

大兴安岭北部塔河花岗杂岩体的地球化学特征及成因^{*}

张彦龙¹ 赵旭晁^{1,2} 葛文春^{1**} 张吉衡^{1,2} 高妍^{1,3}

ZHANG YanLong¹, ZHAO XuChao^{1,2}, GE WenChun^{1**}, ZHANG JiHeng^{1,2} and GAO Yan^{1,3}

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3. 吉林大学东北亚国际地学研究与教学中心, 长春 130026

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. International Centre for Geoscience Research and Education in Northeast Asia, Jilin University, Changchun 130026, China

2009-11-18 收稿, 2010-05-07 改回.

Zhang YL, Zhao XC, Ge WC, Zhang JH and Gao Y. 2010. Geochemical characteristics and genesis of Tahe granitic complex in northern part of the Da Hinggan Range. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12):3507–3520

Abstract Tahe pluton is a granitic complex formed in Early Paleozoic, which locates in the eastern Ergun block near the north side of Tayuan-Xiguitu suture zone. It is mainly composed of syenogranite, monzogranite, with minor alkali-feldspar granite and granodiorite. Gabbroic enclaves are enclosed by granitic rocks. The complex is classified as post-orogenic I-type intrusion, with the characteristics of high-K calc-alkaline series. Characteristics of outcrop, microstructures, mineral assemblages, chemical and zircon Hf isotopic compositions show magma mixing during the petrogenesis definitely. At Early Paleozoic, the crust and mantle underwent partial melting under an extensional environment following the collision between the Ergun and the Xing'an blocks. The basaltic magma which originated from depleted mantle mixed with granitic magma melted by lower crust, and then formed different rock types of Tahe complex through fractionation crystallization. The $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (from -0.8 to +5.6) and Hf model ages (0.9 ~ 1.5 Ga) of the granites indicate that the source rocks of Tahe granite were juvenile crustal materials mainly originated from depleted mantle in Mid-Neo Proterozoic. Combined with previously published zircon Hf isotopic data of the Early Paleozoic and Mesozoic granites in the Ergun block, it is concluded that Ergun block underwent an important episode of crustal growth in Mid-Neo Proterozoic.

Key words Tahe granitic complex; Magma mixing; Zircon Hf isotopes; Crustal growth

摘要 塔河杂岩体位于塔源-喜桂图缝合带北侧的额尔古纳地块东部,是早古生代侵入的花岗杂岩体。该杂岩体的主要岩石类型为正长花岗岩、二长花岗岩,少量碱长花岗岩和花岗闪长岩,辉长岩以包体存在于花岗岩中。岩石成因类型为典型的I型后造山侵入体。岩体在野外地质特征、矿物组合、显微结构、化学成分及锆石 Hf 同位素特征等方面都表现出岩浆混合成因。在早古生代额尔古纳地块与兴安地块拼合后的后造山伸展拉张背景下,地壳和地幔都发生部分熔融,直接起源于亏损地幔的玄武质岩浆侵入到下地壳熔融的花岗质岩浆房,经结晶分异作用,形成了塔河杂岩体不同的岩石类型。花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -0.8 ~ +5.6 之间, Hf 模式年龄在 0.9 ~ 1.5 Ga 之间,反映塔河花岗岩的源岩应该是在中-新元古代时期由亏损地幔起源的新生地壳物质。结合额尔古纳地块早古生代和中生代花岗岩锆石 Hf 同位素资料,我们认为额尔古纳地块在中-新元古代时曾发生过一次重要的地壳增生事件。

关键词 塔河花岗杂岩体; 岩浆混合作用; 锆石 Hf 同位素; 地壳增生

中图法分类号 P588.121

* 本文受国家自然科学基金项目(40972041,40739905)资助。

第一作者简介: 张彦龙,男,1983年生,博士研究生,地球化学专业, E-mail: dtzhangyanlong@163.com

** 通讯作者: 葛文春,男,1963年生,教授,主要从事岩石学研究, E-mail: gewenchun@jlu.edu.cn

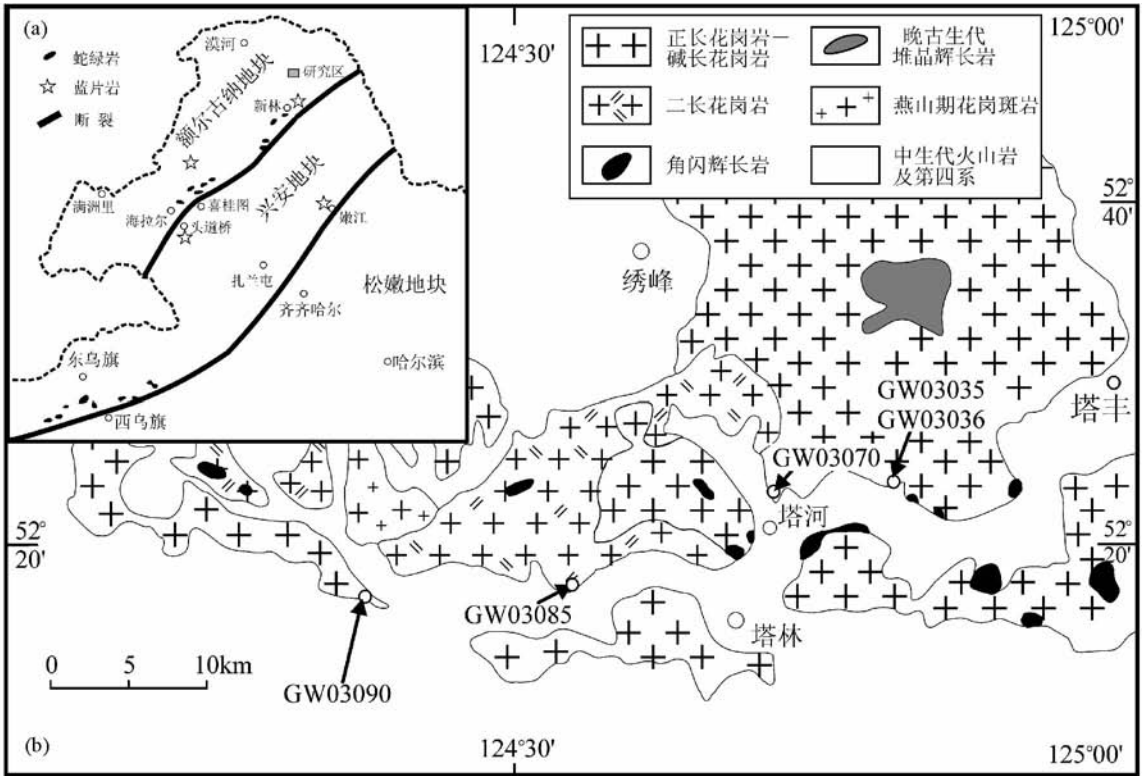


图1 塔河岩体地质简图(引自葛文春等, 2005a)

Fig.1 Simplified geological map of the Tahe granitic complex (after Ge *et al.*, 2005a)

近年来,花岗岩暗色包体的成因成为当今岩石学领域研究的热点问题之一。对这些暗色微粒包体的成因解释主要有:(1)同源岩浆的分离结晶(Didier and Barbarin, 1991);(2)下地壳熔融的残留体(Chappell *et al.*, 1987; Chen *et al.*, 1989; Chappell and White, 1992);(3)基性岩浆与酸性岩浆混合作用产物(Vernon, 1984; Collins, 1998; Yang *et al.*, 2004, 2007; 胡芳芳等, 2005)。这几种争论的焦点在于花岗岩在形成过程中是否有来自幔源基性岩浆的参与。因为幔源基性岩浆在花岗岩的形成过程中提供了地壳熔融的热能和直接的物质输入,因而对暗色微粒包体和寄主花岗岩的研究可以揭示壳-幔相互作用过程。

兴蒙造山带东段的大兴安岭地区分布着大面积的中生代花岗岩(秦克章等, 1999; 孙德有等, 2000, 2001, 2004; 葛文春等, 2005b, 2007b; 隋振民等, 2007; Wu *et al.*, 2000, 2002, 2003),而古生代花岗岩出露相对较少,尤其早古生代花岗岩,仅在兴安地块北部及额尔古纳地块出露,锆石 U-Pb 同位素显示它们形成于 520 ~ 460Ma(刘敦一等, 2003; 武广等, 2005; 葛文春等, 2005a, 2007a, b)。塔河杂岩体发育有大量的辉长岩包体,为研究本区早古生代花岗岩的成因及其壳-幔相互作用提供了可能。本文将通过对塔河杂岩体中辉长岩包体及其寄主岩石的全岩主量元素、微量元素以及锆石 Hf 同位素研究,探讨其岩浆源区特征及成因。

1 区域地质概况

塔河地区位于塔源-喜桂图缝合带北部的额尔古纳地块东部(图 1a)。额尔古纳地块结晶基底为角闪岩相变质的兴华渡口群、绿片岩相变质的佳疙瘩群和少量新元古代花岗质岩石,区内古生代及中生代花岗岩广泛分布。而分布在黑龙江省塔河县城的塔河杂岩体呈不规则状岩基产出,出露面积约 600km²。该杂岩体东北部被晚古生代堆晶辉长岩体侵入(周长勇等, 2005),西侧部分被燕山期花岗斑岩侵入,整个岩体全部被晚中生代火山岩覆盖(图 1b)。前人根据塔河岩体中角闪辉长岩的全岩 K-Ar 年龄(305.5Ma)及二长花岗岩的黑云母 K-Ar(305 ~ 219Ma)年龄,将其视为海西期岩浆活动的产物(黑龙江省地质矿产局, 1985^①),或根据塔河岩体东部十九站岩体 458Ma 的 Rb-Sr 年龄而将其划为加里东期(黑龙江地质矿产局, 1993)。而葛文春(2005a)对塔河岩体 5 个样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年的结果显示,不同岩性样品具有一致的岩浆结晶年龄(480 ~ 494Ma),是早古生代岩浆活动形成的杂岩体。

① 黑龙江省地质矿产局. 1985. 塔河区幅 1:20 万区调报告



图2 塔河岩体的岩浆混合现象

(a)-辉长岩包体与花岗岩接触关系;(b)-“一锅粥”现象;(c)-微粒包体中含有钾长石的斑晶

Fig.2 Field photographs of the magma mixing in Tahe granitic complex

(a)-contact boundary between the gabbro enclaves and granite; (b)-“gruel” phenomenon; (c)-K-feldspar phenocryst in gabbro enclaves

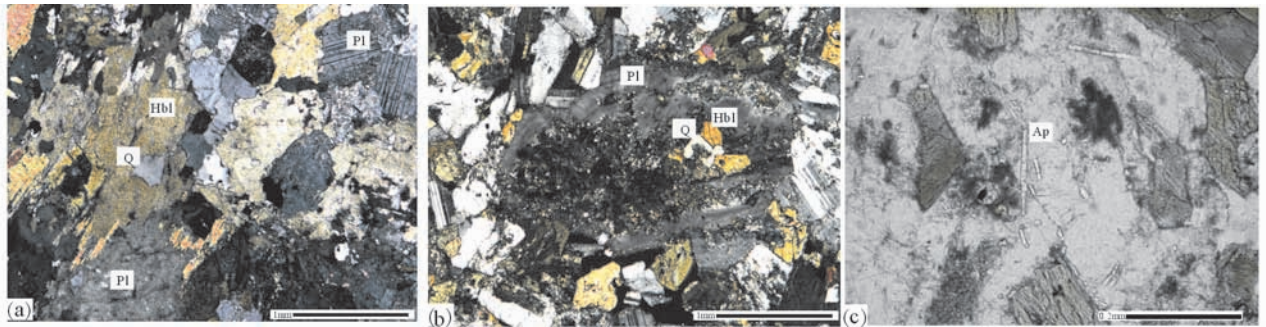


图3 塔河岩体辉长岩显微照片

(a)-角闪石包裹石英;(b)-斜长石中的角闪石和石英;(c)-针状磷灰石. Pl-斜长石;Hbl-角闪石;Q-石英;Ap-磷灰石

Fig.3 Microphotographs of the Tahe gabbro

(a)-quartz is enwrapped in the hornblende; (b)-hornblendes and quartz are in the Plagioclase; (c)-needle-like apatite grain. Pl-plagioclase; Hbl-hornblende; Q-quartz; Ap-apatite

2 岩石学特征

塔河杂岩体由正长花岗岩、二长花岗岩、碱长花岗岩、花岗闪长岩和细粒辉长岩组成。其中二长花岗岩和正长花岗岩为该岩体的主体岩性,碱长花岗岩和花岗闪长岩零星出露。岩体岩石以块状构造为主,局部见有片麻状构造。细粒辉长岩-闪长岩除呈脉状和小岩株状产出外,在二长花岗岩、正长花岗岩中常呈包体形式存在。包体大小不等($1 \times 1\text{cm} \sim 50 \times 50\text{cm}$),形状多样,呈浑圆状、椭圆状、棱角状、扁豆状、镰刀状等(图2a)。一般情况下,辉长岩包体和花岗岩的接触界线多呈凹凸不平的锯齿状淬火边;有的包体与寄主花岗岩的接触界线模糊不清,呈现迷雾状的渐变过渡关系,局部可见花岗岩和辉长岩包体呈现出相互混杂在一起的“一锅粥”现象(图2b)。在个别包体中可见钾长石斑晶(图2c)。上述辉长岩包体特征明显不同于同源包体或残留体。

二长花岗岩:呈灰-灰红色,中细粒花岗结构,块状构造,局部见片麻状构造。主要矿物组合为石英(15%~25%) + 钾长石(25%~30%) + 斜长石(40%±) + 黑云母(5%) +

普通角闪石(3%~5%),偶含少量单斜辉石,副矿物为锆石、榍石、磷灰石等。随着石英含量的减少,局部出现石英二长岩。

正长花岗岩:与二长花岗岩同为塔河岩体的主要岩性。浅肉红色,块状构造。中粒花岗结构,局部为似斑状结构,斑晶为微斜长石和条纹长石。主要矿物组合为石英(25%~30%) + 钾长石(35%~50%) + 斜长石(10%~20%),黑云母和普通角闪石含量<3%。斜长石呈半自形-自形板状,发育聚片双晶和环带结构,且有高岭土化蚀变,粒径为0.5~3mm;石英呈他形粒状,粒径为0.3~3mm;黑云母呈他形-半自形片状,粒径为0.5~2mm。副矿物为锆石、榍石、磷灰石和磁铁矿等。

碱长花岗岩:出露规模较小,呈岩株状出露于正长花岗岩中。岩石呈灰白色,中细粒花岗结构,块状构造。主要矿物为钾长石(60%~65%) + 石英(25%) + 斜长石(5%~8%) + 普通角闪石(2%~5%) + 黑云母(<2%)。钾长石为条纹长石和微斜条纹长石,呈他形-半自形板状;斜长石呈半自形板状,具弱绢云母化;石英呈他形粒状充填于长石颗粒空隙中;黑云母呈暗褐-浅黄褐色片状;副矿物主要为锆石

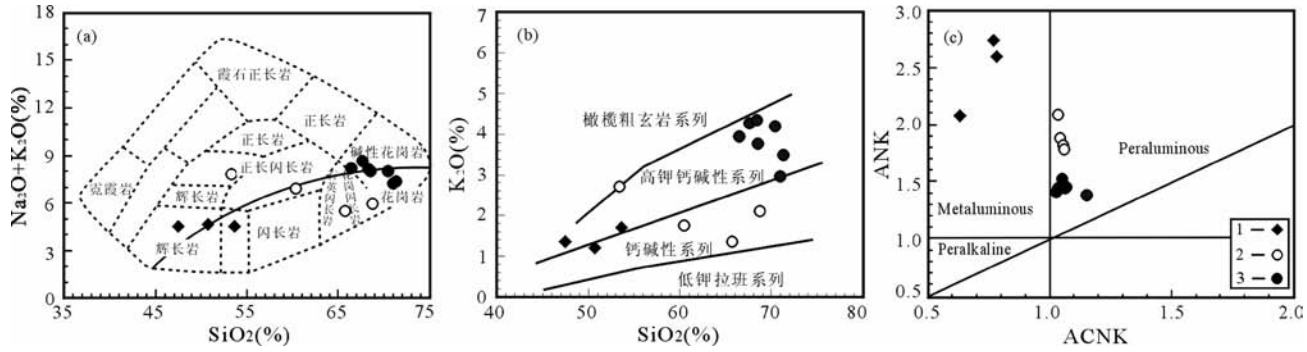


图4 塔河花岗岩杂岩体的地球化学图解

图4a据 Wilson, 1989. 图例: 1-角闪辉长岩; 2-花岗闪长岩-石英闪长岩-闪长岩组合; 3-正长花岗岩-二长花岗岩-碱长花岗岩组合

Fig. 4 Geochemical diagrams of the Tahe granitic complex

Fig. 4a after Wilson, 1989. Symbols: 1-hornblende gabbro; 2-granodiorite, quartz-diorite and diorite assemblages; 3-syenogranite, monzogranite and alkali feldspar granite assemblages

及不透明矿物。

花岗闪长岩-石英闪长岩-闪长岩规模较小, 分布比较局限, 多在角闪辉长岩和花岗岩的接触带附近。这类岩石都呈灰白色, 块状构造, 中细粒结构, 主要矿物组合为斜长石(60%~80%) + 黑云母(10%~20%) + 石英(5%~25%)。其中斜长石多为中长石和更长石, 呈半自形板状, 发育聚片双晶及卡钠联合双晶, 常见环带结构。随着石英含量的减少, 斜长石的含量逐渐增多, 个别斜长石颗粒双晶模糊, 条纹较宽, 与辉长岩中的拉长石相似。副矿物可见磁铁矿、磷灰石、褐帘石和锆石等。

细粒角闪辉长岩: 岩石呈灰黑色, 块状构造, 主要矿物组合为斜长石(40%~55%) + 角闪石(35%~40%) + 石英(<5%) ± 单斜辉石, 其中斜长石为中-拉长石(An41~57), 呈自形-半自形板状, 粒径为0.2~0.5mm, 发育聚片双晶、环带结构, 可见绢云母化、绿泥石化。斜长石颗粒中常包裹有石英及角闪石颗粒(图3b)。单斜辉石颗粒较小, 多存在于角闪石的内部。普通角闪石具浅绿色-绿色多色性, 常呈集合体和单颗粒角闪石两种形态出现。角闪石偶见简单双晶, 有弱的定向性, 内部包裹不规则状石英及黑云母(图3a); 黑云母呈半自形片状。副矿物为锆石、榍石、磷灰石等, 磷灰石有短柱状和针状两种, 后者长宽比可达15:1(图3c)。随着岩石中角闪石含量减少、斜长石含量增加及斜长石号码降低, 辉长岩过渡为辉长闪长岩。

上述野外地质和岩相学特征显示塔河杂岩体为典型的岩浆混合成因, 并据此划分为3个岩石组合: 正长花岗岩-二长花岗岩-碱长花岗岩组合, 近似代表岩浆混合的酸性端元; 角闪辉长岩, 近似代表岩浆混合的基性端元; 花岗闪长岩-石英闪长岩-闪长岩组合, 为岩浆混合的过渡产物。

3 分析方法

塔河杂岩体岩石样品的主量元素和微量元素分别在在

中国科学院广州地球化学研究所的 Rigaku RIX 2000 型荧光光谱仪(XRF)和 Perkin-Elmer Sciex ELAN 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)上分析, 主量元素的 XRF 分析精度优于1%~5%, 其详细步骤与 Li *et al.* (2005) 所述相同。微量元素的 ICP-MS 分析精度一般为2%~5%, 分析流程见 Li (1997)。

锆石 Hf 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所 LA-MC-ICP-MS 实验室完成。实验采用的激光束斑直径为60 μ m, 由 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪测定锆石的 Hf 同位素比值。采用哈佛大学国际标准锆石 91500 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值取 0.282310 ± 0.000035) 对仪器状态进行监控并对样品进行外部校正, 详细测试流程以及仪器参数等见 Wu *et al.* (2006)。

4 地球化学特征

4.1 主量元素地球化学特征

利用岩石的主量元素(表1)在 SiO_2 -($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) 图解上投影, 样品分别落在了三个区域内(图4a): 基性端元的样品(GW03035、GW03097 和 GW03098)落在了辉长岩-辉长闪长岩区; 酸性端元的样品(GW03036、GW03070、GW03085、GW03090、GW03091、GW03092、GW03096)落在了碱性花岗岩-花岗岩区内; 岩浆混合过渡产物(GW03034、GW03087、GW03088 和 GW03100)则落在花岗闪长岩-石英闪长岩-闪长岩区。这与岩相学的分类一致。

角闪辉长岩包体的 SiO_2 含量在 47.46%~53.60% 之间, 属于基性侵入岩, 样品 GW03098 略偏中性(53.60%)。 K_2O 含量在 1.22%~1.70% 之间。在 SiO_2 - K_2O 图解上, 样品落在了高钾钙碱性系列靠近钙碱性系列的边界附近(图4b), 在 ANK-ACNK 图解上均落在了准铝质的范围之内(图4c)。 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 MnO 、 P_2O_5 含量远大于花岗岩组合(表1、图5)。

表1 塔河岩体的主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果
Table 1 Major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) element contents of Tahe granitic complex

样品号	GW03036	GW03070	GW03085	GW03090	GW03091	GW03092	GW03096	GW03035	GW03097	GW03098	GW03034	GW03087	GW03088	GW03100
岩石组合	正长花岗岩-二长花岗岩-碱长花岗岩组合													
	正长花岗岩-二长花岗岩-碱长花岗岩组合							角闪辉长岩包体			花岗岩-石英英闪长岩-闪长岩组合			
SiO ₂	66.44	70.95	67.62	68.34	68.50	70.41	71.33	50.74	47.46	53.60	60.40	53.37	68.72	65.73
TiO ₂	0.48	0.36	0.47	0.34	0.33	0.30	0.33	1.17	1.79	0.69	0.78	1.36	0.21	0.68
Al ₂ O ₃	17.21	14.77	16.39	15.46	15.89	15.35	14.79	18.06	18.39	13.49	19.47	20.68	15.28	17.29
CaO	2.80	2.01	1.31	2.26	2.40	2.23	2.01	8.90	9.48	8.17	4.62	4.56	3.23	4.65
Fe ₂ O ₃	3.56	2.84	3.54	3.42	3.19	3.02	3.12	9.19	12.54	11.67	5.58	8.80	3.94	4.33
K ₂ O	3.94	2.96	4.27	4.33	3.77	4.19	3.50	1.22	1.35	1.70	1.75	2.72	2.10	1.35
MgO	0.77	0.64	0.67	0.52	0.47	0.43	0.44	5.07	5.21	6.73	1.31	2.37	1.44	1.16
MnO	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.16	0.19	0.30	0.06	0.15	0.09	0.06
Na ₂ O	4.28	4.29	4.40	3.82	4.22	3.84	3.89	3.43	3.19	2.83	5.13	5.11	3.83	4.14
P ₂ O ₅	0.12	0.09	0.12	0.08	0.08	0.07	0.07	0.32	0.46	0.26	0.21	0.29	0.03	0.21
LOI	0.83	0.65	1.10	0.93	0.42	0.57	0.63	1.93	0.44	0.63	0.84	0.67	1.33	0.74
Total	100.48	99.62	99.95	99.56	99.32	100.46	100.16	100.19	100.50	100.07	100.15	100.08	100.20	100.34
δ	2.88	1.88	3.05	2.62	2.5	2.35	1.93	2.79	4.62	1.94	2.72	5.91	1.37	1.33
A/CNK	1.05	1.06	1.15	1.02	1.03	1.03	1.07	0.78	0.77	0.63	1.04	1.05	1.06	1.03
La	89.3	69.6	61.6	61.6	73.3	62.5	92.2	35.5	35.7	32.7	184	40.2	10.0	99.6
Ce	159	133	115	131	131	111	159	77.4	74.9	80.7	335	84.5	18.6	166
Pr	17.5	13.7	13.2	14.9	14.9	12.6	17.5	10.4	10.4	12.6	30.3	11.2	2.2	18.1
Nd	54.9	42.9	43.0	48.1	48.1	41.4	54.2	38.8	39.8	54	88.8	42	7.63	56.7
Sm	8.32	6.68	7.27	7.83	7.83	7.06	7.86	6.86	7.63	13.8	10.1	10.6	1.49	8.14
Eu	1.48	0.79	0.94	1.15	1.15	1.07	0.91	2.04	2.39	1.52	1.76	1.27	0.41	1.85
Gd	5.03	4.19	4.74	5.38	5.38	5.09	4.64	5.07	6.35	13.7	4.02	10.9	1.35	5.00
Tb	0.89	0.74	0.78	0.91	0.91	0.86	0.85	0.8	0.91	2.28	0.76	1.86	0.21	0.80
Dy	4.77	3.87	4.33	5.05	5.05	4.96	4.67	4.25	4.89	13.01	3.69	11.2	1.28	4.03
Ho	0.89	0.75	0.85	1.04	1.04	1.01	0.97	0.84	0.97	2.58	0.71	2.27	0.26	0.77
Er	2.45	2.09	2.12	2.82	2.82	2.74	2.82	2.31	2.59	6.94	1.99	5.49	0.77	2.03
Tm	0.35	0.31	0.31	0.45	0.45	0.41	0.43	0.35	0.38	1.05	0.26	0.75	0.13	0.27
Yb	2.01	1.98	2	2.83	2.83	2.75	2.68	2.2	2.27	6.38	1.65	4.59	0.85	1.68
Lu	0.32	0.32	0.29	0.46	0.46	0.44	0.42	0.35	0.35	0.97	0.27	0.65	0.15	0.27
Σ REE	346.9	280.7	256.8	295.1	295.1	254.0	349.5	187.2	189.6	242.4	663.2	227.4	45.3	365.6
Eu/Eu*	0.65	0.43	0.46	0.51	0.51	0.52	0.42	1.01	1.02	0.33	0.71	0.36	0.87	0.82
(La/Yb) _N	31.9	25.2	22.1	18.6	18.6	16.3	24.7	11.6	11.3	3.7	79.8	6.3	8.5	42.5
Sr	511	243	188	201	201	200	159	755	829	286	748	312	276	548
Rb	72.6	107	103	86.8	86.8	97.0	74.3	27.0	24.4	64.2	46.4	150	139	40.4
Ba	1835	1439	1455	1779	1779	1948	1309	689	951	553	1026	365	996	732
Th	12.6	9.80	10.7	13.0	13.0	10.8	15.5	1.60	1.11	1.97	20.4	11.9	4.38	12.2
Nb	10.2	8.83	16.1	10.6	10.6	9.92	11.4	8.31	6.49	10.6	9.26	33.2	5.15	9.03
Zr	371	303	340	386	386	295	331	147	197	294	512	419	71.3	450
Ga	20.6	18.6	20.8	20.8	20.8	18.5	18.6	21.1	21.9	20.1	24.7	39.2	16.1	21.2
Hf	8.97	6.92	7.27	9.25	9.25	7.19	7.96	3.45	4.35	7.46	12.0	9.31	2.19	10.6
U	1.00	1.42	1.63	2.84	2.84	3.07	1.31	0.46	0.28	0.81	1.72	2.64	1.64	1.12
Y	23.3	21.2	21.4	27.4	27.4	26.0	26.3	22.7	25.0	66.0	18.4	58	7.09	19.8
Ta	0.47	0.41	0.58	0.86	0.86	0.81	0.82	0.38	0.27	0.35	0.37	1.76	0.47	0.36

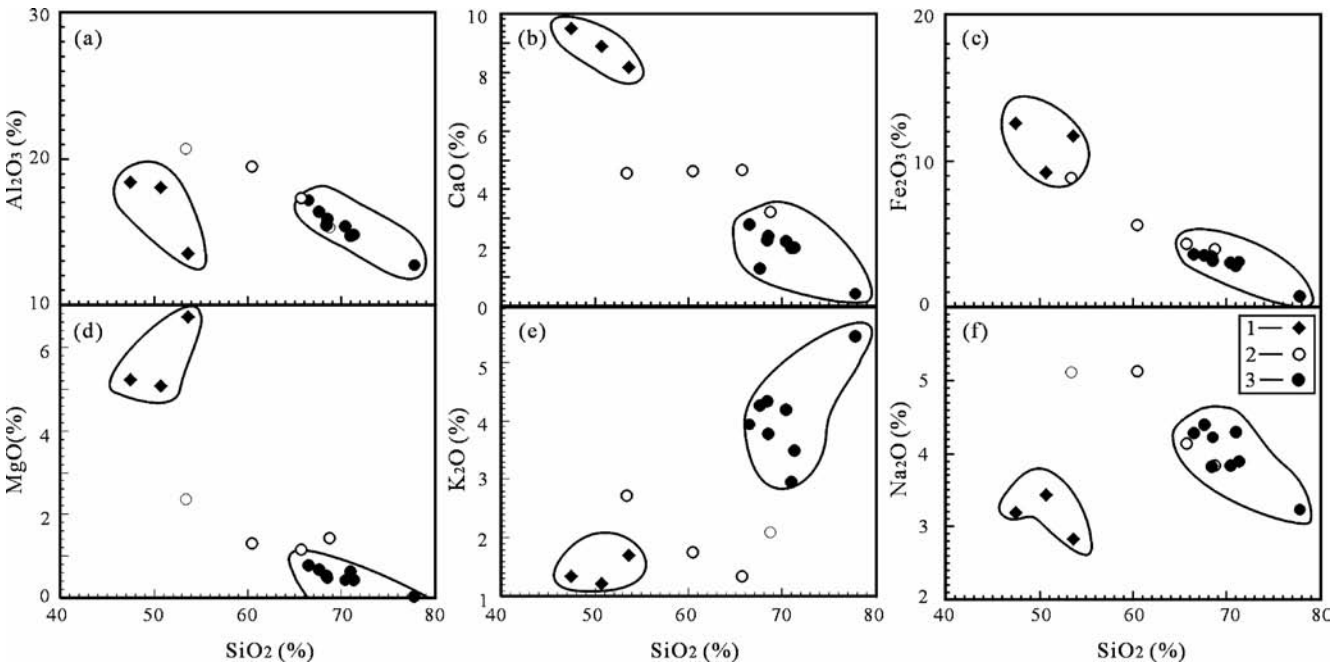


图5 塔河花岗杂岩体的 Harker 图解

图例同图4

Fig.5 Harker diagrams of the Tahe granitic complex

Symbols are the same as those in Fig. 4

正长花岗岩-二长花岗岩-碱长花岗岩组合的 SiO_2 含量在 66.44% ~ 71.33% 之间, 里特曼指数在 1.9 ~ 3.1 之间, 整体小于 3.3, 属钙碱性系列。在 SiO_2 - K_2O 图解上, 样品都落在了高钾钙碱性系列中(图 4b); 贫 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 MnO 、 P_2O_5 ; Al_2O_3 含量为 14.77% ~ 17.21%, A/CNK 比值范围为 1.02 ~ 1.07(图 4c)。

花岗闪长岩-石英闪长岩-闪长岩组合的 SiO_2 含量跨度很大, 为 53.37% ~ 68.72%, 介于中性岩-酸性岩之间, 是岩浆混合程度不同的结果。本岩石组合的 K_2O 含量为 1.35% ~ 2.72%, 在 SiO_2 - K_2O 图解上, 样品落到钙碱性-高钾钙碱性系列范围内(图 4b)。在 A/NK - A/CNK 图解上样品都落在了过铝质花岗岩区(图 4c)。闪长岩(GW03087)和石英闪长岩(GW03034)具有较高的 Al_2O_3 和 Na_2O 含量(图 5a, f), 这可能与样品中斜长石的含量相对较高(~75%)及后期的绢云母化和高岭土化蚀变有关。

4.2 稀土元素地球化学特征

在稀土元素组成上(表 1), 三个岩石组合都富集轻稀土元素(LREE), 重稀土元素(HREE)相对亏损, 但角闪辉长岩包体的稀土总量(ΣREE)比正长花岗岩-二长花岗岩-碱长花岗岩组合略低, 花岗闪长岩-石英闪长岩-闪长岩组合则变化较大。

角闪辉长岩的稀土配分模式为轻稀土富集, 重稀土亏损

的右倾型。根据三个角闪辉长岩包体样品的稀土元素组成可将其分成两类: ①样品 GW03035、GW03097, 稀土元素总量为 $187.2 \times 10^{-6} \sim 189.6 \times 10^{-6}$, 无 Eu 异常($\delta \text{Eu} = 1.01 \sim 1.02$), 轻重稀土分馏程度中等($(\text{La}/\text{Yb})_N = 11.3 \sim 11.6$); ②样品 GW03098 的稀土元素总量 $\Sigma \text{REE} = 242.4 \times 10^{-6}$, 有明显的负 Eu 异常($\delta \text{Eu} = 0.33$), 稀土元素分馏程度较弱($(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.68$), 重稀土含量是①的近三倍之多。

正长花岗岩-二长花岗岩-碱长花岗岩组合的稀土元素总量为 $256.8 \times 10^{-6} \sim 349.5 \times 10^{-6}$, 具有较明显的 Eu 的负异常($\delta \text{Eu} = 0.42 \sim 0.65$), 轻重稀土分馏明显($(\text{La}/\text{Yb})_N = 16.3 \sim 31.8$), 在稀土元素球粒陨石标准化图解(图 6c)上表现为富集轻稀土的右倾形式。

花岗闪长岩-石英闪长岩-闪长岩组合的稀土元素特征继承了上述两个岩石组合的特征(图 6b)。GW03087 的稀土元素总量 $\Sigma \text{REE} = 227.4 \times 10^{-6}$, 有明显的负 Eu 异常($\delta \text{Eu} = 0.36$), 轻重稀土元素分馏程度较弱($(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.29$), 与样品 GW03098 极为相似, 可见其继承了包体的特征; 样品 GW03034、GW03100 的稀土元素总量(ΣREE)为 $365.6 \times 10^{-6} \sim 663.2 \times 10^{-6}$, 有较弱的负 Eu 异常($\delta \text{Eu} = 0.71 \sim 0.82$), 轻重稀土元素分馏程度较强($(\text{La}/\text{Yb})_N = 42.5 \sim 79.8$), 虽然个别样品由于斜长石含量较高, 导致轻稀土含量明显高于花岗岩组合, 但整体上稀土配分形式与花岗岩组合极为相似, 可见其继承了花岗岩的特征; ③样品 GW03088 在

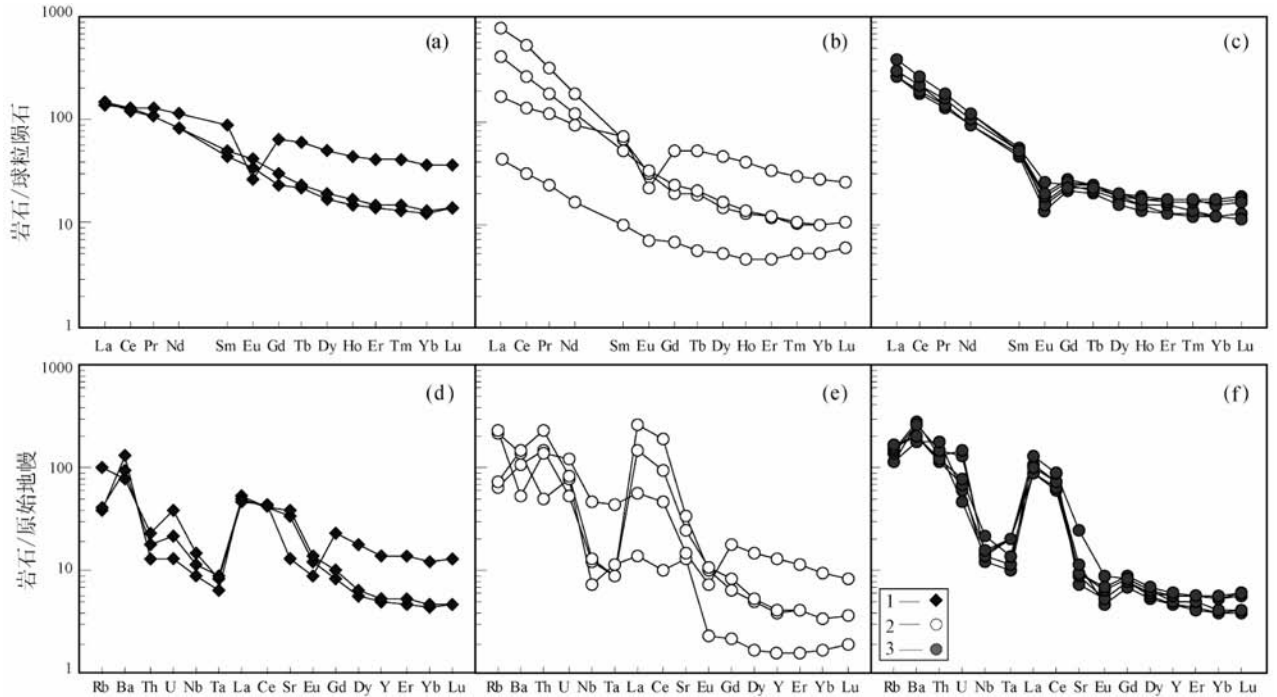


图6 塔河杂岩体的稀土配分模式和微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

图例同图4

Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution patterns and Primitive mantle-normalized trace element patterns of the Tahe granitic complex (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

Symbols are the same as those in Fig. 4

球粒陨石标准化图解上处于最底部,各个元素的含量在所有样品中都是最低的,其稀土元素总量 $\Sigma \text{REE} = 45.33 \times 10^{-6}$,有较弱的负Eu异常($\delta \text{Eu} = 0.87$),轻重稀土元素分馏程度较弱($(\text{La}/\text{Yb})_N = 8.46$)。

4.3 微量元素地球化学特征

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图6d, e, f)上,角闪辉长岩的三个样品中,GW03035和GW03097的微量元素特征比较相似,富集Ba、La等,亏损Nb、Ta。而GW03098则明显与前面的两个样品不同,除了Ta、La、Ga含量比较相近和Sr、Ba含量低于前两个样品之外,其余元素都更富集;正长花岗岩-二长花岗岩-碱长花岗岩组合的微量元素组成比较一致,相对于角闪辉长岩富集Rb($72.6 \times 10^{-6} \sim 106.7 \times 10^{-6}$)、Th($9.80 \times 10^{-6} \sim 15.47 \times 10^{-6}$)等大离子亲石元素(LILE),亏损Nb($8.83 \times 10^{-6} \sim 16.09 \times 10^{-6}$)、Ta($0.41 \times 10^{-6} \sim 0.86 \times 10^{-6}$)等高场强元素(HSFE)。花岗闪长岩-石英闪长岩-闪长岩组合变化较大,介于角闪辉长岩和正长花岗岩-二长花岗岩-碱长花岗岩组合之间(图6e)。

4.4 锆石 Hf 同位素

Lu和Hf均为难熔的中等-强不相容性亲石元素。在Hf

同位素中,部分 ^{176}Hf 可由 ^{176}Lu 衰变而来,这样用稳定的 ^{177}Hf 同位素标准化可获得样品的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值,该比值通过时间校正后,可对岩石成因提供重要信息。由于锆石中具有较高的Hf含量,但Lu的含量又极低,从而导致其 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 具有非常低的比值,且 ^{176}Lu 的半衰期大约有37Ga。因此,锆石在形成后基本没有放射性成因 ^{176}Hf 的积累,所测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值基本上代表了形成时体系的Hf同位素组成。

因而就本文花岗岩中的锆石而言,其放射性成因的 ^{176}Hf 可以忽略不计,所测得的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值基本代表了岩浆结晶时的Hf同位素特征(表2)。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和模式年龄计算过程中,二阶段模式年龄采用平均地壳的 $f_{\text{cc}}(-0.548$; Veever *et al.*, 2005)进行计算,t为样品形成时间, $\lambda_{\text{Hf}} = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ (Bicherl *et al.*, 1997)。

样品GW03090采自塔河西,岩性为角闪碱长花岗岩,锆石均呈自形晶,并具有清晰的韵律环带结构,表明为岩浆成因锆石(图7)。22个岩浆锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值较低,介于 $0.282488 \sim 0.282651$,加权平均值为 0.282550 ± 0.000016 (MSWD = 0.96), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+2.4 \pm 0.5$ (图8a),两阶段亏损地幔模式年龄为1104~1429Ma。

表2 塔河岩体的锆石 Hf 同位素分析结果

Table 2 Zircon Hf isotopic compositions of Tahe granitic complex

测点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}^*$	$2\sigma_m$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lw/Hf}}$
GW03090 01	0.035966	0.000986	0.282597	0.282569	0.000052	-7.2	3.3	1.9	967	1252	-0.97
GW03090 02	0.037769	0.000976	0.282561	0.282533	0.000042	-8.5	2.0	1.5	1018	1333	-0.97
GW03090 03	0.051795	0.001296	0.282609	0.282581	0.000043	-6.8	3.6	1.5	959	1232	-0.96
GW03090 04	0.092813	0.002289	0.282643	0.282615	0.000045	-5.6	4.5	1.6	935	1176	-0.93
GW03090 05	0.076609	0.001945	0.282546	0.282518	0.000039	-9.0	1.2	1.4	1066	1387	-0.94
GW03090 06	0.036433	0.000945	0.282601	0.282573	0.000033	-7.1	3.4	1.2	961	1243	-0.97
GW03090 07	0.028416	0.000750	0.282530	0.282502	0.000036	-9.6	1.0	1.3	1055	1397	-0.98
GW03090 08	0.051398	0.001542	0.282565	0.282536	0.000060	-8.3	2.0	2.1	1028	1336	-0.95
GW03090 09	0.035300	0.000898	0.282552	0.282524	0.000034	-8.8	1.7	1.2	1028	1351	-0.97
GW03090 10	0.059326	0.001483	0.282566	0.282538	0.000033	-8.3	2.0	1.2	1025	1333	-0.96
GW03090 11	0.028567	0.000757	0.282592	0.282564	0.000030	-7.4	3.2	1.1	968	1258	-0.98
GW03090 12	0.042458	0.001098	0.282623	0.282595	0.000045	-6.3	4.2	1.6	933	1195	-0.97
GW03090 13	0.030829	0.000795	0.282516	0.282488	0.000038	-10.0	0.5	1.4	1075	1429	-0.98
GW03090 14	0.034442	0.000882	0.282539	0.282511	0.000036	-9.2	1.3	1.3	1046	1380	-0.97
GW03090 15	0.029735	0.000764	0.282575	0.282547	0.000037	-8.0	2.6	1.3	993	1297	-0.98
GW03090 16	0.110852	0.002716	0.282679	0.282651	0.000039	-4.3	5.6	1.4	893	1104	-0.92
GW03090 17	0.057972	0.001478	0.282610	0.282582	0.000038	-6.7	3.6	1.3	962	1233	-0.96
GW03090 18	0.034172	0.001029	0.282586	0.282558	0.000084	-7.6	2.9	3	984	1277	-0.97
GW03090 19	0.034116	0.000887	0.282552	0.282524	0.000027	-8.8	1.7	0.9	1028	1351	-0.97
GW03090 20	0.037473	0.000967	0.282583	0.282555	0.000034	-7.7	2.8	1.2	987	1284	-0.97
GW03090 21	0.056866	0.001439	0.282592	0.282564	0.000038	-7.4	2.9	1.4	987	1273	-0.96
GW03090 22	0.055789	0.001435	0.282578	0.282550	0.000032	-7.8	2.5	1.1	1005	1303	-0.96
GW03085 01	0.028244	0.000792	0.282535	0.282507	0.000038	-9.4	1.1	1.3	1049	1388	-0.98
GW03085 02	0.048464	0.001287	0.282551	0.282523	0.000038	-8.8	1.6	1.3	1040	1361	-0.96
GW03085 03	0.059192	0.001639	0.282602	0.282574	0.000036	-7.0	3.3	1.3	976	1253	-0.95
GW03085 04	0.037403	0.001047	0.282546	0.282518	0.000037	-9.0	1.5	1.3	1041	1368	-0.97
GW03085 05	0.047875	0.001362	0.282593	0.282565	0.000051	-7.3	3.0	1.8	983	1269	-0.96
GW03085 06	0.034513	0.000962	0.282537	0.282509	0.000039	-9.3	1.2	1.4	1052	1387	-0.97
GW03085 07	0.062985	0.001686	0.282598	0.282570	0.000047	-7.2	3.1	1.7	984	1264	-0.95
GW03085 08	0.031961	0.000909	0.282563	0.282535	0.000043	-8.4	2.1	1.5	1012	1326	-0.97
GW03085 09	0.040192	0.001135	0.282597	0.282569	0.000051	-7.2	3.2	1.8	971	1254	-0.97
GW03085 10	0.025327	0.000735	0.282542	0.282514	0.000052	-9.1	1.4	1.8	1037	1370	-0.98
GW03085 11	0.031091	0.000850	0.282555	0.282527	0.000039	-8.7	1.8	1.4	1023	1344	-0.97
GW03085 12	0.035616	0.000964	0.282524	0.282496	0.000040	-9.8	0.7	1.4	1070	1416	-0.97
GW03085 13	0.056344	0.001542	0.282542	0.282514	0.000041	-9.1	1.2	1.5	1060	1386	-0.95
GW03085 14	0.043235	0.001182	0.282560	0.282532	0.000041	-8.5	1.9	1.5	1025	1339	-0.96
GW03085 15	0.048064	0.001302	0.282586	0.282558	0.000041	-7.6	2.8	1.5	991	1284	-0.96
GW03085 16	0.045919	0.001210	0.282576	0.282548	0.000049	-7.9	2.5	1.7	1003	1303	-0.96
GW03085 17	0.033306	0.000961	0.282547	0.282519	0.000043	-9.0	1.5	1.5	1037	1365	-0.97
GW03085 18	0.057216	0.001542	0.282607	0.282579	0.000042	-6.8	3.5	1.5	968	1242	-0.95
GW03085 19	0.043209	0.001220	0.282565	0.282537	0.000051	-8.3	2.1	1.8	1019	1329	-0.96
GW03085 20	0.066806	0.001804	0.282585	0.282557	0.000045	-7.6	2.6	1.6	1006	1296	-0.95
GW03085 21	0.035837	0.000988	0.282586	0.282558	0.000039	-7.6	2.9	1.4	983	1277	-0.97
GW03070 01	0.027071	0.000860	0.282537	0.282517	0.000034	-9.0	1.5	1.2	1037	1366	-0.97
GW03070 02	0.027641	0.000883	0.282567	0.282547	0.000040	-8.0	2.6	1.4	995	1299	-0.97
GW03070 03	0.026327	0.000789	0.282539	0.282519	0.000040	-9.0	1.6	1.4	1032	1361	-0.98
GW03070 04	0.065635	0.001996	0.282593	0.282573	0.000059	-7.0	3.1	2.1	988	1264	-0.94
GW03070 05	0.021126	0.000672	0.282540	0.282520	0.000026	-8.9	1.6	0.9	1028	1356	-0.98
GW03070 06	0.036852	0.001106	0.282579	0.282559	0.000041	-7.5	2.9	1.5	984	1276	-0.97
GW03070 07	0.076287	0.002274	0.282625	0.282605	0.000039	-5.9	4.1	1.4	949	1198	-0.93
GW03070 08	0.027539	0.000828	0.282587	0.282567	0.000037	-7.2	3.3	1.3	965	1252	-0.98
GW03070 09	0.025049	0.000910	0.282651	0.282631	0.000082	-5.0	5.5	2.9	877	1110	-0.97

续表 2

Continued Table 2

测点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}^*$	$2\sigma_m$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
GW03070 10	0.030242	0.000948	0.282558	0.282538	0.000043	-8.3	2.2	1.5	1009	1320	-0.97
GW03070 11	0.023741	0.000769	0.282529	0.282509	0.000041	-9.3	1.2	1.4	1045	1381	-0.98
GW03070 12	0.029481	0.000914	0.282559	0.282539	0.000040	-8.2	2.3	1.4	1007	1318	-0.97
GW03070 13	0.020980	0.000672	0.282515	0.282495	0.000038	-9.8	0.8	1.3	1063	1413	-0.98
GW03070 14	0.013964	0.000455	0.282541	0.282521	0.000041	-8.9	1.8	1.5	1021	1349	-0.99
GW03070 15	0.032320	0.000986	0.282563	0.282543	0.000037	-8.1	2.4	1.3	1004	1311	-0.97
GW03070 16	0.038204	0.001173	0.282567	0.282547	0.000032	-8.0	2.4	1.2	1003	1305	-0.96
GW03070 17	0.065879	0.001990	0.282599	0.282579	0.000041	-6.8	3.3	1.4	979	1249	-0.94
GW03070 18	0.052910	0.001657	0.282586	0.282566	0.000041	-7.3	3.0	1.5	989	1272	-0.95
GW03070 19	0.050378	0.001518	0.282578	0.282558	0.000044	-7.6	2.7	1.6	997	1288	-0.95
GW03070 20	0.044740	0.001343	0.282561	0.282541	0.000052	-8.2	2.2	1.9	1016	1321	-0.96
GW03070 21	0.027407	0.000843	0.282471	0.282451	0.000044	-11.3	-0.8	1.5	1128	1513	-0.97
GW03070 22	0.042520	0.001302	0.282516	0.282496	0.000060	-9.8	0.6	2.1	1079	1423	-0.96
GW03070 23	0.034782	0.001087	0.282522	0.282502	0.000039	-9.6	0.9	1.4	1064	1405	-0.97
GW03070 24	0.014909	0.000470	0.282537	0.282517	0.000041	-9.0	1.6	1.5	1026	1358	-0.99
GW03070 25	0.059355	0.001736	0.282618	0.282598	0.000041	-6.2	4.1	1.5	945	1202	-0.95
GW03070 26	0.188932	0.005425	0.282810	0.282790	0.000059	0.7	9.7	2.1	742	845	-0.84
GW03070 27	0.042890	0.001318	0.282607	0.282587	0.000052	-6.6	3.8	1.8	951	1219	-0.96
GW03070 28	0.032774	0.001028	0.282553	0.282533	0.000047	-8.5	2.0	1.7	1019	1333	-0.97
GW03070 29	0.043872	0.001355	0.282521	0.282501	0.000049	-9.6	0.8	1.7	1073	1411	-0.96
GW03070 30	0.071738	0.002091	0.282587	0.282567	0.000036	-7.3	2.8	1.3	1000	1280	-0.94
GW03036 01	0.038303	0.001194	0.282550	0.282530	0.000033	-8.6	1.8	1.2	1028	1344	-0.96
GW03036 02	0.069491	0.002003	0.282629	0.282609	0.000031	-5.8	4.4	1.1	936	1183	-0.94
GW03036 03	0.031044	0.000957	0.282565	0.282545	0.000021	-8.0	2.4	0.7	1000	1305	-0.97
GW03036 04	0.025433	0.000829	0.282524	0.282504	0.000029	-9.5	1.0	1	1055	1396	-0.98
GW03036 05	0.041967	0.001289	0.282602	0.282582	0.000030	-6.7	3.6	1.1	957	1229	-0.96
GW03036 06	0.055652	0.001642	0.282573	0.282553	0.000037	-7.8	2.5	1.3	1008	1302	-0.95
GW03036 07	0.037989	0.001120	0.282590	0.282570	0.000026	-7.2	3.3	0.9	970	1253	-0.97
GW03036 08	0.061587	0.001782	0.282637	0.282617	0.000031	-5.5	4.7	1.1	919	1160	-0.95
GW03036 09	0.031649	0.000989	0.282559	0.282539	0.000027	-8.3	2.2	1	1010	1320	-0.97
GW03036 10	0.034882	0.001068	0.282592	0.282572	0.000033	-7.1	3.4	1.2	965	1247	-0.97
GW03036 11	0.018858	0.000578	0.282568	0.282548	0.000033	-7.9	2.7	1.2	986	1291	-0.98
GW03036 12	0.042746	0.001260	0.282623	0.282603	0.000033	-6.0	4.4	1.2	926	1180	-0.96
GW03036 13	0.048805	0.001494	0.282505	0.282485	0.000040	-10.2	0.1	1.4	1100	1451	-0.96
GW03036 14	0.055891	0.001711	0.282560	0.282540	0.000038	-8.2	2.0	1.3	1027	1331	-0.95
GW03036 15	0.031324	0.001008	0.282586	0.282566	0.000025	-7.3	3.2	0.9	972	1259	-0.97
GW03036 16	0.042537	0.001314	0.282571	0.282551	0.000033	-7.8	2.6	1.2	1001	1298	-0.96
GW03036 17	0.032769	0.001024	0.282574	0.282554	0.000033	-7.7	2.8	1.2	989	1286	-0.97
GW03036 18	0.010373	0.000343	0.282514	0.282494	0.000030	-9.8	0.8	1.1	1055	1407	-0.99
GW03036 19	0.018057	0.000566	0.282542	0.282522	0.000040	-8.9	1.7	1.4	1023	1350	-0.98
GW03036 20	0.037422	0.001155	0.282587	0.282567	0.000036	-7.3	3.2	1.3	974	1260	-0.97
GW03036 21	0.037724	0.001180	0.282578	0.282558	0.000042	-7.6	2.9	1.5	987	1280	-0.96
GW03036 22	0.030535	0.001000	0.282491	0.282471	0.000036	-10.6	-0.2	1.3	1105	1471	-0.97
GW03036 23	0.027648	0.000857	0.282518	0.282498	0.000032	-9.7	0.8	1.2	1063	1408	-0.97
GW03035 01	0.071626	0.002621	0.282705	0.282685	0.000041	-3.1	6.9	1.5	840	1025	-0.92
GW03035 02	0.096670	0.003114	0.282699	0.282679	0.000047	-3.3	6.5	1.7	861	1049	-0.91
GW03035 03	0.080318	0.002724	0.282701	0.282681	0.000061	-3.2	6.7	2.2	849	1036	-0.92
GW03035 04	0.029665	0.001097	0.282580	0.282560	0.000047	-7.5	2.9	1.7	982	1274	-0.97
GW03035 05	0.017007	0.000630	0.282533	0.282513	0.000052	-9.2	1.4	1.8	1036	1371	-0.98
GW03035 06	0.020248	0.000700	0.282552	0.282532	0.000040	-8.5	2.1	1.4	1011	1328	-0.98
GW03035 07	0.145223	0.004807	0.282793	0.282773	0.000058	0.0	9.3	2.1	756	872	-0.86
GW03035 08	0.054721	0.001900	0.282637	0.282617	0.000056	-5.5	4.7	2	922	1163	-0.94

续表 2

Continued Table 2

测点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}^*$	$2\sigma_m$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
GW03035 09	0.051402	0.001695	0.282599	0.282579	0.000052	-6.8	3.4	1.9	972	1245	-0.95
GW03035 10	0.091836	0.002858	0.282666	0.282646	0.000051	-4.5	5.4	1.8	904	1118	-0.91
GW03035 11	0.081834	0.002767	0.282664	0.282644	0.000049	-4.5	5.4	1.7	904	1120	-0.92
GW03035 12	0.151034	0.004945	0.282809	0.282789	0.000062	0.6	9.8	2.2	734	839	-0.85
GW03035 13	0.146786	0.004947	0.282800	0.282780	0.000062	0.3	9.5	2.2	749	859	-0.85
GW03035 14	0.062967	0.002214	0.282639	0.282619	0.000055	-5.4	4.7	2	926	1164	-0.93
GW03035 15	0.063039	0.002074	0.282696	0.282676	0.000051	-3.4	6.7	1.8	840	1033	-0.94
GW03035 16	0.022830	0.000806	0.282578	0.282558	0.000046	-7.6	3.0	1.6	978	1272	-0.98
GW03035 17	0.122866	0.004126	0.282769	0.282749	0.000055	-0.8	8.6	2	778	911	-0.88
GW03035 18	0.033956	0.001190	0.282560	0.282540	0.000050	-8.2	2.2	1.8	1014	1322	-0.96
GW03035 19	0.070472	0.002301	0.282622	0.282602	0.000048	-6.0	4.0	1.7	953	1204	-0.93
GW03035 20	0.016131	0.000579	0.282600	0.282580	0.000038	-6.8	3.8	1.3	942	1220	-0.98
GW03035 21	0.034270	0.001271	0.282633	0.282613	0.000047	-5.6	4.7	1.7	913	1160	-0.96
GW03035 22	0.044393	0.001494	0.282601	0.282581	0.000034	-6.7	3.6	1.2	963	1234	-0.95

注： $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}^*$ 为 91500 校正后的比值； t_{DM1} 为单阶段模式年龄； t_{DM2} 为两阶段模式年龄； $f_{\text{Lu/Hf}}$ 为分馏因子； t 以 490Ma 计

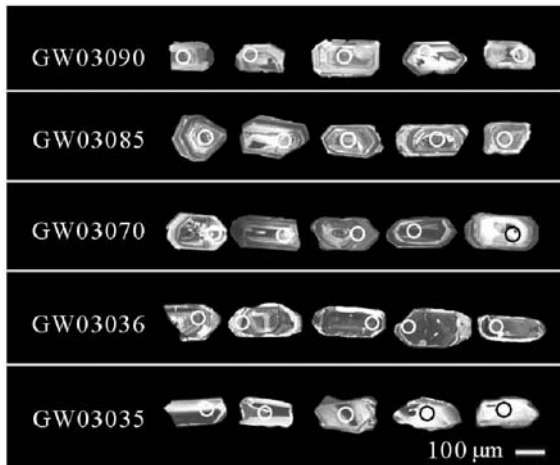


图 7 塔河花岗岩杂岩体的部分锆石阴极发光图像

Fig. 7 CL images of zircons from Tahe granitic complex

样品 GW03085 采自塔林西公路旁,其岩性为黑云母二长花岗岩。实验所测的锆石均为岩浆成因的自形晶(图 7)。21 个锆石测试结果显示, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282496 ~ 0.282579,加权平均值为 0.282537 ± 0.000018 (MSWD = 0.37), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+2.1 \pm 0.4$ (图 8b),两阶段亏损地幔模式年龄为 1242 ~ 1416Ma。

样品 GW03070 采自塔河县城北采石场,为似斑状正长花岗岩。锆石均为岩浆成因的自形晶(图 7)。30 个锆石测试数据中有一个统计离群,剩余 29 个锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282451 ~ 0.282790,加权平均值为 0.282539 ± 0.000013 (MSWD = 1.3), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+2.2 \pm 0.4$ (图 8c),两阶段亏损地幔模式年龄为 845 ~ 1513Ma。

样品 GW03036 采自塔河县东公路边,其岩性为中粗粒正长花岗岩。所测锆石为具有岩浆型振荡环带的自形晶(图

7)。23 个锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.282471 ~ 0.282617,加权平均值为 0.282549 ± 0.000016 (MSWD = 1.4), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+2.5 \pm 0.5$ (图 8d),两阶段亏损地幔模式年龄为 1160 ~ 1471Ma。

样品 GW03035 与 GW03036 采自相同的位置,岩石类型为细粒角闪辉长岩。22 个岩浆锆石的 Hf 同位素测定结果显示, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分布在 0.282513 ~ 0.282789 之间,分布范围略宽于花岗岩。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $+1.4 \sim +9.8$ 之间(图 8e)。

5 讨论

5.1 岩浆的混合成因

近年来一些学者对花岗岩的岩浆混合作用进行了大量的研究,并取得了重要的研究成果(王涛, 2000; 孙德有等, 2001; 胡芳芳等, 2005; Yang *et al.*, 2004, 2007)。野外地质特征、显微结构、地球化学特征及 Hf 同位素的研究证明了塔河花岗岩中的辉长岩包体为岩浆混合成因,其主要特征为:(1)辉长岩包体呈多种形态存在于寄主花岗岩之中,且包体边缘粒度变细,局部可见到花岗岩和辉长岩包体呈现相互混杂在一起的“一锅粥”现象,表明花岗质岩浆和玄武质岩浆之间存在着机械混合的过程,并且在混合过程中二者均处于塑性流动的岩浆状态(即处于液态或半液态);(2)辉长岩中大量的针状磷灰石的出现说明基性岩浆在与花岗岩浆混合时发生了淬火作用;(3)在 Harker 图解上,辉长岩包体和寄主花岗岩分别位于不同的区域,闪长岩组合位于二者之间。在主要元素的 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO}$ 、 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ - SiO_2/CaO 氧化物变化图解(图 9a, b)上,三种岩石组合呈现出双曲线的变异关系,相同的变化关系在微量元素比值图解中也有表现(图 9c),这些都是岩浆混合作用的有力证据(周珣若, 1994)。

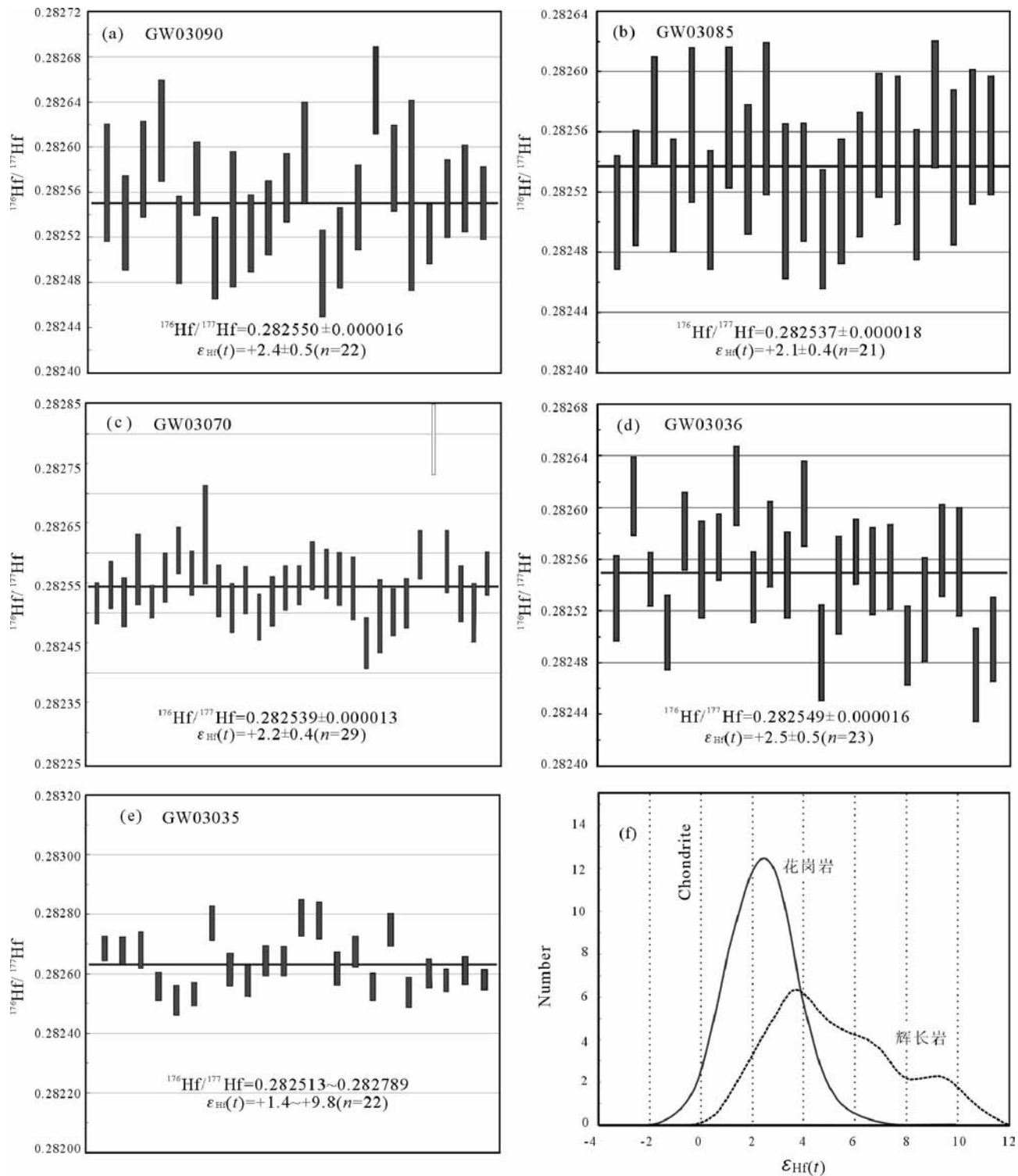


图8 塔河杂岩体的 Hf 同位素组成

Fig. 8 Characteristics of Hf isotope of the Tahe granitic complex

岩浆混合过程中,两端元岩浆中的元素和同位素因在熔体中扮演的角色不同,而使得它们的平衡速率存在差异。一般,微量元素和同位素较主量元素更易于达到平衡(Holden, 1987; Leshner, 1990; Allen, 1991),所以全岩的 Sr-Nd 同位素

容易达到均一,难以示踪岩浆源区性质。由于锆石在岩浆演化过程中属于早期结晶相,且具有较高的 Hf 同位素封闭温度,因而有可能记录下混合端元各自的 Hf 同位素组成(Griffin *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2006,

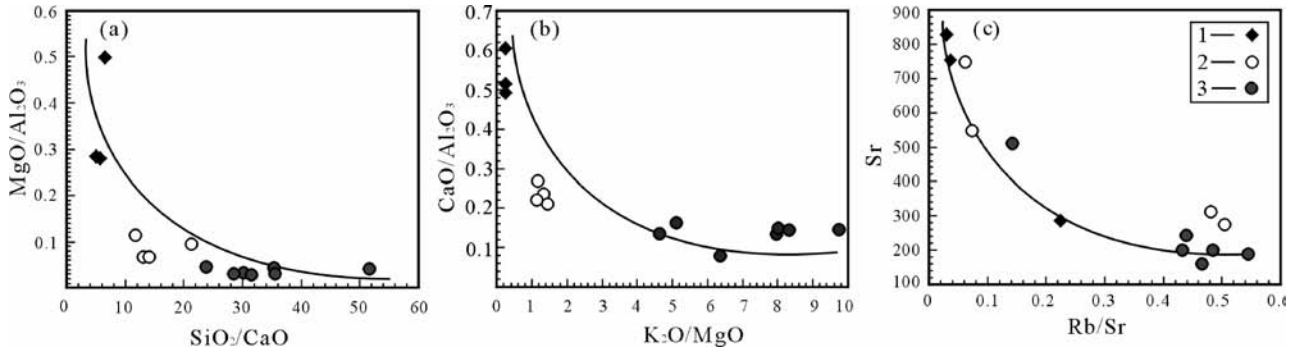


图9 塔河杂岩体地球化学比值图解

图例同图4

Fig. 9 Geochemical ratio diagrams of the Tahe granitic complex

Symbols are the same as those in Fig. 4

2007)。本研究显示,塔河花岗岩及辉长岩包体具有相同的锆石结晶年龄,但却具有不同的 Hf 同位素组成(图 7f)。花岗岩中锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中在 $-0.8 \sim +5.6$ 之间,辉长岩包体中锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 在 $+1.4 \sim +9.8$ 之间,并在 $+4 \sim +10$ 之间形成峰。这说明它们是性质完全不同的两种岩浆,分别起源于不同的岩浆源区。

5.2 岩浆源区特征

塔河杂岩体中的角闪辉长岩包体的 SiO_2 含量为 47.46% ~ 53.60%,属基性-偏中性岩石。宏观上,在辉长岩包体中出现钾长石斑晶,说明在岩浆混合过程中,辉长岩的成分受到了花岗质岩浆的改造。辉长岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282513 ~ 0.282789 之间, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 $+1.4 \sim +9.8$ 之间。虽然我们目前还无法限定岩浆混合的程度及混合作用对锆石 Hf 同位素的影响,但基性岩浆体系原始的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值至少为 $+9.8$,说明基性岩浆直接起源于亏损地幔。辉长岩的 t_{DM1} 为 0.7 ~ 1.0Ga,远大于其形成年龄,这显然与花岗质岩浆的混合作用有关。

二长花岗岩-正长花岗岩-碱长花岗岩组合中,暗色矿物出现角闪石、黑云母,副矿物出现榍石;在岩石化学上具有富碱(TAS = 7.25% ~ 8.67% 之间)、高钾(2.96% ~ 4.33% 之间)的特征,属于弱过铝质,高钾钙碱性系列;具有中等程度的负 Eu 异常,富集大离子亲石元素(如 Rb、Ba、La、Ce 等),亏损高场强元素(Nb、Ta 等),说明本区早古生代花岗岩为高钾钙碱性系列 I 型花岗岩,来源于火成岩的部分熔融。本区花岗岩与辉长岩的 Hf 同位素特征的差别(图 8)说明,酸性端元的花岗质岩浆不可能是同期基性岩浆分异演化的产物,应起源于基性下地壳的部分重熔。

塔河岩体中花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 $-0.8 \sim +5.6$ (图 10)。虽然基性岩浆混合的影响会使花岗岩的 Hf 同位素组成降低,但塔河花岗岩与额尔古纳地块东部起源于新生地壳的早古生代花岗岩-白银纳岩体($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 $-0.5 \sim +5.1$)、哈

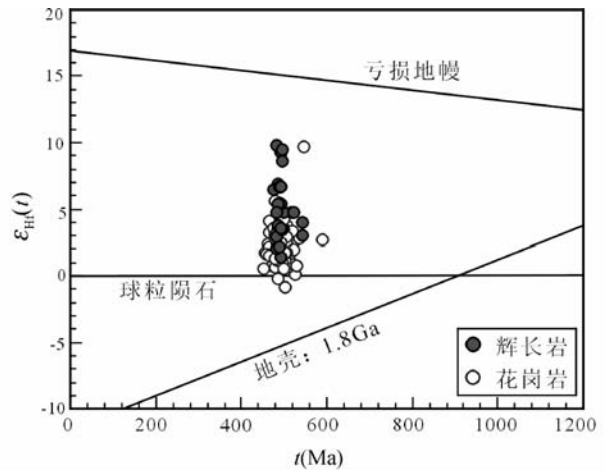


图10 Hf 同位素演化图解

Fig. 10 Evolution graph of Hf isotope

拉巴奇岩体($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 $+1.4 \sim +6.4$)、十八站岩体($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 $-1.4 \sim +5.6$)、查拉班河岩体($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 $-0.5 \sim +3.7$)具有相似的 Hf 同位素组成(葛文春等,2007a),暗示塔河花岗岩受基性岩浆影响的程度较小,基本保持了源区的同位素特征。塔河花岗岩的两阶段模式年龄(t_{DM2})为 0.9 ~ 1.5Ga,因此认为塔河花岗岩的源岩应该是中-新元古代增生的地壳物质,地幔源区可能具有亏损地幔的特征。结合已发表的额尔古纳地块古生代及中生代花岗岩的 Nd-Hf 同位素资料(葛文春等,2007a; 隋振民,2007; 张彦龙等,2008),我们认为中-新元古代是额尔古纳地块的地壳增生的重要时期。

塔河杂岩体中花岗岩和辉长岩的双峰式岩石组合及后造山的地球化学特征,说明该早古生代杂岩体形成于额尔古纳地块与兴安地块拼贴后的后造山构造背景(葛文春等,2005a)。这次强烈的伸展拉张作用引起亏损地幔的部分熔融,形成的玄武质岩浆与下地壳物质发生部分熔融而形成大规模的花岗质岩浆混合。这种壳-幔岩浆混合作用,导致在

塔河地区形成如此类型多样,成分变化大的岩浆杂岩体。

6 结论

(1)塔河花岗杂岩体岩石组合以正长花岗岩-二长花岗岩为主,含少量的碱长花岗岩及角闪辉长岩,岩石成因类型为I型后造山侵入体。岩石学及地球化学特征显示,塔河杂岩体具有典型的岩浆混合特征。

(2)地球化学及锆石 Hf 同位素特征表明,参与混合的两个端元岩浆具有不同的岩浆源区,基性岩浆直接起源于亏损地幔,酸性岩浆由新生下地壳物质的部分熔融而成。壳-幔岩浆的熔融及混合作用受控于额尔古纳地块和兴安地块拼合后的伸展拉张作用。

(3)花岗岩的锆石 Hf 同位素成分显示本区早古生代花岗岩的源岩应该是中-新元古代增生的地壳物质,地幔源区具有亏损地幔的性质。结合已有的 Hf 同位素数据,我们认为中-新元古代时期额尔古纳地块发生过一次重要的地壳增生事件。

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所毛骞和王玉光在锆石 CL 图像采集、谢烈文和杨岳衡在锆石 Hf 同位素分析及中国科学院广州地球化学研究所刘颖和涂湘林在主、微量元素分析过程中给予的帮助。感谢杨进辉研究员和隋振民副教授对文章初稿和两位匿名审稿人提出的建设性修改意见。

References

Allen CM. 1991. Local equilibrium of mafic enclaves and granitoids of the Turtle pluton, southeast California: Chemical and isotopic evidence. *American Mineralogist*, 76: 574 – 588

Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 243 – 258

Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang. 1993. *Regional Geology of Heilongjiang Province*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)

Chappell BW, White AJR and Wyborn D. 1987. The importance of residual source material (restite) in granite petrogenesis. *Journal of Petrology*, 28: 1111 – 1138

Chappell BW and White AJR. 1992. I- and S- type granites in the Lachlan Fold Belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 1 – 26

Chen YD, Price RC, White AJR *et al.* 1989. Inclusions in three S-type granites from southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 30: 1181 – 1218

Collins WJ. 1998. Evaluation of petrogenetic models for Lachlan Fold Belt granitoids: Implications for crustal architecture and tectonic models. *Australian Journal of Earth Sciences*, 45: 483 – 500

Didier J and Barbarin B. 1991. Enclaves and Granite Petrology, *Developments in Petrology*. Amsterdam: Elsevier, 1 – 625

Ge WC, Wu FY, Zhou CY *et al.* 2005a. Emplacement age of the Tahe granite and its constraints on the tectonic nature of the Ergun black in the northern part of the Da Hinggan Mts. *Chinese Science Bulletin*, 50(18): 2097 – 2105

Ge WC, Wu FY, Zhou CY *et al.* 2005b. Zircon U-Pb ages and its significance of the Mesozoic granites in the Wlanhaote region, central Da Hinggan Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 749 – 762 (in Chinese with English abstract)

Ge WC, Sui ZM, Wu FY *et al.* 2007a. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic characteristics and their implications of the Early Paleozoic granites in the northeastern Da Hinggan Mts, northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 423 – 440 (in Chinese with English abstract)

Ge WC, Wu FY, Zhou CY *et al.* 2007b. Porphyry Cu-Mo deposits in the eastern Xing'an-Mongolian Orogenic Belt: Mineralization ages and their geodynamic implications. *Chinese Science Bulletin*, 52(24): 3416 – 3427

Griffin WL, Wang X, Jackson SE *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pangtan igneous complexes. *Lithos*, 61: 237 – 269

Holden P, Halliday AN and Stephaes WE. 1987. Neodymium and strontium isotope content of microdiorite enclaves to mantle input to granitoid production. *Nature*, 330: 53 – 56

Hu FF, Fan HR, Yang JH *et al.* 2005. Magma mixing for the origin of granodiorite: Geochemical, Sr-Nd isotopic and zircon Hf isotopic evidence of dioritic enclaves and host rocks from Changshannan granodiorite in the Jiaodong peninsula, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 569 – 586 (in Chinese with English abstract)

Leshner CE. 1990. Decoupling of chemical and isotopic exchange during magma mixing. *Nature*, 344: 235 – 237

Li XH. 1997. Geochemistry of the Longsheng ophiolite from the southern margin of Yangtze Craton, SE China. *Geochemical Journal*, 31: 323 – 337

Li XH, Qi CS, Liu Y *et al.* 2005. Petrogenesis of the Neoproterozoic bimodal volcanic rocks along the western margin of the Yangtze Block: New constraints from Hf isotopes and Fe/Mn ratios. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2481 – 2486

Li XH, Li ZX, Li WX *et al.* 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constrains on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96: 186 – 204

Liu DY, Jian P, Zhang Q *et al.* 2003. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic subduction. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 317 – 327 (in Chinese with English abstract)

Qin KZ, Li HM, Li WS *et al.* 1999. Intrusion and mineralization ages of the Wunvetushan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia, Nnorthernwestern China. *Geological Review*, 45(2): 181 – 185 (in Chinese with English abstract)

Sui ZM. 2007. Zircon U-Pb age, petrogenesis and crustal evolution of the granites in northeastern part of the Great Xing'an Rang. Ph. D. Dissertation. Changchun: College of Earth Science, Jilin University (in Chinese with English summary)

Sui ZM, Ge WC, Wu FY *et al.* 2007. Zircon U-Pb ages, geochemistry and its petrogenesis of Jurassic granites in northeastern part of the Da Hinggan Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 461 – 480 (in Chinese with English abstract)

Sun DY, Wu FY, Li HM and Lin Q. 2000. Emplacement age of the postorogenic A-type granites in northwestern Lesser Xing'an Ranges, and its relationship to the eastward extension of Suolunshan-Hegenshan-Zhalaiite collisional suture zone. *Chinese Science Bulletin*, 45(20): 2217 – 2222 (in Chinese)

Sun DY, Wu FY, Lin Q and Lu XP. 2001. Petrogenesis and crust-mantle interaction of Early Yanshanian Baishishan pluton in Zhangguangcai Range. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 227 – 235 (in Chinese with English abstract)

Sun DY, Wu FY, Zhang YB and Gao S. 2004. The final closing time of the west Lamulun River-Changchun-Yanji Plate suture zone: Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(2): 174 – 181 (in

Chinese with English abstract)

- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts; Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 42: 313–345
- Veevers JJ, Saeed A, Belousova FA *et al.* 2005. U-Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and denudational history of the Yilgarn craton. *Earth-Science Reviews*, 68: 245–279
- Vernon RH. 1984. Microgranitic enclaves in granites-globules of hybrid magma quenched in a plutonic environment. *Nature*, 30: 438–439
- Wang T. 2000. Origin of hybrid granitoids and the implications for continental dynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 1(2): 161–168 (in Chinese with English abstract)
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. London: Allen and Unwin
- Wu FY, John BM, Wilde SA *et al.* 2000. Phanerozoic continental crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328: 89–113
- Wu FY, Sun DY, Li HM *et al.* 2002. A-type granites in northeastern China; Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187: 143–173
- Wu FY, Jahn BM, Wilde SA *et al.* 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (1): Geochronology and Petrogenesis. *Lithos*, 66: 241–273
- Wu FY, Yang YH, Xie LW *et al.* 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234: 105–126
- Wu G, Sun FY, Zhao CS *et al.* 2005. Discovery of the Early Paleozoic post-collisional granites in northern margin of the Erguna massif and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2733–2743
- Yang JH, Wu FY, Chung SL *et al.* 2004. Multiple sources for the origin of granites: Geochemical and Nd-Sr isotopic evidence from the Gudaolin granite and its mafic enclaves, northeast China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 4469–4483
- Yang JH, Wu FY, Chung SL *et al.* 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, Northeast China; Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence. *Lithos*, 89: 89–106
- Yang JH, Wu FY, Wilde SA *et al.* 2007. Tracing magma mixing in granite genesis: In situ U-Pb dating and Hf-isotope analyses of zircons. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 153: 177–190
- Zhang YL, Ge WC, Liu XM *et al.* 2008. Isotopic characteristics and its significance of the Xinlin town pluton, Great Hinggan Mountains. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(2): 177–186 (in Chinese with English abstract)
- Zhou CY, Wu FY, Ge WC *et al.* 2005. Age, geochemistry and petrogenesis of the cumulate gabbro in Tahe, northern Da Hinggan Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 763–775 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XR. 1994. Hybridization in the genesis of granitoids. *Earth Science Frontiers*, 1(1–2): 97 (in Chinese)

附中文参考文献

- 葛文春, 吴福元, 周长勇等. 2005a. 大兴安岭北部塔河花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造属性的制约. *科学通报*, 50(12): 1239

– 1246

- 葛文春, 吴福元, 周长勇等. 2005b. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *岩石学报*, 21(3): 749–760
- 葛文春, 隋振民, 吴福元等. 2007a. 大兴安岭东北部早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义. *岩石学报*, 23(2): 423–440
- 葛文春, 吴福元, 周长勇等. 2007b. 兴安造山带东段斑岩型 Cu、Mo 矿床成矿时代及其地球动力学意义. *科学通报*, 52(20): 2407–2417
- 黑龙江地质矿产局. 1993. 黑龙江区域地质志. 北京: 地质出版社, 734
- 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉等. 2005. 胶东文登长山南花岗杂岩体的岩浆混合成因: 闪长质包体及寄主岩石的地球化学 Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素证据. *岩石学报*, 21(3): 569–586
- 刘敦一, 简平, 张旗等. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据. *地质学报*, 77(3): 317–327
- 秦克章, 李惠民, 孙伟实等. 1999. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿的成岩、成矿时代. *地质论评*, 45(2): 181–185
- 隋振民. 2007. 大兴安岭东北部花岗岩类锆石 U-Pb 年龄、岩石成因及地壳演化. 博士学位论文. 长春: 吉林大学地球科学学院
- 隋振民, 葛文春, 吴福元等. 2007. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗质岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因. *岩石学报*, 23(2): 461–480
- 孙德有, 吴福元, 李惠民等. 2000. 小兴安岭西北部后造山 A 型花岗岩的时代及与索伦山-贺根山-扎赉特碰撞带拼合带东延的关系. *科学通报*, 45(20): 2217–2222
- 孙德有, 吴福元, 林强等. 2001. 张广才岭燕山早期白石山岩体的成因与壳幔相互作用. *岩石学报*, 17: 213–218
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌等. 2004. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据. *吉林大学学报(地球科学版)*, 34(2): 175–183
- 王涛. 2000. 花岗岩混合成因研究及大陆动力学意义. *岩石学报*, 16(2): 161–168
- 武广, 孙丰月, 赵财胜等. 2005. 额尔古纳地块北缘早古生代后碰撞花岗岩的发现及其地质意义. *科学通报*, 50(20): 2278–2288
- 张彦龙, 葛文春, 柳小明等. 2008. 大兴安岭新林镇岩体的同位素特征及其地质意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 38(2): 177–186
- 周长勇, 吴福元, 葛文春等. 2005. 大兴安岭北部塔河辉长岩体的形成时代、地球化学特征及成因. *岩石学报*, 21(3): 763–775
- 周珣若. 1994. 花岗岩混合作用. *地学前缘*, 1(1–2): 97