

胶莱盆地南缘五莲七宝山地区花岗斑岩 年代学、地球化学特征及其地质意义



Pre-pub. online: www.
geojournals.cn/georev

王欣^{1,2)}, 战洪雷¹⁾, 唐名鹰^{1,2,3)}, 孙丽莎^{1,2)}, 张蕾¹⁾, 朱海波¹⁾,
华磊^{1,2)}, 朱伟¹⁾, 陈建¹⁾, 李双飞¹⁾

- 1) 山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队, 山东省地矿局有色金属矿找矿与资源评价重点实验室, 山东日照, 276800;
- 2) 日照地质地理信息大数据研究院, 山东日照, 276800;
- 3) 自然资源部深部金矿勘查开发技术创新中心, 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东威海, 264209

内容提要: 胶莱盆地周缘发育辽上、宋家沟、西涝口、孔辛头、尚家庄、胶南七宝山和五莲七宝山等金—铜多金属矿床, 为山东省东部重要的金—铜多金属成矿带。五莲七宝山潜火山杂岩体为胶莱盆地南缘发育的与金—铜—多金属成矿关系最为密切的杂岩体, 近年来, 随着外围及深部找矿工作的开展, 在该杂岩体深部新发现花岗斑岩, 为进一步认识该新发现岩体的地质特征, 本文在对花岗斑岩开展岩相学观察和锆石 U-Pb 定年的基础上, 通过全岩地球化学和锆石 Hf 同位素分析, 试图阐明该岩体的成因类型、源区特征和形成的构造环境。锆石 U-Pb 定年结果显示, 花岗斑岩形成于 120.0 ± 0.3 Ma 和 120.5 ± 0.3 Ma, 为早白垩世。花岗斑岩整体表现高硅、高铝、富钠以及贫铁、贫镁的特征, 为高钾钙碱性的弱过铝质岩石, 相对富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 亏损重稀土元素和高场强元素, 具明显 Ta、Nb、Sr 和 Eu 负异常, 属 I 型花岗岩。锆石 Hf 同位素组成具明显的负值 ($-30.3 \sim -24.4$, $n=43$), 二阶段模式平均年龄为 2891 Ma, 指示岩浆来源于中—新太古代古老壳源物质。构造环境判别显示花岗斑岩形成于板块俯冲后短暂伸展的后造山构造环境中, 属后碰撞花岗岩, 与区域上太平洋板块向欧亚大陆俯冲和区内与成矿相关的岩浆作用时间基本一致。

关键词: 锆石 U-Pb 定年; 锆石 Hf 同位素; 岩石地球化学; 花岗斑岩; 五莲七宝山; 胶莱盆地南缘

胶莱盆地周缘作为山东省东部重要的金—铜—多金属成矿带, 已探明胶莱盆地东北缘、胶莱盆地南缘等地区金、铜、银、铅锌和钼等有色金属矿床 100 余处, 其中胶莱盆地东北缘发育以辽上、宋家沟、西涝口为代表的金矿和以孔辛头铅—锌—铜—钼矿、尚家庄钼矿为代表的铜—多金属矿(杨金中等, 2001; 魏绪峰等, 2008; 李超等, 2016; 李国华等, 2017; 张维昕等, 2017), 胶莱盆地南缘则发育以胶南七宝山萤石—铅锌矿和以五莲七宝山金—铜—多金属—硫铁矿为代表的金—铜—多金属矿床(邱德同等, 1986; 王郁, 1991; 田京祥等, 2007; 彭永和等, 2018)。前人对胶莱盆地及周缘与成矿相关的岩浆

岩、火山岩和金属矿床开展了大量的研究, 在区域地质背景、岩浆演化、典型矿床和成矿规律研究等方面取得了重要进展(张岳桥等, 2008; 丁正江等, 2010, 2022; 申文杰等, 2020)。目前研究认为, 胶莱盆地周缘中生代早白垩世岩浆岩与成矿关系密切, 可大致分为两类矿床, 一是与早白垩世中酸性侵入岩体相关的中低温热液脉型金矿(李国华等, 2016; 赵宝聚等, 2019; 周晓萍等, 2022; 韩小梦等, 2023) 和斑岩+矽卡岩型铜—钼—多金属矿床(丁正江等, 2022), 二是与火山岩成矿相关的隐爆角砾岩型金—铜矿和热液脉型铜—铅—锌—多金属矿床(唐名鹰等, 2023; 李双飞等, 2023), 其成矿物质均来源于深部岩

注: 本文为国家重点研发计划(编号: 2023YFC2906900); 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(编号: 2023CXGC011001); 泰山学者工程(编号: tstp20240847)和山东省地矿局第八地质大队总工基金项目(编号: DZG202403)的成果。

收稿日期: 2024-09-06; 改回日期: 2024-12-14; 网络首发: 2025-01-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.01.025

作者简介: 王欣, 男, 1987 年生, 高级工程师, 主要从事矿床勘查及找矿研究工作; Email: wangxinchn@163.com。通讯作者: 唐名鹰, 男, 1990 年生, 高级工程师, 主要从事矿床勘查及找矿研究工作; Email: 353635085@qq.com。

浆,与白垩纪太平洋板块向西俯冲和华北板块东缘岩石圈的伸展减薄和壳幔强烈作用引起的构造岩浆活动相关(丁正江等,2015)。

近年来,随着五莲七宝山外围及深部找矿工作的开展,在五莲七宝山窑头地区实施了 2027.2m 的探矿深孔,在深部新发现花岗斑岩(1726.6~2027.2m),发育有绢英岩化、黄铁矿化等。目前有关于该岩体的研究还未开展,该新发现岩体与七宝山潜火山杂岩体关系如何,其形成时代、成因类型和形成的构造环境均有待进一步研究。因此,本文选择深部钻孔揭露的花岗斑岩,开展岩石地球化学、锆石 U-Pb 测年和 Hf 同位素的研究,确定了岩体成矿时代,研究了岩石的成因类别和构造环境,初步探讨了与浅部七宝山次火山杂岩体的联系,为后续找矿方向提供了参考。

1 地质背景

1.1 区域地质

五莲七宝山地区位于华北克拉通东部胶莱盆地与郯庐断裂带东段(又称沂沭断裂带)交汇处,五莲—青岛断裂带(F_1)的西北部。与胶南隆起—苏鲁超高压变质带相邻,其空间分布主要受沂沭断裂带控制(图 1)。晚中生代太平洋板块向西俯冲,引发区域北北东向昌邑—大店断裂(F_2)和五莲—青岛断裂(F_1)的再活化,形成一系列火山—次火山岩浆带。五莲七宝山次火山杂岩体内部主要发育有中基性—中酸性以及碱性火山—侵入杂岩,为区内铜—金—多金属矿床的形成提供了有利的地质条件(张连营等,1996;秦克章等,1999;石文杰,2014;毛景文等,2018;于光源,2020)。

区内断裂构造按空间分布可分为 NE 向、NNE 向和 NW 向,其中规模最大的是 NNE 向的沂沭断裂带($F_2 \sim F_5$)和 NE 向的五莲—青岛断裂带(F_1)(图 1),后者控制了胶莱盆地南缘的主要边界和区内燕山期的火山—岩浆活动的分布范围。区内出露地层主要为中生代白垩系青山群八亩地组和方戈庄组,其次在河流沟谷出露第四纪山前组。区内岩浆岩主要为中生代五莲七宝山中基性—中酸性侵入杂岩体,由不同时期、不同岩性的侵入岩组成,出露面积约 25km²,平面形态为北西—东南向略长的椭圆,长

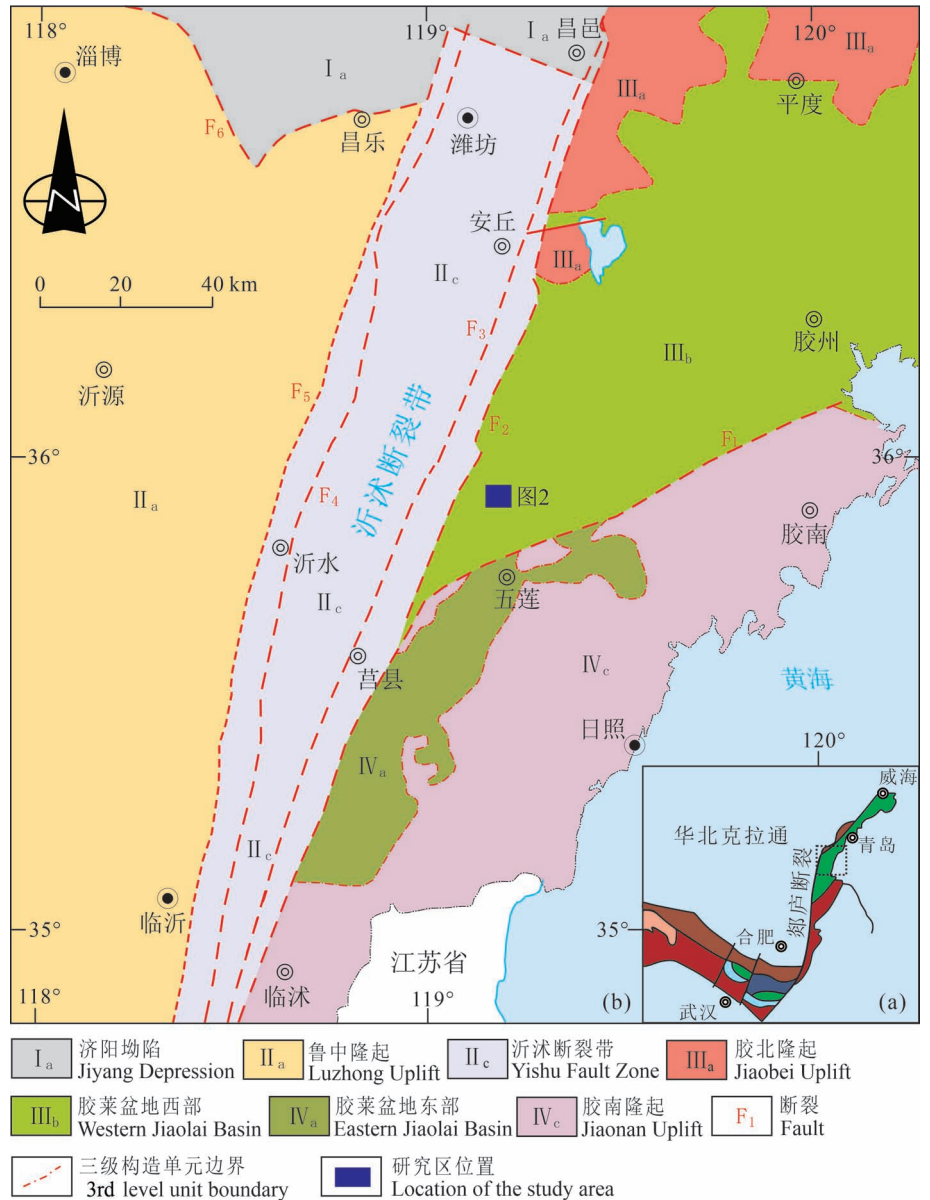


图 1 胶莱盆地南缘大地构造位置和构造分区图

(据张增奇等,2014;Sun Yuqin et al., 2023 修改)

Geotectonic location and tectonic zoning map of the southern margin of Jiaolai basin
(modified from Zhang Zengqi et al., 2014& Sun Yuqin et al., 2023)

轴长约 5.5km,短轴长约 4.5km(图 2)。另外整个研究区内出露少量白垩系中酸性侵入岩体,包括花岗岩、二长岩、正长岩和闪长岩(于光源,2020;李小伟等,2022)。

1.2 矿区地质

五莲七宝山地区发育以金线头金—铜矿、七宝山银—铅—锌矿和钓鱼台硫铁矿为代表的次火山浅成热液型矿床(图 2)。其中金线头金—铜矿位于研

究区南部,主要发育隐爆角砾岩型、细脉浸染型和破碎蚀变岩型矿体,赋存于七宝山杂岩体隐爆角砾岩管中,围岩岩石主要为辉石闪长岩、辉石二长岩、石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩和少量的安山玢岩(徐兴旺等,2000;王永等,2008;孙思等,2010;徐文刚等,2015)。七宝山银—铅—锌多金属矿床主要发育脉状矿体,包括敞沟矿段、红石岗矿段和杏山峪矿段,矿石类型主要为石英—方解石脉型和构造蚀变

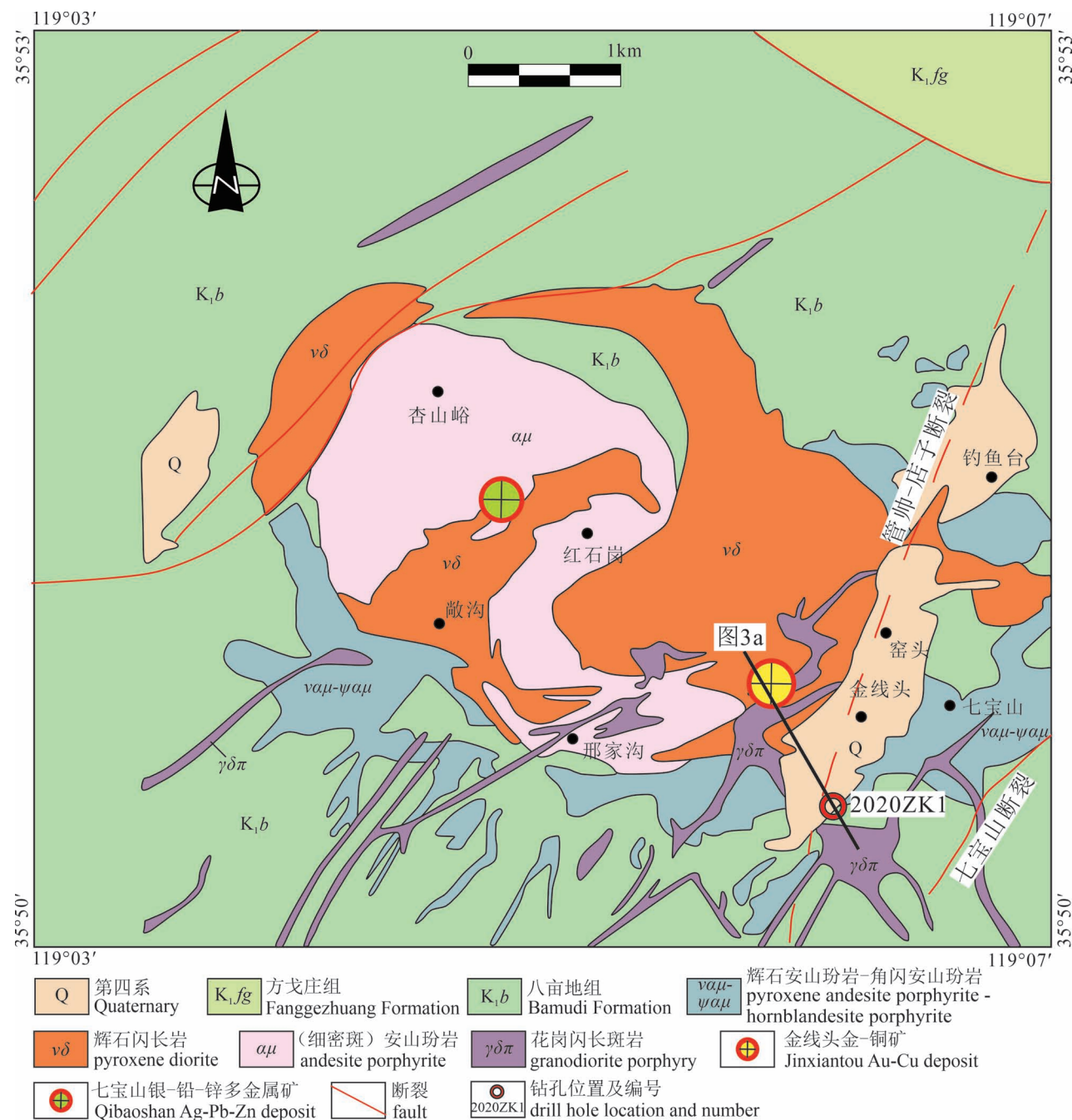


图 2 五莲七宝山地区地质简图(据李小伟等,2022 修改)

Fig. 2 Geological distribution of Qibaoshan area in Wulian County (modified from Li Xiaowei et al., 2022&)

岩型两种(田乃风等,2011;彭永和等,2018)。钓鱼台硫铁矿以发育似层状和层状黄铁矿化矿体为主要特征(张森等,2015)。

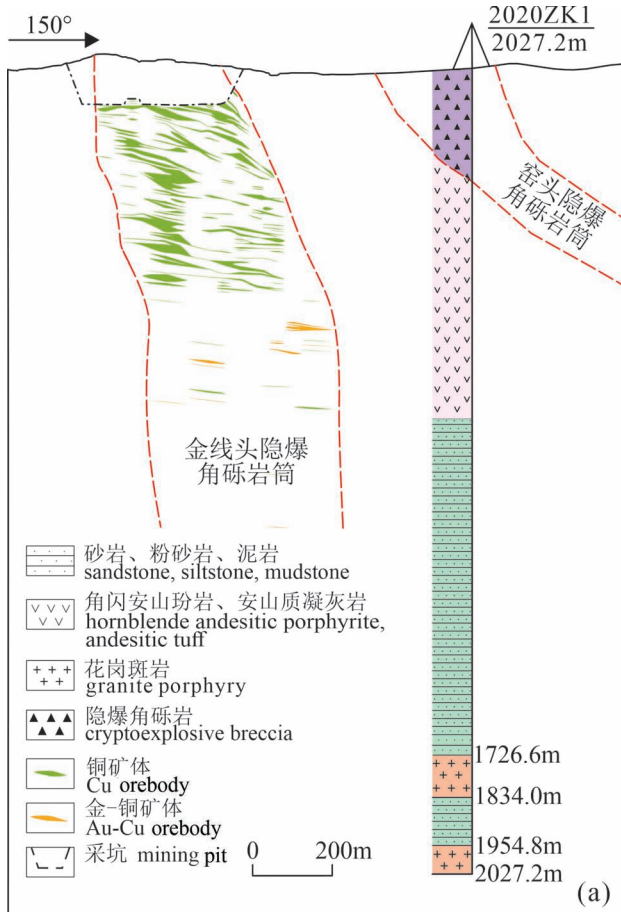
根据七宝山地区岩浆岩的岩性、接触关系及最新的定年结果,将七宝山次火山杂岩体划分为3个时期:青山群火山期(年龄 $133.8 \pm 1.8\text{Ma}$, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年)(于光源,2020)、辉石闪长岩—辉石二长岩和角闪安山玢岩(年龄 $129.6 \sim 122.3\text{Ma}$, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年)和(细密斑)安山玢岩、石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩阶段(年龄 $124.6 \sim 120.8\text{Ma}$)(陈克荣等,1993;王永,2010;于光源,2020;孙丽莎等^①采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年;未发表数据采用 Shrimp 锆石 U-Pb 定年)。空间位置分布上,金铜成矿与花岗闪长斑岩密切相关,银铅锌成矿与(细密斑)安山玢岩的浅成侵入活动密切相关(李双飞等,2023;Liu Lanhai et al.,2024)。

2 深部钻孔特征及样品采集

为进一步揭示七宝山金线头隐爆角砾岩筒深部

变化特征,在前期可控源音频大地电磁测深和二维地震剖面测量的基础上,优选窑头地区实施 2020ZK1 钻孔,终孔孔深 2027.2 m。该钻孔浅部除地表第四系堆积物、部分闪长玢岩外,整体为一套黄铁绢英岩化角闪安山质角砾岩,厚度达 170 m;在孔深 215~281 m 处见八亩地组安山质火山角砾岩—集块角砾岩;281~881 m,主要发育角闪安山玢岩、安山质凝灰岩,局部侵入少量闪长玢岩;881~1726.6 m,发育一套灰绿色—灰黑的粉砂岩、泥岩、硅质岩夹细砂岩组合,局部见少量细砾岩,初步推断为莱阳群法家莹组地层;1726.6 m 以下,钻孔主要发育浅肉红色花岗斑岩,局部见少量中细粒砂岩以及细砾岩(图 3a)。

本次研究用于岩矿鉴定、岩石地球化学分析和锆石 U-Pb 测年、Hf 同位素分析的样品均取自 2020ZK1 钻孔中花岗斑岩,具体采样位置见图 3b。采集的两件测年样品(2020TW1、2020TW2)分别位于 1825 m 和 1979 m。花岗斑岩呈灰红色,块状构造,斑状结构,岩石主要由斑晶和基质两部分组成。



孔深	花纹	采样位置及编号	岩性
1726.6-1794.5m	+++ ++ +++ ++ +++		花岗斑岩
1794.5-1810.2m		细砂岩、粉砂岩
1810.2-1834.0m	+++ ++	ZK1GS1 20ZK1TW1 ZK1GS2 ZK1GS3	花岗斑岩
1834.0-1954.8m	N ∴ ∴ N		长石石英砂岩、 细砂岩、砾岩
	· N ∴ ∴		
	∴ ∴ N ∴ ∴		
	N ∴ ∴ N		
	· N ∴ ∴		
	∴ ∴ N ∴ ∴		
	N ∴ ∴ N		
	· N ∴ ∴		
	∴ ∴ N ∴ ∴		
	N ∴ ∴ N		
0 0 0 0			
1954.8-2027.2m	+++ ++ +++ ++ +++ ++	ZK1GS4 ZK1GS5 ZK1GS6 20ZK1TW2 ZK1GS7 ZK1GS8 ZK1GS9 ZK1GS10	花岗斑岩

图 3 五莲七宝山地区地质剖面(a)和 2020ZK1 钻孔深部柱状图(b)

Fig. 3 Cross section (a) and column (b) of drill No. 2020ZK1 form Qibaoshan area, Wulian County

斑晶含量在 25% 左右,主要为斜长石、正长石和少量的石英(图 4a,4b),以斜长石斑晶最为发育,多呈半自形板状,粒径一般在 0.50~2.50 mm 之间,可见聚片双晶发育(图 4c、4d),钾长石斑晶粒径在 0.50~2.00 mm 之间,最大可达 5.0 mm(图 4a),呈他形一半自形板状(图 4c),上述长石类矿物均具黏土化和绢云母化以及轻微的碳酸盐化,石英斑晶均较小,在 0.20~0.50 mm 之间。基质含量在 75% 左右,见有斜长石、正长石、石英和极少量其他矿物等,粒径一般 0.10 mm 以下。其中,长石呈极细小粒状,致密分布,基质中斜长石较正长石含量多,两者含量占比为 2:1~3:1;石英呈不规则细粒状不均匀分布于长石间隙中,含量在 5%~15%。

3 分析方法

3.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄

本次锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的测定在北京燕都中实测试技术有限公司完成,在完成锆石的挑选、磨制后,进行透射光和反射光显微镜观察,选择合适的锆石样品进行定年分析,锆石 U-Pb 同位素定年利用 LA-ICP-MS 分析完成。激光剥蚀系统为 NWR193, ICP-MS 为德国耶拿 PlasmaQuant MS,剥蚀直径为 25 μ m。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,每个分析数据包括大约 20~30s 的空白信号和 50s 的样品信号。锆石 U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 Plesovice(Sláma et al., 2008)作外标进行同位素分馏校正,并对 91500(Wiedenbeck et al., 1995)、Tanz(Hu et al., 2021)分析一次作为监控。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver4.15(Ludwig, 2012)完成。

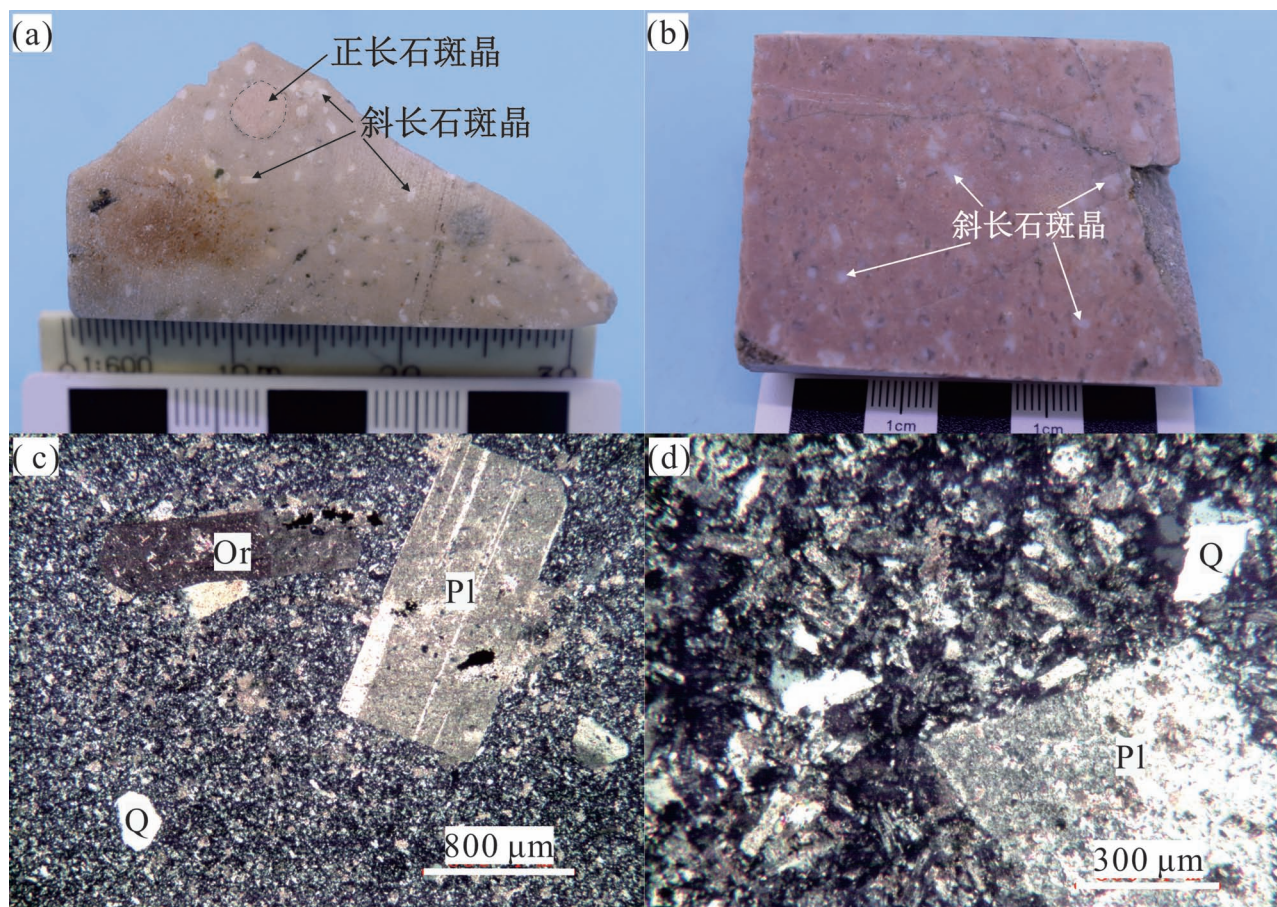


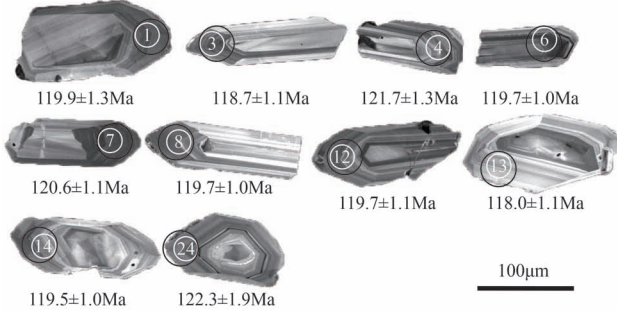
图 4 五莲七宝山地区 2020ZK1 钻孔深部花岗斑岩手标本和正交偏光镜下照片

Fig. 4 Hand specimen, photomicrographs of the granite porphyry from the depth of drill No. 2020ZK1 in Qibaoshan area, Wulian County

Or—正长石; Pl—斜长石; Q—石英

Or—Orthoclase; Pl—Plagioclase; Q—Quartz

样号: 20ZK1TW1



样号: 20ZK1TW2

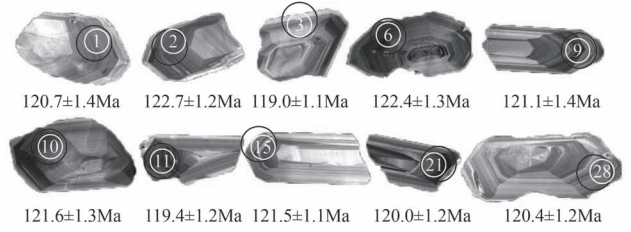


图 5 五莲七宝山区 2020ZK1 钻孔深部花岗斑岩典型锆石阴极发光照片

Fig. 5 Typical CL images of zircons in the granite porphyry from the depth of drill No. 2020ZK1 in Qibaoshan area, Wulian County

白色和黑色圆圈分别代表 LA-ICP-MS U-Pb 定年和 Lu—Hf 同位素测试位置

White and black circles represent LA-ICP-MS U-Pb dating and Lu—Hf isotope test locations, respectively

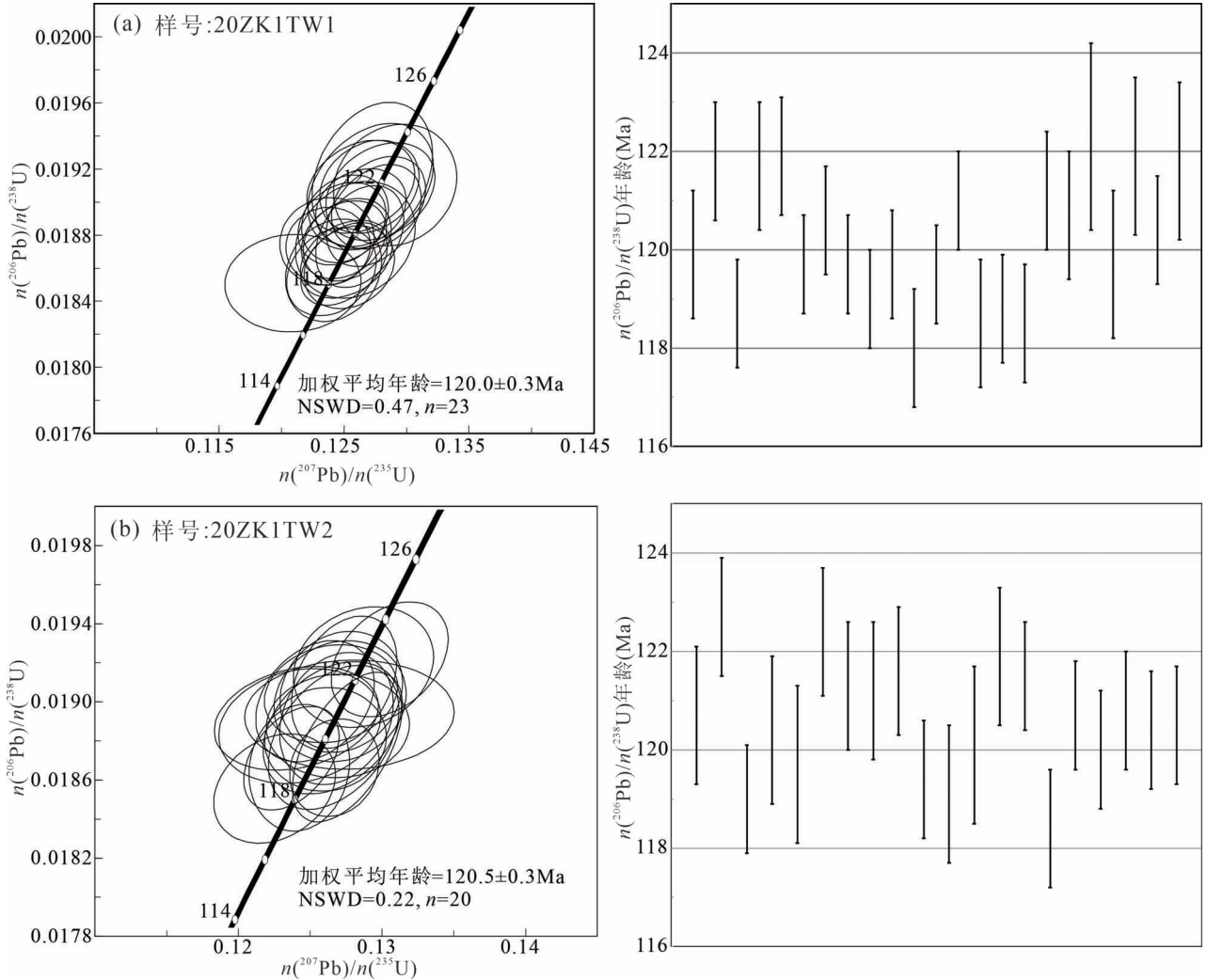


图 6 五莲七宝山区 2020ZK1 钻孔深部花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄协和图及加权平均年龄图

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia diagrams and the weighted age of the granite porphyry from the depth of drill No. 2020ZK1 in Qibaoshan area, Wulian County

表1 五莲七宝山区 2020ZK1 钻孔深部花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果
 Table1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope composition of the granite porphyry from the depth of drill No. 2020ZK1 in Qibaoshan area, Wulian County

测点号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值				同位素年龄 (Ma)				谐和度 (%)					
	Pb	Th		U	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$						
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值		1 σ				
20ZK1TW1: 窑头地区 2020ZK1 钻孔 1825m 深处灰红色花岗岩和 1979m																	
1	10.4	346.0	417.0	0.83	0.04881	0.00093	0.1259	0.0025	0.01877	0.00021	138.6	44.7	120.4	2.2	119.9	1.3	99.6
2	8.10	254.0	321.0	0.79	0.04831	0.00106	0.1267	0.0028	0.01908	0.00019	114.4	51.9	121.1	2.5	121.8	1.2	99.4
3	14.3	558.0	553.0	1.01	0.04890	0.00101	0.1250	0.0025	0.01858	0.00017	143.3	48.3	119.5	2.3	118.7	1.1	99.3
4	9.74	391.0	360.0	1.09	0.04868	0.00113	0.1276	0.0031	0.01905	0.00020	132.4	54.5	121.9	2.7	121.7	1.3	99.8
5	8.81	264.0	362.0	0.73	0.04800	0.00112	0.1259	0.0030	0.01908	0.00019	99.20	55.2	120.4	2.7	121.9	1.2	98.8
6	12.8	420.0	516.0	0.81	0.04838	0.00095	0.1248	0.0025	0.01875	0.00017	117.7	46.2	119.4	2.2	119.7	1.0	99.7
7	10.7	417.0	413.0	1.01	0.04807	0.00095	0.1246	0.0024	0.01888	0.00018	102.8	47.0	119.2	2.2	120.6	1.1	98.9
8	12.2	480.0	468.0	1.03	0.04829	0.00091	0.1245	0.0024	0.01875	0.00016	113.4	44.3	119.1	2.2	119.7	1.0	99.5
11	11.4	477.0	433.0	1.10	0.04859	0.00096	0.1247	0.0026	0.01863	0.00016	128.0	46.3	119.3	2.3	119.0	1.0	99.8
12	12.2	391.0	505.0	0.77	0.04779	0.00110	0.1231	0.0027	0.01874	0.00018	89.00	54.3	117.8	2.4	119.7	1.1	98.4
13	14.0	455.0	591.0	0.77	0.04722	0.00160	0.1202	0.0038	0.01848	0.00020	60.20	80.6	115.2	3.5	118.0	1.2	97.6
14	14.0	587.0	530.0	1.11	0.04795	0.00100	0.1232	0.0024	0.01871	0.00016	97.00	49.3	117.9	2.1	119.5	1.0	98.7
15	12.4	389.0	505.0	0.77	0.04821	0.00097	0.1260	0.0025	0.01895	0.00016	109.8	47.6	120.4	2.3	121.0	1.0	99.5
16	12.9	682.0	465.0	1.47	0.04843	0.00110	0.1236	0.0027	0.01856	0.00021	120.3	53.5	118.3	2.4	118.5	1.3	99.9
18	15.1	416.0	652.0	0.64	0.04845	0.00086	0.1245	0.0024	0.01860	0.00017	121.1	42.0	119.2	2.2	118.8	1.1	99.7
20	13.6	540.0	533.0	1.01	0.04828	0.00098	0.1234	0.0025	0.01855	0.00018	113.2	47.8	118.2	2.3	118.5	1.2	99.7
20	14.6	709.0	518.0	1.37	0.04877	0.00099	0.1275	0.0026	0.01898	0.00019	136.9	47.5	121.8	2.4	121.2	1.2	99.5
20	11.5	480.0	438.0	1.10	0.04883	0.00098	0.1270	0.0027	0.01890	0.00021	139.6	46.9	121.4	2.4	120.7	1.3	99.4
24	13.4	486.0	531.0	0.92	0.04811	0.00128	0.1269	0.0034	0.01915	0.00030	104.5	63.0	121.3	3.0	122.3	1.9	99.2
25	16.2	679.0	633.0	1.07	0.04877	0.00156	0.1255	0.0034	0.01875	0.00024	136.8	75.0	120.0	3.0	119.7	1.5	99.8
27	10.4	376.0	420.0	0.90	0.04913	0.00139	0.1289	0.0035	0.01909	0.00025	153.9	66.0	123.1	3.1	121.9	1.6	99.1
28	14.5	668.0	534.0	1.25	0.04790	0.00094	0.1243	0.0025	0.01885	0.00017	94.50	46.5	119.0	2.2	120.4	1.1	98.8
30	13.4	502.0	517.0	0.97	0.04819	0.00127	0.1268	0.0035	0.01908	0.00026	108.7	62.2	121.2	3.2	121.8	1.6	99.5
20ZK1TW2: 窑头地区 2020ZK1 钻孔 1979 m 深处灰红色花岗岩																	
1	15.7	425.0	635.0	0.67	0.04864	0.00109	0.1263	0.0028	0.01890	0.00023	130.6	52.7	120.8	2.5	120.7	1.4	100.0
2	12.5	380.0	480.0	0.79	0.04920	0.00101	0.1302	0.0028	0.01921	0.00020	157.5	48.1	124.3	2.5	122.7	1.2	98.7
3	16.8	518.0	667.0	0.78	0.04930	0.00090	0.1261	0.0022	0.01864	0.00017	162.1	42.9	120.6	1.9	119.0	1.1	98.7
4	12.6	337.0	517.0	0.65	0.04854	0.00123	0.1260	0.0034	0.01885	0.00023	125.7	59.8	120.5	3.0	120.4	1.5	99.9
5	22.0	747.0	876.0	0.85	0.04920	0.00087	0.1271	0.0027	0.01875	0.00026	157.1	41.3	121.5	2.4	119.7	1.6	98.6
6	11.4	385.0	424.0	0.91	0.04853	0.00130	0.1283	0.0034	0.01917	0.00021	125.3	63.2	122.6	3.1	122.4	1.3	99.9

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值				同位素年龄(Ma)				谐和度 (%)				
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$			$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ		测值	1 σ	测值	1 σ
7	10.7	301.0	428.0	0.70	0.04771	0.00107	0.1247	0.0029	0.01899	0.00021	85.10	53.2	119.3	2.6	121.3	1.3	98.4
9	16.4	575.0	649.0	0.89	0.04842	0.00128	0.1266	0.0032	0.01899	0.00021	119.8	62.2	121.0	2.9	121.2	1.4	99.8
10	18.4	560.0	734.0	0.76	0.04829	0.00118	0.1266	0.0030	0.01904	0.00021	113.3	57.5	121.1	2.7	121.6	1.3	99.6
11	26.9	1120	1040	1.08	0.04767	0.00082	0.1230	0.0023	0.01869	0.00018	83.10	40.7	117.8	2.1	119.4	1.2	98.6
12	34.1	1530	1340	1.14	0.04816	0.00105	0.1236	0.0024	0.01864	0.00022	107.2	51.5	118.3	2.2	119.1	1.4	99.3
13	13.0	408.0	543.0	0.75	0.04867	0.00114	0.1261	0.0032	0.01880	0.00025	132.0	54.9	120.6	2.9	120.1	1.6	99.6
14	16.1	592.0	636.0	0.93	0.04825	0.00095	0.1269	0.0026	0.01909	0.00023	111.6	46.4	121.3	2.3	121.9	1.4	99.5
15	10.5	411.0	410.0	1.00	0.04804	0.00124	0.1259	0.0032	0.01903	0.00017	101.3	61.2	120.4	2.9	121.5	1.1	99.1
17	20.3	820.0	824.0	1.00	0.04764	0.00113	0.1218	0.0029	0.01853	0.00019	81.30	56.1	116.7	2.7	118.4	1.2	98.5
19	10.1	406.0	402.0	1.01	0.04731	0.00148	0.1233	0.0040	0.01890	0.00018	64.80	74.4	118.1	3.6	120.7	1.1	97.8
21	13.1	520.0	526.0	0.99	0.04857	0.00121	0.1255	0.0030	0.01879	0.00018	127.3	58.8	120.0	2.7	120.0	1.2	100.0
25	15.0	408.0	627.0	0.65	0.04881	0.00199	0.1272	0.0051	0.01892	0.00019	138.6	95.8	121.6	4.6	120.8	1.2	99.3
28	13.3	352.0	562.0	0.63	0.04870	0.00140	0.1264	0.0035	0.01886	0.00018	133.3	67.7	120.9	3.1	120.4	1.2	99.6
30	20.4	641.0	855.0	0.75	0.04750	0.00151	0.1236	0.0039	0.01886	0.00020	74.50	75.4	118.3	3.6	120.5	1.2	98.2

3.2 主、微量和稀土元素分析

主、微量和稀土分析测试样品均在山东省地矿局第八地质大队实验测试中心完成。样品的主量元素分析使用 XRF 光谱仪采用 ME-XRF26F 方法完成。微量元素分析使用 ICP-AES 和 ICP-MS 仪器分别采用 ME-MS61r 方法和 ME-MS81 方法完成。主量元素分析的相对偏差和相对误差均小于 5%，微量元素分析的相对偏差和相对误差小于 10%。

3.3 锆石 Hf 同位素

在得到有效且相对谐和的测试年龄的基础上，选择参与年龄计算的锆石点位进行 Hf 同位素的测试。锆石原位 Lu—Hf 同位素测定由美国热电 Neptune-plus MC-ICP-MS 与 NWR193 激光烧蚀进样系统完成测试的。测试步骤与校准方法参照 Wu Fuyuan et al. (2006)。锆石剥蚀使用频率为 8Hz，能量为 16 J/cm² 的激光剥蚀 31s，剥蚀出直径约 35 μ m 的剥蚀坑。测试采用 GJ-1、91500 进行标准样品的监控，测试过程中，由于锆石中的 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 值极其低（一般小于 0.002），¹⁷⁶Lu 对 ¹⁷⁶Hf 的同位素干扰可以忽略不计。每个测试点的 $n(^{173}\text{Yb})/n(^{172}\text{Yb})$ 平均值用于计算 Yb 的分馏系数，然后再扣除 ¹⁷⁶Yb 对 ¹⁷⁶Hf 的同质异位素干扰。 $n(^{173}\text{Yb})/n(^{172}\text{Yb})$ 的同位素比值为 1.35274 (Chu et al., 2002)。锆石 Lu—Hf 同位素的计算参照 Griffin et al. (2000)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

五莲七宝山深部花岗斑岩 2 件样品主要锆石分析点位和阴极发光图像见图 5，其分析结果见表 1。

花岗斑岩锆石在单偏光下呈浅黄色至无色透明，多为长柱状、双锥状，粒度多在 80~200 μ m 之间，长宽比为 1:1~1:3。阴极发光影像中，大部分锆石具较为明显的振荡结晶环带（图 5）。LA-ICP-MS 分析结果表明，花岗斑岩中 2020ZK1TW1 样品锆石中 U 和 Th 含量分别为 321×10^{-6} ~ 652×10^{-6} 和 254×10^{-6} ~ 709×10^{-6} ，Th/U 比值为 0.64~1.47；2020ZK1TW2 样品锆石中 U 和 Th 含量分别为 402×10^{-6} ~ 1340×10^{-6} 和 301×10^{-6} ~ 1530×10^{-6} ，Th/U 值为 0.63~1.14，均明显高于变质和热液锆石的 Th/U 值（通常小于 0.1，Belouova et al., 2002）。本次对选取的 2 件花岗斑岩样品进行锆石测年分析，相关 U-Pb 同位素组成集中分布在谐和线附近，其中 2020ZK1TW1 样品获得 23 个有效测点，其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U

年龄加权平均值为 $120.0 \pm 0.3 \text{Ma}$ (MSWD = 0.47, 图 6a), 2020ZK1TW2 样品获得 20 个有效测点, 其 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄加权平均值为 $120.5 \pm 0.3 \text{Ma}$ (MSWD = 0.22, 图 6b), 上述两件样品年龄分析结果基本一致, 表明深部花岗斑岩形成于早白垩世。

4.2 岩石地球化学特征

本次研究采取的花岗斑岩样品主、微量和稀土元素分析结果见表 2。花岗斑岩 SiO_2 (68.94% ~ 72.92%)、 Al_2O_3 (12.99% ~ 15.30%) 含量较高, TiO_2 (0.13% ~ 0.35%)、 Fe_2O_3 (1.62% ~ 2.91%) 含量偏

表 2 五莲七宝山地区 2020ZK1 钻孔深部花岗斑岩全岩主量元素 (%) 和微量元素 ($\times 10^{-6}$) 和稀土元素分析结果
Table 2 Major (%), trace elements ($\times 10^{-6}$) and REE composition of the granite porphyry from the depth of drill No. 2020ZK1 in Qibaoshan area, Wulian County

样品号	ZK1GS1	ZK1GS2	ZK1GS3	ZK1GS4	ZK1GS5	ZK1GS6	ZK1GS7	ZK1GS8	ZK1GS9	ZK1GS10
SiO_2	69.76	70.74	69.93	68.94	70.50	72.92	71.97	72.38	72.27	71.86
TiO_2	0.23	0.17	0.35	0.25	0.17	0.14	0.14	0.13	0.14	0.13
Al_2O_3	14.78	14.46	12.99	15.30	15.09	14.31	14.27	13.95	14.33	14.36
Fe_2O_3	2.91	1.71	2.17	2.04	2.72	1.67	2.69	2.07	1.62	2.17
FeO	1.66	1.12	1.39	1.34	1.82	1.18	2.04	1.18	1.12	1.66
MnO	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05
MgO	0.56	0.57	0.99	0.59	0.43	0.31	0.22	0.25	0.27	0.30
CaO	1.41	1.39	2.39	1.56	1.08	0.88	0.77	0.94	1.16	1.11
Na_2O	5.02	3.94	3.61	4.83	6.01	4.37	4.52	4.05	3.85	4.08
K_2O	3.44	4.94	3.87	4.08	2.39	4.22	4.39	4.74	4.66	4.47
P_2O_5	0.06	0.04	0.11	0.07	0.07	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
烧失量	1.74	1.98	3.41	2.17	1.41	1.00	0.79	1.29	1.47	1.29
Ga	14.8	15.7	15.0	17.0	16.0	13.9	16.8	15.0	14.7	15.3
Rb	86.0	107	90.9	93.6	61.4	92.4	104	109	111	106
Sr	339	456	550	375	352	254	274	256	267	525
Zr	151	148	166	159	153	108	115	107	100	100
Y	17.2	16.9	19.2	17.5	15.4	17.3	19.6	19.7	17.6	18.5
Nb	11.5	10.7	11.3	11.1	10.1	11.2	12.8	12.2	11.9	11.7
Ba	1581	2825	2137	2850	3873	2949	3187	3709	3905	4030
Hf	4.58	4.44	5.69	4.86	5.00	4.86	4.30	3.47	3.19	3.19
Ta	1.14	0.955	1.18	0.962	0.899	1.11	0.953	1.56	1.12	1.26
Th	23.5	17.7	14.9	22.3	25.1	21.9	25.1	18.5	19.5	21.6
U	5.22	5.35	5.06	5.52	5.95	5.51	6.92	6.77	6.47	6.80
La	71.6	57.6	47.6	69.6	73.2	60.1	64.8	53.5	47.2	57.0
Ce	155	123	96.9	159	156	124	129	117	105	116
Pr	16.7	14.1	11.3	17.7	17.7	14.1	14.5	14.1	12.7	13.4
Nd	60.4	52.2	42.7	64.7	65.5	52.2	53.5	54.3	48.7	49.4
Sm	8.41	7.41	6.74	8.86	9.15	7.96	8.28	8.61	7.51	7.76
Eu	2.01	1.63	1.52	2.07	1.53	1.54	1.76	1.90	1.60	1.61
Gd	7.05	5.98	5.33	7.31	7.17	6.29	6.58	6.62	5.77	6.08
Tb	0.793	0.718	0.746	0.836	0.798	0.785	0.847	0.850	0.767	0.790
Dy	3.84	3.70	4.19	4.08	3.63	3.94	4.44	4.52	3.98	4.16
Ho	0.659	0.642	0.771	0.702	0.601	0.691	0.785	0.792	0.716	0.754
Er	2.10	2.05	2.40	2.22	1.97	2.17	2.49	2.47	2.23	2.33
Tm	0.322	0.318	0.377	0.350	0.298	0.348	0.389	0.392	0.358	0.380
Yb	2.00	2.01	2.41	2.11	1.94	2.20	2.52	2.43	2.38	2.52
Lu	0.317	0.309	0.368	0.340	0.317	0.354	0.405	0.384	0.368	0.388
ΣREE	331	271	223	340	340	276	290	268	239	263
$\frac{\text{LREE}}{\text{HREE}}$	18.4	16.2	12.5	17.9	19.3	15.5	14.7	13.5	13.4	14.1
δEu	0.777	0.726	0.750	0.765	0.558	0.644	0.706	0.742	0.716	0.692
δCe	1.04	1.01	0.973	1.07	1.02	0.990	0.971	1.00	1.02	0.980
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	24.1	19.3	13.3	22.2	25.4	18.4	17.3	14.8	13.4	15.3

低。 K_2O 和 Na_2O 含量分别为 2.39% ~ 4.94% 和

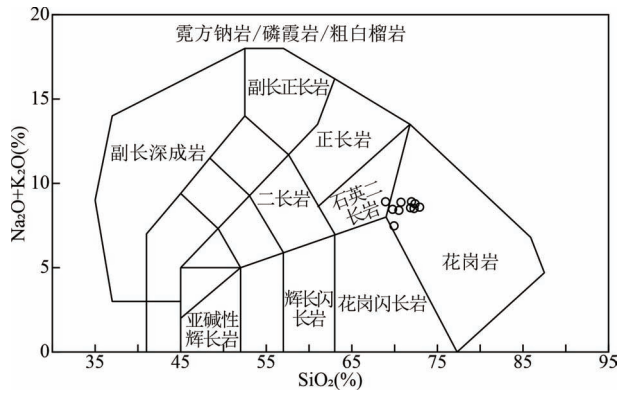


图 7 五莲七宝山区 2020ZK1 钻孔深部花岗斑岩 TAS 图解

Fig. 7 Total alkalis vs. silica diagram of the granite porphyry from the depth of drill No. 2020ZK1 in Qibaoshan area, Wulian County

3.61% ~ 6.01%, 两者之和为 7.48% ~ 8.91%, 在 TAS 图解(图 7)中, 样品落入石英二长岩和花岗岩的过渡区域。样品 $A/CNK [Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)]$ 值为 1.32 ~ 1.59, 整体呈现钙碱性特征, 在 $A/CNK [Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)] - A/NK [Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O)]$ 图解中(图 8a), 仅 1 个样品落入偏铝质区域, 其余样品均落入过铝质岩石分布, 属弱过铝质岩石。花岗斑岩整体上 K_2O 含量低于 Na_2O 含量, 在 $K_2O - SiO_2$ 图解中落入高钾钙碱性系列(图 8b)。

花岗斑岩稀土总量 ΣREE 为 $223.33 \times 10^{-6} \sim$

340.33×10^{-6} , $LREE/HREE$ 值为 12.45 ~ 19.34, $(La/Yb)_N$ 值为 13.32 ~ 25.45, 轻重稀土分馏明显, 球粒陨石标准化稀土元素配分曲线呈现明显的右倾(图 9a), 具 Eu 的负异常(0.56 ~ 0.78)以及低 Sr 含量($254.44 \times 10^{-6} \sim 549.91 \times 10^{-6}$)和低 Y ($15.42 \times 10^{-6} \sim 19.68 \times 10^{-6}$)含量, 这可能与岩石中斜长石和石榴子石的残留相关(张旗等, 2024)。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 9b), 花岗斑岩明显富集 Ba、Th、U、La、Ce 等元素, 相对亏损 Ta、Nb、Sr、P 等元素, 显示出与中—上地壳相对一致的配分模式。

4.3 锆石 Hf 同位素特征

花岗斑岩锆石 Hf 同位素分析结果见表 3, 43 个分析点的 Hf 同位素初始 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值介于 0.281844 ~ 0.282013 之间, 平均值 0.281933, $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值介于 -30.3 ~ -24.4 之间, 平均值 -27.2。Hf 同位素单阶段年龄和二阶段年龄分别为 1781Ma ~ 2037Ma 和 2713Ma ~ 3085Ma, 平均值为 1917Ma 和 2891Ma。

5 讨论

5.1 成岩时代

本次 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年得到五莲七宝山区花岗斑岩的形成年龄 $120.0 \pm 0.3Ma$ (MSWD = 0.47, $n = 23$) 和 $120.5 \pm 0.3Ma$ (MSWD = 0.22, $n = 20$), 2 件样品年龄一致, 表明花岗斑岩形成于早白垩世。

五莲七宝山区发育有鲁东地区最为典型的隐爆角砾岩型金线头金—铜矿和热液脉型七宝山银—

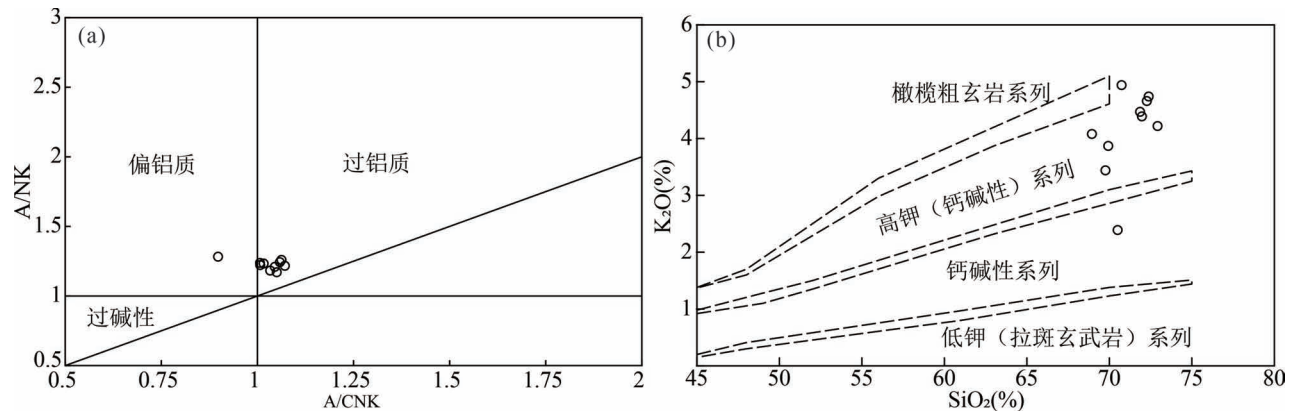


图 8 五莲七宝山区 2020ZK1 钻孔深部花岗斑岩 $A/CNK - A/NK$ (a) 和 $K_2O - SiO_2$ (b) 图解

(据 Maniar et al., 1989; Middlemost, 1985)

Fig. 8 A/CNK vs. A/NK diagram(a) and K_2O vs. SiO_2 (b) diagram of the granite porphyry from the depth of drill No. 2020ZK1 in Qibaoshan area, Wulian County(after Maniar et al., 1989; Middlemost, 1985)

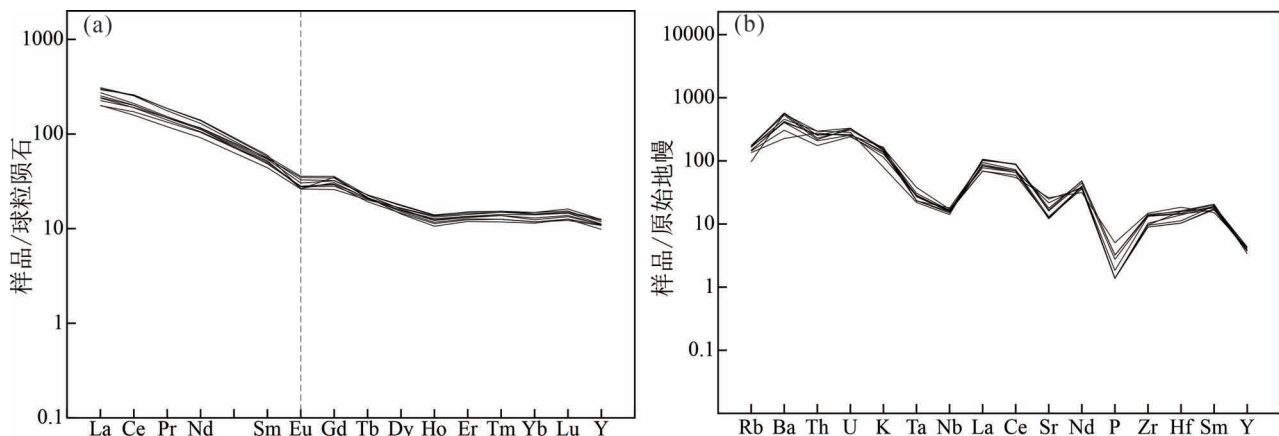


图9 五莲七宝山地区 2020ZK1 钻孔深部花岗斑岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagrams(b) of the granite porphyry from the depth of drill No. 2020ZK1 in Qibaoshan area, Wulian County(after Sun and McDonough, 1989)

铅—锌—多金属矿床,前人通过多种测年手段对七宝山潜火山杂岩体和赋存在岩体内部的矿床进行详细的年龄测试工作(表4),基本确定了矿床和与成矿相关的岩体的年龄,其中,与成矿相关的(细密斑)安山玢岩—石英闪长玢岩—花岗闪长斑岩岩体年龄集中分布于120.8~124.6Ma之间,成矿时代分布在113.9~117.0Ma,略晚于杂岩体分布年龄,具有较好的一致性。上述分析结果表明,五莲七宝山次火山杂岩体与赋存在内的矿床均形成于早白垩世,与胶莱盆地周缘早白垩世岩浆活动和金铜多金属矿床成矿事件基本一致。本次研究得到的花岗斑岩锆石U-Pb年龄与五莲七宝山次火山杂岩体年龄基本一致,均形成于早白垩世。

5.2 岩石成因及源区

5.2.1 岩石成因

野外观察及光薄片鉴定表明,五莲七宝山地区花岗斑岩具有一定的绢云母化和轻微的碳酸盐化,黄铁矿化发育。考虑到热液蚀变作用对岩石地球化学组成的影响,除部分微量元素外,主要选取Ga、Nb、Zr、Ce、Y等元素对岩石成因进行判别。

在五莲七宝山花岗斑岩中, SiO_2 含量较高、 P_2O_5 含量低,基本不含暗色矿物,岩石中 K_2O 含量低于 Na_2O 含量,岩石地球化学特征显示为高钾钙碱性的弱过铝质岩石, $\text{Hf}(t)$ 具明显的负值(-30.3~-24.4)(图10),位于上地壳和平均地壳之间,均明显不同于典型的M型和A型花岗岩特征。在花岗斑岩成因类型判别图解中(图11),绝大部分岩石均

落入分异的I型花岗岩分布区域,在 Al_2O_3 -Ga 的判别图解中(图11d),落入I型花岗岩分布区域,表明五莲七宝山花岗斑岩为经历一定程度结晶分异的I型花岗岩。

5.2.2 岩浆源区

王世进等(2012)对五莲县东北侧五莲群黑云变粒岩进行碎屑锆石U-Pb年龄的测定,得到了2400Ma的峰值年龄;薛怀民等(2006)通过对五莲新元古代花岗岩类(主要为黑云正长花岗质,少数为石英正长质)进行Sr-Nd同位素组成测定,得到了 ϵ_{Nd} 二阶段的模式年龄为1.7~3.4Ga,认为其物质来源于中—下地壳的TTG片麻岩,混入了少量的

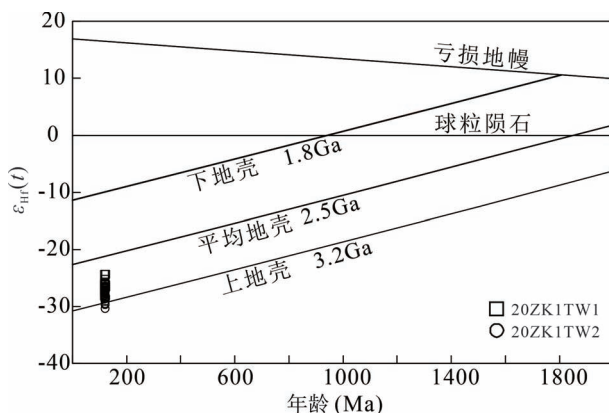


图10 五莲七宝山地区花岗斑岩锆石Hf同位素组成图解

Fig. 10 Hf isotopic composition diagram of zircons from the granite porphyry in Qibaoshan area, Wulian County

年轻地幔物质;黄洁等(2005)通过对五莲北部桑园—郝戈庄一带新元古代和中生代岩浆岩进行 Sr—Nd 和氧同位素的研究,得到新元古代花岗岩样

表 3 五莲七宝山区 2020ZK1 钻孔深部花岗斑岩锆石 Hf 同位素分析结果
Table 3 Hf isotope composition for zircons of the granite porphyry from the depth
of drill No. 2020ZK1 in Qibaoshan area, Wulian County

点 号	$\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}$		$\frac{n(^{176}\text{Yb})}{n(^{177}\text{Hf})}$		$\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})}$		年龄 (Ma)	$\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}\right]_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1} (Ma)	T_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
	测值	2 σ	测值	2 σ	测值	2 σ						
20ZK1TW1:												
1	0.28190	0.00002	0.06367	0.00079	0.002268	0.000029	119.9	0.2819	-28.5	1970	2969	-0.93
2	0.28199	0.00002	0.06991	0.00417	0.002508	0.000160	121.8	0.2820	-25.3	1853	2769	-0.92
3	0.28193	0.00002	0.06726	0.00178	0.002349	0.000056	118.7	0.2819	-27.2	1922	2889	-0.93
4	0.28194	0.00002	0.05609	0.00229	0.001995	0.000051	121.7	0.2819	-26.9	1896	2874	-0.94
5	0.28195	0.00002	0.05953	0.00133	0.002039	0.000023	121.9	0.2819	-26.6	1884	2853	-0.94
6	0.28198	0.00002	0.08295	0.00284	0.002789	0.000061	119.7	0.2820	-25.7	1883	2795	-0.92
7	0.28197	0.00002	0.08651	0.00033	0.003002	0.000032	120.6	0.2820	-26.0	1906	2814	-0.91
8	0.28196	0.00002	0.06295	0.00087	0.002240	0.000023	119.7	0.2820	-26.2	1877	2827	-0.93
11	0.28193	0.00002	0.07097	0.00116	0.002570	0.000042	119.0	0.2819	-27.3	1935	2892	-0.92
12	0.28196	0.00002	0.05058	0.00096	0.001752	0.000009	119.7	0.2820	-26.2	1855	2831	-0.95
13	0.28191	0.00002	0.04194	0.00123	0.001405	0.000035	118.0	0.2819	-27.9	1903	2932	-0.96
14	0.28195	0.00002	0.08779	0.00277	0.002808	0.000046	119.5	0.2819	-26.8	1927	2861	-0.92
15	0.28196	0.00002	0.09460	0.00529	0.003339	0.000215	121.0	0.2820	-26.2	1931	2825	-0.90
16	0.28195	0.00002	0.05412	0.00098	0.002001	0.000036	118.5	0.2819	-26.7	1883	2856	-0.94
18	0.28197	0.00002	0.05276	0.00128	0.001864	0.000022	118.8	0.2820	-26.0	1848	2812	-0.94
20	0.28191	0.00002	0.06022	0.00117	0.002223	0.000027	118.5	0.2819	-28.2	1955	2950	-0.93
21	0.28197	0.00002	0.06658	0.00093	0.002362	0.000023	121.2	0.2820	-26.0	1876	2816	-0.93
22	0.28197	0.00002	0.06326	0.00081	0.002307	0.000014	120.7	0.2820	-25.8	1863	2801	-0.93
24	0.28201	0.00002	0.04816	0.00132	0.001722	0.000026	122.3	0.2820	-24.4	1782	2717	-0.95
25	0.28201	0.00002	0.05111	0.00156	0.001786	0.000043	119.7	0.2820	-24.4	1781	2713	-0.95
27	0.28196	0.00002	0.05416	0.00209	0.001883	0.000046	121.9	0.2820	-26.2	1862	2830	-0.94
28	0.28192	0.00002	0.05154	0.00122	0.001816	0.000032	120.4	0.2819	-27.5	1910	2910	-0.95
30	0.28195	0.00002	0.05326	0.00174	0.001806	0.000022	121.8	0.2819	-26.5	1870	2848	-0.95
20ZK1TW2:												
1	0.28188	0.00002	0.07412	0.00233	0.002549	0.000093	120.7	0.2819	-29.1	2010	3007	-0.92
2	0.28189	0.00002	0.07184	0.00099	0.002528	0.000034	122.7	0.2819	-28.6	1990	2977	-0.92
3	0.28189	0.00002	0.05462	0.00095	0.001859	0.000022	119.0	0.2819	-28.8	1960	2986	-0.94
4	0.28192	0.00002	0.05491	0.00129	0.001906	0.000025	120.4	0.2819	-27.8	1925	2927	-0.94
5	0.28192	0.00002	0.05947	0.00116	0.002016	0.000037	119.7	0.2819	-27.6	1921	2913	-0.94
6	0.28194	0.00001	0.06388	0.00207	0.002364	0.000078	122.4	0.2819	-27.1	1920	2883	-0.93
7	0.28192	0.00002	0.05269	0.00144	0.001811	0.000025	121.3	0.2819	-27.5	1911	2912	-0.95
9	0.28187	0.00002	0.06610	0.00234	0.002391	0.000055	121.2	0.2819	-29.5	2019	3033	-0.93
10	0.28192	0.00002	0.05759	0.00066	0.002086	0.000036	121.6	0.2819	-27.5	1923	2910	-0.94
11	0.28191	0.00002	0.07005	0.00216	0.002501	0.000091	119.4	0.2819	-28.0	1962	2939	-0.92
12	0.28191	0.00002	0.06549	0.00125	0.002400	0.000026	119.1	0.2819	-28.0	1957	2939	-0.93
13	0.28184	0.00002	0.05331	0.00106	0.001890	0.000017	120.1	0.2818	-30.3	2026	3085	-0.94
14	0.28190	0.00002	0.05627	0.00092	0.002056	0.000027	121.9	0.2819	-28.2	1951	2956	-0.94
15	0.28194	0.00002	0.05340	0.00216	0.001808	0.000065	121.5	0.2819	-26.8	1881	2865	-0.95
17	0.28190	0.00002	0.06342	0.00047	0.002353	0.000019	118.4	0.2819	-28.4	1970	2963	-0.93
19	0.28193	0.00002	0.06562	0.00170	0.002453	0.000084	120.7	0.2819	-27.5	1941	2909	-0.93
21	0.28187	0.00002	0.07407	0.00249	0.002624	0.000044	120.0	0.2819	-29.7	2037	3042	-0.92
25	0.28190	0.00002	0.04624	0.00167	0.001787	0.000064	120.8	0.2819	-28.4	1945	2967	-0.95
28	0.28196	0.00002	0.05784	0.00093	0.001942	0.000009	120.4	0.2820	-26.4	1870	2839	-0.94
30	0.28193	0.00002	0.06839	0.00159	0.002343	0.000044	120.5	0.2819	-27.2	1923	2890	-0.93

注:计算公式如下(同徐楠等,2023):

$$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \cdot \left\{ \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s - \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s \cdot (e^{\lambda t} - 1)}{\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR},0} - \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}} \cdot (e^{\lambda t} - 1)} - 1 \right\}; \quad T_{\text{DM1}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s - \left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s - \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}}} \right\}$$

$$T_{\text{DM2CC}} = T_{\text{DM1}} - (T_{\text{DM1}} - t) \cdot \frac{f_{\text{CC}} - f_{\text{S}}}{f_{\text{CC}} - f_{\text{DM}}}; \quad f_{\text{Lu/Hf}} = \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}}} - 1$$

其中: $\lambda(^{176}\text{Lu}) = 1.865 \times 10^{-11} / \text{a}$ (Scherer et al., 2001); $\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s$ 和 $\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s$ 为样品测量值; $\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR},0} = 0.282772$ (Blichert-Toft et al., 1997); $\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}} = 0.0384$, $\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}} = 0.28325$ (Griffin et al., 2000); $\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{平均地壳}} = 0.015$; $f_{\text{CC}} = \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{平均地壳}}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}}} - 1$; $f_{\text{S}} = f_{\text{Lu/Hf}}$; $f_{\text{DM}} = \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}}} - 1$; t 为锆石结晶年龄。

品 (~740Ma) 二阶段演化模式年龄为 1976 ~ 2437Ma, 与古元古代地壳物质的再循环相关; 中生

代岩浆岩 (~120Ma) 则得到了 2156 ~ 2473Ma 的二阶段演化模式年龄, 与新元古代岩浆岩具有相同的

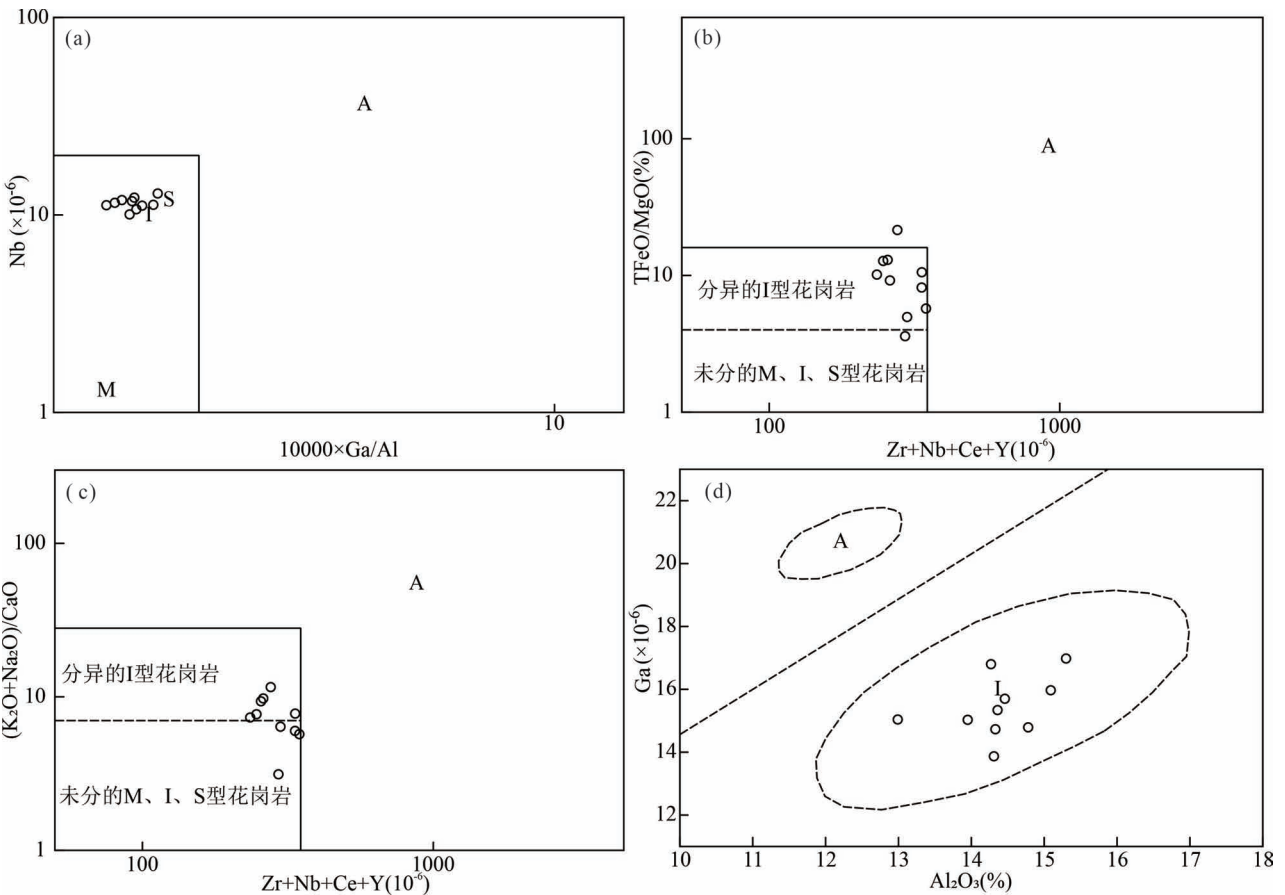


图 11 五莲七宝山地区花岗岩斑岩成因类型判别图解: (a) $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ —Nb; (b) $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ —TFeO/MgO; (c) $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ — $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ (据 Joseph et al., 1987); (d) Al_2O_3 —Ga (据 Collons et al., 1982)

Fig. 11 Genetic discrimination diagrams of the granite porphyry in Qibaoshan area, Wulian County: (a) $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ vs. Nb; (b) $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ vs. TFeO/MgO; (c) $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ vs. $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ (after Joseph et al., 1987); (d) Al_2O_3 vs. Ga (after Collons et al., 1982)

成因联系,均来源于古元古代古老地壳物质,中生代花岗岩可能是中性下地壳的脱水熔融形成。上述研究表明,五莲七宝山及周边地区存在 1.7~3.4 Ga 的古太古代—古元古代古老地壳,区内自新元古代、中生代花岗岩浆均来源于古老地壳物质的熔融。

本次研究获得的锆石 Hf 同位素数据表明,五莲七宝山花岗岩斑岩 2 件样品均具相似且明显的负的 Hf 同位素组成,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-30.3 \sim -24.4$ (图 10),锆石二阶段模式年龄为 2713Ma~3085Ma,平均值为 2891Ma,与前人求得的花岗岩锆石 U-Pb 年龄和稳定同位素二阶段模式年龄基本一致,表明花岗岩斑岩侵入岩来源于中新太古代古老壳源物质的部分熔融。

5.3 构造环境及地质意义

前人研究表明,自中生代以来,包括鲁东在内的中国东部及沿海地区进入环太平洋构造域,板块构造活动加剧(秦克章等,1999;毛景文等,2018)。进入白垩纪以来,随着太平洋板块向东俯冲的进一步加快以及板块发生旋转,使得郯庐断裂发生强烈的左行走滑,区域构造应力转变为强烈张引,加快了包

括华北克拉通在内的整个中国东部沿海板块的破坏进程,火山—岩浆活动变得尤为强烈(丁正江等,2015;汪相,2022;杨文采,2022,2023)。至 125Ma~115Ma 左右,随着太平洋板块运动方向的转变和俯冲后强烈伸展的收缩期,以及伊泽奈奇板块后退式俯冲,使得包括胶莱盆地南缘在内的整个鲁东地区岩浆作用向南东方向推进,从而在幔隆区(盆地)及周缘,深部岩浆沿深源断裂及其次级断裂上升形成侵入体及喷发火山岩,在胶莱盆地及周缘形成诸多与岩浆作用相关的斑岩型、隐爆角砾岩型、热液脉型等金铜多金属矿床(丁正江等,2015,2022)。

本次研究的五莲七宝山花岗岩斑岩形成于早白垩世,属高钾钙碱性的 I 型花岗岩,岩石微量、稀土元素地球化学特征表现出与中—上地壳相对一致的配分模式,锆石 Hf 同位素组成表明岩浆来源于中—新太古代古老壳源物质的部分熔融。在构造环境的 (Y+Nb)—Rb(图 12a)和 Yb—Ta 图解(图 12b)中,样品均落入火山弧花岗岩分布区域,同样显示后碰撞花岗岩特征(Eby,1992;Pearce,1996)。在花岗岩构造环境分类 R1—R2 图解中(图 12c),落入造山晚期花岗岩分布区域。在 Rb/30—Hf—Ta \times 3 图解

中(图 12d)中样品主要落入火山弧和碰撞晚期—碰撞后期环境中,部分位于火山弧和板内环境界线周围。结合区内时空背景,认为花岗岩斑岩为后碰撞花岗岩,形成于造山作用晚期或板块俯冲后短暂伸展的后造山构造环境中。以上研究结果与区域上构造演化基本一致,反映了该花岗岩斑岩与区域上岩浆演化关系极为密切。

6 结论

(1)通过对五莲七宝山地区深部施工的 2020ZK1 钻孔新揭露的花岗斑岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,得到该斑岩结晶年龄为 120.0 ± 0.3 Ma 和 120.5 ± 0.3 Ma,形成于早白垩世。

表 4 五莲七宝山地区相关年龄统计表

Table 4 Compilation for ages of Qibaoshan area in Wulian County

类型	测试方法	样品岩性	采样位置	年龄 (Ma)	参考文献
地层	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	青山群八亩地组 安山质凝灰岩	五莲七宝山	133.8 \pm 1.8	于光源,2020
岩体	全岩 K-Ar	次火山岩	金线头金铜矿	平均 146.7	王郁等,1991
	黑云母 K-Ar	辉石二长岩	七宝山破火山口	124.9	陈克荣等,1993
	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	辉石二长岩	五莲七宝山	122.3 \pm 0.3	孙丽莎等 [●]
	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	辉石闪长岩	五莲七宝山	128 \pm 1	王永,2010
	锆石 SHRIMP U-Pb	辉石闪长岩	五莲七宝山	123.4 \pm 0.8	未发表数据
	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	角闪安山玢岩	五莲七宝山	129.6 \pm 1.2	于光源,2020
	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	角闪安山玢岩	五莲七宝山	128 \pm 2	未发表数据
	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	安山玢岩	五莲七宝山	125 \pm 1~132 \pm 1	王永,2010
	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	安山玢岩	金线头金铜矿	122.3 \pm 0.6	未发表数据
	锆石 SHRIMP U-Pb	安山玢岩	金线头金铜矿	122.0 \pm 0.6	未发表数据
	锆石 SHRIMP U-Pb	安山玢岩	五莲七宝山	122.2 \pm 0.8	未发表数据
	锆石 SHRIMP U-Pb	细密斑安山玢岩	五莲七宝山	122.8 \pm 1.1	未发表数据
	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	花岗闪长斑岩	五莲七宝山	124.6 \pm 1.1	于光源,2020
	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	石英闪长玢岩	七宝山破火山口	124.1	陈克荣等,1993
	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	石英闪长玢岩	五莲七宝山	123 \pm 1~126 \pm 1	王永,2010
锆石 LA-ICP-MS U-Pb	石英闪长玢岩	五莲七宝山	122.0 \pm 0.4	孙丽莎等 [●]	
锆石 LA-ICP-MS U-Pb	石英闪长玢岩	五莲七宝山	122.0 \pm 0.4	未发表数据	
锆石 SHRIMP U-Pb	石英闪长玢岩	五莲七宝山	120.8 \pm 0.8	未发表数据	
矿体	黄铁矿 Rb-Sr	金铜矿矿石	金线头金铜矿	117 \pm 3	王永,2010
	硫化物 Rb-Sr	金铜矿矿石	金线头金铜矿	116.2 \pm 2.4	未发表数据
	硫化物 Rb-Sr	银铅锌矿矿石	七宝山银铅锌多金属矿	113.9 \pm 2.1	李双飞等,2023

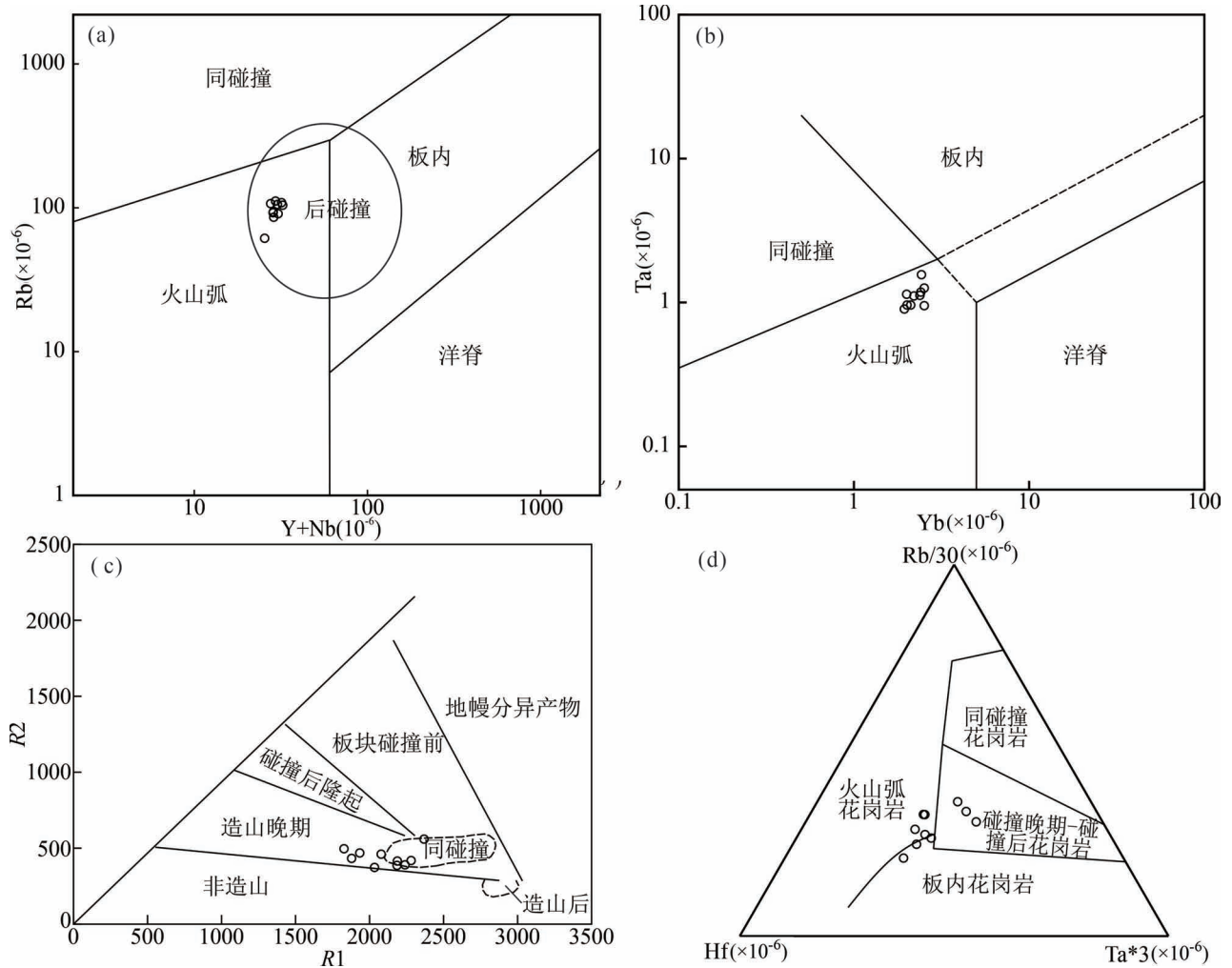


图 12 五莲七宝山地区花岗斑岩构造环境判别图解(底图据 Pearce et al., 1984; Pearce, 1996; Betchelor, 1985; Harris, 1986)

Fig. 12 Tectonic environment identification diagrams of the granite porphyry in Qibaoshan area, Wulian County (Base map from Pearce et al., 1984; Pearce, 1996; Betchelor, 1985; Harris, 1986)

$$R1 = 4 * n(\text{Si}) - 11 * n(\text{Na+K}) - 2 * n(\text{Fe+Ti}), R2 = 6 * n(\text{Ca}) + 2 * n(\text{Mg}) + n(\text{Al})$$

(2) 五莲七宝山花岗斑岩表现为高硅、高铝和富钠以及贫铁、镁,为高钾钙碱性的弱过铝质岩石。稀土元素分异明显,相对富集轻稀土和大离子亲石元素,亏损重稀土和高场强元素,具明显 Ta、Nb、Sr 和 Eu 负异常,属 I 型花岗岩。锆石 Hf 同位素具明显的负值(-30.3~-24.4),二阶段模式平均年龄为 2891 Ma,综合表明花岗斑岩来源于中新太古代古老壳源物质。

(3) 五莲七宝山花岗斑岩形成于板块俯冲后短暂伸展的后造山构造环境中,属后碰撞花岗岩。该时代正是太平洋板块向欧亚大陆俯冲时运动方向的转变和俯冲后强烈伸展的收缩期,包括区内的鲁东地区岩浆构造活动强烈,形成了一系列与岩浆作用

相关的金铜多金属矿床,该花岗斑岩与区域上七宝山次火山杂岩体岩浆演化关系极为密切。

致谢:野外工作得到了山东省地矿局第八地质大队彭永和正高级工程师的帮助,文章修改得到了山东科技大学孟元库教授悉心指导;章雨旭研究员和审稿专家提出了宝贵意见和建议,在此表示诚挚的感谢!

注释 / Note

① 孙丽莎,陈建,唐名鹰. 2022. 鲁东中生代盆地边缘地区有色金属矿床成矿系列及找矿方向研究报告. 日照: 山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 陈克荣,潘永伟,陈小明. 1993. 山东五莲七宝山早白垩世破火山口与火山—侵入杂岩特征和成因. 南京大学学报自然科学版, 29(1):92~103.
- 丁正江,孙丰月,赵财胜,刘殿浩,张丕建,王学乾. 2010. 山东胶莱盆地东北缘地区金矿成矿系列. 矿床地质, 29(S1):919~920.
- 丁正江,孙丰月,刘福来,刘建辉,彭齐鸣,纪攀,张丕建. 2015. 胶东中生代动力学演化及主要金属矿床成矿系列. 岩石学报, 31(10):3045~3080.
- 丁正江,孙丰月,薄军委. 2022. 山东省胶莱盆地东北缘金矿地质. 北京:地质出版社:1~145.
- 韩小梦,郭云成,段留安,王建田,赵鹏飞,王利鹏,喻光明. 2023. 胶莱盆地东北缘前垂柳金矿床 S、Pb 同位素组成:对成矿物质来源的指示. 地质科技通报, 42(3):210~221.
- 黄洁,郑永飞,吴元保,赵子福. 2005. 苏鲁造山带五莲地区岩浆岩元素和同位素地球化学研究. 岩石学报, 21(3):545~568.
- 李超,裴浩翔,王登红,周利敏,赵鸿,李欣尉,杜安道. 2016. 山东孔辛头铜铅矿成矿时代及物质来源:来自黄铜矿、辉钼矿 Re-Os 同位素证据. 地质学报, 90(2):240~249.
- 李国华,丁正江,纪攀,李勇,唐俊智,刘莉莎. 2016. 胶莱盆地东北缘地区金矿特征及找矿方向. 地质与勘探, 52(6):1029~1036.
- 李国华,丁正江,宋明春,李俊建,李秀章,纪攀,王志新. 2017. 胶东新类型金矿—辽上黄铁矿碳酸盐脉型金矿. 地球学报, 38(3):423~429.
- 李双飞,陈建,唐名鹰,宋伟,丁正江,黄鹂,丁文洁. 2023. 胶莱盆地南缘五莲地区七宝山多金属矿床硫化物 Rb-Sr 年龄及其地质意义. 地球科学与环境学报, 45(5):1149~1161.
- 李小伟,单伟,于学峰,李大鹏,谢元惠,张国坤,马祥县. 2022. 五莲七宝山地区早白垩世碱性侵入岩成因及其地质意义. 地学前缘, 29(5):438~463.
- 毛景文,谢桂青,袁顺达,刘鹏,孟旭阳,周振华,郑伟. 2018. 环太平洋成矿带斑岩—矽卡岩型铜矿和与花岗岩有关的锡多金属矿研究现状与展望. 岩石学报, 34(9):2501~2517.
- 彭永和,王申,李小陪,李双飞. 2018. 山东五莲七宝山多金属矿床勘查发现及启示. 山东国土资源, 34(10):57~61.
- 邱德同,孔令刚. 1986. 山东省七宝山角砾岩筒型金铜矿床的地质地球化学特征. 地质与勘探, 5:7~12.
- 秦克章,汪东波,王之田,孙极. 1999. 中国东部铜矿床类型、成矿环境、成矿集中区与成矿系统. 矿床地质, 18(4):359~371.
- 申文杰,刘少峰,张博,王喻,王者涵,方敏,李雪岩. 2020. 胶莱盆地白垩纪构造演化. 大地构造与成矿学, 44(3):325~339.
- 石文杰. 2014. 山东沂沭断裂带及邻区晚中生代构造—岩浆活动与金成矿作用. 导师:魏俊浩. 中国地质大学(武汉)博士学位论文:1~106.
- 孙思,李永刚,张小允,刘洪举. 2010. 山东七宝山隐爆角砾岩型金铜矿床含矿蚀变斑岩石英颗粒中高温高盐度沸腾包裹体的发现及其意义. 岩石学报, 26(11):3319~3326.
- 唐名鹰,陈建,邹占春,孙丽莎,何宗围,李双飞,丁文洁. 2023. 胶莱盆地南缘家宅科地区短波红外光谱特征及金多金属矿勘查指示意义. 山东国土资源, 39(5):17~26.
- 田京祥,李洪奎,刘汉栋,李秀章,祝德成,胡伟. 2007. 山东省胶南市七宝山铅矿地质特征及成因浅析. 加强地质工作 促进社会经济和谐发展——2007年华东六省一市地学科技论坛论文集:

264~268.

- 田乃凤,张帆,高宗军,袁杰. 2011. 山东五莲七宝山铜及多金属矿床成矿地质特征及找矿方向. 山东国土资源, 27(04):8~11.
- 王世进,相振群,张成基,陆松年,宋志勇,杨恩秀. 2012. 苏鲁造山带北缘五莲地区五莲群变质地层特征及形成时代——锆石 MC-ICPMS U-Pb 测年的证据. 山东国土资源, 28(10):7~12.
- 王郁. 1991. 山东七宝金山矿床地质特征及成因探讨. 地质论评, 37(4):329~337.
- 王永,范宏瑞,胡芳芳,蓝廷广. 2008. 山东五莲七宝山 Cu—Au 矿床成矿流体特征及成矿作用. 岩石学报, 24(09):2029~2036.
- 王永. 2010. 鲁西南地区晚中生代岩浆活动与金铜矿成矿作用. 导师:范宏瑞. 中国科学院研究生院博士学位论文:28~31.
- 魏绪峰,时占华,解英芳,孙瑞刚. 2008. 山东省栖霞市尚家庄铅矿地质特征. 甘肃科技, 24(21):88~91.
- 徐楠,吴才来,赵苗苗,刘畅. 2023. 茫崖闪长岩的成因及对造山带构造演化的指示意义. 地质论评, 69(6):2085~2111.
- 徐兴旺,蔡新平,秦大军,王杰,梁光河,张宝林,高浩中,张小允,刘立金,薛世强,刘成深,周林科. 2000. 山东七宝山角砾岩筒流体双重致裂机制与金铜成矿. 中国科学 D 辑:地球科学, 30(1):47~52.
- 徐文刚,范宏瑞,胡芳芳,王永,杨奎锋. 2015. 山东七宝山隐爆角砾岩型 Cu—Au 矿床流体包裹体及成矿流体演化特征. 岩石学报, 31(4):1015~1030.
- 薛怀民,刘福来,孟繁聪. 2006. 苏鲁造山带五莲新元古代花岗岩类成因的 Sr—Nd 同位素证据. 地球科学, 31(4):497~504.
- 杨文采. 2023. 长江中下游构造带成因与燕山期的大洋俯冲. 地质论评, 69(5):1619~1627.
- 杨文采. 2022. 形成闽浙火山岩带的洋陆转换作用. 地质论评, 68(2):375~384.
- 汪相. 2022. 中国东南部黄山运动及其花岗质岩浆活动与成矿作用. 地质论评, 68(5):1677~1728.
- 杨金中,赵玉灵,沈远超,刘铁兵. 2001. 胶东宋家沟金矿床的地质特征及矿床类型—胶东层控矿床的新发现. 地质与勘探, 37(4):1~4.
- 于光源. 2020. 山东五莲七宝山矿田金—铜多金属成矿作用及成矿预测. 导师:王可勇. 吉林大学博士学位论文:69~98.
- 赵宝聚,高明波,李亚东,付厚起,李大兜,冯启伟,王立刚. 2019. 胶莱盆地东北缘龙口—土堆矿区金矿床成矿规律研究. 地质学报, 93(s1):1~11.
- 张连营,程敏清. 1996. 山东五莲七宝山金铜矿床地球化学特征及成因分析. 地质找矿论丛, 2(1):18~24.
- 张森,王可勇,赵立国,尹桂堂,王承洋,于琪. 2015. 山东七宝山金铜多金属矿区黄铁矿微量元素特征及其地质意义. 世界地质, 34(3):653~663.
- 张旗,原杰. 2024. 地球化学研究的危机与机遇. 地质论评, 70(5):1907~1926.
- 张维昕,李太兵,刘金友,丁宪华,赵明传,徐小林. 2017. 山东西涝口金矿床控矿构造特征及动力学浅析. 山东国土资源, 33(10):19~24.
- 张岳桥,李金良,张田,董树文,袁嘉音. 2008. 胶莱盆地及其邻区白垩纪—古新世沉积构造演化历史及其区域动力学意义. 地质学报, 82(9):1229~1257.
- 张增奇,张成基,王世进,刘书才,王来明,杜圣贤,陈诚. 2014. 山东省地层侵入岩构造单元划分对比意见. 山东国土资源, 30(3):1~23.
- 周晓萍,胡秉谦,周明岭,康恺,胡亮,姜帆,张娜. 2022. 胶莱盆地东北缘西涝口金矿煌斑岩脉岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄及其对构造岩浆事件的记录. 地质通报, 41(9):1634~1647.

- Batchelor R A, Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multication parameters. *Chemical Geology*, 48:43~55.
- Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602~622.
- Chen Kerong, Pan Yongwei, Chen Xiaoming. 1993&. The Early Cretaceous QibaoShan caldera, and the characteristics and petrogenesis of volcanic—intrusive complex in Wulian County, Shandong Province. *Journal of Nanjing University*, 29(1): 92~103.
- Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, Nesbitt R W, Boella R M, Milton J A, Germain C R, Bayon G, Burton K. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: an evaluation of isobaric interference corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17: 1567~1574.
- Collins W J, Beams S D, White A J R. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189~200.
- Ding Zhengjiang, Sun Fengyue, Zhao Caisheng, Liu Dianhao, Zhang Pijian, Wang Xueqian. 2010#. Gold metallogenic series in the northeast margin of Jiaolai Basin, Shandong Province. *Mineral Deposits*, 29(S1): 919~920.
- Ding Zhengjiang, Sun Fengyue, Liu Fulai, Liu Jianhui, Peng Qiming, Ji Pan, Li Bile, Zhang Pijian. 2015&. Mesozoic geodynamic evolution and metallogenic series of major metal deposits in Jiaodong Peninsula, China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 3045~3080.
- Ding Zhengjiang, Sun Fengyue, Bo Junwei. 2022#. Gold deposit geology in northeast margin of Jiaolai Basin, Shandong Province. Beijing: Geological Publishing House; 1~145.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7): 641~644.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, Van Acherbergh E, O'Reilly S Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64:133~147.
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward M P and Ries A C. eds. *Collision Tectonics*. Geological Society, London, Special Publication, 19: 67~81.
- Han Xiaomeng, Guo Yuncheng, Duan Liuan, Wang Jiantian, Zhao Pengfei, Wang Lipeng, Yu Guangming. 2023&. S and Pb isotopic compositions of the Qianchuilu gold deposit on the northeastern margin of the Jiaolai Basin: Implication on the source of ore-forming material. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(3): 210~221.
- Hu Zhaochu, Li Xianhua, Luo Tao, Zhang Wen, Crowley J, Li Qiuli, Ling Xiaoxiao, Yang Chuan, Li Yang, Feng Lanping, Xia Xiaoping, Zhang Shaobing, Wang Zaicong, Guo Jinliang, Xu Lei, Lin Jie, Liu Xiaoming, Bao Zhian, Liu Yongsheng, Zong Keqing, Chen Wei, Hu Shenghong. 2021. Tanz zircon megacrysts: a new zircon reference material for the microbeam determination of U-Pb ages and Zr—O isotopes. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 36(12): 2715~2734.
- Huang Jie, Zheng Yongfei, Wu Yuanbao, Zhao Zifu. 2005&. Geochemistry of elements and isotopes in igneous rocks from the Wulian region in the Sulu orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 545~568.
- Joseph B W, Kenneth L. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 95(4):407~419.
- Li Chao, Pei Haoxiang, Wang Denghong, Zhou Limin, Zhao Hong, Li Xinwei, Qu Wenjun, Du Andao. 2016&. Age and source constraints for Kongxintou copper molybdenum deposit, Shandong, from Re-Os isotope in molybdenite and chalcopyrite. *Acta Geologica Sinica*, 90(2):240~249.
- Li Guohua, Ding Zhengjiang, Ji Pan, Li Yong, Tang Junzhi, Liu Lisha. 2016&. Features and prospecting direction of the gold deposits in the northeastern margin of the Jiaolai Basin. *Geology and Exploration*, 52(6): 1029~1036.
- Li Guohua, Ding Zhengjiang, Song Mingchun, Li Junjian, Li Xiuzhang, Ji Pan, Wang Zhixin. 2017&. The liaoshang pyrite—carbonate veined deposit: A new type of gold deposit in Jiaodong Peninsula. *ACTA Geoscientica Sinica*, 38(3):423~429.
- Li Shuangfei, Chen Jian, Tang Mingying, Zhu Wei, Ding Zhengjiang, Huang Li, Ding Wenjie. 2023&. Rb-Sr age of sulfides of Qibaoshan polymetallic deposit in Wulian area, the southern margin of Jiaolai Basin, China and its geological significance. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 45(5):1149~1161.
- Li Xiaowei, Shan Wei, Yu Xuefeng, Li Dapeng, Xie Yuanhui, Zhang Guokun, Chi Naijie, Wang Wenlu, Zhang Yan, Li Zengsheng, Ma Xiangxian. 2022&. Petrogenesis of early cretaceous Qibaoshan alkaline intrusive rocks in the Wulian area and its geological significance. *Earth Science Frontiers*, 29(5):438~463.
- Liu Lanhai, Chen Jing, Li Xuanxuan, Zhou Taofa, Li Shuangfei, Sun Lisha, Huang Li, Tang Mingying, Chen Jian. 2024. Short wavelength infrared (SWIR) reflectance spectroscopy of alteration minerals of Qibaoshan ore district, Shandong Province, China. *Ore Geology Reviews*. 165, 105868.
- Ludwig K R. 2012. *Isoplot: Ageochronological toolkit for microsoft excel*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 5: 1~70.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Yuan Shunda, Liu Peng, Meng Xuyang, Zhou Zhenhua, Zheng wei. 2018&. Current research progress and future trends of porphyry—skarn copper and granite-related tin polymetallic deposits in the Circum Pacific metallogenic belts. *Acta Petrologica Sinica*, 34(9): 2501~2517.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 1015:635~643.
- Middlemost E A K. 1985. *Magma and magmatic rocks, An introduction to igneous petrology*. London: Longman Group; 73~87.
- Peace J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25:956~983.
- Pearce J A. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19(4): 120~125.
- Peng Yonghe, Wang Shen, Li Xiaopei, Li Shuangfei. 2018&. Discovery and revelation of Qibaoshan polymetallic deposit exploration in Wulian County of Shandong Province. *Shandong Land and Resources*, 34(10):57~61.
- Qiu Detong, Kong Linggang. 1986#. Geological and geochemical characteristics of the tubreccia gold—copper deposit in Qibaoshan, Shandong Province. *Geology and Exploration*, 5:7~12.
- Qin Kezhang, Wang Dongbo, Wang Zhitian, Sun Shu. 1999&. Types, geological background, metallogenic provinces and ore-forming systematics of major copper deposits in Eastern China. *Mineral*

- Deposit, 18(4): 359~371.
- Shen Wenjie, Liu Shaofeng, Zhang Bo, Wang Yu, Wang Zhehan, Fang Min, Li Xueyan. 2020#. Cretaceous tectonic evolution of the Jiaolai Basin, North China. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(3): 325~339.
- Shi Wenjie. 2014#. The late mesozoic tectonic—magmatic evolution process in the Yishu fault zone and adjacent regions, Shandong Province; Implication for gold mineralization. Wuhan; Ph. D. Dissertation of China University of Geosciences: 1~106.
- Slama J, Košler J, Condon D J, Crowley J L, Gerdes A, Hancher J M, Horstwood M S A, Morris G A, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N, Whitehouse M J. 2008. Plešovice zircon—a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1~2): 1~35.
- Sun Si, Li YongGang, Zhang XiaoYun, Liu Hongju. 2010#. Boiling fluid inclusions of high temperature and high salinity in the quartz grains in altered porphyry from the Au—Cu-bearing cryptexplosion breccia pipe at Qibaoshan, Shandong Province and their significance. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3319~3326.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. *Geological Society of London*, 42: 313~345.
- Sun Yuqin, Wang Xin, Zhang Yan, Li Dapeng, Shan Wei, Geng Ke, Wei Pengfei, Liu Qqiang, Xie Wei, Chi Naojie. 2023. Cu—S isotopes of the main sulfides and indicative significance in the Qibaoshan Cu—Au polymetallic ore district, Wulian County, Shandong Province, North China Craton. *Minerals*, 13, 723.
- Tang Mingying, Chen Jian, Zou Zhanchun, Sun Lisha, He Zongwei, Li Shuangfei, Ding Wenjie. 2023#. Characteristics of shortwave infrared spectrum and significance of exploration instructions of gold polymetallic deposit in Gaojiazhaikou area in the southern margin of Jiaolai Basin. *Shandong Land and Resources*, 39(5): 17~26.
- Tian Jingxiang, Li Hongkui, Liu Handong, Li Xiuzhang, Zhu Decheng, Hu Wei. 2007#. Geological characteristics and genesis of Qibaoshan lead deposit in Jiaonan City, Shandong Province. *Strengthening Geological Work to Promote the Harmonious Development of Social Economy —Proceedings of the 2007 East China Six Provinces and one City Geoscience Science and Technology Forum*; 264~268.
- Tian Naifeng, Zhang Fan, Gao Zongjun, Yuan Jie. 2011#. Geological characteristics and prospecting direction of Qibaoshan copper and polymetallic mineralization in Wulian County of Shandong Province. *Shandong Land and Resources*, 27(04): 8~11.
- Wang Shijian, Xiang Zhenqun, Zhang Chengji, Lu Songnian, Song Zhiyong, Yang Enxiu. 2012#. Characteristics and formation era of metamorphic strata of Wulian Group in Wulian area in the north margin of Sulu Orogenic Belt—Zircon MC-ICPMS U-Pb dating evidence. *Shandong Land and Resources*, 28(10): 7~12.
- Wang Xiang. 2022#. Huangshan movement in SE China and its granitic magmatism and mineralization. *Geological Review*, 68(5): 1677~1728.
- Wang Yu. 1991#. Geological characteristics and origin of Qibaoshan gold deposit in Shandong Province. *Geological Review*, 37(4): 329~337.
- Wang Yong, Fan Hongrui, Hu Fangfang, and Lan Tingguang. 2008#. Ore-forming fluids and metallogenesis of the Qibaoshan Cu—Au deposit in the Wulian County, Shandong Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(09): 2029~2036.
- Wang Yong. 2010#. Late Mesozoic magmatism and gold—copper mineralization in the southwestern part of Shandong province. Beijing; Ph. D. Dissertation of Graduate University of the Chinese Academy of Sciences; 28~31.
- Wei Xifeng, Shi Zhanhua, Xie Yingfang, Sun Ruigang. 2008#. Geological characteristics of Shangjiazhuang Mo deposit in Qixia City, Shandong Province. *Gansu Science and Technology*, 24(21): 88~91.
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, Griffin W L, Meier M, Oberli F, von Quadt A, Roddick J C, Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U—Th—Pb, Lu—Hf, trace element and REE analyses. *Geostandard Newslett*, 19, 1~23.
- Wu Fuyuan, Yang Yueheng, Xie Liexie, Yang Jinhui, Xu Ping. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234: 105~126.
- Xu Nan, Wu Cailai, Zhao Miaomiao, Liu Chang. 2023#. Petrogenesis of Mangya diorites and its implication to tectonic evolution. *Geological Review*, 69(6): 2085~2111.
- Xu Xingwang, Cai Xinfeng, Qin Dajun, Wang Jie, Liang Guanghe, Zhang Baolin, Gao Haozhong, Zhang Xiaoyun, Liu Lijin, Xue Shiqiang, Liu Chengshen, Zhou Linke. 2000#. Fluid double cracking mechanism and Au—Cu mineralization of the breccia pipe in Qibaoshan, Shandong Province. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 30(1): 47~52.
- Xu WenGang, Fan HongRui, Hu FangFang, Wang Yong, Yang KuiFeng. 2015#. Fluid inclusions of the Qibaoshan Cu—Au deposit, Shandong Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(4): 1015~1030.
- Xue Huaimin, Liu Fulai, Meng Fancong. 2006#. Petrogenesis of Neoproterozoic Granitoids from the Wulian Region in the Sulu Orogen: Sr—Nd Isotopic Constraints. *Earth Science*, 31(4): 497~504.
- Yang Jinzhong, Zhao Yuling, Shen Yuanchao, Liu Tiebing. 2001#. Discovery of a stratr-bound deposit: Geology and Metallogenic Type of the Songjiagou Gold Deposit. *Geology and Prospecting*, 37(4): 1~4.
- Yang Wencai. 2023#. Origin of the Mid—Lower- Yangtze tectonic belt and Yanshanian ocean subduction. *Geological Review*, 69(5): 1619~1627.
- Yang Wencai. 2022#. The ocean—continent transition process on formation of Zhejiang—Fujian volcanic rock belt. *Geological Review*, 68(2): 375~384.
- Yu Guangyuan. 2020#. Metallogenesis and Metallogenic Prognosis of gold—copper polymetallic deposits in Qibaoshan orefield, Wulian County, Shandong Province. Changchun; Ph. D. Dissertation of Jilin University; 69~98.
- Zhao Baoju, Gao Mingbo, Li Yadong, Fu Houqi, Li Dadou, Feng Qiwei, Zhang Ding, Zheng Dechao, MA Ming, Wang Ligang. 2019#. Study on metallogenic regularity of gold deposits in Longkou—Tudui mining area on the northeastern margin of Jiaolai basin. *Acta Geologica Sinica*, 93(s1): 1~11.
- Zhang Lianying, Li Zhaolong, Cheng Minqing. 1996#. Geochemical characteristic and genesis of volcanic-type gold deposit in Yishu rift system. *Gold Geology*, 2(1): 46~53.
- Zhang Miao, Wang Keyong, Zhao Liguang, Yin Guitan, Wang Chengyang, Yu Qi. 2015#. Characteristics of trace elements of pyrite in Qibaoshan Au—Cu polymetallic deposit and its geological significance. *World Geology*, 34(3): 653~663.
- Zhang Qi, Yuan Jie. 2024#. The crisis and opportunity of geochemical

research. *Geological Review*, 70(5):1907~1926.

Zhang Weixin, Li Taibing, Liu Jinyou, Ding Xianhua, Zhao Mingchuan, Xu Xiaolin. 2017. Primary study on ore controlling structures characteristics and dynamics of Xilaokou gold deposit in Shandong Province. *Shandong Land and Resources*, 33(10):19~24.

Zhang Yueqiao, Li Jinliang, Zhang Tian, Dong Shuwen, Yuan Jiayin. 2008. Cretaceous to Paleocene tectono—sedimentary evolution of the Jiaolai basin and in the contiguous areas of Shandong peninsular (North China) and geodynamic implications. *Acta Geologica Sinica*, 82(9):1229~1257.

Zhang Zengqi, Zhang Chengji, Wang Shijin, Liu Shucui, Wang Laiming, Du Shengxian, Chen Cheng. 2014. Views on classification and contrast of tectonic units in strata in Shandong Province. *Shandong Land and Resources*, 30(3):1~23.

Zhou Xiaoping, Hu Bingqian, Zhou Mingling, Kang Kai, Hu Liang, Jiang Fan, Zhang Na. 2022. Geological characteristics, zircon U-Pb age and its records for tectonomagmatic events of lamprophyres in Xilaokou gold deposit, northeast margin of Jiaolai Basin. *Geological Bulletin of China*, 41(9):1634~1647.

Geochronology, geochemistry and geological significance of granite porphyry in Qibaoshan area, Wulian County, southern margin of Jiaolai Basin

WANG Xin^{1,2)}, ZHAN Honglei¹⁾, TANG Mingying^{1,2,3)}, SUN Lisha^{1,2)}, ZHANG Lei¹⁾, ZHU Haibo¹⁾, HUA Lei^{1,2)}, ZHU Wei¹⁾, CHEN Jian¹⁾, LI Shuangfei¹⁾

1) No. 8 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Key Laboratory of Nonferrous Metal Ore Exploration and Resource Evaluation of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Rizhao Shandong, 276800;

2) Rizhao Big Data Research Institute of Geology and Geographic Information, Rizhao Shandong, 276800;

3) Ministry of Natural Resources Technology Innovation Center for Deep Gold Resources Exploration and Mining, No. 6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Weihai Shandong, 264200

Abstract: The Jiaolai Basin is an important Au—Cu polymetallic metallogenic belt in eastern Shandong Province. The Qibaoshan subvolcanic complex in Wulian is a complex rock mass developed in the southern margin of Jiaolai Basin, which is most closely related to the metallogenesis of Au—Cu polymetals. With the development of prospecting work in the outer and deep parts of the complex, the granite porphyry has been discovered in the deep part of the complex. On the basis of lithographic observation and zircon U-Pb dating of granite porphyry, this paper attempts to clarify the genetic type, provenance characteristics and tectonic environment of this rock mass through whole rock geochemistry and zircon Hf isotope analysis. Zircon U-Pb dating results show that the granite porphyry was formed in 120.0 ± 0.3 Ma and 120.5 ± 0.3 Ma, which is early Cretaceous. The granite porphyry as a whole is characterized by high Si, Al, Na, and low Fe, Mg. It is a weak peraluminous rock with high potassium calcium alkalinity, relatively enriched in light rare earth elements and large ion lithophile elements, and deficient in heavy rare earth elements and high field strength elements, with obvious Ta, Nb, Sr and Eu negative anomalies, belonging to type I granite. The Hf isotopic composition of the zircon is obviously negative, and the mean age of the two-stage model is 2891 Ma, indicating that the magma originates from the Mesoarchaean ancient shell source material. Tectonic environment discrimination shows that the granite porphyry was formed in the post-orogenic tectonic environment after the plate subduction briefly extended, belongs to post-collision granite, and is basically consistent with the subduction of the Pacific plate to Eurasia and the magmatism related to mineralization in the region.

Keywords: zircon U-Pb dating; Hf isotope; Petrogeochemistry; Granite porphyry; Qibaoshan area; Southern margin of Jiaolai Basin

Acknowledgements: This paper is the results of the National Key R&D Program of China (No. 2023YFC2906900), Key R&D Program of Shandong (No. 2023CXGC011001), Taishan Scholars Program (No. tstp20240847) and the General Engineering fund project of No. 8 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources (No. DZG202403).

First author: WANG Xin, male, born in 1987, senior engineer, is mainly engaged in mineral deposit exploration and prospecting research; Email: wangxinchn@163.com.

Corresponding author: TANG Mingying, male, born in 1990, senior engineer, is mainly engaged in mineral deposit exploration and prospecting research; Email: 353635085@qq.com.

Manuscript received on: 2024-09-06; Accepted on: 2024-12-14; Published online on: 2025-01-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.01.025

Edited by: ZHANG Yuxu

