

· 专题研究 ·

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2025.3094

胶东栖霞闪长玢岩脉中花岗岩捕虏体地球化学、 锆石 U-Pb 年龄、Lu-Hf 同位素研究及地质意义

于晓卫¹,任天龙¹,程蓉蓉²,王来明¹,刘汉栋¹,张学松¹,何铁良³,王英鹏¹,
杨仕鹏¹,单伟⁴

(1. 山东省地质调查院, 山东 济南 250014; 2. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东 烟台 264000; 3. 中国电建市政建设集团有限公司, 天津 300384; 4. 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 济南 250013)

摘要: 胶东地区晚侏罗世玲珑期花岗岩主要出露于招远、莱州、文登、乳山等地区, 主要包括玲珑岩体和鹊山-昆嵛山岩体, 而两者之间的栖霞地区主要出露太古宙 TTG 类岩石。本次在栖霞地区上曲家村闪长玢岩脉(围岩为 TTG 类岩石)中发现较多中粒二长花岗岩捕虏体, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 161.0 ± 2.2 Ma, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.281929 \sim 0.281971$, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-26.39 \sim -24.77$, 亏损地幔二阶段模式年龄 $t_{\text{DM}2}$ 为 $2.871 \sim 2.773$ Ma, 岩石地球化学特征显示, 二长花岗岩捕虏体具有富钾、高铝、贫镁和铁的特征, 为过铝质高钾钙碱性岩石, 亏损重稀土元素, 轻重稀土元素分馏明显, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值变化在 $28.11 \sim 78.50$ 之间, 有明显的 Eu 正异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.16 \sim 1.77$), 大离子亲石元素 Rb、K、Ba、Sr 相对富集。其同位素年代学、岩相学、岩石地球化学特征与玲珑岩体、鹊山-昆嵛山岩体基本一致, 是在古太平洋板块的运动背景下, 扬子板块与华北板块陆陆碰撞加厚的地壳部分熔融的结果, 物源区以 TTG 类岩石为主, 本文认为这些二长花岗岩捕虏体归属为玲珑期花岗岩。结合区域重力异常解译, 认为栖霞地区 TTG 类岩石下部有隐伏的玲珑期花岗岩体, 推测范围西起陡崖断裂, 东至桃村断裂, 南至胶莱盆地北缘, 北至臧家庄盆地南缘, 玲珑岩体和鹊山-昆嵛山岩体在深部可能是连通的。

关键词: 花岗岩捕虏体; 岩石地球化学; U-Pb 同位素测年; Lu-Hf 同位素; 胶东栖霞

中图分类号: P581.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)01-0001-23

Geological significance of granite xenoliths in Qixia diorite porphyrite vein, Jiaodong: Geochemical characteristics, zircon U-Pb age and Lu-Hf isotope constraints

YU Xiao-wei¹, REN Tian-long¹, CHENG Rong-rong², WANG Lai-ming¹, LIU Han-dong¹, ZHANG Xue-song¹,
HE Tie-liang³, WANG Ying-peng¹, YANG Shi-peng¹ and SHAN Wei⁴

(1. Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250014, China; 2. Shandong Third Geological and Mineral Exploration Institute, Yantai 264000, China; 3. STECOL Corporation, Tianjin 300384, China; 4. Ministry of Natural Resources Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization, Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, China)

Abstract: Late Jurassic granite in Jiaodong area is mainly exposed in Zhaoyuan, Laizhou, Wendeng, Rushan and

收稿日期: 2023-07-07; 接受日期: 2024-04-18; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 山东省地勘基金项目[鲁勘字(2018)19号, (2023)3号]

作者简介: 于晓卫(1982-), 男, 汉族, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查工作, E-mail: 412102439@qq.com; 通讯作者: 任天龙(1980-), 男, 汉族, 学士, 正高级工程师, 主要从事区域地质调查工作, E-mail: 673028639@qq.com。

网络首发时间: 2024-07-22; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240722.1022.002.html>

other areas, including Linglong pluton and Queshan-Kunyushan pluton. In between, the Qixia region is dominated by Archean TTG-type rocks. This time, many meso-grained monzogranite xenoliths were found in the diorite porphyrite veins (surrounding rock is TTG type rock) in Shangqujia village, Qixia area, the SHRIMP U-Pb age of zircon from monzonitic granite is 161.0 ± 2.2 Ma. The ratio of $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ranged from 0.281 929 to 0.281 971, the $\varepsilon\text{Hf}(t)$ was -26.39 to -24.77 , t_{DM2} was 2 871 to 2 773 Ma. The monzogranite xenoliths are characterized by high potassium, high aluminum, low magnesium and iron. They are peraluminous, high potassium calc-alkaline rocks, which are deficient in heavy rare earth elements and have obvious fractionation of light and heavy rare earth elements. The ratio of $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ varies from 28.11 to 78.50, there are obvious Eu positive anomalies ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.16 \sim 1.77$), and the large ion lithophilic elements Rb, K, Ba and Sr are relatively enriched. Its isotopic geochronology, petrology, and rock geochemical characteristics are basically consistent with those of the Linglong pluton and the Queshan-Kunyushan pluton. It is the result of partial melting of the crust thickened by the collision between the Yangtze plate and the North China plate under the background of the movement of the ancient Pacific plate. The source area is mainly composed of TTG type rocks. This article believes that these diorite xenoliths belong to the Linglong period granite. Based on the interpretation of regional gravity anomalies, it is believed that there is a hidden Linglong period granite body in the lower part of TTG rocks in the Qixia area. It is speculated that the range extends from the Douya fault in the west to the Taocun fault in the east, to the northern edge of the Jiaolai Basin in the south, and to the southern edge of the Zangjiazhuang Basin in the north. The Linglong pluton and the Queshan-Kunyushan pluton may be connected in the deep part.

Key words: granite xenoliths; rock geochemistry; U-Pb isotope dating; Lu-Hf isotope; Qixia of Jiaodong

Fund support: Geological Exploration Fund Project of Shandong Province[Lukanzi (2018) No. 19, (2023) No. 3]

胶东地区中生代花岗岩广泛发育,主要由晚侏罗世玲珑期花岗岩和早白垩世郭家岭期花岗岩、伟德山期花岗岩、崂山期花岗岩组成(王来明等, 2021; 于晓卫等, 2023)。前人对中生代花岗岩做了大量研究工作,主要有构造背景、岩浆演化、形成时代、与金矿成矿关系等方面。构造背景方面,胶东地区中生代经历了扬子板块与华北板块的陆陆碰撞、古太平洋板块的俯冲回撤等构造事件,动力机制从特提斯构造域向滨太平洋构造域转换,构造格局也从东西向到北东、北北东向转变(任纪舜等, 1999; 翟明国等, 2003; 赵越等, 2004)。构造岩浆演化方面,晚三叠世苏鲁造山带同折返岩浆活动事件、晚侏罗世加厚地壳的重熔岩浆活动事件、早白垩世构造体制转换及大规模的岩浆活动事件(陈衍景等, 2004; 郑永飞, 2008; 吴福元等, 2008; liu *et al.*, 2010)。形成时代方面,前人对中生代花岗岩成岩年龄做了大量测年工作,经过统计,玲珑期花岗岩成岩年龄集中在 166~146 Ma,郭家岭期花岗岩成岩年龄集中在 135~123 Ma,伟德山期花岗岩成岩年龄集中在 123~110 Ma,崂山期花岗岩成岩年龄集中在 118~108 Ma(苗来成等, 1997; 关康等, 1998; 罗镇宽等, 1999, 2002; Li *et al.*, 2012; Jiang *et al.*, 2012; Ma

et al., 2013; 丁正江等, 2013, 2015; 罗贤冬等, 2014; 陈广俊等, 2014; Tang *et al.*, 2014; 陈俊等, 2015; 李洪奎等, 2017; 李增达等, 2018; 宋英昕等, 2019; 王瑞良等, 2019)。与金矿成矿关系方面,先后提出混合岩化岩浆热液型金矿(朱奉三, 1980)及岩浆期后热液型金矿(吕古贤等, 2016)、克拉通破坏型金矿(Zhu *et al.*, 2015)、胶东型金矿(杨立强等, 2014; Song *et al.*, 2015)等认识。

胶东地区玲珑期花岗岩出露面积较大,出露总面积达 5 000 km²,形成两个复式岩基玲珑岩体和鹊山-昆崮山岩体。玲珑岩体呈北东向展布于招远、平度、莱州、牟平一带,是招平成矿带的主要赋矿围岩; 鹊山-昆崮山岩体呈近东西向展布于乳山、文登一带,是牟乳成矿带赋矿围岩。两者之间的地表出露太古宙 TTG 类岩石(刘建辉等, 2011; 朱凤丽等, 2012; 谢士稳等, 2022),栖霞地区岩石主要由太古宙 TTG 质片麻岩及表壳岩类组成,内发育众多的石英脉型中小型金矿和矿(化)点。笔者在栖霞市区东 7 km 的上曲家村闪长玢岩脉中发现中粒二长花岗岩捕虏体,通过对二长花岗岩捕虏体、玲珑岩体、鹊山-昆崮山岩体的岩石学特征、锆石 U-Pb 测年、地球化学和锆石 Lu-Hf 同位素进行对比研究,结合区域地球物

理资料,厘定其形成时代和岩石成因,探讨其成岩物质来源,进一步为揭示栖霞地区中新太古代变质岩下部是否存在隐伏玲珑期花岗岩体提供证据。

1 地质背景

胶东地区地层属华北地层区-鲁东地层分区-胶北地层小区,出露有中太古代唐家庄岩群,新太古代胶东岩群郭格庄岩组、苗家岩组,古元古代荆山群与粉子山群,新元古代蓬莱群。中生界主要出露于中部臧家庄盆地和南东部胶莱盆地内,自下而上划分为莱阳群、青山群和王氏群,新生界新近系主要出露临朐群尧山组。中太古代以来,经过漫长的地质构造演化,胶东地区演化为中深层次近东西向韧性变形构造被浅表层次北东向脆性断裂构造交切的构造格局,其构造形迹表现形式为褶皱、韧性剪切变形带和脆性断裂构造(Yu *et al.*, 2018)。该区侵入岩分布广泛,总体呈近东西或北东向展布的岩基、岩株、岩墙状产出,岩石类型多样,从超基性到酸性岩均有分布,中酸性-酸性侵入岩规模大、分布广。侵入岩成因上既有 I 型,又有 A 型,亦有 S 型(Defant and Drummond, 1990) 以及埃达克岩(Martin *et al.*, 2005); 岩浆物质来源上,有壳源、幔源以及壳幔岩浆混合源等。主要出露有中新太古代 TTG 岩、晚三叠世石英正长岩($T_3\epsilon o$)-正长岩($T_3\epsilon$)、晚侏罗世玲珑期二长花岗岩($J_3\eta\gamma$)-花岗闪长岩($J_3\gamma\delta$)、早白垩世郭家岭期斑状二长花岗岩($K_1\eta\gamma$)-花岗闪长岩($K_1\gamma\delta$)(于晓卫等, 2021)、伟德山期斑状二长花岗岩($K_1\eta\gamma$)-花岗闪长岩($K_1\gamma\delta$)(任天龙等, 2021)、崂山期二长花岗岩($K_1\eta\gamma$)-正长花岗岩($K_1\epsilon\gamma$)(陶有兵等, 2021)以及超基性-酸性脉岩等。根据胶东地区主要侵入岩的展布特征,岩体侵位明显受构造环境控制。其中,中新太古代、古元古代侵入岩受近东西向基底构造控制,新元古代侵入岩受北东向韧性变形带控制,中生代燕山期侵入岩受北东东向断裂构造控制(图 1)。

2 栖霞上曲家地区地质特征

栖霞地区十八盘-唐家泊一带主要出露新太古代的 TTG 片麻岩,万渝生等(2017)在该地区开展了 1:5 万地质图修测工作,详细的划分了 2.5、2.7、2.9 Ga 的 3 期英云闪长质片麻岩。该地区不仅经历

了新太古代晚期和古元古代晚期强烈的构造热事件,中生代的岩浆事件也有明显的构造响应,在 TTG 岩体中穿插着不同期中生代中基性脉岩。在上曲家村南,通过野外调查,发现在 TTG 岩体中发育一条宽约 5~10 m 的闪长玢岩脉(图 2),走向 NE,产状 $331^\circ \angle 56^\circ$,脉体侵入界面平直,接触带呈分支状,边部明显细粒化,具有冷凝边。脉岩中含有中粒二长花岗岩捕虏体,多呈不规则状产出,大者达 30~40 cm,小者仅几厘米,局部集中(图 3a、3b),边部具有烘烤边。

3 岩相学特征

本次分别在栖霞市上曲家村南($120^\circ 54' 04''$, $37^\circ 17' 08''$)采集闪长玢岩脉样品 JD40-1 和中粒二长花岗岩捕虏体样品(JD40-2, SQJ-3, SQJ-4, SQJ-5),在玲珑岩体北部采集中粒二长花岗岩样品 PM003-12、13($120^\circ 10' 18''$, $37^\circ 24' 05''$)和 JD47($120^\circ 32' 22''$, $37^\circ 33' 39''$),在昆崂山岩体采集中粒二长花岗岩样品 DG-3($121^\circ 36' 21''$, $37^\circ 11' 08''$)、JD69($121^\circ 42' 13''$, $37^\circ 04' 51''$)和 JD103($121^\circ 51' 31''$, $37^\circ 13' 13''$)。所有样品均较为新鲜,无明显蚀变。对采集的样品开展岩相学研究,分别详述如下:

(1) 闪长玢岩: 呈斑状结构,斑晶粒径 1~3 mm,主要矿物为斜长石(10%±)、角闪石(15%±); 基质粒径一般为 0.05~0.6 mm,主要由斜长石(45%±)、石英(2%±)、角闪石(25%±)、方解石(2%±)及不透明矿物(1%±)等组成。其中斜长石呈板柱状,可见聚片双晶,有的发生绢云母化、黏土化、帘石化等; 石英呈不规则粒状,多呈他形充填分布; 角闪石呈浅黄绿色,柱状,部分发生绿泥石化、帘石化等(图 3c、3g)。

(2) 中粒二长花岗岩捕虏体: 呈中粒花岗结构,矿物粒径在 1~5 mm,主要矿物为斜长石(25%±)、钾长石(40%±)、石英(30%±)、黑云母(约 3%)、磷灰石(约 1%)及不透明矿物(约 1%),岩石中矿物裂纹较多,可见少量碎基化长英质物质沿岩石裂隙及矿物间隙分布,呈碎裂化结构。其中斜长石呈板柱状,可见聚片双晶,有的发生绢云母化、黏土化; 石英为不规则粒状,多呈他形充填于长石之间; 钾长石呈半自形粒状晶,可见条纹结构,有的发生黏土化,有的其中可见斜长石包体; 黑云母为棕灰色,片状,多发生绿泥石化和帘石化; 磷灰石呈半自形晶,零散分

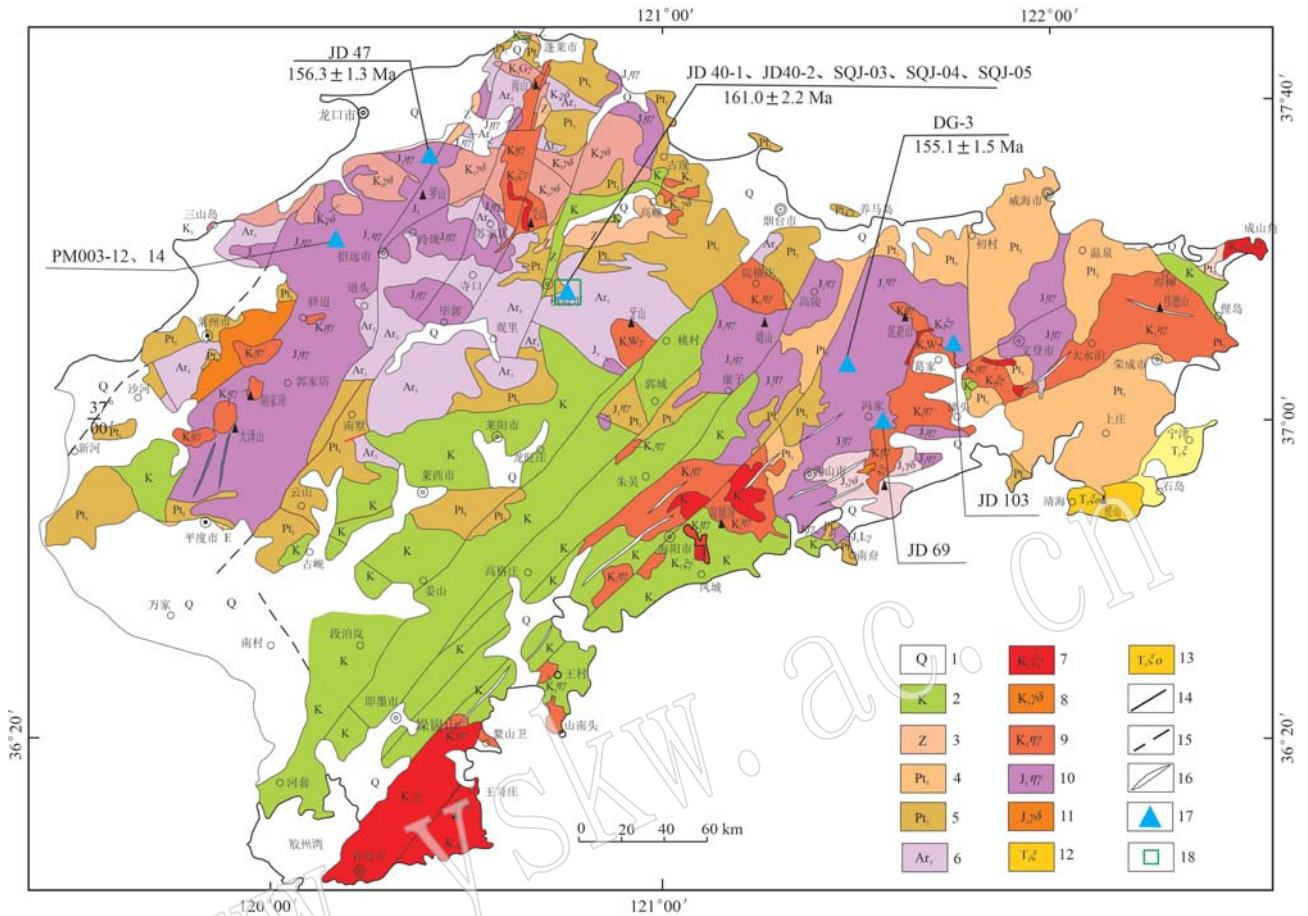


图1 胶东地区区域地质图(王来明等, 2021)

Fig. 1 Regional geological map of Jiaodong area (Wang Laiming *et al.*, 2021)

1—第四系; 2—白垩系; 3—震旦系; 4—新元古界; 5—古元古界; 6—新太古界; 7—早白垩世正长花岗岩; 8—早白垩世花岗闪长岩; 9—早白垩世二长花岗岩; 10—晚侏罗世二长花岗岩; 11—晚侏罗世花岗闪长岩; 12—晚三叠世正长岩; 13—晚三叠世石英正长岩; 14—断裂; 15—推测断裂; 16—脉岩; 17—样品采集位置; 18—图2范围

1—Quaternary; 2—Cretaceous; 3—Sinian; 4—Neoproterozoic; 5—Paleoproterozoic; 6—Neoproterozoic; 7—Early Cretaceous syenogranite; 8—Early Cretaceous granodiorite; 9—Early Cretaceous monzogranite; 10—Late Jurassic monzogranite; 11—Late Jurassic granodiorite; 12—Late Triassic syenite; 13—Late Triassic quartz syenite; 14—fault; 15—inferred fault; 16—vein rock; 17—sample location; 18—scope of Fig. 2

布(图3d,3h)。

(3) 玲珑岩体二长花岗岩:呈中粒花岗结构,主要矿物粒径一般为1.0~4.0 mm,岩石主要由斜长石(35%±)、钾长石(30%±)、石英(30%±)、黑云母(3%±)、磷灰石(1%)、不透明矿物(1%)等组成,斜长石呈板柱状,可见聚片双晶,有的其中可见石英包体;石英呈不规则粒状,可见波状消光,多呈他形或呈不规则集合体状分布;钾长石呈半自形粒状晶,可见条纹结构,有的其中可见斜长石包体;黑云母呈棕色,片状。磷灰石呈半自形晶,零星分布;不透明矿物呈黑色,不规则粒状,零星分布(图3e,3i)。

(4) 昆嵛山岩体二长花岗岩:呈中粒花岗结构,主要矿物粒径一般为1.0~5.0 mm,岩石主要由斜长石(35%±)、钾长石(35%±)、石英(22%±)、黑云母(5%±)、磷灰石(1%±)、榍石(1%±)、不透明矿物(1%±)等组成。其中斜长石呈板柱状,可见聚片双晶;石英呈不规则粒状,多呈他形充填于长石之间;钾长石呈不规则粒状,可见条纹结构,有的其中可见斜长石、石英包体;黑云母呈棕色,片状,有的发生绿泥石化;榍石呈半自形粒状晶,零星分布;磷灰石呈半自形晶,零星分布;不透明矿物呈黑色,不规则粒状,零星分布(图3f,3j)。

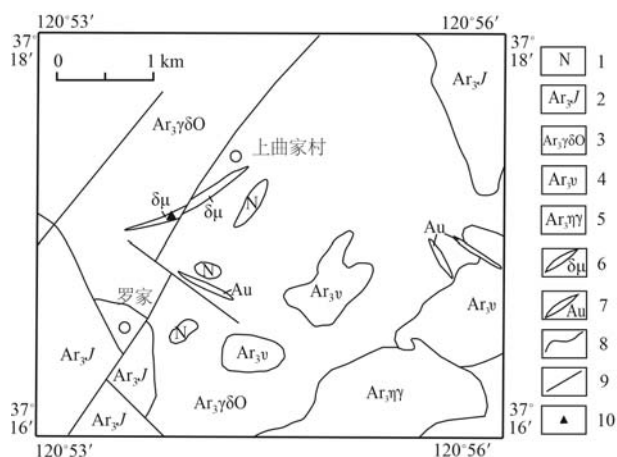


图 2 栖霞上曲家地区地质简图

Fig. 2 Sketch geological map of Shangqujia area, Qixia

- 1—新近系; 2—新太古代胶东群; 3—新太古代英云闪长质片麻岩; 4—新太古代斜长角闪岩; 5—新太古代二长花岗岩; 6—闪长玢岩脉; 7—金矿脉; 8—地质界线; 9—断层; 10—采样位置
1—Neogene; 2—Neoproterozoic Jiaodong Group; 3—Neoproterozoic tonalite gneiss; 4—Neoproterozoic amphibolite; 5—Neoproterozoic monzogranite; 6—diorite porphyrite vein; 7—gold vein; 8—geological boundary; 9—fault; 10—sampling location

4 分析方法

岩石主量和微量元素分析测试在自然资源部济南矿产资源监督检测中心完成, 分别使用 X 荧光光谱仪 (XRF) 和电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 完成, 分析精度小于 3%, 温度 20°C, 湿度 30%, 测试过程中使用国际标准进行监控, 与国际标准物质标准值的相对误差 (RE) 和相对标准偏差 (RSD) 在误差范围内, 分析测试过程详见文献 (张保科等, 2011; 高志军等, 2015)。

锆石单矿物挑选在河北省区域地质调查研究所实验室完成, 矿物分离和挑选过程详见文献 (牛玉勤等, 1990, 1993)。锆石制靶、透射光、反射光以及阴极发光 (CL) 显微拍照均在中国地质科学院地质研究所完成。在对锆石图像详细研究后, 选择锆石中无裂隙、无包裹体、环带清晰的区域作为测试点。

样品 JD40-2、JD47、DG-3 锆石 SHRIMP U-Pb 定年在国家科技基础条件平台北京离子探针中心 (中国地质科学院地质研究所) 完成, 测试仪器型号为 SHRIMP II。测定时仪器质量分辨率约为 5 000 (1% 峰高), 一次离子流 O^{2-} 强度为 4 nA, 一次离子流束斑直径约为 25 μm , 分析前样品点清洗时间为 150 s,

每个数据点测定由 5~7 次扫描构成, 测定质量峰为 $^{90}\text{Zr}^{16}\text{O}^+$ 、 $^{204}\text{Pb}^+$ 、背景值、 $^{206}\text{Pb}^+$ 、 $^{207}\text{Pb}^+$ 、 $^{208}\text{Pb}^+$ 、 $^{238}\text{U}^+$ 、 $^{232}\text{Th}^{16}\text{O}^+$ 和 $^{238}\text{U}^{16}\text{O}^+$ 。标准为 SL13 ($U = 238 \times 10^{-6}$) 和 TEM (年龄为 417 Ma) 分别用于样品 U 含量标定和年龄校正, 待测样和 TEM 标样之比为 3:1, 数据处理采用 SQUID 和 ISOPLOT 程序。定年分析原理和流程见文献 (Ludwig, 2001; Black *et al.*, 2003; 宋彪, 2015)。

样品 JD40-1 锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年在山东省地质科学研究院岩石矿物研究所完成, 测试仪器为激光剥蚀多接收电感耦合等离子体质谱 (LA-MC-ICP-MS)。本次分析的激光束斑、剥蚀频率和能量密度分别为 24 μm 、2 Hz 和 2 J/cm^2 。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移, 利用锆石标准 91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正, 每分析 6 个样品点间插 2 个 91500。对分析数据的离线处理 (包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算) 采用软件 ICPMSDataCal 完成。锆石 GJ-1 作为未知样品监控分析结果的准确度, 测得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄为 604 ± 4 Ma ($n = 35$, 2SD), 在误差范围内与前人的报道值一致, 单点分析精度均在 1% (2σ) 以内。定年分析原理和流程见文献 (Hu *et al.*, 2012a)。

微区原位锆石 Hf 同位素测试在武汉上谱分析科技有限责任公司完成, 测试仪器为激光剥蚀多接收杯等离子体质谱 (LA-MC-ICP-MS)。测试点对应于锆石测年分析点, 分析过程同时配备了信号平滑装置以提高信号稳定性和同位素比值测试精密性 (侯可军等, 2009)。载气使用氦气, 并在剥蚀池之后引入少量氮气以提高 Hf 元素灵敏度, 分析采用 Neptune Plus 新设计高性能锥组合。激光输出能量可以调节, 实际输出能量密度约为 7.0 J/cm^2 , 采用单点剥蚀模式, 斑束固定为 44 μm 。详细仪器操作条件和分析方法可参考文献 (Hu *et al.*, 2012b)。

5 分析结果

5.1 锆石 U-Pb 年龄

JD40-1 样品锆石多呈浅灰色, 自形柱状, 一般较小, 残缺破损, 粒径 100~200 μm , 长宽比 1:1~3:1, 阴极发光照片显示 (图 4a), 个别发育有裂纹, 重结晶现象。绝大多数锆石具有振荡环带, 属于岩浆结



图3 闪长玢岩和二长花岗岩捕虏体野外、手标本及显微照片

Fig. 3 The field, hand specimens and micrographs of diorite porphyrite and monzogranite xenoliths

Q—石英; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Am—角闪石

Q—quartz; Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Am—Amphibole

晶期锆石。大多数锆石都具有核幔结构,反映其继承性生长的特点。采用 LA-ICP-MS U-Pb 法测点 26 个, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值分布在 2 879 Ma (6 个点)、2 680 Ma (2 个点)、2 535 Ma (6 个点)、163.95 Ma (7 个点)、143.2 Ma (6 个点)。2 879 Ma 年龄组 U 含量 $95 \times 10^{-6} \sim 112 \times 10^{-6}$, Th 含量 $86 \times 10^{-6} \sim 123 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.34 ~ 0.54, 变化不大, 对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄单点值 3 010 ~ 2 807 Ma, 加权平均值 $2\,879 \pm 25$ Ma (MSWD=1.9); 2 680 Ma 年龄组 U 含量 $114 \times 10^{-6} \sim 118 \times 10^{-6}$, Th 含量 $94 \times 10^{-6} \sim 121 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.25 ~ 0.37, 变化不大, 对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄单点值 2 686 ~ 2 606 Ma, 加权平均值 $2\,680 \pm 13$ Ma (MSWD=2.3); 2 535 Ma 年龄组 U 含量 $115 \times 10^{-6} \sim 154 \times 10^{-6}$, Th 含量 $11 \times 10^{-6} \sim 114 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.03 ~ 0.41, 对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄单点值 2 598 ~ 2 503 Ma, 加权平均值 $2\,535 \pm 19$ Ma (MSWD=2.8);

163.95 Ma 年龄组 U 含量 $376 \times 10^{-6} \sim 653 \times 10^{-6}$, Th 含量 $69 \times 10^{-6} \sim 406 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.08 ~ 0.43, 对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄单点值 165.7 ~ 159.5 Ma, 加权平均值 163.95 ± 1.6 Ma (MSWD=0.59); 143.2 Ma 年龄组 U 含量 $517 \times 10^{-6} \sim 631 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $27 \times 10^{-6} \sim 2\,561 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.09 ~ 0.22, 变化不大, 也反映这些锆石属岩浆成因, 对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄单点值 145 ~ 140.2 Ma, 加权平均值 143.2 ± 1.4 Ma (MSWD=0.0036)。其中 2 879、2 680、2 535 Ma 与万渝生等 (2017) 划分的 3 期 TTG 年龄一致, 代表了捕获围岩栖霞片麻岩的锆石年龄, 163.95 Ma 年龄组应为捕获玲珑期花岗岩的锆石年龄。综合判断该样品 143.2 ± 1.4 Ma 年龄值为闪长玢岩的成岩年龄 (表 1、图 5a)。

JD40-2 样品中的锆石多呈长柱状, 椭圆状, 粒度变化大, 大者长轴达 250 μm , 小者仅 100 μm , 长宽比



图 4 区内各类岩石中锆石 CL 图像
Fig. 4 The CL images of zircon in various rocks in the area

1 : 1.5~1:4。阴极发光照片显示(图 4b), 锆石多具有核幔结构, 核部岩浆生长环带发育, 边部发育变质

增生边, 个别锆石具重结晶现象, 可能指示了闪长质岩浆对先期锆石的改造。采用 SHRIMP U-Pb 法测点

表 1 闪长玢岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄
Table 1 LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb ages of diorite porphyrite

点号	$^{10}B/10^{-6}$		$^{232}Th/^{238}U$	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$		同位素比值		年龄/Ma				谐和度/%		
	Th	U		$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	$^{207}Pb^*/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb^*/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}Pb$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$		1σ	
JD40-1-2	94	95	0.42	0.22	17.693 6	0.068 9	0.595 0	0.002 1	2 947.2	2 973.2	4.3	3 009.7	8.6	98
JD40-1-3	34	143	0.10	0.17	11.279 4	0.037 7	0.495 7	0.001 6	2 509.3	2 546.5	3.6	2 595.3	6.8	97
JD40-1-4	69	653	0.04	0.05	0.177 9	0.001 0	0.025 9	0.000 1	183.4	166.2	0.8	164.9	0.4	99
JD40-1-5	11	154	0.03	0.17	11.073 8	0.034 4	0.481 8	0.001 2	2 524.4	2 529.4	3.4	2 535.1	5.3	97
JD40-1-6	138	595	0.10	0.05	0.189 2	0.001 7	0.026 0	0.000 1	320.4	175.9	1.5	165.5	0.5	98
JD40-1-7	95	101	0.41	0.21	16.520 6	0.090 5	0.568 1	0.002 8	2 912.0	2 907.4	5.6	2 900.1	11.7	98
JD40-1-8	127	631	0.09	0.05	0.150 4	0.000 9	0.022 3	0.000 1	150.1	142.3	0.8	141.9	0.3	99
JD40-1-9	253	505	0.22	0.05	0.176 7	0.000 8	0.026 0	0.000 1	166.8	165.2	0.7	165.7	0.3	99
JD40-1-10	256	517	0.22	0.05	0.155 0	0.001 0	0.022 7	0.000 1	168.6	146.3	0.9	145.0	0.4	98
JD40-1-11	124	620	0.08	0.05	0.174 9	0.001 7	0.025 5	0.000 1	183.4	163.7	1.5	162.4	0.7	99
JD40-1-12	121	114	0.37	0.19	12.907 0	0.083 1	0.498 2	0.002 9	2 723.2	2 672.9	6.3	2 606.2	12.6	99
JD40-1-13	209	560	0.16	0.05	0.150 7	0.000 8	0.022 5	0.000 1	124.2	142.5	0.7	143.6	0.4	93
JD40-1-14	89	112	0.34	0.21	15.728 1	0.050 5	0.545 6	0.001 4	2 897.8	2 860.4	3.6	2 806.9	6.2	99
JD40-1-15	86	105	0.36	0.21	16.688 5	0.081 5	0.588 0	0.002 6	2 871.9	2 917.1	5.1	2 981.4	10.7	99
JD40-1-16	114	115	0.41	0.17	11.329 2	0.047 6	0.496 5	0.002 0	2 512.0	2 550.6	4.3	2 598.9	8.7	99
JD40-1-17	94	118	0.25	0.19	13.303 1	0.090 5	0.517 0	0.003 2	2 722.2	2 701.4	6.7	2 686.4	13.5	99
JD40-1-18	107	132	0.34	0.18	10.827 2	0.051 0	0.436 8	0.001 9	2 650.3	2 508.4	4.7	2 336.3	8.6	99
JD40-1-19	138	626	0.09	0.05	0.146 8	0.000 9	0.022 0	0.000 1	120.5	139.1	0.8	140.2	0.4	97
JD40-1-20	66	141	0.21	0.16	10.746 7	0.064 0	0.480 9	0.002 7	2 476.2	2 501.5	5.8	2 531.3	11.8	99
JD40-1-21	406	376	0.43	0.05	0.175 1	0.004 4	0.025 9	0.000 2	146.4	163.9	3.8	164.9	1.1	98
JD40-1-22	256	511	0.23	0.05	0.168 0	0.000 9	0.025 1	0.000 1	127.9	157.6	0.8	159.5	0.4	97
JD40-1-24	123	99	0.54	0.21	16.342 9	0.065 2	0.562 0	0.002 0	2 922.2	2 897.1	4.3	2 874.8	8.4	99
JD40-1-25	99	130	0.32	0.17	11.461 5	0.111 8	0.474 5	0.003 3	2 605.6	2 561.4	9.3	2 503.3	14.4	92
JD40-1-26	158	595	0.11	0.05	0.153 9	0.001 2	0.022 4	0.000 1	187.1	145.4	1.1	142.7	0.4	99
JD40-1-27	141	623	0.10	0.05	0.150 2	0.000 9	0.022 0	0.000 1	168.6	142.1	0.8	140.5	0.4	98
JD40-1-28	99	103	0.41	0.21	16.647 2	0.062 1	0.567 7	0.001 8	2 925.6	2 914.7	4.1	2 898.3	7.7	99
JD40-1-29	243	507	0.20	0.05	0.175 4	0.001 3	0.025 9	0.000 2	153.8	164.1	1.1	164.9	1.0	98

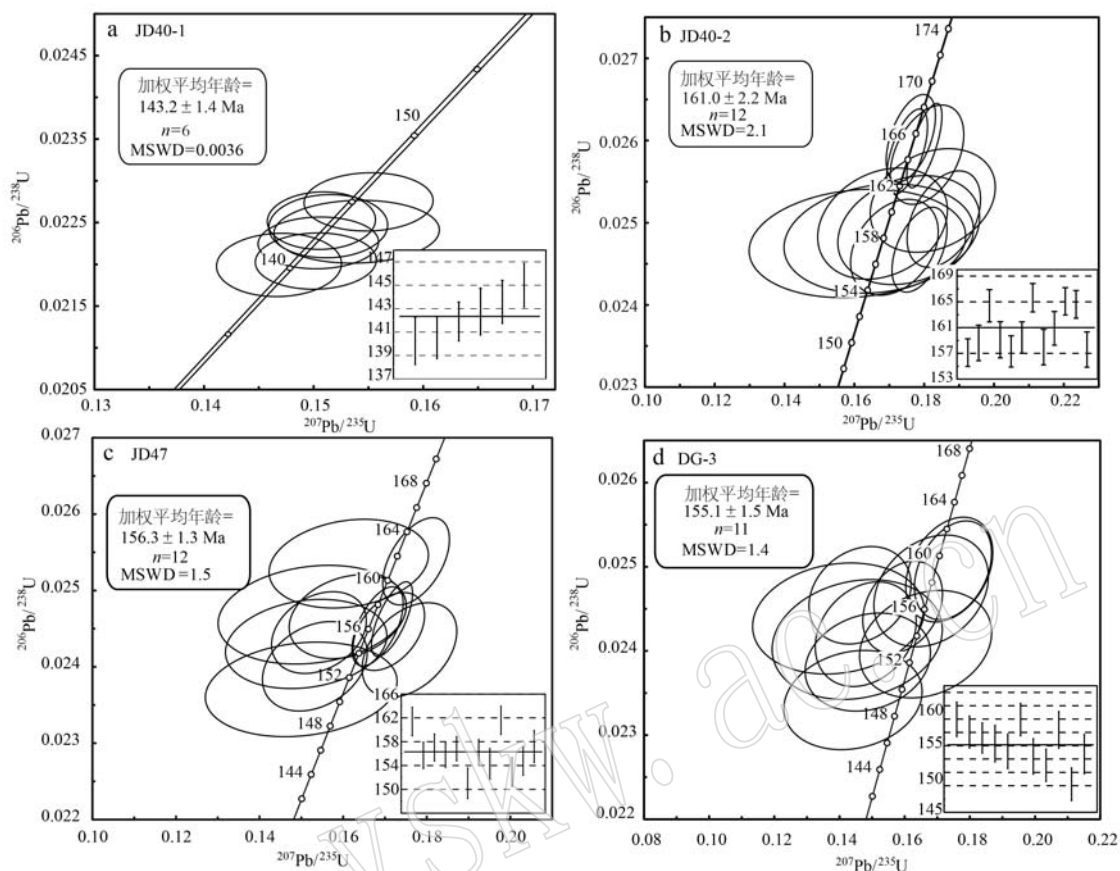


图 5 各类岩石锆石 U-Pb 谐和年龄图

Fig. 5 The zircon U-Pb concordant ages of various rocks

16 个, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值分布在 2 500~2 400 Ma (3 点), 165~157 Ma (12 点)。2 500~2 400 Ma 年龄组 U 含量 $124 \times 10^{-6} \sim 593 \times 10^{-6}$, Th 含量 $21 \times 10^{-6} \sim 199 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.25~0.37, 变化不大, 对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄单点值 2 638~2 389 Ma, 代表捕获围岩 TTG 锆石年龄; 165~157 Ma (12 点) 年龄组 U 含量 $(114 \sim 1 678) \times 10^{-6}$, Th 含量 $4 \times 10^{-6} \sim 378 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.02~0.68, 变化不大, 属岩浆成因锆石, 对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄单点值 165.6~157.1 Ma, 加权平均年龄为 161.0 ± 2.2 Ma (MSWD=2.1)。综合判断该样品 161.0 ± 2.2 Ma 年龄值为二长花岗岩捕虏体的成岩年龄 (表 2、图 5b)。

JD47、DG-3 样品中的锆石呈长柱状或宽板状, 粒径 150~300 μm , 长宽比 2:1~3:1, 自形。阴极发光照片显示 (图 4c、4d), 部分可见熔蚀凹坑, 边部有清晰的岩浆振荡环带, 为的岩浆锆石。JD47 样品 12 个测点取得了较为一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, U 含量为 $138 \times 10^{-6} \sim 1 477 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $44 \times 10^{-6} \sim 698 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.32~0.84, 具有岩浆成因的特征, 加权平均年龄值

为 156.3 ± 1.3 Ma (MSWD=1.5), 代表岩体结晶年龄 (图 5c)。DG-3 样品 11 个测点取得了较为一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, U 含量为 $105 \times 10^{-6} \sim 476 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $5 \times 10^{-6} \sim 115 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.02~0.66, 具有岩浆成因的特征, 加权平均年龄值为 155.1 ± 1.5 Ma (MSWD=1.4), 代表岩体结晶年龄 (图 5d)。

5.2 锆石 Lu-Hf 同位素

二长花岗岩捕虏体样品 JD40-2 锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 929~0.281 971 (表 3), 平均 0.281 946; $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 -26.39~-24.77, 平均 -25.74, 亏损地幔二阶段模式年龄 $t_{\text{DM}2}$ 为 2 871~2 773 Ma, 平均 2 831.5 Ma; 所有锆石测点的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值为 -0.99~-0.97。

玲珑岩体样品 JD47 锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 887~0.281 945 (表 3), 平均 0.281 921; $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 -27.99~-25.78, 平均 -26.74, 亏损地幔二阶段模式年龄 $t_{\text{DM}2}$ 为 2 967~2 833 Ma, 平均 2 891.17 Ma; 所有锆石测点的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值为 -0.98~-0.95。

表 2 二长花岗岩捕虏体、玲珑岩体和鹊山-昆嵛山岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄
Table 2 SHRIMP zircon U-Pb ages of monzogranite xenoliths, Linglong pluton and Queshan-Kunyushan pluton

点号	$^{206}\text{Pb}_c/\%$	$w_{\text{Pb}}/10^{-6}$	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素比值				年龄/Ma			
							$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	1σ	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	1σ	errcorr	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
二长花岗岩捕虏体														
JD40-2-1	-	622	52	13.20	0.09	0.0525	2.6	0.1786	2.9	0.02467	1.4	0.475	157.1±2.1	308±58
JD40-2-2	0.06	133	37	2.86	0.29	0.0511	7.4	0.1760	7.6	0.02491	1.8	0.230	158.6±2.8	246±170
JD40-2-3	-	222	4	4.93	0.02	0.0508	3.5	0.1808	3.8	0.02583	1.5	0.401	164.4±2.5	230±81
JD40-2-4	0.15	114	72	2.44	0.66	0.0488	7.1	0.1680	7.3	0.02499	1.8	0.244	159.1±2.8	137±170
JD40-2-5	0.56	214	16	4.57	0.08	0.0503	4.6	0.1715	4.8	0.02470	1.6	0.323	157.3±2.4	211±110
JD40-2-6	-	226	137	4.85	0.63	0.0538	3.4	0.1856	3.7	0.02504	1.5	0.413	159.5±2.4	361±77
JD40-2-7	-	124	199	54.00	1.65	0.1680	0.7	11.7100	1.6	0.50570	1.5	0.916	2638.0±33	2538±11
JD40-2-8	-	222	21	85.50	0.10	0.1587	0.9	9.8200	2.1	0.44870	1.9	0.908	2389.0±38	2442±15
JD40-2-9	0.02	825	190	18.50	0.24	0.0491	2.3	0.1762	2.6	0.02603	1.3	0.510	165.6±2.2	152±53
JD40-2-10	0.02	593	145	220.00	0.25	0.1665	0.6	9.8900	1.4	0.43060	1.3	0.925	2308.0±26	2523±92
JD40-2-11	0.86	144	82	3.10	0.59	0.0488	11.0	0.1670	11.0	0.02481	1.8	0.165	158.0±2.8	139±250
JD40-2-12	-	167	72	3.61	0.45	0.0524	6.3	0.1820	6.5	0.02527	1.6	0.254	160.9±2.6	301±140
JD40-2-13	-	1678	368	37.40	0.23	0.0503	1.3	0.1800	1.8	0.02594	1.3	0.709	165.1±2.1	211±30
JD40-2-15	0.08	1248	378	27.80	0.31	0.0491	1.8	0.1751	2.2	0.02586	1.3	0.598	164.6±2.2	152±42
JD40-2-16	0.51	165	109	3.53	0.68	0.0471	13.0	0.1610	13.0	0.02475	1.8	0.138	157.6±2.7	57±300
玲珑岩体														
JD47-1	0.46	338	119	7.40	0.36	0.0462	7.7	0.1610	7.8	0.02535	1.5	0.194	161.4±2.4	6±180
JD47-2	0.36	420	208	8.85	0.51	0.0457	4.6	0.1542	4.9	0.02445	1.4	0.298	155.7±2.2	-16±110
JD47-3	0.33	436	159	9.27	0.38	0.0474	5.5	0.1611	5.7	0.02466	1.5	0.256	157.0±2.3	68±130
JD47-4	0.05	651	200	13.70	0.32	0.0507	3.0	0.1709	3.3	0.02446	1.4	0.417	155.8±2.1	226±69
JD47-5	-	1477	698	31.20	0.49	0.0506	1.4	0.1717	1.9	0.02462	1.3	0.694	156.8±2.0	221±31
JD47-6	0.86	142	115	2.91	0.84	0.0459	9.9	0.1500	10.0	0.02370	1.7	0.171	151.0±2.6	-8±240
JD47-7	0.06	1154	392	24.30	0.35	0.0497	2.0	0.1682	2.4	0.02453	1.4	0.581	156.2±2.2	183±46
JD47-8	-	165	89	3.41	0.56	0.0527	3.9	0.1759	4.3	0.02422	1.7	0.397	154.3±2.6	314±89
JD47-9	-	461	249	10.00	0.56	0.0507	2.6	0.1775	3.0	0.02538	1.5	0.500	161.6±2.4	227±59
JD47-10	0.39	161	68	3.34	0.43	0.0463	5.2	0.1532	5.4	0.02401	1.6	0.298	152.9±2.4	13±120
JD47-11	0.35	232	78	4.86	0.35	0.0451	8.3	0.1510	8.4	0.02430	1.6	0.188	154.8±2.4	-50±200
JD47-12	0.53	134	44	2.85	0.34	0.0448	9.6	0.1530	9.7	0.02468	1.7	0.177	157.2±2.7	-64±230
鹊山-昆嵛山岩体														
DG-3-1	0.19	242	5	5.20	0.02	0.0505	4.8	0.1737	5.1	0.02497	1.6	0.324	159.0±2.6	216±110
DG-3-2	1.21	476	50	10.20	0.11	0.0430	6.9	0.1460	7.1	0.02466	1.6	0.219	157.1±2.4	-166±170
DG-3-3	-	356	210	41.10	0.61	0.0648	1.1	1.2020	1.8	0.13460	1.5	0.799	814.0±11	767±23
DG-3-4	0.33	441	115	9.31	0.27	0.0471	4.8	0.1594	5.1	0.02452	1.5	0.291	156.2±2.3	56±120
DG-3-5	0.69	572	334	13.20	0.60	0.0452	7.9	0.1660	8.0	0.02671	1.6	0.198	169.9±2.7	-45±190
DG-3-6	1.25	157	5	3.34	0.03	0.0415	12.0	0.1400	12.0	0.02439	1.8	0.143	155.3±2.7	-254±310
DG-3-7	0.57	217	5	4.55	0.02	0.0444	6.7	0.1480	6.9	0.02420	1.7	0.245	154.1±2.6	-90±160
DG-3-8	0.17	275	7	5.90	0.03	0.0508	4.2	0.1748	4.5	0.02496	1.6	0.347	158.9±2.4	232±97
DG-3-9	0.25	210	13	4.35	0.06	0.0501	7.8	0.1660	8.0	0.02408	1.7	0.218	153.4±2.7	201±180
DG-3-10	0.89	274	11	5.66	0.04	0.0452	8.4	0.1490	8.5	0.02387	1.6	0.189	152.1±2.4	-46±200
DG-3-11	0.31	319	6	6.79	0.02	0.0493	6.7	0.1680	6.9	0.02471	1.8	0.257	157.4±2.8	164±160
DG-3-12	1.17	234	9	4.75	0.04	0.0446	9.6	0.1440	9.7	0.02342	1.7	0.171	149.2±2.5	-75±230
DG-3-13	0.83	105	67	2.20	0.66	0.0437	12.0	0.1450	12.0	0.02414	1.9	0.164	153.7±3.0	-127±290

表 3 二长花岗岩捕虏体和玲珑岩体锆石 Hf 同位素分析结果
Table 3 Analysis results of zircon Hf isotope of monzogranite xenoliths and Linglong pluton

点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	f_{Lu}/Hf
二长花岗岩捕虏体													
JD40-2-1	157.1	0.013 530	0.000 101	0.000 350	0.000 003	0.281 956	0.000 012	0.281 955	-28.87	-25.45	1 790	2 812	-0.99
JD40-2-2	158.6	0.008 069	0.000 139	0.000 219	0.000 003	0.281 934	0.000 015	0.281 933	-29.64	-26.19	1 813	2 858	-0.99
JD40-2-3	164.4	0.009 042	0.000 248	0.000 263	0.000 006	0.281 964	0.000 015	0.281 964	-28.56	-24.97	1 774	2 788	-0.99
JD40-2-4	159.1	0.037 655	0.001 024	0.000 884	0.000 014	0.281 955	0.000 016	0.281 953	-28.88	-25.48	1 815	2 814	-0.97
JD40-2-5	157.3	0.008 300	0.000 136	0.000 220	0.000 006	0.281 951	0.000 013	0.281 950	-29.04	-25.62	1 790	2 821	-0.99
JD40-2-6	159.5	0.026 289	0.000 214	0.000 694	0.000 006	0.281 929	0.000 017	0.281 927	-29.80	-26.39	1 842	2 871	-0.98
JD40-2-9	165.6	0.015 755	0.000 314	0.000 388	0.000 003	0.281 971	0.000 014	0.281 969	-28.34	-24.77	1 771	2 773	-0.99
JD40-2-11	158.0	0.016 320	0.000 172	0.000 421	0.000 002	0.281 937	0.000 017	0.281 936	-29.52	-26.10	1 818	2 852	-0.99
JD40-2-12	160.9	0.015 773	0.000 151	0.000 449	0.000 003	0.281 932	0.000 014	0.281 930	-29.71	-26.25	1 827	2 863	-0.99
JD40-2-13	165.1	0.035 398	0.000 631	0.000 875	0.000 017	0.281 943	0.000 014	0.281 941	-29.31	-25.77	1 832	2 838	-0.97
JD40-2-15	164.6	0.035 758	0.001 381	0.000 857	0.000 021	0.281 932	0.000 011	0.281 93	-29.70	-26.17	1 846	2 862	-0.97
JD40-2-16	157.6	0.032 397	0.000 241	0.000 834	0.000 007	0.281 950	0.000 011	0.281 948	-29.07	-25.69	1 820	2 826	-0.97
玲珑二长花岗岩													
JD47-1	161.4	0.025 155	0.000 385	0.000 681	0.000 014	0.281 945	0.000 013	0.281 943	-29.23	-25.78	1 819	2 833	-0.98
JD47-2	155.7	0.031 923	0.000 077	0.000 884	0.000 005	0.281 927	0.000 013	0.281 925	-29.87	-26.54	1 854	2 878	-0.97
JD47-13	157.0	0.032 475	0.000 682	0.000 867	0.000 009	0.281 923	0.000 016	0.281 921	-30.02	-26.65	1 859	2 887	-0.97
JD47-14	155.8	0.023 929	0.001 538	0.000 634	0.000 033	0.281 925	0.000 015	0.281 923	-29.96	-26.61	1 845	2 882	-0.98
JD47-15	156.8	0.035 202	0.001 468	0.000 883	0.000 028	0.281 912	0.000 013	0.281 910	-30.41	-27.05	1 875	2 912	-0.97
JD47-16	151.0	0.056 681	0.000 919	0.001 617	0.000 031	0.281 915	0.000 019	0.281 911	-30.29	-27.14	1 907	2 911	-0.95
JD47-17	156.2	0.064 575	0.001 784	0.001 682	0.000 031	0.281 917	0.000 016	0.281 912	-30.25	-26.99	1 909	2 907	-0.95
JD47-18	154.3	0.030 492	0.000 887	0.000 889	0.000 018	0.281 887	0.000 015	0.281 885	-31.29	-27.99	1 909	2 967	-0.97
JD47-19	161.6	0.027 752	0.000 444	0.000 783	0.000 011	0.281 932	0.000 014	0.281 930	-29.69	-26.23	1 842	2 863	-0.98
JD47-110	152.9	0.031 797	0.000 435	0.000 916	0.000 019	0.281 924	0.000 016	0.281 922	-29.98	-26.71	1 860	2 887	-0.97
JD47-111	154.8	0.030 632	0.000 289	0.000 865	0.000 009	0.281 905	0.000 016	0.281 902	-30.67	-27.37	1 884	2 929	-0.97
JD47-112	157.2	0.030 379	0.000 934	0.000 861	0.000 020	0.281 945	0.000 015	0.281 943	-29.24	-25.87	1 828	2 838	-0.97

5.3 岩石地球化学

样品地球化学分析结果见表4。中粒二长花岗

岩捕虏体具有较高的 SiO₂ 含量 70.94%~72.04%;

玲珑岩体 SiO₂ 含量 72.15%~73.78%; 鹤山-昆崙山岩

表4 岩石样品的主量($w_B/\%$)、微量和稀土元素($w_B/10^{-6}$)分析结果

Table 4 Analysis results of major ($w_B/\%$), trace and rare earth elements ($w_B/10^{-6}$) of monzogranite xenoliths, Linglong pluton and Queshan-Kunyushan pluton

样品号	二长花岗岩捕虏体				玲珑岩体			鹤山-昆崙山岩体		
	JD40-2	SQJ-3	SQJ-4	SQJ-5	PM003-12	PM003-14	JD47	DG-3	JD69	JD103
SiO ₂	72.04	71.99	70.94	71.42	72.24	72.15	73.78	70.47	71.32	72.01
TiO ₂	0.28	0.19	0.20	0.22	0.15	0.15	0.16	0.24	0.25	0.14
Al ₂ O ₃	15.34	14.84	15.43	14.62	15.60	15.54	14.70	16.13	15.83	15.22
TFe ₂ O ₃	1.84	2.79	2.78	3.55	1.47	1.51	1.36	1.91	1.84	1.01
MnO	0.03	0.34	0.37	0.39	0.04	0.06	0.02	0.04	0.06	0.13
MgO	0.63	0.34	0.37	0.39	0.29	0.30	0.23	0.43	0.46	0.33
CaO	1.65	1.47	1.62	1.99	2.02	1.99	1.56	2.16	1.84	1.55
Na ₂ O	4.19	3.88	3.90	3.75	3.49	3.56	3.83	3.29	3.85	4.84
K ₂ O	3.81	4.39	4.54	4.34	4.53	4.56	3.89	4.46	4.58	4.30
P ₂ O ₅	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.06	0.06	0.03
LOI	0.69	0.79	0.84	0.83	0.20	0.17	0.66	0.86	0.36	0.58
TOTA	100.56	101.07	101.03	101.54	100.07	100.02	100.22	100.05	100.45	100.14
Na ₂ O+K ₂ O	8.00	8.27	8.44	8.09	8.02	8.12	7.72	7.75	8.43	9.14
Na ₂ O/K ₂ O	1.10	0.88	0.86	0.86	0.77	0.78	0.98	0.74	0.84	1.10
A/NK	1.39	1.33	1.36	1.35	1.47	1.44	1.40	1.58	1.40	1.21
A/CNK	1.11	1.08	1.09	1.02	1.10	1.08	1.11	1.15	1.09	0.99
La	39.4	25.0	33.6	37.4	17.9	15.2	28.2	43.0	40.5	52.15
Ce	69.8	43.9	56.6	63.7	30.6	26.1	48.7	71.0	68.0	90.11
Pr	7.13	4.88	5.84	6.56	3.25	2.89	5.26	7.52	7.48	9.18
Nd	23.5	14.2	19.0	21.4	11.0	10.1	17.7	24.4	24.9	29.09
Sm	3.43	2.16	2.87	3.15	1.62	1.76	2.49	3.40	3.97	3.81
Eu	1.15	1.25	1.25	1.19	0.78	0.81	1.01	1.27	1.23	1.22
Gd	2.67	2.17	2.80	3.04	1.55	1.74	1.88	2.68	3.40	2.21
Tb	0.29	0.25	0.33	0.34	0.21	0.30	0.23	0.35	0.52	0.28
Dy	1.26	1.20	1.55	1.50	1.22	1.90	0.99	1.76	2.95	1.16
Ho	0.20	0.26	0.28	0.24	0.23	0.41	0.18	0.34	0.57	0.23
Er	0.62	0.78	0.87	0.77	0.75	1.22	0.53	1.03	1.79	0.64
Tm	0.06	0.10	0.12	0.10	0.10	0.20	0.07	0.16	0.26	0.10
Yb	0.36	0.64	0.80	0.67	0.65	1.23	0.40	1.05	1.80	0.67
Lu	0.06	0.08	0.11	0.08	0.10	0.19	0.07	0.16	0.24	0.12
Y	5.80	7.15	8.08	7.09	7.13	11.80	4.90	9.90	18.50	6.23
Rb	83.0	113.0	118.0	108.0	65.2	66.3	82.6	64.4	107.0	91.37
Th	7.12	5.06	6.74	7.39	2.76	2.62	5.25	6.67	7.36	7.93
U	0.35	0.705	0.889	1.23	0.49	0.28	0.49	0.50	0.72	0.90
Nb	10.10	8.39	12.60	9.44	5.30	6.20	7.70	8.00	15.70	6.79
Sr	698	822	859	795	830	779	564	990	716	1050
Zr	130.0	20.8	23.3	26.6	53.5	65.0	91.6	127.0	131.0	222.1
Hf	1.46	0.76	0.80	0.92	0.44	0.30	0.79	0.56	0.74	5.16
Ti	1678.6	1139.1	1217.0	1318.9	902.9	902.3	935.8	1453.2	1501.2	1450.8
Pb	33.3	37.5	26.7	32.3	22.8	22.0	30.6	21.1	30.0	25.6
Ta	0.31	0.55	0.98	0.68	0.44	0.52	0.36	0.53	1.81	0.26
Ba	1858	2469	2662	2478	2226	2077	1951	2755	2398	3546
ΣREE	149.93	96.87	126.02	140.14	69.96	64.05	107.71	158.12	157.61	191.00
(La/Yb) _N	78.50	28.11	30.01	40.22	19.75	8.86	50.57	29.38	16.14	55.83
δEu	1.16	1.77	1.35	1.18	1.50	1.42	1.43	1.29	1.02	1.29
δCe	1.02	0.97	0.99	1.00	0.98	0.97	0.98	0.97	0.96	1.01

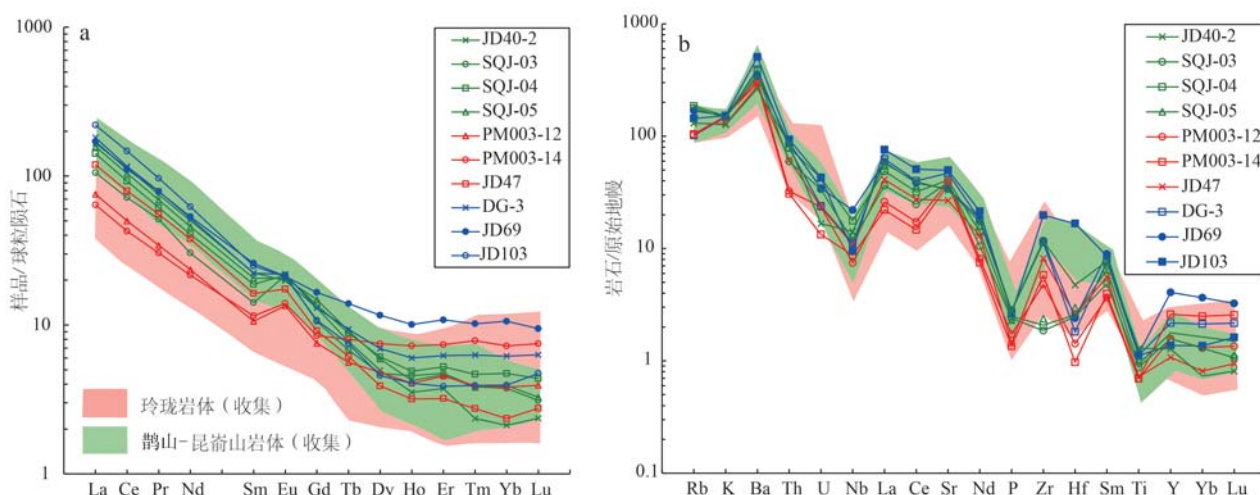


图8 岩石球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989; 玲珑岩体、鹊山-昆崙山岩体据张娟, 2011; Jiang *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2013; 林博磊等, 2013; 陈俊等, 2015; 赵睿, 2016; 张瑞忠, 2017; 刘晓阳等, 2020; 王斌等, 2021)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE distribution diagram (a) and primitive mantle normalized trace element cobweb diagram (b) of rocks (standardized values according to Sun and McDonough, 1989; Linglong pluton and Queshan-Kunlunshan pluton according to Zhang Juan, 2011; Jiang *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2013; Lin Bolei *et al.*, 2013; Chen Jun *et al.*, 2015; Zhao Rui, 2016; Zhang Ruizhong, 2017; Liu Xiaoyang *et al.*, 2020; Wang Bin *et al.*, 2021)

年龄值为 143.2 ± 1.4 Ma, 中粒二长花岗岩捕虏体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄值为 161.0 ± 2.2 Ma, 玲珑岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄值为 156.3 ± 1.3 , 鹊山-昆崙山岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄值为 155.1 ± 1.5 Ma。结合前人测得的玲珑岩体和鹊山-昆崙山岩体成岩年龄(表5), 认为玲珑岩体成岩年龄在 167~145 Ma, 鹊山-昆崙山岩体成岩年龄在 166~146 Ma, 二长花岗岩捕虏体成岩年龄均在玲珑岩体和鹊山-昆崙山岩体成岩年龄范围内, 三者成岩年龄基本一致, 即成岩时代为晚侏罗世早期, 而闪长玢岩的形成时代为早白垩世。

6.2 地化特征、成因及归属

上曲家二长花岗岩捕虏体主量元素特征显示, TiO_2 、 MgO 较玲珑期花岗岩略高, 其他氧化物含量及其他等特征参数均在玲珑期花岗岩的变化范围之内(图7), 稀土元素、微量元素标准化曲线变化趋势也与玲珑、鹊山-昆崙山岩体一致(图8), 表明它们继承了壳源源区岩石富含长石的特征。二长花岗岩捕虏体岩石具有过铝质高钾钙碱性, 高铝、贫铁和镁等特征, La/Nb 值为 2.45~6.68, 平均值为 3.86, 高于大陆地壳平均值(2.2), Th/Nb 值为 0.42~1.16, 平均值为 0.67, 高于大陆地壳平均值(0.44), P、Ti 的亏损类似于弧源古老地壳, Nb 负异常和 Zr、Hf 正异常显示为大陆壳的岩石特征。

玲珑期花岗岩属于高 Sr 低 Yb 型 ($\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} < 2 \times 10^{-6}$), 昆崙山杂岩属于高 Sr 花岗岩, 这一类型的花岗岩成因可能是来自加厚的下地壳 (Salters and Hart, 1991; Atherton and Pethord, 1993; Perford and Atherton, 1996; 张旗等, 2001; 张华锋等, 2004)。在构造环境 Rb-Y+Nb 图解中, 二长花岗岩捕虏体、玲珑岩体、鹊山-昆崙山岩体投点均位于火山弧区域(图 10a)。在 Rb/30-Hf-3 Ta 图解中, 二长花岗岩捕虏体投点位于火山弧与同碰撞区域, 玲珑岩体和鹊山-昆崙山岩体位于同碰撞区域(图 10b)。所有样品 La/Nb 值为 2.4~7.6, 均大于 2, 反映了成岩环境为活动大陆边缘环境, 与古太平洋板块俯冲时限一致 (Miller and Mittlefehldt, 1984; 郭春影, 2009)。二长花岗岩捕虏体含有捕获锆石年龄值为 2 636 Ma, 与栖霞地区 TTG 片麻岩 (万渝生等, 2017) 形成时代时代相对应 (Sun and McDonough, 1989)。单颗粒锆石 Lu-Hf 同位素显示, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-26.39 \sim -24.77$, t_{DM2} 年龄值集中在 2 871~2 773 Ma 之间, 与部分捕获锆石年龄大致对应。所有锆石测点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值都介于 0.000 219 3~0.000 884 1 之间, 小于 0.002, 说明锆石在岩体形成之后的演化过程中有较少的放射成因的 Hf 积累, 因此可以用锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值解释岩体形成时的成因信息。锆

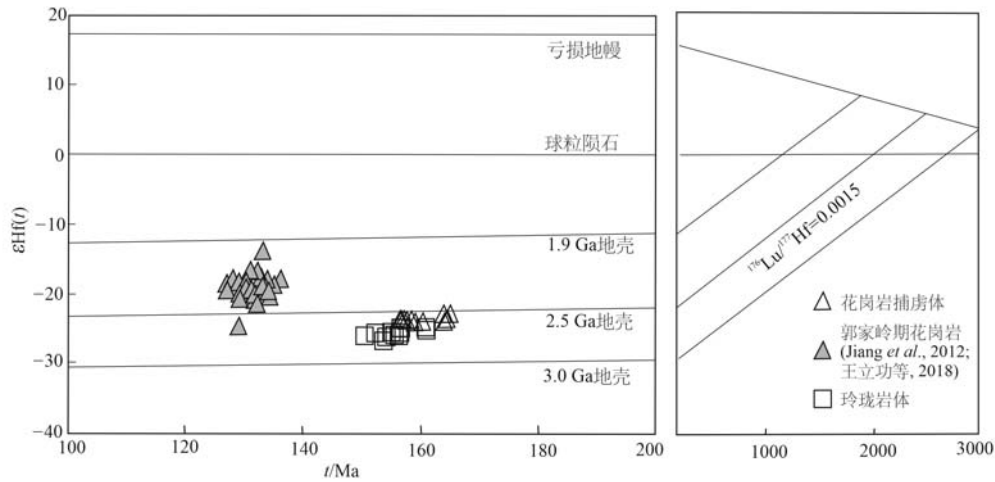
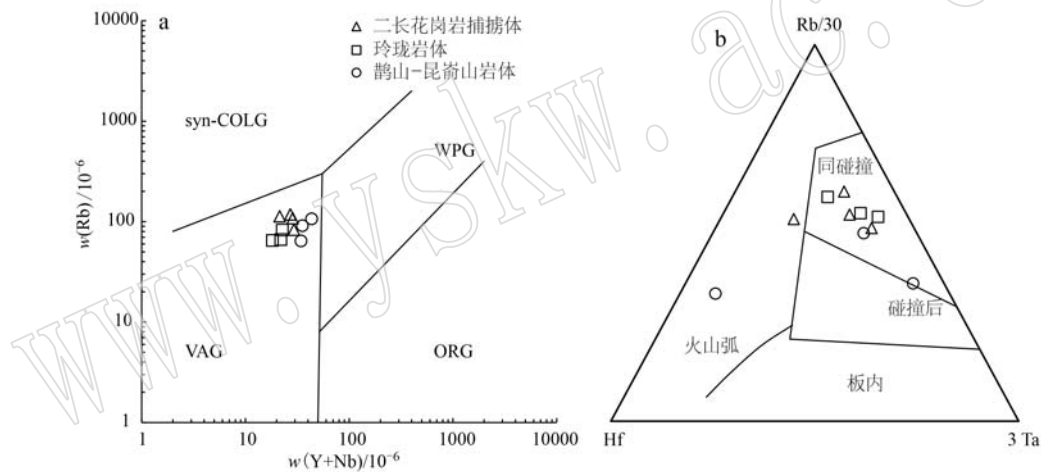
表 5 玲珑期花岗岩锆石 U-Pb 测年结果表
Table 5 Zircon U-Pb dating results of Linglong period granite

岩体名称	样品编号	地理位置	岩性	年龄/Ma	方法	资料来源
玲珑 岩体 (北)	JD47	龙口市磨山迟家	中粒二长花岗岩	156.3±1.3	SHRIMP	侯建华等, 2021
	17SZK07	莱州三山岛钻孔	中粒二长花岗岩	153.8±1.1	SHRIMP	侯建华等, 2021
	PM203-6	莱州小西庄村	含斑中粒二长花岗岩	159.3±1.2	SHRIMP	侯建华等, 2021
	06D	招远坡石山村	中粒二长花岗岩	154.0±3.0	LA-ICPMS	侯建华等, 2021
	STW1	莱州寺庄	中粒二长花岗岩	164.4±1.9	SHRIMP	侯建华等, 2021
	256ZK766	莱州小管庄	中粒二长花岗岩	159.8±1.6	SHRIMP	侯建华等, 2021
	DYD08TW3	招远大尹格庄	花岗岩	164.7±3.6	SHRIMP	侯建华等, 2021
	MGZ-TW1	莱州盟格庄	中粒二长花岗岩	147.0±1.1	SHRIMP	侯建华等, 2021
	LN01/2B	招远蚕庄	中粒含黑云母二长花岗岩	161.0±2.0	LA-ICPMS	侯建华等, 2021
	SL-04	莱州小官庄	中粒黑云母二长花岗岩	153.0±1.0	LA-ICPMS	侯建华等, 2021
	WES10D228B2	招远望儿山	中粒黑云母二长花岗岩	161.1±1.8	LA-ICPMS	侯建华等, 2021
	DYYP-TW1	龙口小前乔	粗中粒二长花岗岩	166.7±0.9	SHRIMP	侯建华等, 2021
	LL67D04TW1	招远九曲蒋家	斑状粗中粒二长花岗岩	157.8±0.6	SHRIMP	侯建华等, 2021
	L010D10	莱州宋家村	粗中粒二长花岗岩	147.1±1.6	SHRIMP	侯建华等, 2021
	L010D17	莱州盟格庄东	粗粒二长花岗岩	144.4±1.1	SHRIMP	侯建华等, 2021
	06SD52	欧家乔东北	中粗粒二长花岗岩	147.0±3.0	LA-ICPMS	张娟, 2011
	LLXS-10ZD-N1	玲珑金矿西山矿区	中粗粒黑云母斜长花岗岩	158.5±0.8	LA-ICPMS	林博磊, 2013
	S0907-3	玲珑西山水库	玲珑花岗岩	156.3±0.8	LA-ICPMS	阳琼艳, 2013
	W26	九曲矿区井下巷道	花岗岩	160.5±0.8	LA-ICPMS	万多, 2014
	LL1-3	玲珑金矿井下	花岗岩	151.8±2.4	LA-ICPMS	于昆, 2014
	08G33	三山岛	中粒二长花岗岩	159.0±2.0	LA-ICPMS	Yang <i>et al.</i> , 2012
	116ZK2-1745	夏甸金矿围岩	玲珑二长花岗岩	159.5±0.9	LA-ICPMS	Ma <i>et al.</i> , 2017
	DYG15D020B1	大尹格庄金矿	黑云母花岗岩	162.0±2.0	LA-ICPMS	张瑞忠, 2017
	JT15D001B1	金亭岭金矿	黑云母花岗岩	159.0±2.0	LA-ICPMS	张瑞忠, 2017
XDJ	龙口下丁家镇	黑云母二长花岗岩	144.9±0.8	LA-ICPMS	赵睿, 2016	
DJDB-6-N1	山后金矿区丁家	中粗粒黑云二长花岗岩	148.8±1.5	LA-ICPMS	陈俊等, 2015	
玲珑 岩体 (南)	JD1416	莱州市夏邱镇	片麻状二长花岗岩	160.0±2.0	SHRIMP	侯建华等, 2021
	LS07/1B	平度市西涧村	弱片麻状含石榴石二长花岗岩	154.0±2.0	LA-ICPMS	侯建华等, 2021
	LS09/1B	平度市王汉庄村	弱片麻状含石榴石二长花岗岩	161.0±2.0	LA-ICPMS	侯建华等, 2021
	GJT-TW1	平度市洪山南	中粒二长花岗岩	161.2±1.1	SHRIMP	侯建华等, 2021
	JD61	平度彭家村	中粒二长花岗岩	150.3±0.8	SHRIMP	侯建华等, 2021
	LM09/1B	莱州市古庄沟村	粗中粒黑云二长花岗岩	154.0±3.0	LA-ICPMS	侯建华等, 2021
	08G59	平度东北	细粒黑云二长花岗岩	159.0±1.0	LA-ICPMS	Yang <i>et al.</i> , 2012
	08LL06		含黑云母花岗岩	149.0±2.0	LA-ICPMS	Jiang <i>et al.</i> , 2012
08LL07		含黑云母花岗岩	163.0±2.0	LA-ICPMS	Jiang <i>et al.</i> , 2012	
鹊山- 昆崙山 岩体	JD69	牟平上口村	中细粒黑云二长花岗岩	154.2±1.0	SHRIMP	侯建华等, 2021
	DG-3	邓格庄金矿	矿体围岩, 二长花岗岩	155.1±1.5	SHRIMP	侯建华等, 2021
	22A	牟平合立场村	黑云母花岗岩	166.0±3.0	LA-ICPMS	侯建华等, 2021
	03R097	乳山金矿围岩	中粒二长花岗岩	160.0±3.0	SHRIMP	胡芳芳等, 2004
	SD	牟平水道镇	黑云母二长花岗岩	156.6±0.6	LA-ICPMS	赵睿, 2016
	GJ	葛家镇	黑云母二长花岗岩	146.5±0.5	LA-ICPMS	赵睿, 2016
	S391	昆崙山	二长花岗岩	152.2±1.2	LA-ICPMS	张田等, 2008
	GJ	葛家镇	黑云母二长花岗岩	146.5±0.5	LA-ICPMS	张娟, 2011
	06SD12	莒格庄杭北头北	中粗粒二长花岗岩	149.0±5.0	LA-ICPMS	张娟, 2011

石测点 $f_{Lu/Hf}$ 值小于硅铝质地壳 $f_{Lu/Hf}$ 值 (-0.72) 和铁镁质地壳 $f_{Lu/Hf}$ 值 (-0.34), 二阶段模式年龄反映其源区物质从亏损地幔被获取的时间。在 $t-\varepsilon Hf(t)$ 图解(图 9)中, 二长花岗岩捕虏体落点与玲珑岩体一致, 位于球粒陨石 Hf 同位素演化线之下, 2.5 Ga

地壳范围内, 反映其物源以太古宙 TTG 类岩石为主。

晚三叠世, 胶东地区经历了华北-扬子板块的陆陆碰撞造山作用 (Liou *et al.*, 1996; Sengor and Natal'in, 1996; 张国伟, 2001; 郑永飞, 2008)。早侏罗世, 古太平洋板块在现今南太平洋位置初步形成

图9 二长花岗岩捕虏体 $\varepsilon\text{Hf}(t)-t$ 图解Fig. 9 The diagram of $\varepsilon\text{Hf}(t)-t$ of monzogranite xenoliths in diorite porphyrite图10 Rb-(Y+Nb)图解(a, 据 Pearce *et al.*, 1984)和 Rb/30-Hf-3 Ta 图解(b, 据 Harris *et al.*, 1986)Fig. 10 The diagrams of Rb-(Y+Nb) (a, according to Pearce *et al.*, 1984) and Rb/30-Hf-3 Ta (b, according to Harris *et al.*, 1986)

(185 Ma \pm), 古太平洋板块俯冲开始时间可能在 180~170 Ma 左右, 受古太平洋板块俯冲影响, 导致扬子板块向华北板块继续俯冲使地壳持续增厚(陈衍景等, 2004)。晚侏罗世(约 160 Ma), 受控于古太平洋板块的运动学背景下, 俯冲加厚的地壳在不同层位发生了部分熔融, 生成地壳原地重熔型花岗质岩浆(张哲坤, 2020)。在内压及浮力作用下岩浆侵位, 与附近低程度熔融的围岩一起穿刺到较高层位上侵, 并且以侧向膨胀的方式扩展或沿平缓的构造不断侵位, 形成复式的大型花岗岩岩基-玲珑岩体、鹊山-昆崙山岩体等。大约在 140 Ma, 软流圈地幔上涌加热导致了胶东富集岩石圈地幔的部分熔融,

形成了地幔熔体, 地幔熔体延张性裂隙快速侵位, 并在上升的过程中捕获了已经结晶的玲珑期花岗岩, 形成含有玲珑期花岗岩捕虏体的闪长玢岩脉。

6.3 隐伏花岗岩推断

胶东地区晚侏罗世花岗岩广泛分布, 面积较大的有玲珑岩体、毕郭岩体、昆崙山岩体、磁山岩体等(王来明等, 2021)。玲珑岩体呈北东向展布, 总面积达 3 000 km², 在布格重力异常图上, 总体表现为低负重力异常, 通过重力异常模拟显示为厚约 8 km 的席状岩基(曾华霖等, 1999)。昆崙山岩体呈近东西向展布, 总面积达 2 800 km², 在布格重力异常图上, 总体表现为低负重力异常。从地表出露看, 玲珑

岩体与昆崙山岩体之间,发育中新太古代 TTG 片麻岩,两者呈独立的巨大岩基。然而在胶东地区布格重力异常图上,低重力或负重力异常呈现斜“H”形状(图 11),暗示栖霞地区 TTG 片麻岩下存在隐伏花岗岩体。另外,在栖霞地区也有晚侏罗世花岗岩局限出露,多以小型岩株、岩瘤或岩枝状侵入 TTG 片麻岩,如榆山后岩体、南黄崖底-杨础岩株,这些岩株在 1:5 万布格重力异常图上也呈现低负重力异常。在史家庄-杜家黄口存在规模较大的近圆形负重力异常中心,表明深部具有隐伏的花岗岩。根据上述重力异常结合栖霞上曲家地区闪长玢岩脉中玲珑期花岗岩的发现推断,从玲珑-栖霞杨础-史家庄-榆山后-鹊山-昆崙山一线由西至东深部均存在隐伏的晚侏

罗世花岗岩。

另外在泽头一带,中粗粒二长花岗岩(样品 JD31)中发现有 145 Ma 捕获锆石年龄数据(未发表),泽头岩体中普遍发育有玲珑中粗粒二长花岗岩捕虏体,捕虏体小者十几厘米,大者可达数十米,也指示了该地区深部也存在玲珑期花岗岩。考虑到后期地壳抬升、剥蚀作用,玲珑期花岗岩分布范围从西至东,莱州-招远-栖霞-文登-乳山一带分布有较大范围的玲珑期花岗岩。结合重力异常(图 11),对胶东地区隐伏玲珑期花岗岩范围进行推测,大致西起陡崖断裂,东至桃村断裂,南至胶莱盆地北缘,北至臧家庄盆地南缘的地区,玲珑岩体和鹊山-昆崙山岩体在深部可能是连通的。

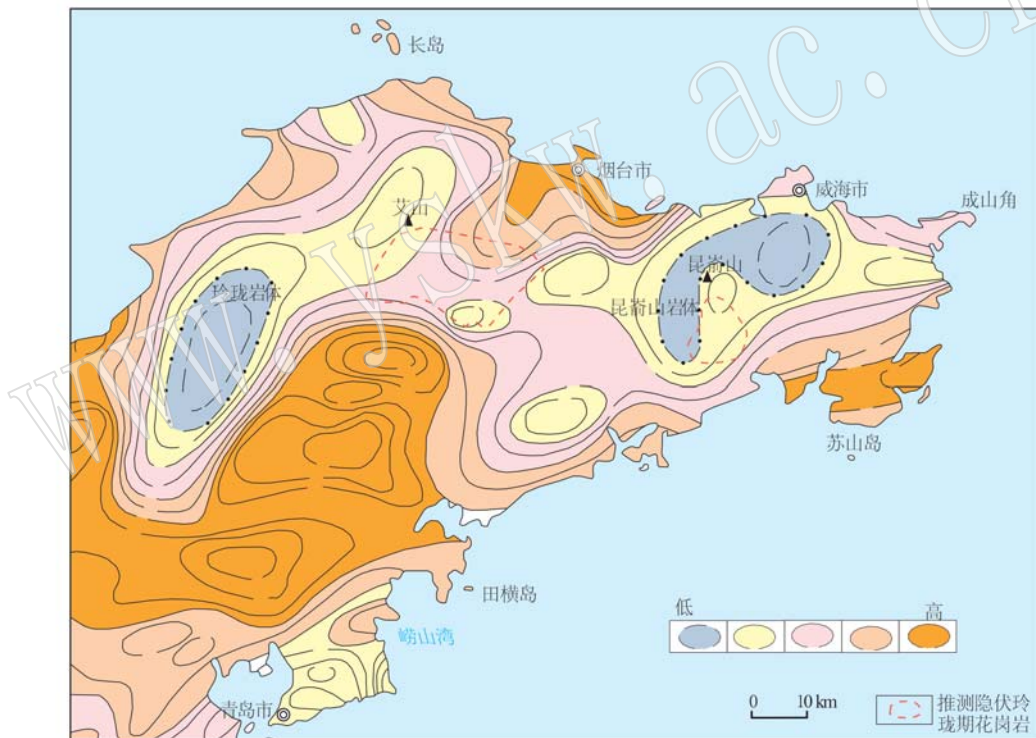


图 11 胶东地区布格重力异常图

Fig. 11 Bouguer gravity anomaly map of Jiaodong area

7 结论

(1) 闪长玢岩脉中二长花岗岩捕虏体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄值为 161.0 ± 2.2 Ma, 与玲珑岩体、鹊山-昆崙山岩体基本一致。

(2) 岩相学、岩石地球化学特征, 揭示其物源以

太古宙 TTG 类岩石为主, 是受控于古太平洋板块的运动学背景下, 扬子板块与华北板块陆陆碰撞加厚的地壳发生部分熔融, 生成地壳原地重熔型花岗质岩浆, 经过底侵形成, 属玲珑期花岗岩。

(3) 闪长玢岩脉中玲珑期二长花岗岩捕虏体的发现, 同时结合区域重力异常特征解译, 认为栖霞太古宙 TTG 类岩石下部有隐伏玲珑期岩体存在, 玲珑

岩体和鹊山-昆崙山岩体在深部可能是连通的。

致谢 感谢自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室李大鹏研究员、迟乃杰高工在样品测试工作中提供的帮助;感谢国家科技基础条件平台北京离子探针中心的顾顽强和谢士稳在装载样品、仪器调试、仪器监控和数据处理方面提供的帮助;感谢武汉上谱分析科技有限责任公司有关工作人员在原位微区锆石 Hf 同位素测试方面提供的帮助;感谢中国地质科学院矿产资源研究所柯昌辉副研究员提出的宝贵意见;感谢审稿专家和编辑部提出了宝贵的意见、建议。

References

- Atherton M P and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 362: 144~146.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, *et al.* 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 200(1~2): 155~170.
- Chen Guangjun, Sun Fengyue, Li Yuchun, *et al.* 2014. U-Pb dating, geochemical characteristics and geological significance of Guojialing grandiorite in Jiaodong Peninsula[J]. *Global Geology*, 33(1): 39~47 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jun, Sun Fengyue, Wang Li, *et al.* 2015. Zircon U-Pb geochronology and petrogeochemistry of Luanjiahe granite in Jiaodong Region and their geological significance[J]. *Global Geology*, 34(2): 283~295 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Pirajno Franco, Lai Yong, *et al.* 2004. Metallogenic time and tectonic setting of the Jiaodong gold province, eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(4): 907~922 (in Chinese with English abstract).
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662~665.
- Ding Zhengjiang, Sun Fengyue, Li Guohua, *et al.* 2015. Accurate zircon U-Pb dating of Early Yanshanian molybdenum-tungsten mother rocks in Xingjiashan area of Jiaodong Peninsula and its significance[J]. *Geology in China*, 42(2): 556~569 (in Chinese with English abstract).
- Ding Zhengjiang, Sun Fengyue, Liu Fulai, *et al.* 2013. U-Pb dating of zircons from the Weideshan molybdenum copper polymetallic deposits in Jiaodong Peninsula, China, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 607~618 (in Chinese with English abstract).
- Gao Zhijun, Chen Jing, Chen Haofeng, *et al.* 2015. Simultaneous determination of major and minor components in silicate and bauxite by X-ray fluorescence spectrometry with fusion sample preparation[J]. *Metallurgical Analysis*, 35(7): 73~78 (in Chinese with English abstract).
- Guan Kang, Luo Zhenkuan, Miao Laicheng, *et al.* 1998. Shrimp in zircon chronology for Guojialing suite granite in Jiaodong Zhaoye district[J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 33(3): 318~328 (in Chinese with English abstract).
- Guo Chunying. 2009. Tectonic Magmatic Fluid Gold Metallogenic System of Sanshandao Cangshang Gold Belt in eastern Shandong[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Harris N B W, Pearce J A and Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 19(1): 67~81.
- Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481~492 (in Chinese with English abstract).
- Hou Jianhua, Ren Tianlong, Wang Laiming, *et al.* 2021. Granites in Late Jurassic linglong period in Jiaodong area[J]. *Shandong Land and Resources*, 37(9): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Hu Fangfang, Fan Hongrui, Yang Jinhui, *et al.* 2004. Metallogenic age of gold-bearing quartz vein type gold deposit in Rushan, Jiaodong: U-Pb determination of hydrothermal zircon SHRIMP method[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(12): 1 191~1 198 (in Chinese).
- Hu Z C, Liu Y S, Gao S, *et al.* 2012a. A "wire" signal smoothing device for laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry analysis[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 78: 50~57.
- Hu Z C, Liu Y S, Gao S, *et al.* 2012b. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1 391~1 399.
- Jiang N, Chen J Z, Guo J H, *et al.* 2012. In situ zircon U-Pb, oxygen and hafnium isotopic compositions of Jurassic granites from the North China Craton: Evidence for Triassic subduction of continental crust and subsequent metamorphism-related ^{18}O depletion[J]. *Lithos*, 142: 84~94.

- Li Hongkui, Li Dapeng, Geng Ke, *et al.* 2017. The Mesozoic magmatic activities framework in Jiaodong area: SHRIMP chronology recording of single particle zircon[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(1): 163~179(in Chinese with English abstract).
- Li X C, Fan H R, Santosh M, *et al.* 2012. An evolving magma chamber within extending lithosphere: An integrated geochemical, isotopic and zircon U-Pb geochronological study of the Gushan granite, eastern North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 50: 27~43.
- Li Zengda, Yu Xiaofei, Wang Quanming, *et al.* 2018. Petrogenesis of Sanfoshan granite, Jiaodong: Diagenetic physical and chemical conditions, zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotope constraints[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(2): 447~468 (in Chinese with English abstract).
- Lin Bolei and Li Bile. 2013. Geochemistry, U-Pb dating, Lu-Hf isotopic analysis and geological significance of Linglong granite in Jiaodong Peninsula[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 40(2): 147~160 (in Chinese with English abstract).
- Liou J C, Zhang R Y, Wang X, *et al.* 1996. Metamorphism and tectonics of high-pressure and ultra-high-pressure belts in the Dabie-Sulu China [C]//Yin A and Harrison T M. *The Tectonic Region Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 300~344.
- Liu F L, Xu Z Q, Liou J G, *et al.* 2004. SHRIMP U-Pb ages of ultra-high-pressure and retrograde metamorphism of gneisses, south-western Sulu terrane, Eastern China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 22(4): 315~326.
- Liu Jianhui, Liu Fulai, Liu Pinghua, *et al.* 2011. Polyphase magmatic and metamorphic events from Early Precambrian metamorphic basement in Jiaobei area: Evidences from the zircon U-Pb dating of TTG and granitic gneisses[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 943~960 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoyang, Tan Jun, Wang Huaihong, *et al.* 2020. Petrogenesis and tectonic setting of the Late Jurassic low-Mg adakitic granites in the fanjiazhuang area, Jiaodong peninsula[J]. *Earth Science*, 45(2): 451~466 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. *Stjuid 1.02: A users manua*[C]//Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2: 1~19.
- Luo Xiandong, Yang Xiaoyong, Duan Lian, *et al.* 2014. Geochemical and geochronological study of the gold-related guojialing pluton and Shangzhuang pluton in Jiaobei Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(10): 1 874~1 888 (in Chinese with English abstract).
- Luo Zhenkuan, Guan Kang, Miao Laicheng, *et al.* 1999. The ages and its significance of inherited zircons in the granitoid in Zhaoyuan-Laizhou area[J]. *Geology of Shandong*, 15(3): 24~30, 57(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhenkuang and Miao Laicheng. 2002. *Granite and Gold Deposits in Zhaolai Area, Jiaodong*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1~157(in Chinese with English abstract).
- Lü Guxian, Li Hongkui, Ding Zhengjiang, *et al.* 2016. Hydrothermal alteration metallogenesis in the determination zone of a "Magmatic core Complex" upheaval-detachment structure, Jiaodong[J]. *Geoscience*, 30(2): 247~262 (in Chinese with English abstract).
- Ma L, Jiang S Y, Dai B Z, *et al.* 2013. Multiple sources for the origin of Late Jurassic Linglong adakitic granite in the Shandong Peninsula, Eastern China: Zircon U-Pb geochronological, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 162: 251~263.
- Ma W D, Fan H R, Liu X, *et al.* 2017. Geochronological framework of the Xiadian gold deposit in the Jiaodong Province, China: Implications for the timing of gold mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 86: 196~211.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, *et al.* 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 79(1~2): 1~24.
- Miao Laicheng, Luo Zhenkuan, Huang Jiazhan, *et al.* 1997. Zircon SHRIMP study of granitoid intrusions in Zhaoye Gold Belt, Shandong Province and its significance[J]. *Science in China (series D)*, 27(3): 207~213(in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3~4): 215~224.
- Miller C F and Mittlefehldt D W. 1984. Extreme fractionation in felsic magma chambers: A product of liquid-state diffusion or fractional crystallization? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 68(1): 151~158.
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association[J]. *Lithos*, 13(1): 97~108.
- Niu Yuqin, Jiang Chengliang, Li Cuiyun, *et al.* 1990. Study on new process of preferential flotation of zircon [J]. *Non Ferrous Metals (Beneficiation)*, 4: 13~15(in Chinese with English abstract).
- Niu Yuqin, Jiang Chengliang, Li Cuiyun, *et al.* 1993. Research on flotation separation of ilmenite, rutile, monazite and zircon from beach placer[J]. *Mining and Metallurgy*, 2(1): 23~29 (in Chinese with English abstract).

- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Petford N and Atherton M. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The cordillera Blanca batholith, Peru [J]. *Journal of Petrology*, 37(6): 1 491~1 521.
- Ren Jishun, Niu Baogui and Liu Zhigang. 1999. Soft collision, superposition orogeny and polycyclic suturing[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 85~93 (in Chinese with English abstract).
- Ren Tianlong, Wang Laiming, Zhu Xueqiang, *et al.* 2021. Early Cretaceous Weideshan period granite in Jiaodong area[J]. *Shandong Land and Resources*, 37(10): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Salters V J M and Hart S R. 1991. The mantle sources of ocean ridges, islands and arcs; The Hf-isotope connection[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2~4): 364~380.
- Sengor A M C and Natal'in B A. 1996. Paleotectonics of Asia; Fragments of Nthesis[C]//Yin A and Harrison T M. *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 486~640.
- Song Biao. 2015. SHRIMP zircon U-Pb age measurement: Sample preparation, measurement, data processing and explanation[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(10): 1 777~1 788 (in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun. 2009. *Tectonic Framework and Tectonic Evolution of Shandong Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~272(in Chinese with English abstract).
- Song Yingxin, Song Mingchun, Li Shiyong, *et al.* 2019. The discovery of Three-stage Late Mesozoic metallogenic granitic bodies and 3.5 Ga zircon in the Jiaodong Terrane and their metallogenic geodynamical setting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(2): 440~458 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Sanders A D and Norry M J. *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313~345.
- Tao Youbing, Wang Laiming, Huang Yongbo, *et al.* 2021. Early Cretaceous Laoshan granite in Jiaodong area[J]. *Shandong Land and Resources*, 37(10): 13~22 (in Chinese with English abstract).
- Wan Duo. 2014. Metallogenic Regularity and Metallogenic Prediction of Gold Deposits in The North Section of Zhaoping Fault Zone in Jiaodong Area, Shandong Province[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng, Song Zhiyong, Wang Laiming, *et al.* 2017. Early Precambrian evolution of the Qixia area, eastern North China Craton: Evidence from geological mapping and SHRIMP U-Pb zircon dating [J]. *Geological Bulletin of China*, 36(11): 1 927~1 941 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bin, Song Mingchun, Huo Guang, *et al.* 2021. Source characteristics and tectonic evolution of Late Mesozoic granites in Jiaodong and their implications for gold mineralization [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(2): 288~320 (in Chinese with English abstract).
- Wang Laiming, Ren Tianlong, Liu Handong, *et al.* 2021. Division of Mesozoic granites in Jiaodong area [J]. *Shandong Land and Resources*, 37(8): 1~14 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ligong, Zhu Decheng, Guo Ruiheng, *et al.* 2018. Geochemistry, zircon U-Pb age and Lu-Hf isotopes of the Gangshang and Sanshandao monzogranites in the northwestern Jiaodong peninsula, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(10): 2 081~2 095 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ruiliang, Zhang Zhaochong, Zeng Qingdong, *et al.* 2019. Ages of the Early Cretaceous granites in Qixia gold concentration area, Shandong Province and implications for gold mineralization[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(1): 186~198 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Xu Yigang, Gao Shan, *et al.* 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1 145~1 174 (in Chinese with English abstract).
- Xie Shiwen, Wang Fang and Liu Qian. 2022. Petrogenesis and tectonic significance of mid-Paleoproterozoic granitic gneisses in the Jiaobei terrane, North China Craton: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(2): 371~395 (in Chinese with English abstract).
- Yang K F, Fan H R, Santosh M, *et al.* 2012. Reactivation of the Archean lower crust: Implications for zircon geochronology, elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of late Mesozoic granitoids from northwestern Jiaodong Terrane, the North China Craton [J]. *Lithos*, 146: 112~127.
- Yang Liqiang, Deng Jun, Wang Zhongliang, *et al.* 2014. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, Eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2 447~2 467 (in Chinese with English abstract).
- Yang Qiongyan. 2013. *Mesozoic Magmatism and Metallogeny Geodynamics of Linglong Gold Deposit in Jiaodong Peninsula Eastern North China Craton*[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).

- Yu Kun. 2014. Geochemical Characteristics of The Gold Deposits on Zhaoping Fault Zone and Its Implications [D]. Hefei: Hefei University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Yu Xiaowei, Wang Laiming, Liu Handong, *et al.* 2021. Study on Early Cretaceous guojialing granite in Jiaodong area [J]. Shandong Land and Resources, 37(9): 12~25 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xiaowei, Wang Laiming, Liu Handong, *et al.* 2023. The relationship between Mesozoic granite, gold deposits and the division of metallogenic period in eastern Shandong [J]. Acta Geologica Sinica, 97(6): 1 848~1 873 (in Chinese with English abstract).
- Yu X F, Shan W, Xiong Y X, *et al.* 2018. 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—English Edition, 92(5): 1 823~1 840.
- Zeng Hualin, Wan Tianfeng and Christian Teyssier. 1999. Gravity modeling for 3D geometry of linglong granitic complex [J]. Earth Science, 24(6): 607~612 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Zhu Rixiang, Liu Jianming, *et al.* 2003. Key time limit of Mesozoic tectonic regime transition in eastern North China [J]. Science China (Series D), 33(10): 913~920 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Baoke, Wen Hongli, Wang Lei, *et al.* 2011. Quantification of multi elements in geological samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry with pressurized decomposition-hydrochloric acid extraction [J]. Rock and Mineral Analysis, 30(6): 737~744 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Zhang Benren and Xiao Qinghui. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 1~855 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Huafeng, Zhai Mingguo, He Zhongfu, *et al.* 2004. Petrogenesis and implications of the sodium-rich granites from the Kunyushan complex, eastern Shandong Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 20(3): 369~380 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Juan. 2011. A Geochemical Study of Mesozoic Magmatic Rocks in the Sulu Orogeny [D]. Hefei: University of Science and Technology of China (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erqi, *et al.* 2001. An East China Plateau in mid-late yanshanian period; Implication from adakites [J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 36(2): 248~255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ruizhong. 2017. Structural Control on Gold Mineralization and Deep Metallogenic Forecast in Zhaoping Gold Belt, Jiaodong Peninsula, Eastern China [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tian and Zhang Yueqiao. 2008. Late Mesozoic tectono-magmatic evolution history of the Jiaobei uplift, Shandong peninsula [J]. Acta Geologica Sinica, 82(9): 1 210~1 228 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhekun. 2020. Intracontinental Deformation and Magmatism of the North China Craton Induced by Subduction of the Paleo-Pacific Plate [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Zhao Rui. 2016. Tectonic Evolution and Gold Mineralization in The Jiaodong Peninsula [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yue, Xu Gang, Zhang Shuanhong, *et al.* 2004. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia [J]. Earth Science Frontiers, 11(3): 319~328 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei. 2008. Research progress of ultrahigh pressure metamorphism and continental collision: A case study of Dabie-Sulu orogenic belt [J]. Chinese Science Bulletin, 53(18): 2 129~2 152 (in Chinese).
- Zhu Fengli and Zhang Qiang. 2012. Discussion on the prospecting direction of gold deposits in qixia area, shandong province [J]. West-China Exploration Engineering, (4): 161~164 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Fengsan. 1980. Preliminary Study on mineralization of mixed petrolycated hydrothermal gold deposits: A case study of the gold deposits in Zhaoye Area [J]. Geology and Prospecting, 16(7): 1~10 (in Chinese with English abstract).
- Zhu R X, Fan H R, Li J W, *et al.* 2015. Decratonic gold deposits [J]. Science China Earth Sciences, 58(9): 1 523~1 537.

附中文参考文献

- 陈广俊, 孙丰月, 李玉春, 等. 2014. 胶东郭家岭花岗闪长岩 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义 [J]. 世界地质, 33(1): 39~47.
- 陈俊, 孙丰月, 王力, 等. 2015. 胶东招掖地区滦家河花岗岩锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学及其地质意义 [J]. 世界地质, 34(2): 283~295.
- 陈衍景, Pirajno Franco, 赖勇, 等. 2004. 胶东矿集区大规模成矿时

- 间和构造环境[J]. 岩石学报, 20(4): 907~922.
- 丁正江, 孙丰月, 李国华, 等. 2015. 胶东邢家山地区燕山早期钨锡成矿母岩锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. 中国地质, 42(2): 556~569.
- 丁正江, 孙丰月, 刘福来, 等. 2013. 胶东伟德山地区铜钼多金属矿锆石 U-Pb 法测年及其地质意义[J]. 岩石学报, 29(2): 607~618.
- 高志军, 陈静, 陈浩凤, 等. 2015. 熔融制样-X 射线荧光光谱法测定硅酸盐和铝土矿中主次组分[J]. 冶金分析, 35(7): 73~78.
- 关康, 罗镇宽, 苗来成, 等. 1998. 胶东招掖郭家岭型花岗岩锆石 SHRIMP 年代学研究[J]. 地质科学, 33(3): 318~328.
- 郭春影. 2009. 胶东三山岛-仓上金矿带构造-岩浆-流体成矿系统[D]. 北京: 中国地质大学.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481~492.
- 侯建华, 任天龙, 王来明, 等. 2021. 胶东地区晚侏罗世玲珑期花岗岩[J]. 山东国土资源, 37(9): 1~11.
- 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 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[J]. 科学通报, 49(12): 1191~1198.
- 李洪奎, 李大鹏, 耿科, 等. 2017. 胶东地区燕山期岩浆活动及其构造环境——来自单颗锆石 SHRIMP 年代学的记录[J]. 地质学报, 91(1): 163~179.
- 李增达, 于晓飞, 王全明, 等. 2018. 胶东三佛山花岗岩的成因: 成岩物理化学条件、锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd 同位素约束[J]. 岩石学报, 34(2): 447~468.
- 林博磊, 李碧乐. 2013. 胶东玲珑花岗岩的地球化学、U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素及地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 40(2): 147~160.
- 刘建辉, 刘福来, 刘平华, 等. 2011. 胶北早前寒武纪变质基底多期岩浆-变质热事件: 来自 TTG 片麻岩和花岗质片麻岩中锆石 U-Pb 定年的证据[J]. 岩石学报, 27(4): 943~960.
- 刘晓阳, 谭俊, 王怀洪, 等. 2020. 胶东范家庄地区晚侏罗世低镁埃达克质花岗岩成因及构造背景[J]. 地球科学, 45(2): 451~466.
- 罗贤冬, 杨晓勇, 段留安, 等. 2014. 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, 88(10): 1874~1888.
- 罗镇宽, 关康, 苗来成, 等. 1999. 招远-莱州地区花岗岩类继承锆石年龄及其意义[J]. 山东地质, 15(3): 24~30, 57.
- 罗镇宽, 苗来成. 2002. 胶东招掖地区花岗岩和金矿床[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1~157.
- 吕古贤, 李洪奎, 丁正江, 等. 2016. 胶东地区“岩浆核杂岩”隆起-拆离带岩期后热液蚀变成矿[J]. 现代地质, 30(2): 247~262.
- 苗来成, 罗镇宽, 黄佳展, 等. 1997. 山东招掖金矿带内花岗岩类侵入体锆石 SHRIMP 研究及其意义[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 27(3): 207~213.
- 牛玉勤, 姜成良, 李翠云, 等. 1990. 优先浮选锆英石的新工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), (4): 13~15, 22.
- 牛玉勤, 姜成良, 李翠云, 等. 1993. 海滨砂矿中钛铁矿、金红石、独居石与锆英石浮选分离的研究[J]. 矿冶, 2(1): 23~29.
- 任纪舜, 牛宝贵, 刘志刚. 1999. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合合作[J]. 地学前缘, 6(3): 85~93.
- 任天龙, 王来明, 朱学强, 等. 2021. 胶东地区早白垩世伟德山期花岗岩[J]. 山东国土资源, 37(10): 1~12.
- 宋彪. 2015. 用 SHRIMP 测定锆石 U-Pb 年龄的工作方法[J]. 地质通报, 34(10): 1777~1788.
- 宋英昕, 宋明春, 李世勇, 等. 2019. 胶东晚中生代三期成矿岩体和 3.5 Ga 锆石发现及成矿动力学背景[J]. 地质学报, 93(2): 440~458.
- 陶有兵, 王来明, 黄永波, 等. 2021. 胶东地区早白垩世崂山期花岗岩[J]. 山东国土资源, 37(10): 13~22.
- 万多. 2014. 山东胶东地区招平断裂带北段金矿成矿规律与成矿预测[D]. 长春: 吉林大学.
- 万渝生, 宋志勇, 王来明, 等. 2017. 华北克拉通太古宙典型地区栖霞县幅 1:5 万地质图修编——野外地质调查和 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年[J]. 地质通报, 36(11): 1927~1941.
- 王斌, 宋明春, 霍光, 等. 2021. 胶东晚中生代花岗岩的源区性质与构造环境演化及其对金成矿的启示[J]. 岩石矿物学杂志, 40(2): 288~320.
- 王来明, 任天龙, 刘汉栋, 等. 2021. 胶东地区中生代花岗岩划分[J]. 山东国土资源, 37(8): 1~14.
- 王立功, 祝德成, 郭瑞朋, 等. 2018. 胶西北仓上、三山岛岩体二长花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素研究[J]. 地质学报, 92(10): 2081~2095.
- 王瑞良, 张招崇, 曾庆栋, 等. 2019. 胶东栖霞金矿集区早白垩世花岗岩形成时代及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 43(1): 186~198.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 24(6): 1145~1174.
- 谢士稳, 王舫, 刘倩. 2022. 胶北地体古元古代中期花岗岩片麻岩的成因和构造意义——SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和全岩地球化学约束[J]. 岩石矿物学杂志, 41(2): 371~395.

- 杨立强, 邓 军, 王中亮, 等. 2014. 胶东中生代金成矿系统[J]. 岩石学报, 30(9): 2 447~2 467.
- 阳琼艳. 2013. 胶东玲珑金矿中生代岩浆作用与金成矿动力学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 于 昆. 2014. 招平断裂带金矿床岩石地球化学特征及其地质意义[D]. 合肥: 合肥工业大学.
- 于晓卫, 王来明, 刘汉栋, 等. 2021. 胶东地区早白垩世郭家岭期花岗岩[J]. 山东国土资源, 37(9): 12~25.
- 于晓卫, 王来明, 刘汉栋, 等. 2023. 胶东中生代花岗岩与金矿关系及成矿期划分[J]. 地质学报, 97(6): 1 848~1 873.
- 曾华霖, 万天丰, Teyssier Christian, 等. 1999. 山东玲珑花岗质杂岩体三维形态的重力模拟[J]. 地球科学, 24(6): 607~612.
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限[J]. 中国科学 D 辑, 33(10): 913~920.
- 张保科, 温宏利, 王 蕾, 等. 2011. 封闭压力酸溶-盐酸提取-电感耦合等离子体质谱法测定地质样品中的多元素[J]. 岩矿测试, 30(6): 737~744.
- 张国伟. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1~855.
- 张华锋, 翟明国, 何中甫, 等. 2004. 胶东昆崙山杂岩中高锆花岗岩地球化学成因及其意义[J]. 岩石学报, 20(3): 369~380.
- 张 娟. 2011. 苏鲁造山带中生代岩浆岩地球化学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学.
- 张 旗, 钱 青, 王二七, 等. 2001. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示[J]. 地质科学, 36(2): 248~255.
- 张瑞忠. 2017. 招平金矿带构造控矿机理及深部成矿预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 张 田, 张岳桥. 2008. 胶北隆起晚中生代构造-岩浆演化历史[J]. 地质学报, 82(9): 1 210~1 228.
- 张哲坤. 2020. 古太平洋俯冲对华北克拉通陆内变形及岩浆作用的制约[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所).
- 赵 睿. 2016. 胶东半岛构造演化及金成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学.
- 赵 越, 徐 刚, 张拴宏, 等. 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. 地学前缘, 11(3): 319~328.
- 郑永飞. 2008. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别-苏鲁造山带为例[J]. 科学通报, 53(18): 2 129~2 152.
- 朱凤丽, 张 强. 2012. 山东栖霞地区金矿找矿方向探讨[J]. 西部探矿工程, 24(4): 161~164.
- 朱奉三. 1980. 混合岩化热液金矿床成矿作用初步研究——以招掖地区的金矿床为例[J]. 地质与勘探, 16(7): 1~10.