

胶东文登长山南花岗闪长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*

胡芳芳 范宏瑞** 杨进辉 翟明国 金成伟 谢烈文 杨岳衡

HU FangFang, FAN HongRui, Yang JinHui, ZHAI MingGuo, JIN ChengWei, XIE LieWen and YANG YueHeng

中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室和矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

State Key Laboratory of Lithospheric Evolution and Key Laboratory of Mineral Resources,

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

2005-01-21 收稿, 2005-03-01 改回.

Hu FF, Fan HR, Yang JH, Zhai MG, Jin CW, Xie LW and Yang YH. 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

Abstract A large number of directional microgranular dioritic enclaves occur in Changshannan granodiorite from Kunyushan granitoids in the Jiaodong Peninsula, eastern China. Microgranular dioritic enclaves, commonly showing ellipsoidal and spindled shapes, display igneous textures and range from meter- to centimeter-sized fragments. The enclaves are darker-colored and finer-grained than their hosting granodiorite, and exhibit a very similar mineralogy to those of their granitic hosts. The enclaves have higher contents of ferro-magnesian phases and plagioclase, and lower contents of quartz and K-feldspar than those found in the hosting granodiorite. The chemical composition of biotite and hornblende within the dioritic enclaves is mostly similar to those of the same phases found in the host granodiorite, but the mineralogy display obvious disequilibrium structure. Acicular apatite is common in the enclaves. Those observations suggest that the enclaves are derived from a hybrid-magma formed as a result the intrusion of a mafic magma into the base of a felsic magma chamber. Geochemical data show dioritic enclaves and hosting granodiorite are enriched in LILEs and LREEs and depleted in HFSEs. Enclaves and hosting granodiorite, similar in Sr- and Nd- isotopic compositions, have low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios (0.70784 ~ 0.70818) and negative $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (- 15.0 ~ - 15.5), and display a trend characterized by a linear correlation between major elements. Petrological and zircon Hf isotopic features indicate the occurrence of magma mixing between mafic magma and felsic magma in the original processes of Changshannan granodiorite. During the magma mixing, the Sr and Nd isotope and later crystallized minerals can much quickly homogenize, but major element and Hf isotope of high temperature mineral such as zircon have preserved some information of the primary magmas. The results indicate that although magma mixing has produced similar Sr and Nd isotopic compositions in the enclaves and the hosting granodiorite, the zircon Hf isotope has not easily reached equilibrium and has more effectively traced the hybrid-magma sources and the magma mixing processes.

Key words Microdioritic enclave, Granodiorite, Geochemistry, Zircon Hf-isotope, Magma mixing, Changshannan, Jiaodong Peninsula

摘 要 胶东昆崙山杂岩文登长山南花岗闪长岩体中广泛分布具有火成结构的闪长质包体, 这些包体主要为椭圆形或纺锤形, 定向排列, 大小不等 (几 cm 至几 m), 颜色较寄主岩深, 粒度较细。包体具有与寄主岩石相似的矿物组合, 但铁镁质矿物及斜长石含量明显比寄主岩石高, 而石英和钾长石含量低于寄主岩石; 镜下包体具有明显的不平衡反应结构, 广泛发育针状磷灰石。在地球化学特征上, 包体和寄主岩石都富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损高场强元素, 并具有相近的 Sr、Nd 同

* 本文受国家自然科学基金项目(40273024, 40203005)和国家重点基础研究发展规划项目(G1999075502)资助。

第一作者简介: 胡芳芳, 女, 1975 年生, 博士研究生, 岩石学和地球化学专业, E-mail huff@mail. igcas. ac. cn

** 通讯联系人: 范宏瑞, 男, 1963 年生, 研究员, 岩石学和地球化学专业, E-mail fanhr@mail. igcas. ac. cn

位素组成 I_{Sr} 为 0.70784 ~ 0.70818, ϵ_{Nd} 为 -15.0 ~ -15.5。然而,包体和寄主岩石的主量元素在相关图上呈明显的线性关系,并且岩石学和锆石 Hf 同位素特征也明显表明文登长山南岩体在成岩过程中发生了镁铁质岩浆和长英质岩浆的混合作用。在岩浆混合作用过程中,全岩 Sr、Nd 同位素和晚期生成的矿物组成比较快速地达到了均一化,而主量元素和高温矿物锆石 Hf 同位素组成则残留了原始岩浆的部分特征。研究表明,锆石 Hf 同位素在岩浆混合作用过程中不容易达到同位素平衡,其同位素组成比全岩 Sr、Nd 同位素更能有效地示踪混合岩浆的源区特征和岩浆混合过程。

关键词 闪长质包体;花岗闪长岩;地球化学;锆石 Hf 同位素;岩浆混合;长山南;胶东

中图法分类号 P588.121

中-细粒闪长质包体常出现在各类花岗岩中,尤其是 I 和 S 型钙碱性花岗岩(Vernon, 1983; Cantagrel *et al.*, 1984; Frost and Mahood, 1987; Kumar, 1988; Poli and Tommasini, 1991; Didier and Barbarin, 1991; Yang *et al.*, 2004; Bonin, 2004), 对它及其寄主岩石的研究不仅可以探讨花岗岩的成因机制,而且可以获得岩浆演化过程等方面的信息。对闪长质包体成因机理,以及它与寄主岩石间的关系却一直存在着较大的争议,概况起来主要有以下几点:(1) 岩浆早期分离结晶形成的堆晶体(Didier and Barbarin, 1991);(2) 岩浆上升和侵位过程中捕获的围岩捕虏体(Eberz *et al.*, 1990; Mass *et al.*, 1997);(3) 源岩熔融残余体(restite, Chappell *et al.*, 1987; Chen *et al.*, 1989; Chappell and White, 1992);(4) 与长英质岩浆混合的镁铁质岩浆残留物(Vernon, 1984; Bacon, 1986; Holden *et al.*, 1987; Collins, 1998; Yang *et al.*, 2004)。其中,主要的成因争论在后两种观点,主要原因在于花岗岩是否由两类不同性质岩浆物理/化学混合(magma mingling/mixing)形成。由于这一混合过程涉及到了幔源的基性组分和壳源的酸性组分,可提供壳-幔相互作用的重要信息,因而近年来这方面的研究工作一直受到人们的关注。

位于山东半岛东段牟平断裂和米山断裂之间的昆崙山地区(图 1),是胶东三大金矿成矿密集区(招远-莱州-平度、蓬莱-栖霞和牟平-乳山)之一。米山断裂以东为苏鲁超高压变质带的北段,牟平断裂以西为华北克拉通,处在这两个断裂之间的昆崙山地区则是两大不同块体的衔接过渡地带,其中的昆崙山岩体是非常特殊的杂岩体,在其西侧分布着以邓格庄(牟平)和金青顶(乳山)为代表的一系列大、中、小型脉状金矿床,而在岩体(即米山断裂)以东的广大地区则只有零星的小型金矿点产出。目前的研究认为(翟明国等, 2004), 本区大量的壳熔花岗岩和壳幔混合花岗岩是由中生代岩石圈减薄引起的强烈壳-幔相互作用的结果,并伴随或引发了在 120Ma ± 10Ma 的金爆发式大规模成矿(Yang and Zhou, 2001; Qiu *et al.*, 2002; Fan *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2003; Hu *et al.*, 2004)。

昆崙山杂岩体东南部的文登长山南花岗闪长岩体内发育有大量闪长质包体,这为研究该区中生代花岗岩的演化及其壳-幔相互作用提供了可能。本文拟通过对文登长山南闪长质包体及其寄主岩石花岗闪长岩的矿物学、全岩主量元素、微量元素、Sr-Nd 同位素以及锆石 Hf 同位素研究,探讨其源区特征及成因。

1 区域地质概况

中生代昆崙山杂岩体位于胶北地块的东部,呈南北向展布,长约 50km,宽约 20km。岩体与古元古代荆山群变质岩系(锆石 U-Pb 年龄为 2484 ± 21Ma,徐洪林等, 1997)呈侵入接触关系,在接触带局部可见岩体呈岩枝(脉)状穿切围岩,界限分明,岩体内也多处存在片麻岩、大理岩等围岩捕虏体,并有接触热变质现象,岩体东南部被较晚形成的中生代三佛山岩体侵入。前人对该复式岩体期次的划分有多种观点,徐金方(1989)等将岩体分为敦北山、红石头、晒字、垛崮顶等不同期次侵入体;山东省地质矿产局(1991)编纂的区域地质志则划分为片麻状黑云母花岗岩和中粒花岗岩两个岩相带;山东地质三队在对岩基中北部进行 1/5 万区调填图时,划分出玉林店、敦北山、五爪山、瓦善等不同期次的岩体,将岩体北部原划归元古宙的条带状片麻岩改定为玉林店和敦北山花岗岩;徐洪林等(1997)将岩体按岩性和测得的同位素年龄由老到新简化为三期,依次为,早期包括垛崮顶片麻状花岗闪长岩和八门邹家片麻状巨斑状花岗闪长岩两个岩体,中期为瓦善—水道弱片麻状二长花岗岩,晚期为五爪山片麻状含榴二长花岗岩。

根据山东省地质矿产局 1/5 万地质填图和锆石 U-Pb 年代学资料(郭敬辉等, 2001),昆崙山杂岩体由至少 5 期不同类型的花岗岩类侵入体构成,形成时代从 160Ma 至 100Ma,延续了大约 60Ma。在岩体中部和南部大面积出露的弱片麻状二长花岗岩及岩体北缘和西缘出露的弱片麻状含石榴石淡色花岗岩具有强过铝的特点,形成时代分别为 160 ~ 140Ma 和 140 ~ 130Ma;岩体中北部小面积分布的二长花岗岩属橄榄粗玄岩系列,形成时代在 121Ma 左右;分布在昆崙山主峰泰礴顶及岩体中南部、中东部的似斑状二长花岗岩属高钾钙碱系列,形成时代在 114 ~ 100Ma 之间。本次研究的文登长山南含闪长质包体的花岗闪长岩体(图 1)位于昆崙山岩体的东南侧,锆石 U-Pb 法测定其年龄为 114Ma(郭敬辉等, 2001),岩体内穿插有晚期基性岩脉。

2 岩石学特征

文登长山南花岗闪长岩为似斑状结构,灰白色,主要矿物由斜长石(35 ~ 40%)、钾长石、石英及少量角闪石、黑云母

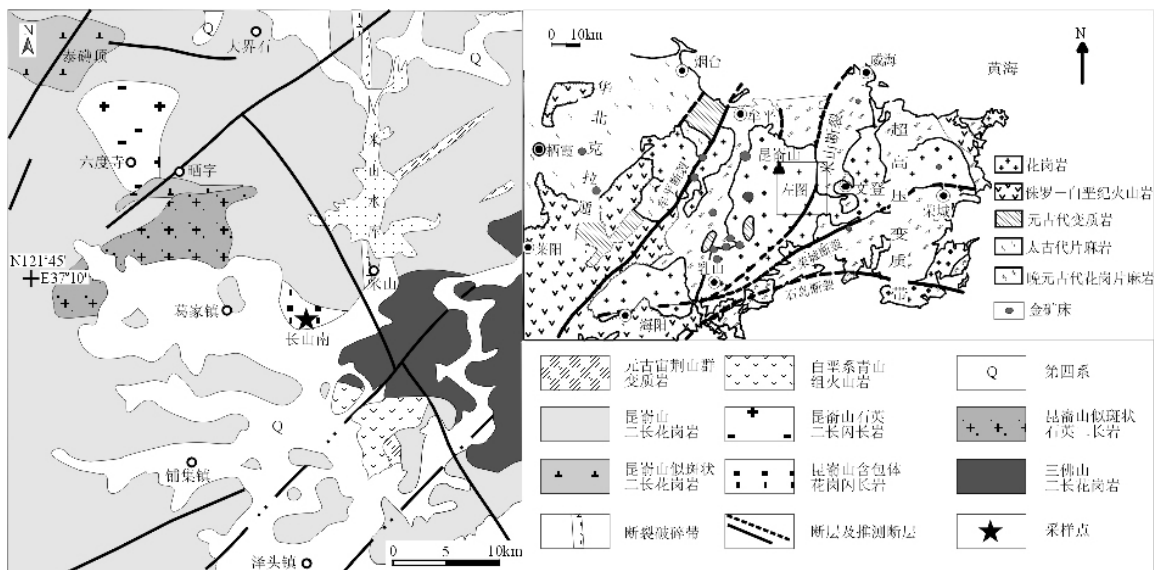


图1 胶东文登长山南地区地质简图

Fig.1 Location and geological setting of the Changshannan area in the Jiaodong Peninsula

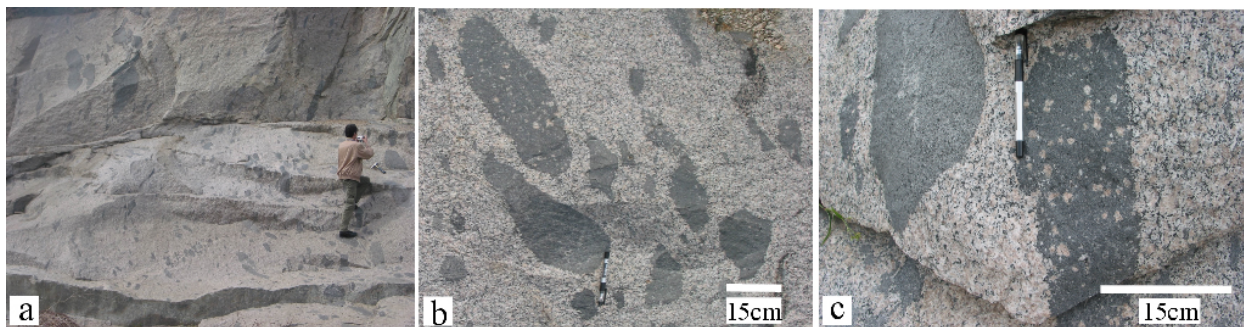


图2 文登长山南花岗闪长岩中闪长质包体的野外照片

a. 花岗闪长岩内略呈定向分布的闪长质包体(全貌); b. 呈椭圆形或纺锤形的闪长质包体,与寄主岩石为突变关系(近照); c. 含钾长石斑晶的包体和不含钾长石斑晶的包体

Fig.2 Field photographs of Changshannan microgranular dioritic enclaves occurring within granodiorites

组成,副矿物主要为磷灰石、磁铁矿、榍石、锆石等。以含大的斜长石和钾长石斑晶的似斑状结构为特征,斑晶大小为 $0.5 \times 0.5 \text{cm}^2 \sim 1.0 \times 1.0 \text{cm}^2$,其中斜长石和钾长石多呈自形板状晶体。

花岗闪长岩中的闪长质包体大小不一(图2a),长径一般在十~数十厘米,有些长径达数米。包体颜色较寄主岩深,粒度细,与寄主岩呈突变关系,无冷凝边和烘烤边(图2b)。包体在岩体中分布不均匀,约占岩体总面积的10%~20%,多为椭圆形或纺锤形,定向性好,有的包体沿岩浆流动方向被拉长,部分包体中包含有与寄主岩相似的钾长石斑晶(图2c)。闪长质包体比寄主岩更富基性矿物,主要矿物为斜长石(40~50%),角闪石、黑云母,以及少量的石英和钾长石,局部可见辉石,但多被熔蚀或被角闪石次生加大。显微镜下岩石以半自形粒状结构为主,局部可见蠕虫结构,

角闪石、黑云母和斜长石自形程度较高,呈半自形柱状或板条状;斜长石无环带,有的薄片可观察到板状角闪石晶体中包裹有小的、叶状黑云母晶体(图3);石英和钾长石呈他形粒状填隙分布。闪长质包体中副矿物种类与寄主岩相同,其中磷灰石含量较寄主岩高,呈针状。

3 分析方法

野外采集了新鲜的寄主岩花岗闪长岩(03R066、03R067、03R069、03R070、03R074-1和03R075-1)、含钾长石斑晶的闪长质包体(03R077)、不含钾长石斑晶的闪长质包体(03R071、03R072、03R073、03R074、03R074-2、03R075、03R075-2、03R076、03R078)样品共16件。将岩石磨制成光

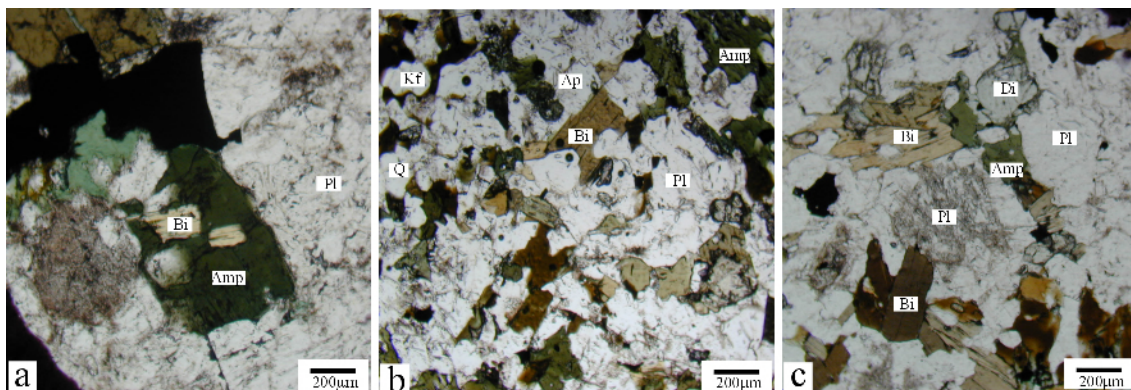


图3 文登长山南花岗闪长岩及闪长质包体显微照片(单偏光)

a. 花岗闪长岩中板状角闪石晶体中包裹有小的、叶状黑云母晶体; b. 闪长质包体中呈他形粒状的石英和钾长石充填在半自形的角闪石和黑云母中, 针状磷灰石广泛分布; c. 闪长质包体中半自形的角闪石和黑云母, 可见被熔蚀和被角闪石次生加大的辉石颗粒。Amp-角闪石; Bi-黑云母; Pl-斜长石; Kf-钾长石; Q-石英; Ap-磷灰石; Di-透辉石

Fig. 3 Microphotographs of Changshannan microgranular dioritic enclaves and granodiorites

表1 文登长山南闪长质包体及其寄主岩花岗闪长岩中斜长石电子探针分析结果(%)

Table 1 Microprobe analysis compositions of plagioclase from Changshannan microgranular dioritic enclaves and hosting granodiorites (%)

岩石 描述 样品号	花岗闪长岩				闪长质包体						
	核部		边部		从核到边线扫描				核部		边部
	03R066 -c4-2	03R066 -c4-4	03R074- 1-c1-6	03R074- 1-c1-8	03R071- c1-5-L1	03R071 -c1-5-L2	03R071- c1-5-L6	03R071- c1-5-L7	03R074- 2-c4-9	03R074- 2-c4-10	
SiO ₂	62.17	62.04	62.46	62.62	62.09	62.29	61.27	60.87	62.09	62.28	
TiO ₂	0.09	0.12	0.09	0.04	0.02	0.06	0.03	0.07	0.02	0.00	
Al ₂ O ₃	23.45	23.67	23.91	23.47	24.29	23.90	24.59	24.92	24.01	23.97	
FeO	0.17	0.14	0.19	0.12	0.14	0.15	0.17	0.16	0.26	0.23	
MnO	0.00	0.00	0.08	0.04	0.02	-	0.00	0.01	0.00	0.00	
MgO	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	
CaO	4.67	4.87	4.91	4.53	5.26	4.99	5.72	5.99	5.03	4.90	
Na ₂ O	8.91	8.90	8.63	8.96	8.02	8.25	8.23	8.15	7.77	8.47	
K ₂ O	0.48	0.49	0.43	0.49	0.35	0.37	0.25	0.30	0.25	0.39	
Total	99.94	100.25	100.70	100.27	100.21	100.02	100.27	100.49	99.43	100.26	
Si	2.76	2.75	2.75	2.77	2.75	2.76	2.72	2.70	2.76	2.76	
Al	1.23	1.24	1.24	1.22	1.27	1.25	1.28	1.30	1.26	1.25	
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fe ²⁺	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ca	0.22	0.23	0.23	0.22	0.25	0.24	0.27	0.28	0.24	0.23	
Na	0.77	0.77	0.74	0.77	0.69	0.71	0.71	0.70	0.67	0.73	
K	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	
Σcations	5.02	5.02	5.00	5.01	4.98	4.98	5.00	5.01	4.95	4.99	
Ab	75.5	74.8	74.2	76.1	71.9	73.3	71.2	69.9	72.6	74.1	
An	21.8	22.6	23.4	21.3	26	24.5	27.4	28.4	25.9	23.6	
Or	2.7	2.6	2.4	2.7	2.1	2.2	1.4	1.7	1.5	2.2	

注 阳离子系数以8个氧原子计算,全铁以FeO计算

薄片进行电子探针分析;化学分析先将样品手工粗碎后进行缩分,在玛瑙研钵内磨至200目后,然后进行主量元素、微量元素及Sr、Nd同位素分析;闪长质包体及寄主岩石内的锆石按常规方法分选,并在双目镜下挑纯,以进行Hf同位素分析。所有分析均在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化国家重点实验室和矿产资源研究重点实验室室内完成。

3.1 电子探针分析

电子探针分析在Cameca SX51型电子探针仪上完成,加

速电压为15kV,加速电流20nA,束斑直径3 μ m,测得数据利用Minpet矿物学计算机程序进行处理。

3.2 主量和微量元素分析

将样品熔制成玻璃饼用XRF光谱测定主元素,分析精度优于1%。称取40mg样品于Teflon罐中,加入HNO₃和HF充分溶解后,用1%的HNO₃稀释后,在双聚焦电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)上测定微量元素,分析精度优于5%~8%。

表2 文登长山南闪长质包体及其寄主岩花岗闪长岩中角闪石电子探针分析结果(%)

Table 2 Microprobe analysis compositions of amphibole from Changshannan microgranular dioritic enclaves and hosting granodiorites (%)

岩石	花岗闪长岩						闪长质包体			
	边部	核部	核部	核部	边部	边部	核部	核部	边部	边部
样品号	03R066- c3-07	03R066- c3-13	03R074- 1-c1-1	03R074- 1-c1-2	03R074- 1-c1-3	03R074- 1-c1-4	03R074- 2-c4-1	03R074- 2-c4-2	03R074- 2-c4-3	03R074- 2-c4-4
SiO ₂	45.21	46.66	45.94	45.97	46.15	45.77	45.77	45.78	45.74	46.32
TiO ₂	1.26	1.21	1.60	1.47	1.50	1.30	1.43	1.35	1.47	1.31
Al ₂ O ₃	7.44	6.68	7.49	7.34	7.53	7.90	7.80	7.87	7.73	7.49
FeO	16.51	15.84	15.35	15.36	15.27	15.24	15.73	16.28	15.97	15.93
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.01	0.03
MnO	0.83	0.85	0.67	0.72	0.74	0.69	0.75	0.69	0.69	0.71
MgO	11.52	12.34	12.50	12.48	12.45	12.60	11.91	11.85	11.86	11.96
CaO	11.65	11.71	11.34	11.37	11.35	11.60	11.52	11.39	11.49	11.50
Na ₂ O	1.47	1.45	1.53	1.68	1.55	1.35	1.59	1.44	1.60	1.44
K ₂ O	0.97	0.89	0.86	0.94	0.94	0.93	0.86	0.89	0.86	0.85
Total	96.84	97.63	97.26	97.32	97.47	97.37	97.40	97.54	97.42	97.54
TSi	6.79	6.91	6.79	6.81	6.81	6.75	6.79	6.77	6.79	6.85
TAl	1.21	1.09	1.21	1.19	1.19	1.25	1.21	1.23	1.21	1.15
CAI	0.10	0.07	0.09	0.09	0.12	0.12	0.16	0.14	0.14	0.16
CCr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CFe ³⁺	0.47	0.45	0.58	0.51	0.53	0.62	0.45	0.60	0.47	0.48
CTi	0.14	0.14	0.18	0.16	0.17	0.14	0.16	0.15	0.16	0.15
CMg	2.58	2.72	2.75	2.76	2.74	2.77	2.64	2.61	2.63	2.64
CFe ²⁺	1.61	1.51	1.32	1.39	1.36	1.26	1.51	1.41	1.52	1.49
CMn	0.11	0.11	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
BCa	1.87	1.86	1.79	1.80	1.79	1.83	1.83	1.81	1.83	1.82
BNa	0.13	0.14	0.21	0.20	0.21	0.17	0.17	0.20	0.17	0.18
ANa	0.30	0.28	0.23	0.29	0.24	0.22	0.29	0.22	0.29	0.24
AK	0.19	0.17	0.16	0.18	0.18	0.17	0.16	0.17	0.16	0.16
Σ cations	15.49	15.44	15.40	15.46	15.41	15.39	15.45	15.39	15.45	15.40
X _{Mg}	0.62	0.64	0.68	0.66	0.67	0.69	0.64	0.65	0.63	0.64

注:阳离子系数以23个氧原子计算, $X_{Mg} = Mg / (Mg + Fe^{2+})$

3.3 Sr、Nd 同位素分析

称取适量样品于 Teflon 罐, 加入 ^{84}Sr 、 ^{87}Rb 、 ^{150}Nd 和 ^{147}Sm 稀释剂再滴入 HClO_4 和 HF 充分溶解, 利用离子交换树脂分离后在 Finnigan MAT262 多通道质谱仪上测试, 具体化学分析实验流程见任胜利(1995), 质谱分析流程见 Qia(1998)。

Sr、Nd 同位素比值测定分别采用 $^{87}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 、 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行标准化, 整个分析流程实验本底为: Rb 、 $\text{Sr} < 100\text{pg}$, Sm 、 $\text{Nd} < 50\text{pg}$ 。实验中国际标样分析结果分别为: $\text{NBS-607 } ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 1.201262 \pm 21$; $\text{BCR-1 } ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512652 \pm 10$ 。

表 3 文登长山南闪长质包体中黑云母电子探针分析结果(%)

Table 3 Microprobe analysis compositions of biotite from Changshannan microgranular dioritic enclaves (%)

描述	从核到边线扫描				边部		核部
	03R071-c1-4-L1	03R071-c1-4-L4	03R071-c1-4-L5	03R071-c1-4-L8	03R074-2-c4-5	03R074-2-c4-6	
SiO_2	37.44	30.96	33.75	37.38	37.06	37.40	
TiO_2	3.85	9.40	1.26	3.60	4.14	4.19	
Al_2O_3	13.92	12.26	15.98	13.67	13.69	13.95	
Cr_2O_3	0.00	0.06	0.02	0.01	0.12	0.10	
FeO	18.07	13.84	19.69	18.10	18.17	18.48	
MnO	0.37	0.32	0.39	0.35	0.46	0.40	
MgO	12.79	9.96	16.24	12.53	11.91	11.79	
CaO	0.00	8.54	0.24	0.02	0.02	0.01	
Na_2O	0.07	0.06	0.04	0.08	0.16	0.16	
K_2O	9.60	1.48	2.18	9.42	9.37	9.42	
Total	96.11	86.87	89.80	95.13	95.09	95.89	
Si	5.64	5.06	5.29	5.69	5.66	5.66	
Al^{IV}	2.36	2.36	2.71	2.31	2.35	2.34	
Al^{VI}	0.11	0.00	0.24	0.14	0.12	0.14	
Ti	0.44	1.16	0.15	0.41	0.48	0.48	
Fe^{2+}	2.28	1.89	2.58	2.30	2.32	2.34	
Cr	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	
Mn	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	
Mg	2.87	2.43	3.80	2.84	2.71	2.66	
Ca	0.00	1.50	0.04	0.00	0.00	0.00	
Na	0.02	0.02	0.01	0.02	0.05	0.05	
K	1.85	0.31	0.44	1.83	1.82	1.82	
$\Sigma\text{cations}$	15.62	14.76	15.31	15.60	15.56	15.55	
X_{Mg}	0.56	0.56	0.6	0.55	0.54	0.53	

注: 阳离子系数以 22 个氧原子计算, $X_{\text{Mg}} = \text{Mg}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$

3.4 锆石原位 Hf 同位素分析

挑纯后的锆石样品置于环氧树脂内, 研磨至锆石露出一半, 抛光、清洗制成样品靶, 在阴极发光 (CL) 图像研究的基础上进行原位 Hf 同位素分析。测试在配有 193nm 激光取样系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪 (LA-MC-ICP-MS) 上进行, 分析时激光束直径为 $63\mu\text{m}$ 或 $31\mu\text{m}$, 激光

剥蚀时间为 26s, 所用的激光脉冲速率为 $8 \sim 10\text{Hz}$, 激光束脉冲能量为 100mJ, 测定时用锆石国际标样 91500 作外标。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值计算中, 采用 Blichert-Toft 和 Albaredo(1998) 所推荐的球粒陨石值, 亏损地幔模式年龄 (T_{DM}) 计算采用 Griffin 等 (2000) 的推荐值。仪器的运行条件、详细的分析流程参见 Xu 等 (2004)。

表4 文登长山南花岗闪长岩中黑云母电子探针分析结果(%)

Table 4 Microprobe analysis compositions of biotite from Changshannan granodiorites (%)

矿物 描述	黑云母独立晶体				被角闪石包裹的黑云母晶体							
	核部	边部	核部	边部	边部	边部	核部	核部	从核到边线扫描			
样品号	03R066- c3-04	03R066- c3-06	03R074- 1-c2-10	03R074- 1-c2-12	03R066- c3-16	03R066- c3-17	03R066- c3-18	03R066- c3-19	03R066- c1-1-L1	03R066- c1-1-L2	03R066- c1-1-L3	03R066- c1-1-L4
SiO ₂	37.36	37.31	37.51	37.50	38.07	37.48	37.03	37.20	37.65	37.64	37.47	38.93
TiO ₂	3.33	3.52	3.97	4.19	4.20	4.44	4.52	4.68	3.03	3.96	3.47	2.09
Al ₂ O ₃	13.94	14.08	13.95	14.05	13.79	13.56	13.35	13.41	14.00	13.88	13.79	14.59
Cr ₂ O ₃	0.01	0.05	0.02	0.05	0.00	0.00	0.02	0.02	0.04	0.01	0.03	0.00
FeO	17.11	17.16	18.94	18.42	17.17	17.60	17.17	17.46	17.75	17.83	17.88	16.11
MnO	0.41	0.51	0.51	0.49	0.52	0.48	0.56	0.52	0.58	0.67	0.52	0.50
MgO	13.10	12.53	12.13	11.96	12.79	12.85	12.58	12.40	13.03	12.85	12.66	12.35
CaO	0.05	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.01	0.82
Na ₂ O	0.16	0.12	0.06	0.07	0.12	0.09	0.15	0.11	0.07	0.09	0.14	0.08
K ₂ O	9.36	9.47	9.40	9.57	9.03	9.53	9.19	9.37	9.20	9.62	9.49	8.70
Total	94.81	94.79	96.49	96.30	95.71	96.03	94.56	95.18	95.36	96.57	95.46	94.17
Si	5.68	5.68	5.65	5.65	5.71	5.65	5.65	5.65	5.70	5.65	5.68	5.88
Al ^{IV}	2.32	2.32	2.35	2.35	2.29	2.35	2.35	2.35	2.30	2.35	2.32	2.12
Al ^{VI}	0.17	0.20	0.12	0.14	0.15	0.05	0.06	0.05	0.19	0.10	0.15	0.48
Ti	0.38	0.40	0.45	0.47	0.47	0.50	0.52	0.54	0.35	0.45	0.40	0.24
Fe ²⁺	2.18	2.18	2.39	2.32	2.16	2.22	2.19	2.22	2.25	2.24	2.27	2.04
Cr	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Mn	0.05	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.09	0.07	0.06
Mg	2.97	2.84	2.72	2.69	2.86	2.89	2.86	2.81	2.94	2.87	2.86	2.78
Ca	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.13
Na	0.05	0.04	0.02	0.02	0.04	0.03	0.05	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02
K	1.82	1.84	1.81	1.84	1.73	1.83	1.79	1.82	1.78	1.84	1.84	1.68
Σcations	15.62	15.59	15.57	15.55	15.48	15.58	15.54	15.53	15.60	15.61	15.62	15.43
X _{Mg}	0.58	0.57	0.53	0.54	0.57	0.57	0.57	0.56	0.57	0.56	0.56	0.58

注:阳离子系数以22个氧原子计算, $X_{Mg} = Mg / (Fe^{2+} + Mg)$

4 花岗闪长岩及闪长质包体地球化学特征

4.1 矿物组分

对闪长质包体和寄主岩花岗闪长岩中的斜长石、角闪石、黑云母和辉石进行了电子探针分析(表1至表3)。尽管全岩成分有所不同,但包体中斜长石、黑云母和角闪石的化学组分与寄主岩中的非常相似。斜长石均以奥长石为主,包体中斜长石的An含量(An=23.6~28.4)较寄主岩石(An=21.3~23.4)略偏高;角闪石都为镁角闪石,包体中角闪石

的 X_{Mg} [$X_{Mg} = Mg / (Mg + Fe^{2+})$]为0.63~0.65,全Al为1.31~1.37,寄主岩石中的 X_{Mg} 为0.62~0.69,全Al为1.16~1.37;黑云母均具有富镁贫铁特征,包体中黑云母的 X_{Mg} [$X_{Mg} = Mg / (Fe^{2+} + Mg)$]=0.53~0.57,Al^{IV}为2.31~2.36,寄主岩石中的 X_{Mg} =0.53~0.58,Al^{IV}为2.12~2.35。对花岗闪长岩中自形程度较好的黑云母晶体和被角闪石晶体包裹的黑云母晶体分别进行了电子探针分析,结果表明这两种黑云母的成分并没有显著差别(表4)。包体中的辉石为透辉石。

4.2 主量元素

花岗闪长岩的 SiO₂ 含量变化不大,为 60.24% ~ 61.99%,富钾,在 SiO₂ - K₂O 图上,落在橄榄粗玄岩系列, K₂O/Na₂O 为 0.98 ~ 1.23, K₂O + Na₂O 值为 8.77% ~ 9.89%。Al₂O₃ 为 16.48% ~ 17.72%。MgO 含量为 1.47% ~ 1.77%, 镁指数 (Mg[#]) [Mg[#] = 100 × Mg²⁺ / (Mg²⁺ + 0.9 × Fe_T)] 为 43 ~ 45。铝指数 (A/CNK) [Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O) 摩尔比] 为 0.98 ~ 1.03, 属于准铝质或过铝质花岗岩 (表 5 图 4)。

闪长质包体较寄主岩贫硅, SiO₂ 含量为 52.46% ~ 58.06%, 在 SiO₂-K₂O 图上,落在高钾钙碱系列和橄榄粗玄岩系列范围内, K₂O/Na₂O 为 0.38 ~ 1.05, K₂O + Na₂O 值为 7.17% ~ 9.81%, Al₂O₃ 为 17.45% ~ 19.22%, MgO 含量为 1.86% ~ 4.31%, Mg[#] 为 40.17 ~ 55.80。A/CNK 为 0.90 ~ 1.02 (表 5; 图 4)。与寄主岩石相比,闪长质包体富 CaO、MgO、FeO_T、TiO₂、MnO 和 P₂O₅, 说明包体中更富斜长石、碱性组分和磷灰石,这与显微镜下观察相一致。在 Harker 图解上 (图 5) 这些闪长质包体的 SiO₂ 与其余的氧化物之间具有良好的线性关系,随着 SiO₂ 含量增加, TiO₂、FeO_T、MgO、CaO、P₂O₅ 和 MnO 线性降低, K₂O 线性增加; 在 Al₂O₃/CaO - Na₂O/CaO、SiO₂/CaO - Na₂O/CaO、Al₂O₃/MgO - SiO₂/MgO、MgO/K₂O - CaO/K₂O 同分母氧化物比值相关图上 (图 6) 也构成良好的线性相关。

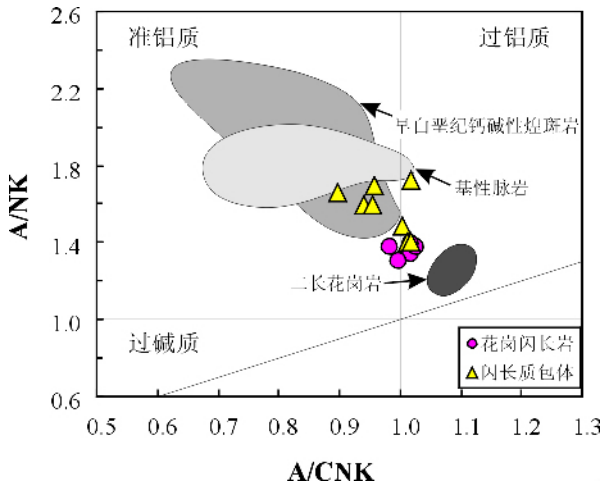


图 4 文登长山南闪长质包体及其寄主花岗闪长岩 A/NK-A/CNK 图

注: 基性脉岩、二长花岗岩引自胡芳芳等未刊数据; 早白垩纪钙碱性煌斑岩引自 Guo 等 (2004)

Fig. 4 Plot of A/NK versus A/CNK of Changshannan microgranular dioritic enclaves and hosting granodiorites compared with regional mafic dikes and monzogranites

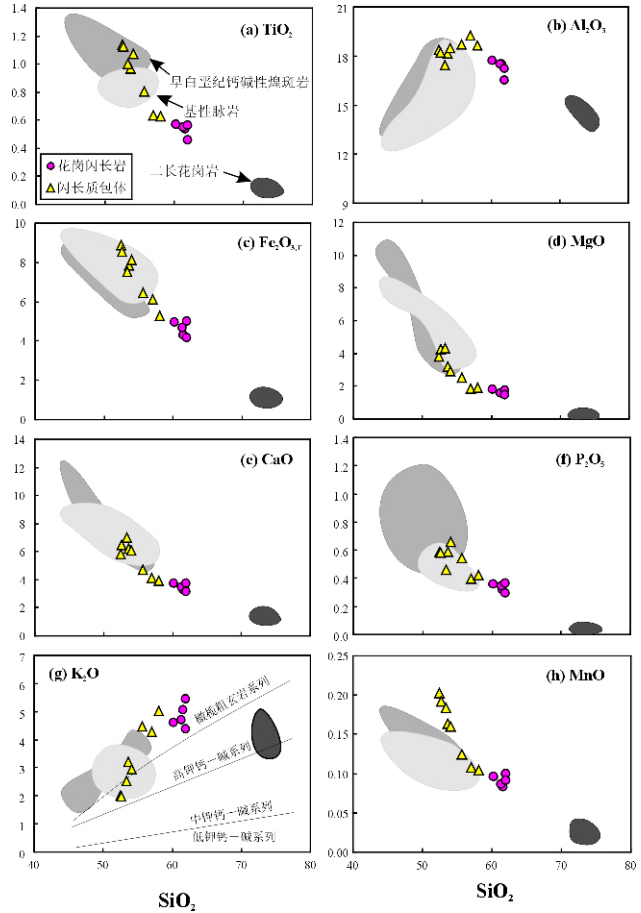


图 5 文登长山南闪长质包体及其寄主花岗闪长岩主量元素与 SiO₂ 协变图 (图例及资料来源同图 4)

Fig. 5 Diagrams of SiO₂ versus predominant oxides of Changshannan microgranular dioritic enclaves and host granodiorites compared with regional mafic dikes and monzogranites

4.3 微量及稀土元素

闪长质包体与寄主岩石具有相似的微量元素配分型式 (图 7), 在原始地幔标准化图解上都显示富集大离子亲石元素 (LILE, 如 Rb、Ba、Th、U) 及轻稀土元素 (LREE), 亏损高场强元素 (HSFE, 如 Nb、P、Ti) 的特征。

在稀土元素组成上, 闪长质包体与寄主岩石都富集轻稀土元素 (LREE)、重稀土 (HREE) 相对亏损, 但包体的稀土含量 (ΣREE = 933 ~ 1199) 比寄主岩 (ΣREE = 1004 ~ 1309) 略低。寄主岩石中 Y 为 17.70 ~ 20.79 μg/g, Yb 为 1.58 ~ 1.92 μg/g, 轻、重稀土分馏非常明显 [(La/Yb)_N = 34.1 ~ 39.3] 基本无铕异常 (δEu = 0.91 ~ 1.00); 而闪长质包体中 Y 为 19.01 ~ 25.33 μg/g, Yb 为 1.79 ~ 2.55 μg/g, (La/Yb)_N 为 17.6 ~ 35.0, δEu 值为 0.69 ~ 1.06, 绝大多数集中在 0.71 ~ 0.95 之间, 表现为轻微的铕负异常或略具正异

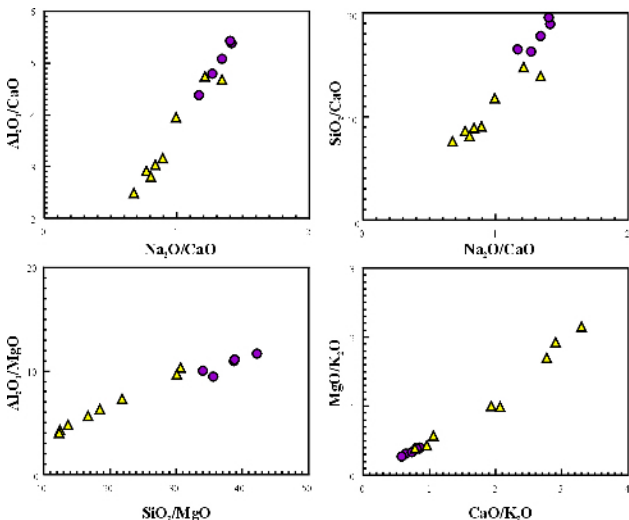


图6 文登长山南闪长质包体及其寄主岩花岗闪长岩同分母氧化物比值相关图

Fig. 6 Diagrams showing the predominant oxide ratios of Changshannan microgranular dioritic enclaves and hosting granodiorites

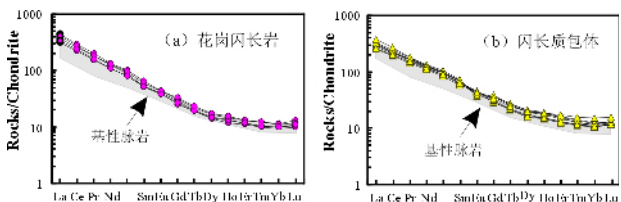


图7 文登长山南闪长质包体及其寄主岩花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化配分图

注:基性脉岩引自胡芳芳等未刊数据;球粒陨石标准化值引自 Taylor 和 McLennan(1985)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE distribution patterns of Changshannan microgranular dioritic enclaves and host granodiorites compared with regional mafic dikes

常(表5)。在稀土模式配分图上,寄主岩石具有更陡的稀土曲线配分模式,而包体相对较缓(图8),这可能是因为包体中角闪石和磷灰石含量更高或在基性岩浆和酸性岩浆中 REE 优先分离的缘故。

4.4 Sr、Nd 同位素

闪长质包体与其寄主岩石的 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素含量、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 及 T_{DM} 列于表6。初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (I_{Sr}) 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 以 114Ma 计算,亏损地幔模式年龄 (T_{DM}) 利用 De Paolo(1981)的模式计算。包体和寄主岩石具有相似的 Sr、Nd 同位素组成, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分别为 0.708591 ~ 0.708632

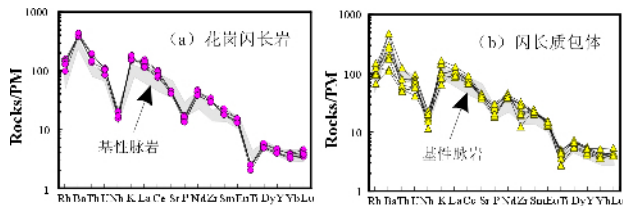


图8 文登长山南闪长质包体及其寄主岩花岗闪长岩微量元素地幔标准化蛛网图

注:基性脉岩引自胡芳芳等未刊数据;地幔标准化值引自 Sun 和 McDonough(1989)

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace element patterns of Changshannan microgranular dioritic enclaves and hosting granodiorites compared with regional mafic dikes

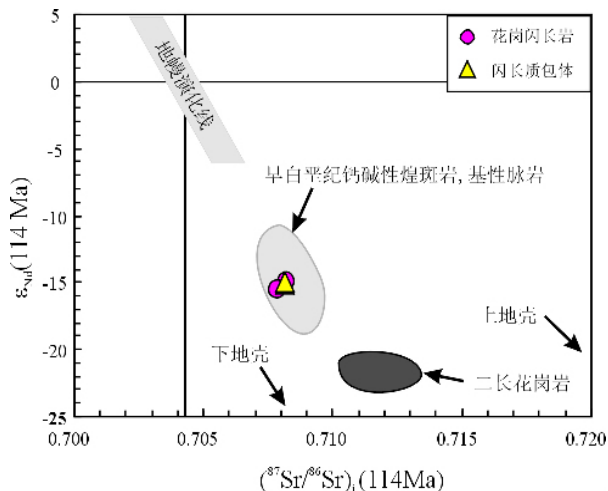


图9 文登长山南闪长质包体及其寄主岩花岗闪长岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图

注:基性脉岩、二长花岗岩引自胡芳芳等未刊数据;早白垩纪钙碱性煌斑岩引自 Guo 等(2004)

Fig. 9 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ versus $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ plot of Changshannan microgranular dioritic enclaves and hosting granodiorites

和 0.708290 ~ 0.708775, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值分别为 0.511786 ~ 0.511789 和 0.511755 ~ 0.511784, I_{Sr} 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为 0.70817 ~ 0.70818、-15.1 和 0.70787 ~ 0.70821、-15.1 ~ -15.6 表明两者可能来自均一的岩浆源区。在 $I_{\text{Sr}} - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图(图9)上,包体和寄主岩石的投影点都落在胶东地区早白垩纪钙碱性煌斑岩(Guo *et al.*, 2004)和基性脉岩(胡芳芳等,未刊数据)范围内,但完全不同于昆崙山杂岩体中形成时代为 160 ~ 130 Ma 的二长花岗岩 Sr-Nd 同位素特征(胡芳芳等,未刊数据)。

表5 文登长山南闪长质包体及其寄主花岗岩闪长岩主量元素(%)、微量元素($\mu\text{g/g}$)分析结果

Table 5 Major and trace element contents of Changshannan microgranular dioritic enclaves and hosting granodiorites

岩石类型	花岗岩长岩						闪长质包体						
	03R066	03R067	03R069	03R074-1	03R075-1	03R071	03R072	03R073	03R074-2	03R075-2	03R076	03R077	03R078
SiO ₂	61.56	61.38	61.99	60.24	61.99	53.65	55.69	52.46	52.64	57.02	54.07	58.06	53.32
TiO ₂	0.54	0.55	0.56	0.57	0.46	0.97	0.81	1.14	1.12	0.63	1.08	0.63	1.00
Al ₂ O ₃	17.49	17.52	16.48	17.72	17.22	18.17	18.72	18.38	18.19	19.22	18.46	18.67	17.45
Fe ₂ O ₃ T	4.29	4.65	4.99	4.96	4.16	7.83	6.44	8.88	8.54	6.11	8.13	5.29	7.53
MnO	0.08	0.09	0.10	0.10	0.09	0.16	0.12	0.20	0.19	0.11	0.16	0.10	0.18
MgO	1.59	1.58	1.74	1.77	1.47	3.21	2.55	3.84	4.24	1.86	2.92	1.93	4.31
CaO	3.25	3.45	3.76	3.70	3.17	6.22	4.74	5.80	6.49	4.11	6.08	3.94	7.00
Na ₂ O	4.59	4.62	4.38	4.69	4.44	4.80	4.71	5.17	5.22	5.52	5.09	4.78	4.72
K ₂ O	5.05	4.69	4.39	4.60	5.45	3.22	4.47	2.00	1.97	4.29	2.95	5.02	2.53
P ₂ O ₅	0.32	0.34	0.36	0.36	0.29	0.59	0.54	0.59	0.58	0.39	0.66	0.42	0.46
TOTAL	99.49	99.45	99.33	99.58	99.39	99.74	99.55	100.10	100.24	99.79	100.27	99.46	99.93
Mg#	42.39	40.28	40.91	41.47	41.23	44.87	44.01	46.19	49.64	37.67	41.62	42.00	53.19
A/CNK	1.02	1.03	0.98	1.02	1.00	0.94	1.00	1.02	0.96	1.01	0.96	1.02	0.90
A/NK	1.34	1.38	1.38	1.39	1.30	1.60	1.49	1.72	1.70	1.40	1.59	1.40	1.66
Ga	18.7	19.1	18.9	20.9	19.3	20.9	19.5	20.6	21.2	19.9	21.0	20.1	19.4
Rb	101.0	91.7	89.9	60.5	82.3	65.2	61.3	43.3	82.5	64.8	60.9	80.1	94.8
Sr	895	915	876	930	860	991	953	849	923	798	883	928	861
Y	17.7	18.6	20.7	20.8	17.9	25.3	21.4	23.1	23.5	19.0	25.1	19.9	24.2
Zr	332	359	322	376	326	219	344	250	226	341	140	367	323
Nb	11.3	10.9	14.5	12.2	11.9	15.8	12.5	12.5	12.1	8.2	16.6	11.1	14.4
Cs	1.36	1.04	1.09	0.95	1.14	1.05	1.06	0.89	1.62	1.85	1.43	0.90	2.39
Ba	2933	2680	2638	2857	3055	1900	3285	814	775	2071	1442	3326	1254
La	75.2	86.5	105.2	95.8	80.1	65.9	60.0	71.7	72.6	76.6	79.3	89.8	62.6
Ce	136	157	179	169	144	133	120	135	138	135	149	165	121
Pr	14.7	16.9	18.8	17.4	15.1	15.9	13.4	15.6	15.9	15.1	17.1	17.2	14.4
Nd	50.6	57.3	62.8	59.6	50.9	61.1	51.0	57.3	59.2	54.9	63.4	59.3	52.9

续表 5

Continued Table 5

岩石类型	花岗岩闪长岩					闪长质包体							
	03R066	03R067	03R069	03R074 - 1	03R075 - 1	03R071	03R072	03R073	03R074 - 2	03R075 - 2	03R076	03R077	03R078
Sm	8.03	7.91	9.85	8.96	7.82	10.40	8.84	10.71	10.98	9.55	11.07	9.87	9.88
Eu	2.23	2.31	2.51	2.53	2.16	2.52	2.66	2.18	2.17	2.33	2.27	2.66	2.45
Gd	5.17	5.77	6.34	6.82	5.52	7.45	5.87	7.55	7.50	6.04	8.02	6.61	6.89
Tb	0.72	0.73	0.82	0.87	0.71	1.02	0.83	0.96	0.98	0.80	1.02	0.81	0.91
Dy	3.55	3.79	4.13	4.28	3.60	5.15	4.36	4.91	5.09	3.97	5.40	4.08	4.95
Ho	0.66	0.75	0.83	0.86	0.74	1.04	0.86	0.97	1.03	0.82	1.08	0.84	1.05
Er	1.82	1.87	2.13	2.15	1.93	2.62	2.11	2.45	2.57	2.05	2.68	2.17	2.82
Tm	0.25	0.27	0.31	0.31	0.26	0.35	0.29	0.32	0.32	0.28	0.36	0.29	0.40
Yb	1.58	1.69	1.92	1.85	1.67	2.06	1.84	1.93	1.98	1.79	2.12	1.84	2.55
Lu	0.25	0.27	0.33	0.30	0.27	0.33	0.29	0.31	0.34	0.29	0.33	0.29	0.40
Hf	7.46	8.04	7.35	8.42	7.44	5.09	7.22	5.98	5.79	7.81	3.60	8.65	7.81
Pb	18.8	22.0	19.5	20.7	23.3	20.2	25.1	12.2	20.6	25.4	16.1	21.1	18.9
Th	11.5	12.4	15.8	15.8	16.4	4.9	4.5	5.4	4.2	6.8	6.8	10.6	4.3
U	2.26	1.76	2.21	2.27	2.19	2.00	0.86	1.20	1.20	1.70	1.59	1.49	1.24

注: $Mg^{\#} = 100 \times Mg^{2+} / (Mg^{2+} + 0.9 \times Fe_T)$

表 6 文登长山南闪长质包体及其寄主花岗岩闪长岩 Sr、Nd 同位素组成

Table 6 Sr and Nd isotopic compositions of Changshannan microgranular dioritic enclaves and hosting granodiorites

样品号/岩性	Rb ($\mu g/g$)	Sr ($\mu g/g$)	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	2σ	Sm ($\mu g/g$)	Nd ($\mu g/g$)	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	2σ	$I_{Nd}(t)$	$I_{Sr}(t)$	$\epsilon_{Nd}(t)$	T_{DM} (Ma)
03R066/花岗岩闪长岩	115	947	0.3500	0.708775	14	8.04	54.7	0.0889	0.511784	10	0.511718	0.70821	-15.1	1667
03R074 - 1/花岗岩闪长岩	92.2	1021	0.2613	0.708290	14	8.65	63.9	0.0819	0.511755	9	0.511694	0.70787	-15.6	1610
03R071/闪长质包体	100	1042	0.2779	0.708632	16	9.33	60.2	0.0937	0.511786	11	0.511716	0.70818	-15.1	1730
03R074 - 2/闪长质包体	88.4	978	0.2616	0.708591	14	9.01	57.2	0.0953	0.511789	10	0.511718	0.70817	-15.1	1748

注: 计算过程中所用常数为 $\lambda_{Sm} = 6.54 \times 10^{-12} a_{rb} = 1.42 \times 10^{-11}$, 亏损地幔(DM): $^{147}Sm/^{144}Nd = 0.2137$, $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.51315$, $t = 114$ Ma

4.5 锆石 Hf 同位素

寄主岩花岗闪长岩中锆石自形程度较好, 锆石形态为简单的四方柱或四方双锥, 柱面和锥面平直且发育完善, 根据 CL 图像可分为两类 (1) 锆石发育清晰的成分环带 (图 10a); (2) 锆石较均一, CL 图像较亮 (图 10b)。这两类锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值比较接近, 范围为 0.282244 ~ 0.282369, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-11.9 \sim -16.2$ (表 7)。

闪长质包体中锆石的自形程度一般较差, 内部结构复

杂, 总体可分为两类 (1) 锆石的 CL 图像具有明显岩浆环带或成分均一, 类似于寄主岩中的锆石 (图 10c 和 10d); (2) 锆石具有不均匀的组分, 呈布丁状结构, CL 图像较暗, 边部具有熔蚀现象并有一窄的白色生长边 (图 10e 和 10f)。对闪长质包体中的锆石进行了 Hf 同位素原位分析, 结果表明: 第 (1) 类锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值较低, 为 0.282205 ~ 0.282427, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-9.9 \sim -17.6$; 而第 (2) 类锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值较高, 为 0.282511 ~ 0.282634, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-6.9 \sim -2.7$ (表 7)。

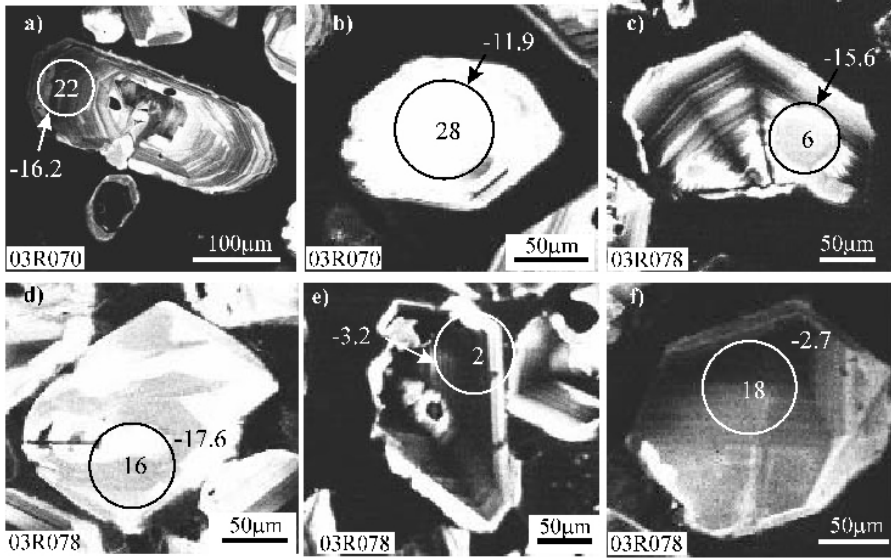


图 10 文登长山南花岗闪长岩中锆石 (a ~ b) 及闪长质包体中锆石 (c ~ f) CL 图像。图中圆圈为分析点位置, 圆圈外数字为 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

Fig. 10 CL images of representative zircons collected from Changshannan granodiorites (a ~ b) and microgranular dioritic enclaves (c ~ f). Rounded circles with $\sim 63\mu\text{m}$ diameter indicate the spots of Hf isotopic analyses with the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values being labeled outside and spot numbers being labeled inside

表 7 文登长山南闪长质包体及其寄主岩花岗闪长岩锆石原位 Hf 同位素组成

Table 7 Zircon in situ Hf isotopic compositions of Changshannan microgranular dioritic enclaves and hosting granodiorites

样品号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma_m$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}(\text{Hf})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
03R070 花岗闪长岩								
03R070-22	0.024459	0.000855	0.282244	0.000010	-18.7	-16.2	1416	-0.97
03R070-23	0.031210	0.001092	0.282275	0.000011	-17.6	-15.2	1382	-0.97
03R070-24	0.034295	0.001246	0.282271	0.000011	-17.7	-15.3	1393	-0.96
03R070-25	0.019465	0.000724	0.282275	0.000012	-17.6	-15.1	1369	-0.98
03R070-26	0.026815	0.000978	0.282257	0.000010	-18.2	-15.8	1403	-0.97
03R070-27	0.074583	0.002679	0.282349	0.000013	-15.0	-12.7	1335	-0.92
03R070-28	0.049865	0.001910	0.282369	0.000017	-14.3	-11.9	1278	-0.94
03R070-29	0.030080	0.001061	0.282286	0.000011	-17.2	-14.8	1365	-0.97
03R070-30	0.015453	0.000572	0.282261	0.000011	-18.1	-15.6	1382	-0.98

样品号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma_m$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}(\text{Hf})$	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$
03R070-31	0.040894	0.001392	0.282295	0.000014	-16.9	-14.5	1365	-0.96
03R070-32	0.025891	0.000908	0.282279	0.000010	-17.4	-15.0	1369	-0.97
03R070-33	0.025027	0.000906	0.282269	0.000012	-17.8	-15.4	1384	-0.97
03R070-34	0.027324	0.000948	0.282271	0.000011	-17.7	-15.3	1382	-0.97
03R070-35	0.027521	0.000991	0.282268	0.000012	-17.8	-15.4	1389	-0.97
03R070-36	0.069651	0.002245	0.282366	0.000010	-14.4	-12.0	1294	-0.93
03R070-37	0.031270	0.001132	0.282299	0.000011	-16.7	-14.3	1349	-0.97
03R070-38	0.023484	0.000821	0.282256	0.000012	-18.3	-15.8	1399	-0.98
03R070-39	0.026773	0.000920	0.282269	0.000010	-17.8	-15.4	1384	-0.97
03R070-40	0.033911	0.001161	0.282285	0.000011	-17.2	-14.8	1370	-0.97
03R070-41	0.044233	0.001650	0.282314	0.000018	-16.2	-13.8	1347	-0.95
03R070-42	0.026648	0.000866	0.282268	0.000011	-17.8	-15.4	1384	-0.97
03R071 闪长质包体								
03R071-1	0.070581	0.002375	0.282374	0.000010	-14.1	-11.8	1287	-0.93
03R071-2	0.063824	0.002265	0.282342	0.000010	-15.2	-12.9	1329	-0.93
03R071-3	0.018094	0.000678	0.282291	0.000011	-17.0	-14.6	1345	-0.98
03R071-4	0.100256	0.003712	0.282380	0.000012	-13.9	-11.6	1327	-0.89
03R071-5	0.026504	0.001042	0.282293	0.000010	-16.9	-14.5	1355	-0.97
03R071-6	0.015201	0.000565	0.282298	0.000012	-16.8	-14.3	1331	-0.98
03R071-7	0.021534	0.000809	0.282329	0.000012	-15.7	-13.2	1297	-0.98
03R071-8	0.090789	0.003260	0.282373	0.000010	-14.1	-11.9	1321	-0.90
03R071-9	0.065709	0.002210	0.282333	0.000013	-15.5	-13.2	1341	-0.93
03R071-10	0.029015	0.001065	0.282311	0.000011	-16.3	-13.9	1331	-0.97
03R071-11	0.020305	0.000776	0.282305	0.000011	-16.5	-14.1	1329	-0.98
03R071-12	0.015317	0.000572	0.282308	0.000010	-16.4	-14.0	1317	-0.98
03R071-13	0.025850	0.000951	0.282322	0.000010	-15.9	-13.5	1311	-0.97
03R071-14	0.048601	0.001751	0.282328	0.000011	-15.7	-13.3	1331	-0.95
03R071-15	0.013351	0.000561	0.282298	0.000011	-16.7	-14.3	1330	-0.98
03R071-16	0.056741	0.002012	0.282345	0.000011	-15.1	-12.8	1316	-0.94
03R071-17	0.017328	0.000691	0.282303	0.000011	-16.6	-14.1	1328	-0.98
03R071-18	0.043299	0.001658	0.282319	0.000011	-16.0	-13.7	1341	-0.95
03R071-19	0.042259	0.001541	0.282333	0.000010	-15.5	-13.2	1317	-0.95
03R071-20	0.081116	0.003112	0.282347	0.000011	-15.0	-12.8	1353	-0.91
03R072 闪长质包体								
03R072-43	0.059755	0.001986	0.282332	0.000011	-15.6	-13.2	1333	-0.94
03R072-44	0.032638	0.001118	0.282325	0.000012	-15.8	-13.4	1313	-0.97
03R072-45	0.049352	0.001714	0.282340	0.000010	-15.3	-12.9	1312	-0.95
03R072-46	0.030448	0.001097	0.282314	0.000012	-16.2	-13.8	1328	-0.97
03R072-47	0.047679	0.001628	0.282332	0.000012	-15.6	-13.2	1321	-0.95
03R072-48	0.049760	0.001845	0.282312	0.000011	-16.3	-13.9	1357	-0.94
03R072-49	0.035984	0.001328	0.282343	0.000013	-15.2	-12.8	1295	-0.96

样品号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma_m$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}(\text{Hf})$	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$
03R072-50	0.044331	0.001568	0.282317	0.000009	-16.1	-13.7	1339	-0.95
03R072-51	0.070679	0.002535	0.282327	0.000010	-15.7	-13.4	1361	-0.92
03R072-52	0.057895	0.002050	0.282340	0.000012	-15.3	-12.9	1325	-0.94
03R072-53	0.050770	0.001692	0.282354	0.000012	-14.8	-12.4	1292	-0.95
03R072-54	0.066381	0.002199	0.282378	0.000011	-13.9	-11.6	1274	-0.93
03R072-55	0.132526	0.004347	0.282449	0.000015	-11.4	-9.3	1246	-0.87
03R072-56	0.081111	0.002544	0.282366	0.000017	-14.4	-12.1	1305	-0.92
03R072-57	0.054228	0.001805	0.282343	0.000011	-15.2	-12.8	1312	-0.95
03R072-58	0.026727	0.000952	0.282307	0.000010	-16.4	-14.0	1332	-0.97
03R072-59	0.055651	0.001956	0.282333	0.000013	-15.5	-13.2	1331	-0.94
03R072-60	0.065943	0.002237	0.282354	0.000012	-14.8	-12.4	1311	-0.93
03R072-61	0.075368	0.002623	0.282346	0.000013	-15.1	-12.8	1336	-0.92
03R072-62	0.097223	0.003397	0.282420	0.000012	-12.4	-10.2	1255	-0.90
03R072-63	0.065847	0.002288	0.282388	0.000011	-13.6	-11.2	1263	-0.93
03R078 闪长质包体								
03R078-1	0.070843	0.002718	0.282415	0.000013	-12.6	-10.3	1239	-0.92
03R078-2	0.145052	0.005627	0.282624	0.000017	-5.2	-3.2	1013	-0.83
03R078-3	0.033094	0.001291	0.282324	0.000013	-15.9	-13.5	1321	-0.96
03R078-4	0.052013	0.002112	0.282376	0.000045	-14.0	-11.7	1274	-0.94
03R078-5	0.067282	0.002745	0.282427	0.000029	-12.2	-9.9	1222	-0.92
03R078-6	0.013167	0.000546	0.282263	0.000013	-18.0	-15.6	1379	-0.98
03R078-7	0.038585	0.001604	0.282317	0.000014	-16.1	-13.7	1341	-0.95
03R078-8	0.018046	0.000725	0.282245	0.000015	-18.6	-16.2	1410	-0.98
03R078-9	0.087361	0.003027	0.282511	0.000014	-9.2	-6.9	1107	-0.91
03R078-10	0.014549	0.000589	0.282277	0.000012	-17.5	-15.0	1361	-0.98
03R078-11	0.012899	0.000560	0.282277	0.000013	-17.5	-15.1	1360	-0.98
03R078-12	0.046276	0.001893	0.282358	0.000013	-14.7	-12.3	1294	-0.94
03R078-13	0.045290	0.001706	0.282323	0.000013	-15.9	-13.5	1336	-0.95
03R078-14	0.052682	0.002000	0.282415	0.000032	-12.6	-10.3	1215	-0.94
03R078-15	0.031863	0.001249	0.282324	0.000013	-15.8	-13.4	1318	-0.96
03R078-16	0.010614	0.000447	0.282205	0.000012	-20.0	-17.6	1455	-0.99
03R078-17	0.032723	0.001297	0.282285	0.000015	-17.2	-14.8	1375	-0.96
03R078-18	0.124918	0.004364	0.282634	0.000013	-4.9	-2.7	960	-0.87
03R078-19	0.013400	0.000561	0.282266	0.000011	-17.9	-15.4	1375	-0.98
03R078-20	0.044698	0.001837	0.282318	0.000014	-16.1	-13.7	1349	-0.94
03R078-21	0.025855	0.001047	0.282318	0.000012	-16.0	-13.6	1319	-0.97
03R078-22	0.030421	0.001121	0.282323	0.000012	-15.9	-13.5	1316	-0.97
03R078-23	0.041977	0.001592	0.282349	0.000013	-15.0	-12.6	1295	-0.95
03R078-24	0.078679	0.003116	0.282415	0.000013	-12.6	-10.4	1253	-0.91

注: 计算过程中所用常数为 $\lambda_{\text{Lu}} = 1.867 \times 10^{-11}$; 球粒陨石 (CHUR): $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282772$ 、 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.03321$ 、亏损地幔 (DM): $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$ 、 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.03842$; $t = 114 \text{ Ma}$

5 讨论

5.1 岩浆的混合成因

根据前人对花岗岩浆混合成因研究的大量成果 (Vernon, 1984, 1990; Poli *et al.*, 1991; Poli, 1992; 曲晓明等, 1997; Thoma, 1999; Janoušek *et al.*, 2000; Waight *et al.*, 2000; 李昌年, 2002; 成中梅, 2003; Gagnevin, 2004; Barbarin, 2005), 可以认为文登长山南含闪长质包体的花岗闪长岩在野外地质特征、显微结构、矿物组合及化学成分上均显示为岩浆混合 (mingling 和 mixing) 成因。闪长质包体定向性好, 有的沿岩浆流动方向被拉长 (图 2), 反映了岩浆侵位时局部呈液态或半固态 (Vernon *et al.*, 1988)。有的包体薄片上可观察到角闪石晶体包裹黑云母晶体的现象, 并且它们之间是连续的, 好像是角闪石晶体在生长过程中捕获了个别黑云母, 这种不平衡结构不能用正常的结晶顺序来解释, 因为在钙碱性岩石中角闪石早于黑云母先结晶, 这种反序反映了熔体中 SiO_2 含量的减少或者斜长石含量的增加 (Bateman, 1993; Castro, 1993), 当岩浆房中有基性岩浆突然注入时, 熔体成分的改变将导致角闪石的结晶, 角闪石结晶之后是第二世代黑云母的结晶, 这两种黑云母成分没有显著的差别, 说明两种岩浆重新达到了平衡。石英和钾长石呈他形粒状分布, 在半自形的角闪石、黑云母和斜长石中, 说明石英和钾长石的结晶和岩浆混合存在一定的时间间隔, 它们是在两种岩浆达到了热平衡后才结晶的, 且淬火温度比其结晶

温度要高 (Janoušek *et al.*, 2000)。大量针状磷灰石的发育说明岩浆侵位过程中曾经历过快速冷凝阶段。闪长质包体中斜长石、黑云母和角闪石的化学组分与寄主岩石中对应矿物非常相似, 表明包体和寄主岩石至少已经达到了局部平衡 (Allen, 1991)。

在 Harker 图解 (图 5) 上, 闪长质包体的 SiO_2 与其余的氧化物之间具有良好的线性关系, 随着 SiO_2 含量增加, TiO_2 、 FeO_T 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 和 MnO 线性降低, K_2O 则线性增加, 呈现出典型的岩浆混合或结晶分异演化趋势; 在 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2/\text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO} - \text{SiO}_2/\text{MgO}$ 、 $\text{MgO}/\text{K}_2\text{O} - \text{CaO}/\text{K}_2\text{O}$ 同分母氧化物比值相关图上也构成良好的线性相关, 说明包体与寄主岩石可能为混合作用的演化趋势, 因为在分离结晶作用过程中, 由于受固溶体矿物晶出的影响, 其演化线多为曲线而不是直线 (周珣若, 1994)。

寄主岩和闪长质包体中的锆石 Hf 同位素组成并不均一, 表明寄主岩和闪长质包体可能不是同一种岩浆演化的产物, 至少可能存在两种不同性质的岩浆参与了成岩作用。寄主岩中的锆石和闪长质包体中与寄主岩 CL 图像相似的锆石, 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值都较低, 最低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值都偏向崑崙山二长花岗岩中锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 平均值 (-22.6 ± 1.1 , 95% 的置信区间, 胡芳芳等未刊资料, 图 11) 显示了其壳源成因; 然而, 闪长质包体中部分锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值较高, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 最高值为 -2.7 有向正值演化的趋势 (图 11), 表明幔源物质可能参与了成岩作用。

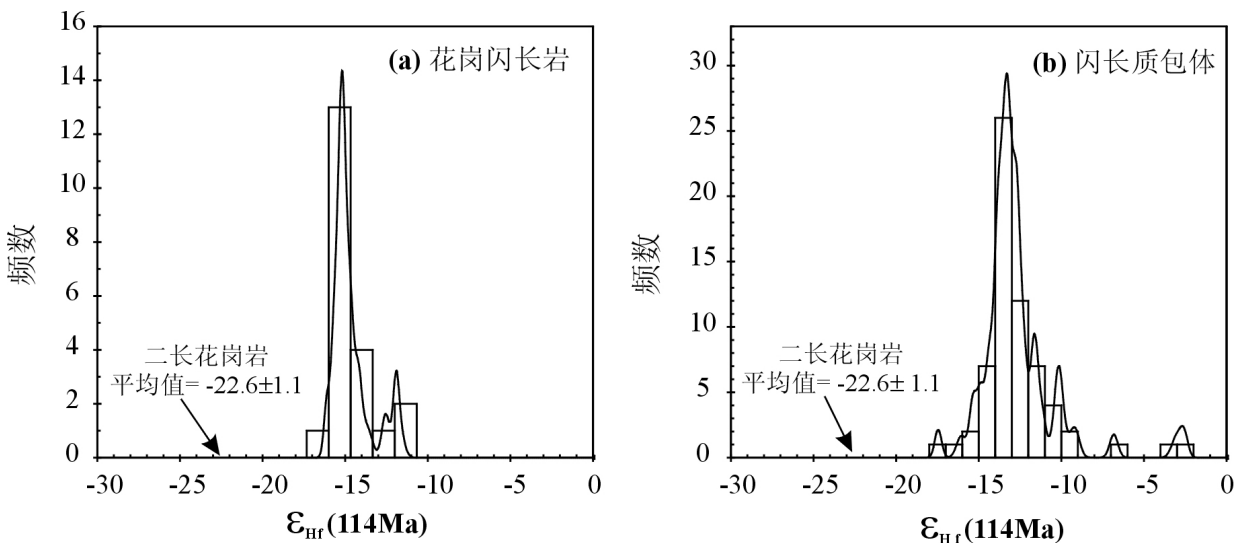


图 11 文登长山南闪长质包体及其寄主岩花岗闪长岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 频率直方图

注: 二长花岗岩平均值引自胡芳芳等未刊数据

Fig. 11 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ histogram of Changshannan microgranular dioritic enclaves and hosting granodiorites

5.2 源区特征

Yang 等(2004)和 Guo 等(2004)的研究表明,胶东地区早白垩纪基性脉岩和钙碱性煌斑岩具有高的 $Mg^{\#}$ 、Cr、Ni、 K_2O 含量,富集不相容元素,具有较高初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值和负的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值,其来源为古老富集的岩石圈地幔,而文登长山南花岗闪长岩中的闪长质包体也具有类似特征。另外,文登长山南闪长质包体中除含钾长石斑晶的 03R077 样品外,其余样品的 Th/U 值均在 2.48~5.17 范围内,与原始地幔的 Th/U 值(为 4.05; Sun and McDonough, 1989)相近,且锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 最高值达 -2.7, 都说明有地幔物质的参与。可以认为,文登长山南闪长质包体可能来源于与本区基性脉岩相似的源区,即富集岩石圈地幔。

在主量元素与 SiO_2 协变图(图 5)上,随着 SiO_2 含量增加,文登长山南闪长质包体的 TiO_2 、 FeO_T 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 和 MnO 线性降低, K_2O 线性增加; Nb/U (4.80~14.45) 和 Ce/Pb (4.78~11.07) 较低,这与大陆地壳 Nb/U 和 Ce/Pb 值(分别为 6.2 和 3.9; Rudnick and Fountain, 1995)相近,而与洋中脊和大洋岛弧玄武岩明显不同(Nb/U 为 47, Ce/Pb 为 27; Hofmann *et al.*, 1986); 另外,文登长山南闪长质包体以富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE),亏损高场强元素(HSFE, 如 Nb、P、Ti)为特征,锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 最低值为 -17.6, 均表明大陆地壳物质参与了闪长质包体的成岩过程。

寄主岩石富 SiO_2 , 贫 MgO 、 MnO 和 CaO , 铝指数接近或 > 1, 富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损 Nb、Ta、Zr、Hf, 高 $^{87}Sr/^{86}Sr$, 负 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值, 并且 Th/U 值为 5.07~7.48, 与下地壳的 Th/U 值(为 6.00; Rudnick and Gao, 2003)相近, 反映了其壳源成因; 寄主岩石中锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 -11.9~-16.2, 高于壳源的昆崙山杂岩体中二长花岗岩(杨进辉, 2000)的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 平均值(-22.6±1.1), 这表明寄主岩石主要来源于地壳物质的部分熔融, 并且可能有幔源物质参与了成岩过程。

因此,文登长山南花岗闪长岩及其包体是两种岩浆混合作用的结果,而这两种岩浆可能分别来源于富集岩石圈地幔和地壳。

5.3 形成机制

闪长质包体记录了岩浆混合作用过程中基性岩浆演化的信息(Poli and Tommasini, 1991)。文登长山南闪长质包体具有轻微的负异常或略具正异常, SiO_2 与其余氧化物之间具有良好的线性关系, 说明来源于岩石圈地幔的镁铁质岩浆可能已经历过结晶分异作用, 或者在注入长英质岩浆房以后发生了结晶分异。在中生代, 华北东部岩石圈发生了大规模的减薄和壳幔置换作用(Yang *et al.*, 2003; 翟明国等, 2004) 软流圈的上涌可引发地壳物质局部熔融形成长英质岩浆房, 当深部热的铁镁质岩浆注入已经侵位的长英质岩浆

房后, 由于温度和粘度等的不同, 他们之间未达到热平衡状态, 只是在两者边界发生能量交换, 铁镁质岩浆边部冷凝, 长英质岩浆则被加热形成温度梯度, 从而促使岩浆房内的长英质岩浆发生对流, 铁镁质岩浆也发生伸展及对流搅动, 其内部基性组分发生分离结晶并形成微粒包体, 边界处则受到长英质岩浆的混染。对流促进了这种物理和化学过程的重复循环, 经过演化的铁镁质岩浆与长英质岩浆的温度差别越来越小, 最终形成含微粒包体的均一岩浆, 这种岩浆结晶后形成寄主花岗闪长岩。

5.4 锆石原位 Hf 同位素的有效示踪

岩浆混合过程中, 两端熔体之间及从混合前岩浆熔体中结晶的矿物与混合后的熔体之间, 元素和同位素平衡的速度显然是有所差异的; 而元素和同位素的平衡速率又取决于它们在熔体中所扮演的角色, 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 和 Nd 同位素、晚期矿物的组成等能比较快速地达到均一; 而锆石由于具有很高的 Hf 同位素体系封闭温度, 且 Lu-Hf 同位素体系的封闭温度要高于 Sm-Nd 同位素体系, 即使在麻粒岩相等高级变质条件下, 锆石仍可保持原始的 Hf 同位素组成(Scherer, 2000), 故锆石 Hf 同位素原位分析可以揭示岩浆形成过程的复杂性(Griffin *et al.*, 2002; 汪相等, 2003)。文登长山南闪长质包体与寄主岩具有相似的微量元素、稀土元素及 Sr 和 Nd 同位素特征, 但主量元素和 Hf 同位素却有明显差异(图 5 和图 11), 其锆石 Hf 同位素组成有大部分的重叠, 似乎是锆石在岩浆混合(熔体中 Hf 同位素达到平衡)之后结晶所致, 包体中部分锆石呈现不同的 Hf 同位素组成则反映它们可能是从岩浆混合前的基性岩浆中结晶出来的, 从而保存了原始岩浆的部分特征。该结果表明, 由于锆石的结晶温度和 Hf 同位素的封闭温度较高, 锆石 Hf 同位素组成比全岩 Sr、Nd 同位素更难达到同位素平衡, 可更为有效地对混合岩浆的源区特征和岩浆混合过程进行示踪。

6 结论

(1) 野外地质特征、显微结构、矿物组合、化学组分和地球化学特征均表明, 胶东文登长山南含闪长质包体的花岗闪长岩体为岩浆混合成因, 并且成岩过程中有岩石圈地幔物质参与, 也受到地壳的混染。

(2) 闪长质包体的地球化学特征表明, 胶东文登长山南含闪长质包体的花岗闪长岩体的形成机制为: 来源于岩石圈地幔的铁镁质岩浆注入长英质岩浆房后, 经过演化形成微粒包体, 演化的铁镁质岩浆与长英质岩浆混合, 最终形成含微粒包体的均一岩浆, 这种岩浆结晶后形成寄主岩花岗闪长岩。

(3) 锆石 Hf 同位素组成比全岩 Sr、Nd 同位素更能有效地示踪混合岩浆的源区特征和岩浆混合过程。

致谢 实验分析测试过程中,中国科学院地质与地球物理研究所各相关实验室的工作人员曾付出辛勤的劳动;成文过程中得到钱青博士、张华锋博士和石永红博士的有益建议和帮助;吴福元研究员、徐夕生教授和孙涛博士审阅了本文并提出许多宝贵的修改意见,在此谨致谢忱。

References

- Allen C M. 1991. Local equilibrium of mafic enclaves and granitoids of the Turtle pluton, southeast California: Mineral, chemical, and isotopic evidence. *American mineralogist*, 76: 574 – 588
- Bacon C R. 1986. Magmatic inclusions in silicic and intermediate volcanic rocks. *Journal of Geophysical Research*, 91: 6091 – 6112
- Barbarin B. 2005. Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: mature, origin, and relations with the hosts. *Lithos*, 80: 155 – 177
- Bateman R. 1993. Mineral disequilibria under the microscope. In Bateman R and Castro A (eds). *Heterogeneities in felsic igneous rocks at scales from crystals to plutons*. Workshop Notes, 4 – 7. Sevilla: Universidad de Sevilla
- Blichert-Toft J, Albarede F. 1998. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 243 – 258
- Bonin B. 2004. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review. *Lithos*, 78: 1 – 24
- Cantagrel J M, Didier J, Gourgrud A. 1984. Magma mixing: origin of intermediate rocks and "enclaves" from volcanism to plutonism. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 35: 63 – 76
- Castro A. 1993. Biotite-hornblende relationships in calc-alkaline granitoids and enclaves. In Bateman R and Castro A (eds) *Heterogeneities in felsic igneous rocks at scales from crystals to plutons*. Workshop notes, 3. Sevilla: Universidad de Sevilla
- Chappell B W, White A J R, Wyborn D. 1987. The importance of residual source material (residue) in granite petrogenesis. *Journal of Petrology*, 28: 1111 – 1138
- Chappell B W, White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 1 – 26
- Chen Y D, Price R C, White A J R, Chappell B W. 1989. Inclusions in three S-type granites from southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 30: 1181 – 1218
- Cheng Zhongmei. 2003. Genesis of microgranular enclaves in Shouwangfen granodiorites, Hebei Province. *Geosciences*, 17(1): 20 – 26 (in Chinese with English abstract)
- Collins W J. 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
- De Paolo D J. 1981. Neodymium isotopes in the Colorado Front Range and crust-mantle evolution in the Proterozoic. *Nature*, 291: 193 – 196
- Didier J, Barbarin B. 1991. Enclaves and Granite Petrology, *Developments in Petrology*. Amsterdam: Elsevier, 1 – 625
- Eberz G W, Nicholls I A, Maas R, McCulloch M T, Whiteford D J. 1990. The Nd- and Sr- isotopic composition of microgranitoid enclaves and their host rocks from the Swifts Creek pluton, southeast Australia. *Chemical Geology*, 85: 119 – 134
- Fan H R, Zhai M G, Xie Y H, Yang J H. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China. *Mineralium Deposita*, 38: 739 – 750
- Frost T P, Mahood G A. 1987. Field, chemical, and physical constraints on mafic-felsic magma interaction in the Lamarck Granodiorite, Sierra Nevada, California. *Geological Society of America Bulletin*, 99: 272 – 291
- Gagnevin D, Daly J S, Poli G. 2004. Petrographic, geochemical and isotopic constraints on magma dynamics and mixing in the Miocene Monte Capanne monzogranite (Elba Island, Italy). *Lithos*, 78: 157 – 195
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, van Acherbergh E, O'Reilly S Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 133 – 147
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu X S, Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61: 237 – 269
- Guo F, Fan W M, Wang Y J, Zhang M. 2004. Origin of early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres from the Sulu orogen in eastern China: implications for enrichment processes beneath continental collisional belt. *Lithos*, 78: 291 – 305
- Guo Jinghui, Chen Fukun, Zhang Xiaoman, Fan Hongrui, Cong Bolin. 2001. Petrogenesis of granites and post-collisional tectonic processes in Su-Lu UHP metamorphic belt. In: Cong BL, Zhai MG, Guo JH, Liu JM (eds). *Continental Subduction, Detachment, and Thinning*. Xi'an: Northwest University, 99 – 102 (in Chinese)
- Hofmann A, Jochum K, Seufert M, White M. 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 33: 33 – 45
- Holden P, Halliday A N, Stephaes W E. 1987. Neodymium and strontium isotope content of microdiorite enclaves points to mantle input to granitoid production. *Nature*, 330: 53 – 56
- Hu F F, Fan H R, Yang J H, Wan Yusheng, Liu Dunyi, Zhai Mingguo and Jin Chengwei. 2004. Mineralizing age of the Rushan lode gold deposit in the Jiaodong Peninsula: SHRIMP U-Pb dating on hydrothermal zircon. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1629 – 1636
- Janoušek V, Bowes D R, Braithwaite C J R, Rogers G. 2000. Microstructural and mineralogical evidence for limited involvement of magma missing in the petrogenesis of a Hercynian high-K calc-alkaline intrusion: the Koz rovice granodiorite, Central Bohemian Pluton, Czech Republic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 91: 15 – 26
- Kumar S C. 1988. Microgranular enclaves in granitoids: agents of magma mixing. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 2(3–4): 109 – 121
- Leshner C E. 1990. Decoupling of chemical and isotopic exchange during magma mixing. *Nature*, 344: 235 – 237
- Li Changnian. 2002. Comment on the magma mixing and their research. *Geological Science and Technology Information*, 21(4): 49 – 53 (in Chinese with English abstract)
- Maas R, Nicholls I A, Legg C. 1997. Igneous and metamorphic enclaves in the S-type Deddick granodiorite, Lachlan Fold Belt, SE Australia: Petrographic, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence for crustal melting and magma mixing. *Journal of Petrology*, 38: 815 – 841
- Poli G, Tommasini S. 1991. Model for the origin and significance of microgranular enclaves in calc-alkaline granitoids. *Journal of Petrology*, 32(3): 657 – 666
- Poli G. 1992. Geochemistry of Tuscan Archipelago granitoids, central Italy: the role of hybridization processes in their genesis. *Journal of Geology*, 100: 41 – 56
- Qiao Guangsheng. 1988. Normalization of isotopic dilution analysis. *Scientia Sinica (Series A)*, 31(10): 1263 – 1268
- Qiu Y M, Groves D I, McNaughton N J, et al. 2002. Nature, age, and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China. *Mineralium Deposita*, 37: 283 – 305
- Qu Xiaoming. 1997. A study on the genesis of dioritic enclaves in Guojialing granite. *Acta Mineralogica Sinica*, 17(3): 302 – 309 (in Chinese with English abstract)

- Ren Shengli. 1995. Tectonic evolution of the western Fujian-southern Guizhou: geochemical constraints [Ph. D. dissertation]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1 - 133 (in Chinese with English abstract)
- Rudnick R L, Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Review in Geophysics*, 33: 267 - 309
- Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Rudnick R L (ed.), *The Crust*, 1 - 64, *Treaties on Geochemistry*, v. 3. Oxford: Elsevier Pergamon
- Scherer E E, Cameron K L, Blichert-Toft J. 2000. Lu-Hf garnet geochronology: closure temperature relative to the Sm-Nd system and the effects of trace mineral inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 3413 - 3432
- Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources. 1991. *Regional Geology of Shandong Province*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Soderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, Isachsen C E. 2004. The ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219: 311 - 324
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D and Norry M J (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*, 313 - 345 Special Publication v. 42 of Geological Society
- Thoma J B, Sinha A K. 1999. Field, geochemical, and isotopic evidence for magma mixing and assimilation and fractional crystallization processes in the Quotooton Igneous Complex, northwestern British Columbia and southeastern Alaska. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 36: 819 - 831
- Vernon R H, Etheridge M A, Wall V J. 1988. Shape and microstructure of microgranitoid enclaves: indicators of magma mingling and flow. *Lithos*, 22: 1 - 11
- Vernon R H. 1983. Restite, xenoliths and microgranitoid enclaves in granites. *Journal and Proceedings of the Royal Society of New South Wales*, 116: 77 - 103
- Vernon R H. 1984. Microgranitoid enclaves in granites-globules of hybrid magma quenched in a plutonic environment. *Nature*, 309: 438 - 439
- Vernon R H. 1990. Crystallisation and hybridism in microgranitoid enclave magmas: microstructural evidence. *Journal of Geophysical Research*, 95: 17849 - 17859
- Waight T E, Dean A A, Maas R, Nicholls I A. 2000. Sr and Nd isotopic investigations towards the origin of feldspar megacrysts in microgranular enclaves in two I-type plutons of the Lachlan Fold Belt, southeast Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47: 1105 - 1112
- Wang X, Griffin W L, Wang Z C, Zhou X M. 2003. Hf isotope composition of zircons and implication for the petrogenesis of Yajiangqiao granite, Hunan Province, China. *Chinese Science Bulletin*, 48(10): 995 - 998
- Xu Honglin, Zhang Dequan, Sun Guiying. 1997. Characteristics and genesis of Kunyushan granite and its relation with gold deposits in Jiaodong. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(2): 131 - 143 (in Chinese with English abstract)
- Xu Jingfang, Shen Buyun, Niu Liangzhu, Zheng Wenshen. 1989. Studies on the gold mineralization-related granites from the Jiaodong Block. *Geology of Shandong*, 5(2): 1 - 125 (in Chinese)
- Xu P, Wu F Y, Xie L W, Yang Y H. 2004. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1642 - 1648
- Yang J H and Zhou X H. 2001. Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of lode gold deposits. *Geology*, 29: 711 - 714
- Yang J H, Chung S L, Zhai M G, Zhou X H. 2004. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle. *Lithos*, 73: 145 - 160
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Wilde S A, Chu M F. 2004. Multiple sources for the origin of granites: Geochemical and Nd/Sr isotopic evidence from the Guodaoling granite and its mafic enclaves, northeast China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 4469 - 4483
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A. 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: an association with lithospheric thinning. *Ore Geology Reviews*, 23: 125 - 152
- Yang Jinhui. 2000. Age and metallogenic dynamics of gold mineralization in Jiaodong Peninsula Constraints on the interaction of mantle/crust and metallogenesis/lithospheric evolution [Ph. D. dissertation]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1-133 (in Chinese with English abstract)
- Zhai Mingguo, Fan Hongrui, Yang Jinhui, Miao Laicheng. 2004. Large scale cluster of gold deposits in east Shandong: Anorogenic metallogenesis. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 85 - 98 (in Chinese with English abstract)
- Zhou Xunruo. 1994. Hybridization in the genesis of granitoids. *Earth Science Frontiers*, 1(1~2): 97 - 97 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 成中梅, 路凤香, 李昌年, 袁晓萍. 2003. 河北寿王坟花岗岩闪长岩中暗色微粒岩石包体的成因. *现代地质*, 17(1): 20 - 26
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 范宏瑞, 从柏林. 2001. 苏鲁超高压带花岗岩类成因与碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究. 见: 从柏林, 翟明国, 郭敬辉, 刘建明编. *大陆的俯冲、拆离和减薄作用学术研讨会论文集摘要集*. 西安: 西北大学, 99 - 102
- 李昌年. 2002. 岩浆混合作用及其研究评述. *地质科技情报*, 21(4): 49 - 53
- 曲晓明, 王鹤年, 饶冰. 1997. 郭家岭花岗岩闪长岩体中闪长质包体的成因研究. *矿物学报*, 17(3): 302 - 309
- 任胜利. 1995. 闽西-赣南地质构造演化的岩石地球化学制约研究. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所 [博士学位论文]
- 山东地质矿产局. 1991. *山东省区域地质志*. 北京: 地质出版社
- 汪相, W L Griffin, 王志成, 周新民, 汪传胜. 2003. 湖南丫江桥花岗岩中锆石的 Hf 同位素地球化学. *科学通报*, 48(4): 379 - 382
- 徐洪林, 张德全, 孙桂英. 1997. 胶东昆崙山花岗岩的特征、成因及其与金矿的关系. *岩石矿物杂志*, 16(2): 131 - 143
- 徐金方, 沈步云, 牛良柱, 郑文深. 1989. 胶北地块与金矿有关的花岗岩类研究. *山东地质*, 5(2): 1 - 125
- 杨进辉. 2000. 胶东地区金矿床成矿时代及其成矿地球动力学背景-兼论壳幔相互作用于成岩成矿. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所 [博士学位论文], 1 - 133
- 翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 苗来成. 2004. 非造山型金矿-胶东型金矿的陆内成矿作用. *地学前缘*, 11(1): 85 - 98
- 周珣若. 1994. 花岗岩混合作用. *地学前缘*, 1(1~2): 97 - 97