotope analyses of zircons in sample X-603 from the Badashi dioritic enclaves

序号	^{204}Pb	^{232}Th	^{238}U	Th/U	^{206}Pb	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
	$w_{\text{B}}/10^{-6}$	^{204}Pb	^{232}Th		^{238}U	比值					t/Ma	1σ	
1	<0.56	81	194	0.42	73	0.052 53	0.000 73	0.345 39	0.003 69	0.047 67	0.000 25	301.2	2.8
2	0.56	163	381	0.43	142	0.052 43	0.000 62	0.342 33	0.002 75	0.047 34	0.000 23	298.9	2.1
3	<0.57	23	96	0.24	36	0.057 89	0.001 00	0.387 99	0.005 68	0.048 59	0.000 28	332.9	4.2
4	0.80	102	256	0.40	68	0.053 94	0.000 7	0.357 25	0.003 35	0.048 02	0.000 24	310.2	2.5
5	0.74	159	345	0.46	99	0.055 85	0.000 73	0.370 64	0.003 54	0.048 12	0.000 24	320.1	2.6
6	0.52	217	311	0.70	126	0.051 05	0.000 65	0.335 19	0.003 06	0.047 61	0.000 24	293.5	2.3
7	<0.60	227	304	0.75	106	0.054 64	0.000 79	0.356 74	0.004 03	0.047 35	0.000 25	309.8	3.0
8	0.74	81	164	0.50	47	0.054 08	0.000 70	0.358 38	0.003 37	0.048 05	0.000 24	311.0	2.5
9	0.65	310	437	0.71	141	0.055 85	0.000 63	0.367 59	0.002 62	0.047 73	0.000 23	317.9	1.9
10	<0.50	162	298	0.54	125	0.051 62	0.000 64	0.337 69	0.002 96	0.047 44	0.000 23	295.4	2.3
11	0.56	101	193	0.53	72	0.053 27	0.000 87	0.349 53	0.004 75	0.047 58	0.000 26	304.4	3.6
12	<0.48	229	336	0.68	146	0.051 33	0.000 63	0.335 83	0.002 84	0.047 45	0.000 23	294.0	2.2



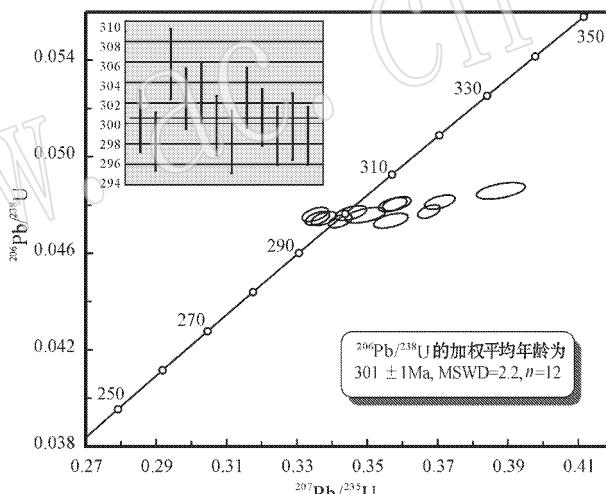
图 7 八大石闪长质包体(X-603)中锆石样品阴极发光照片

Fig. 7 Cathode luminescence images of zircons in sample X-603 from the Badashi dioritic enclaves

较年轻的锆石则采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄更为合适(Compston *et al.*, 1992)。表 6 中 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据集中分布于 298.2~305.8 Ma, 所有数据点基本投影在谐和曲线上或其附近(图 8), 表明 298.2~305.8 Ma 可以代表包体在岩浆中的结晶时间, 用 Isoplot 2 程序计算得到包体中锆石 12 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 301 ± 1 Ma(MSWD = 2.2)。

4.2 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素特征

一般假定所有的岩石样品最初都来自于地幔, 模式年龄表示岩石样品从地幔中分离出来的时间。当分馏因子 $f_{\text{Sm/Nd}}$ 落在 -0.5~-0.3 之间时, 用单阶段模式计算岩体的模式年龄 t_{DM} 是合适的(李献

图 8 八大石闪长质包体(X-603)中单颗粒锆石的谐和图及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄Fig. 8 Concordia diagram and weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age for single-grain zircon from the Badashi dioritic enclaves (X-603)

华, 1996)。表 7 中闪长质包体的分馏因子 $f_{\text{Sm/Nd}}$ 为 -0.32, 计算得到包体的 t_{DM} 为 812 Ma, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 +4.15, $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 为 +4.14 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 为 0.704 12。

5 讨论

岩浆混合成因的闪长质包体特征较明显, 如当长英质岩浆和镁铁质岩浆混合时, 前者早期晶出的斑晶(如斜长石、钾长石、角闪石和黑云母等)在被较高温的后者熔融及反应后, 有的被熔蚀成圆形球粒, 有的则会被斜长石围绕形成环斑结构(Langmuir

表7 八大石闪长质包体(X-606)和寄主花岗岩(X-604)Sr-Nd同位素数据及参数

Table 7 Sr-Nd data and parameters of the Badashi dioritic enclave (X-606) and its hosting granite (X-604)

样品	岩体名称	$\omega(\text{SiO}_2) \times 10^{-6}$	$\omega(\text{Rb}) \times 10^{-6}$	$\omega(\text{Sr}) \times 10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} (2\sigma)$	$\omega(\text{Sm}) \times 10^{-6}$	$\omega(\text{Nd}) \times 10^{-6}$
X-606	包体	53.16	72.08	424.24	0.491505	0.706227 ± 12	6.19	27.83
X-604	寄主体	65.72	66.62	299.76	0.642996	0.707473 ± 12	5.63	24.68
样品	岩性	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} (2\sigma)$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$	$f_{\text{Sm/Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM}/Ma
X-606	闪长岩	0.134458	0.512728 ± 11	0.70412	-0.32	+1.76	+4.15	812
X-604	二长花岗岩	0.137830	0.512680 ± 12	0.70475	-0.30	+0.82	+3.06	944

t 为岩体结晶年龄，八大石寄主岩和包体的结晶年龄 t 分别为 298 Ma 和 301 Ma， $\chi^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} = 0.512638$ ， $\chi^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} = 0.1967$ ， $\chi^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{DM}} = 0.51315$ ， $\chi^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{DM}} = 0.2137$ ， $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$ ， $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ 。

et al., 1987; 朱金初等, 2006), 长英质岩浆中磷灰石结晶速度慢, 为短柱状, 而在镁铁质岩浆中磷灰石结晶速度快, 为长柱状和针状, 长/宽 > 30 (Wyllie et al., 1962; Didier and Ferrand, 1987; 周金城等, 1994), 两种岩浆的混合势必出现两种不同形状的磷灰石; 混合成因的包体多呈浑圆状或透镜状的塑变形态, 少数表现出“撕扯状”或“火焰状”的形态特征, 包体与寄主岩相互穿插和包裹 (张晓琳等, 2005)。笔者在八大石闪长质包体中并没有发现这些现象, 八大石包体多为球形、椭圆形、纺锤形、次棱角状等, 与寄主花岗岩的界线较模糊, 甚至见到斜长石斑晶骑跨在包体和寄主岩之间, 包体中的磷灰石仅为短柱状, 所以基本排除八大石包体为不混溶包体。

通过对八大石闪长质包体高精度 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 获得其结晶年龄为 301 ± 1 Ma, 表明包体与寄主花岗岩的结晶时间相近 (寄主花岗岩 U-Pb 年龄为 298 ± 2 Ma, 汪传胜等, 2009), 均形成在早二叠世。包体与寄主岩均具有正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (+4.15 和 +3.06) 较低的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) (0.70412 和 0.70475) 以及新元古代的模式年龄 (t_{DM} 分别为 812 Ma 和 944 Ma)。另外, 哈尔里克北坡出露少量中—上奥陶统荒草坡群地层, 该地层为较为动荡的浅海相沉积过渡到滨海相沉积①, 其物质来源可能来自前寒武纪地层的剥蚀, 哈尔里克南侧的吐哈盆地, 在奥陶纪时作为“微大陆”驮在古天山洋之上 (马瑞士等, 1993) 暗示哈尔里克岛弧存在前寒武纪基底。这些证据表明, 它们的岩浆均来源于新元古代的初生陆壳, 而这种初生陆壳则来源于亏损地幔 (Macera et al., 1994; Han et al., 1997; Chen and Jahn, 2002; 韩宝福等, 1999)。由于上述 3 种同位素值非常接近, 暗示包体与寄主岩的物质来源相同。

八大石闪长质包体是否可能为重熔残留体? 重熔残留体具有耐熔残余矿物组合, 可含特征的变质矿物, 通常具有残留结构, 如花岗变晶、鳞片变晶、片理、片麻理等变质岩的组构特征, 有时从包体中心到边缘, 矿物粒度逐渐变粗 (王德滋等, 1992)。八大石包体不具有上述特征, 包体富含角闪石、黑云母、斜长石, 但缺乏深源变晶矿物, 表明这种包体不大可能是其源区残留体 (Clemens, 2003)。况且, 重熔残留体的形成年龄代表源岩的结晶年龄, 肯定会比寄主花岗岩的结晶年龄大, 甚至大很多, 而笔者所获得的八大石包体和寄主岩的形成年龄非常接近, 在误差允许的范围内可能相同, 暗示包体和寄主花岗岩可能为同源母岩浆结晶分异的先后产物。

在矿物组成上, 与寄主花岗岩相比, 八大石闪长质包体富含角闪石和黑云母等暗色矿物和斜长石, 而贫石英, 不含钾长石, 包体的颜色较深, 矿物粒度较小。在矿物化学成分上, 包体和寄主岩中同类矿物的种属相似, 如斜长石均为更—中长石, 成分相似; 角闪石种属均为铁角闪石, 与寄主岩中角闪石相比, 包体中角闪石富镁和钙, 贫铁和钠; 黑云母种属均含有镁质黑云母和铁质黑云母, 包体中多含镁质黑云母, 而寄主岩中多含铁质黑云母, 与寄主花岗岩中黑云母相比, 包体中黑云母富镁, 贫铁和钛。这些特征和江西关田岩体与其包体以及湖南桂东岩体与其包体的特征相似, 而后两者岩体中的包体均为同源包体 (周金城等, 1994)。

从同源母岩浆分离结晶的角度分析, 可以解释包体和寄主岩之间的一系列地球化学变化。与寄主花岗岩相比, 闪长质包体中 Fe、Mg、Ti、Ca 等主要造岩元素的含量更为富集, Na、K、Si 等元素的含量较低, 两者的 SiO₂ 含量与其他的氧化物含量有着很好

① 新疆地质矿产局第六地质大队, 1985. 新疆哈密地质与矿产(地层部分)。

的相关性,共同构成一条分异演化趋势曲线(图4),表明镁铁质矿物、斜长石、榍石和磷灰石等矿物的分离结晶对寄主岩的演化和包体的形成起着重要作用。与寄主花岗岩相比,闪长质包体的稀土元素总量较高,富重稀土元素,轻重稀土元素分馏较强,稀土元素配分曲线均为右倾(图5),铕均为低-弱负异常。包体中富重稀土元素可能与同源岩浆中角闪石和磷灰石的分离结晶有关;铕异常主要受制于斜长石,在部分熔融作用中斜长石残留在源区,必然会引起铕的负异常。

包体与寄主岩微量元素标准化曲线(图6)相似,与寄主岩相比,包体富Sr、P、Ti,贫Ba、Th、Hf、Zr,显示同源包体的特征(徐红,1994)。斜长石、磷灰石和钛铁氧化物的分离结晶,会使残余岩浆中Sr、P、Ti的含量降低(Roedder and Bodnar,1997),反之,较早结晶的包体就会富Sr、P、Ti。Ba占据早期富含K的矿物中K的位置,Ba主要进入钾长石,其次才是黑云母(Cerny et al.,1985),当同源包体与寄主岩同时结晶时,包体中Ba含量就会比寄主岩中Ba含量低。目前普遍认为,Th富集于残余岩浆,Zr、Hf易留在熔体中或进入锆石等副矿物中,Hf比起Zr来,其络合物的稳定存在可以持续到更低的温度下(Cerny et al.,1985;Dostal and Chatterjee,1995)。

哈尔里克造山带属于哈萨克斯坦板块东南部之准噶尔-吐鲁番-哈密陆块东北缘的晚古生代火山弧(Gu et al.,1999;何国琦等,1994;顾连兴等,2001)。其北侧的库兰喀孜干造山带为西伯利亚板块南缘的晚古生代火山弧,两者之间的克拉麦里-麦钦乌拉断裂带和沿此带分布的蛇绿岩带代表着晚石炭世碰撞带(马瑞士等,1993;舒良树等,2003;李锦轶,2004)。八大石花岗岩体侵入于强烈变形的泥盆系至石炭系围岩而本身未受变形的特征,表明这类花岗岩是主碰撞和区域构造变形以后的产物,结合其年龄数据,认为其形成于东天山大陆碰撞之后挤压-伸展转折阶段(顾连兴等,2006)。

在主碰撞挤压时期,加厚的岩石圈开始拆沉,导致软流圈的上涌,在壳-幔边界形成底侵体,底侵体带来的热能使新元古代形成的初生地壳发生部分熔融(刘红涛等,2002;顾连兴等,2007)。部分熔融所生成的母岩浆在早期温度较高时结晶形成包体,使残余岩浆更加富集SiO₂、K₂O、Na₂O,而贫MgO、TiO₂、FeO、CaO。经过分异的残余岩浆,即寄主花岗岩岩浆随后携带这些早期形成的同源包体向上侵

位,在侵位过程中,由于温度和压力的变化及寄主花岗岩岩浆的同化混染作用,包体在化学成分和矿物组成上可能会受到一定的影响。

6 结论

八大石闪长质包体和寄主花岗岩的岩石学、地球化学、同位素示踪和年代学研究表明,它们的结晶年龄分别为301±1 Ma和298±2 Ma,均形成于碰撞之后的二叠纪早期挤压-伸展转折阶段,其岩浆来自新元古代时从亏损地幔分离出来的初生地壳源区。闪长质包体属于同源包体,为寄主花岗岩同源母岩浆经结晶分异作用形成的早期产物。

致谢 顾连兴教授对本文的研究工作进行了指导,匿名审稿专家多次耐心细致地审阅了本文的初稿和复审稿,并提出了很多宝贵的修改意见,编辑在成文过程中给予了热情帮助,在此致以衷心的谢意!

References

- Barbarin B and Didier J. 1992. Genesis and evolution of mafic microgranular enclaves through various type of interaction between coexisting felsic and mafic magma[J]. Earth Science, 83: 145~153.
- Boulton J and Gasquet D. 1995. Melting and undercooled crystallisation of felsic xenoliths from minor intrusions (Jebilet massif, Morocco)[J]. Lithos, 35: 201~219.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[A]. Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry [C]. Elsevier: 63~114.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region (BGMRX). 1999. Stratigraphy (lithostratigraphic) of Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~430 (in Chinese with English abstract).
- Cerny P, Meintzer R E and Anderson A J. 1985. Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites: Selected examples of data and mechanism[J]. Can. Mineral., 23: 381~421.
- Chappell B W and White A J R. 1991. Restite enclaves and the restite mode[A]. Didier J and Barbarin B. Enclaves and Granite Petrology [C]. Amsterdam: Elsevier, 375~381.
- Chappell B W, White A J R and Wyborn D. 1987. The importance of residual source material (restite) in granite petrogenesis[J]. J. Petrol., 28: 1111~1188.
- Chen B and Jahn B M. 2002. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of northwest China and their tectonic implications[J]. Geol. Mag., 139: 1~13.
- Chen Rong, Xing Guangfu, Yang Zhiliang, et al. 2005. Study on

- Beizhang and Lianglong granites and their dark enclaves[J]. Geological Journal of China Universities, 11(2): 264~275 (in Chinese with English abstract).
- Clemens J D. 2003. S-type granitic magmas petrogenetic issues, models and evidence[J]. Earth-Science Reviews, 61: 1~18.
- Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, et al. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale[J]. J. Geol. Sci. London, 149: 1~84.
- Didier J. 1973. Granites and Their Enclaves: The Bearing of Enclaves on the Origin of Granite[A]. Development in Petrology, 3.[C]. Amsterdam: Elsevier, 393.
- Didier J and Barbarin B. 1991. Enclaves and Granite Petrology[A]. Development in Petrology, 13.[C]. Amsterdam: Elsevier, 625.
- Didier J and Ferrand C. 1987. Contribution of enclave studies to the understanding of origin and evolution of granitic magma[J]. Geologische Rundschau, 76(1): 41~50.
- Dostal J and Chatterjee A K. 1995. Origin of topaz-bearing and related peraluminous granites of the Late Devonian Davis Lake pluton, Nova Scotia, Canada: Crustal versus fluid fractionation[J]. Chemical Geology, 123: 67~88.
- Du Yangsong. 1994. Classification and nomenclature on the enclaves in acidic-intermediate acidic igneous rock[J]. Geoscience, 8(2): 127~132 (in Chinese with English abstract).
- Elburg M A. 1996. Evidence of isotopic equilibration between microgranitoid enclaves and host granodiorite, Warburton granodiorite, Lachlan fold belt, Australia[J]. Lithos, 38: 1~22.
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of triocahedral mica[J]. U.S. Geol. Survey. Prof. Paper, 354.
- Gu L X, Hu S X, Chu Q, et al. 1999. pre-collision granites and post-collision intrusive assemblage of the Kelameili-Harlik orogenic belt [J]. Acta Geologica Sinica, 73(3): 316~329.
- Gu Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chunshui, et al. 2001. Initiation and evolution of the Bogda subduction-torn-type rift[J]. Acta Petrologica Sinica, 17(4): 585~597 (in Chinese with English abstract).
- Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, Wu Changzhi, et al. 2006. Some problems on granites and vertical growth of the continental crust in the eastern Tianshan Mountains, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1103~1120 (in Chinese with English abstract).
- Gu L X, Zhang Zunzhong, Wu Changzhi, et al. 2007. Permian geological, metallurgical and geothermal events of the Huangshan-Jing'erquan area, eastern Tianshan: indications for mantle magma intraplating and its effect on the crust[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(11): 2860~2880 (in Chinese with English abstract).
- Gu Shengyan, Hua Renmin and Qi Huawen. 2006. Study on Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Sr-Nd Isotope of the Guposhan Granite in Guangxi[J]. Acta Geologic Sinica, 80(4): 543~553 (in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, He Guoqi and Wang Shiguang. 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar basin[J]. Science in China (Series D), 29(1): 16~21 (in Chinese with English abstract).
- Han B F, Wang S G, Jahn B M, et al. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence and implications for Phanerozoic crustal growth[J]. Chem. Geol., 138: 135~159.
- He Guogi, Li Maosong, Liu Deguan, et al. 1994. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China[M]. Xinjiang People's Publishing House, 31~220 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Lu Jiren, Lin Shengzhong, et al. 2005. The Axial zone consisting of pyrolite and eclogite in the Emei mantle plume: Major, trace element and Sr-Nd-Pb isotope evidence[J]. Acta Geologica Sinica, 79(2): 200~219 (in Chinese with English abstract).
- Huang Shou and Wu Liren. 1990. Isotopic Characteristics of Nd, Sr in the igneous rocks and relations of it and the development of geologic tectonics in Shanxi[J]. Acta Petrologica Sinica, 6(2): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- IMA-CNMMN. 1997. Nomenclature of Amphiboles[J]. The Canadian Mineralogist, 35: 219~246.
- Langmuir C H, Vocke R D, Hanson G N, et al. 1987. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts[J]. Earth Planet Sci. Lett., 37: 380~392.
- Li Jinyi. 2004. Late Neoproterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China[J]. Geological Review, 50(3): 304~322 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua. 1996. A discussion on the model and isochron ages of Sm-Nd isotopic systematics: suitability and limitation[J]. Scientific Geologica Sinica, 31(1): 97~104 (in Chinese with English abstract).
- Li Zonghuai, Han Baofu, Li Xinzi, et al. 2004. Microgranular dioritic enclaves in Junggar granites and their implications for the origin and evolution of post-collisional granitic magmatism in north Xinjiang [J]. Acta Petro. Miner., 23(3): 214~226 (in Chinese with English abstract).
- Liang Xirong, Li Xianhua, Liu Yongkang, et al. 2000. U-Pb isotopic dating of young zircons by laser ablation microprobe-inductively coupled plasma mass spectrometry (LAM-ICPMS)[J]. Geochemistry, 29(1): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chengdong, Zhang Wenqin, Mo Xuanxue, et al. 2002. Features and origin of mafic microgranular enclaves in the Yuegelu granite in the eastern Kunlun[J]. Geological Bulletin of China, 21(11): 739~744 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hongtao, Zhai Mingguo, Liu Jianming, et al. 2003. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of north China craton: evolution from post-collisional to anorogenic setting[J]. Acta Petrologica Sinica, 19(4): 433~448 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 1991. ISOPLOT: A plotting and regression program for radiogenic-isotope data[A]. US Geological Survey Open-File Report [C], 39.
- Ma Ruishi, Wang Ciyin and Ye Shangfu. 1993. Tectonic Framework and Crustal Evolution of the Eastern Tianshan Mountains[M]. Nanjing: Publishing House of Nanjing University, 1~255 (in Chinese with English abstract).

- Maas R , Nicholls I A and Legg C. 1997. Igneous and metamorphic enclaves in the S-type Duddick granodiorite , Lachlan Fold Belt , SE Australia : Petrographic , geochemical and Nd-Sr isotopic evidence for crustal melting and magma mixing [J]. Journal of Petrology , 38 : 815~841.
- Macera P , Del Moro A , Bargossi G M , et al . 1994. Polygenetic nature of the Cima d'Asta intrusive complex , Southern Alps , Italy : Inferences from petrological , geochemical and isotopic (Sr and Nd) data [J]. Lithos , 32 : 47~62.
- McDonough W F , Sun S , Ringwood A E , et al . 1992. Potassium , rubidium and cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth [J]. Geochim. Cosmochim Acta , 56(3): 1 001 ~ 1 012.
- Pang Baocheng. 2001. The types , features and genesis of enclaves in granitoids in the junction of Guangdong and Guangxi [J]. J. Mieral Petrol. , 21(1): 8~13 (in Chinese with English abstract).
- Qi L , Hu J and Gregoire D C. 2000. Determination of trace elements in granites : by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Tectonophysics , 31 : 507~513.
- Roedder E and Bodnar R J. 1997. Fluid inclusion studies of hydrothermal ore deposits [A]. Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits [C]. New York : John Wiley & Sons , third edition , 657~698.
- Rubatto D and Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM Microprobe : Some examples from the western Alps [A]. Cathodoluminescence in Geoscience [C]. Germany : Springer-Verlag Berlin Heidelberg , 373~400.
- Schumacher J C. 1997. Estimation of Fe^{3+} and Fe^{2+} from electron microprobe analyses [J]. The Canadian Mineralogist , 35 : 219~246.
- Shu Liangshu and Wang Yujing. 2003. Late Devonian-Early Carboniferous radiolarian fossils from siliceous rocks of the Kalamaili ophiolite , Xinjiang [J]. Geological Review , 49(4): 408~412 (in Chinese with English abstract).
- Silva M M V G , Neiva A M R and Whitehouse M J. 2000. Geochemistry of enclaves and host granites from the Nelas area , central Portugal [J]. Lithos , 50 : 153~170.
- Sun Guihua , Li Jinyi , and Gao Liming. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb age of a dioritic Pluton in the Harlik Mountain , Eastern Xinjiang , and its tectonic implication [J]. Geological Review , 51(4): 463 ~ 469 (in Chinese with English abstract).
- Vernon R H. 1983. Restite , xenolith and microgranitoid enclaves in granites [J]. Proceed. Royal. Soc. New South Wales , 116 : 77~103.
- Waight T E , Maas R and Nicholls I A. 2001. Geochemical investigation of microgranitoid enclaves in the S-type Cowra granodiorite , Lachlan Fold Belt , SE Australia [J]. Lithos , 56 : 165~186.
- Wang Chuansheng , Gu Lianxing , Zhang Zunzhong , et al . 2009. Petrogenesis and geological implications of the Permian high-K calc-alkaline granites in Harlik Mountains of eastern Tianshan , NW China [J]. Acta Petrologica Sinica , 25(6): 1 499~1 511 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi , Zhou Xinmin and Xu Xisheng. 1992. On geneses of microgranitoid enclaves [J]. Journal of Guilin College of Geology , 12(3): 235~241 (in Chinese with English abstract).
- Wiedenbeck M , Alle P and Corfu F. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb , Lu-Hf , trace element and REE analyses [J]. Geostand New Sl , 19 : 1~23.
- Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis [J]. Geological Magazine , 106 (4): 370~384.
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesic research of zircon in mineralogy and its restriction to the U-Pb age [J]. China Science Bulletin , 49 (16): 1 589~1 604 (in Chinese with English abstract).
- Wyllie P J , Cox K G and Biggar G M. 1962. The habit of apatite in synthetic systems and igneous rocks [J]. J. Petrol. , 3(2): 238 ~ 242.
- Xu Hong. 1994. Discussion on genesis of dioritic enclaves in Zhuguang granitic complex [J]. J. Mieral Petrol. , 14(3): 16~21 (in Chinese with English abstract).
- Xu Keqin , Zhu Jinchu , Liu Changshi , et al . 1989. Genetic series and material sources of granitoids in south China [J]. Journal of Nanjing University (Earth Sciences), 3 : 1~18 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng and Zhou Xinmin. 1988. Enclaves of granitoids [J]. Journal of Nanjing University (Earth Sciences), 1(1): 233~241 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ce , Zhu Jinchu , Zhang Peihua , et al . 2006. Geochemical characteristics and genesis of dioritic enclaves in Lisong granite , NE Guangxi province [J]. Geological Journal of Chian Universities , 12 (3): 310~318 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi , Pan Guoqing , Li Chengdong , et al . 2007. Granitic magma mixing versus basaltic magma mixing : New viewpoints on granitic magma mixing process [J]. Acta Petrologica Sinica , 23(5): 1 141 ~ 1 152 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaolin , Qiu Jiansheng , Wang Dezi , et al . 2005. Geochemistry and magmatic mixing of the Putuoshan biotite moyites and their enclaves , Zhejiang province [J]. Acta Petrologica et Mineroligica , 24 (2): 81~92 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Qiaorong. 1983. Calculating of Fe^{3+} and Fe^{2+} of mineral from electron microprobe analyse [J]. Acta Mineralogica Sinica , 1 : 55 ~ 62 (in Chinese).
- Zhou Jincheng , Xu Xisheng and Tao Xiancong. 1994. Geochemical constraints on microgranitoid enclaves by host granites [J]. Geochemica , 23(3): 254~261 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jinchu , Zhang Peihua , Xie Caifu , et al . 2006. Magma mixing origin of the mafic enclaves in Lisong granite , NE Guangxi , western Nanling mountain [J]. Geochemica , 35(5): 506~516 (in Chinese with English abstract).
- Zou Changxing. 1984. Geological characteristics and genesis of Badashi pluton in Hami , Xinjiang [J]. Eastern Xinjiang Geology , 1 : 1~9 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈 荣 邢光福,杨祝良. 2005. 浙东白垩纪北漳和梁弄花岗岩体及其暗色岩石包体研究[J]. 高校地质学报, 21(2): 264~275.
- 杜杨松. 1994. 论酸性-中酸性火成岩中包体的分类与命名[J]. 现代地质, 8(2): 127~132.
- 顾连兴 胡受奚,于春水. 2001. 论博格达俯冲撕裂型裂谷的形成与演化[J]. 岩石学报, 17(4): 585~597.
- 顾连兴 张遵忠,吴昌志,等. 2006. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识[J]. 岩石学报, 22(5): 103~1120.
- 顾连兴 张遵忠,吴昌志. 2007. 东天山黄山-镜儿泉地区二叠纪地质成矿事件:幔源岩浆内侵及其地壳效应[J]. 岩石学报, 23(11): 2869~2880.
- 褚 强. 1988. 新疆东部碱性花岗岩和哈尔里克地区花岗岩及其成矿作用研究[D]. 南京大学地科系硕士论文.
- 顾晟彦,华仁民,戚华文. 2006. 广西姑婆山花岗岩单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及全岩 Sr-Nd 同位素研究[J]. 地质学报, 80(4): 543~553.
- 韩宝福,何国琦,王式洸. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动,底垫作用及准噶尔盆地基底的性质[J]. 中国科学(D辑), 29(1): 16~21.
- 何国琦,李茂松,刘德权. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 31~220.
- 侯增谦,卢记仁,林盛中,等. 2005. 峨眉地幔柱轴部的榴辉岩-地幔岩源区主元素、痕量元素及 Sr, Nd, Pb 同位素证据[J]. 地质学报, 79(2): 200~219.
- 黄 首,吴利仁. 1990. 陕西地区岩浆岩 Nd, Sr 同位素特征及其与大地构造发展的联系[J]. 岩石学报, 6(2): 1~11.
- 李锦铁. 2004. 新疆东部新元古代构造格局及其演变[J]. 地质论评, 50(3): 304~322.
- 李献华. 1996. Sm-Nd 模式年龄和等时线年龄的适用性与局限性[J]. 地质科学, 31(1): 97~104.
- 李宗怀,韩宝福,李辛子. 2004. 新疆准噶尔地区花岗岩中微粒闪长质包体特征及后碰撞花岗质岩浆起源和演化[J]. 岩石矿物学杂志, 23(3): 214~226.
- 梁细荣,李献华,刘永康. 2000. 激光探针等离子体质谱法(LAM-ICPMS)用于年轻锆石 U-Pb 定年[J]. 地球化学, 29(1): 1~5.
- 刘成东,张文秦,莫宣学,等. 2002. 东昆仑约格鲁岩体暗色微粒包体特征及成因[J]. 地质通报, 21(11): 739~744.
- 刘红涛,翟明国,刘建明. 2002. 华北克拉通北缘中生代花岗岩:从碰撞后到非造山[J]. 岩石学报, 18(4): 433~448.
- 马瑞士,王赐银,叶尚夫. 1993. 东天山构造格架与地壳演化[M]. 地质出版社, 1~225.
- 庞保成. 2001. 两广交界地区花岗岩中包体的类型、特征与成因[J]. 矿物岩石, 21(1): 8~13.
- 舒良树,王玉净. 2003. 新疆卡拉麦里蛇绿岩带中硅质岩的放射虫化石[J]. 地质论评, 49(4): 408~412.
- 孙桂华,李锦铁,高立明. 2005. 新疆东部哈尔里克闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质论评, 51(4): 463~469.
- 汪传胜,顾连兴,张遵忠,等. 2009. 东天山哈尔里克山区二叠纪高钾钙碱性花岗岩成因及地质意义[J]. 岩石学报, 25(6): 1499~1511.
- 王德滋,周新民,徐夕生. 1992. 微粒花岗岩类包体的成因[J]. 桂林冶金地质学院学报, 12(3): 235~241.
- 吴元保,郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1589~1604.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局(BGMRX). 1999. 新疆维吾尔自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~430.
- 徐 红. 1994. 诸广岩体中闪长质包体的成因探讨[J]. 矿物岩石, 14(3): 16~21.
- 徐克勤,朱金初,刘昌实. 1989. 华南花岗岩类的成因系列和物质来源[J]. 南京大学学报(地科版), 3: 1~18.
- 徐夕生,周新民. 1988. 花岗岩类中的岩石包体[J]. 南京大学学报(地球科学版), 1(1): 233~241.
- 杨 策,朱金初,张佩华. 2006. 广西姑婆山里松花岗岩中闪长质包体的地球化学特征及其成因探讨[J]. 高校地质学报, 12(3): 310~318.
- 张 旗,潘国强,李承东. 2007. 花岗岩混合问题:与玄武岩对比的启示[J]. 岩石学报, 23(5): 1141~1152.
- 张晓琳,邱检生,王德滋,等. 2005. 浙江普陀山黑云母钾长花岗岩及其岩石包体的地球化学与岩浆混合作用[J]. 岩石矿物学杂志, 24(2): 81~92.
- 郑巧荣. 1983. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} [J]. 矿物学报, 1: 55~62.
- 周金城,徐夕生,陶仙聪. 1994. 寄主花岗岩对微花岗岩类包体的地球化学制约[J]. 地球化学, 23(3): 254~261.
- 朱金初,张佩华,谢才富,等. 2006. 桂东北里松花岗岩中暗色包体的岩浆混合成因[J]. 地球化学, 35(5): 506~516.
- 邹长兴. 1984. 新疆哈密八大石岩体地质特征及其成因归属[J]. 东疆地质, 1: 1~9.