

• 专题研究 •

浙江普陀山黑云母钾长花岗岩及其岩石包体的 地球化学与岩浆混合作用

张晓琳, 邱检生, 王德滋, 王汝成, 徐夕生, 陈小明

(南京大学 地球科学系 成矿作用国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

摘要: 浙江普陀山岩体是我国东南沿海产出的由多阶段岩浆作用形成的典型 LA 型复合花岗岩杂岩体。锆石 U-Pb 定年结果显示该杂岩体主要由 3 期岩浆侵入活动形成, 自早到晚分别为石英闪长玢岩(约 170 Ma)、黑云母钾长花岗岩(约 110 Ma)和晶洞钾长花岗岩(约 90 Ma), 其中黑云母钾长花岗岩是该杂岩体的主体岩性, 在该类岩石中常发育有丰富的深色闪长质包体。本文重点研究了该杂岩体中的黑云母钾长花岗岩(寄主岩)及其中的深色闪长质包体。寄主花岗岩为高演化的 I 型花岗岩, 地球化学特征表现为高硅、富碱、准铝或弱过铝质, 富大离子亲石元素(如 Rb、Th 等)和轻稀土元素(LREE/HREE= 8.58~13.83), 具有中-强的铕负异常($\delta\text{Eu}=0.29\sim 0.43$), 并显著亏损 Sr、Ba、P 和 Ti 等。闪长质包体与寄主岩之间主、微量元素表现出混合成因的演化趋势, 二者具有相似的 Nd 同位素组成 [$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为 -6.30~-6.60 和 -6.95~-7.12], 均表现出壳幔混源花岗岩类岩石的特点。对包体与寄主岩产出构造背景和地球化学特征的综合分析表明, 该杂岩体中的深色闪长质包体是在伸展引张构造背景下, 上涌的幔源基性岩浆与其诱发的长英质岩浆混合作用的产物。

关键词: 黑云母钾长花岗岩; 闪长质包体; 地球化学; 岩浆混合作用; 浙江普陀山

中图分类号: P588.12⁺; P581

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)02-0081-12

Geochemistry and magmatic mixing of the Putuoshan biotite moyites and their enclaves, Zhejiang Province

ZHANG Xiao_lin, QIU Jian_sheng, WANG De_zi, WANG Ru_cheng, XU Xi_sheng and CHEN Xiao_ming
(State Key Laboratory of Mineral Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The Putuoshan pluton is a typical multi-stage LA composite granitic complex in the coastal area of southeastern China. Zircon U-Pb dating demonstrates that it consists mainly of three stage magmatic intrusions, which are from early to late quartz diorite porphyry (≈ 170 Ma), biotite moyite (≈ 110 Ma), and miarolitic moyite (≈ 90 Ma). Among them, the biotite moyite, which often contains abundant meladioritic enclaves, forms the main body of this pluton. This paper is mainly devoted to the study of the biotite moyites (host rocks) and the meladioritic enclaves. Geochemically, the host granites are characterized by high silica and alkali contents, and show metaluminous to weakly peraluminous attribute. They are also enriched in LILE (e. g., Rb and Th) and LREE, with LREE/HREE ratios ranging from 8.58 to 13.83, and depleted in Sr, Ba, P and Ti, etc. In the chondrite-normalized REE patterns, they display moderately to strong negative europium anomalies ($\delta\text{Eu}=0.29\sim 0.43$). Integrated geochemical data suggest that the host rocks are highly fractionated I-type granites. The variation of major and trace element abundances between the host granites and the meladiorite enclaves shows the evolutionary tendency of magmatic mixing. The host granites and the meladiorite also have

收稿日期: 2004-07-16; 修订日期: 2004-12-27

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目; 国家自然科学基金资助项目(40132010, 40221301, 40272036)

作者简介: 张晓琳(1979-), 女, 硕士研究生, 主要从事火成岩岩石学和地球化学研究, E-mail: mg0229013@yml.nju.edu.cn。通讯作者: 邱检生(1965-), 男, 博士, 教授, E-mail: jsqiuwyh@public1.ptt.js.cn。

similar Nd isotopic compositions, with $\epsilon Nd(t)$ values being $-6.30 \sim -6.60$ and $-6.95 \sim -7.12$ respectively, which are all indicative of mixing of crustal and mantle materials. Based on a comprehensive analysis of their tectonic settings as well as geological and geochemical data, the authors hold that the meladiorite enclaves in the Putuoshan pluton were generated by mixing of mantle-derived basic magma and its induced crustal felsic magma in a tensile environment.

Key words: biotite moyite; dioritic enclave; geochemistry; magmatic mixing; Putuoshan in Zhejiang Province

花岗质岩石中发育的暗色微粒包体蕴涵着丰富的壳幔作用信息, 对其进行系统的地质和地球化学研究, 一方面可以揭示岩浆作用的深部过程(Elburg, 1996; Blake & Fink, 2000; Silva *et al.*, 2000; Michelle *et al.*, 2002), 另一方面也有助于了解寄主岩岩浆的起源、定位机制与成因演化(Didier & Barbarin, 1991; Castro *et al.*, 1991; Chappell, 1996; Barbarin, 1999; Wilcox, 1999), 因而成为花岗质岩石中倍受关注的研究对象。

我国浙闽沿海存在着一条颇具特色的 IA 型复合花岗岩带(邱检生等, 1999), 其中的钙碱性(I型)花岗质岩石中普遍发育暗色微粒包体, 典型实例如浙江的青田、海溪、石前和大衢山岩体, 福建的漳州、平潭和岱前山岩体等, 这些岩体中的暗色包体被普遍认为是基性与酸性岩浆混合作用的产物(董传万等, 1992; 周新民等, 1992; 李武显等, 1999; Dong *et al.*, 1998; Xu *et al.*, 1999)。浙江普陀山岩体是我国东南沿海产出的由多阶段岩浆作用形成的典型 IA 型复合花岗质杂岩体, 该杂岩体呈南北向展布(图1), 出露面积约 26 km^2 ^①。构成杂岩体的岩石类型有石英闪长玢岩、黑云母钾长花岗岩及晚期的晶洞钾长花岗岩等。其中黑云母钾长花岗岩是该杂岩体的主体岩性, 该类岩石部分地段发育有丰富的暗色闪长质包体。前人对该岩体进行过一定程度的研究(蒋叙良, 1991; 邱检生等, 1999), 但研究工作侧重于杂岩体中 A 型花岗岩的地球化学及其与 I 型花岗岩的复合关系和成因联系, 而对杂岩体中 I 型花岗岩的岩浆源区性质及深部作用过程研究较薄弱, 特别是对赋存于 I 型花岗岩中暗色包体的类型、地球化学特征及其与寄主岩的成因联系等缺乏深入探讨。为此, 本文重点进行了包体与寄主岩岩石学和地球化学特征的综合对比, 旨在揭示二者之间的联系, 并进一步探讨成岩过程及岩石成因。

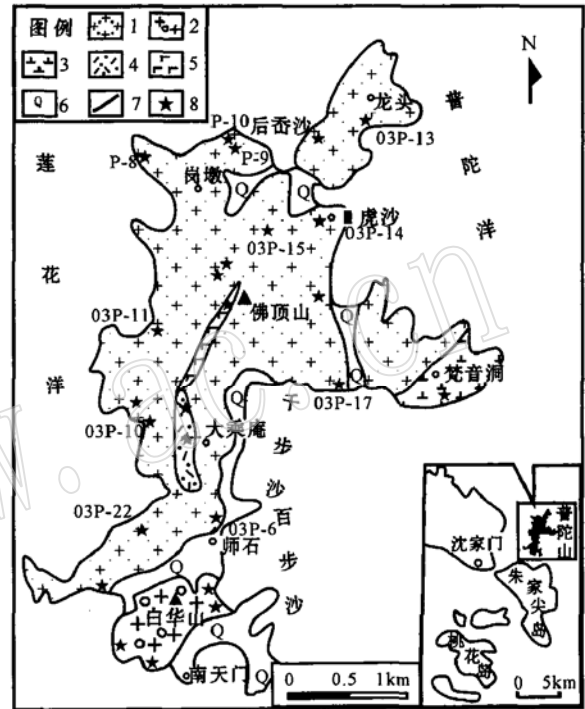


图1 普陀山花岗质杂岩体地质略图

Fig. 1 Sketch geological map of the Putuoshan granitic complex

- 1—黑云母钾长花岗岩; 2—晶洞钾长花岗岩; 3—石英闪长玢岩;
4—英安质-流纹质火山岩; 5—流纹斑岩; 6—第四系;
7—断裂; 8—采样点
1—biotite moyite; 2—miarolitic moyite; 3—quartz diorite
prophyry; 4—dacitic rhyolitic volcanic rock; 5—rhyolite
porphyry; 6—Quaternary; 7—fault; 8—sampling location

1 岩体地质及岩石学特征

普陀山杂岩体位于浙闽沿海 IA 型复合花岗岩带的最北端, 龙泉-宁波北东向断裂带北端的南东侧, 为多次岩浆活动形成的杂岩体。其东侧梵音洞一带为第一次侵入的中细粒石英闪长玢岩, 面积约 0.48 km^2 ^①。杂岩体主体为中粗粒黑云母钾长花

① 浙江省地质矿产局, 1980. 沈家门幅、定海幅区调报告(1:20万).

岗岩。岛南侧师石、南天门一带为较晚阶段形成的晶洞钾长花岗岩，晶洞中主要充填伟晶状或晶簇状长英质矿物，偶尔还可见暗红色的锰铝榴石充填于石英、钾长石等矿物间隙中，表现出铝质 A 型花岗岩的特征(邱检生等, 2000; 刘昌实等, 2003)。在岛北侧后岙沙、虬虎沙一带部分地段的黑云母钾长花岗

岩中发育有形态各异的暗色微粒闪长质包体。包体形态有浑圆状、透镜状和撕裂状等，大小悬殊，直径一般在 10~ 30 cm 之间，有些则达数米而与花岗质岩石呈相互包裹关系(图 2a)。包体与寄主岩的界线清晰，有的呈突变关系，有的则呈现过渡关系，局部可见包体岩浆与寄主岩浆的“反应边”。包体粒度比

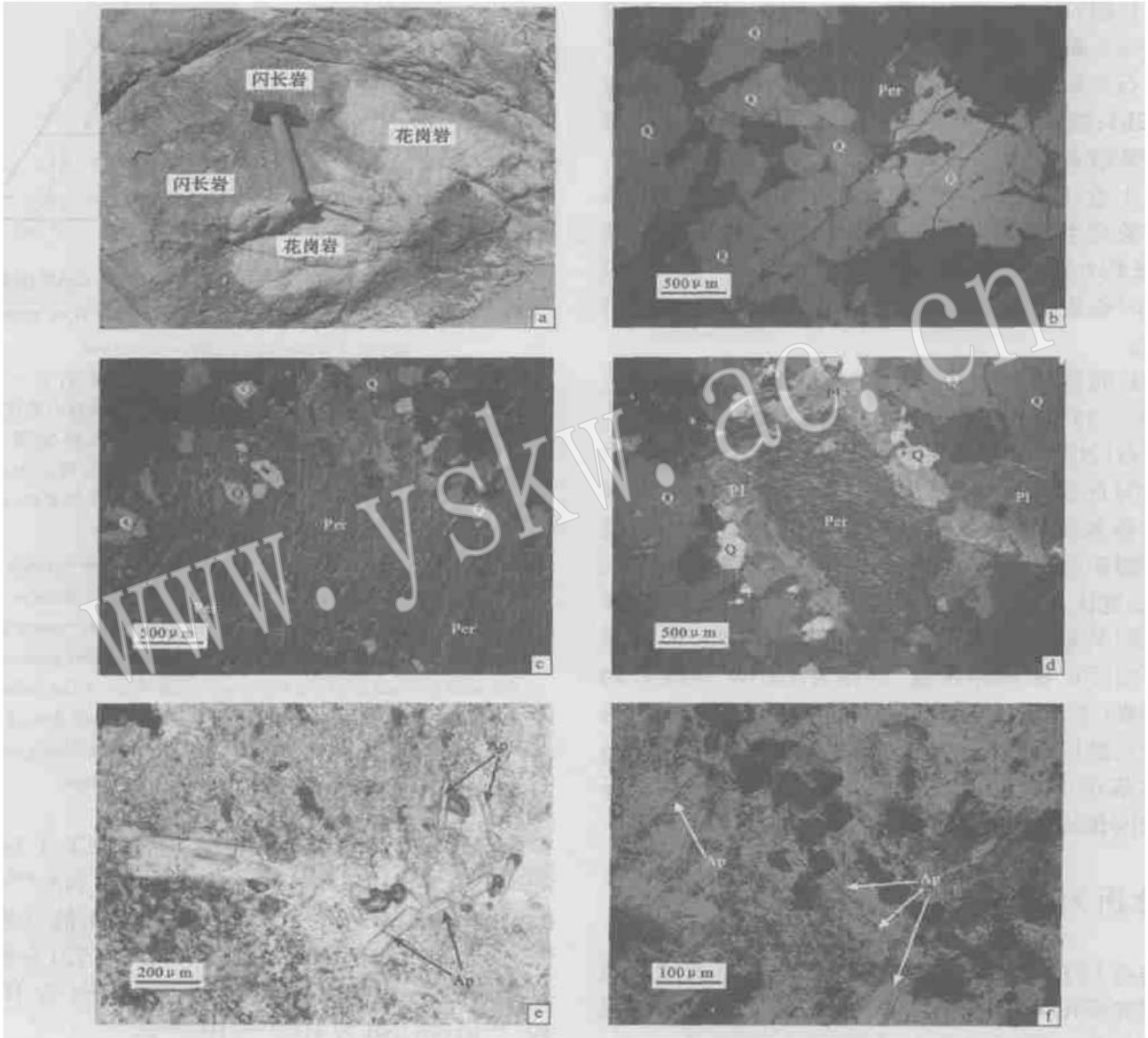


图 2 普陀山花岗岩及其闪长质包体的显微照片

Fig. 2 Microphotos of the Putuoshan granite and their dioritic enclaves

a—浅色花岗岩与深色闪长岩呈塑性相互穿插; b—寄主花岗岩中的石英碎斑及熔蚀结构, 正交偏光; c—寄主花岗岩中微纹长石边缘或内部的珠状石英, 正交偏光; d—寄主花岗岩中微纹长石的斜长石增生边, 正交偏光; e—寄主花岗岩中呈短柱状的磷灰石, 单偏光;

f—闪长质包体中的针状、细长柱状磷灰石, 正交偏光

Q—石英; Per—微纹长石; Pl—斜长石; Ap—磷灰石

a—plastic interfingering between leucogranites and meladiorites; b—quartz porphyroclasts and corrosion texture in host granites (crossed nicols); c—pearlitic quartz developed in the margin or interior of microperthite in host granites (crossed nicols); d—microperthite mantled by overgrowth plagioclase in host granites (crossed nicols); e—short prismatic apatites in host granites (plane polarized light); f—acicular or slender prismatic apatites in dioritic enclaves (crossed nicols); Q—quartz; Per—microperthite; Pl—plagioclase; Ap—apatite

寄主岩细,与寄主岩接触处可见冷凝边,部分包体中还可见到与寄主岩中相似的钾长石斑晶。在大乘庵西北侧山顶可见晚侏罗世西山头组火山岩的残留顶盖,说明岩体剥蚀程度不深。

寄主黑云母钾长花岗岩为中粗粒似斑状结构,组成矿物主要为石英(30%~35%)、微纹长石(50%~55%)、斜长石(10%~15%, $An = 10 \sim 14$)和黑云母(<3%),副矿物有锆石、榍石、磷灰石及钛铁氧化物等。石英斑晶多呈碎斑,且常见“港湾状”的熔蚀边(图2b);微纹长石的条纹主要呈细脉状,在其边缘或内部常散布有珠状石英(图2c),有时还可见斜长石的增生边(图2d),此外偶尔还可见石英与微纹长石呈文象交生,指示岩体定位深度较浅;磷灰石为短柱状,长约0.1~0.2 mm,长宽比约2:1~5:1(图2e),与闪长质包体中呈针状产出的磷灰石(图2f)明显有别。

闪长质包体呈细粒结构,主要组成矿物为斜长石(40%~55%, $An = 31 \sim 35$)、石英(10%~15%)、碱性长石(20%~30%)和角闪石(5%~10%),其中斑晶角闪石多不同程度蚀变。副矿物有榍石、磷灰石及钛铁氧化物等,其中磷灰石是闪长质包体中最主要的副矿物。镜下观察磷灰石晶体呈细长柱状、针状,长宽比一般大于10,最高可达20(图2f),这种结构说明其形成于淬冷、快速结晶的环境。根据显微镜下实际矿物估测含量,并结合CIPW标准矿物计算结果(主要对闪长质包体,因其颗粒细小难以目测含量),然后利用QAP分类图投影,可见寄主花岗岩基本落在正常花岗岩区,而闪长质包体则落在石英二长闪长岩及石英二长岩区(图3)。

2 分析方法

锆石U-Pb同位素定年在国土资源部天津地质矿产研究所用VG_354质谱仪测定,详细的分析过程见陆松年和李惠民(1991),全流程本底Pb为0.050 ng, U为0.002 ng,数据使用ISOPLOT软件进行处理。主量元素在南京大学现代分析中心用XRF方法测定,相对标准样品的偏差,高含量氧化物小于2%,低含量氧化物小于10%。微量元素(包括稀土元素)在南京大学成矿作用国家重点实验室用ICP-MS方法分析,精度优于10%。Sr、Nd同位素组成在中国科学院地质与地球物理研究所用VG354质谱测定,详细的分析方法见Zhang等(2001),在本文

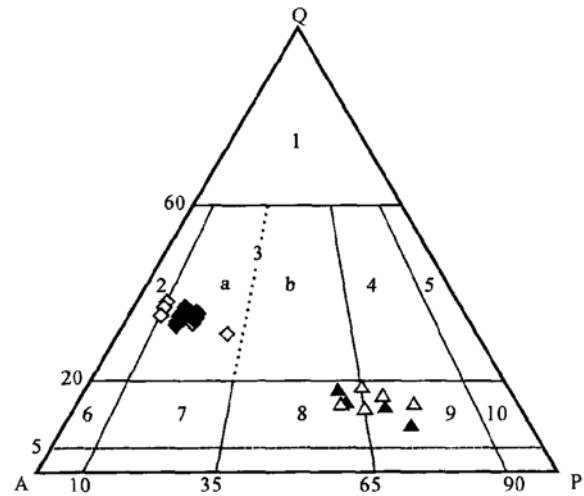


图3 普陀山杂岩体寄主花岗岩与包体QAP图解
Fig. 3 QAP diagram for enclaves and their host granites in the Putuoshan granitic complex

1—富石英花岗岩; 2—碱性长石花岗岩; 3a—花岗岩; 3b—二长花岗岩; 4—花岗岩闪长岩; 5—英云闪长岩; 6—碱性长石石英正长岩; 7—石英正长岩; 8—石英二长岩; 9—石英二长闪长岩/石英二长辉长岩; 10—石英闪长岩/石英辉长岩; 图中实心符号样品为本文资料,空心符号样品引自邱检生等(1999)及课题组未刊资料; 菱形为寄主花岗岩,三角形为闪长质包体

1—quartz rich granite; 2—alkali feldspar granite; 3a—granite; 3b—adamellite; 4—granodiorite; 5—tonalite; 6—alkali feldspar quartz syenite; 7—quartz syenite; 8—quartz monzonite; 9—quartz monzodiorite/quartz monzogabbro; 10—quartz diorite/quartz gabbro; Data of the solid symbols are from this study, and those of the hollow ones from Qiu Jiansheng *et al.* (1999) and the unpublished data of the research group of this project; The diamonds represent host granites, and the triangles represent dioritic enclaves

样品分析过程中,该仪器测定的BCR_1标样的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.705\,015 \pm 15 (2\sigma)$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\,615 \pm 8 (2\sigma)$, Sr和Nd同位素比值分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.119\,4$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721\,9$ 进行质量分馏校正,实验室全流程本底: Rb、Sr为 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ g; Sm、Nd为 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ g。

3 年代学

表1列出了普陀山杂岩体不同期次岩石的锆石U-Pb同位素定年结果。由表中数据可看出,梵音洞石英闪长玢岩两个锆石颗粒的3组表面年龄均十分接近,在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 图解中,样品点投影在U-Pb谐和线上(图4a),说明样品中放射成因铅

表 1 普陀山杂岩体锆石 U_Pb 同位素定年结果

Table 1 Zircon U_Pb dating results of the Putuoshan complex

点号	锆石特征	质量 (μg)	浓度		样品中 普通铅 含量 (ng)	同位素原子比					表面年龄(Ma)		
			U ($\mu\text{g/g}$)	Pb ($\mu\text{g/g}$)		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$
1	无色透明 长柱状晶体	20	653	23	0.09	267	0.145 7	0.026 94 \pm 56	0.183 8 \pm 57	0.049 50 \pm 104	171.3	171.4	171.4
2	无色透明 短柱状晶体	20	1 112	37	0.13	316	0.120 9	0.026 92 \pm 38	0.183 9 \pm 36	0.049 56 \pm 62	171.2	171.4	171.2
锆石样品选自梵音洞石英闪长玢岩, 2 个颗粒锆石样品 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄统计权重平均值为 171.3 \pm 3.3 Ma。													
3	无色透明 不规则状晶体	20	1 296	33	0.15	131	1.225	0.009 98 \pm 25	0.065 1 \pm 27	0.047 3 \pm 15	64.0	64.1	64.8
4	黄褐色透明 短柱状晶体	30	2 255	74	0.25	310	0.910 6	0.017 24 \pm 17	0.114 7 \pm 14	0.048 25 \pm 33	110.2	110.3	111.8
锆石样品选自岗墩石英二长闪长岩包体, 4 号颗粒锆石样品 U_Pb 同位素年龄为 110.2 \pm 1.1 Ma。													
5	浅黄色 短柱状晶体	20	2 467	42	0.014	2 078	0.288 9	0.014 57 \pm 9	0.096 17 \pm 494	0.047 86 \pm 231	93.26	93.23	92.51
6	无色透明 细长柱状晶体	30	1 582	27	0.021	1 315	0.253 9	0.014 67 \pm 8	0.096 94 \pm 595	0.047 94 \pm 281	93.58	93.95	96.46
锆石样品选自师石晶洞钾长花岗岩, 2 个颗粒锆石样品 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄统计权重平均值为 93.6 \pm 0.4 Ma。													

基本没有扩散丢失。由于年轻锆石的 ^{206}Pb 和 ^{238}U 丰度较高, 其比值容易测准, 且受扣除实验空白及样品中初始普通铅的影响较小, 因此样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值精度较高。由两个锆石颗粒计算出梵音洞石英闪长玢岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄统计权重平均值为 171.3 \pm 3.3 Ma, 这一年龄代表了该期岩石的侵位年龄。石英二长闪长质包体一个锆石颗粒的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 110.2 \pm 1.1 Ma, 另一颗粒为 64.0 \pm 1.7 Ma, 它们均投影在 U_Pb 一致曲线上(图 4b)。根据前人测得的区内主体岩性——黑云母钾长花岗岩的全岩 Rb_Sr 年龄为 107.4 \pm 2.7 Ma^①, 以及闪长质包体呈塑变形态, 同时可见闪长质包体与黑云母钾长花岗岩相互穿截或包裹的现象, 说明二者形成时代相同或相近, 因此, 笔者认为 110.2 \pm 1.1 Ma 应代表包体的定位年龄。较新的 64.0 \pm 1.7 Ma 年龄其地质意义尚不十分明确, 但最可能为后期热液作用形成的新生锆石年龄。晶洞钾长花岗岩两个锆石颗粒的 3 组表面年龄也较接近, 投影点也落在 U_Pb 谱和线上(图 4c), 由两个样品计算所得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄统计权重平均值为 93.6 \pm 0.4 Ma, 代表了岩石的侵位年龄。因此, 普陀山杂岩体存在 3 期岩浆侵位活动, 自早至晚分别为石英闪长

玢岩、黑云母钾长花岗岩和晶洞钾长花岗岩。

4 地球化学

表 2 列出了普陀山杂岩体中寄主黑云母钾长花岗岩和暗色闪长质包体代表性样品的主量、微量及稀土元素测定结果。

4.1 主量元素

普陀山杂岩体中寄主花岗岩的主量元素特征可归结为: (1) 高硅, SiO_2 含量多在 76% 以上; 富碱, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 值均大于 8.50%。(2) 富钾($\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.10 \sim 1.21$), 与典型 I 型花岗岩相对富钠的特征有一定的区别; Fe、Mg、Ca、Ti 和 P 等氧化物的含量明显偏低。(3) 碱铝指数(AKI) 较高(> 0.90), 铝饱和指数(A/CNK) 变化于 0.95~1.02 之间, 部分样品 CIPW 标准矿物中出现少量刚玉分子, 属准铝或弱过铝质。(4) 分异演化程度高, 分异指数(DI) 介于 96.1~97.2 之间。寄主花岗岩主量元素特征与 Barbarin (1999) 总结的产于从挤压转变成拉张过程中的富钾钙碱性花岗岩(KCG) 相似。

① 浙江省宁波地质勘查大队, 1995. 1: 5 万舟山幅区调报告.

表2 普陀山寄主花岗岩及闪长质包体主量、微量及稀土元素含量

Table 2 Major, trace and rare earth element contents of the host granites and dioritic enclaves from the Putuoshan complex

岩性	寄主花岗岩						闪长质包体				
	样号	03P_10	03P_11	03P_13	03P_14_3	03P_15	03P_17	03P_7_1	03P_14_4	P_8	P_9
主量元素($w_B/\%$)											
SiO ₂	76.87	77.53	76.61	77.13	75.75	76.93	54.92	57.89	60.52	59.02	
TiO ₂	0.12	0.10	0.13	0.12	0.13	0.11	1.66	1.32	0.69	0.81	
Al ₂ O ₃	12.47	12.42	12.48	12.59	12.71	12.82	15.12	15.83	17.20	16.16	
FeO _t	0.63	0.59	0.77	0.77	0.82	0.75	7.55	7.54	5.13	6.70	
MnO	0.05	0.05	0.05	0.03	0.06	0.08	0.17	0.14	0.16	0.47	
MgO	0.01	0.01	0.05	0.03	0.06	0.07	3.16	2.36	1.95	3.12	
CaO	0.45	0.40	0.64	0.41	0.81	0.56	5.24	5.28	4.90	5.07	
Na ₂ O	4.02	3.88	4.08	4.20	4.06	4.13	3.02	4.11	4.74	4.81	
K ₂ O	4.80	4.69	4.50	4.67	4.81	4.72	3.15	2.63	2.36	1.44	
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.84	0.60	0.38	0.24	
烧失	0.37	0.64	0.20	0.37	0.70	0.44	3.46	1.49	1.66	1.36	
Total	99.43	99.68	99.32	99.96	99.22	100.18	98.29	99.19	99.69	99.20	
ALK	8.82	8.57	8.58	8.87	8.87	8.85	6.17	6.74	7.10	6.25	
K/Na	1.19	1.21	1.10	1.11	1.18	1.14	1.04	0.64	0.50	0.30	
AKI	0.95	0.92	0.93	0.95	0.94	0.93	0.55	0.61	0.60	0.59	
A/CNK	0.99	1.02	0.98	0.99	0.95	0.99	0.84	0.82	0.89	0.86	
D. I.	97.2	97.0	96.2	97.1	96.1	96.2	58.2	66.8	63.4	56.7	
微量元素($w_B/10^{-6}$)											
Rb	164	168	154	145	205	160	114	89	97	71	
Sr	30	45	58	108	49	54	1024	619	737	390	
Ba	189	148	257	202	232	214	1145	773	679	403	
Th	22.14	25.76	21.41	23.24	23.17	24.50	9.82	11.71	6.30	9.20	
U	3.18	3.54	2.70	3.51	6.28	4.32	1.77	2.22	/	0.60	
Nb	16.45	21.12	13.85	15.01	20.96	22.56	15.80	12.41	10.48	13.24	
Ga	14.84	15.27	14.81	13.63	15.51	15.34	19.69	20.85	21.30	20.30	
Zr	95.04	77.45	90.94	91.19	83.34	85.22	281.74	216.76	159.00	174.00	
Y	14.75	17.74	14.46	11.79	16.81	16.07	30.92	28.80	26.50	23.50	
Sc	2.30	2.16	2.55	2.44	2.57	2.36	18.39	19.34	8.36	15.53	
V	3.17	3.30	5.71	4.26	5.40	4.56	175.38	191.20	52.00	143.00	
Co	0.38	0.42	1.09	0.48	0.91	0.72	17.22	17.49	/	6.90	
Ni	2.14	2.08	12.88	2.83	4.07	5.93	1.30	6.06	3.90	8.50	
Rb/Sr	5.47	3.73	2.66	1.34	4.18	2.96	0.11	0.14	0.13	0.18	
Rb/Ba	0.87	1.14	0.60	0.72	0.88	0.75	0.10	0.12	0.14	0.18	
La/Nb	1.80	1.15	2.38	1.84	1.59	1.05	3.28	3.37	3.19	2.19	
Ba/Nb	11.49	7.01	18.56	13.46	11.07	9.49	72.47	62.29	64.79	30.44	
10 ⁴ Ga/Al	2.25	2.32	2.24	2.04	2.31	2.26	2.46	2.49	2.34	2.31	
稀土元素($w_B/10^{-6}$)											
La	29.53	24.29	32.91	27.67	33.24	23.70	51.80	41.86	33.47	28.98	
Ce	54.24	44.29	62.66	52.00	64.22	45.25	100.24	78.50	74.30	59.25	
Pr	5.66	4.76	5.90	5.32	6.19	4.47	12.61	10.00	10.07	6.71	
Nd	18.41	15.83	18.67	16.95	19.96	14.80	51.37	40.27	45.30	24.65	
Sm	3.00	3.11	2.98	2.95	3.38	2.66	9.52	7.55	7.86	5.27	
Eu	0.33	0.27	0.38	0.31	0.36	0.29	2.31	1.91	1.60	0.95	
Gd	2.27	2.37	2.19	2.10	2.56	2.20	7.54	6.34	6.17	4.77	
Tb	0.38	0.45	0.37	0.34	0.47	0.41	1.10	0.99	0.92	0.66	
Dy	2.26	2.81	2.25	1.92	2.78	2.50	6.09	5.42	4.80	3.49	
Ho	0.49	0.61	0.49	0.41	0.59	0.56	1.22	1.11	0.96	0.72	
Er	1.42	1.75	1.40	1.16	1.72	1.59	3.05	2.84	2.61	2.03	
Tm	0.25	0.32	0.24	0.21	0.29	0.30	0.46	0.45	0.39	0.32	
Yb	1.71	2.14	1.71	1.47	2.03	1.89	2.86	2.75	2.40	2.20	
Lu	0.28	0.34	0.28	0.24	0.32	0.30	0.43	0.43	0.35	0.31	
ΣREE	120.23	103.34	132.43	113.05	138.11	100.92	250.60	200.42	191.20	140.31	
LR/HR	12.27	8.58	13.83	13.40	11.84	9.35	10.02	8.86	9.28	8.68	
(La/Yb) _N	12.39	8.14	13.80	13.50	11.75	8.99	12.99	10.92	10.00	9.45	
δEu	0.37	0.29	0.43	0.36	0.36	0.36	0.81	0.82	0.68	0.57	
$t_{Zircon}/^{\circ}C$	742	729	737	738	726	733	779	727	745	745	

ALK= Na₂O+ K₂O; K/Na= K₂O/Na₂O; AKI= (Na₂O+ K₂O)/Al₂O₃(分子比); A/NCK= Al₂O₃/(Na₂O+ K₂O+ CaO)(分子比); D. I—分异指数; t_{Zircon} 为据 Watson 和 Harrison (1983) 方法计算的锆石饱和温度。

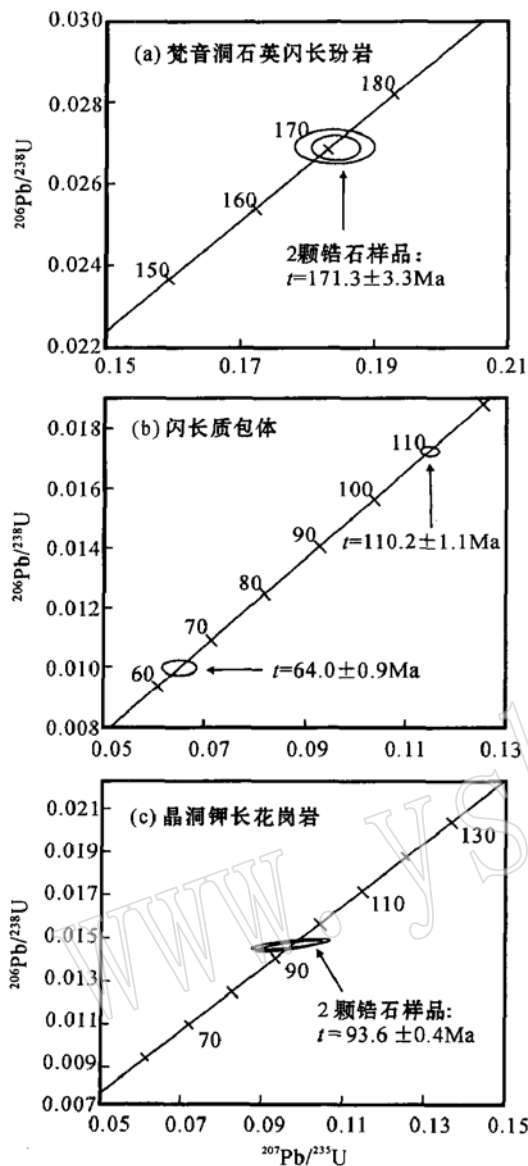


图 4 普陀山杂岩体锆石 U-Pb 同位素年龄谱和图
Fig. 4 U-Pb concordia diagrams for zircons of the Putuoshan complex

闪长质包体的主量元素特征与寄主岩相比有较大差别, 主要表现在相对贫硅 ($\text{SiO}_2 = 54.92\% \sim 60.52\%$), 富 Fe、Mg、Ca、Ti 等, 全碱含量偏低 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 6.17\% \sim 7.10\%$), 多数样品 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, 铝含量也偏低 ($A/\text{CNK} = 0.82 \sim 0.89$), 碱铝指数 (AKI) 变化于 0.55~0.60 之间, 为亚碱准铝质, 属于较典型的钙碱性岩石。

包体和寄主岩的主要氧化物比值之间表现出良好的协变关系(图 5), 暗示它们在成因上可能存在密切的联系, 如, 在同分母氧化物比值协变图

($\text{K}_2\text{O}/\text{CaO} - \text{SiO}_2/\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$, 图 5a、b) 上表现为线性相关, 在多元素不同分母比值图解 ($\text{K}_2\text{O}/\text{CaO} - \text{FeO}^T/\text{SiO}_2$ 、 $\text{FeO}^T/\text{K}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$, 图 5c、d) 上表现为双曲线演化关系, 上述特征指示包体与寄主岩之间很可能发生过岩浆混合作用(Langmuir, 1978)。

4.2 微量及稀土元素

寄主花岗岩富 Rb、Th, 贫 Sr、Ba、P、Ti, 亲铁元素(如 Co、Ni 等)显著亏损, Rb/Sr、Rb/Ba 比值高(分别为 1.34~5.47 及 0.72~1.14), 上述特征充分显示岩石为高程度演化岩浆结晶的产物, 其 Sr、Ba、P、Ti 显著亏损的特征指示岩浆经历了较强的斜长石、磷灰石和钛铁矿的分离结晶作用。岩石的 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素含量较低, $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 值低于 A 型花岗岩的下限值(2.6, Whalen *et al.*, 1987), 表明其不具备 A 型花岗岩富 Ga 和高场强元素的地球化学特征。寄主花岗岩的稀土元素总量也相对偏低 ($\Sigma\text{REE} = 100.92 \times 10^{-6} \sim 138.11 \times 10^{-6}$), 富轻稀土元素(LR/HR = 8.58~13.83), (La/Yb)_N = 8.14~13.80, 具中等至强的铕负异常($\delta\text{Eu} = 0.29 \sim 0.43$, 表 2), 稀土元素配分曲线呈右倾型(图 6)。上述特征总体与纽芬兰东部阿克利分异的 I 型花岗岩(Chappell & White, 1992) 以及我国东北部的高演化 I 型花岗岩(Wu *et al.*, 2003) 相似。因此, 寄主花岗岩应属于高分异的 I 型花岗岩。

与寄主岩相比, 闪长质包体相对贫 Rb, 富 Sr、Ba, 其 P、Ti 的亏损也不及寄主岩显著(图 7), V、Co、Ni 含量偏高, Rb/Sr 比值变化于 0.11~0.18 之间, 高于原始地幔值(0.025, Hofmann, 1988)。La/Nb 及 Ba/Nb 比值分别为 2.19~3.37 和 30.44~72.47, 较之原始地幔、洋脊玄武岩及洋岛玄武岩的相应值(Jahn *et al.*, 1999) 均偏高, 表明其应为幔源基性岩浆经改造的产物, 即极可能为由基性岩浆经演化或与酸性岩浆混合产生的过渡岩浆结晶形成。

闪长质包体稀土元素总量 ($140.31 \times 10^{-6} \sim 250.60 \times 10^{-6}$) 较寄主岩高, 表明其不是寄主岩浆早期结晶分异产物的堆积体, 因为 REE 为强不相容元素, 若闪长质包体是花岗质岩浆结晶分异的产物, 则其 REE 含量应该较寄主花岗岩低, REE 配分曲线也应当位于寄主花岗岩的下方。其铕负异常不及寄主花岗岩明显(0.57~0.82, 表 2, 图 6), 说明成岩过程中斜长石的分离结晶作用不显著。

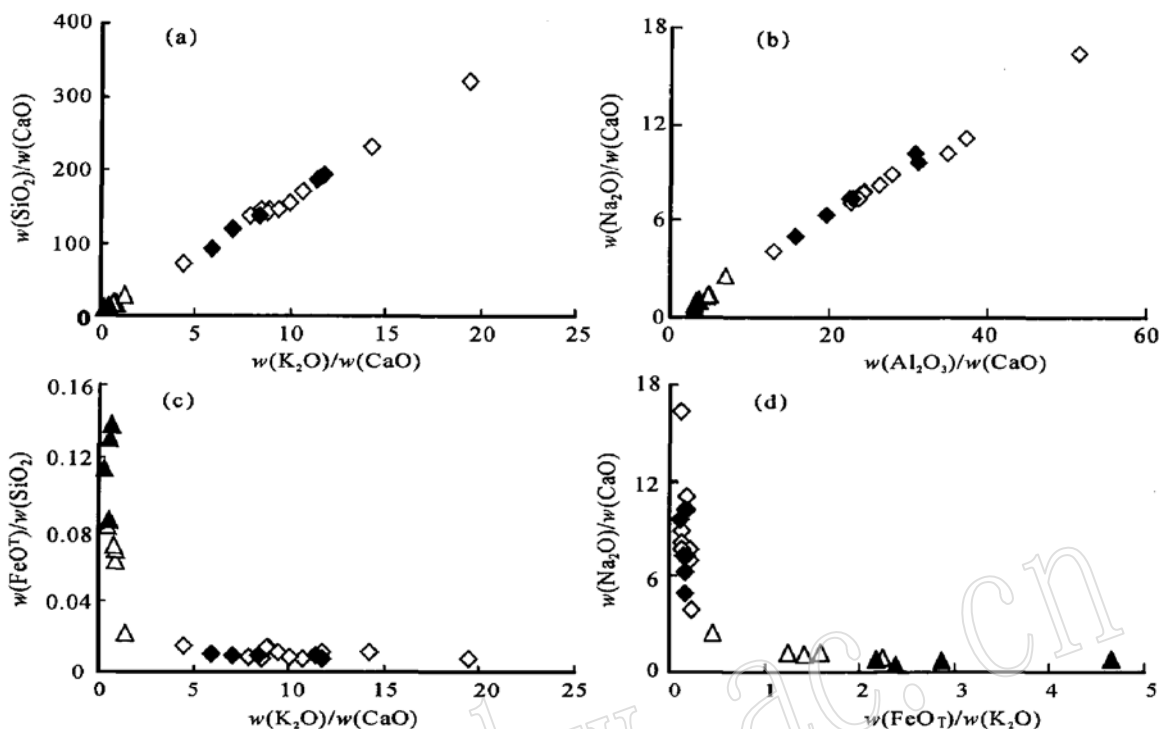


图5 普陀山寄主花岗岩及闪长质包体主要元素协变图解

Fig. 5 Covariant diagram for major elements of dioritic enclaves and their host granites in the Putuoshan complex

图例及资料来源同图3

Legends and data sources as for Fig. 3

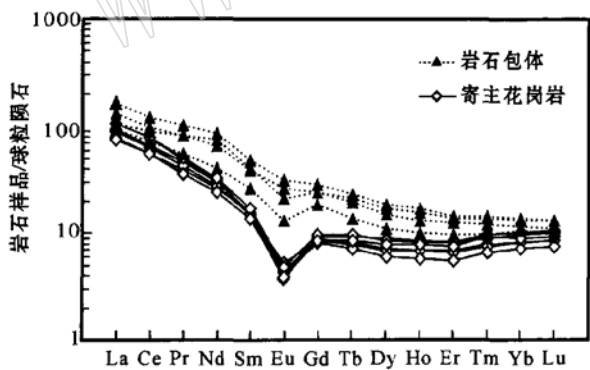


图6 普陀山杂岩体寄主花岗岩及闪长质包体
稀土元素球粒陨石标准化配分型式

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of dioritic enclaves
and their host granites from the Putuoshan complex

球粒陨石数据引自 Boynton (1984)

Chondrite values from Boynton (1984)

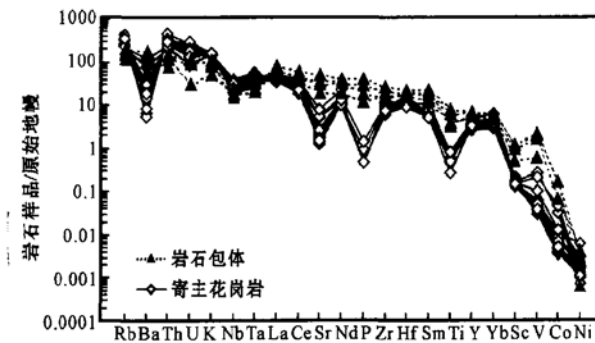


图7 普陀山杂岩体寄主花岗岩及闪长质包体
微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 7 Primitive mantle-normalized spidergrams of
trace elements for dioritic enclaves and their
host granites from the Putuoshan complex

原始地幔数据引自 Sun & McDonough (1989)

Primitive mantle values from Sun & McDonough (1989)

尽管包体与寄主岩在微量元素和稀土元素含量及相关元素比值方面存在着差异,但在一些微量元素三元素共分母比值图解(如 $Zr/Sr-La/Sr$, $Zr/Sr-$

Ce/Sr , $Rb/Sr-Ce/Sr$, $Rb/Sr-Y/Sr$, 图8)上二者同样呈现较显著的线性相关,也说明包体与寄主岩之间发生过岩浆混合作用(Langmuir, 1978)。

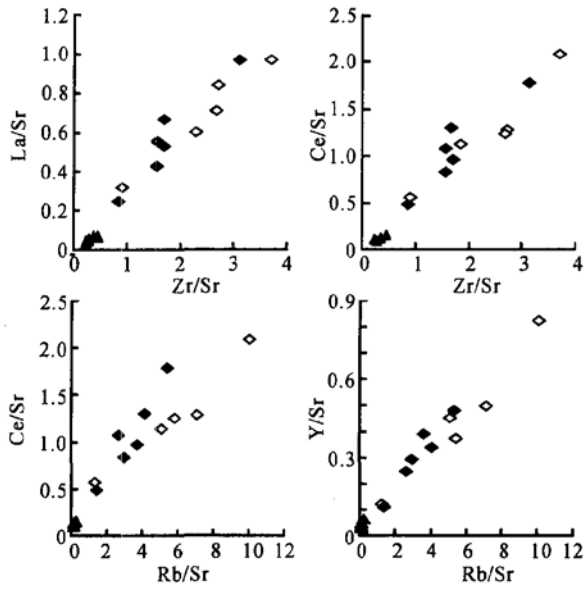


图 8 普陀山杂岩体寄主花岗岩及闪长质包体微量元素共分母三元素比值图解

Fig. 8 Covariant diagram of trace element ratios for dioritic enclaves and their host granites from the Putuoshan complex

图例及资料来源同图 3

Legends and data sources as for Fig. 3

4.3 Sr-Nd 同位素

闪长质包体和寄主花岗岩的 Sr-Nd 同位素组成较接近, 二者的 I_{Sr} 和 $\epsilon Nd(t)$ 值分别为 0.708 320~0.708 632、-6.30~-6.60 和 0.706 960~0.707 449、-6.95~-7.12(表 3), 均表现出壳幔混源花岗岩类岩石的 Sr-Nd 同位素组成特征。花岗岩的 I_{Sr} 值略低于闪长质包体的现象极可能是由于岩石具高的 Rb/Sr 比值, 使得年龄对 I_{Sr} 值的校正十分敏感, 且在测试过程中易产生误差所致。在这种情况下, 岩石的 Nd 同位素组成更能有效地示踪岩浆源区性质。在 $\epsilon Nd(t)-t$ 图解中, 二者的投影点位于华南元古代地壳演化域上方(图 9), 指示成岩过程中有幔源组分的参与。

闪长质包体与寄主岩的二阶段 Nd 模式年龄分别为 1.42~1.44 Ga 和 1.47~1.49 Ga(表 3), 较之华夏地块基底变质岩的 Nd 模式年龄(主要为早元古代, 沈渭州等, 1993)明显偏低, 而与浙闽东部地区新生地壳的形成年龄范围(约为 1.5~1.8 Ga, 陈江峰等, 1999)较为接近, 包体与寄主岩明显偏低的 t_{DM} 年龄同样指示幔源组分参与了成岩过程。据陈江峰等(1999)研究, 我国东南部闽台地区岩浆岩的 t_{DM} 年龄最低, 这一特征被认为是该区在燕山晚期发生

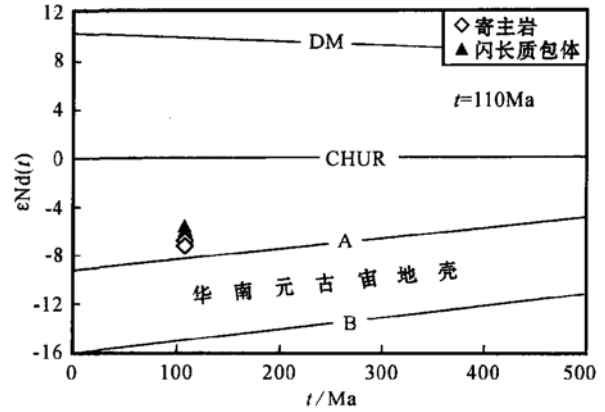


图 9 普陀山杂岩体寄主花岗岩及闪长质包体 $\epsilon Nd(t)-t$ 关系图

Fig. 9 $\epsilon Nd(t)-t$ diagram of the dioritic enclaves and their host granites from the Putuoshan complex
A—成熟度较低的元古宙地壳; B—成熟度较高的元古宙地壳; DM—亏损地幔; 底图引自沈渭洲等(1993)
A—Proterozoic crust with low maturity; B—Proterozoic crust with high maturity; DM—depleted mantle
Base map quoted from Shen Weizhou et al. (1993)

过强烈的壳幔相互作用, 新的幔源物质加入地壳的直接表现。选择华南上地壳和亏损地幔作为混合端员, 利用刘昌实等(1990)和 Faure(1986)提供的二端员参数, 并将二端员的 Sr-Nd 同位素组成校正到岩石形成时($t=110$ Ma)的相应值, 再按简单的二元混合模型拟合混合曲线, 可以看出闪长质包体和寄主花岗岩的投影点十分靠近混合线(图 10), 二者地幔物质的卷入比例相近, 分别为 46%~48% 和 44%~45%。

5 普陀山花岗质杂岩中的岩浆混合作用及其成因机制

普陀山暗色微粒包体不含富铝的特征变质矿物, 不发育变晶结构和片理构造等变质岩的组构特征, 缺乏含水矿物的脱水残留相, 表明包体不是基底变质岩的难熔残留物。其 Rb/Sr、La/Nb 及 Ba/Nb 比值较高的特征也反映它们不是岩浆中早期晶出矿物的“堆积体”。包体多呈浑圆状或透镜状的塑变形态, 少数表现出“撕扯状”或“火焰状”的形态特征, 部分地段(如虬虎沙)可见深色闪长质岩石与寄主花岗岩相互穿插和包裹的现象, 显示二者具同时或近时性。单个包体与寄主岩接触界线清晰, 可见冷凝边

表 3 普陀山杂岩体寄主花岗岩及闪长质包体 Sr、Nd 同位素组成

Table 3 Sr、Nd isotopic compositions of dioritic enclaves and their host granites in the Putuoshan complex

样品号	岩性	Rb/Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	I_{Sr}	$\epsilon\text{Sr}(t)$	Sm/Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon\text{Nd}(t)$	t_{DM}/Ga
03P_7_1	闪长质包体	0.107	0.307 9	0.709 113 ± 14	0.708 632	60.47	0.186	0.112 6	0.512 239 ± 9	- 6.60	1.44
03P_14_4	闪长质包体	0.138	0.397 2	0.708 941 ± 13	0.708 320	56.05	0.191	0.115 9	0.512 257 ± 10	- 6.30	1.42
03P_13	寄主花岗岩	2.962	8.5110	0.720 265 ± 14	0.706 960	36.75	0.160	0.097 0	0.512 210 ± 12	- 6.95	1.47
03P_14_3	寄主花岗岩	1.574	4.525 0	0.714 523 ± 15	0.707 449	43.69	0.171	0.103 7	0.512 206 ± 16	- 7.12	1.49

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 所示的 2 σ 误差为小数点后的最后位数, 为减少 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 变化对 Nd 模式年龄计算产生的影响, 表中所列 t_{DM} 年龄统一采用二阶段模式计算, 表中与时间有关的参数 I_{Sr} 、 $\epsilon\text{Sr}(t)$ 、 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 和 t_{DM} 均采用 $t = 110 \text{ Ma}$ 计算。

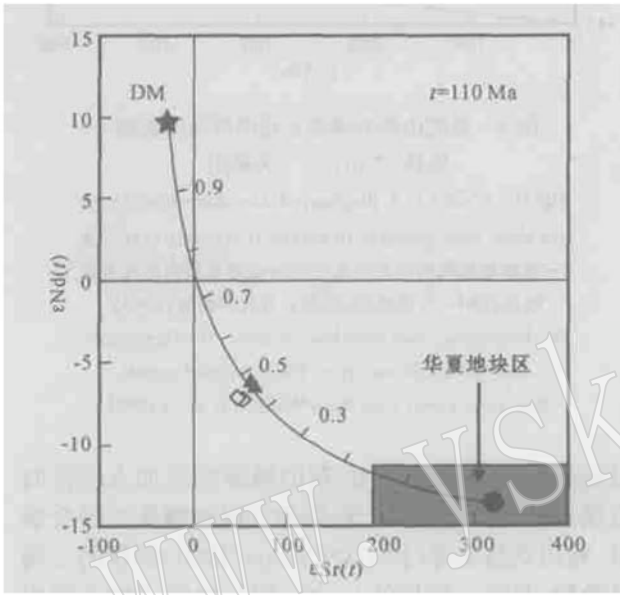


图 10 普陀山杂岩体寄主花岗岩及闪长质包体 $\epsilon\text{Nd}(t) - \epsilon\text{Sr}(t)$ 关系图

Fig. 10 $\epsilon\text{Nd}(t) - \epsilon\text{Sr}(t)$ diagram of dioritic enclaves and their host granites from the Putuoshan granitic complex

图例同图 9; DM—亏损地幔; 华夏地区 Sr、Nd 同位素组成变化范围引自沈渭洲等(1995)

Legends as for Fig. 9; DM—depleted mantle; the range of Sr, Nd isotopic compositions for the Cathaysia Block quoted from Shen Weizhou *et al.* (1995)

及横跨包体与寄主岩的长石斑晶。包体中针状磷灰石发育, 长宽比一般大于 10, 最高可达 20, 这与寄主岩中呈短柱状的磷灰石迥然不同。实验结果表明, 快速冷却条件下结晶的磷灰石, 晶体沿 c 结晶轴方向最发育, 其长宽比最高可达 20 (Wyllie *et al.*, 1962)。包体中磷灰石呈针状产出表明其快速结晶于较大温度梯度条件下, 而寄主岩中短柱状的磷灰石则显示其经历了相对缓慢的结晶过程。此外, 包体中还可见因熔蚀而呈“港湾状”形态的石英碎斑, 以及微纹长石斑晶的斜长石增生边, 这些特征是成岩过程中发生过岩浆混合作用的直接证据 (Baxter

& Feely, 2002), 因此, 普陀山花岗质杂岩体中的深色闪长质包体应为岩浆混合作用的产物。前述包体与寄主岩元素或元素比值的演变关系(如共分母三元素比值图解呈良好的线性相关, 多元素不共分母元素比值图解呈双曲线演变趋势等)均支持这一认识。根据 Watson & Harrison(1983)方法, 笔者计算了普陀山寄主花岗岩与包体的锆石饱和温度(表 2), 可以看出, 寄主岩与包体具有相近的锆石饱和温度, 主要变化于 720~750 °C 之间, 说明混合的二端员岩浆达到了热平衡。由于两种熔体间同位素的扩散不需要改变熔体的结构, 同位素交换比化学成分的交流容易得多 (Leshner, 1990)。因此, 包体与寄主岩 Sr、Nd 同位素组成相近而元素组成存在较显著差别的特征也可用岩浆混合的观点得到合理的解释。

岩石学及地球化学的综合研究表明, 普陀山黑云母钾长花岗岩及其中发育的暗色闪长质包体不是由简单的基底地壳物质部分熔融形成, 而是壳幔作用与岩浆混合作用的产物。区内构造演化研究资料显示, 在早白垩纪晚期, 太平洋洋壳朝东亚陆缘拼贴增生, 在中国东南沿海形成长乐-南澳大型左旋走滑韧性剪切带 (Faure *et al.*, 1989), 紧随其后是东亚陆缘区发生的伸展-减薄活动, 形成一系列 NE-NNE 向的断陷盆地群 (舒良树等, 2002)。地壳的伸展拉伸有利于幔源基性岩浆底侵, 在底侵基性岩浆带来的热的影响下, 促使地壳物质的部分熔融。新的幔源物质加入, 导致该区在燕山晚期发生一期较小规模的地壳垂向生长, 岩体较低的 Nd 模式年龄也证明了这种可能。当来自地幔的温度高、粘度小的基性岩浆注入到已部分结晶的长英质岩浆中时, 由于两种共存岩浆之间存在较大的温度差和粘度差, 使得彼此之间不能发生完全的化学混合形成均一的岩浆, 而主要表现为机械混合 (Fernandez & Barbarin, 1991), 这时未完全均匀混合的囊状或液粒状基性岩浆在长英质岩浆中淬冷结晶即形成微粒包体。因

此, 普陀山花岗质杂岩中的深色闪长质包体是在伸展-引张构造背景下, 由幔源基性岩浆及其诱发的壳源长英质岩浆混合作用的产物。

6 结 论

(1) 普陀山岩体为一多期岩浆活动形成的杂岩体, 主要岩浆活动有3期, 自早至晚分别为石英闪长玢岩(约170 Ma)、黑云母钾长花岗岩(约110 Ma)和晶洞钾长花岗岩(约90 Ma)。

(2) 普陀山岩体主体岩性——黑云母钾长花岗岩为高演化的I型花岗岩, 地球化学上具有高硅、富碱、相对富钾、准铝或弱过铝、分异演化程度高、富轻稀土和大离子亲石元素(K、Rb、Th等), 以及亏损Sr、Ba、P、Ti和Eu等特征。暗色闪长质包体与寄主岩之间主、微量元素具有混合成因的演化趋势, 二者的Nd同位素组成相似, $\epsilon Nd(t)$ 值分别为-6.30~-6.60和-6.95~-7.12, 均为壳幔混源岩浆结晶的产物。

(3) 闪长质包体地质地球化学特征综合显示其应为伸展-引张构造背景下, 由幔源基性岩浆及其诱发的壳源长英质岩浆混合作用的产物。

致 谢: 本项研究得到周新民教授的指导, 并承审阅论文初稿, 谨致谢忱!

References

- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments [J]. *Lithos*, 46: 605~626.
- Baxter S and Feely M. 2002. Magma mixing and mingling textures in granitoids: examples from the Galway Granite, Connemara, Ireland [J]. *Mineralogy and Petrology*, 76: 63~74.
- Blake S and Fink J H. 2000. On the deformation and freezing of enclaves during magma mixing [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 95: 1~8.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [A]. Henderson P. *Rare Earth Elements Geochemistry* [C]. Amsterdam: Elsevier, 63~144.
- Castro A, Moreno Ventas I and De La Rosa J D. 1991. H₂ type (hybrid) granitoids: a proposed revision of the granite type classification and nomenclature [J]. *Earth Science Reviews*, 31(3~4): 237~253.
- Chappell B W. 1996. Magma mixing and the production of compositional variation within granite suits: evidence from the granites of southern Australia [J]. *J. Petrol.*, 37(3): 449~470.
- Chappell B W and White A J R. 1992. I₁ and S₁ type granites in the Lachlan Fold Belt [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 1~26.
- Chen Jiangfeng, Guo Xinsheng and Tang Jiafu. 1999. Nd isotopic model ages: implications of the growth of the continental crust of South-eastern China [J]. *J. Nanjing University (Nature Science Edition)*, 35(6): 649~658 (in Chinese with English abstract).
- Didier J and Barbarin B. 1991. *Enclaves and Granite Petrology* [M]. Amsterdam: Elsevier, 625.
- Dong Chuanwan, Li Wuxian, Chen Xiaoming, *et al.* 1998. Late Mesozoic magma mixing in SE Fujian—Petrologic evidence from the Pingtan igneous complex [J]. *Progress in Natural Sciences*, 8(2): 196~201.
- Dong Chuanwan and Peng Yaming. 1992. The features and origin of the enclaves in the Qingtian granite, Zhejiang Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 11(1): 21~30 (in Chinese with English abstract).
- Elburg M A. 1996. Evidence of isotopic equilibration between microgranitoid enclaves and host granodiorite, Warburton Granodiorite, Lachlan Fold Belt, Australia [J]. *Lithos*, 38: 1~22.
- Faure M, Marchadier Y and Rangin C. 1989. Pre-Eocene syn-metamorphic structure in the Mondoro-Romblon-Palawan area, west Philippines, and implications for the history of Southeast Asia [J]. *Tectonics*, 8(5): 963~979.
- Faure G. 1986. *Principles of Isotope Geology* [M]. Jones Willey & Sons, 141~249.
- Fernandez A N and Barbarin B. 1991. Relative rheology of coeval mafic and felsic magmas: nature of resulting interaction processes and shape and mineral fabrics of mafic microgranular enclaves [A]. Didier J & Barbarin B. *Enclaves and Granite Petrology* [C]. Amsterdam: Elsevier, 263~276.
- Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust [J]. *Earth and Planet Sci. Lett.*, 90: 297~314.
- Jahn Bor_ming, Wu Fu_yuan, Lo Ching_hua, *et al.* 1999. Crustal-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr_Nd isotope evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China [J]. *Chem. Geol.*, 157(1~2): 119~146.
- Jiang Xuliang. 1991. A tentative discussion on the geochemical characters and tectonic setting of alkali-rich granites in the coastal area of east Zhejiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 10(2): 144~153 (in Chinese with English abstract).
- Langmuir C H. 1978. A general mixing equation with application to Icelandic basalt [J]. *Earth and Planet Sci. Lett.*, 37: 380~392.
- Leshner C E. 1990. Decoupling of chemical and isotopic exchange during magma mixing [J]. *Nature*, 344: 235~237.
- Li Wuxian, Dong Chuanwan and Zhou Xinmin. 1999. Plagioclase xenocryst and magma mingling in Pingtan and Zhangzhou complexes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 286~290 (in Chinese with English abstract).

- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Wang Rucheng, *et al.* 2003. Origin of Nankunshan aluminous A₁-type granite, Longkou County, Guangdong Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 1~ 10 (in Chinese with English abstract).
- Liu Changshi, Zhu Jinchu, Shen Weizhou, *et al.* 1990. Evolution of continental crust and material source (genesis) of granitoids in south China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 14(2): 125~ 138 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian and Li Huimin. 1991. A precise U-Pb single zircon dating for the volcanics of Dahongyu Formation, Changcheng System in Jixian [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 22: 137~ 146 (in Chinese with English abstract).
- Michelle L, Coombs J C and Eichelberger M J R. 2002. Experimental and textural constraints on mafic enclave formation in volcanic rocks [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 119: 125~ 144.
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi and McInnes B I A. 1999. Geochemistry and petrogenesis of the L₁ and A₁-type composite granite masses in the coastal area of Zhejiang and Fujian Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 237~ 246 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Satoshi Kanisawa, *et al.* 2000. Geochemistry and petrogenesis of aluminous A₁-type granites in the coastal area of Fujian Province [J]. *Geochemica*, 29(4): 313~ 321 (in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Wang Dezi and Liu Changshi. 1995. Isotope geochemical characteristics and material sources of tin-bearing porphyries in south China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 69(4): 349~ 359 (in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Zhu Jinchu, Liu Changshi, *et al.* 1993. Sm-Nd isotopic study of basement metamorphic rocks in south China and its constraint on material sources of granitoids [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(2): 115~ 124 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu and Zhou Xinmin. 2002. Late Mesozoic tectonism of Southeast China [J]. *Geological Review*, 48(3): 249~ 260 (in Chinese with English abstract).
- Silva M M V G, Neiva A M R and Whitehouse M J. 2000. Geochemistry of enclaves and host granite from the Nelas area, central Portugal [J]. *Lithos*, 50: 153~ 170.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunderson A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. *Geol. Soc. Spe. Publ.*, 42, 313~ 345.
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. *Earth. Planet Sci. Lett.*, 64: 295~ 304.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A₁-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407~ 419.
- Wilcox R E. 1999. The ideal of magma mixing: history of a struggle for acceptance [J]. *Geology*, 107: 421~ 432.
- Wu Fuyuan, Jahn Borming, Wilde S A, *et al.* 2003. Highly fractionated L₁-type granites in NE China (I): geochemistry and petrogenesis [J]. *Lithos*, 66: 241~ 273.
- Wyllie P J, Cox K G and Biggar G M. 1962. The habit of apatite in synthetic systems and igneous rocks [J]. *Petrology*, 3(2): 238~ 264.
- Xu Xisheng, Dong Chuanwan, Li Wuxian, *et al.* 1999. Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian, SE China: the significance of the gabbro-diorite-granite association [J]. *Lithos*, 46(2): 299~ 315.
- Zhang H F, Sun M, Lu F X, *et al.* 2001. Geochemical significance of a garnet-ilmenite from the Dahongshan kimberlite, Yangtze Craton, southern China [J]. *Geochem. J.*, 35: 315~ 331.
- Zhou Xinmin, Yao Yupeng and Xu Xisheng. 1992. Quenched enclaves in Daqushan granitoid and their genesis, east Zhejiang, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 8(3): 234~ 242 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈江峰, 郭新生, 汤加富. 1999. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄 [J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 35(6): 649~ 658.
- 董传万, 彭亚鸣. 1992. 浙江青田花岗岩中岩石包体特征及成因 [J]. *岩石矿物学杂志*, 11(1): 21~ 30.
- 蒋叙良. 1991. 浙东沿海富碱花岗岩地球化学特征及其构造环境探讨 [J]. *岩石矿物学杂志*, 10(2): 144~ 153.
- 李武显, 董传万, 周新民. 1999. 平潭和漳州深成杂岩中斜长石捕虏晶与岩浆混合作用 [J]. *岩石学报*, 15(2): 286~ 290.
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 等. 2003. 广东龙口南昆山铝质 A₁-型花岗岩的成因 [J]. *岩石矿物学杂志*, 22(1): 1~ 10.
- 刘昌实, 朱金初, 沈渭洲, 等. 1990. 华南花岗岩物源成因特征与陆壳演化 [J]. *大地构造与成矿学*, 14(2): 125~ 138.
- 陆松年, 李惠民. 1991. 蓟县长城系大红峪组火山岩的单颗粒锆石 U-Pb 法准确定年 [J]. *中国地质科学院院报*, 22: 137~ 146.
- 邱检生, 王德滋, McInnes B I A. 1999. 浙闽沿海地区 I 型 A₁-型复合花岗岩体的地球化学及成因 [J]. *岩石学报*, 15(2): 237~ 246.
- 邱检生, 王德滋, 蟹泽聪史, 等. 2000. 福建沿海铝质 A₁-型花岗岩的地球化学及岩石成因 [J]. *地球化学*, 29(4): 313~ 321.
- 沈渭洲, 王德滋, 刘昌实. 1995. 华南含锡斑岩的同位素地球化学特征与物质来源 [J]. *地质学报*, 69(4): 349~ 359.
- 沈渭洲, 朱金初, 刘昌实, 等. 1993. 华南基底变质岩的 Sm-Nd 同位素及其对花岗岩类物质来源的制约 [J]. *岩石学报*, 9(2): 115~ 124.
- 舒良树, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代构造作用 [J]. *地质论评*, 48(3): 249~ 260.
- 周新民, 姚玉鹏, 徐夕生. 1992. 浙东大衢山花岗岩中淬冷包体及其成因机制 [J]. *岩石学报*, 8(3): 234~ 242.