

胶北地块与金成矿有关的郭家岭岩体和上庄岩体年代学及地球化学研究

罗贤冬^{1,2)}, 杨晓勇¹⁾, 段留安¹⁾, 孙卫东³⁾

1) 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥, 230026;

2) 安徽省勘查技术院, 合肥, 230031; 3) 中国科学院广州地球化学研究所

矿物与成矿重点实验室, 同位素年代学和地球化学重点实验室, 广州, 510640

内容提要:胶东半岛是我国最主要的原生金矿矿集区, 金矿的主要控矿围岩是郭家岭花岗岩, 通过研究郭家岭花岗岩的地球化学特征对研究金矿的成因和物质来源具有指示性意义。本文研究的两个花岗岩岩体为上庄岩体和郭家岭岩体, 两岩体同属郭家岭型花岗岩。通过对两岩体的花岗岩样进行岩相学矿相学观察、全岩主、微量元素和 U-Pb 同位素分析, 获得胶东半岛中生代岩浆岩的成因机制与源区性质及自然金的产出形式等科学信息。LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄得出郭家岭岩体年龄 125.4 ± 2.2 Ma, 上庄岩体 U-Pb 年龄 128.8 ± 2.0 Ma, 都为中生代早白垩世, 两岩体年龄相差 3Ma, 在年龄误差范围来看可以把两岩体作为同一期岩体, 也在年龄角度证实两岩体都同属郭家岭花岗岩。两岩体的锆石组成都含有太古宙和晚侏罗纪的继承锆石, 指示两岩体的成岩物质来源具相似性, 都包含太古宙岩石成分和晚侏罗世花岗岩成分。两岩体具有相似的稀土元素和微量元素分配模式, 表现出明显的 LREE 富集和 HREE 极度亏损, 没有明显的铕负异常。郭家岭岩体和上庄岩体花岗岩都具有类似埃达克岩的特征, 都具有高的 Sr 含量($913 \times 10^{-6} \sim 1325 \times 10^{-6}$), 低的 Y 含量($2.2 \times 10^{-6} \sim 8.4 \times 10^{-6}$)和 Yb 含量($0.21 \times 10^{-6} \sim 0.68 \times 10^{-6}$), 较高的 (Dy/Yb)_N 比值 1.62~2.28, 暗示花岗岩岩浆形成时石榴石是一个重要的残留相, 而没有斜长石作为残留相。两岩体具有较低的 MgO、Cr、Ni 含量和 Mg#, 反映郭家岭型花岗岩岩浆的形成可能是岛弧环境榴辉岩相压力条件下洋壳玄武质岩石的部分熔融。

关键词: 胶北地块; 郭家岭岩体; LA-ICP MS; 埃达克岩; 岛弧

胶东半岛是我国最主要的原生金矿矿集区, 现已探明特大型金矿床 7 处, 大型金矿床 8 处, 中小型金矿床 100 余处, 金总储量占全国现有储量的 1/4 多, 是我国第一大黄金产出集中区。胶东地区金矿的成因一直是国内外矿床地质学界研究和讨论的热点, 虽然有学者曾将其归为前寒武变质热液成因(郭文魁等, 1951; 朱丰三, 1979; 余汉茂, 1987; 沈保丰等, 1994), 但目前普遍认为金矿的形成与中生代构造—岩浆热液活动或碰撞造山作用有密切的联系(Wang L G et al., 1998; 翟明国等, 2001, 2004; Qiu Y M et al., 2002; Zhai M G et al., 2001; Fan H R et al., 2003; 毛景文等, 2005; Yang J H et al., 2003; 陈衍景等, 2004; Chen Y J et al., 2005)。该区已经历了 30 余年的科研工作, 发表了诸多科研论文, 尤其是关于成矿流体研究领域(翟建平等, 1995;

徐九华等, 1996; 卢焕章等, 1999; 沈昆等, 2000; Fan et al., 2003; 胡芳芳等, 2004)。郭家岭花岗岩是胶东花岗岩的一种主要类型。对郭家岭花岗岩来源问题还存在很大争议, 胡世玲等(1987)认为它们是由胶东群偏基性的斜长角闪岩类混合岩化形成的; 徐金方等(1989)通过暗色包体的研究提出了壳幔混合的证据。林景仟等(1992)则认为它们来自于地壳深层胶东群斜长角闪岩类的部分熔融。本文通过研究郭家岭花岗岩的主微量元素组成及成岩年代来对其物质来源和成岩环境进行制约。

1 地质概况和样品采集

胶东地区位于郯庐断裂东侧, 华北板块东部, 滨太平洋成矿带西部中—新生代大陆边缘活动带内, 南以五莲—荣城断裂与大别苏鲁超高压变质带相邻

注: 本文为中国科学院知识创新工程(KZCX1-YW-15, KZCX2-YW-QN509), 国家自然科学基金重点项目(No. 90814008, 41173057)科研项目共同资助。

收稿日期: 2012-09-09; 改回日期: 2014-07-09; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 罗贤冬, 男, 1985 年生。硕士, 矿床地球化学专业; 通讯作者: 杨晓勇, Email: xyyang555@163.com。

(图 1)。传统构造将其划为胶辽台隆(任纪舜等, 1981), 板块—地体构造将其划为胶北地体(曹国权, 1990; 胡受奚等, 2001)。因此, 有学者称为胶北地体(胡受奚等, 1992), 而部分学者称其五莲—荣城断裂以南为胶南地体(曹国权, 1990)。胶东地区广泛发育郯庐断裂系的各级构造, 其中以 NNE—NE 向次级断裂为金矿控矿构造。其基本构造格架为盆岭相间格局, 自北而南依次为渤海盆地(黄县盆地为其边缘部分)、胶东隆起、胶州—莱阳盆地。胶东隆起基底是典型的华北克拉通早前寒武纪基底片麻岩分布区, 由太古宇胶东群、古元古代的荆山群和粉子山群(林润生等, 1988; 王德洪等, 1991)以及新元古代的蓬莱群(张文起, 1995)组成。中生代燕山期胶东地区又经历强烈的岩浆侵入作用, 金矿区内花岗岩、脉岩异常发育, 它们与金矿床时空关系密切, 同形成于燕山期。这些有利的成矿因素造就胶北地块成为中国最大的金矿产地, 也是环太平洋中、新生代金成矿系统的重要组成部分(Goldfarb et al., 1998)。目

前普遍认为该区金矿的形成与中生代岩石圈减薄及相应的构造—岩浆热液活动有密切关系(Wang L G et al., 1998; Zhai M G et al., 2001; Qiu Y M et al., 2002; Mao J W et al., 2003; Yang J H et al., 2003; Fan H R et al., 2003, 2007; Chen Y J et al., 2005)。胶北地块出露的主要岩石类型以前寒武纪变质岩和中生代花岗岩为主。在半岛内自西向东依次分布着招远金矿成矿带、蓬莱—栖霞金矿成矿带、牟平—乳山金矿成矿带和文登—荣成金矿成矿带(李兆龙等, 1993), 年产金量占全国四分之一。产有玲珑、焦家超大型金矿床, 以及三山岛、仓上、大尹格庄、夏甸、金青顶、邓格庄等众多的大型金矿床。

胶北地体位于胶东地区北部, 地体内中生代花岗岩特别发育(图 2), 其形成的动力学环境与断裂带的形成和演化密不可分。出露的中生代岩浆岩主要为燕山期玲珑花岗岩体和郭家岭花岗岩体。它们的围岩主要为太古代 TTG 片麻岩和古元古代粉子山群变质岩。可将这些花岗岩划分为两大系列: ①

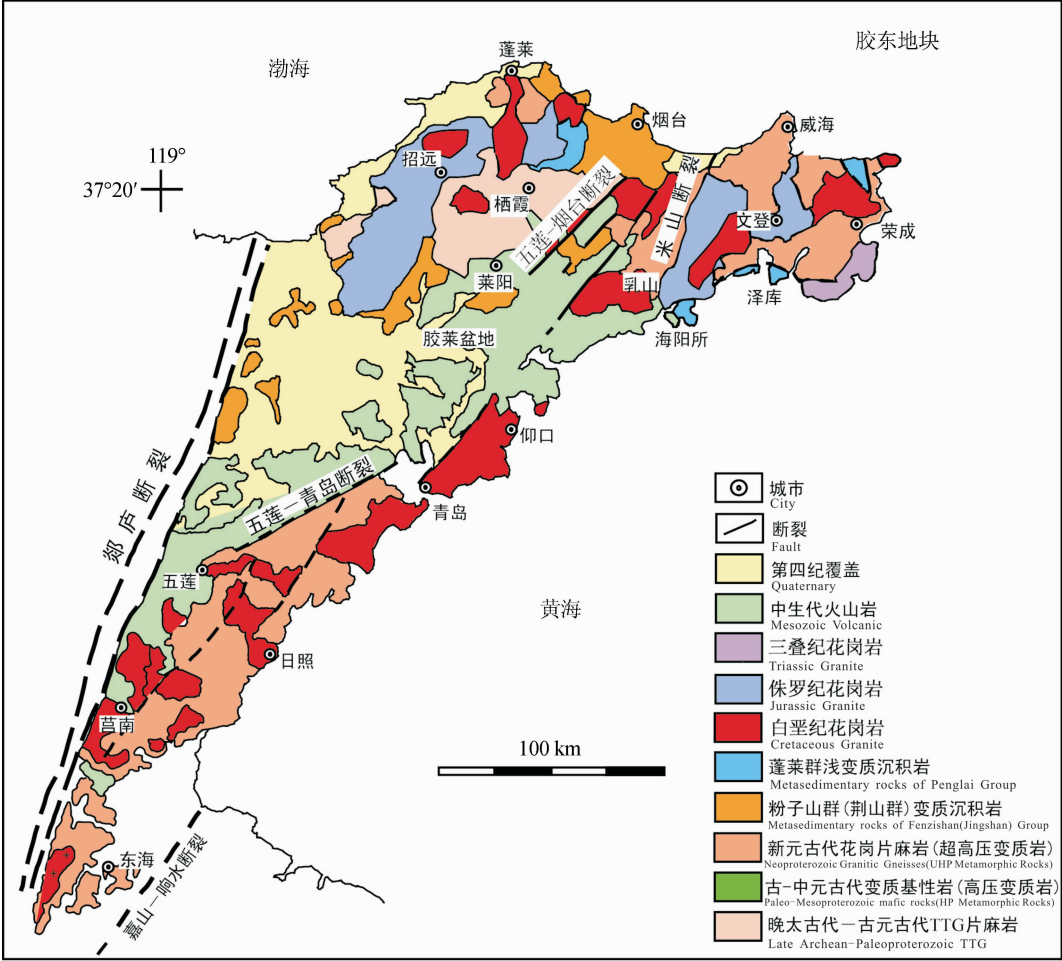


Fig. 1 The geological sketch map of the Jiaodong Peninsula and the Sulu orogenic belt (modified from Tang J et al., 2006)

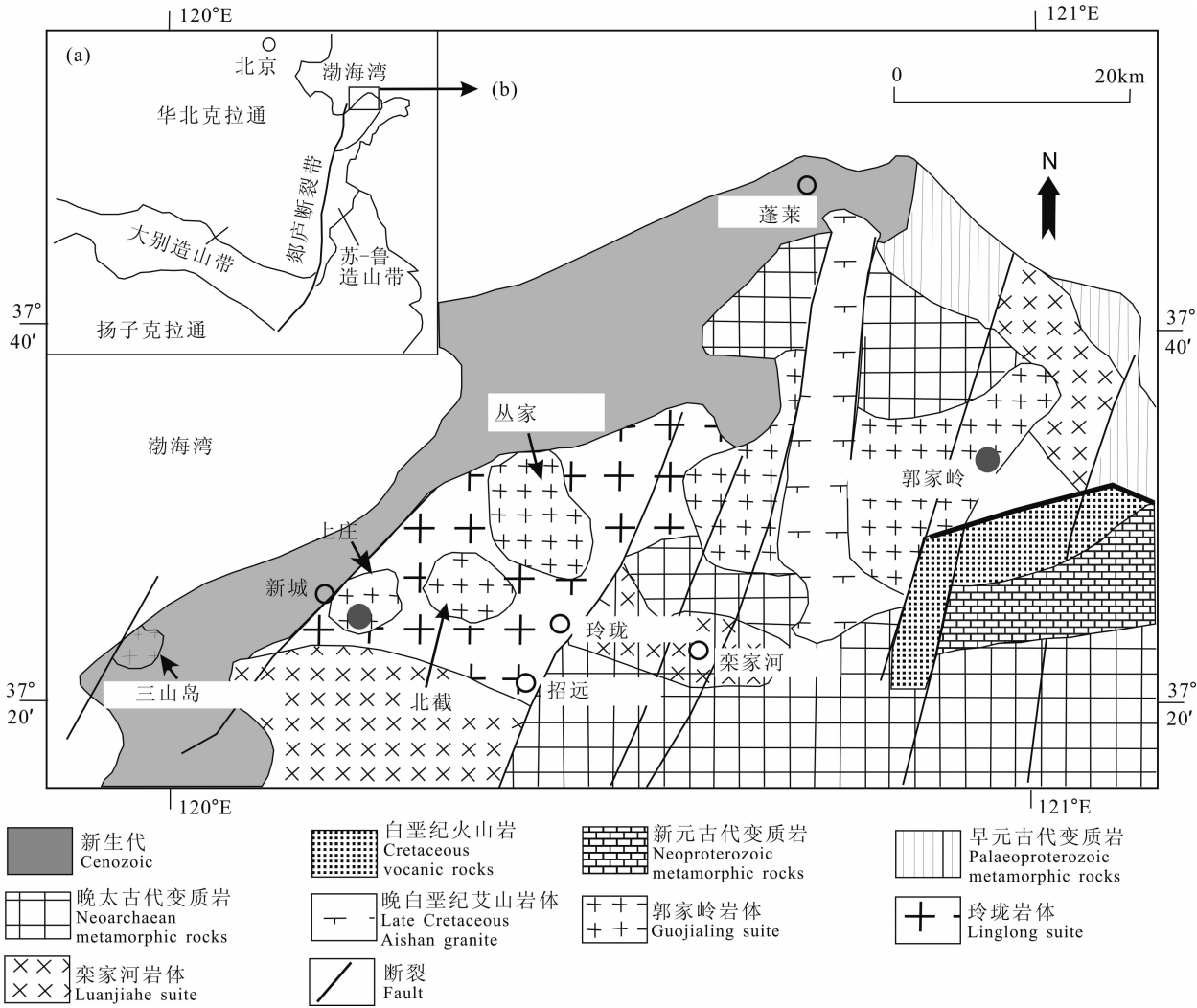


图 2 胶北地块中生代花岗岩分布略图(据 Hou M L et al. ,2007)

Fig. 2 The distribution diagram of Mesozoic granites in Jiaobei Block (modified from Hou M L et al. , 2007)

(图中黑点为本次采样位置,分别对应上庄岩体和郭家岭岩体)

(The two black-dots indicate sampling location, corresponding to Shangzhuang suite and Guojialing suite respectively)

以玲珑花岗岩为代表的片麻状黑云母花岗岩系列,包括玲珑、滦家河、磁山、昆崙山、鹊山、文登等大花岗岩基,其成因被认为属重熔型花岗岩系列;②以郭家岭花岗闪长岩为代表的花岗岩系列,包括郭家岭、艾山等花岗岩,其成因被认为属同熔型花岗岩系列(李俊建等,2005)。此外,沿五莲—荣成断裂带还分布有海阳、三佛山、崂山等 A 型花岗岩和石岛碱性花岗岩,其成因被认为属幔源型花岗岩系列,因其与金成矿关系不大。

本文对郭家岭花岗岩及基性岩脉开展系统野外考察及样品采样(采样位置见图 2 所示),本次采样都是在金矿区进行,其中 11 块上庄岩体花岗岩样品是在招金集团河东金矿矿区的矿井及废石堆采集(系列编号 HD),12 块郭家岭岩体样品是在金创公

司槐树庄金矿黑岚沟矿区采集(系列编号 JC)。

2 岩相学特征

采于郭家岭岩体和上庄岩体的酸性侵入岩样品手标本都是含有钾长石斑晶的似斑状花岗闪长岩,上庄岩体样品具有更大的钾长石斑晶,主要造岩矿物由钾长石(30%~40%)、石英(30%~40%)、斜长石(20%左右)及少量黑云母、角闪石组成。如图 3,对两岩体样品的显微镜下薄片进行观察,可见以巨大的钾长石为斑晶(大至 15cm)的似斑状结构,斑晶钾长石具有环带结构,晶体内含大量的以斜长石、角闪石、黑云母和少量副矿物为主的矿物包裹体,并可见具出溶的钠长石及酸性更长石条片。基质为中粗粒的石英和长条状的黑云母、角闪石。

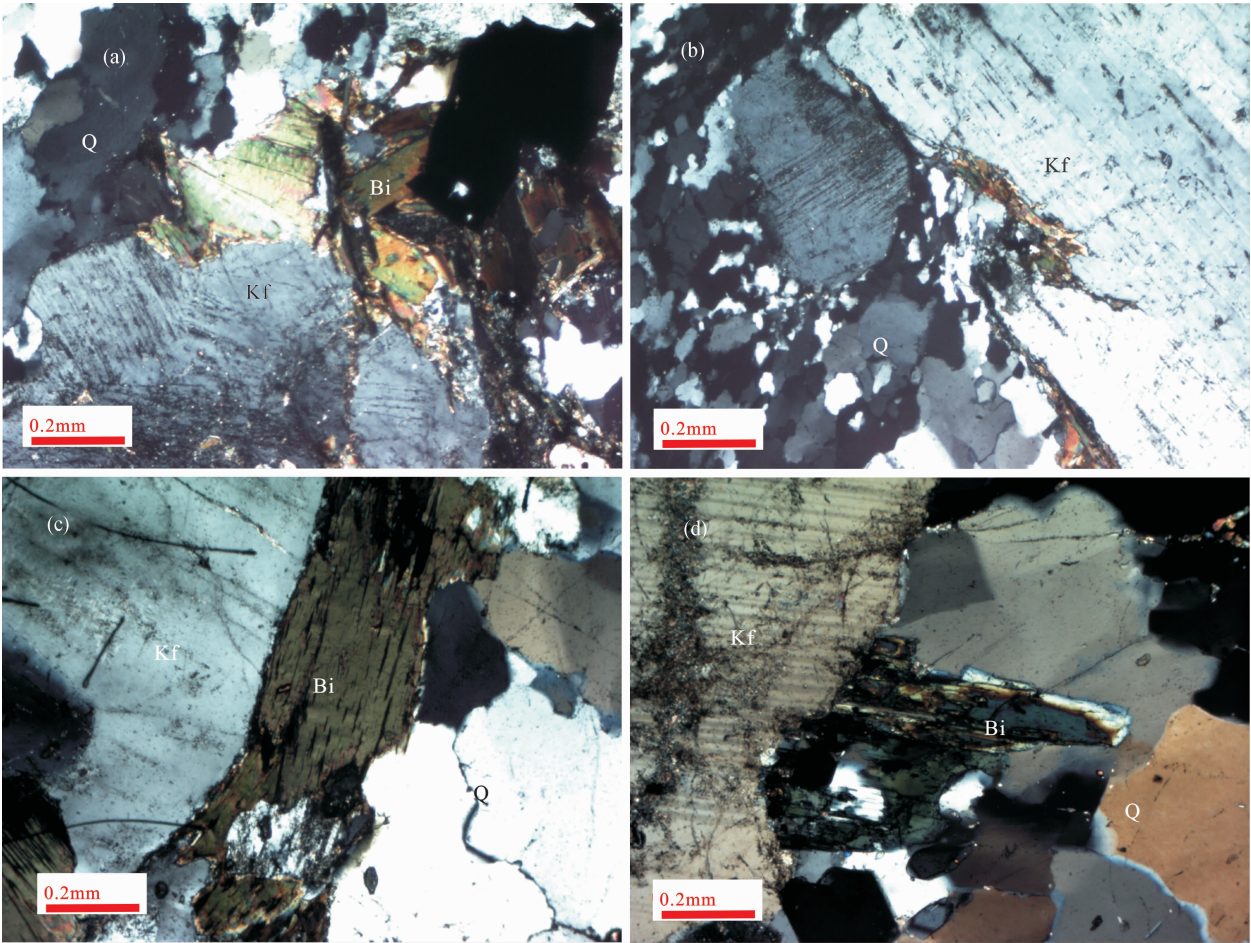


图 3 胶东半岛中生代郭家岭岩体和上庄岩体花岗岩薄片显微照片

Fig. 3 The thin section microscopy photos of Mesozoic Guojialing suite and Shangzhuang suite in Jiaodong Peninsula

(a,b)—上庄岩体花岗岩;(c,d)—郭家岭岩体花岗岩;上述岩石,主要造岩矿物为石英(Q),钾长石(Kf)和黑云母(Bi)

(a,b)—Granite of Shangzhuang suite;(c,d)—granite of Guojialing suite;

the mainly rock-forming minerals are quartz(Q), K-feldspar(Kf) and biotite(Bi)

3 分析方法

3.1 锆石分离及激光 ICP MS U-Pb 定年

锆石的分选在河北廊坊区域地质调查研究所实验室完成,选取新鲜的样品,去掉表面风化层后用纯化的水清洗。先用“老虎口”将样品机械破碎成小块,然后再细磨,除花岗岩样品破碎至 40 目外,其余样品均破碎至 60 目。两个样品之间,先后用玻璃渣和一定量的接下来要破碎的样品来清洗机器,以避免交叉污染。然后在淘沙盘手动分离重砂,经分离出的重砂,首先用磁铁选出磁性较强的部分,磁性较弱的部分用 W72 型磁力仪选出。

锆石的阴极发光(CL)图像分析在合肥中国科技大学结构中心扫描电子显微镜上进行。本文研究样品的锆石 U-Pb 年龄测定在中国科学院广州地球化学研究所激光 ICP-MS 实验室完成,LA-ICP-MS

采用美国 Resonetics 公司生产的 RESolution M-50 激光剥蚀系统和 Agilent 7500a 型的 ICP-MS 联机。采用的激光器包括一个 193nm ArF 准分子(excimer)激光器,一个双室(two-volume cell)样品室,一个平滑激光剥蚀脉冲的 Squid 系统和电脑控制高精度样品 X-Y 样品台移动、定位系统。双室样品室的好处是降低样品交叉污染,减少样品室吹洗所需时间。平滑激光剥蚀脉冲的 Squid 系统可以降低因激光脉冲带来的统计误差。样品定位系统的定位精度优于 0.1 μ m。

3.2 全岩主、微量元素含量测定

选取新鲜的样品,去掉表面风化层后,通过机械粉碎至粒径约 1 cm 左右,用去离子水清洗之后烘干,然后把样品置于无污染自动玛瑙研磨器中研磨至 200 目。两个样品之间用高压气枪吹洗玛瑙研磨器,然后用浸有酒精的棉花擦拭后烘干,防止样品间

的交叉污染。进行下一步实验之前,将制备好的 200 目粉末放置于烘干箱内,在 100 °C 温度下烘干 3h 后取出放入干燥器皿中。

全岩主微量分析在广州澳矿物分析实验室完成,主量元素各项分析误差为 1% 以内,微量元素分析识差为 5% 以内。

4 结果

年代学和元素地球化学测定结果分别见表 1 和表 2 所示。

4.1 郭家岭岩体花岗岩

对采自郭家岭岩体的一件花岗闪长岩样品 10JC-35 进行了 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 定年。

10JC-35 是一个中粗粒花岗闪长岩,阴极发光 CL 图像显示:样品的锆石大部分为等轴状—长柱状,晶体长度 50~400 μm,长宽比 1:1~4:1,大部分锆石颗粒存在密集振荡环带,具有岩浆成因特点,部分锆石无明显环带,具有核幔结构,核部为发光极强的继承锆石。

对样品 10JC-35 的 32 颗锆石进行了 29 个点的分析测定。这些锆石 U 含量为 $41.1 \times 10^{-6} \sim 994.0 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $6.5 \times 10^{-6} \sim 679.9 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.03~1.52,变化范围较大。结果中有 3 个分析点为太古代年龄,11 个分析点位年龄为燕山早期,在 136~208Ma 年之间断续分布,可见本样品具有较多的继承锆石,故除去一些继承锆石年龄,其他的 13 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄比较相似,都在 120~130 Ma 之间(图 4),加权平均值为 125.6 ± 1.6 Ma (MSWD=0.7),这一年龄被解释为该样品的结晶年龄。这 13 个数据点在谐和线上投影,与谐和线的交点为 125.4 ± 2.2 Ma (MSWD=0.57)(图 5)。

4.2 上庄岩体花岗岩

对采自上庄岩体的一件花岗闪长岩样品 10HD-41 进行了 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 定年。

10HD-41 是一个粗粒花岗闪长岩,阴极发光 CL 图像显示:样品的锆石大部分为等轴状—长柱状,晶体长度 100~300 μm,长宽比 1:1~3:1,几乎所有锆石颗粒存在密集振荡环带,具有岩浆成因特点,少数锆石无明显环带,具有核幔结构,核部为发光较强或者发光很弱的继承锆石。与郭家岭岩体花岗岩样品中锆石相比,上庄岩体花岗岩中继承锆石少很多,下面从 U-Pb 年龄数据来分析获得的这些锆石。

对样品 10HD-41 的 32 颗锆石进行了 32 个点

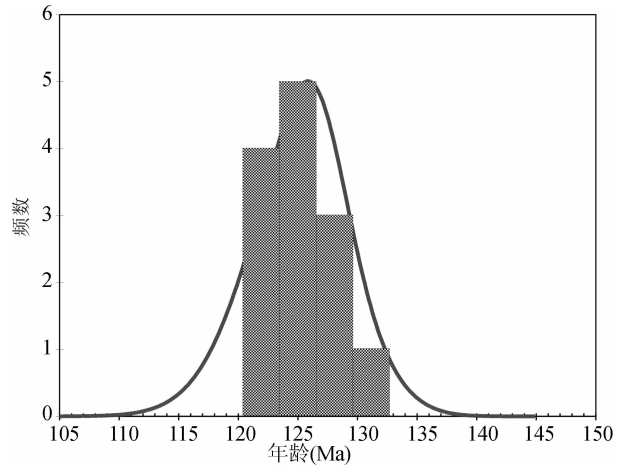


图 4 胶东半岛郭家岭岩体花岗岩锆石 U-Pb 年龄分布图
Fig. 4 Histogram of Zircon U-Pb ages of Guojialing suite granite in Jiaodong Peninsula

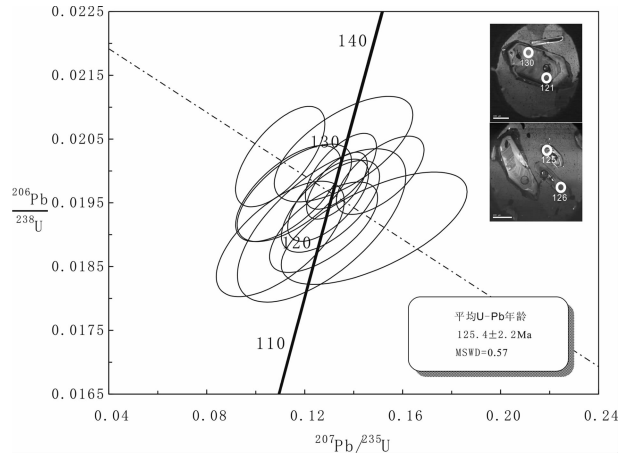


图 5 胶东半岛郭家岭岩体花岗岩样品(JC-35)的锆石 CL 图像及 U-Pb 谐和图图解

Fig. 5 CL images and U-Pb concordia diagrams of zircon from the Guojialing suite granite(JC-35) in Jiaodong Peninsula

的分析测定,获得 29 个分析点的可靠年龄。与郭家岭岩体相比,上庄岩体中所选锆石 U 含量偏低,为 $30.6 \times 10^{-6} \sim 114.0 \times 10^{-6}$, Th 含量普遍很低,为 $1.7 \times 10^{-6} \sim 24.1 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.05~0.53,变化范围较小。结果中有 1 个分析点为古元古代年龄——2354Ma,3 个分析点位年龄为燕山早期,分别为 147Ma、150Ma、160Ma,可见本样品的继承锆石较少,这些继承锆石在 CL 图看是作为明显的核部存在,除去这些继承锆石年龄,其他的 28 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄比较相近(图 6),都在 120~140 Ma 之间,加权平均值为 128.6 ± 1.7 Ma (MSWD=0.76),这一年龄被解释为该样品的结晶年龄。这 28 个数据点在谐和线上投影,与谐和线的交点为 128.8 ± 2.0 Ma (MSWD=0.69)(图 7)。

表 1 胶东半岛中生代郭家岭岩体和上庄岩体锆石激光 ICP-MS 的 U-Pb 年龄测定结果

Table 1 The results of Zircon La-ICP-MS of Mesozoic Guojialing suite and Shangzhuang suite in Jiaodong Peninsula

点	元素($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比				年龄(Ma)											
	Th	U	Pb		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ							
上庄岩体花岗岩 10HD-41																				
1	15.50	87.66	1.58	0.18	0.04921	0.00183	0.13234	0.00840	0.01933	0.00062	0.01344	0.00129	158	79	126	8	123	4	270	26
2	17.35	86.60	1.62	0.20	0.04874	0.00235	0.13282	0.01029	0.01996	0.00070	0.01396	0.00150	135	105	127	9	127	4	280	30
3	16.21	30.59	0.81	0.53	0.05749	0.00245	0.19819	0.01461	0.02519	0.00096	0.01758	0.00194	510	94	184	12	160	6	352	39
4	20.92	58.85	1.15	0.36	0.04660	0.00199	0.12705	0.00903	0.01979	0.00068	0.01319	0.00139	29	87	121	8	126	4	265	28
5	13.75	37.72	0.72	0.36	0.04895	0.00269	0.12359	0.01078	0.01946	0.00076	0.01362	0.00143	145	116	118	10	124	5	274	29
6	12.46	74.68	1.38	0.17	0.05501	0.00185	0.14803	0.00913	0.01962	0.00069	0.01735	0.00134	413	75	140	8	125	4	348	27
7	16.75	94.50	1.77	0.18	0.04655	0.00193	0.12891	0.00890	0.02024	0.00068	0.01399	0.00154	26	79	123	8	129	4	281	31
8	13.68	48.69	0.94	0.28	0.05189	0.00256	0.14577	0.01156	0.01988	0.00072	0.01470	0.00163	281	104	138	10	127	5	295	32
9	12.15	58.67	1.09	0.21	0.04829	0.00243	0.12662	0.01044	0.01970	0.00077	0.01416	0.00168	114	114	121	9	126	5	284	33
10	15.36	83.88	1.56	0.18	0.04952	0.00233	0.13204	0.01027	0.01973	0.00074	0.01549	0.00174	172	106	126	9	126	5	311	35
11	10.47	59.13	1.12	0.18	0.04801	0.00235	0.13657	0.01066	0.02035	0.00072	0.01469	0.00162	100	92	130	10	130	5	295	32
12	8.57	54.14	1.03	0.16	0.04909	0.00250	0.13807	0.01126	0.02031	0.00075	0.01671	0.00229	152	104	131	10	130	5	335	45
13	11.07	67.84	1.28	0.16	0.05161	0.00230	0.14433	0.01054	0.02046	0.00071	0.01487	0.00175	268	95	137	9	131	4	298	35
14	24.14	112.69	2.07	0.21	0.04798	0.00206	0.12794	0.00931	0.01934	0.00071	0.01441	0.00180	98	92	122	8	124	4	289	36
15	9.36	53.54	0.99	0.17	0.04911	0.00312	0.13400	0.01255	0.01971	0.00070	0.01500	0.00185	153	134	128	11	126	4	301	37
16	22.94	114.02	2.14	0.20	0.05026	0.00204	0.13814	0.00952	0.01992	0.00069	0.01471	0.00153	207	88	131	8	127	4	295	30
17	10.19	37.06	0.75	0.27	0.04626	0.00280	0.13266	0.01194	0.02127	0.00074	0.01397	0.00152	11	122	126	11	136	5	280	30
18	5.99	51.83	1.00	0.12	0.04681	0.00265	0.13673	0.01183	0.02105	0.00075	0.01518	0.00196	40	110	130	11	134	5	304	39
19	15.21	98.23	1.89	0.15	0.04757	0.00203	0.13759	0.00986	0.02088	0.00074	0.01433	0.00163	78	90	131	9	133	5	288	32
20	12.50	88.99	2.51	0.14	0.14247	0.00616	0.46575	0.03330	0.02310	0.00079	0.09560	0.00834	2257	72	388	23	147	5	1845	154
21	1.68	35.90	0.65	0.05	0.04582	0.00298	0.12881	0.01217	0.02085	0.00072	0.01448	0.00296	-11	132	123	11	133	5	291	59
22	6.51	38.83	0.74	0.17	0.05090	0.00260	0.14439	0.01175	0.02039	0.00074	0.01436	0.00160	236	110	137	10	130	5	288	32
23	11.33	68.44	1.21	0.17	0.04445	0.00208	0.11700	0.00918	0.01897	0.00073	0.01218	0.00150	-47	90	112	8	121	5	245	30
24	15.50	68.83	1.51	0.23	0.04798	0.00258	0.15749	0.01299	0.02358	0.00081	0.01460	0.00178	99	112	149	11	150	5	293	35
25	9.01	56.91	1.13	0.16	0.04814	0.00283	0.13637	0.01189	0.02115	0.00071	0.01904	0.00249	106	126	130	11	135	4	381	49
26	6.84	45.68	0.87	0.15	0.05654	0.00275	0.15370	0.01214	0.02004	0.00073	0.01595	0.00175	474	96	145	11	128	5	320	35
27	6.29	56.45	1.05	0.11	0.04744	0.00230	0.13274	0.01032	0.02029	0.00071	0.01579	0.00171	72	100	127	9	129	5	317	34
28	7.74	34.29	0.65	0.23	0.04830	0.00299	0.13513	0.01266	0.02014	0.00076	0.01408	0.00199	114	130	129	11	129	5	283	40
29	7.02	31.30	0.64	0.22	0.05823	0.00291	0.15957	0.01352	0.02131	0.00091	0.01675	0.00206	538	106	150	12	136	6	336	41
30	13.23	74.67	1.49	0.18	0.05101	0.00270	0.15151	0.01270	0.02116	0.00078	0.01633	0.00191	241	109	143	11	135	5	327	38
31	10.17	66.49	1.26	0.15	0.05128	0.00227	0.14164	0.01033	0.02030	0.00070	0.01552	0.00155	253	99	135	9	130	4	311	31
32	5.28	9.84	4.82	0.54	0.15531	0.00665	9.59487	0.69498	0.44073	0.01598	0.25186	0.03153	2405	70	2397	67	2354	72	4540	509
郭家岭岩体花岗岩 10JC-35																				
1	4.70	21.23		0.22	0.04585	0.00264	0.15651	0.01389	0.02526	0.00094	0.01902	0.00252	-10	107	148	12	161	6	381	50
2	44.21	23.52		1.88	0.05252	0.00319	0.14273	0.01299	0.01999	0.00071	0.01397	0.00140	308	129	135	12	128	5	280	28

续表 1

3	10.09	23.80		0.42	0.04908	0.00250	0.16743	0.01316	0.02460	0.00081	0.01660	0.00178	152	109	157	11	157	5	333	35
4	10.44	37.43		0.28	0.04791	0.00217	0.14094	0.01033	0.02136	0.00072	0.01469	0.00166	95	99	134	9	136	5	295	33
5	1.45	2.84		0.51	0.18472	0.03086	0.23707	0.05737	0.02332	0.00206	0.03098	0.00541	2696	250	216	47	149	13	617	106
6	30.84	86.72		0.36	0.05045	0.00169	0.18555	0.01117	0.02662	0.00089	0.01898	0.00194	216	74	173	10	169	6	380	38
7	17.45	40.57		0.43	0.24333	0.01517	18.96812	1.79753	0.56536	0.02159	0.15139	0.00578	3142	104	3040	91	2889	89	2849	101
8	17.16	49.31		0.35	0.04975	0.00228	0.14564	0.01079	0.02115	0.00072	0.01415	0.00153	183	106	138	10	135	5	284	31
9	8.92	22.56		0.40	0.12732	0.00533	4.15009	0.30015	0.23517	0.00882	0.17118	0.01750	2061	69	1664	59	1362	46	3194	302
10	6.67	24.34		0.27	0.05629	0.00344	0.15855	0.01516	0.02196	0.00091	0.02012	0.00232	464	142	149	13	140	6	403	46
11	13.88	58.46		0.24	0.05096	0.00197	0.14523	0.00951	0.02083	0.00069	0.01440	0.00148	239	80	138	8	133	4	289	30
12	11.81	55.92		0.21	0.04946	0.00235	0.13584	0.01030	0.02033	0.00069	0.01404	0.00158	170	114	129	9	130	4	282	31
13	201.62	194.04	155.28	1.04	0.23077	0.01464	17.98803	1.04932	0.54343	0.00878	0.10425	0.01505	3057	101	2989	56	2798	37	2004	276
14	19.06	103.77	48.61	0.18	0.14790	0.00895	9.22106	0.58436	0.43658	0.01230	0.11893	0.00670	2322	104	2360	58	2335	55	2271	121
15	96.38	174.00	76.99	0.55	0.12734	0.00859	6.76827	0.43078	0.37519	0.00940	0.06396	0.01426	2061	119	2082	56	2054	44	1253	271
16	679.88	707.22	30.42	0.96	0.05056	0.00295	0.22961	0.01384	0.03281	0.00063	0.01020	0.00036	220	135	210	11	208	4	205	7
17	185.87	219.97	8.92	0.84	0.05130	0.00697	0.20923	0.02610	0.03116	0.00087	0.01039	0.00058	254	285	193	22	198	5	209	12
18	94.89	994.01	26.69	0.10	0.04253	0.00381	0.16383	0.01371	0.02652	0.00059	0.00790	0.00069	error	154	12	169	4	159	14	
19	6.50	84.67	2.31	0.08	0.06415	0.01645	0.20862	0.04662	0.02604	0.00091	0.01288	0.00520	746	565	192	39	166	6	259	104
20	28.24	162.85	4.28	0.17	0.04941	0.00738	0.17256	0.02280	0.02563	0.00080	0.00763	0.00136	169	315	162	20	163	5	154	27
21	133.83	365.23	11.20	0.37	0.05038	0.00619	0.16764	0.02001	0.02478	0.00064	0.01481	0.00246	213	263	157	17	158	4	297	49
22	64.69	201.65	4.81	0.32	0.05751	0.01662	0.16632	0.04418	0.02450	0.00123	0.00870	0.00161	509	546	156	38	156	8	175	32
23	11.14	69.17	1.70	0.16	0.07339	0.01614	0.19779	0.03941	0.02384	0.00109	0.00687	0.00209	1033	457	183	33	152	7	138	42
24	175.59	599.51	15.58	0.29	0.04073	0.00438	0.12739	0.01597	0.02359	0.00073	0.00468	0.00050	error	error	122	14	150	5	94	10
25	34.21	110.83	3.00	0.31	0.08329	0.01167	0.27259	0.03822	0.02341	0.00096	0.00798	0.00101	1276	276	245	31	149	6	161	20
26	102.55	196.05	5.37	0.52	0.05179	0.00769	0.15703	0.02197	0.02301	0.00070	0.00692	0.00058	276	307	148	19	147	4	139	12
27	83.23	170.77	4.57	0.49	0.05655	0.01038	0.15237	0.02391	0.02252	0.00081	0.00431	0.00122	476	415	144	21	144	5	87	25
28	16.32	41.14	1.08	0.40	0.06680	0.01947	0.14809	0.04278	0.02197	0.00123	0.01036	0.00144	831	640	140	38	140	8	208	29
29	32.73	169.69	4.00	0.19	0.05424	0.00799	0.15861	0.02189	0.02147	0.00061	0.00856	0.00108	389	337	149	19	137	4	172	22
30	143.80	426.75	9.24	0.34	0.04875	0.00539	0.12771	0.01457	0.01912	0.00047	0.00571	0.00040	200	176	122	13	122	3	115	8
31	272.57	498.66	11.90	0.55	0.04413	0.00492	0.11327	0.01417	0.01965	0.00050	0.00467	0.00041	error	109	109	13	125	3	94	8
32	298.87	643.66	15.72	0.46	0.04058	0.00416	0.11000	0.01204	0.02022	0.00052	0.00469	0.00039	error	error	106	11	129	3	95	8
33	197.91	130.36	3.72	1.52	0.06215	0.01226	0.14839	0.02505	0.01910	0.00058	0.00566	0.00031	680	431	140	22	122	4	114	6
34	281.04	327.33	8.46	0.86	0.04860	0.00423	0.12958	0.01090	0.01954	0.00043	0.00636	0.00035	128	193	124	10	125	3	128	7
35	561.93	967.66	23.27	0.58	0.04907	0.00305	0.13317	0.00818	0.01977	0.00035	0.00605	0.00024	150	150	127	7	126	2	122	5
36	71.56	278.79	6.27	0.26	0.04887	0.00694	0.13587	0.01867	0.02034	0.00055	0.00778	0.00088	143	313	129	17	130	3	157	18
37	109.58	299.17	6.28	0.37	0.04699	0.00864	0.12691	0.02269	0.01915	0.00079	0.00429	0.00053	56	383	121	20	122	5	87	11
38	101.44	325.25	7.25	0.31	0.04352	0.00617	0.11578	0.01541	0.01966	0.00051	0.00378	0.00144	error	111	111	14	125	3	76	29
39	27.36	961.42	19.72	0.03	0.04856	0.00373	0.13478	0.00958	0.01999	0.00039	0.00491	0.00118	128	170	128	9	128	2	99	24
40	237.21	799.83	17.84	0.30	0.05453	0.00454	0.15083	0.01182	0.01993	0.00041	0.00506	0.00075	394	187	143	10	127	3	102	15
41	109.18	476.07	10.16	0.23	0.04852	0.00504	0.13053	0.01323	0.01945	0.00048	0.00603	0.00073	124	230	125	12	124	3	122	15
42	100.43	388.18	8.26	0.26	0.04085	0.00684	0.11004	0.01725	0.01893	0.00060	0.00437	0.00048	error	106	106	16	121	4	88	10

表 2 胶东半岛中生代郭家岭岩体和上庄岩体全岩主微量元素分析结果

Table 2 Thersluts of major and trace elements contents of the whole rock of Mesozoic Guojialing suite and Shangzhuang suite in Jiaodony Peninsula

	上庄岩体花岗岩							郭家岭岩体花岗岩						
SAMPLE	10HD-06	10HD-07	10HD-10	10HD-11	10HD-12	10HD-14	10HD-15	10JC-24	10JC-28	10JC-29	10JC-30	10JC-31	10JC-34	10JC-35
主量元素(%)														
SiO ₂	73.02	70.48	70.7	71	72	72.5	71.29	69	69.33	68.62	68.89	70.05	68.23	69
Al ₂ O ₃	14.77	16.15	15.46	15.88	15.72	15.16	15.99	15.8	15.34	15.04	15.39	15	15.26	15.54
Fe ₂ O ₃	1.62	1.69	2.03	1.57	1.48	1.65	1.65	2	2.09	2.65	2.32	2	2.35	2.32
CaO	2.06	2.12	2.12	2.18	2.26	2.12	2.18	2.53	2.42	2.78	2.62	2.38	2.68	2.77
MgO	0.35	0.4	0.38	0.4	0.36	0.35	0.37	1.15	1.21	1.42	1.18	1	1.31	1.19
Na ₂ O	4.48	4.83	4.66	4.88	5.06	4.82	4.96	4.39	4.34	4.07	4.24	4.21	4.24	4.38
K ₂ O	2.72	3.29	2.96	2.97	2.33	2.44	2.82	3.94	3.64	3.77	3.63	3.46	3.83	3.57
Cr ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01
TiO ₂	0.21	0.23	0.21	0.21	0.21	0.18	0.21	0.31	0.3	0.33	0.33	0.27	0.34	0.37
MnO	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05
P ₂ O ₅	0.055	0.056	0.058	0.057	0.051	0.05	0.055	0.116	0.117	0.158	0.126	0.103	0.144	0.129
SrO	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11	0.12	0.15	0.15	0.14	0.14	0.12	0.15	0.14
BaO	0.14	0.17	0.15	0.15	0.1	0.1	0.14	0.23	0.28	0.23	0.22	0.17	0.24	0.21
LOI	0.24	0.41	0.34	0.36	0.37	0.33	0.32	0.4	0.7	0.42	0.57	0.53	0.49	0.48
Total	99.8	99.98	99.21	99.8	100.1	99.84	100.15	100.05	99.95	99.68	99.7	99.33	99.3	100.15
微量元素(×10 ⁻⁶)														
Ag	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ba	1195	1465	1325	1260	892	856	1215	1985	2400	2020	1770	1415	1960	1690
Ce	59.6	52.9	43.1	38.4	36.5	34.3	43.9	90.9	92.7	125.5	91.8	66.7	109.5	93.1
Co	1.4	1.6	1.8	1.7	1.6	1.4	1.6	4.7	4.5	5.7	4.5	3.8	4.6	4.4
Cr	20	20	20	20	10	10	10	40	30	50	30	20	40	40
Cs	0.7	0.78	0.81	0.86	0.74	0.76	0.81	2.54	2.44	2.76	1.04	1.58	2.06	1.48
Cu	5	5	7	11	25	8	42	<5	5	10	8	10	<5	6
Dy	0.83	0.77	0.7	0.63	0.63	0.51	0.7	1.83	1.65	1.87	1.63	1.26	1.86	1.82
Er	0.38	0.37	0.34	0.29	0.29	0.25	0.31	0.82	0.82	0.93	0.77	0.64	0.87	0.9
Eu	0.83	0.84	0.83	0.73	0.7	0.63	0.78	1.47	1.37	1.6	1.38	1.06	1.6	1.45
Ga	21.8	23.2	23.7	23.8	24.3	22.4	24.1	24.1	23.4	22.9	21.7	21.7	21.4	21.5
Gd	2.65	2.38	2.12	1.91	1.84	1.57	2.06	4.66	4.48	5.69	4.61	3.46	5.05	4.47
Hf	4.7	3.6	4.7	3.9	4.2	4.1	3.8	5.2	4.2	4.6	4.5	4	4.6	4.7
Ho	0.11	0.12	0.11	0.1	0.09	0.08	0.1	0.3	0.28	0.31	0.27	0.21	0.31	0.31
La	34.2	30	24.3	21.5	20.6	19.4	25	50.6	52.7	73.1	51.6	37	60.8	51.8
Lu	0.05	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.09	0.08	0.1	0.08	0.07	0.1	0.1
Mo	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Nb	3.7	3.9	3.6	3.5	3.5	2.9	3.5	6	5.6	5.7	5.4	4.6	5.6	7.5
Nd	22	20	17.1	15.1	14.4	13.1	16.8	37.5	36.2	47.1	36.8	26.8	42.6	37.2
Ni	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	19	17	22	14	11	29	25
Pb	22	24	25	25	24	26	26	37	36	35	29	30	37	35
Pr	6.46	5.78	4.89	4.3	4.08	3.72	4.84	10.35	10.2	13.6	10.4	7.49	12.05	10.35
Rb	64	74.3	71.6	72.4	59.9	62.1	70.2	104.5	93.9	97.7	85.3	90.3	94.9	97
Sm	3.1	2.9	2.55	2.31	2.29	1.92	2.57	6.02	5.58	6.8	5.73	4.09	6.6	5.85
Sn	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Sr	913	971	993	998	989	917	1025	1325	1320	1275	1220	1040	1250	1160
Ta	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
Tb	0.23	0.23	0.21	0.18	0.18	0.14	0.19	0.48	0.45	0.53	0.45	0.34	0.52	0.46
Th	6.81	6.07	4.92	4.73	4.28	4.26	5.28	11.25	11.5	15.25	10.55	9.36	12.65	11.5
Tl	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Tm	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.1	0.09	0.09	0.07	0.06	0.11	0.11
U	1.84	1.85	1.54	2.04	1.67	1.1	1.91	8.48	2.95	1.33	1.76	2.52	3.85	1.87
V	10	11	11	11	10	9	11	30	29	35	29	25	29	28
W	1	2	2	2	2	1	2	1	1	1	2	2	<1	<1

续表 2

Y	3.5	3.4	3.2	2.7	2.8	2.2	3	7.9	7.3	8.3	7.3	5.7	8.2	8.4
Yb	0.32	0.28	0.27	0.25	0.24	0.21	0.25	0.64	0.62	0.68	0.59	0.48	0.66	0.68
Zn	44	41	46	41	47	37	49	46	41	57	41	39	47	54
Zr	162	124	161	135	146	136	135	181	152	171	165	141	170	168

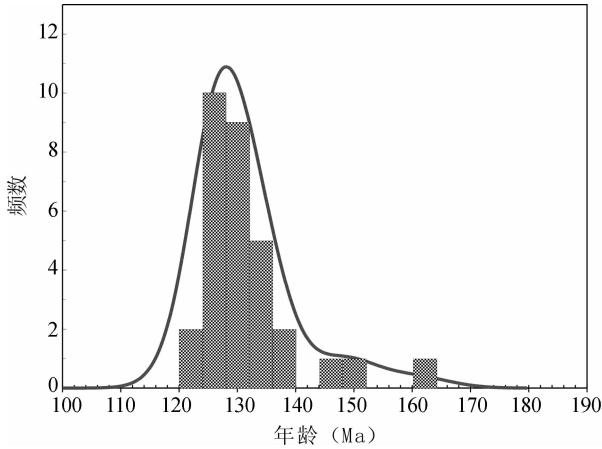


图 6 胶东半岛上庄岩体样品锆石 U-Pb 年龄分布图
Fig. 6 Histogram of Zircon U-Pb ages of Shangzhuang suite granite in Jiaodong Peninsula

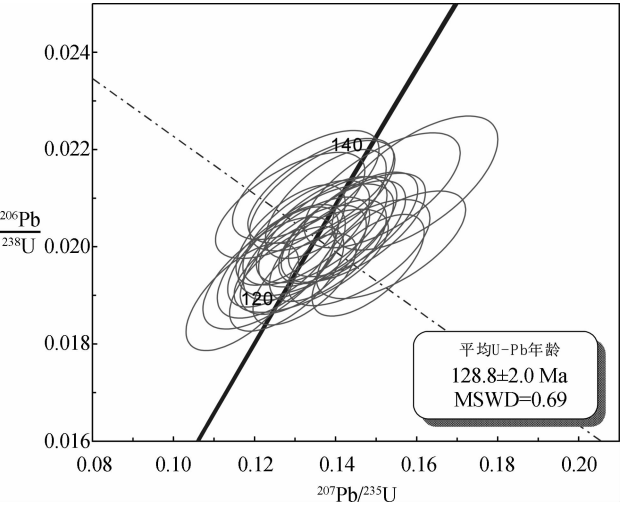


图 7 胶东半岛上庄岩体花岗岩样品(HD-41)的锆石 U-Pb 谐和图解
Fig. 7 U-Pb concordia diagrams of zircon from the Shangzhuang suite granite(HD-41) in Jiaodong Peninsula

4.3 全岩主微量元素特征

郭家岭岩体 SiO₂ 含量为 68.23%~70.05%，在硅碱图中落入花岗岩和花岗闪长岩及石英二长岩的范围(图 8)，具有较高的 K₂O (3.46%~3.94%)、Al₂O₃ (15.00%~15.8%)、高的 Sr 含量 (1040×10⁻⁶~1325×10⁻⁶)、Ba 含量 (1415×10⁻⁶~2400×10⁻⁶) 和高的 Sr/Y (138.1~182.5) 比值以及较低的 CaO (2.38%~2.78%)、TiO₂ (0.27%~

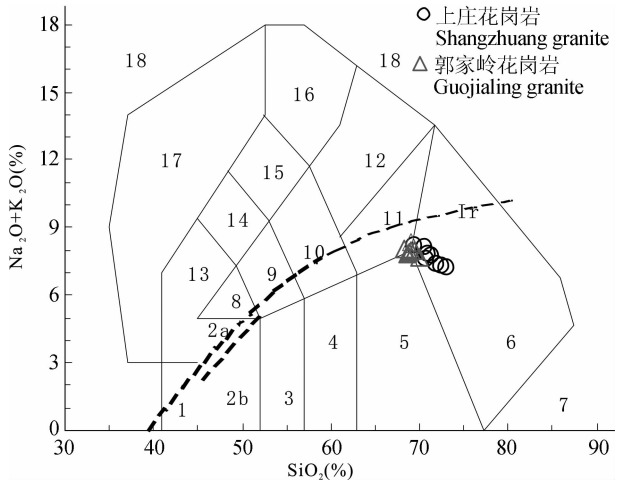


图 8 胶东半岛郭家岭和上庄岩体花岗岩的 TAS 图解
(据 Earth-Science Reviews, 1994)
Fig. 8 The TAS diagram of Guojialing granite and Shangzhuang granite in Jiaodong Peninsula
(after Earth-Science Reviews, 1994)

1—橄榄辉长岩;2a—碱性辉长岩;2b—亚碱性辉长岩;3—辉长闪长岩;4—闪长岩;5—花岗闪长岩;6—花岗岩;7—石英岩;8—二长辉长岩;9—二长闪长岩;10—二长岩;11—石英二长岩;12—正长岩;13—副长石辉长岩;14—副长石二长闪长岩;15—副长石二长正长岩;16—副长正长岩;17—副长深成岩;18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩
1—Peridotite gabbro; 2a—alkaline gabbro; 2b—sub-alkaline gabbro; 3—gabbro-diorite; 4—diorite; 5—granodiorite; 6—granite; 7—quartzolite; 8—monzogabbro; 9—monzodiorite; 10—monzonite; 11—quartz-monzonite; 12—syenite; 13—nepheline gabbro; 14—nepheline monzodiorite; 15—nepheline monzosyenite; 16—nepheline syenite; 17—foiolite; 18—tawite/neapite/italite

0.37%)、MgO (1.00%~1.42%)、全 Fe₂O₃ (2.00%~2.65%)，Rb (85.3×10⁻⁶~104.5×10⁻⁶) 含量和 Rb/Sr (0.070~0.087) 比值。K₂O/Na₂O 为 0.81~0.93，Mg# 为 50~54。

上庄岩体 SiO₂ 含量为 69.46%~73.02%，在硅碱图中主要落入花岗岩的范围(图 8)。具有较高的 Na₂O (4.33%~5.06%)、Al₂O₃ (14.77%~16.15%)、高的 Sr 含量 (913×10⁻⁶~1135×10⁻⁶)、Ba 含量 (856×10⁻⁶~2290×10⁻⁶) 和高的 Sr/Y 比值 (260.9~416.8) 以及较低的 K₂O (2.33%~3.86%)、CaO (2.04%~2.26%)、TiO₂ (0.18%~0.24%)、MgO (0.35%~0.42%)、全 Fe₂O₃ (1.48%

~2.03%), Rb ($60 \times 10^{-6} \sim 75 \times 10^{-6}$) 含量和 Rb/Sr (0.061~0.076) 比值。K₂O/Na₂O 为 0.46~0.90, Mg# 为 27~35, 较郭家岭岩体低。

在稀土元素球粒陨石标准化图上(图 9), 郭家岭岩体和上庄岩体具有相似的稀土元素和微量元素分配模式, 表现出明显的 LREE 富集和 HREE 极度亏损[(La/Yb)_N = 54~101], 没有明显的铈负异常(Eu/Eu* = 0.79~1.11), 其中郭家岭岩体稀土配分图显示微弱的负异常(Eu/Eu* = 0.79~0.87), 上庄岩体总体上显示微弱的正异常(Eu/Eu* = 0.86~1.11), 与埃达克岩稀土分配模式相似, 这区别于典型的板内花岗岩的 V 型配分模式。郭家岭岩体样品总稀土平均值(214×10^{-6})明显高于上庄岩体(105.3×10^{-6})。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 10), 两岩体所有样品均表现出明显的 Ba、Sr、K、Pb 和 LREE 富集以及 Nb、Ta、Ti、P 的亏损, 表现出明显的弧型地壳特征(Taylor et al., 1985; Rudnick, 1995; Zheng et al., 2008)。在含量上两岩体有所不同, 与稀土元素相同, 郭家岭岩体几乎所有微量元素的含量都高于上庄岩体。

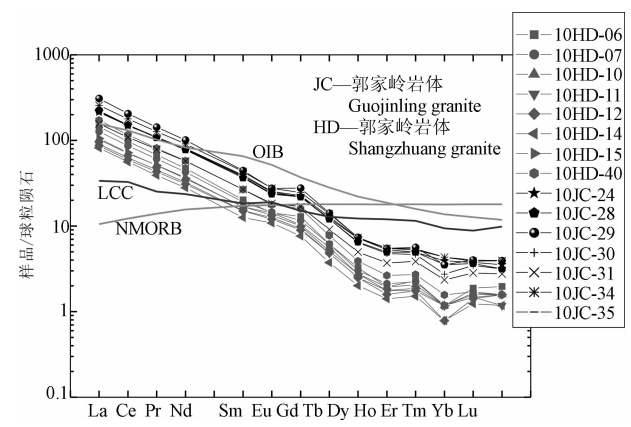


图 9 胶东半岛郭家岭岩体和上庄岩体稀土元素配分图
Fig. 9 Chondrite-normalized REE distribution patterns of Guojialing and Shangzhuang granites in Jiaodong Peninsula (球粒陨石值根据 McDonough et al., 1995; 平均下地壳 LCC 组成来自 Rudnick et al., 2003; OIB 和 N-MORB 来自 Sun et al., 1989) (Chondrite-normalized data are taken from McDonough et al., 1995; LCC is from Rudnick et al., 2003; OIB and N-MORB are from Sun et al., 1989)

5 讨论

5.1 郭家岭花岗岩各岩体年龄总结

前人对胶东晚侏罗世和早白垩世花岗岩的同位素年代学研究也做了大量的工作(胡世玲等, 1987; 徐金方等, 1989; 张田等, 2007; Wang L G et al.,

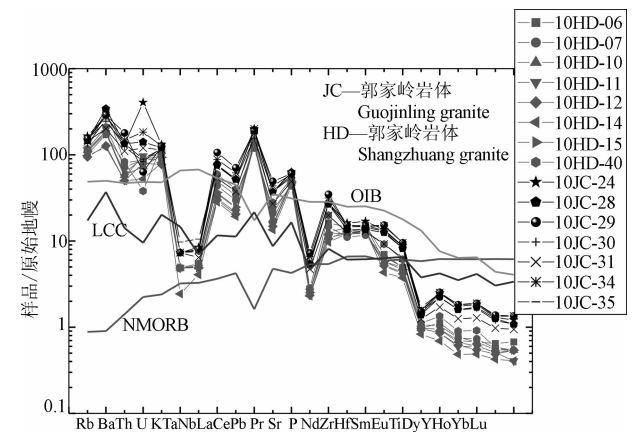


图 10 胶东半岛郭家岭岩体和上庄岩体微量元素蛛网图
Fig. 10 Trace elements spidergram of Guojialing and Shangzhuang granite in Jiaodong Peninsula [原始地幔值根据 McDonough et al., 1995; 平均下地壳 LCC(蓝线)组成来自 Rudnick et al., 2003; OIB(绿线)和 N-MORB(红线)来自 Sun et al., 1989] [Compositions of primitive mantle are from McDonough et al., 1989; LCC(blue line) is from Rudnick et al., 2003; OIB(green line) and N-MORB(red line) are from Sun et al., 1989]

1998; Qiu Y M et al., 2002; Guo F et al., 2006)。上庄岩体⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年的结果为 134.8~136.8 Ma(胡世玲等, 1987), 近些年来, 许多学者用锆石 U-Pb 定年方法得到了更加精确的年龄数据, 有关结果如郭家岭岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年的结果为 124~133 Ma (Wang L G et al., 1998), 这些定年结果与我们的年龄结果是一致的。

郭家岭岩体和上庄岩体同属郭家岭花岗岩基, 只是出露位置不同, 明显区别于玲珑型花岗岩基, 从年龄角度来看, 郭家岭岩体的形成时代为 125.4 ± 2.2 Ma, 为早白垩世, 与前人所测年龄相似(胡世玲等, 1987; 关康等, 1998; Wang L G et al., 1998); 上庄岩体的形成时代为 128.8 ± 2.0 Ma, 也是早白垩世, 两岩体年龄相差 3 Ma, 在年龄误差范围来看可以把两岩体作为同一期岩体, 也在年龄角度证实两岩体都同属郭家岭花岗岩。从两岩体的锆石组成上看, 除都以典型的环带结构的岩浆锆石为特征外, 都含有太古宙和晚侏罗纪的继承锆石, 成分上还是存在区别的, 主要区别有: 郭家岭岩体含有大量的太古宙和晚侏罗纪继承锆石, 而这些继承锆石在上庄岩体中则较少出现; 郭家岭岩体中锆石的 Th 和 U 的含量明显高于上庄岩体, Th/U 比值也比上庄岩体高。这可能指示了两岩体的成岩物质来源具相似性, 都包含太古宙岩石成分和晚侏罗世花岗岩成分, 不同在于混合的比例不同或者岩浆温度不同, 若是

岩浆形成温度不同,那具有较少继承锆石的上庄岩体具有较高的岩浆温度。

5.2 岩体成岩构造环境判别

元素 Rb、Y(性质与 Yb 相似)和 Nb(性质与 Ta 相似)能有效地区分不同大地构造环境的花岗岩,因而被选择来区分 VAG-火山弧花岗岩、Syn-COLG-同碰撞花岗岩、WPG-板内花岗岩和 ORG-洋脊花岗岩。在花岗岩 Nb-Y 和 Ta-Yb 构造环境判别图解上(图 11),郭家岭花岗岩全部落在火山弧花岗岩范围,暗示早白垩纪郭家岭型花岗岩是由中生代时太平洋板块向欧亚板块俯冲所形成的。

基于变量 Hf-Rb-Ta 的花岗岩判别三角图解可

以区分大洋脊花岗岩、火山弧花岗岩、板内花岗岩、同碰撞和碰撞后花岗岩(图 12)。根据投图,郭家岭花岗岩都落在火山弧花岗岩范围。

5.3 成因机制

在 Sr/Y-Y 和 (La/Yb)_N-Yb_N 图(图 13)上所有样品点都落入埃达克岩的区域(Defant et al., 1990; Matin, 2005),郭家岭岩体和上庄岩体花岗岩都具有高的 Sr/Y 和 (La/Yb)_N 比值,类似埃达克岩的特征。具有高 Sr/Y 比值的中酸性岩石可能具有多种成因,如:①榴辉岩相压力条件下玄武质岩石的部分熔融;②低压下具高 Sr/Y 比值的中酸性岩石的部分熔融(Kamei et al., 2009);③玄武质岩浆

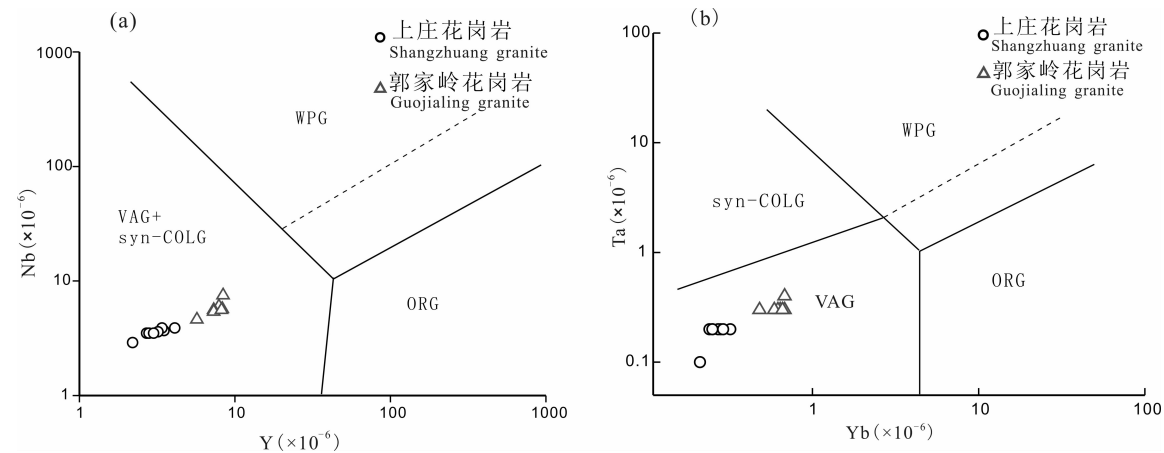


图 11 胶东半岛郭家岭和上庄岩体花岗岩 Nb-Y(a)和 Ta-Yb(b)元素含量的大地构造环境判别图解 (据 Pearce et al., 1984; VAG—火山弧花岗岩; Syn-COLG—同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; 虚线区域是 ORG 的异常区)

Fig. 11 Nb-Y(a) and Ta-Yb(b) discrimination diagrams of Guojialing and Shangzhuang granite Suite (VAG—volcanic-arc granite; Syn-COLG—syn-collision granite; WPG—within-plate granite; ORG—ocean ridge granite; Dashed line arises from the boundary line abnormal ridges ORG, after Pearce et al., 1984)

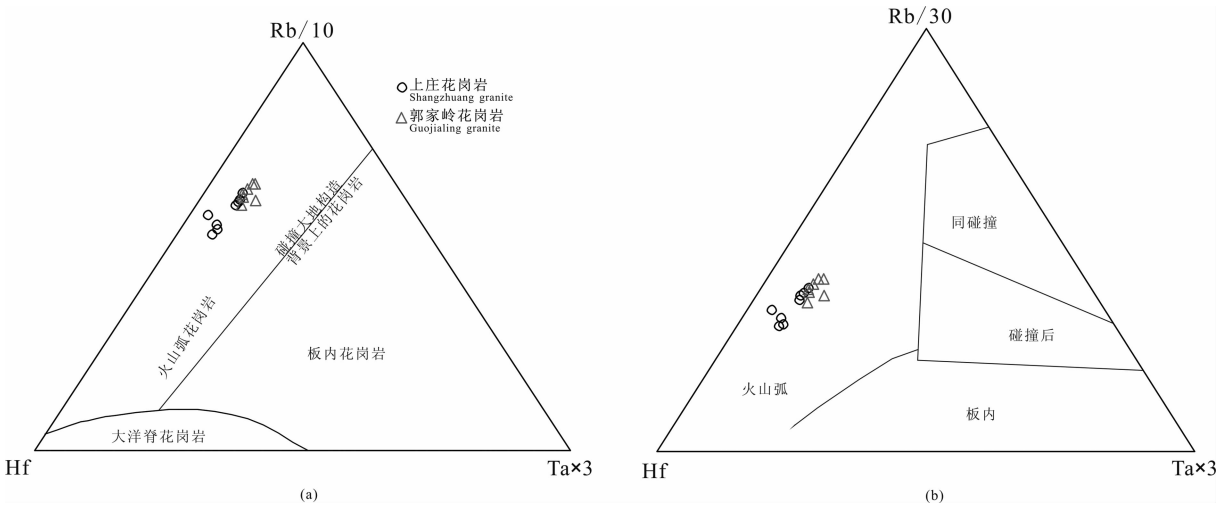


图 12 胶东半岛郭家岭和上庄岩体花岗岩成岩环境的 Hf-Rb/10-3Ta(a)和 Hf-Rb/30-3Ta(b)判别图(据 Harris et al., 1986)

Fig. 12 Hf-Rb/10-3Ta(a) and Hf-Rb/30-3Ta(b) discrimination diagrams of Guojialing and Shangzhuang granite Suite(after Harris et al., 1986)

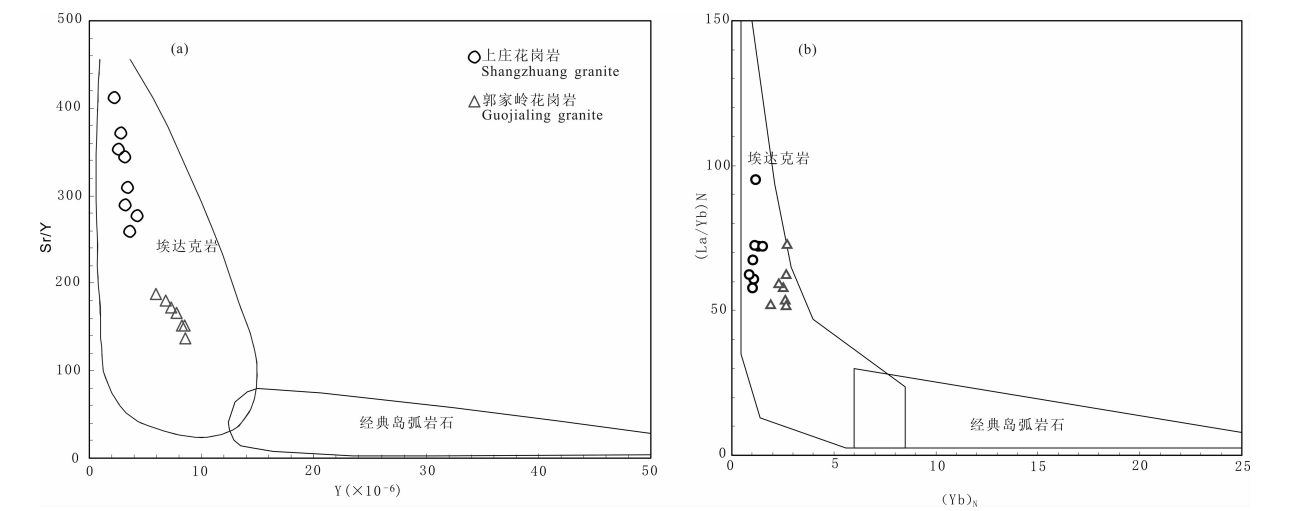


图 13 胶东半岛中生代郭家岭岩体和上庄岩体花岗岩的 Sr/Y-Y(a)和(La/Yb)_N-Yb_N(b)图解
(Adakite 和岛弧岩石的区域根据 Martin, 2005)

Fig. 13 Plots of Y-Sr/Y(a) and (La/Yb)_N-Yb_N(b) for Guojialing and Shangzhuang granite in Jiaodong Peninsula(areas of Adakite and OIB are after Martin, 2005)

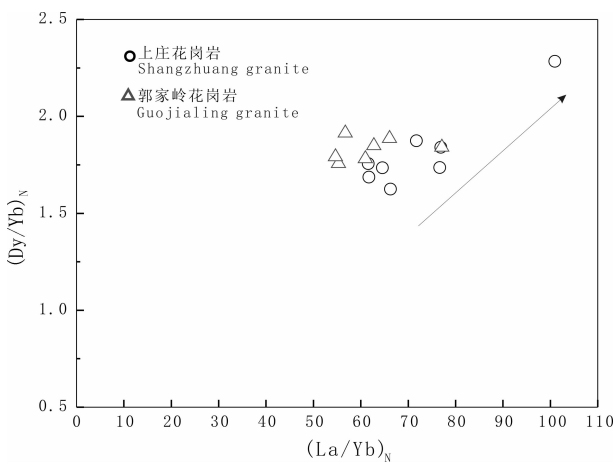


图 14 胶东半岛郭家岭岩体和上庄岩体
(Dy/Yb)_N-(La/Yb)_N 图解

Fig. 14 Plots of (Dy/Yb)_N-(La/Yb)_N for Guojialing and Shangzhuang granite in Jiaodong Peninsula

的高压分离结晶 (Macpherson et al., 2006; Richard et al., 2007)。第一种成因的高 Sr/Y 岩浆岩是通常定义的埃达克质岩石,包括俯冲板块来源的埃达克岩以及拆沉/加厚下地壳来源的埃达克质岩石,而后两种高 Sr/Y 岩浆岩由于不具备直接的岩石形成条件(如压力),为假埃达克质岩石(Kamei et al., 2009)。由于成因的多样性,如何区别不同成因的高 Sr/Y 中酸性岩石尤为重要。He Y S 等(2011)最近通过对大别山早白垩纪具有高 Sr/Y 比值的花岗质岩石与低 Sr/Y 比值的花岗质岩石进行对比后发现,尽管高 Sr/Y 花岗质岩石和普通花岗岩具有相似的 SiO₂变化范围,但 Sr/Y 花岗质岩石

具有耦合的高 (La/Yb)_N、(Dy/Yb)_N、Sr/Y、Nb/Ta 比值,而普通花岗岩具有低的 (La/Yb)_N、(Dy/Yb)_N、Sr/Y、Nb/Ta 比值,这些差异表明大别山早白垩世高 Sr/Y 花岗质岩石来自加厚下地壳的部分熔融,熔融过程中石榴石为主要残留相,而没有斜长石。因为仅石榴石能够有效地分异重稀土,且分配系数 Yb 大于 Dy,因此在榴辉岩相部分熔融过程中石榴石作为主要残留相将产生高 (Dy/Yb)_N 的岩浆,(La/Yb)_N与(Dy/Yb)_N的正相关关系进一步支持这一点(Liu S A et al., 2010),而玄武质岩浆结晶分异过程中单斜辉石/角闪石分异均不能显著增加熔体的 (Dy/Yb)_N,这已经被实际观察到(Castillo et al., 2006; Li J W et al., 2009)。

郭家岭岩体和上庄岩体都具有高的 Sr 含量 (913×10⁻⁶~1325×10⁻⁶),低的 Y 含量 (2.2×10⁻⁶~8.4×10⁻⁶)和 Yb 含量 (0.21×10⁻⁶~0.68×10⁻⁶),较高的 (Dy/Yb)_N 比值 1.62~2.28,且它们的高 Sr/Y 和 (Dy/Yb)_N 比值与 (La/Yb)_N 呈现良好的正相关(图 14),暗示花岗岩岩浆形成时石榴石是一个重要的残留相,结合两岩体几乎无负的 Eu 异常,熔融过程中应该没有斜长石作为残留相。由于玄武质岩浆结晶分异过程中单斜辉石/角闪石分异均不能显著增加熔体的 (Dy/Yb)_N,因此并不能由玄武质岩浆结晶分异出郭家岭型花岗岩浆,结合前面的构造环境判别图所指示的岛弧环境,说明郭家岭花岗岩岩浆的形成是在榴辉岩相压力条件下洋壳玄武质岩石的部分熔融,残留相主要是石榴石,几

乎没有角闪石和斜长石。

6 结论

(1)郭家岭岩体和上庄岩体花岗岩都以具有大的钾长石巨晶为特征的一种似斑状结构。LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄得出郭家岭岩体年龄 125.4 ± 2.2 Ma, 上庄岩体 U-Pb 年龄 128.8 ± 2.0 Ma, 都为中生代早白垩世。两岩体年龄相差 3Ma, 在年龄误差范围来看可以把两岩体作为同一期岩浆事件, 也在年龄角度证实两岩体都同属郭家岭花岗岩基。

(2)郭家岭岩体和上庄岩体具有相似的稀土元素和微量元素分配模式, 表现出明显的 LREE 富集和 HREE 极度亏损, 没有明显的铕负异常。二者都具有类似埃达克岩的特征, 都具有高的 Sr 低的 Y 和较高的 $(Dy/Yb)_N$ 比值特征, 根据大地和构造环境推测郭家岭型花岗岩形成成为岛弧环境下(榴辉岩相压力条件)玄武质洋壳的部分熔融。

(3)郭家岭岩体和上庄岩体花岗岩的锆石年龄中都含有太古宙和晚侏罗纪的继承锆石, 指示两岩体的成岩物质来源具相似性, 都包含太古宙岩石和晚侏罗世源区物质成分, 显示俯冲洋壳重熔岩浆在上涌过程中都经历了同化混染作用, 该区金矿的成矿作用显然受制于这种岩浆作用, 金也应源自于这种复杂的源区物质。

致谢: 感谢山东招金集团河东金矿有关人员和金创公司黑岚沟金矿区有关人员对本研究提供的野外工作支持, 尤其感谢金创公司技术科郭庆海在考察和采样过程中的鼎力帮助。LA-ICP MS 锆石 U-Pb 定年实验感谢广州地化所李贺、李双和李聪颖博士的大力相助。

参 考 文 献

曹国权. 1990. 试论“胶南地体”. 山东地质, 6(2): 1~10.
陈衍景, Priajno F, 赖勇, 李超. 2004. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境. 岩石学报, 4: 907~922.
关康, 罗镇宽, 苗来成, 黄佳展. 1998. 胶东招掖郭家岭型花岗岩锆石 SHRIMP 年代学研究. 地质科学, 33(3): 318~328.
郭文魁, 段承敬. 1951. 山东招远玲珑金矿. 地质论评, 16(1): 112~113.
胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 万渝生, 刘敦一, 翟明国, 金成伟. 2004. 胶东乳山含金石英脉型金矿的成矿年龄: 热液锆石 SHRIMP 法 U-Pb 测定. 科学通报, 49(12): 1191~1198.
胡世玲, 王松山, 桑海清, 裘冀, 张任祜. 1987. 山东玲珑和郭家岭岩体的同位素年龄及其地质意义. 岩石学报, 3: 83~89.
胡受奚, 赵一英, 徐兵, 卢冰. 1992. 山东的地体构造与金的区域成矿规律. 黄金科技动态, 5: 12~14.

胡受奚, 孙景贵, 凌洪飞, 叶瑛, 翟建平, 方长泉. 2001. 中生代苏—鲁活动大陆边缘榴辉岩、煌斑岩、金矿及富集地幔间的成因联系. 岩石学报, 17(3): 425~435.
卢焕章, J. Guha, 方根保. 1999. 山东玲珑金矿的成矿流体特征. 地球化学, 28(5): 421~437.
刘荣, 胡瑞忠, 赵军红, 冯彩霞, 钟宏, 曹建劲, 史丹妮. 2005. 胶北晚中生代煌斑岩的岩石地球化学特征及其成因研究. 岩石学报, 21(3): 947~958.
李俊建, 罗镇宽, 刘晓阳, 徐卫东, 骆辉. 2005. 胶东中生代花岗岩及大型—超大型金矿床形成的地球动力学环境. 矿床地质, 24(4): 361~372.
李兆龙, 杨敏之. 1993. 胶东金矿床地质地球化学. 天津: 天津科学技术出版社, 1~300.
林景仟, 谭东娟, 迟效国, 毕立岩, 谢才富, 许文良. 1992. 胶辽半岛中生代花岗岩. 北京: 科学出版社.
林润生, 于志臣. 1988. 山东胶北隆起区荆山群. 山东地质, 4(1): 1~21.
毛景文, 李厚民, 王一天, 张长青, 王瑞廷. 2005. 地幔流体参与胶东金矿成矿作用的氢氧碳硫同位素证据. 地质学报, 79(6): 839~857.
任纪舜, 等. 1981. 中国大地构造及其演化. 北京: 科学出版社.
沈保丰, 骆辉, 韩刚, 等. 1994. 辽北—吉南北太古宙地质及成矿. 北京: 地质出版社, 1~202.
沈昆, 胡受奚, 孙景贵. 2000. 山东招远大尹格庄金矿成矿流体特征. 岩石学报, 16(4): 542~550.
王德洪, 林润生. 1991. 山东省平度地区下元古界荆山群变质作用特征. 山东地质, 7(2): 1~16.
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的研究. 山东地质, 5: 1~125.
徐九华, 何知礼, 谢玉玲. 1996. 绿岩型金矿床成矿流体的地球化学. 北京: 地质出版社, 1~99.
余汉茂. 1987. 胶东西北部地区岩石同位素地质年代学研究. 山东地质, 3(1): 75~88.
朱丰三. 1979. 混合岩化热液金矿床的地球化学、岩石学和成矿作用的初步研究. 见: 中国东部金矿主要类型及找矿方向(第一集), 吉林冶金地质勘查公司研究所汇编.
翟明国, 杨进辉, 刘文军. 2001. 胶东大型黄金矿集区及大规模成矿作用. 中国科学(D辑), 31(7): 545~552.
翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 苗来成. 2004. 非造山带型金矿—胶东型金矿的陆内成矿作用. 地学前缘, 11(1): 85~98.
翟建平, 胡凯, 陆建军. 1995. 山东乳山金矿床的流体包裹体和氢氧同位素地球化学研究. 地球化学, 24(增刊): 141~149.
张田, 张岳桥. 2007. 胶东半岛中生代侵入岩浆活动序列及其构造制约. 高校地质学报, 13(2): 323~336.
张文起. 1995. 胶东地区粉子山群及蓬莱群地层铅同位素组成探讨. 山东地质, 11(1): 18~24.
Castillo P R. 2006. An overview of adakite petrogenesis. Chinese Science Bulletin, 51(3): 257~268.
Chen Y J, Pirajno F, Qi J P. 2005. Origin of gold metallogeny and sources of ore-forming fluids, Jiaodong Province, Eastern China. International Geology Review, 47: 530~549.
Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc

- magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662~665.
- 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.
- Fan H R, Hu F F, Yang J H, Zhai M. G. 2007. Fluid evolution and large-scale gold metallogeny during Mesozoic tectonic transition in the Jiaodong Peninsula, eastern China. In: zhai, M. G. , Windley, B. F. , Kusky, T. M. , Meng, Q (eds.). *Mesozoic Sub Continental Lithospheric Thinning under Eastern Asia*. Geological Society of London, Special Publications, 280: 303~316.
- Goldfarb R J, Phillips G N, Nokleberg W J. 1998. Fectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific Rim. *Ore Geology Review*, 13: 185~218.
- Guo F, Fan W M, Li C W. 2006. Geochemistry of late Mesozoic adakites from the Sulu belt, eastern China; magma genesis and implications for crustal recycling beneath continental collisional orogens. *Geological Magazine*, 143: 1~13.
- Harris N B W, Pearce J A and Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward M. P. and Reis A. C. , *Collison tectonics*. Spec. Publ. Grol. Soc. Lond. , 19: 67~81.
- He Y S, Li S G, Hoefs J, Huang F, Liu S A, Hou Z H. 2011. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen; New evidence for partial melting of a thickened continental crust. *Geochim. Cosmochim.*, 75: 3815~3838.
- Hou M L, Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, Zhao K D. 2007. Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, east China; implications for crustal thickening to delamination. *Geological Magazine*, 144: 619~631.
- Kamei A, Miyake Y, Owada M, et al. 2009. A pseudo adakite derived from partial melting of tonalitic to granodioritic crust, Kyushu, southwest Japan arc. *Lithos*, 112: 615~625.
- Li J W, Zhao X F, Zhou M F, et al. 2009. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U-Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(3): 383~409.
- Liu S A, Li S G, He Y S, Huang F. 2010. Geochemical contrasts between early Cretaceous ore-bearing and ore-barren high-Mg adakites in central-eastern China; Implications for petrogenesis and Cu-Au mineralization. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 7160~7178.
- Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. 2006. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3-4): 581~593.
- Mao J W, Wang Y T, Zhang Z H, Yu J J, Niu B G. 2003. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas-Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits. *Science in China (Series D)*, 46: 838~851.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, Moyen J F, Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) and sanukitoid; relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79: 1~24.
- McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223~253.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G, 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25: 956~983.
- Qiu Y M, Groves D I, McNaughton N G, Wang L G, Zhou T H. 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.
- Richards J R, Kerrich R. 2007. Special paper: Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 102: 537~576.
- Rudnick R L. 1995. Making continental crust. *Nature*, 378: 571~578.
- Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the Continental Crust. In the *Crust* (ed. R. L. Rudnick), 3 *Treatise on Geochemistry* (eds. H. D. Holland and K. K. Turekian), Elsevier-Pergamon, Oxford: 1~64.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implication for mantle composition and process. In: Saunders, A. D., Norry, M. J. (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*, 42: 313~345.
- Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, Gong B. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating C and O isotopes for impure marbles in the Jiaobei terrane of the Sulu orogen; implication for its tectonic affinity. *Precambrian Research*, 144: 1~18.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The Continental Crust: its Compositions and Evolution. Blackwell, Oxford, pp. 27~72.
- Wang L G, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I, Luo Z K, Huang J Z, Miao L C, Liu Y K. 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids. *Ore Geology Reviews*, 13: 275~291.
- 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 Review*, 23: 125~152.
- Zhai M G, Yang J H, Liu W J. 2001. Large clusters of gold deposits and large-scale metallogenesis in the Jiaodong Peninsula, Eastern China. *Science in China (Series D)*, 44: 758~768.
- Zheng Y F. 2008. A perspective view on ultrahigh-pressure metamorphism and continental collision in the Dabie-Sulu orogenic belt. *Chinese Science Bulletin*, 53: 3081~3104.

Geochemical and Geochronological Study of the Gold-Related Guojialing
Pluton and Shangzhuang Pluton in Jiaobei Block

LUO Xiandong^{1,2)}, YANG Xiaoyong¹⁾, DUAN Liuan¹⁾, SUN Weidong³⁾

1) CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026; 2) Reconnaissance Technology Institute of Anhui, Hefei, 230031;
3) CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640

Abstract

The Jiaodong Peninsula is the most important pool of native gold ore deposits in China, which is mostly controlled by Granite. In this paper, we discuss the genesis and material source of gold deposit by study the geochemistry and geochronology characteristics of the Guojialing Granite. Two granite plutons of the Guojialing Granite are studied in this paper, which are the Shangzhuang pluton and Guojialing Pluton. This dissertation presents a combined study of petrography and mineralogy, whole-rock major, trace elements and U-Pb isotopes for granite of these two plutons, to obtain some recognition of the genesis, material source and presence of natural gold for Mesozoic magmatic rocks in the Jiaodong Peninsula. LA-ICPMS zircon U-Pb dating yields Early Cretaceous age of 125.4 ± 2.2 Ma for the Guojialing pluton, and also Early Cretaceous age of 128.8 ± 2.0 Ma for the Shangzhuang pluton, with an age difference of 3 Ma. From the perspective of age, these two plutons all belong to Guojialing granite with the same intruding period. Granite of the two plutons contain inherited zircons with Archean and Late Jurassic ages, indicating similar material sources containing components of both Archean rocks and Late Jurassic granite composition. The Guojialing and Shangzhuang plutons have similar distribution patterns of REE and trace elements, with LREE and LILE enrichment but HREE and HFSE depletion, slightly negligible Eu anomalies. Both of them have high Sr, low Yb and Y contents corresponding to high (La/Yb)_N and Sr/Y ratios, resembling to normal adakites. This indicates the presence of garnet with none Plagioclase as residual phases during partial melting. They Both have relatively low MgO, Cr, Ni contents and thus low Mg#. All these results indicate that Guojialing Granite is formed by partial melting of basaltic rocks of oceanic crust with the presence of garnet as residual phase in the island arc environment.

Key words: Jiaobei Block; Guojialing Pluton; LA-ICP MS; adakites; island arc