

胶东郭家岭序列北截杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学、岩石学、地球化学特征及构造意义

迟乃杰^{1,2}, 韩作振², 单伟¹, 刘传娥³, 熊玉新¹, 舒磊¹, 李增胜¹, 郭广军¹, 马祥县¹

(1. 山东省地质科学研究院 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室,

山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东 济南 250013;

2. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 山东省地矿工程勘察院, 山东 济南 250014)

摘要: 胶东地区大规模金成矿作用与中生代构造、岩浆活动关系紧密, 如郭家岭期岩浆杂岩体与该区域大规模的金成矿期存在较好的时间耦合性。本研究以郭家岭期北截杂岩体中发育的两期花岗闪长岩为研究对象, 开展岩相学、全岩主微量元素地球化学及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究。北截杂岩体两期花岗闪长岩均为似斑状结构, 但二者的基质粒度表现出显著的差异性, 其中较早一期(132.9±1.2) Ma 花岗闪长岩中基质为中粗粒结构, 而较晚一期(129.7±1.1) Ma 花岗闪长岩中基质呈中细粒结构; 前者具有高钾钙碱性特征, 后者属中钾-高钾钙碱性系列, 二者均表现出准铝质至弱过铝质特征。两期花岗闪长岩的主量元素具良好的线性关系, 表明二者为同源岩浆演化的结果。此外, 早期就位岩体与晚期岩体的微量元素特征存在轻微差异, 且岩浆物质来源显示为壳幔混源, 说明胶东地区中生代发育的岩浆杂岩体以持续构造活动为基础, 存在长期活动的岩浆房, 不同时期的同源岩浆具有轻微的演化程度差异。

关键词: 郭家岭序列; 北截杂岩体; SHRIMP 锆石; 岩浆演化; 构造环境

中图分类号: P597

文献标志码: A

SHRIMP U-Pb zircon geochronology, petrology, geochemical characteristics and tectonic significance of Beijie complex of Guojialing sequence in Jiaodong Peninsula

CHI Naijie^{1,2}, HAN Zuozhen², SHAN Wei¹, LIU Chuan'e¹, XIONG Yuxin¹,

SHU Lei¹, LI Zengsheng¹, GUO Guangjun¹, MA Xiangxian¹

(1. Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization of Ministry of Natural Resources, Shandong Key Laboratory of Mineralization Geological Processes and Resources Utilization in Metallic Minerals,

Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan, Shandong 250013, China;

2. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 3. Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: Large-scale gold mineralization in Jiaodong area is closely related to Mesozoic tectono-magmatic activity. For example, there is a good time coupling between Guojialing magmatic complex and the large-scale gold mineralization period in this area. In this paper, two stages of granodiorites in Beijie complex of Guojialing sequence

收稿日期: 2021-05-15

基金项目: 山东省地质勘查委托项目(鲁勘字(2019)8号, 鲁勘字(2020)7号); 山东省自然科学基金项目(ZR2019PD019); 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室开放课题(kfkt201810)

作者简介: 迟乃杰(1984—), 男, 山东蓬莱人, 工程师, 博士研究生, 主要从事金属矿产的勘探研究与矿床地球化学研究, 山东科技大学地质工程专业 2004 级校友. E-mail: chinaijie@163.com

韩作振(1965—), 男, 河南新乡人, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石与矿物学方面的研究工作, 本文通信作者. E-mail: hanzz@163.com

have been studied in terms of petrography, major and trace element geochemistry of the whole rock and SHRIMP zircon U-Pb chronology. Both of the granodiorites in Beijie complex show porphyritic texture, but their granularity of the matrix minerals is significantly different. The granodiorite of the earlier stage (132.9 ± 1.2) Ma is of medium-coarse structure while the granodiorite of the later stage (129.7 ± 1.1) Ma is of medium-fine structure. The former has the characteristics of high K calc-alkaline while the latter belongs to the middle K to high K calc-alkaline series. Both of them show quasi-aluminous to weak peraluminous characteristics. There is a good linear relationship between the major elements of the two granodiorites, indicating that the two granodiorites are the results of homologous magmatic evolution. In addition, there are slight differences in the characteristics of trace elements between the two stages of granodiorites, and the source of magmatic material is crust-mantle mixed source. This indicates that the Mesozoic magmatic complex developed in Jiaodong area is based on continuous tectonic activity, that there are long-term active magma chambers, and that the homologous magmas in different periods have slight differences in evolution.

Key words: Guojialing sequence; Beijie complex; SHRIMP zircon; magmatic evolution; tectonic environment

胶东地区是中国最大的黄金生产基地,也是世界第三大金矿区,累计查明金资源量和产能多年来稳居全国第一,中国绝大多数超大型、大型金矿均集中于此。长期以来,胶东地区的金成矿研究一直是地学研究的热点问题,前人^[1-4]在区域构造、成矿流体、岩浆演化、成矿机制等方面开展了一些研究,主要涉及典型成矿区岩浆岩的岩相学、矿物学、同位素地球化学、元素地球化学及流体包裹体的研究,但对构造-岩浆-成矿的研究相对欠缺。与胶东地区许多大型-特大型金矿关系密切的呈串珠状展布的郭家岭序列花岗岩在岩石成因方面还存在争议。曲晓明等^[5]将郭家岭期的岩浆作用分为两个阶段,早期以花岗闪长岩为主,晚期以呈小岩株产出的石英闪长岩为主,认为郭家岭花岗岩是由壳幔物质混合形成。杨进辉等^[6]认为郭家岭花岗闪长岩是由下地壳镁铁质岩石脱水部分熔融作用形成。常裕林等^[7]指出郭家岭花岗岩应该属于幔源物质参加的同熔型花岗岩,可能经历了多期次构造-岩浆作用。因此,明确郭家岭花岗岩成因、阐明其形成机理和演化过程等对中国东部中生代深部构造格架、岩浆演化及金成矿过程与机制等研究具有重要意义。

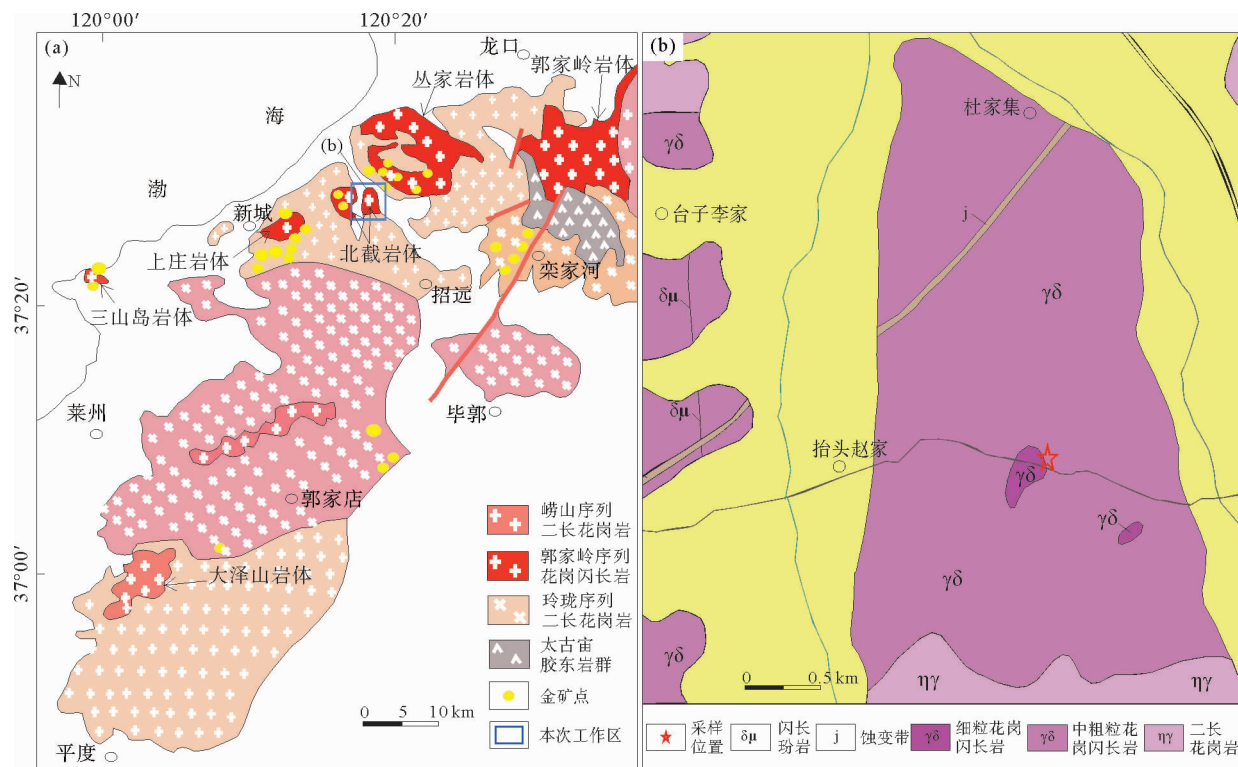
本研究在胶东地区郭家岭期花岗闪长岩岩石学、地球化学、同位素年代学等的基础上,通过对郭家岭序列北截杂岩体的地质背景、SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学、岩石学、地球化学的系统研究,探讨了地壳结构对岩浆演化的约束以及北截岩体的形成演化过程和成因,为胶东地区中生代以来地质体结构的形成以及地质作用过程的研究提供了新的视角。

1 区域地质背景

胶东地区是发育中生代构造-岩浆作用的内生热液金成矿集中区。胶东地处胶东半岛胶辽隆起区^[8],西为郯庐断裂带,南与大别-苏鲁超高压变质带相接。胶东地区地层主要为胶东岩群,是区内最古老的地层,呈包体形式残留于新太古代栖霞序列 TTG 中,呈东西向分布,主要岩石类型为斜长角闪岩、黑云变粒岩、斜长片麻岩等,是一套角闪岩相和角闪麻粒岩相的区域变质岩。胶东地区岩浆活动强烈,分布广泛,是由 160~150 Ma 的玲珑序列且原地重熔型钙碱性黑云二长花岗岩和 132~126 Ma 的郭家岭序列且壳幔混合成因的高钾钙碱性花岗闪长岩组成^[9];郭家岭序列花岗闪长岩岩体呈串珠状 NEE 方向侵入玲珑序列二长花岗岩中;郭家岭序列岩体自西向东出露规模依次增大,分别为三山岛岩体、上庄岩体、北截岩体、丛家岩体、曲家岩体和郭家岭岩体(图 1(a))。

本次研究对象为招远市张星镇正西方向出露的郭家岭序列北截杂岩体(图 1(b)),岩体内发育两种岩相不同的花岗闪长岩(图 2(a)),分别为似斑状中粗粒花岗闪长岩(图 2(b))和似斑状细粒花岗闪长岩(图 2(c));二者的岩石类型及矿物组成均为含斑花岗闪长岩类,斑晶为钾长石,基质为斜长石、钾长石、石英、黑云母、角闪石、榍石、不透明矿物等(图 2(d)),但基质的粒度及暗色矿物含量存在较大差异。中粗粒花岗闪长岩样品呈浅肉红色,钾长石斑晶粒径 5~15 mm,含量 15%~25%,基质包括石英(25%~30%)、斜长石(25%~35%)、钾长石(10%~15%)及少量黑云母(5%~7%)、角闪石(1%~5%),矿物粒径为 2.0~

7.0 mm。细粒花岗闪长岩样品呈浅灰色,斑晶较小,直径3~8 mm,斑晶含量约10%~15%;石英、长石等矿物粒径一般小于3.0 mm,以中细粒为主;暗色矿物主要为黑云母(约10%)及角闪石(5%~10%)。



(a)胶东地质简图;(b)北截杂岩体地质简图

图1 胶东地区与研究区地质图

Fig. 1 Geological map of Jiaodong area and research area

2 分析方法

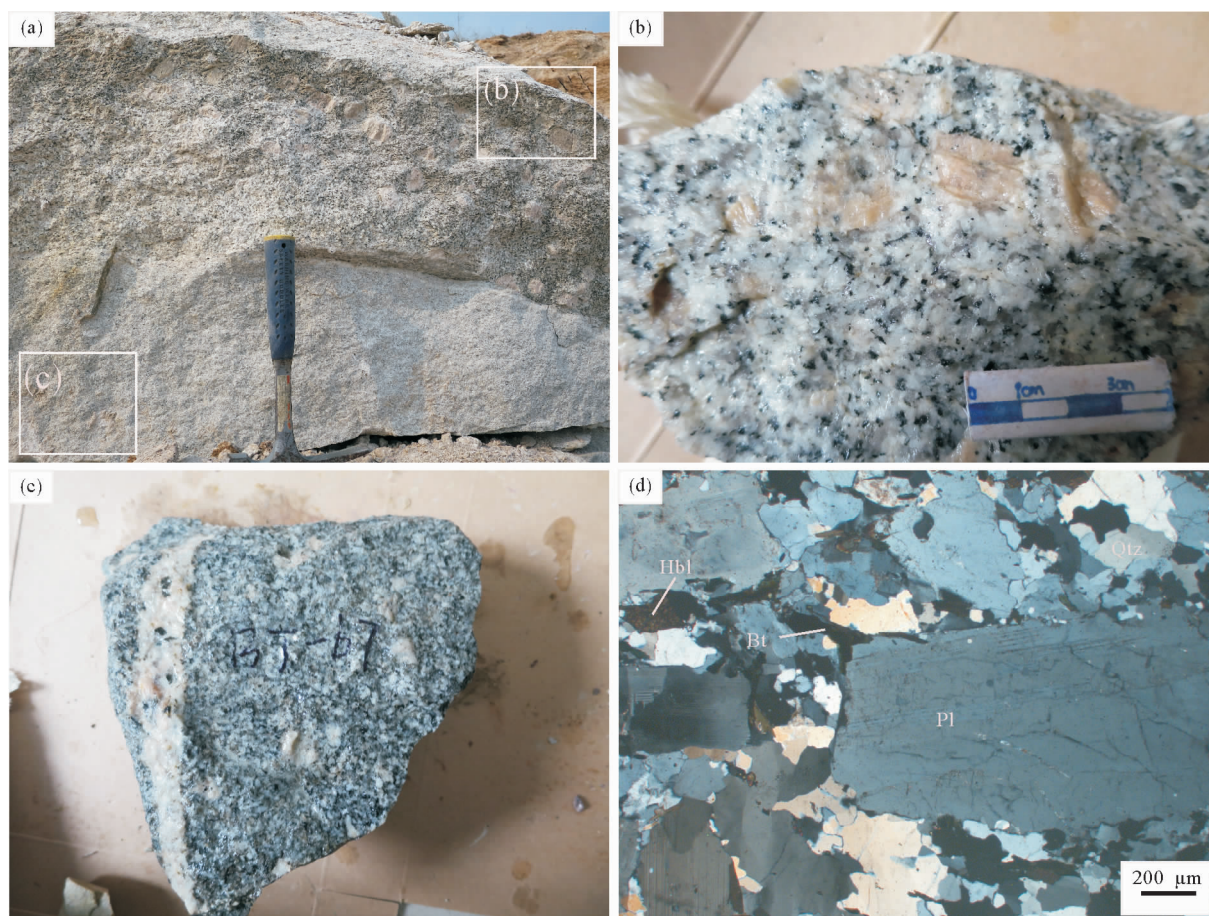
2.1 锆石 SHRIMP 年龄测定

研究区北截杂岩体锆石 SHRIMP 年龄样品的锆石单矿物挑选委托廊坊诚信地质服务公司完成。首先将样品机械破碎至 80 目,然后磁选、重液分选和锆石人工挑选,获得单颗粒锆石。锆石 U-Pb 测年工作委托中国地质科学院北京离子探针中心完成,先将挑选出的纯净锆石裱在不含 U-Th-Pb 的环氧树脂靶上,然后对样品靶表面进行抛光处理,之后用透射光和反光照相并喷金,最后是阴极发光(CL)照相,选择生长环带较好、无裂纹的锆石颗粒进行年龄测定。详细制靶和实验流程见宋彪等^[10]。

本次共测试点位 49 个,对测定结果用标样 U-Th-Pb 同位素含量及年龄进行校正,普通铅根据实测的 ^{204}Pb 进行校正,单个数据点误差为 1σ ,加权平均年龄误差为 95% 可信度,数据处理采用 Squid 和 Isoplot 程序,由离子探针中心工作人员完成。

2.2 岩石地球化学分析

全岩主微量、稀土元素测试由国土资源部济南矿产资源监督检测中心完成。先将新鲜岩石样品(300 g 左右)粉碎到 200 目,采用湿化学分析法进行主量元素分析,其中 SiO_2 烧失量采用重量法; CaO 、 MgO 、 FeO 采用容量法。微量元素和稀土元素分析采用等离子发射光谱仪(IRISIntrepidII)、原子吸收光谱仪(AASPE400,PE600)、原子荧光光谱仪(AFS-820)、等离子质谱仪(XSERIES2)等完成,采用国家标准 GB/T 14506—2010《硅酸盐岩石化学分析方法》校正,微量元素的测定误差低于 10%,主量元素的测定误差低于 5%。



(a)北截岩体两种花岗闪长岩接触关系及(b)、(c)的采样位置;(b)中粗粒似斑状花岗闪长岩;(c)中细粒似斑状花岗闪长岩;
(d)显微照片,主要造岩矿物为石英(Qtz)、斜长石(Pl)、黑云母(Bt)、角闪石(Hbl)

图2 北截杂岩体两种花岗闪长岩岩相学特征

Fig. 2 Petrographic characteristics of two kinds of granodiorite in Beijie complex

3 结果

3.1 锆石 SHRIMP 测试结果

对采自郭家岭序列北截杂岩体的似斑状中粗粒花岗闪长岩(BJ-b3)和似斑状中细粒花岗闪长岩(BJ-b7)样品进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年,锆石阴极发光 CL 图像均显示振荡环带结构发育,大多锆石具核幔结构,反映其继承性生长的特点。锆石颗粒较大,幔部生长结构清晰,环带规整,长宽比 $1:3 \sim 1:2$,符合岩浆锆石的特征,内核多呈浑圆状、浅白色,部分颜色较深;部分锆石具暗色生长边,可能为后期流体作用所致。

似斑状中粗粒花岗闪长岩的锆石 U 含量为 $330 \sim 2\,339 \mu\text{g/g}$ (表 1), Th 含量 $12 \sim 227 \mu\text{g/g}$, Th/U 比值为 $0.02 \sim 0.44$,变化范围中等。分析结果显示 2 个太古代年龄和 2 个侏罗纪年龄,锆石呈浑圆状特征表明这些年龄较老的锆石均为继承锆石,其他 11 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中分布在 $128 \sim 136 \text{ Ma}$ (图 3),加权平均值为 $(132.9 \pm 1.2) \text{ Ma}$ (MSWD=1.6),该年龄为似斑状中粗粒花岗闪长岩的结晶年龄。

似斑状中细粒花岗闪长岩的锆石 U 含量为 $75 \sim 1\,555 \mu\text{g/g}$ (表 1), Th 含量为 $3 \sim 255 \mu\text{g/g}$, Th/U 比值为 $0.03 \sim 1.09$,变化范围较大。年龄结果中有 2 个为元古代年龄、1 个为三叠纪年龄,为继承锆石的年龄,其他的 10 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 $(125.9 \sim 136.5) \text{ Ma}$ (图 3),加权平均值为 $(129.7 \pm 1.1) \text{ Ma}$ (MSWD=1.5),该年龄为似斑状中细粒花岗闪长岩的结晶年龄。

表 1 北截杂岩体粗粒花岗岩闪长岩与细粒花岗岩闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年结果
Tab. 1 SHRIMP zircon U-Pb dating results of coarse-grained granodiorite and fine-grained granodiorite in Beijie complex

测点号	含量/($\mu\text{g/g}$)				Th/U				年龄/Ma				同位素比值			
	U	Th	Pb		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	1σ
BJ-b3-01	1 030	59	18.9	0.06	136.1	2.0	154	55	153	13.0	0.050 13	0.001 0	0.144 6	0.004 0	0.021 34	0.000 31
BJ-b3-02	901	52	16.2	0.06	133.7	1.9	206	85	144	25.0	0.050 90	0.001 3	0.145 2	0.005 7	0.020 95	0.000 31
BJ-b3-03	955	165	16.9	0.18	130.8	1.9	103	110	106	12.0	0.051 90	0.001 1	0.135 9	0.006 4	0.020 50	0.000 30
BJ-b3-04	754	12	13.6	0.02	133.7	2.0	175	59	150	35.0	0.050 30	0.001 2	0.143 2	0.004 2	0.020 95	0.000 31
BJ-b3-05	627	73	11.4	0.12	135.2	2.0	124	89	135	13.0	0.050 30	0.001 3	0.141 7	0.005 7	0.021 20	0.000 32
BJ-b3-06	395	227	184.0	0.59	2 788.0	130.0	2 482	36	2 910	180.0	0.162 60	0.003 5	12.120 0	0.720 0	0.541 00	0.030 00
BJ-b3-07	2 339	138	44.1	0.06	139.5	1.9	85	50	109	16.0	0.049 78	0.000 6	0.143 9	0.003 7	0.021 88	0.000 31
BJ-b3-08	1 368	178	24.7	0.13	133.6	1.9	-43	78	96	11.0	0.049 59	0.000 8	0.130 7	0.004 6	0.020 95	0.000 31
BJ-b3-09	369	156	144.0	0.44	2 418.0	35.0	2 518	± 20	2 477	58.0	0.166 00	0.002 0	10.420 0	0.220 0	0.455 10	0.007 80
BJ-b3-10	691	58	12.2	0.09	130.3	2.0	4	160	86	35.0	0.051 40	0.001 2	0.129 8	0.008 8	0.020 41	0.000 31
BJ-b3-11	1 164	138	21.0	0.12	134.0	1.9	242	41	149	4.6	0.050 62	0.000 9	0.147 8	0.003 4	0.021 01	0.000 30
BJ-b3-12	371	122	8.4	0.34	167.5	2.6	163	69	165	5.4	0.049 10	0.001 4	0.178 9	0.006 0	0.026 32	0.000 41
BJ-b3-13	596	54	10.6	0.09	131.0	2.0	27	110	112	21.0	0.050 50	0.001 3	0.131 8	0.006 6	0.020 53	0.000 31
BJ-b3-15	1 988	155	36.3	0.08	135.1	1.9	37	66	99	16.0	0.049 88	0.000 7	0.136 6	0.004 3	0.021 18	0.000 30
BJ-b3-16	836	133	14.5	0.16	128.3	1.9	-57	66	110	5.2	0.047 90	0.001 1	0.124 7	0.003 8	0.020 11	0.000 30
BJ-b3-17	330	45	8.2	0.14	180.9	2.9	-78	220	75	39.0	0.055 60	0.001 6	0.175 0	0.016 0	0.028 46	0.000 47
BJ-b7-01	1 555	255	28.7	0.17	136.5	1.7	-10	70	110	8.3	0.045 90	0.001 3	0.135 3	0.004 3	0.021 40	0.000 26
BJ-b7-02	440	12	13.2	0.03	220.6	2.8	182	67	206	63.0	0.049 70	0.001 4	0.238 7	0.007 6	0.034 82	0.000 45
BJ-b7-03	105	3	2.0	0.03	140.1	2.7	58	390	—	—	0.047 20	0.007 7	0.143 0	0.023 0	0.021 98	0.000 43
BJ-b7-04	285	72	77.9	0.26	1 781.0	20.0	1 829	12	1 766	31.0	0.111 83	0.000 7	4.905 0	0.070 0	0.318 10	0.004 00
BJ-b7-05	570	86	10.2	0.16	130.9	1.8	-229	180	79	20.0	0.042 00	0.003 0	0.118 7	0.008 7	0.020 52	0.000 28
BJ-b7-06	470	72	10.1	0.16	158.3	2.1	171	99	148	15.0	0.049 50	0.002 1	0.169 6	0.007 6	0.024 86	0.000 33
BJ-b7-07	75	79	16.2	1.09	1 440.0	25.0	1 415	65	1 081	31.0	0.089 50	0.003 0	3.090 0	0.120 0	0.250 20	0.004 90
BJ-b7-08	389	37	7.0	0.10	132.1	2.0	213	150	97	33.0	0.050 40	0.003 3	0.143 8	0.009 6	0.020 70	0.000 32
BJ-b7-09	839	75	14.6	0.09	128.7	1.6	66	73	139	13.0	0.047 30	0.001 4	0.131 6	± 0.004 3	0.020 17	0.000 26
BJ-b7-10	494	62	8.8	0.13	132.1	1.7	297	87	165	14.0	0.052 30	0.002 0	0.149 2	± 0.006 0	0.020 71	0.000 28
BJ-b7-11	470	39	8.2	0.09	127.1	1.8	-102	200	—	—	0.044 20	0.003 7	0.121 0	0.010 0	0.019 91	0.000 28
BJ-b7-12	970	136	17.3	0.14	132.1	1.7	101	94	125	13.0	0.048 00	0.001 9	0.137 1	0.005 7	0.020 70	0.000 26
BJ-b7-13	1 127	201	19.8	0.18	130.0	1.6	-49	83	122	7.8	0.045 10	0.001 5	0.126 7	0.004 6	0.020 36	0.000 25
BJ-b7-14	812	85	14.1	0.11	128.4	1.6	117	55	112	6.5	0.048 40	0.001 1	0.134 2	0.003 6	0.020 12	0.000 26
BJ-b7-15	169	37	3.0	0.23	131.3	2.6	301	110	141	8.8	0.052 40	0.002 6	0.148 5	0.007 9	0.020 57	0.000 41
BJ-b7-16	1 065	176	19.3	0.17	134.5	1.7	188	54	136	6.0	0.049 90	0.001 2	0.144 9	0.003 8	0.021 08	0.000 26
BJ-b7-17	387	63	6.6	0.17	125.9	1.8	115	160	122	19.0	0.048 30	0.003 3	0.131 5	0.009 2	0.019 73	0.000 28

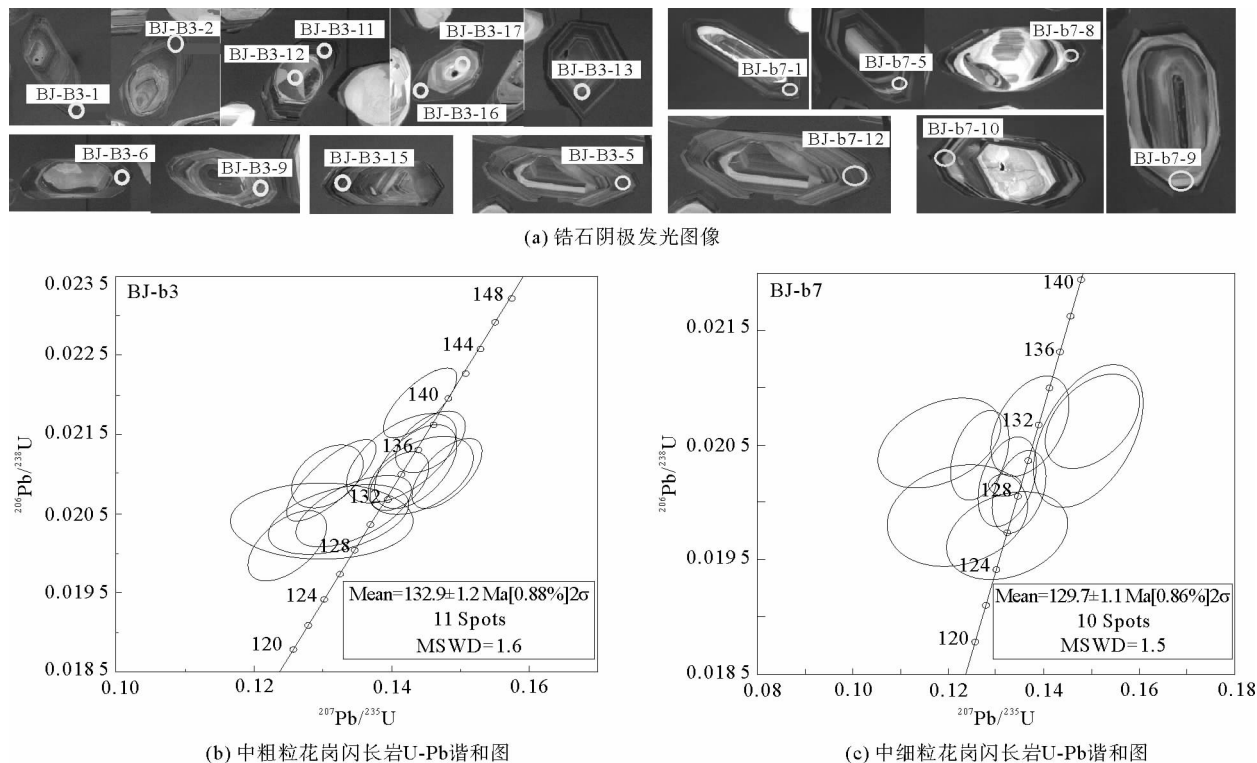


图 3 北截杂岩体中粗粒花岗闪长岩与中细粒花岗闪长岩中锆石阴极发光图像和锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 3 Cathodoluminescence image and zircon U-Pb concordance diagram of the coarse-grained granodiorite and the medium-fine-grained granodiorite in Beijie complex

3.2 全岩主微量元素特征

由表 2 所示,似斑状中粗粒花岗闪长岩样品的 SiO_2 含量为 72.10%~73.36%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 1.52~3.68 > 1.0, 表现为富钠特征; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 值为 7.06%~8.23%, 在 TAS 投点图中(图 4(a))样品点落在花岗岩区; 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 4(b))中样品点落入高钾钙碱性系列区域。含铝指数 A/CNK 为 0.94~0.98, 在 A/CNK-A/NK 投点图上(图 4(c))与郭家岭花岗岩及高 Sr-Ba 花岗岩类似, 属于准铝质花岗岩。似斑状中粗粒花岗闪长岩样品 SiO_2 含量为 70.52%~74.10%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 1.09~1.53, 具富钠特征; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 值为 7.76%~8.77%, 在 TAS 投点图中样品点落在花岗岩区(图 4(a)); 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 投点图中(图 4(b))落入高钾-中钾钙碱性系列区域。含铝指数 A/CNK 为 0.90~1.05, 在 A/CNK-A/NK 投点图上(图 4(c))中落入准铝质-弱过铝质花岗岩。

在微量元素原始地幔标准化图解中(图 5(a)), 似斑状中粗粒花岗闪长岩岩体与似斑状中细粒花岗闪长岩岩体均明显富集 Ba、Sr、K、Pb 等大离子亲石元素(large ionic lithophile element, LILE), 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(high field strength element, HSFE), 高 Sr/Y 比值 110.87~278.14, Rb/Sr 比值为 0.029~0.076, 显示出典型的高 Ba-Sr 花岗岩所具有的地球化学特征, 表现出大陆下地壳岩石部分熔融形成的酸性岩浆与早先幔源岩浆底侵作用形成的年轻镁铁质地壳部分熔融形成的中性岩浆混合形成的岩浆岩特征。

在球粒陨石标准化稀土元素(rare earth element, REE)配分图上(图 5(b)), 似斑状中粗粒花岗闪长岩的稀土元素含量略高于似斑状中细粒花岗闪长岩, 二者的 ΣREE 分别为 38.96~54.45 $\mu\text{g/g}$ 和 33.40~85.20 $\mu\text{g/g}$ 。二者均具有富集轻稀土(light rare earth element, LREE)、亏损重稀土元素(heavy rare earth element, HREE)的特点, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 分别为 21.76~37.77 和 16.07~26.47, LREE/HREE 比值分别为 11.91~21.50 和 10.59~17.35, 轻、重稀土发生了明显的分馏。两类花岗闪长岩, 均具有较明显的正铕异常(δEu 为 1.25~2.37), 表明岩浆演化过程中发生了长石的堆晶作用; δCe 为 0.79~1.32, 具较高含量的 Sr 和 La 和较低含量的 Y、Yb, 表现出埃达克质岩石的特征。

表2 花岗闪长岩主量元素(%)、微量元素($\mu\text{g/g}$)分析结果Tab. 2 Analysis results of major elements (%) and trace elements ($\mu\text{g/g}$) of granodiorite

编号	BJ-b3-1	BJ-b3-2	BJ-b3-3	BJ-b7-1	BJ-b7-2	BJ-b7-3	GJL-1	LL-1	AI-1 ^[11]	TTG-1 ^[12]	TTG-2 ^[12]	Sr-1 ^[3]
岩性	似斑状中细粒花岗闪长岩			似斑状中粗粒花岗闪长岩			郭家岭	玲珑	埃达克	TTG		高 Sr-Ba
Fe ₂ O ₃	0.91	1.08	1.13	0.90	0.65	0.72	1.67	1.05	4.68	2.84	2.49	1.02
SiO ₂	73.36	72.10	72.30	70.52	74.10	73.70	72.26	72.74	63.89	70.20	68.53	71.14
Al ₂ O ₃	13.72	15.20	15.50	14.10	14.70	14.80	14.46	12.32	17.40	15.74	15.91	15.06
CaO	2.29	2.19	2.55	2.57	1.38	1.37	1.63	2.03	5.23	3.17	3.36	1.46
MgO	0.45	0.46	0.46	0.79	0.19	0.32	0.28	0.39	2.20	1.09	1.41	0.26
FeO	0.40	0.32	0.29	1.01	0.34	0.86	—	0.49	—	—	—	—
Na ₂ O	4.98	4.96	5.74	4.69	4.57	4.60	3.90	4.83	4.09	4.87	5.57	4.35
K ₂ O	2.08	3.27	1.56	3.07	4.20	3.78	4.29	4.96	1.52	1.88	1.56	4.22
P ₂ O ₅	0.04	0.05	0.04	0.09	0.02	0.03	0.04	0.06	0.19	0.12	0.11	0.06
MnO	0.04	0.02	0.02	0.05	0.01	0.02	—	0.20	0.08	0.04	0.04	0.01
LOI	0.26	0.36	0.36	0.17	0.43	0.53	0.48	0.81	—	—	—	—
Total	98.70	100.15	100.10	98.31	100.69	100.85	99.17	100.09	99.79	100.28	99.30	97.82
La	9.10	15.27	13.08	18.60	7.35	8.12	21.68	17.63	17.50	29.80	16.90	21.50
Ce	16.30	19.13	27.29	34.50	16.70	17.09	41.38	29.93	34.60	51.60	36.70	37.60
Pr	1.90	2.33	2.11	4.11	1.30	1.41	5.24	3.27	—	—	—	4.09
Nd	6.80	9.07	7.75	16.30	4.92	5.52	18.55	11.59	20.10	19.90	16.40	15.10
Sm	1.27	1.54	1.28	3.15	0.90	1.05	3.23	1.95	3.10	2.70	2.70	2.54
Eu	0.57	1.07	0.52	1.19	0.41	0.52	0.95	0.59	0.97	0.91	0.71	0.94
Gd	1.16	1.24	1.02	2.71	0.75	0.82	2.46	1.57	2.25	2.04	—	1.71
Tb	0.15	0.13	0.12	0.38	0.09	0.10	0.32	0.19	0.37	0.25	0.21	0.21
Dy	0.77	0.62	0.55	1.90	0.44	0.47	1.62	0.90	1.43	1.16	—	0.83
Ho	0.13	0.12	0.11	0.35	0.08	0.09	0.31	0.14	—	—	—	0.11
Er	0.40	0.28	0.26	1.01	0.19	0.20	0.79	0.38	—	—	—	0.28
Tm	0.06	0.04	0.04	0.14	0.03	0.03	0.15	0.05	—	—	—	0.04
Yb	0.30	0.29	0.28	0.83	0.21	0.22	0.87	0.31	0.91	0.46	0.38	0.20
Lu	0.05	0.04	0.04	0.13	0.03	0.03	0.12	0.05	0.15	0.09	0.06	0.26
Y	3.98	4.72	4.48	10.30	4.43	4.09	9.30	4.51	—	6.80	4.00	3.45
Rb	42.20	—	—	69.30	—	—	118.00	104.70	—	50.00	30.00	93.90
Sr	1 107.00	1 066.00	1 075.00	1 142.00	1 133.00	1 048.00	930.00	380.50	—	495.00	586.00	640.00
Zr	13.80	87.87	85.07	61.60	68.39	67.52	132.00	91.24	—	149.00	95.00	—
Nb	3.82	4.80	5.38	7.36	7.20	6.67	10.50	5.02	—	5.40	—	4.74
Ba	943.00	1 934.00	1 095.00	1 657.00	1 161.00	1 353.00	1 597.00	1 399.00	—	746.00	543.00	1438.0
Hf	0.76	2.52	2.57	3.08	3.26	2.66	3.89	4.73	—	—	—	21.50
Ta	0.23	0.16	0.16	0.42	0.26	0.21	0.54	0.70	—	—	—	37.60
ΣREE	38.96	51.17	54.45	85.20	33.40	35.67	97.57	68.55	81.28	108.91	74.06	85.41
LREE	35.94	48.41	52.03	77.85	31.58	33.71	91.03	64.96	76.27	104.91	73.41	81.77
HREE	3.02	2.76	2.42	7.35	1.82	1.96	6.54	3.59	5.01	4.00	0.65	3.64
LREE/HREE	11.91	17.54	21.50	10.59	17.35	17.20	13.92	18.09	15.22	26.23	112.94	22.46
La _N /Yb _N	21.76	37.77	33.51	16.07	25.11	26.47	17.87	40.79	13.79	46.47	31.90	77.11
δEu	1.44	2.37	1.39	1.25	1.53	1.71	1.03	1.03	1.12	1.19	1.01	1.38
δCe	0.96	0.79	1.27	0.97	1.32	1.24	0.95	0.97	0.94	0.97	1.05	0.98

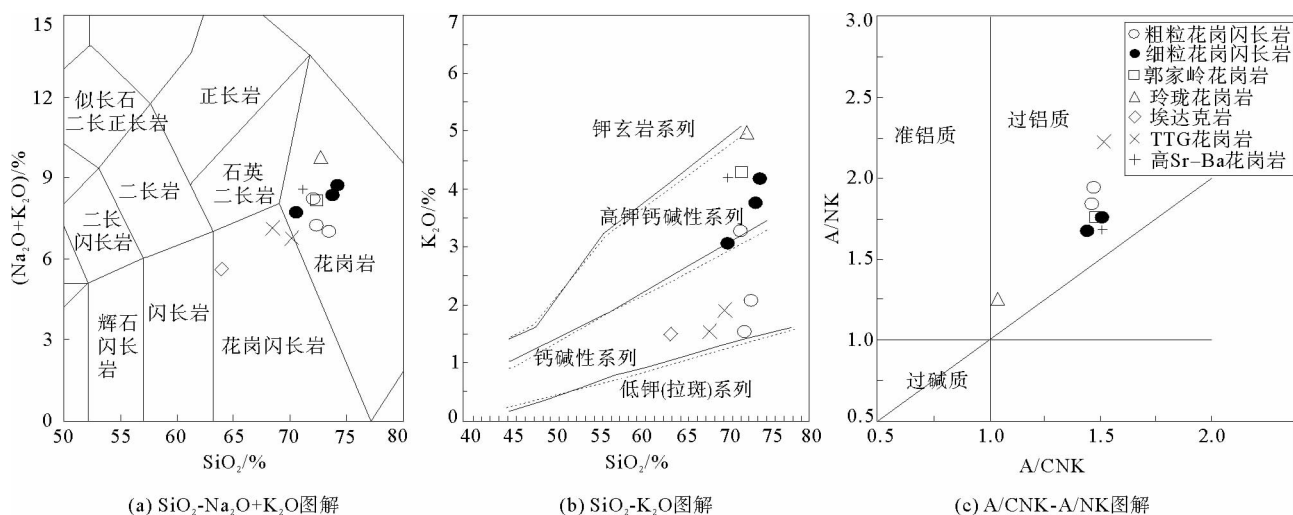


图 4 北截两种花岗闪长岩岩体的主量元素变异图

Fig. 4 Variation diagram of major elements of two granodiorite rocks in Beijie complex

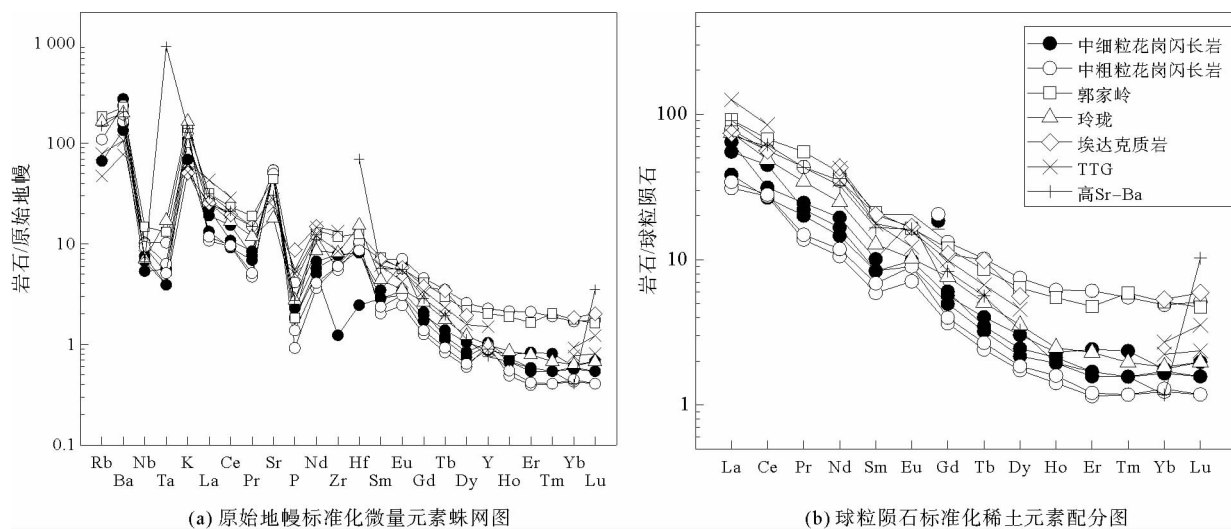
图 5 北截杂岩体及相关岩体(标准化值据 Sun and McDonough, 1989^[13])

Fig. 5 Standardized trace element cobweb map of the original mantle of Beijie complex

4 讨论

4.1 北截杂岩体形成时代

近年来,随着高精度同位素测年技术的成熟与应用,前人^[14-16]对胶东早白垩世花岗岩做了大量的同位素年代学研究,认为胶东郭家岭序列花岗闪长岩的形成时间大致限定在 123~132 Ma,年龄集中在 127~130 Ma,表明它们近于同时期或前后时期相继侵位,平均值 127.9 Ma 作为代表郭家岭序列花岗闪长岩形成的统一年龄。本次工作测得北截杂岩体两种不同岩性花岗闪长岩岩石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 (129.7 ± 1.1) Ma 和 (132.9 ± 1.2) Ma,略老于郭家岭序列其他岩体的侵入时间,说明北截岩体是郭家岭型序列花岗闪长岩中较早期的侵入岩体。

4.2 北截杂岩体的岩浆物质来源与成因

锆石熔融温度较高,早期形成的变质热液锆石或岩浆结晶锆石在后期中酸性岩浆演化过程中保留下来

成为继承锆石,是复杂地质演化过程中的良好物源指示器。本次研究测得北截杂岩体中的似斑状中粗粒花岗闪长岩的继承锆石年龄主要为 2 788、2 418、180 和 167 Ma,其中:2 788 Ma 年龄与 2.8 Ga 的唐家庄岩群^[8]或中太古代的十八盘序列、官地注序列^[17-18]形成年龄一致;2 418 Ma 年龄与新太古代的官道序列形成时代^[18]或胶东岩群黑云变粒岩单颗粒锆石年龄一致;167~180 Ma 年龄接近于玲珑序列的锆石年龄值。似斑状中细粒花岗闪长岩的继承锆石年龄主要为 1 781、1 440、220、158 Ma,1 781 Ma 年龄与元古代莱州序列或芝罘群地层形成时代一致^[17-18];1 440 Ma 年龄表明胶东地区可能存在 1.4 Ga 未出露的中新元古代陆壳或 TTG 片麻岩;220 Ma 年龄与三叠纪柳林庄序列^[18]的花岗岩形成时代一致,同时与胶南—威海造山带在加里东期和印支期的高压-超高压变质作用时间相同^[19],结合其岩浆锆石的性质,认为该年龄的锆石更可能来源于柳林庄序列的花岗岩的捕获锆石;158 Ma 年龄与侏罗纪玲珑序列的花岗岩形成时代一致。因此,推断北截岩体花岗闪长岩的岩浆物质来源十分复杂,两类花岗闪长岩中继承锆石的年龄区间有一定的差别,表明岩浆穿越的路径略有不同,似斑状中粗粒花岗闪长岩的岩浆经过太古代的侵入岩体或沉积变质地层形成,而似斑状中细粒花岗闪长岩的岩浆经过了元古代的侵入岩体或沉积变质地层而形成;两种母岩浆共同经历了近地表较浅的侏罗纪玲珑序列的侵入。

从哈克图解(图 6)中可以看出,两种不同岩性花岗闪长岩的主、微量元素及其比值具有良好的线性关系,结合前文提到的二者具有相似的稀土元素配分模式和微量元素,表明二者可能为同源岩浆演化的结果,因此北截杂岩体是由同源的多个单一侵入体相继侵入形成。

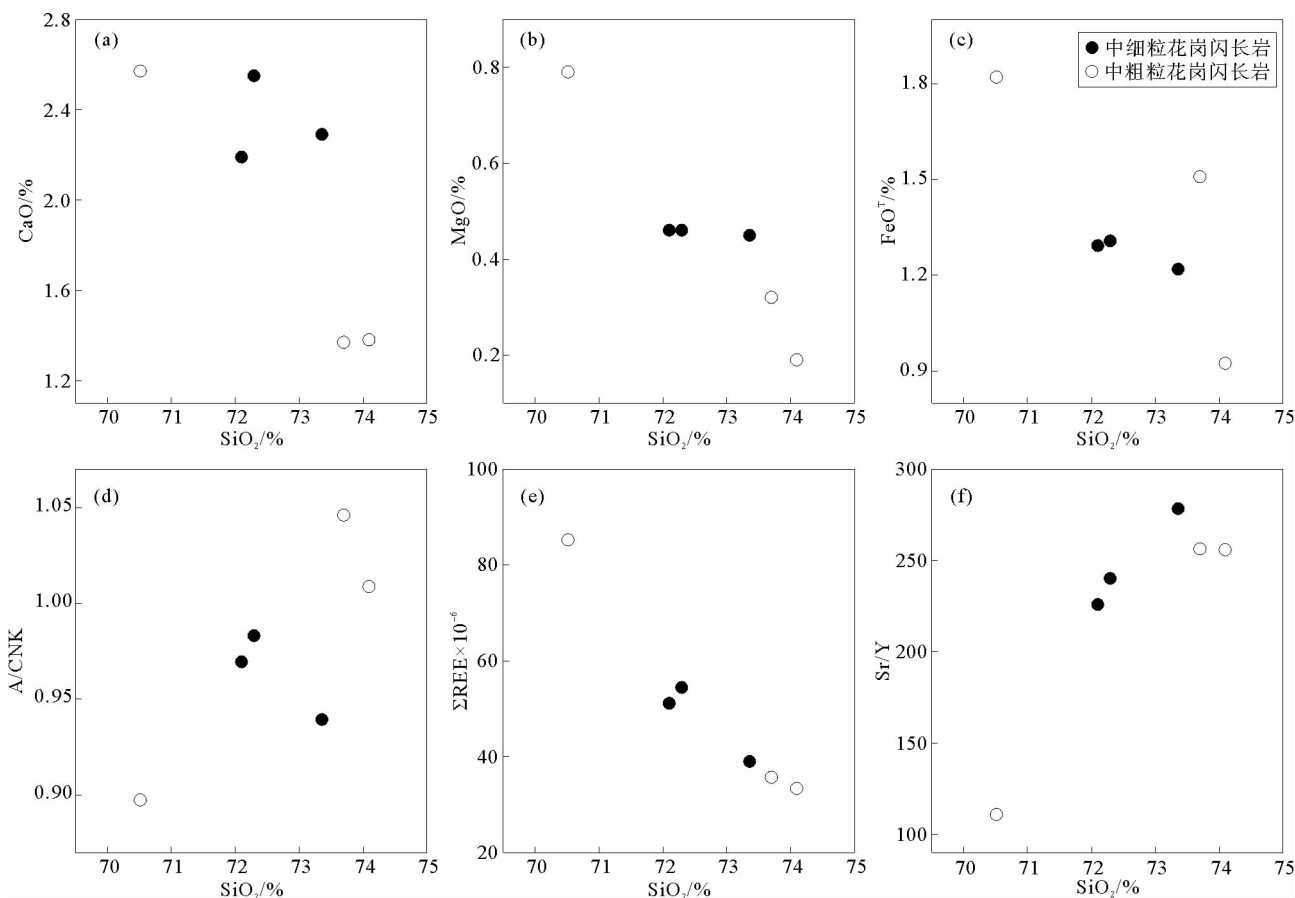


图 6 北截岩体花岗闪长岩哈克图解

Fig. 6 Haker diagram of granodiorite in the rock mass of Beijie complex

前人^[20]岩相学研究表明,北截岩体花岗质岩石中的钾长石与斜长石存在反环带现象,并认为这反映了

幔源区成份注入的特征。此外, Wyllie 等^[21]和 Xu 等^[22]对北截杂岩体花岗闪长岩的研究也指出这些花岗闪长岩为岩浆混合成因。本次分析的似斑状中粗粒花岗闪长岩与似斑状中细粒花岗闪长岩样品均具有相对高的 Cr、Ni、Co、Sc 含量并明显贫 Zr 含量特征, 与幔源岩浆注入的特征相吻合, 表明北截杂岩体的两期花岗闪长质岩浆是早先幔源岩浆底侵作用形成的年轻镁铁质地壳部分熔融形成的中性岩浆和胶北地体的基底岩石胶东群变质岩部分熔融形成的酸性岩浆混合作用的结果。

4.3 成矿构造环境分析

元素 Nb、Y、Yb、Ta、Sr/Yb 的相关比值能有效区分花岗岩形成的构造环境。在花岗岩 Nb-Y 和 Yb-Ta 构造环境判别图解上(图 7), 北截杂岩体的细粒花岗闪长岩和粗粒花岗闪长岩样品全部落入火山弧花岗岩范围内; 北截杂岩体的花岗闪长岩 Sr、Y、Yb 含量具有与玲珑花岗岩相似的埃达克岩特征。高 Ba-Sr 的北截杂岩体花岗闪长岩形成于张性或者非挤压的构造背景中, 包括岩石圈拉张环境或碰撞造山后与重力垮塌作用有关的构造环境等^[23]。

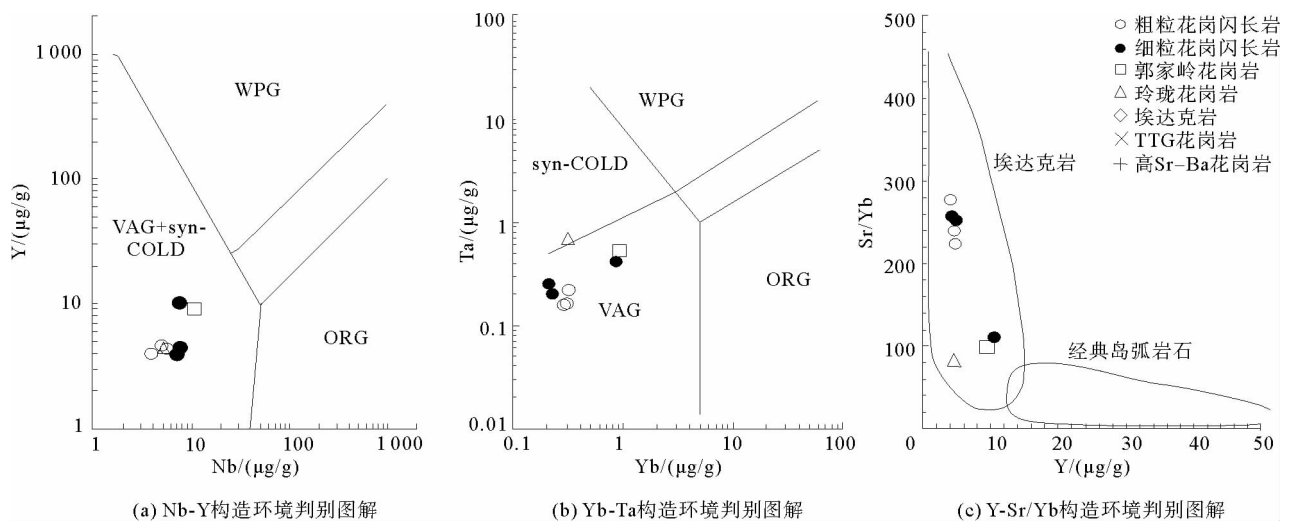


图 7 北截杂岩体两种花岗闪长岩的构造环境判别图解

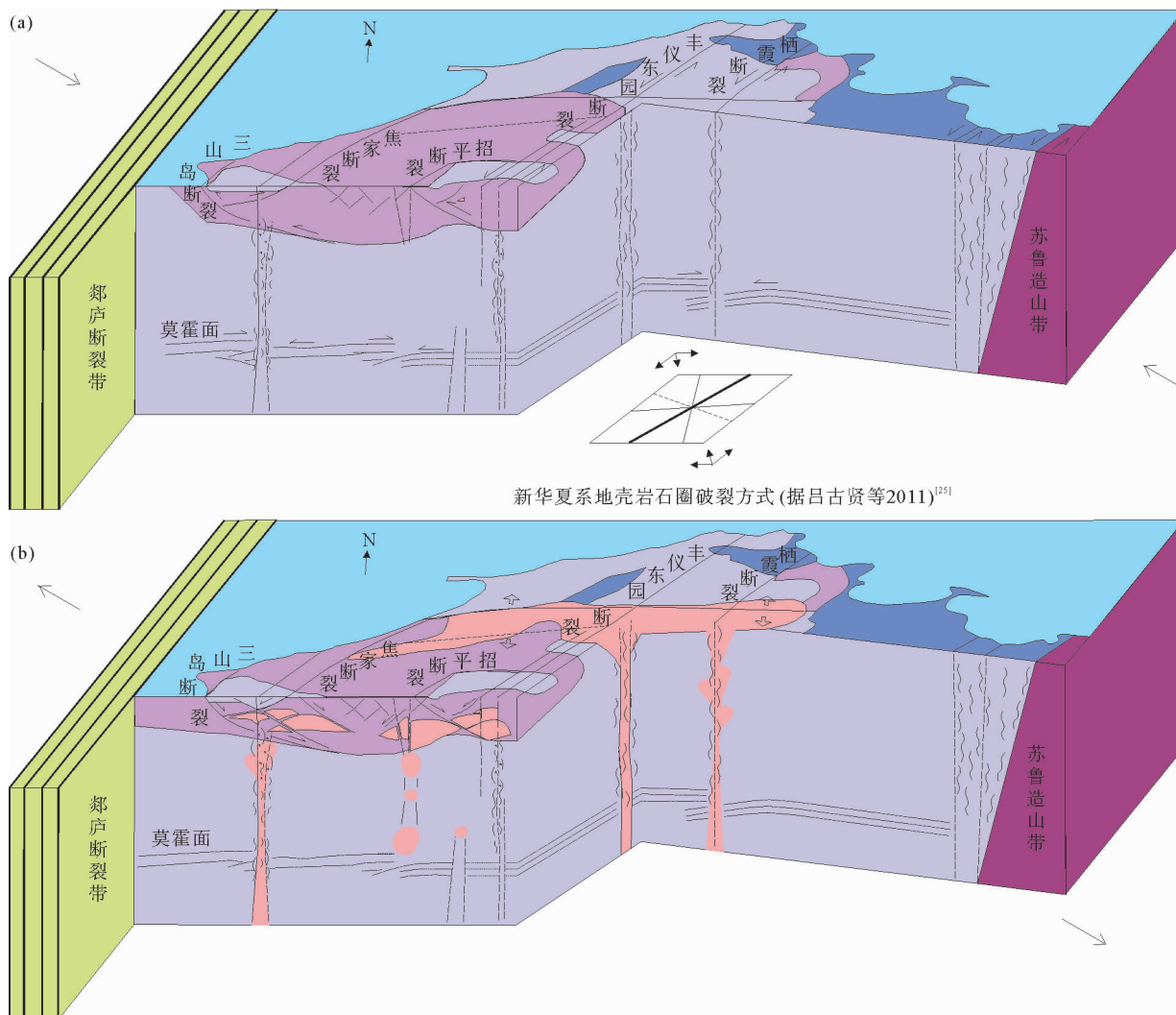
Fig. 7 Diagram of the discrimination of the tectonic environment of the two granodiorites in Beijie complex

研究表明,在早期 NW 向挤压环境下(图 8(a)),存在推覆逆冲构造,同时挤压机制使地壳或岩石圈破裂。地壳破裂形成的构造样式符合新华夏系构造岩相体系模式。多组构造中主要发育 NE 向延伸的左旋压扭性走滑断裂。郯庐断裂带大规模的左旋走滑,不仅是主构造带的活动,在郯庐断裂带两侧的地质体内部,也广泛发育同种机制形成的次级构造,例如玲珑岩体东西两侧切割了整个地壳的左旋走滑断裂,深部对应于莫霍面的破裂、错动与叠置。同时配套发育 NW 向张扭性断裂。在两组断裂的交汇处,可见中生代的岩体分布。

在 NW-SE 向伸展环境下(图 8(b)),小位移量的走滑断裂面的伸展或可形成岩浆上涌的通道^[24]。从而形成 NE 向延伸的岩浆岩带,伸展机制与这些后期的岩浆岩带的叠加改造,掩盖/破坏了先期构造性质和岩体特征。这一结论与区域内岩浆和断裂构造的多期次活动吻合。

胶东地区广泛分布类似特征的断裂,例如控制臧家庄盆地的栖霞断裂、切割牙山岩体的桃村断裂以及金牛山断裂等,该系列断裂均具有高陡倾角,部分地段倾向发生反转的特征。断裂带周边多分布有内生金矿床或多金属矿床。由此推断,胶东地体以深切割的走滑断裂为边界,由多个斜列的块体拼合而成。而断裂的形成与活动可能存在多阶段、多期性,从而导致该区域岩浆活动的多期次性,是北截杂岩体及其他串状分布岩体形成的根本原因。块体之间多期次的岩浆及其相关热液作用强烈,诱发了大规模的成矿作用,成矿物质在与走滑断裂连通的伸展断裂中富集成矿。上述认识为胶东地区中生代以来地质体的形成以及地质作用过程

研究提供了新的视角。



(a)晚侏罗世挤压变形期:在 NW-SE 向挤压环境下,胶北地块缩短、破裂变形;浅部三山岛断裂、招平断裂为逆冲构造,反向发育焦家断裂,同时地质体破裂符合新华夏系构造岩相体系规律,形成 NE 向和近 E-W 向的破裂面,深部由于挤压错动形成莫霍面的破裂、叠置和错动;(b)早白垩世伸展与裂谷阶段:伸展环境下,早期形成了断裂面处于张性状态,形成岩浆和热液上升通道;郭家岭期花岗闪长岩侵入,岩体两侧及顶部发育局部伸展构造

图 8 胶东地块内构造格局模式图

Fig. 8 Diagram of the structural pattern in the Jiaodong block

5 结论

1) 北截杂岩体似斑状中细粒花岗闪长岩和似斑状中粗粒花岗闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 (129.7 ± 1.1) Ma 和 (132.9 ± 1.2) Ma, 略老于郭家岭序列其他岩体的年龄, 说明北截岩体是郭家岭型序列中较早期的侵入岩体。

2) 北截杂岩体两期花岗闪长质岩浆物质来源十分复杂, 两种不同岩性的岩浆经过的路径略有不同, 但主量元素具有良好的线性关系, 且具有相似的微量元素特征, 呈典型的同源岩浆演化特征。此外, 岩石中较高的 Cr、Ni 含量及反环带特征斜长石的发育反映了岩浆演化过程中存在幔源物质的加入。

3) 高 Ba-Sr 的北截杂岩体花岗闪长岩形成于张性的或者非挤压的构造背景中, 小位移量的走滑断裂面

的伸展为多期次岩浆上涌的通道。

参考文献:

- [1] 罗贤东, 杨晓勇, 段留安, 等. 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[J]. 地质学报, 2014, 88(10): 1874-1888.
LUO Xiandong, YANG Xiaoyong, DUAN Liuan, et al. Geochemical and geochronological study of the gold-related Guojialing Pluton and Shangzhuang Pluton in Jiaobei Block[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(10): 1874-1888.
- [2] DENG J, WANG Q F, Santosh M, et al. Remobilization of metasomatized mantle lithosphere: A new model for the Jiaodong gold province, eastern China[J]. Mineralium Deposita, 2020, 55(2): 257-274.
- [3] 王中亮, 赵荣新, 张庆, 等. 胶西北高 Ba-Sr 郭家岭型花岗岩岩浆混合成因: 岩石地球化学与 Sr-Nd 同位素约束[J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2595-2608.
WANG Zhongliang, ZHAO Rongxin, ZHANG Qing, et al. Magma mixing for the high Ba-Sr Guojialing-type granitoids in northwest Jiaodong Peninsula: Constraints from petrogeochemistry and Sr-Nd isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(9): 2595-2608.
- [4] 冯乔, 徐子苏, 张耀, 等. 青岛胶南隆起带小珠山早白垩世花岗岩锆石 U-Pb 年代学及胶东半岛中生代花岗岩成因初探[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(2): 1-13.
FENG Qiao, XU Zisu, ZHANG Yao, et al. Zircon U-Pb geochronology of the Early Cretaceous Xiaozhushan granite in Qingdao Jiaonan uplift and tectonic evolution of Mesozoic granite in Jiaodong Peninsula[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2019, 38(2): 1-13.
- [5] 曲晓明, 王鹤年. 郭家岭花岗岩的时代与成因[J]. 地质找矿论丛, 1995, 10(3): 24-30.
QU Xiaoming, WANG Henian. The age and genesis of Guojialing granite[J]. Collections to Geology and Mineral Resources Research, 1995, 10(3): 24-30.
- [6] 杨进辉, 朱美妃, 刘伟, 等. 胶东地区郭家岭花岗闪长岩的地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 2003, 19(4): 692-700.
YANG Jinhui, ZHU Meifei, LIU Wei, et al. Geochemistry and petrogenesis of Guojialing granodiorites from the northwestern Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(4): 692-700.
- [7] 常裕林, 郑小礼, 王晖. 胶东西北部玲珑、郭家岭超单元花岗岩成因探讨[J]. 地质找矿论丛, 2006, 21(10): 90-94.
CHANG Yulin, ZHENG Xiaoli, WANG Hui. Probe into genesis of linglong and guojialing super-unit granites in western Jiaodong Peninsular[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2006, 21(10): 90-94.
- [8] 张增奇, 张成基, 王世进, 等. 山东省地层侵入岩构造单元划分对比意见[J]. 山东国土资源, 2014, 30(3): 1-23.
ZHANG Zengqi, ZHANG Chengji, WANG Shijin, et al. Views on classification and contrast of tectonic units in strata in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2014, 30(3): 1-23.
- [9] 杨立强, 邓军, 王中亮. 胶东金矿控矿构造样式: 地质-地球物理综合约束[M]// 陈运泰, 金振民, 石耀霖, 等. 中国大陆地球深部结构与动力学研究. 北京: 科学出版社, 2014: 1006-1030.
YANG Liqiang, DENG Jun, WANG Zhongliang. Ore-controlling structural pattern of Jiaodong gold deposits: Geological-geo-physical integration constraints[M]// CHEN Yuntai, JIN Zhenmin, SHI Yaolin, et al. The deep-seated structures of Earth in China. Beijing: Sciences Press, 2014: 1006-1030.
- [10] 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 2002, 48(5): 26-30.
SONG Biao, ZHANG Yuhai, WAN Yusheng, et al. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. Geological Review, 2002, 48(5): 26-30.
- [11] MARTIN H. Adakitic magmas: Modern analogue of Archean granitoids[J]. Lithos, 1999, 46(3): 411-429.
- [12] SMITHIES R H. The Archean tonalite-trondhjemite-granodiorite(TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 182, 115-125.
- [13] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[M]// SAUNDERS A D, NORRIS M J. Magmatism in the Ocean Basins London: Geological Society, London, Special Publication, 1989: 313-345.
- [14] WANG L G, QIU Y M, MCNAUGHTON N J, et al. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids[J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13: 275-291.

- [15]刘跃,邓军,王中亮,等.胶西北新城金矿床二长花岗岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素组成[J].岩石学报,2014,30(9):2559-2573.
LIU Yue,DENG Jun,WANG Zhongliang,et al.Zircon U-Pb age,Lu-Hf isotopes and petrogeochemistry of the monzogranites from Xincheng gold deposit,northwestern Jiaodong Peninsula,China[J].Acta Petrologica Sinica,2014,30(9):2559-2573.
- [16]ZHU R X,CHEN L,WU F Y,et al.Timing scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J].Science in China:Earth Science,2011,54:789-797.
- [17]顿颖强,万渝生,王世进,等.胶东谭格庄地区奥长花岗质片麻岩和斜长角闪岩的野外地质和锆石 SHRIMP 定年[J].岩石学报,2013,29(2):619-629.
XIE Hangqiang,WAN Yusheng,WANG Shijin,et al.Geology and zircon dating of trondhjemitic gneiss and amphibolite in the Tangezhuang area, eastern Shandong[J].Acta Petrologica Sinica,2013,29(2):619-629.
- [18]王世进,王来明,万渝生,等.鲁东地区侵入岩形成时代划分和期次划分:锆石 SHRIMP U-Pb 年龄的证据[J].山东国土资源,2009,25(12):8-22.
WANG Shijin,WANG Laiming,WAN Yusheng,et al.Study on intrusive rocks forming period and stages division in Ludong Area[J].Shandong Land and Resources,2009,25(12):8-22.
- [19]唐俊,郑永飞,吴元保,等.威海地区超高压变质花岗片麻岩锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究[J].地球科学:中国地质大学学报,2005,30(6):692-706.
TANG Jun,ZHENG Yongfei,WU Yuanbao,et al.A study of zircon U-Pb dating and oxygen isotope in UHP granitic gneiss from the Weihai region in Northeast Sulu[J].Earth Science:Journal of China University of Geosciences,2005,30(6):692-706.
- [20]谭俊,魏俊浩,郭玲利,等.胶东郭城地区脉岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及斑晶 EPMA 研究:对岩石圈演化的启示[J].中国科学 D 辑:地球科学,2008,38(8):913-929.
- [21]WYLLIE P J,COX K G,BIGGAR G M.The habit of apatite in synthetic systems and igneous rocks[J].Journal of Petrology,1962,3(2):238-243.
- [22]XU X S,FAN Q C,O'Reilly S Y,et al.U-Pb dating of zircons from quartz diorite and its enclaves at Tongguanshan in Anhui and its petrogenetic implication[J].Chinese Science Bulletin,2004,49(19):2073-2082.
- [23]FOWLER M B,HENNEY P J,DARBYSHIRE D P F,et al.Petrogenesis of high Ba-Sr granites: The Rogart pluton, Sutherland[J].Journal of the Geological Society,2001,158(3):521-534.
- [24]YU X F,SHAN W,XIONG Y X,et al.Deep structural framework and genetic analysis of gold concentration areas in the northwestern Jiaodong Peninsula,China: A new understanding based on high-resolution reflective seismic survey[J].Acta Geologica Sinica,2018,92(5):1823-1840.
- [25]吕古贤,曹钟清,郭涛,等.长江中下游中生代构造岩相体系分布玉成矿规律[J].大地构造玉成矿,2011,35(4):495-501.
LU Guxian,CAO Zhongqing,GUO Tao,et al.Distribution of Mesozoic tectono-facies system and metallogeny in middle and lower reaches of the Yangtze river[J].Geotectonica et Metallogenia,2011,35(4):495-501.

(责任编辑:高丽华)