

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

王斌¹, 宋明春¹, 霍光¹, 周明岭¹, 徐忠华¹, 蒋雷¹, 宋英昕², 李杰³

(1. 山东省深部金矿探测大数据应用开发工程实验室, 山东省地矿局深部金矿勘查评价重点实验室, 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东威海 264209; 2. 山东省地质科学研究院, 山东济南 250013; 3. 河北地质大学资源学院, 河北石家庄 050031)

摘要: 胶东地区位于华北板块与大别-苏鲁造山带拼合位置的东北端, 晚中生代发育强烈的构造-岩浆事件, 是研究区域构造活动体制转换和克拉通破坏过程的理想之地。本文以晚中生代花岗岩为研究对象, 通过详细的岩相学、岩石地球化学、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及 Sr-Nd 同位素研究, 探讨了岩浆源区性质和成岩成矿的构造环境演变历史。研究表明, 胶东地区的玲珑型花岗岩、郭家岭型花岗岩、伟德山型花岗岩的侵位时代分别为 163.2~157.9、132.9~130.0 和 121.3~116.7 Ma, 崂山型花岗岩和脉岩的侵位时代分别为 125.0 和 120.7 Ma。由侏罗纪至早白垩世, 岩石化学成分由高钾钙碱性系列→橄榄安粗岩系列, 由过铝质→偏铝质; 微量元素由高 Ba、Sr→低 Ba、Sr, 由高 Sr 低 Y→低 Sr 高 Y; 稀土元素由无或弱正铈异常→显著负铈异常; 花岗岩类型由 S 型→I 型→A 型; 地幔性状的 EM2 型向 EM1 型演化, 由富集地幔转向亏损地幔或由岩石圈转向软流圈演变。胶东地区晚中生代花岗岩的岩浆演化特征是深层次构造背景转换的反映, 即由华北-扬子板块构造体系向欧亚-太平洋板块构造体系和由挤压机制向伸展机制的转换, 在这一过程中发生的早白垩世热隆-伸展构造为胶东大规模金成矿提供了有利条件。

关键词: 胶东地区; 晚中生代花岗岩类; 地球化学特征; 源区性质; 构造环境演化; 热隆-伸展; 金矿

中图分类号: P588.12¹; P618.51

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)02-0288-33

Source characteristics and tectonic evolution of Late Mesozoic granites in Jiaodong and their implications for gold mineralization

WANG Bin¹, SONG Ming-chun¹, HUO Guang¹, ZHOU Ming-ling¹, XU Zhong-hua¹, JIANG Lei¹,
SONG Ying-xin² and LI Jie³

(1. Deep Gold Mine Exploration Big Data Application Development Engineering Laboratory in Shandong Province, Key Laboratory of Deep Gold Exploration and Evaluation of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Shandong Provincial No. 6 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Weihai 264209, China; 2. Institute of Geological Sciences of Shandong Province, Jinan 250013, China; 3. College of Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: Located at the junction of the southeastern margin of the North China Craton and the northeastern section of the Dabie-Sulu orogenic belt, the Jiaodong area is an ideal place for studying the transformation of regional tectonic

收稿日期: 2020-10-21; 接受日期: 2021-01-19; 编辑: 郝艳丽

基金项目: NSFC-山东联合基金(U2006201); 山东省重点研发计划(2017CXGC1604); 山东省泰山学者建设工程专项经费(ts201511076); 山东省地矿局科研项目(KY2018002); 山东省第六地质矿产勘查院青年创新基金(DKLY201901)

作者简介: 王斌(1990-), 男, 汉族, 硕士, 工程师, 从事矿产勘查、区域地质调查及构造地质学研究工作, E-mail: wangbinjlu@qq.com; 通讯作者: 宋明春(1963-), 男, 博士, 工程技术应用研究员, 主要从事矿产勘查、区域地质调查及相关研究, E-mail: mingchuns@163.com。

mechanism and craton destruction. In this paper, the authors chose the Late Mesozoic granite as the research object, and carried out detailed petrographic, petrogeochemical, zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronological and Sr-Nd isotope studies, focusing on the origin and evolution history of magma and geodynamic mechanism of regional diagenesis and mineralization. The results show that the emplacement ages of Jurassic continental crust remelted Linglong-type granite, Cretaceous crust-mantle mixed Guojialing-type granite and Weideshan-type granite are 163.2~157.9 Ma, 132.9~130.0 Ma, and 121.3~116.7 Ma, respectively, and the emplacement ages of Cretaceous Laoshan-type granite and vein rock are 125.0 Ma and 120.7 Ma, respectively, which are basically in line with the previous age test data. From Jurassic to Early Cretaceous, the chemical composition of granites evolved from high-potassium calc-alkaline series to shoshonite series, i. e., from peraluminous to metaluminous, trace element content evolved from high Ba-Sr to low Ba-Sr and from high Sr, low Y to low Sr and high Y, REE varied from no or weak positive Eu anomaly to significant negative Eu anomaly, and the type of granites varied from S-type to I-type and A-type. It shows the evolution trend from EM2 enriched mantle to EM1 enriched mantle, from enrichment to depletion or from lithosphere to asthenosphere. The Jiaodong area in the Late Mesozoic experienced the transformation from North China-Yangtze tectonic system to Eurasian-Pacific tectonic system and from compression mechanism to extension mechanism. The strong thermal-uplift extension structure in Early Cretaceous provided favorable conditions for large-scale gold mineralization.

Key words: Jiaodong area; Late Mesozoic granites; geochemical features; source characteristics; tectonic evolution; thermal upwelling-extension; gold deposit

Fund support: NFSC-Shandong United Fund (U2006201); Key Research and Development Project of Shandong Province (2017CXGC1604); Taishan Scholar Special Project Fund (ts201511076); Scientific Research Project of Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (KY2018002); Youth Innovation Fund of No. 6 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province (DKLY201901)

花岗岩作为大陆地壳的主要组成部分,其形成与壳幔相互作用和板块构造演化密切相关,形成于不同源区和构造环境下的花岗岩,具有其特有的岩石学与地球化学特征,因此,花岗岩研究对推演大陆构造演化历史具有重要意义(郭春丽等,2004)。胶东地区位于华北板块与大别-苏鲁造山带拼合位置的东北端,发育晚中生代强烈的构造-岩浆事件,岩浆岩类型多样,是研究晚中生代区域构造活动体制转换和克拉通破坏过程的理想之地。胶东晚中生代花岗岩类主要由玲珑型花岗岩($164\pm 2\sim 140\pm 4$ Ma)、郭家岭型花岗岩($130\pm 3\sim 125\pm 2$ Ma)、伟德山型花岗岩($126\pm 3\sim 108\pm 2$ Ma)和崂山型花岗岩($120\pm 2\sim 107\pm 2$ Ma)组成(胡世玲等,1987;徐洪林等,1997;关康等,1998;苗来成等,1998;Wang *et al.*, 1998;Zhao *et al.*, 1998;Zhang *et al.*, 2003a, 2003c;周建波等,2003;Hu *et al.*, 2004;郭敬辉等,2005;李俊建等,2005;邱连贵等,2008;谭俊等,2008;张田等,2008;Goss *et al.*, 2010;Zhang *et al.*, 2010;王

世进等,2010,2011;Yang *et al.*, 2012;丁正江等,2013;Ma *et al.*, 2013, 2014a;罗贤冬等,2014;董学等,2020;宋英昕等,2020)。前人对花岗岩类的地质和地球化学特征、同位素年龄、成因机制、岩浆活动的构造背景等进行了较多研究(徐贵忠等,2001;Yang, 2003;周新华,2006;张田等,2008),也研究了与胶东巨量金成矿有关的构造-岩浆作用过程,认识到早白垩世伸展作用及岩石圈减薄对成岩成矿的重要影响,但尚缺乏对花岗岩类地球化学特征演化及其指示的大地构造背景转化的系统研究,制约了对该区岩浆活动的构造驱动机制和大规模金成矿机理的深入理解。本文通过对胶东地区晚中生代花岗岩类的岩相学、岩石地球化学、Sr-Nd同位素组成、锆石 U-Pb 年代学等方面的综合研究,讨论了花岗岩类的侵位时代、岩浆源区及构造环境演化,揭示了晚中生代构造体制转换过程,为华北克拉通东部壳幔相互作用、岩浆演化和大规模成矿作用研究提供了重要依据。

1 区域地质背景

胶东地区位于大别山-苏鲁造山带的西北部,华北板块东南缘与大别-苏鲁造山带东北段的拼贴位置,由隶属华北板块的胶北隆起、胶莱盆地和隶属苏鲁超高压带的威海隆起组成(图1;宋明春,2008;宋明春等,2009)。胶北隆起和威海隆起主要由稳定的前寒武纪基底变质岩系和中生代花岗岩类侵入岩组成。白垩纪胶莱盆地为伸展盆地,由莱阳群、王氏群陆相沉积地层和青山群火山岩系组成。胶东最发育的一组断裂是NE-NNE走向断裂,其次为近EW-NEE走向断裂。EW向断裂连续性较差,零星出露地表。华北陆块(胶北隆起)和大别-苏鲁超高压变质带(威海隆起)的拼贴位置大致位于牟平-即墨断裂带附近。NNE-NE走向断裂为胶东金矿的控矿断裂,自西向东主要依次有三山岛断裂带、焦家断裂带、招远-平度断裂带、西林-陡崖断裂带和金牛山断裂带。

胶东地区晚中生代岩浆岩大规模出露,约占胶东陆地总面积的25%,主要为广泛发育的花岗岩类侵入岩、密集带状分布的中基性-酸性脉岩和沿裂隙

盆地分布的火山岩(宋明春等,2003;李洪奎等,2016)。花岗岩类主要包括侏罗纪玲珑型花岗岩和白垩纪郭家岭型花岗岩、伟德山型花岗岩、崂山型花岗岩,其中,玲珑型和郭家岭型花岗岩是胶东金矿的主要赋矿围岩。各类型花岗岩均由诸多花岗岩体组成。玲珑型花岗岩典型岩体包括玲珑岩体、毕郭岩体、鹊山岩体和昆嵛山岩体等,其岩性主要为不同结构、构造或特征矿物含量的二长花岗岩类。郭家岭型花岗岩主要分布于胶西北地区,包括仓上、上庄、北截、丛家、曲家、郭家岭、范家店和泽头等岩体,其岩性主要由二长闪长岩、石英二长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩等组成,具似斑状结构。岩体内部发育以椭圆形为主、定向排列的闪长质包体。伟德山型花岗岩广泛分布于早前寒武纪变质岩系发育区域,规模较大,重要岩体有伟德山、院格庄、南宿、牙山、艾山、三佛山和海阳等岩体,主要岩石类型有闪长岩、石英二长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩,岩石常具似斑状结构,其内有较多微粒闪长质包体。崂山型花岗岩主要分布在胶东南沿海地区,典型岩体如崂山、龙须岛、招虎山、大泽山等,为二长花岗岩-正长花岗岩-碱长花岗岩系列侵入岩(赵广涛等,1997;李洪奎等,2016;宋明春等,2017)。

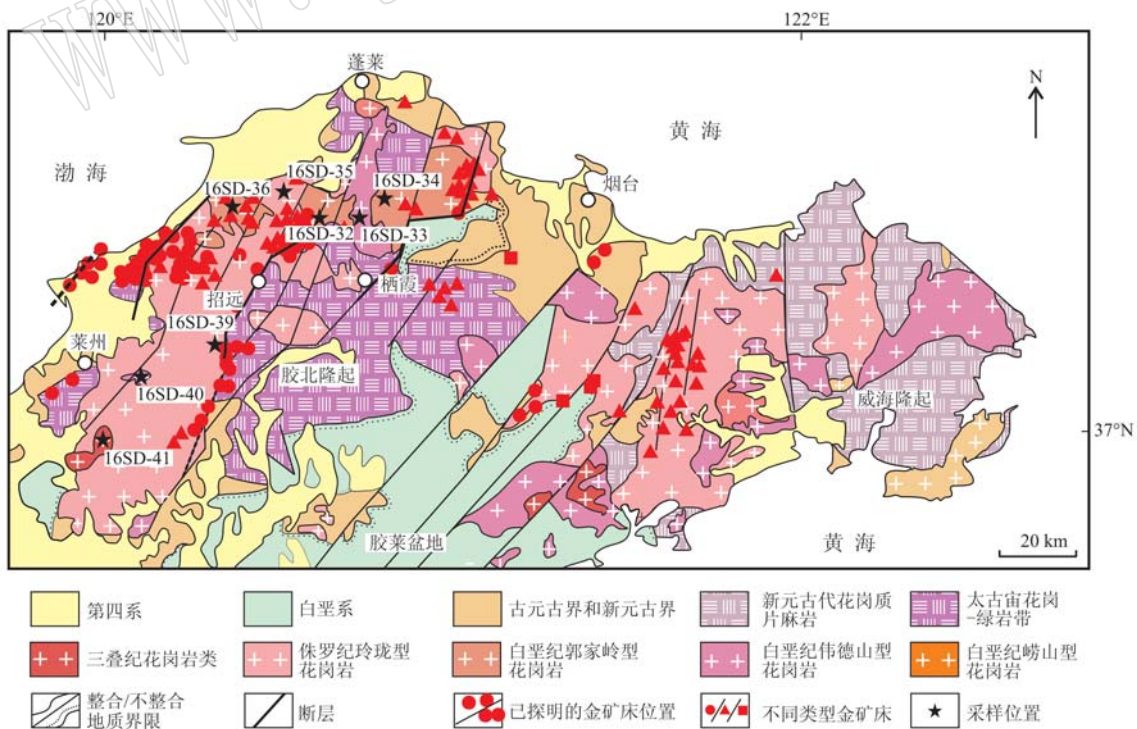


图1 胶东地区区域地质图(据宋明春等,2018)

Fig. 1 Regional geological map of Jiaodong area showing sampling sites(modified after Song Mingchun *et al.*, 2018)

2 样品采集与岩相特征

本次针对胶西北金矿床集中区附近的侏罗纪玲珑型花岗岩(玲珑岩体崔召单元)和白垩纪郭家岭型花岗岩(曲家、北截岩体)、伟德山型花岗岩(艾山、南宿岩体)、崂山型花岗岩(大泽山岩体)及白垩纪脉岩进行了调查研究,采集岩石样品进行了岩相学、岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及岩石 Sr-Nd 同位素测试工作。

2.1 玲珑型花岗岩

片麻状含斑中粒黑云二长花岗岩(16SD-35, 坐标: E120°29'45", N 37°33'36")采自下丁家镇北,南山集团南,北邢家村 S215 国道东侧,为新鲜露头,有宽约 5 cm 的伟晶岩脉。岩石样品呈浅灰白色,具中细粒结构、片麻状构造(图 2a),主要矿物成分为斜

长石(30%)、钾长石(25%)、石英(30%)以及黑云母(5%),另外有少量副矿物如石榴子石、锆石、榍石等。斑晶为斜长石,含量 10%左右,长径多在 1 cm 左右。斜长石呈自形-半自形板柱状,大小 0.5~3 cm 不等,部分发生绢云母化蚀变。钾长石呈自形-半自形柱状或板状,格子双晶发育,大小 0.2~1 cm 不等。石英多为他形中细粒,粒径 0.5~1 cm,普遍具有波状消光。

片麻状中细粒二长花岗岩(16SD-39, 坐标: E120°20'11", N 37°12'30")采自招远大尹格庄金矿西小尹格庄东,为新鲜露头。岩石样品呈淡红色,具中细粒结构、片麻状构造,主要矿物成分为钾长石(35%)、斜长石(30%)、石英(32%)以及黑云母(3%),另外有少量副矿物如角闪石、锆石、榍石等。可见矿物定向排列及定向拉长,石英拉长长宽比 3:1 左右(图 2b)。

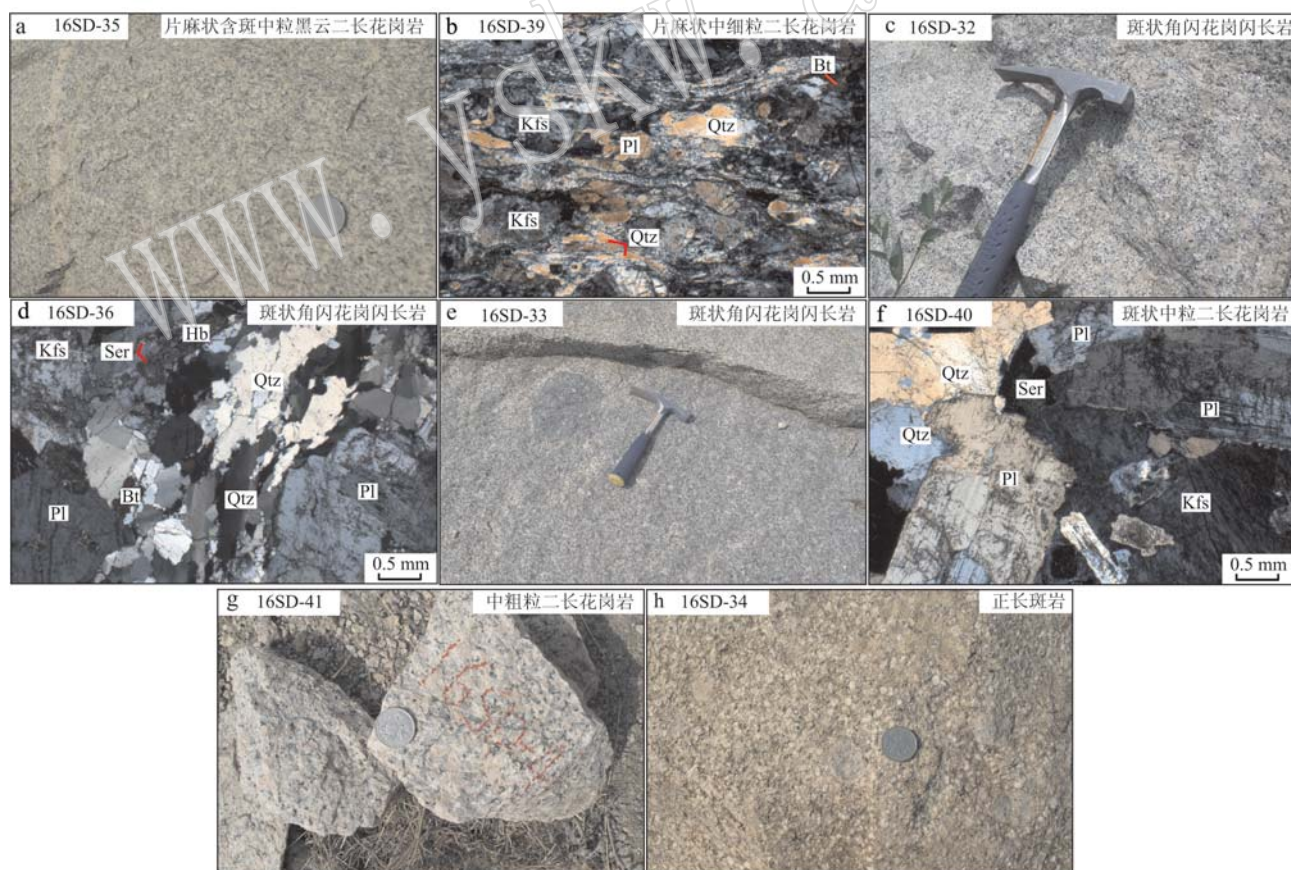


图 2 胶东地区晚中生代花岗岩的野外及正交偏光显微镜下特征

Fig. 2 Field outcrop and photomicrographs under crossed nicols of Late Mesozoic granite in Jiaodong area, Shandong Province

Qtz—石英; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Bt—黑云母; Hb—角闪石; Ser—绢云母

Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Kfs—alkali feldspar; Bt—biotite; Hb—hornblende; Ser—sericite

2.2 郭家岭型花岗岩

斑状角闪花岗闪长岩(16SD-32, 坐标: E120°38'09", N 37°32'33")采自龙口市东南,王屋水库西南公路边小采坑,为新鲜露头,有细粒闪长质包体。斑状角闪花岗闪长岩(16SD-36, 坐标: E120°22'15", N37°31'53")采自招远市西北,狗山李家村东,为新鲜露头,西侧见有与玲珑中细粒二长花岗岩呈侵入接触。岩石均呈灰白色,似斑状结构,块状构造,基质为中细粒花岗结构(图2c)。主要矿物成分为斜长石(35%)、钾长石(30%)、石英(25%)及少量角闪石(6%)、黑云母(4%),副矿物有锆石、榍石和磷灰石等。斑晶主要为钾长石,粒径长3~5 cm。基质中石英呈它形粒状充填在长石之间,粒径大小一般为0.05~8 mm,可见波状、带状消光;斜长石呈半自形板状,常见聚片双晶,偶见环带结构,微弱高岭土化、绢云母化,粒径一般为0.1~5 mm;钾长石呈半自形板状,在基质中大小一般为0.1~2 mm的细粒,2~4 mm的中粒次之;见少量角闪石(8%),呈它形-半自形柱粒状,多为普通角闪石,具明显黄绿色-绿色多色性,局部发生绿泥石化、绿帘石化;黑云母呈它形鳞片状-叶片状,常定向排列或环绕长石斑晶分布,或呈集合体产出(图2d)。

2.3 伟德山型花岗岩

斑状角闪花岗闪长岩(16SD-33, 坐标: E120°45'37", N 37°30'54")采自栖霞村里集镇柳格庄村西500 m采坑,野外见有较多闪长质包体,较大包体长径约20 cm。岩石呈似斑状结构、块状构造(图2e),斑晶长径3~5 cm。矿物组成主要为斜长石(45%)、钾长石(20%)、石英(20%)、角闪石(10%),黑云母等其他矿物约占5%,镜下可见斜长石广泛发育高岭土化蚀变。

斑状中粒二长花岗岩(16SD-40, 坐标: E120°06'53", N37°09'01")采自招远南宿村东的南宿岩体。岩石呈似斑状结构,基质中粒花岗结构,块状构造。主要矿物组成为斜长石(35%)、钾长石(30%)、石英(30%)、黑云母(3%)、角闪石(2%),有少量榍石、磷灰石等副矿物,镜下可见长石发生绢云母化蚀变。钾长石斑晶含量约占10%,长径2~4 cm,基质中主要矿物粒径一般在0.5~5 mm(图2f)。

2.4 崂山型花岗岩

中粗粒二长花岗岩(16SD-41, 坐标: E119°58'53", N37°00'24")采自平度大泽山镇秦姑庵村西北采坑。岩石呈不等粒花岗结构、块状构造(图2g)。

主要矿物成分为斜长石(40%)、钾长石(25%)、石英(30%)、黑云母(3%)、角闪石(2%)、少量磷灰石和榍石等副矿物。钾长石斑晶含量约占10%,长径2~3 cm,基质中主要矿物粒径一般在3~10 mm,多数 \geq 5 mm。野外露头见有闪长质包体,直径约5 cm。

2.5 脉岩

正长斑岩样品(16SD-34, 坐标: E120°47'18", N37°32'34")采自蓬莱村里集镇陈家沟村东采砂场。此处主要为郭家岭型花岗岩露头,风化较严重,见有一条正长斑岩脉,宽约20 cm。岩石呈斑状结构、块状构造,基质具粗面结构。斑晶主要为正长石,呈长板状自形晶,卡式双晶发育,粒径一般为1.5~3.0 cm,基质由斜长石微晶和少量角闪石等组成(图2h)。

3 实验测试方法

3.1 岩石地球化学测试

岩石主、微量及稀土元素测试分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,样品经人工粉碎至200目。主量元素采用X射线荧光法(XRF)测试,微量及稀土元素利用电感耦合等离子体质谱法测试,仪器分别为X荧光光谱仪 Philips PW2404和等离子质谱仪 ELEMENT-I(Finnigan-MAT有限公司制造),精度优于1%和5%。依据标准为《电感耦合等离子体质谱方法通则(DZ/T0223-2001)》。

3.2 锆石 U-Pb 年代学测试

挑选中生代花岗岩类8件样品进行了锆石 U-Pb 年龄测试。同位素定年样品处理及分析测试流程主要包括碎样、锆石颗粒挑选、锆石制靶、反射光及 CL 图像采集、选定测试锆石颗粒、实验测试及数据处理等。在河北廊坊市宏信地质勘查技术服务有限公司完成锆石挑选。首先将野外采集岩石样品粉碎,然后采用淘选与电磁选方法进行锆石分选。将挑选出的锆石用环氧树脂制靶并抛光表面,在此基础上对锆石进行反射光和阴极发光(CL)图像采集。锆石 U-Pb 定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,采用 Agilent7500a 等离子质谱仪和 GeoLas2005 激光剥蚀系统,激光束斑直径 32 μm 。具体的仪器操作流程详见 Liu 等(2008)。U-Pb 定年中采用标准锆石 91500 作为外标进行同位素分馏校正。样品的 U-Th-Pb 同位素比值和年龄处理均采用 ICPMSDataCal 软件完成。

3.3 全岩 Sr-Nd 同位素测试

选择崂山型花岗岩和脉岩进行本项测试。全岩 Sr-Nd 同位素测定在核工业北京地质研究院分析测试中心完成。全岩 Sr-Nd 同位素分析首先称量全岩粉末(200 目) 50~100 mg, 使用纯化 HF-HNO₃-HCl 溶样, 之后加入纯化 HCl 使用 Rb-Sr (AG50W-X12, 200~400 目)、Sr-Nd (LN 树脂) 交换柱进行分离提纯和元素提取。样品采用热电离质谱仪 TIMS 进行测试, Sr-Nd 同位素比值测定分别采⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.119 4 和¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.712 9 进行标准化校正。在样品测试中所测定的 Alfa Nd 标样和 NBS-987 Sr 标样的 Sr-Nd 同位素比值, 分别为¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512 433 ± 0.000 008 (±2σ) 和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.710 252 ± 0.000 015 (±2σ)。

4 测试结果

4.1 岩石地球化学特征

本文对 8 件胶东地区晚中生代花岗岩样品进行了主、微量元素测试分析, 结果详见表 1 和表 2。

4.1.1 玲珑型花岗岩

玲珑型花岗岩样品 (16SD-35、16SD-39) 的主、微量元素测试结果列于表 1。岩石化学成分中 SiO₂ 含量为 72.55%~75.86%, 平均 74.25%, 属于酸性岩类的化学组成范畴; 岩石全碱 (Na₂O+K₂O) 含量为 8.23%~9.32%, Na₂O/K₂O 值为 0.91~1.15, 属于钾质型, 在 TAS 图解 (图 3a) 中投入花岗岩区域, 在 K₂O-SiO₂ 图解 (图 3b) 中投入高钾钙碱性系列。Al₂O₃ 含量为 14.01%~15.07%, CaO 含量为 0.37%~1.64%, 铝饱和指数 (A/CNK) = 1.03~1.13, 在 A/NK-A/CNK 图解 (图 3c) 中均投入过铝质区域。MgO 含量为 0.06%~0.29%, TFe₂O₃ 介于 0.09%~1.32%, 镁指数 (Mg[#]) [Mg[#] = 100 (MgO/40.31) / (MgO/40.31+0.899 8 TFe₂O₃/71.85)] 为 29.07~60.60, 多数小于 40。TiO₂ 和 P₂O₅ 含量分别为 0.03%~0.15% 和 0.01%~0.04%, 含量较低。岩石主量元素氧化物 (TFe₂O₃、MgO 等) 与 SiO₂ 含量呈负相关 (图 4), 可能经历了辉石、磷灰石、钛铁矿等矿物的分离结晶 (Sun and McDonough, 1989)。

在稀土元素球粒陨石标准化图 (图 5a) 上, 样品 16SD-35 稀土元素总量为 104.19 × 10⁻⁶ ~ 135.09 × 10⁻⁶, 表现出明显的轻稀土元素 (LREE) 富集和重稀土元素 (HREE) 相对亏损, LREE/HREE 值为 20.71

~25.65, (La/Yb)_N = 45.97~52.02, 指示轻、重稀土元素发生了强烈分异, 呈右倾型模式; δEu 为 0.92~1.02, 没有明显的铕负异常, 部分样品有轻微正异常, 暗示石榴石或石榴石+角闪石可能是部分熔融的残留相, 局部可能有斜长石的分离结晶现象。样品 16SD-39 则显示出较平坦的稀土元素配分模式, 稀土元素总量较低 (14.74 × 10⁻⁶ ~ 28.46 × 10⁻⁶), LREE/HREE 值为 1.58~5.99, (La/Yb)_N = 0.70~4.47, 指示轻、重稀土元素分异不明显, δEu 为 0.92~1.58, 多数具明显的 Eu 正异常。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图 (图 5b) 上, 玲珑型花岗岩样品显示富集 Rb、Ba、Sr、K、Pb 等大离子亲石元素 (LILE) 以及相对亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素 (HFSE) 特征。微量元素具有高 Ba、Sr (Ba = 606 × 10⁻⁶ ~ 2 044 × 10⁻⁶, Sr = 202 × 10⁻⁶ ~ 640 × 10⁻⁶) 和低 Y、Yb (Y = 4.23 × 10⁻⁶ ~ 13.60 × 10⁻⁶, Yb = 0.36 × 10⁻⁶ ~ 2.48 × 10⁻⁶) 的特点 (图 6a), 具有埃达克岩特征。

4.1.2 郭家岭型花岗岩

郭家岭型花岗岩样品 (16SD-32、16SD-36) 的主、微量元素测试结果列于表 1。岩石化学成分中 SiO₂ 含量为 68.66%~70.36%, 平均 69.48%, 属于酸性岩类; 岩石全碱 (Na₂O+K₂O) 含量介于 7.95%~9.01%, Na₂O/K₂O 为 1.10~1.60, 在 TAS 图解 (图 3a) 中投入花岗岩范围, 少量投入正长岩和二长岩范围, 在 K₂O-SiO₂ 图解 (图 3b) 中投入高钾钙碱性系列。Al₂O₃ 含量为 14.99%~16.60%, CaO 含量为 2.30%~2.79%, 铝饱和指数 (A/CNK) = 0.94~1.00, 在 A/CNK-A/NK 图解 (图 3c) 中落入偏铝质区域。MgO 含量为 0.88%~1.15%, TFe₂O₃ 含量介于 1.59%~2.02% 之间, Mg[#] 值为 52.15~53.28。TiO₂ 和 P₂O₅ 含量分别为 0.25%~0.29% 和 0.08%~0.10%。在 Harker 图解 (图 4) 上, 多数氧化物随 SiO₂ 含量增高而降低, 具有良好的线性关系, 而 Na₂O 则与 SiO₂ 呈正相关关系, 为典型的岩浆混合或结晶分异演化趋势。Sr/Y 值为 112.38~145.48, 具有埃达克岩特征。

在稀土元素球粒陨石标准化图 (图 5a) 上, 郭家岭型花岗岩样品显示出相似的稀土元素特征, 岩石稀土元素总量为 82.32 × 10⁻⁶ ~ 281.12 × 10⁻⁶, 表现出明显的 LREE 富集和 HREE 相对亏损特征, LREE/HREE 值为 13.21~21.54, 呈 LREE 高度富集的模式; (La/Yb)_N = 17.83~50.48, 指示轻、重稀土元素

表 1 胶东地区晚中生代玲珑型、郭家岭型花岗岩的主量($w_B/\%$)、微量和稀土元素($w_B/10^{-6}$)分析结果
Table 1 Major ($w_B/\%$), trace element and REE ($w_B/10^{-6}$) analyses of Late Mesozoic Linglong- and Guojialing-type granites in Jiaodong area, Shandong Province

样品号	玲珑型花岗岩										郭家岭型花岗岩									
	16SD-35	16SD-35	16SD-35	16SD-39	16SD-39	16SD-39	16SD-39	16SD-39	16SD-39	16SD-39	16SD-32	16SD-32	16SD-32	16SD-32	16SD-32	16SD-32	16SD-32	16SD-32	16SD-32	16SD-32
SiO ₂	73.20	72.73	73.30	72.55	74.93	75.74	75.74	75.86	69.50	68.84	69.80	70.36	69.55	69.26	68.66	69.84	69.84	69.84	69.84	
Al ₂ O ₃	14.85	15.00	14.70	15.07	14.45	14.07	14.01	15.60	15.83	15.27	14.99	14.99	16.18	16.29	16.60	16.05	16.05	16.05	16.05	
TTFe ₂ O ₃	1.18	1.31	1.05	1.32	0.09	0.21	0.33	1.89	2.02	1.81	1.90	1.90	1.61	1.66	1.59	1.67	1.67	1.67	1.67	
MgO	0.26	0.27	0.29	0.28	0.08	0.07	0.08	0.37	2.56	2.79	2.52	2.63	2.48	2.36	2.30	2.46	2.46	2.46	2.46	
CaO	1.61	1.64	1.57	1.64	0.48	0.61	0.48	4.28	4.59	4.65	4.40	4.53	5.03	4.77	4.72	4.89	4.89	4.89	4.89	
Na ₂ O	4.35	4.34	4.09	4.39	4.45	4.28	4.40	4.59	4.65	4.40	4.53	5.03	5.03	4.77	4.72	4.89	4.89	4.89	4.89	
K ₂ O	3.88	4.00	4.24	4.01	3.93	4.87	4.41	4.12	3.38	3.51	3.77	3.42	3.15	3.80	4.29	3.21	3.21	3.21	3.21	
MnO	0.03	0.03	0.02	0.03	0.00	0.00	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	
TiO ₂	0.13	0.14	0.12	0.15	0.03	0.05	0.05	0.28	0.28	0.29	0.27	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	
P ₂ O ₅	0.04	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01	0.09	0.10	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	
FeO	0.92	0.89	0.84	0.92	<0.10	0.17	0.26	1.31	1.22	1.05	1.41	1.03	1.03	1.05	1.00	1.08	1.08	1.08	1.08	
LOI	0.43	0.46	0.52	0.48	0.75	0.57	0.53	0.72	0.99	0.74	1.02	0.71	0.64	0.49	0.52	0.51	0.51	0.51	0.51	
Total	100.87	100.85	100.78	100.87	100.19	99.95	100.13	100.22	101.27	101.16	101.04	101.39	100.98	101.00	100.96	101.04	101.04	101.04	101.04	
Mg [#]	30.39	29.07	35.28	29.59	36.44	60.60	36.97	30.85	52.15	53.00	52.75	52.73	53.28	52.76	52.41	52.16	52.16	52.16	52.16	
Na ₂ O+K ₂ O	8.23	8.34	8.33	8.40	8.46	9.32	8.69	8.52	7.97	8.16	8.17	7.95	8.18	8.57	9.01	8.10	8.10	8.10	8.10	
Na ₂ O/K ₂ O	1.12	1.09	0.96	1.09	1.15	0.91	0.97	1.07	1.36	1.32	1.17	1.32	1.60	1.26	1.10	1.52	1.52	1.52	1.52	
A/CNK	1.04	1.04	1.04	1.03	1.12	1.07	1.09	1.13	0.98	0.96	0.96	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
A/NK	1.31	1.31	1.30	1.30	1.21	1.15	1.19	1.20	1.39	1.38	1.35	1.34	1.38	1.36	1.34	1.39	1.39	1.39	1.39	
Li	13.00	12.20	11.00	13.20	7.40	2.65	4.81	3.92	12.60	13.40	12.00	11.60	21.10	21.60	20.30	21.90	21.90	21.90	21.90	
Be	1.29	1.29	1.25	1.29	1.30	1.59	1.30	0.95	2.27	2.28	2.06	2.30	2.70	2.58	2.45	2.76	2.76	2.76	2.76	
Sc	1.59	1.69	1.19	1.53	1.46	1.73	1.65	1.33	4.22	4.91	4.51	4.63	3.74	3.82	3.72	3.74	3.74	3.74	3.74	
V	3.92	4.47	4.43	5.29	2.85	2.66	3.13	2.59	29.90	29.50	28.20	26.80	20.00	22.70	18.30	19.40	19.40	19.40	19.40	
Cr	1.10	1.00	1.51	1.25	0.97	1.09	0.75	0.70	4.51	4.80	4.04	4.25	3.15	3.24	3.03	3.16	3.16	3.16	3.16	
Co	0.83	0.93	0.82	0.91	0.33	0.11	0.22	0.20	9.78	11.00	9.23	9.88	8.09	8.20	7.54	8.22	8.22	8.22	8.22	
Ni	1.32	1.36	1.19	1.29	0.70	0.47	0.61	0.53	4.65	4.40	4.02	4.25	3.89	4.13	4.12	4.24	4.24	4.24	4.24	
Cu	2.29	3.10	2.37	2.64	9.45	1.04	2.71	1.45	4.65	4.40	4.02	4.25	3.89	4.13	4.12	4.24	4.24	4.24	4.24	
Zn	35.60	36.00	29.40	37.20	7.02	5.17	5.12	9.20	40.30	36.10	39.20	56.00	45.70	49.10	44.50	47.20	47.20	47.20	47.20	
Ga	18.4	18.9	17.4	18.1	16.7	22.2	17.6	15.4	22.2	21.8	20.6	20.8	23.6	23.5	23.3	23.6	23.6	23.6	23.6	
Rb	84.2	90.8	87.0	85.6	105.0	129.0	121.0	106.0	86.1	85.1	87.4	76.2	84.6	96.3	86.6	86.6	86.6	86.6	86.6	
Sr	596	640	586	614	287	202	261	244	926	972	945	876	1 673	1 655	1 621	1 592	1 592	1 592	1 592	
Y	5.90	4.95	5.22	5.55	11.20	13.60	5.95	4.23	8.24	7.29	6.86	6.18	11.50	11.80	12.60	13.00	13.00	13.00	13.00	
Mo	0.09	0.09	0.15	0.05	0.06	0.04	0.09	0.08	0.12	0.14	0.10	0.10	0.18	0.19	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	
Cd	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
In	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
Sb	0.02	0.02	0.02	0.04	0.12	0.06	0.08	0.10	0.06	0.07	0.08	0.10	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
Cs	0.77	1.08	0.69	0.66	0.80	0.63	0.75	0.70	1.57	1.69	1.32	1.52	0.78	0.85	0.80	0.82	0.82	0.82	0.82	
Ba	1 796	2 044	1 994	1 917	896	606	770	844	1 078	1 427	1 502	1 260	2 408	3 124	3 521	2 472	2 472	2 472	2 472	
W	0.06	0.06	0.07	0.05	0.33	0.21	0.23	0.18	0.11	0.10	0.08	0.07	0.07	0.08	0.15	0.10	0.10	0.10	0.10	

续表 1
Continued Table 1

样品号	玲珑型花岗岩										郭家岭型花岗岩									
	16SD-35 -1	16SD-35 -2	16SD-35 -3	16SD-35 -4	16SD-35 -1	16SD-39 -1	16SD-39 -2	16SD-39 -3	16SD-39 -4	16SD-39 -1	16SD-32 -1	16SD-32 -2	16SD-32 -3	16SD-32 -4	16SD-36 -1	16SD-36 -2	16SD-36 -3	16SD-36 -4		
Re	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002		
Tl	0.46	0.49	0.47	0.48	0.56	0.59	0.58	0.60	0.63	0.60	0.60	0.61	0.53	0.50	0.60	0.58	0.52	0.52		
Pb	24.5	26.9	25.6	24.3	16.1	23.2	22.5	17.6	32.4	32.4	33.0	32.8	31.7	31.3	32.9	35.9	29.7	29.7		
Bi	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10	0.10	0.11	0.11	0.09	0.03	0.04	0.09	0.04	0.04		
Th	5.93	5.38	5.23	4.95	3.58	2.92	1.98	2.14	6.88	5.73	5.73	6.27	6.46	11.20	10.50	13.60	10.70	10.70		
U	0.72	0.67	0.67	0.58	1.02	1.25	0.46	0.85	2.12	4.92	2.04	2.04	1.08	1.01	1.05	1.10	1.07	1.07		
Nb	6.28	6.12	5.12	5.87	11.90	8.13	8.27	6.00	6.60	5.75	5.61	5.61	5.16	11.50	11.50	12.30	13.00	13.00		
Ta	0.46	0.34	0.38	0.32	1.01	1.32	0.42	0.31	0.42	0.35	0.32	0.32	0.29	0.71	0.73	0.77	0.76	0.76		
Zr	24.9	26.4	21.2	27.5	30.6	38.4	13.4	24.8	17.1	15.4	12.6	12.6	13.7	22.5	16.4	22.5	25.8	25.8		
Hf	0.68	0.71	0.64	0.79	1.10	2.34	0.58	0.93	0.70	0.61	0.51	0.51	0.64	0.59	0.52	0.70	0.68	0.68		
La/Ta	62.61	104.41	72.89	93.75	5.07	1.95	6.33	11.58	50.24	52.00	71.25	71.25	72.41	87.46	80.55	94.81	78.95	78.95		
Nb/Ta	13.56	18.00	13.44	18.58	11.78	6.16	19.88	19.17	15.90	16.62	17.48	17.48	18.11	16.20	15.82	15.91	17.08	17.08		
Th/U	8.25	8.05	7.84	8.52	3.51	2.34	4.29	2.51	3.25	1.16	3.07	3.07	5.98	11.09	10.00	12.36	10.00	10.00		
Rb/Sr	0.14	0.14	0.15	0.14	0.37	0.64	0.46	0.43	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05		
Rb/Ba	0.05	0.04	0.04	0.04	0.12	0.21	0.16	0.13	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04		
Sr/Y	101.02	129.29	112.26	110.63	25.63	14.85	43.87	57.68	112.38	133.33	137.76	137.76	141.75	145.48	140.25	128.65	122.46	122.46		
La	28.80	35.50	27.70	30.00	5.12	2.58	2.66	3.59	21.10	18.20	22.80	22.80	21.00	62.10	58.80	73.00	60.00	60.00		
Ce	48.00	62.40	47.20	51.20	9.70	4.67	4.58	6.83	39.20	34.80	39.10	39.10	35.30	104.00	99.70	125.00	101.00	101.00		
Pr	5.08	6.58	4.95	5.40	1.27	0.64	0.68	0.91	4.56	3.90	4.42	4.42	3.98	11.80	11.30	14.00	11.30	11.30		
Nd	17.70	22.10	16.70	18.30	5.19	2.53	2.65	3.68	18.90	16.20	17.70	17.70	14.60	41.30	40.20	47.80	41.10	41.10		
Sm	2.31	2.65	2.22	2.35	1.29	0.77	0.73	0.92	2.97	2.66	2.91	2.91	2.46	6.20	5.79	6.97	6.36	6.36		
Eu	0.68	0.79	0.73	0.74	0.36	0.28	0.35	0.38	0.81	0.77	0.77	0.77	0.78	1.57	1.74	1.88	1.57	1.57		
Gd	2.15	2.33	2.09	2.11	1.04	0.73	0.59	0.70	2.49	2.22	2.27	2.27	1.96	4.92	4.59	5.85	5.10	5.10		
Tb	0.27	0.26	0.24	0.25	0.23	0.21	0.13	0.13	0.35	0.31	0.33	0.33	0.28	0.60	0.62	0.70	0.65	0.65		
Dy	1.25	1.11	1.17	1.19	1.43	1.42	0.74	0.64	1.63	1.47	1.42	1.42	1.32	2.62	2.55	2.99	2.88	2.88		
Ho	0.19	0.16	0.17	0.17	0.32	0.40	0.17	0.13	0.28	0.26	0.23	0.23	0.21	0.38	0.35	0.40	0.39	0.39		
Er	0.57	0.59	0.55	0.60	0.96	1.35	0.53	0.41	0.85	0.74	0.67	0.67	0.64	1.17	1.11	1.28	1.22	1.22		
Tm	0.07	0.07	0.07	0.08	0.18	0.31	0.11	0.08	0.13	0.10	0.11	0.11	0.09	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16		
Yb	0.40	0.48	0.36	0.44	1.18	2.48	0.69	0.54	0.80	0.60	0.59	0.59	0.59	0.91	0.84	0.98	0.97	0.97		
Lu	0.05	0.06	0.04	0.06	0.19	0.37	0.12	0.09	0.11	0.10	0.10	0.08	0.08	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12		
ΣREE	107.52	135.09	104.19	112.89	28.46	18.73	14.74	19.04	94.17	82.32	93.40	93.40	83.29	237.83	227.86	281.12	232.81	232.81		
LREE/HREE	20.71	25.65	21.24	22.04	4.14	1.58	3.77	5.99	13.21	13.21	15.39	15.39	15.10	20.91	21.05	21.54	19.28	19.28		
δEu	0.92	0.95	1.02	0.99	0.92	1.11	1.58	1.41	0.89	0.94	0.88	0.88	1.04	0.84	1.00	0.88	0.82	0.82		
δCe	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.92	0.92	0.88	0.88	0.87	0.87	0.88	0.88	0.87	0.87		
(La/Yb) _N	48.30	49.45	52.02	45.97	2.93	2.90	2.59	4.47	17.83	20.32	26.05	26.05	23.84	46.01	47.03	50.48	41.83	41.83		
(La/Sm) _N	7.84	8.43	7.85	8.03	2.50	2.10	2.30	2.46	4.47	4.30	4.93	4.93	5.37	6.30	6.39	6.59	5.93	5.93		
(Gd/Yb) _N	4.32	3.88	4.70	3.87	0.71	0.24	0.69	1.04	2.52	2.97	3.10	3.10	2.66	4.36	4.39	4.84	4.26	4.26		
(Ce/Yb) _N	30.89	33.35	34.01	30.10	2.13	0.49	1.71	3.26	12.71	14.90	17.14	17.14	15.37	29.56	30.59	33.16	27.02	27.02		

表 2 胶东地区晚中生代伟德山型、崂山型花岗岩和脉岩的主量 ($w_B/\%$)、微量和稀土元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果
 Table 2 Major ($w_B/\%$), trace element and REE ($w_B/10^{-6}$) analyses of Late Mesozoic Weideshan-, Laoshan-type granites and dike in Jiaodong area, Shandong Province

样品号	伟德山型花岗岩						崂山型花岗岩						脉岩				
	16SD-33	16SD-33	16SD-33	16SD-40	16SD-40	16SD-40	16SD-41	16SD-41	16SD-41	16SD-41	16SD-41	16SD-41	16SD-34	16SD-34	16SD-34	16SD-34	
SiO ₂	69.27	70.20	71.00	69.32	71.42	71.33	73.18	71.50	74.31	74.59	74.59	75.24	75.51	68.00	67.49	67.69	67.36
Al ₂ O ₃	14.65	14.65	14.36	15.10	14.42	14.53	13.61	14.63	13.95	13.72	13.57	13.23	13.23	15.10	15.15	14.87	15.11
TFe ₂ O ₃	2.68	2.30	2.11	2.56	1.81	1.71	1.77	1.67	0.87	0.83	0.74	0.90	0.90	2.93	3.05	3.11	3.09
MgO	1.51	1.25	1.19	1.40	0.81	0.77	0.81	0.79	0.26	0.26	0.23	0.27	0.27	1.60	1.68	1.72	1.69
CaO	2.77	2.32	2.28	2.69	1.78	1.64	1.94	1.84	0.97	0.89	0.90	0.91	0.91	2.69	2.64	2.80	2.74
Na ₂ O	4.10	3.87	3.88	4.03	3.95	3.88	4.10	4.10	4.20	3.90	3.95	3.88	3.88	4.15	4.16	4.03	4.09
K ₂ O	3.76	4.22	4.16	3.93	4.52	5.05	3.44	4.35	4.54	4.95	4.82	4.65	4.65	3.91	4.05	3.95	3.94
MnO	0.05	0.05	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
TiO ₂	0.36	0.30	0.30	0.33	0.25	0.24	0.25	0.24	0.13	0.13	0.11	0.14	0.14	0.38	0.39	0.40	0.41
P ₂ O ₅	0.17	0.14	0.13	0.16	0.12	0.11	0.11	0.11	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.20	0.21	0.21	0.21
FeO	1.71	1.40	1.12	1.48	0.96	1.03	1.16	0.97	0.53	0.67	0.52	0.50	0.50	1.49	1.54	1.54	1.74
LOI	0.65	0.65	0.52	0.39	0.86	0.67	0.70	0.70	0.65	0.62	0.33	0.39	0.39	0.99	1.10	1.15	1.26
Total	101.68	101.34	101.08	101.44	100.92	100.99	101.11	100.93	100.48	100.62	100.48	100.45	100.45	101.48	101.5	101.52	101.69
Mg#	52.74	51.84	52.77	52.00	46.90	47.08	47.67	48.22	37.49	37.92	37.88	36.93	36.93	51.96	52.18	52.28	52.00
Na ₂ O+K ₂ O	7.86	8.09	8.04	7.96	8.47	8.93	7.54	8.45	8.74	8.85	8.77	8.53	8.53	8.06	8.21	7.98	8.03
Na ₂ O/K ₂ O	1.09	0.92	0.93	1.03	0.87	0.77	1.19	0.94	0.93	0.79	0.82	0.83	0.83	1.06	1.03	1.02	1.04
A/CNK	0.92	0.97	0.95	0.96	0.98	0.98	0.97	0.99	1.03	1.02	1.02	1.02	1.01	0.95	0.94	0.93	0.94
A/NK	1.35	1.34	1.32	1.39	1.26	1.22	1.30	1.28	1.18	1.16	1.16	1.16	1.16	1.36	1.35	1.36	1.37
Li	25.0	12.8	14.9	18.4	17.2	17.7	19.9	17.5	42.8	39.4	39.3	34.9	34.9	11.9	13.6	13.2	13.8
Be	1.72	1.81	1.73	1.83	3.14	2.90	3.35	3.09	4.08	3.02	3.38	3.35	3.35	1.75	1.87	1.83	1.87
Sc	5.62	4.48	3.94	11.20	3.61	3.75	4.38	3.15	1.94	2.20	2.85	2.81	2.81	6.04	6.92	7.02	7.18
V	40.00	35.00	34.10	45.40	22.30	21.30	21.10	21.30	10.10	6.59	6.48	7.41	7.41	43.60	42.60	48.80	48.20
Cr	28.30	24.20	22.60	28.80	12.90	11.60	11.60	11.40	2.53	2.17	1.81	2.03	2.03	33.80	33.10	40.30	39.60
Co	7.09	5.97	5.17	6.55	3.83	3.47	3.70	3.36	1.37	0.88	0.82	0.89	0.89	7.75	8.39	8.22	7.91
Ni	12.20	9.61	9.09	10.60	5.75	5.21	5.75	5.37	1.43	1.27	1.38	1.22	1.22	14.00	14.40	16.10	15.80
Cu	5.60	5.27	5.60	4.72	3.93	3.85	3.82	3.80	2.04	2.07	2.16	2.30	2.30	7.04	8.07	8.11	8.14
Zn	55.4	39.9	30.5	40.1	25.2	24.1	24.1	23.1	29.6	20.9	29.7	25.5	25.5	41.1	43.6	46.2	44.9
Ga	18.0	17.1	16.8	17.2	19.1	18.9	18.5	19.0	18.5	17.5	17.5	17.0	17.0	17.2	18.0	18.8	18.8
Rb	101.0	106.0	110.0	102.0	154.0	174.0	129.0	151.0	200.0	195.0	190.0	180.0	180.0	93.7	101.0	104.0	105.0
Sr	604	535	501	594	562	509	471	522	215	194	190	177	177	746	711	770	818
Y	8.94	8.57	8.02	8.58	9.74	8.58	8.56	8.88	7.74	7.54	7.40	9.49	9.49	10.40	11.00	11.30	11.20
Mo	0.17	0.19	0.58	0.20	0.30	0.34	0.29	0.49	0.06	0.04	0.05	0.04	0.04	0.17	0.24	0.19	0.17
Cd	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.04
In	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03
Sb	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.17	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	0.03
Cs	1.54	1.27	1.32	1.40	1.10	1.05	0.98	1.13	2.58	2.11	2.21	2.12	2.12	2.78	2.01	3.09	3.07
Ba	817	1092	700	849	1280	1363	678	1128	612	615	544	558	558	1435	1288	1284	1390
W	0.13	0.13	0.26	0.11	0.33	0.14	0.12	0.14	0.84	0.33	0.30	0.87	0.87	0.31	0.41	0.39	0.37

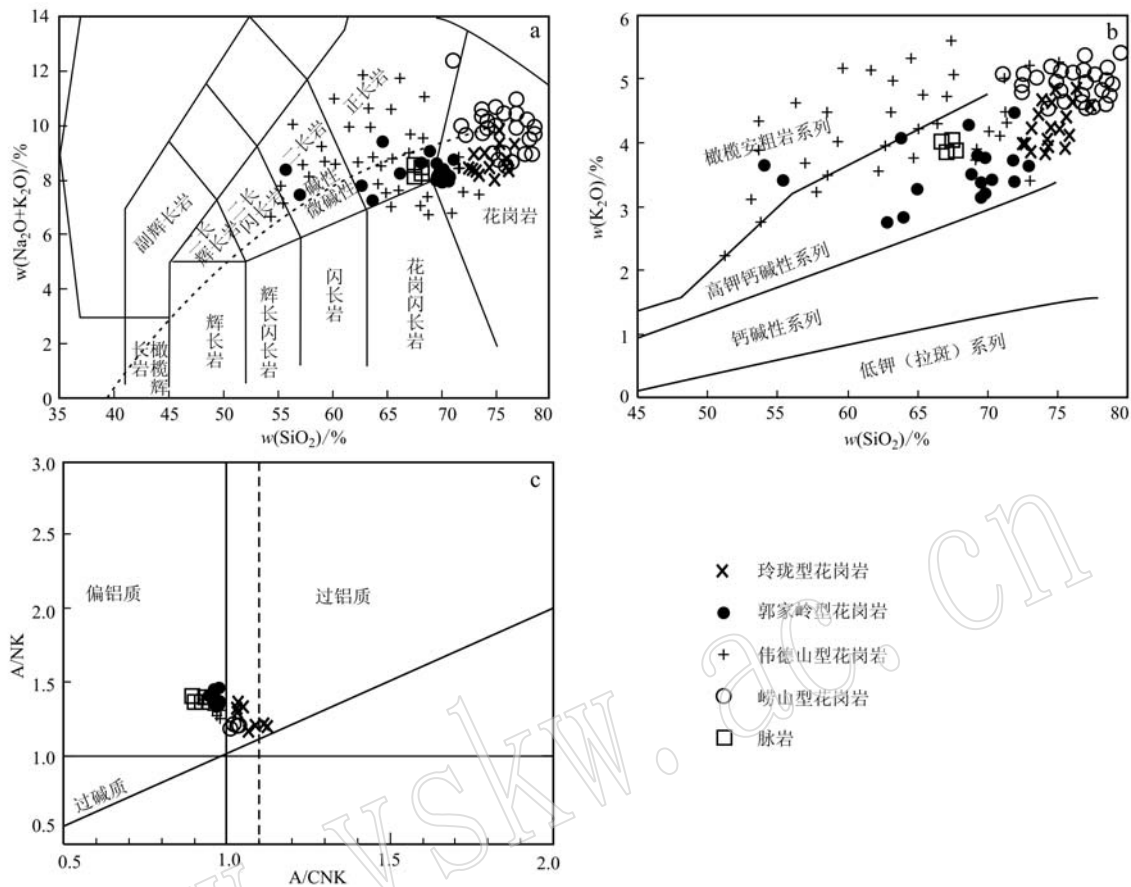


图3 花岗岩地球化学分类图解

Fig. 3 Geochemical classification diagrams of granites

a—TAS 图解(据 Middlemost, 1994); b— $K_2O - SiO_2$ 图解(据 Rickwood, 1989); c— $A/NK - A/CNK$ 图解(据 Maniar and Piccoli, 1989); 除本文样品外,其他数据来源于宋明春等(2003)、Yang 等(2012)和 Song 等(2015)

a—total alkali versus SiO_2 (TAS) diagram (after Middlemost, 1994); b— K_2O versus SiO_2 variation diagram (after Rickwood, 1989); c— A/NK versus A/CNK diagram (after Maniar and Piccoli, 1989); data after this study, Song Mingchun *et al.*, 2003, Yang *et al.*, 2012 and Song *et al.*, 2015

发生了强烈分异; δE_u 为 0.82~1.04,没有明显的钕负异常,表明熔融过程中应该没有斜长石作为残留相。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图上,微量元素显示了富集 Ba、Sr、K、Pb 等大离子亲石元素(LILE)以及亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素(HFSE)(图 5b),表现出弧型地壳特征。微量元素具有高 Ba、Sr 的特点($Ba = 1.078 \times 10^{-6} \sim 3.521 \times 10^{-6}$, $Sr = 876 \times 10^{-6} \sim 1.673 \times 10^{-6}$),属高 Ba、Sr 花岗岩(图 6a)且 Sr 含量均高于玲珑型花岗岩。

4.1.3 伟德山型花岗岩

伟德山型花岗岩样品的主、微量元素测试结果列于表 2。岩石化学成分中 SiO_2 含量为 69.27%~73.18%,平均 70.90%,低于玲珑型花岗岩,高于郭家岭型花岗岩,属于酸性岩类;岩石全碱($Na_2O +$

K_2O) 含量介于 7.54%~8.93%之间, Na_2O/K_2O 值为 0.77~1.19,在 $K_2O - SiO_2$ 图解(图 3b)中投入高钾钙碱性系列和橄榄安粗岩系列,与前人测试数据一致。 Al_2O_3 含量为 13.61%~15.10%,CaO 含量为 1.64%~2.77%,铝饱和指数(A/CNK) = 0.92~0.99,在 $A/CNK - A/NK$ 图解(图 3c)中落入偏铝质区域。 MgO 含量为 0.77%~1.51%, TFe_2O_3 介于 1.67%~2.68%, $Mg^\#$ 值为 46.90~52.77。 TiO_2 和 P_2O_5 含量分别为 0.24%~0.36%和 0.11%~0.17%。在 Harker 图解中,除 K_2O 与 SiO_2 含量同步增长外, SiO_2 与 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 MgO 、 P_2O_5 和 CaO 等氧化物含量均呈良好的线性关系(图 4)。本文和前人数据在 TAS 图解中落入二长闪长岩、二长岩、正长岩、花岗闪长岩、花岗岩区域,说明伟德山型花岗岩为同源岩浆演化序列(图 3a)。

在稀土元素球粒陨石标准化图(图 5a)上,伟德山型花岗岩样品显示出相似的稀土元素分配模式, 岩石稀土元素总量为 $144.66 \times 10^{-6} \sim 207.48 \times 10^{-6}$, 表现出明显的 LREE 富集和 HREE 相对亏损, LREE/

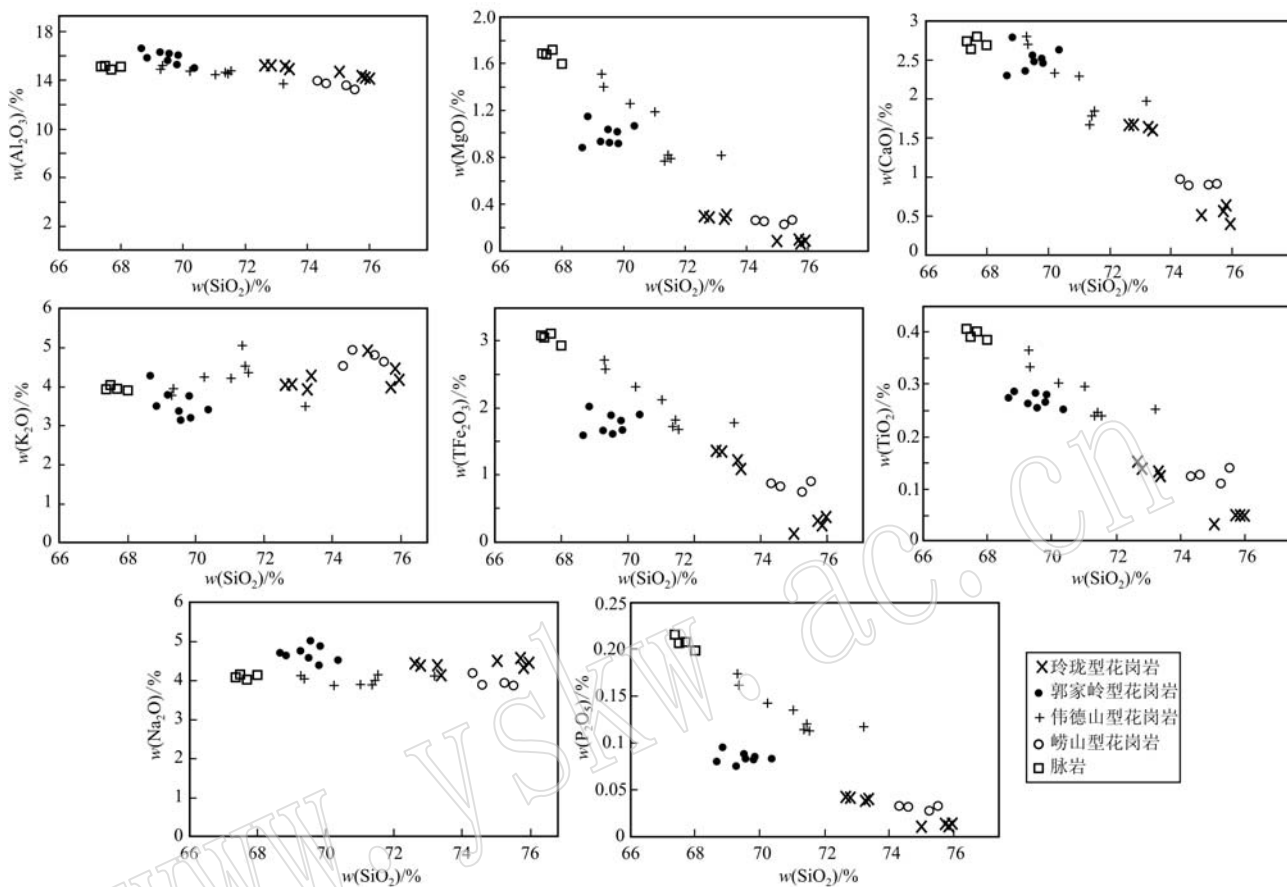


图 4 花岗岩主要元素与 SiO₂ 含量变异图 (Harker 图解)

Fig. 4 Harker diagrams showing the magmatic evolution of the granite in the Jiaodong Peninsula

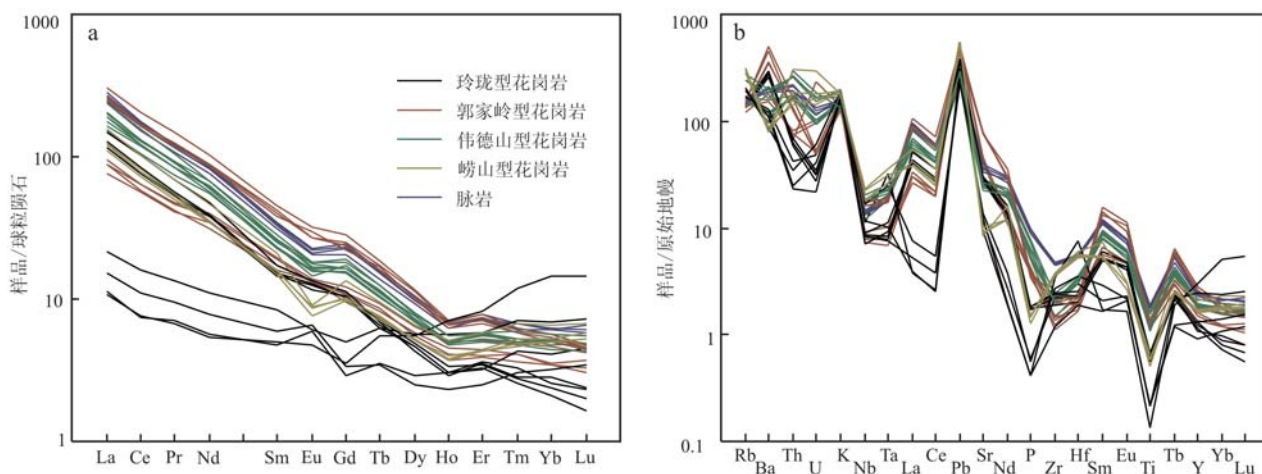


图 5 花岗岩球粒陨石标准化稀土分配模式图解(a, Boynton, 1984)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a, after Boynton, 1984) and primitive-mantle-normalized trace element spidergrams (b, after Sun and McDonough, 1989) for the granites in the Jiaodong Peninsula

HREE 值为 17.95~22.20, 呈 LREE 高度富集的模式; $(La/Yb)_N = 30.23 \sim 39.67$, 指示轻、重稀土元素发生了强烈分异; δEu 为 0.72~0.85, 表现出略微明显的铕负异常。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 5b), 微量元素显示了富集 Ba、Sr、K、Pb 等大离子亲石元素(LILE)以及亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素(HFSE), 指示岩浆活动受地壳影响。微量元素 Ba、Sr 的含量($Ba = 678 \times 10^{-6} \sim 1\ 363 \times 10^{-6}$, $Sr = 471 \times 10^{-6} \sim 604 \times 10^{-6}$) 低于玲珑型和郭家岭型花岗岩, 处于高 Ba-Sr 花岗岩与低 Ba-Sr 花岗岩的过渡地带(图 6a)。Sr/Y 值为 55.02~69.23, 具有埃达克岩特征。样品的 Nb/Ta 值介于 11.61~14.63 之间, 平均值 13.34, 接近于大陆地壳的平均值(Green, 1995)。

4.1.4 崂山型花岗岩

崂山型花岗岩样品 16SD-41 的主、微量元素测试结果列于表 2。岩石化学成分中 SiO_2 含量为 74.31%~75.51%, 平均 74.91%, 属于酸性岩类的化学组成范畴; 岩石全碱($Na_2O + K_2O$) 含量为 8.53%~8.85%, Na_2O/K_2O 值为 0.79~0.93, 在 TAS 图解(图 3a)中投入花岗岩范围, 在 $K_2O - SiO_2$ 图解(图 3b)中投入高钾钙碱性系列。 Al_2O_3 含量为 13.23%~13.95%, CaO 含量为 0.89%~0.97%, 明显富硅、碱,

贫钙。 $A/CNK = 1.01 \sim 1.03$, 在 $A/CNK - A/NK$ 图解(图 3c)中投入过铝质区域。

在稀土元素球粒陨石标准化图上, 岩石稀土元素总量为 $100.82 \times 10^{-6} \sim 139.17 \times 10^{-6}$, 表现出明显的 LREE 富集和 HREE 相对亏损, LREE/HREE 值为 16.37~18.41, 呈 LREE 高度富集的模式(图 5a); $(La/Yb)_N = 19.59 \sim 22.89$, 指示轻、重稀土元素发生了强烈分异; δEu 为 0.52~0.68, 显示出明显的铕负异常。本次及前人研究测试数据显示崂山型花岗岩微量元素具低 Ba、Sr 特点, 属低 Ba、Sr 花岗岩(图 6a)。

4.1.5 脉岩

正长斑岩脉样品(16SD-34)的主、微量元素测试结果列于表 2。岩石化学成分中 SiO_2 含量为 67.36%~68.00%, 平均 67.64%; 岩石全碱($Na_2O + K_2O$) 含量为 7.98%~8.21%, Na_2O/K_2O 值为 1.02~1.06, 在 TAS 图解(图 3a)中投入正长岩范围, 在 $K_2O - SiO_2$ 图解(图 3b)中投入高钾钙碱性系列。 Al_2O_3 含量为 14.87%~15.15%, CaO 含量为 2.64%~2.80%, $A/CNK = 0.93 \sim 0.95$, 在 $A/CNK - A/NK$ 图解(图 3c)中投入偏铝质区域。 MgO 含量为 1.60%~1.72%, TFe_2O_3 介于 2.93%~3.11%。 TiO_2 和 P_2O_5 含量分别为 0.38%~0.41%和 0.20%~0.21%。

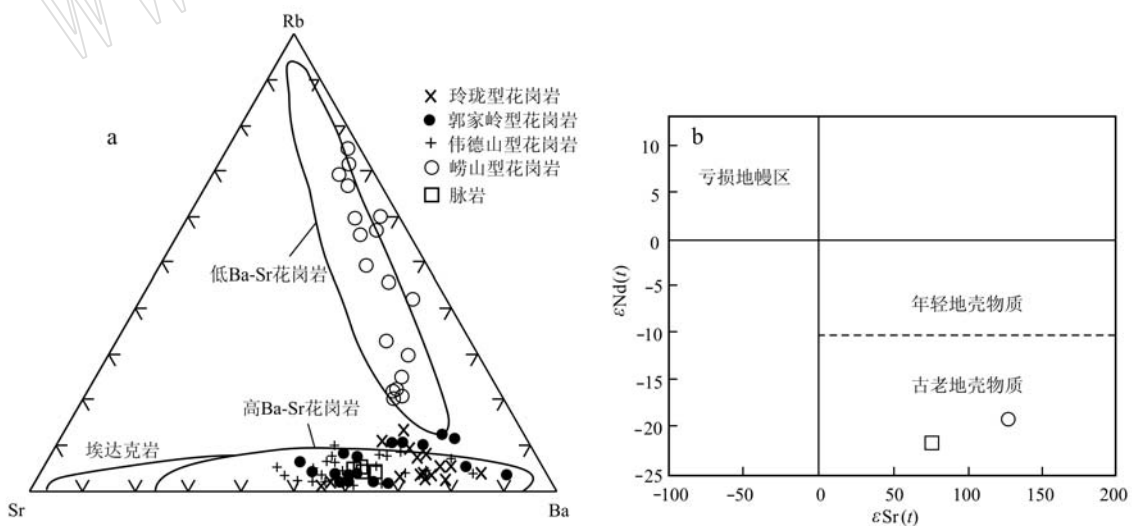


图 6 花岗岩的 Rb-Sr-Ba 图解(a) (据 Qian *et al.*, 2002) 和 $\epsilon Nd(t) - \epsilon Sr(t)$ 图解(b)

Fig. 6 Rb-Sr-Ba plot (a, after Qian *et al.*, 2002) and $\epsilon Nd(t)$ versus $\epsilon Sr(t)$ plot (b) for the Mesozoic granite in the Jiaodong Peninsula

除本文样品外,其他数据来源于赵广涛等(1997)、杨进辉等(2003)、黄洁等(2005)、Goss 等(2010)、Yang 等(2012)、林博磊等(2013)、王中亮等(2014)、Yang 和 Santosh(2015)

Data after this study; Zhao Guangtao *et al.*, 1997; Yang Jinhui *et al.*, 2003; Huang Jie *et al.*, 2005; Goss *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2012; Lin Bolei *et al.*, 2013; Wang Zhongliang *et al.*, 2014; Yang and Santosh, 2015

在稀土元素球粒陨石标准化图上,岩石稀土元素总量为 $211.89 \times 10^{-6} \sim 245.60 \times 10^{-6}$,表现出明显的 LREE 富集和 HREE 相对亏损, LREE/HREE 值为 $19.78 \sim 21.30$,呈 LREE 高度富集的模式(图 5a); $(La/Yb)_N = 37.40 \sim 41.84$,指示轻、重稀土元素发生了强烈分异; δEu 为 $0.75 \sim 0.80$,具铕负异常。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图上,微量元素显示了富集大离子亲石元素(LILE)、亏损高场强元素(HFSE),Ti 的含量低(图 5b)。微量元素显示了高 Ba、Sr ($Ba = 1.284 \times 10^{-6} \sim 1.435 \times 10^{-6}$, $Sr =$

$711 \times 10^{-6} \sim 818 \times 10^{-6}$) 的特点,属高 Ba-Sr 类型(图 6a)。

4.2 锆石 U-Pb 年代学测试结果

本文对 8 件胶东地区晚中生代花岗岩样品进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测试,部分锆石阴极发光(CL)图像见图 7,测试分析结果详见表 3。由图 7 可见,8 件样品锆石绝大多数呈自形-半自形,晶形完整,表面光滑,内部振荡环带结构发育,且具有较高 Th/U 值($0.31 \sim 2.23$,表 3),暗示均为岩浆结晶锆石。

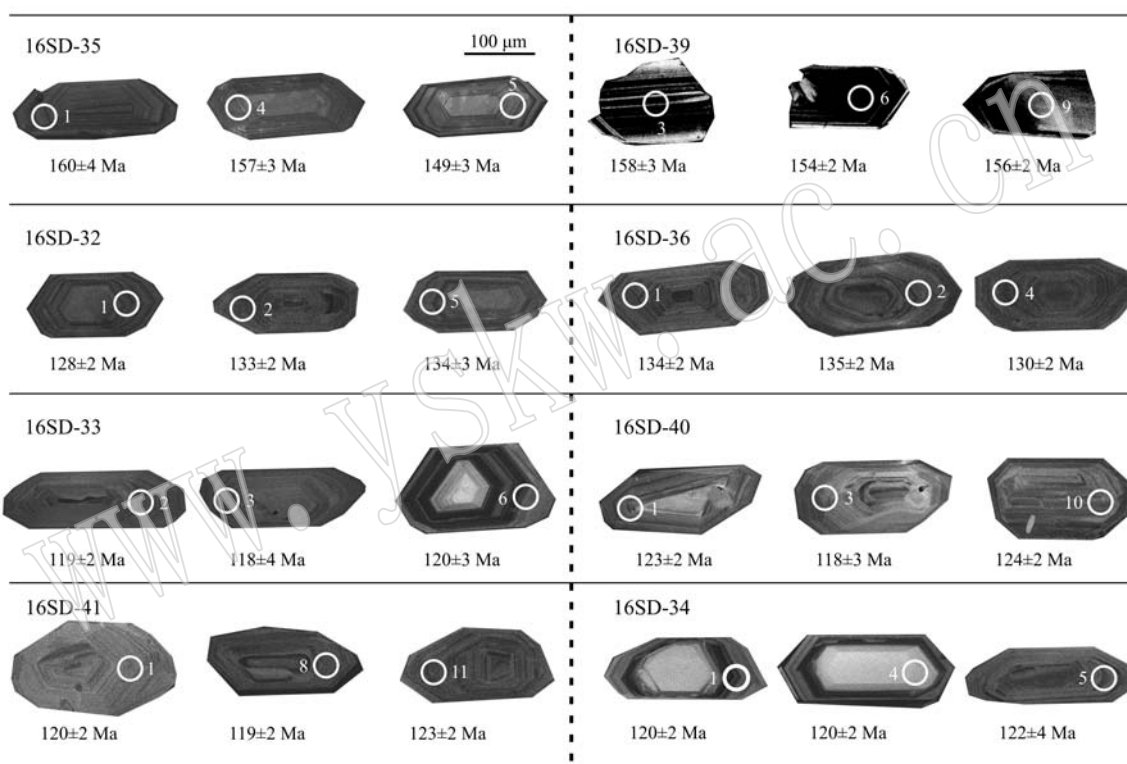


图 7 胶东地区晚中生代花岗岩的锆石阴极发光图像

Fig. 7 Cathodoluminescence (CL) images of zircon grains of the Late Mesozoic granites in Jiaodong area, Shandong Province

4.2.1 玲珑型花岗岩

样品 16SD-35 的 20 个分析点中 1 个分析点(16SD-35-14)偏离谐和线较远,谐和度较低,说明原锆石形成后可能遭受热事件改造而导致铅丢失,不能代表锆石结晶年龄。剩余 19 个测点落在谐和线上或附近,所得年龄变化于 $2444 \pm 20 \sim 143 \pm 2$ Ma(表 3)之间(对于年龄 < 1000 Ma 的年轻锆石采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,对于 > 1000 Ma 的锆石则采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的年龄,下同),可分为 2 组,分别为侏罗纪($174 \pm 3 \sim 143 \pm 2$ Ma, 16 个测点)、古元古代($2444 \pm 20 \sim 2025 \pm 24$ Ma, 3 个测点)。侏罗纪锆石

大部分具有高的 Th 含量($17.92 \times 10^{-6} \sim 216.29 \times 10^{-6}$)和 Th/U 值($0.15 \sim 0.95$),具有典型的振荡环带。古元古代锆石有残留核,但仍可见环带,测点位于核部,Th/U 值为 $0.19 \sim 0.45$,推测为来源于前寒武纪变质基底的继承性锆石。侏罗纪锆石加权平均年龄值为 157.9 ± 4.1 Ma(MSWD = 6.5, $n = 16$)(图 8a),代表了岩石固结年龄。

样品 16SD-39 的 20 个测试分析点获得年龄介于 $2758 \pm 18 \sim 125 \pm 2$ Ma 之间(表 3),年龄分布范围较广,混入较多前寒武纪锆石和少量早白垩世锆石,可将其分为 4 组,分别为早白垩世($134 \pm 2 \sim 125 \pm 2$

表 3 胶东地区中生代花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年结果
Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of Late Mesozoic granite in Jiaodong area, Shandong Province

样品点	$t_{\text{Pb}}/10^{-6}$		同位素比值						锆石年龄/Ma								
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	1 σ						
玲珑型花岗岩(16SD-35,39)																	
16SD-35-01	75.73	127.55	0.59	0.0547	0.0060	0.18997	0.02040	0.02518	0.00070	0.0084	0.00049	400	229	177	17	160	4
16SD-35-02	178.58	187.34	0.95	0.0541	0.0030	0.16740	0.00923	0.02242	0.00039	0.0073	0.00017	377	121	157	8	143	2
16SD-35-03	106.08	566.35	0.19	0.1589	0.0019	8.50399	0.11517	0.38814	0.00485	0.1604	0.00236	2444	20	2286	12	2114	23
16SD-35-04	137.73	415.05	0.33	0.0526	0.0026	0.17834	0.00857	0.02457	0.00040	0.0081	0.00028	313	107	167	7	157	3
16SD-35-05	71.61	136.49	0.52	0.0481	0.0041	0.15469	0.01278	0.02331	0.00051	0.0079	0.00036	105	188	146	11	149	3
16SD-35-06	76.87	312.11	0.25	0.1247	0.0017	5.56232	0.08325	0.32337	0.00412	0.1046	0.00179	2025	24	1910	13	1806	20
16SD-35-07	249.10	550.86	0.45	0.1535	0.0018	8.25972	0.11179	0.39034	0.00489	0.0391	0.00047	2385	20	2260	12	2124	23
16SD-35-08	37.73	117.20	0.32	0.0488	0.0043	0.16945	0.01466	0.02519	0.00058	0.0086	0.00052	137	195	159	13	160	4
16SD-35-09	57.84	303.73	0.19	0.0487	0.0028	0.16300	0.00908	0.02429	0.00042	0.0078	0.00039	132	128	153	8	155	3
16SD-35-10	125.59	397.45	0.32	0.0488	0.0025	0.17073	0.00855	0.02536	0.00042	0.0079	0.00029	140	115	160	7	161	3
16SD-35-11	208.20	512.55	0.41	0.0508	0.0022	0.17229	0.00725	0.02460	0.00038	0.0087	0.00023	231	95	161	6	157	2
16SD-35-12	115.93	356.89	0.32	0.0482	0.0026	0.16386	0.00877	0.02466	0.00042	0.0078	0.00030	109	123	154	8	157	3
16SD-35-13	216.29	605.32	0.36	0.0502	0.0026	0.18894	0.00962	0.02729	0.00046	0.0087	0.00030	205	116	176	8	174	3
16SD-35-14	241.85	389.90	0.62	0.0950	0.0047	0.34377	0.01639	0.02625	0.00050	0.0119	0.00033	1528	90	300	12	167	3
16SD-35-15	96.58	110.38	0.87	0.0499	0.0047	0.16513	0.01540	0.02402	0.00058	0.0083	0.00032	189	208	155	13	153	4
16SD-35-16	99.30	643.98	0.15	0.0504	0.0019	0.17971	0.00662	0.02587	0.00038	0.0082	0.00031	213	84	168	6	165	2
16SD-35-17	50.98	89.29	0.57	0.0549	0.0050	0.19502	0.01731	0.02578	0.00061	0.0076	0.00037	407	191	181	15	164	4
16SD-35-18	71.19	114.79	0.62	0.0542	0.0048	0.18501	0.01592	0.02477	0.00059	0.0075	0.00036	379	187	172	14	158	4
16SD-35-19	74.82	83.98	0.89	0.0498	0.0049	0.17905	0.01709	0.02610	0.00065	0.0092	0.00036	184	213	167	15	166	4
16SD-35-20	17.92	27.47	0.65	0.0512	0.0147	0.16244	0.04557	0.02301	0.00152	0.0053	0.00096	251	554	153	40	147	10
16SD-39-01	69.04	206.48	0.33	0.0837	0.0021	1.86414	0.04834	0.16171	0.00236	0.0497	0.00110	1285	49	1069	17	966	13
16SD-39-02	88.63	453.94	0.20	0.1735	0.0020	9.45574	0.13204	0.39558	0.00515	0.0946	0.00155	2592	20	2383	13	2149	24
16SD-39-03	92.66	767.56	0.12	0.0502	0.0029	0.17171	0.00982	0.02484	0.00044	0.0079	0.00051	203	129	161	9	158	3
16SD-39-04	4.78	229.73	0.02	0.0663	0.0035	0.23800	0.01226	0.02606	0.00047	0.0187	0.00094	815	106	217	10	166	3
16SD-39-05	212.43	1260.00	0.17	0.1751	0.0018	11.1243	0.14177	0.46114	0.00581	0.1557	0.00187	2607	17	2534	12	2445	26
16SD-39-06	225.94	1292.72	0.17	0.0585	0.0019	0.19492	0.00637	0.02420	0.00035	0.0107	0.00028	547	70	181	5	154	2
16SD-39-07	32.43	342.93	0.09	0.0828	0.0032	0.30852	0.01179	0.02704	0.00044	0.0201	0.00072	1264	74	273	9	172	3
16SD-39-08	224.24	283.94	0.79	0.0711	0.0025	0.76992	0.02666	0.07852	0.00121	0.0315	0.00063	961	70	580	15	487	7
16SD-39-09	706.21	897.87	0.79	0.0523	0.0024	0.17604	0.00806	0.02444	0.00039	0.0082	0.00018	296	102	165	7	156	2
16SD-39-10	11.43	300.88	0.04	0.1606	0.0002	9.70182	0.13901	0.43814	0.00563	0.1122	0.00375	2462	21	2407	13	2342	25
16SD-39-11	120.15	675.39	0.18	0.0483	0.0021	0.16120	0.00680	0.02419	0.00037	0.0076	0.00030	116	97	152	6	154	2
16SD-39-12	165.15	300.45	0.55	0.0683	0.0002	0.95439	0.02760	0.10132	0.00144	0.0500	0.00082	878	59	680	14	622	8

续表 3-1
Continued Table 3-1

样品点	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Rb} \times 10^{-6}$		Th/U		同位素比值					锆石年龄/Ma							
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
	I	σ	I	σ	I	σ	I	σ	I	σ	I	σ	I	σ	I	σ	
16SD-39-13	271.74	475.26	0.57	0.002	0.149	0.006	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	141	5	134	2
16SD-39-14	193.53	1406.46	0.14	0.001	0.184	0.005	0.027	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	172	5	176	2
16SD-39-15	136.55	769.42	0.18	0.002	0.189	0.007	0.026	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	176	6	167	2	
16SD-39-16	36.91	256.37	0.14	0.002	0.131	0.017	0.049	0.000	0.010	0.001	0.001	0.001	173	8	168	3	
16SD-39-17	52.60	355.04	0.15	0.002	0.186	0.009	0.026	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	173	8	168	3	
16SD-39-18	278.13	545.62	0.51	0.002	0.133	0.017	0.053	0.006	0.052	0.015	0.015	0.015	173	8	168	3	
16SD-39-19	42.14	95.60	0.44	0.003	2.959	0.091	0.84	0.209	0.26	0.078	0.078	0.078	139	7	139	2	
16SD-39-20	283.95	322.28	0.88	0.002	0.125	0.006	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	120	6	125	2	
郭家岭型花岗岩(16SD-32,36)																	
16SD-32-01	214.32	390.42	0.55	0.003	0.147	0.008	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	139	8	128	2	
16SD-32-02	318.97	508.70	0.63	0.003	0.144	0.008	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	133	8	133	2	
16SD-32-03	338.59	536.75	0.63	0.003	0.145	0.008	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	134	8	128	2	
16SD-32-04	158.67	329.10	0.48	0.004	0.144	0.012	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	137	11	126	3	
16SD-32-05	159.77	304.31	0.53	0.003	0.154	0.012	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	146	11	134	3	
16SD-32-06	273.61	437.53	0.63	0.002	0.152	0.008	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	144	7	135	2	
16SD-32-07	221.62	431.82	0.51	0.004	0.580	0.023	0.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	75	15	247	4	
16SD-32-08	245.74	447.81	0.55	0.003	0.156	0.011	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	155	10	136	3	
16SD-32-09	265.94	456.07	0.58	0.003	0.161	0.009	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	134	9	138	3	
16SD-32-10	138.19	271.74	0.51	0.004	0.145	0.012	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	193	11	131	3	
16SD-32-11	238.37	587.87	0.41	0.002	4.111	0.070	0.191	0.002	0.006	0.006	0.006	0.006	27	14	1128	14	
16SD-32-12	292.02	448.53	0.65	0.003	0.138	0.009	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	156	9	129	3	
16SD-32-13	54.36	322.06	0.17	0.002	10.723	0.156	0.402	0.005	0.003	0.011	0.011	0.011	21	14	2179	24	
16SD-32-14	146.81	282.87	0.52	0.004	0.144	0.013	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	208	12	134	3	
16SD-32-15	190.61	306.48	0.62	0.003	0.157	0.018	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	250	16	136	4	
16SD-32-16	208.33	360.22	0.58	0.004	0.138	0.012	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	210	11	136	3	
16SD-32-17	426.61	1367.08	0.31	0.002	0.152	0.005	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	85	5	137	2	
16SD-32-18	195.04	370.33	0.53	0.004	0.294	0.009	0.017	0.000	0.000	0.003	0.003	0.003	60	8	112	2	
16SD-32-19	220.58	336.24	0.66	0.004	0.147	0.012	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	188	11	134	3	
16SD-32-20	184.76	309.14	0.60	0.003	0.131	0.012	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	174	11	134	3	
16SD-36-01	359.16	577.22	0.62	0.002	0.144	0.007	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	117	7	134	2	
16SD-36-02	377.86	550.35	0.69	0.002	0.144	0.006	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	106	6	135	2	
16SD-36-03	230.69	412.8	0.56	0.003	0.168	0.009	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	124	8	144	3	
16SD-36-04	329.78	412.86	0.80	0.002	0.135	0.007	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	127	7	130	2	

续表 3-2
Continued Table 3-2

样品点	$w_B/10^{-6}$		同位素比值										锆石年龄/Ma				
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
16SD-36-05	154.39	329.42	0.47	0.0544	0.0033	0.1544	0.0092	0.0206	0.0004	0.0066	0.0002	388	131	146	8	131	2
16SD-36-06	357.87	557.85	0.64	0.0465	0.0023	0.1298	0.0063	0.0203	0.0003	0.0064	0.0002	22	114	124	6	129	2
16SD-36-07	256.77	356.65	0.72	0.0527	0.0034	0.1421	0.0091	0.0196	0.0004	0.0070	0.0002	314	141	135	8	125	2
16SD-36-08	642.5	773.83	0.83	0.0488	0.0023	0.1338	0.0062	0.0199	0.0003	0.0065	0.0002	136	106	128	6	127	2
16SD-36-09	287.74	460.82	0.62	0.0485	0.0029	0.1345	0.0078	0.0201	0.0004	0.0061	0.0002	126	133	128	7	128	2
16SD-36-10	329.81	471.72	0.70	0.0530	0.0027	0.1447	0.0074	0.0198	0.0003	0.0063	0.0002	331	113	137	7	126	2
16SD-36-11	356.61	579.03	0.62	0.0493	0.0024	0.1362	0.0065	0.0200	0.0003	0.0067	0.0002	163	110	130	6	128	2
16SD-36-12	61.18	194.29	0.31	0.0541	0.0055	0.1627	0.0161	0.0218	0.0006	0.0076	0.0005	376	213	153	14	139	4
16SD-36-13	475.35	607.66	0.78	0.0522	0.0028	0.1505	0.0079	0.0209	0.0004	0.0065	0.0002	292	117	142	7	134	2
16SD-36-14	436.52	612.05	0.71	0.0493	0.0024	0.1332	0.0065	0.0196	0.0003	0.0062	0.0002	161	111	127	6	125	2
16SD-36-15	273.31	449.96	0.61	0.0482	0.0027	0.1355	0.0073	0.0204	0.0004	0.0067	0.0002	111	125	129	7	130	2
16SD-36-16	304.51	527.45	0.58	0.0542	0.0025	0.1479	0.0069	0.0198	0.0003	0.0063	0.0002	378	102	140	6	127	2
16SD-36-17	224.92	359.16	0.63	0.0470	0.0026	0.1327	0.0073	0.0205	0.0004	0.0063	0.0002	48	128	127	7	131	2
16SD-36-18	236.19	414.61	0.57	0.0503	0.0025	0.1421	0.0070	0.0205	0.0003	0.0069	0.0002	209	112	135	6	131	2
16SD-36-19	232.66	262.03	0.89	0.0443	0.0029	0.1227	0.0080	0.0201	0.0004	0.0061	0.0002	0	58	118	7	128	2
16SD-36-20	390.37	546.11	0.71	0.0459	0.0021	0.1287	0.0059	0.0203	0.0003	0.0063	0.0002	0	98	123	5	130	2
伟德山型花岗岩(16SD-33,40)																	
16SD-33-01	278.37	320.64	0.87	0.0505	0.0036	0.1269	0.0088	0.0182	0.0004	0.0057	0.0002	216	156	121	8	117	2
16SD-33-02	293.10	295.26	0.99	0.0535	0.0036	0.1376	0.0091	0.0187	0.0004	0.0060	0.0002	348	144	131	8	119	2
16SD-33-03	158.94	150.10	1.06	0.0565	0.0080	0.1444	0.0199	0.0185	0.0007	0.0065	0.0004	473	286	137	18	118	4
16SD-33-04	258.13	308.57	0.84	0.0488	0.0035	0.1187	0.0084	0.0177	0.0004	0.0055	0.0002	137	160	114	8	113	2
16SD-33-05	480.43	429.85	1.12	0.0448	0.0029	0.1088	0.0068	0.0176	0.0003	0.0053	0.0001	0	81	105	6	113	2
16SD-33-06	214.23	207.65	1.03	0.0424	0.0041	0.1093	0.0103	0.0187	0.0004	0.0057	0.0002	0	21	105	9	120	3
16SD-33-07	462.02	340.66	1.36	0.0519	0.0035	0.1323	0.0087	0.0185	0.0004	0.0056	0.0001	280	146	126	8	118	2
16SD-33-08	212.18	203.68	1.04	0.0578	0.0051	0.1752	0.0151	0.0220	0.0005	0.0076	0.0002	523	183	164	13	140	3
16SD-33-09	258.99	262.96	0.98	0.0499	0.0039	0.1276	0.0097	0.0185	0.0004	0.0058	0.0002	191	171	122	9	118	2
16SD-33-10	247.41	213.54	1.16	0.0518	0.0043	0.1285	0.0103	0.0180	0.0004	0.0057	0.0002	277	177	123	9	115	2
16SD-33-11	389.55	351.17	1.11	0.0534	0.0030	0.1390	0.0076	0.0189	0.0003	0.0059	0.0001	347	120	132	7	121	2
16SD-33-12	455.93	401.73	1.13	0.0514	0.0030	0.1265	0.0072	0.0178	0.0003	0.0058	0.0001	259	127	121	6	114	2
16SD-33-13	208.52	225.62	0.92	0.0485	0.0040	0.1252	0.0101	0.0187	0.0004	0.0059	0.0002	125	183	120	9	120	3
16SD-33-14	233.09	272.49	0.86	0.0506	0.0037	0.1309	0.0093	0.0187	0.0004	0.0056	0.0002	225	159	125	8	120	2
16SD-33-15	333.68	245.27	1.36	0.0495	0.0040	0.1206	0.0096	0.0177	0.0004	0.0055	0.0002	172	179	116	9	113	2
16SD-33-16	358.33	375.62	0.95	0.0521	0.0033	0.1317	0.0083	0.0184	0.0004	0.0057	0.0002	288	140	126	7	117	2
16SD-33-17	212.30	249.11	0.85	0.0525	0.0049	0.1398	0.0128	0.0193	0.0005	0.0060	0.0003	308	200	133	11	123	3

续表 3-3
Continued Table 3-3

样品点	$u_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				锆石年龄/Ma									
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$							
	1 σ	1 σ		1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ							
16SD-33-18	239.00	287.23	0.83	0.057 5	0.004 9	0.134 2	0.011 1	0.016 9	0.000 4	0.005 5	0.000 2	510	176	128	10	108	3
16SD-33-19	314.51	279.21	1.13	0.050 0	0.004 8	0.129 6	0.012 1	0.018 8	0.000 5	0.006 0	0.000 2	195	207	124	11	120	3
16SD-33-20	486.90	342.28	1.42	0.044 0	0.004 9	0.112 9	0.012 2	0.018 6	0.000 5	0.006 2	0.000 2	0	140	109	11	119	3
16SD-40-01	304.60	261.40	1.17	0.046 5	0.003 2	0.123 3	0.008 3	0.019 3	0.000 4	0.006 5	0.000 2	21	157	118	8	123	2
16SD-40-02	377.98	382.65	0.99	0.052 9	0.004 4	0.133 8	0.010 9	0.018 3	0.000 4	0.006 3	0.000 2	326	178	128	10	117	3
16SD-40-03	137.04	159.32	0.86	0.047 3	0.004 1	0.120 8	0.010 2	0.018 5	0.000 4	0.006 6	0.000 2	62	194	116	9	118	3
16SD-40-04	373.16	312.66	1.19	0.046 7	0.003 0	0.119 3	0.007 4	0.018 5	0.000 3	0.006 3	0.000 2	36	145	114	7	118	2
16SD-40-05	237.59	195.08	1.22	0.053 7	0.004 6	0.147 3	0.012 3	0.019 9	0.000 5	0.006 4	0.000 2	358	181	140	11	127	3
16SD-40-06	277.67	274.23	1.01	0.052 3	0.003 3	0.134 5	0.008 4	0.018 7	0.000 4	0.006 5	0.000 2	298	138	128	7	119	2
16SD-40-07	553.21	609.45	0.91	0.051 8	0.004 0	0.127 7	0.009 7	0.017 9	0.000 4	0.006 4	0.000 2	278	169	122	9	114	2
16SD-40-08	374.78	279.98	1.34	0.053 2	0.005 8	0.147 0	0.015 6	0.020 1	0.000 6	0.007 0	0.000 3	336	228	139	14	128	4
16SD-40-09	349.20	326.93	1.07	0.053 0	0.003 5	0.136 3	0.008 7	0.018 7	0.000 4	0.006 2	0.000 2	329	141	130	8	119	2
16SD-40-10	216.65	264.87	0.82	0.048 3	0.003 0	0.129 3	0.007 9	0.019 4	0.000 4	0.006 1	0.000 2	116	141	124	7	124	2
16SD-40-11	268.01	198.65	1.35	0.049 0	0.004 3	0.136 9	0.011 8	0.020 3	0.000 5	0.006 1	0.000 2	149	194	130	11	129	3
16SD-40-12	381.93	344.32	1.11	0.056 2	0.006 4	0.151 7	0.016 8	0.019 6	0.000 6	0.006 4	0.000 3	459	234	143	15	125	4
16SD-40-13	383.76	354.30	1.08	0.046 1	0.003 2	0.127 1	0.008 5	0.020 0	0.000 4	0.006 2	0.000 2	4	157	122	8	128	2
16SD-40-14	1667.84	748.00	2.23	0.049 6	0.002 3	0.126 3	0.005 9	0.018 5	0.000 3	0.006 4	0.000 1	174	107	121	5	118	2
16SD-40-15	176.14	178.87	0.98	0.046 3	0.004 5	0.118 2	0.011 2	0.018 5	0.000 4	0.006 3	0.000 2	14	217	113	10	118	3
16SD-40-16	148.50	135.85	1.09	0.050 0	0.004 5	0.130 8	0.011 5	0.019 0	0.000 4	0.006 1	0.000 2	193	196	125	10	121	3
16SD-40-17	247.86	292.52	0.85	0.046 8	0.004 9	0.124 3	0.012 7	0.019 3	0.000 5	0.005 8	0.000 3	39	233	119	12	123	3
16SD-40-18	341.44	236.17	1.45	0.053 8	0.004 9	0.146 4	0.013 1	0.019 8	0.000 5	0.006 5	0.000 2	361	194	139	12	126	3
16SD-40-19	311.42	181.35	1.72	0.114 3	0.007 7	0.320 4	0.020 6	0.020 3	0.000 5	0.008 1	0.000 2	1 869	117	282	16	130	3
崂山型花岗岩(16SD-41)																	
16SD-41-01	384.99	378.38	1.02	0.048 6	0.002 9	0.126 01	0.007 47	0.018 82	0.000 34	0.006 5	0.000 16	127	136	121	7	120	2
16SD-41-02	1 329.68	1 888.98	0.70	0.093 4	0.004 6	0.160 61	0.007 68	0.012 48	0.000 24	0.009 6	0.000 25	1 496	90	151	7	80	2
16SD-41-03	761.15	778.39	0.98	0.052 3	0.002 8	0.148 55	0.007 84	0.020 59	0.000 36	0.006 5	0.000 16	300	118	141	7	131	2
16SD-41-04	250.21	365.99	0.68	0.045 7	0.002 7	0.118 63	0.006 96	0.018 82	0.000 34	0.006 1	0.000 17	0	120	114	6	120	2
16SD-41-05	202.46	200.17	1.01	0.048 3	0.006 2	0.127 59	0.016 02	0.019 16	0.000 58	0.006 8	0.000 32	114	277	122	14	122	4
16SD-41-06	480.65	379.50	1.27	0.054 2	0.003 1	0.146 71	0.008 38	0.019 63	0.000 36	0.006 7	0.000 16	380	125	139	7	125	2
16SD-41-07	245.16	376.06	0.65	0.049 4	0.003 7	0.127 88	0.009 47	0.018 77	0.000 39	0.006 0	0.000 22	167	167	122	9	120	2
16SD-41-08	1 605.01	3 346.14	0.48	0.099 2	0.002 2	0.255 84	0.005 93	0.018 70	0.000 26	0.009 6	0.000 15	1 610	42	231	5	119	2
16SD-41-09	1 408.96	2 700.36	0.52	0.054 2	0.001 8	0.155 59	0.005 15	0.020 80	0.000 30	0.006 7	0.000 14	381	72	147	5	133	2
16SD-41-10	154.50	200.81	0.77	0.053 2	0.005 1	0.143 52	0.013 54	0.019 56	0.000 49	0.006 8	0.000 29	338	204	136	12	125	3

续表 3-4
Continued Table 3-4

样品点	$u_B/10^{-6}$		同位素比值										锆石年龄/Ma		
	Th/U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ		
	Th	U	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ		
16SD-41-11	694.40	777.26	0.89	0.131 54	0.005 52	0.019 28	0.000 30	0.006 3	0.000 12	170	126	5	123	2	
16SD-41-12	2 047.81	3 366.72	0.61	0.215 02	0.005 67	0.012 31	0.000 19	0.010 4	0.000 18	2 053	198	5	79	1	
16SD-41-13	1 302.50	2 421.86	0.54	0.184 62	0.005 74	0.017 88	0.000 27	0.008 3	0.000 16	1 065	172	5	114	2	
16SD-41-14	277.47	273.09	1.02	0.128 37	0.009 15	0.019 76	0.000 39	0.006 5	0.000 18	54	123	8	126	2	
16SD-41-15	928.01	1 020.03	0.91	0.344 59	0.010 67	0.013 96	0.000 24	0.009 8	0.000 18	2 643	301	8	89	2	
16SD-41-16	306.15	290.22	1.05	0.137 49	0.008 52	0.018 66	0.000 35	0.005 6	0.000 15	347	131	8	119	2	
16SD-41-17	518.22	623.74	0.83	0.167 18	0.006 26	0.015 14	0.000 24	0.006 3	0.000 12	1 199	157	5	97	2	
16SD-41-18	257.63	363.70	0.71	0.143 11	0.008 52	0.019 68	0.000 36	0.006 0	0.000 18	317	136	8	126	2	
16SD-41-19	1 512.32	2 904.61	0.52	0.166 72	0.006 36	0.019 66	0.000 30	0.007 7	0.000 17	657	157	6	126	2	
16SD-41-20	1 354.25	2 756.11	0.49	0.146 27	0.003 97	0.020 13	0.000 28	0.006 7	0.000 12	316	139	4	129	2	
白垩纪脉岩(16SD-34)															
16SD-34-01	352.97	332.70	1.06	0.129 04	0.008 70	0.018 57	0.000 36	0.006 1	0.000 17	214	123	8	119	2	
16SD-34-02	185.80	208.24	0.89	0.138 91	0.010 36	0.018 85	0.000 40	0.006 3	0.000 19	348	163	9	120	3	
16SD-34-03	1 000.32	488.46	2.05	0.128 56	0.007 66	0.018 87	0.000 34	0.006 3	0.000 12	167	136	7	121	2	
16SD-34-04	288.33	283.80	1.02	0.145 33	0.016 57	0.019 53	0.000 57	0.006 6	0.000 29	370	244	15	125	4	
16SD-34-05	394.16	343.72	1.15	0.133 00	0.010 25	0.018 23	0.000 39	0.005 7	0.000 18	326	169	9	116	2	
16SD-34-06	410.92	378.30	1.09	0.1309 1	0.010 42	0.017 77	0.000 39	0.005 6	0.000 18	348	174	9	114	2	
16SD-34-07	29.59	73.67	0.40	0.1550 3	0.024 15	0.024 46	0.000 81	0.007 7	0.000 78	0	340	21	156	5	
16SD-34-08	275.72	247.30	1.11	0.1364 5	0.009 49	0.018 38	0.000 37	0.006 2	0.000 17	365	152	8	117	2	
16SD-34-09	256.62	231.35	1.11	0.1356 6	0.011 76	0.019 58	0.000 45	0.006 1	0.000 21	207	193	11	125	3	
16SD-34-10	493.99	285.78	1.73	0.1375 5	0.008 70	0.019 32	0.000 36	0.006 4	0.000 14	270	141	8	123	2	
16SD-34-11	238.35	218.27	1.09	0.1414 3	0.011 95	0.019 56	0.000 45	0.005 9	0.000 21	305	185	11	125	3	
16SD-34-12	311.96	293.37	1.06	0.1166 6	0.008 70	0.019 19	0.000 38	0.006 3	0.000 18	0	70	8	123	2	
16SD-34-13	273.63	241.46	1.13	0.1332 3	0.012 28	0.018 83	0.000 46	0.006 0	0.000 25	255	155	9	122	2	
16SD-34-14	128.02	153.51	0.83	0.1302 3	0.009 90	0.019 07	0.000 39	0.005 8	0.000 17	341	203	11	120	3	
16SD-34-15	304.77	259.41	1.17	0.1302 3	0.009 38	0.018 75	0.000 38	0.006 1	0.000 17	213	162	8	120	2	
16SD-34-16	282.60	303.53	0.93	0.1375 5	0.009 83	0.019 37	0.000 40	0.006 1	0.000 19	264	159	9	124	3	
16SD-34-17	389.50	301.55	1.29	0.1758 1	0.010 19	0.018 11	0.000 36	0.006 6	0.000 17	941	117	9	116	2	
16SD-34-18	276.25	246.81	1.12	0.1438 3	0.011 26	0.019 75	0.000 43	0.006 3	0.000 20	321	171	10	126	3	
16SD-34-19	697.09	348.61	2.00	0.1261 4	0.009 46	0.018 33	0.000 38	0.005 6	0.000 13	192	169	9	117	2	
16SD-34-20	315.46	251.21	1.26	0.1406 3	0.010 83	0.019 02	0.000 41	0.006 2	0.000 18	355	168	10	122	3	

Ma, 2 个测点)、侏罗纪 ($176 \pm 2 \sim 154 \pm 2$ Ma, 9 个测点)、早古生代 ($622 \pm 8 \sim 487 \pm 7$ Ma, 2 个测点)、新元古代-新太古代 ($2\ 758 \pm 18 \sim 966 \pm 13$ Ma, 7 个测点)。早白垩世锆石具有典型振动环带, Th/U 值为 0.57 和 0.88, 应为后期混入岩浆锆石。侏罗纪锆石中有 3 个测点 (16SD-39-04、16SD-39-06、16SD-39-07) 在谐和图中偏离谐和线较远, 谐和度较低, 其他 6 个锆石震荡环带发育良好, Th/U 值介于 0.12~0.79, 为岩浆锆石。早古生代锆石晶形不完整, 但可见振荡环带发育, Th/U 值为 0.55 和 0.79, 为继承岩浆锆石。新元古代-新太古代锆石中 16SD-39-10 明显受后期事件改造而无环带, 测点位于核部, Th/U 值为 0.04, 边部锆石具面状分带, 说明存在变质流体的作用, 该锆石应为变质锆石, 而其他锆石均显示岩浆锆石特

征, 推测为来自于华北板块前寒武纪结晶基底和苏鲁超高压带的继承锆石。对谐和度较高的 6 个侏罗纪锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄采取加权平均, 所获年龄值为 163.2 ± 9.3 Ma (MSWD=13, $n=6$) (图 8b)。综上所述, 玲珑型花岗岩结晶年龄范围为 163.2~157.9 Ma, 即晚侏罗世。大量继承锆石的发育指示了玲珑型花岗岩物质来源的复杂性, 既有华北板块新太古代结晶基底部分熔融的产物, 也有苏鲁超高压变质带深俯冲物质的残留。

4.2.2 郭家岭型花岗岩

样品 16SD-32 的 20 个分析点中含有 2 个古-中元古代 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (16SD-32-11、16SD-32-13), 1 个早古生代年龄 (16SD-32-07), 应为继承锆石年龄。再剔除 1 个不谐和度较高的锆石数据 (16SD-32-18),

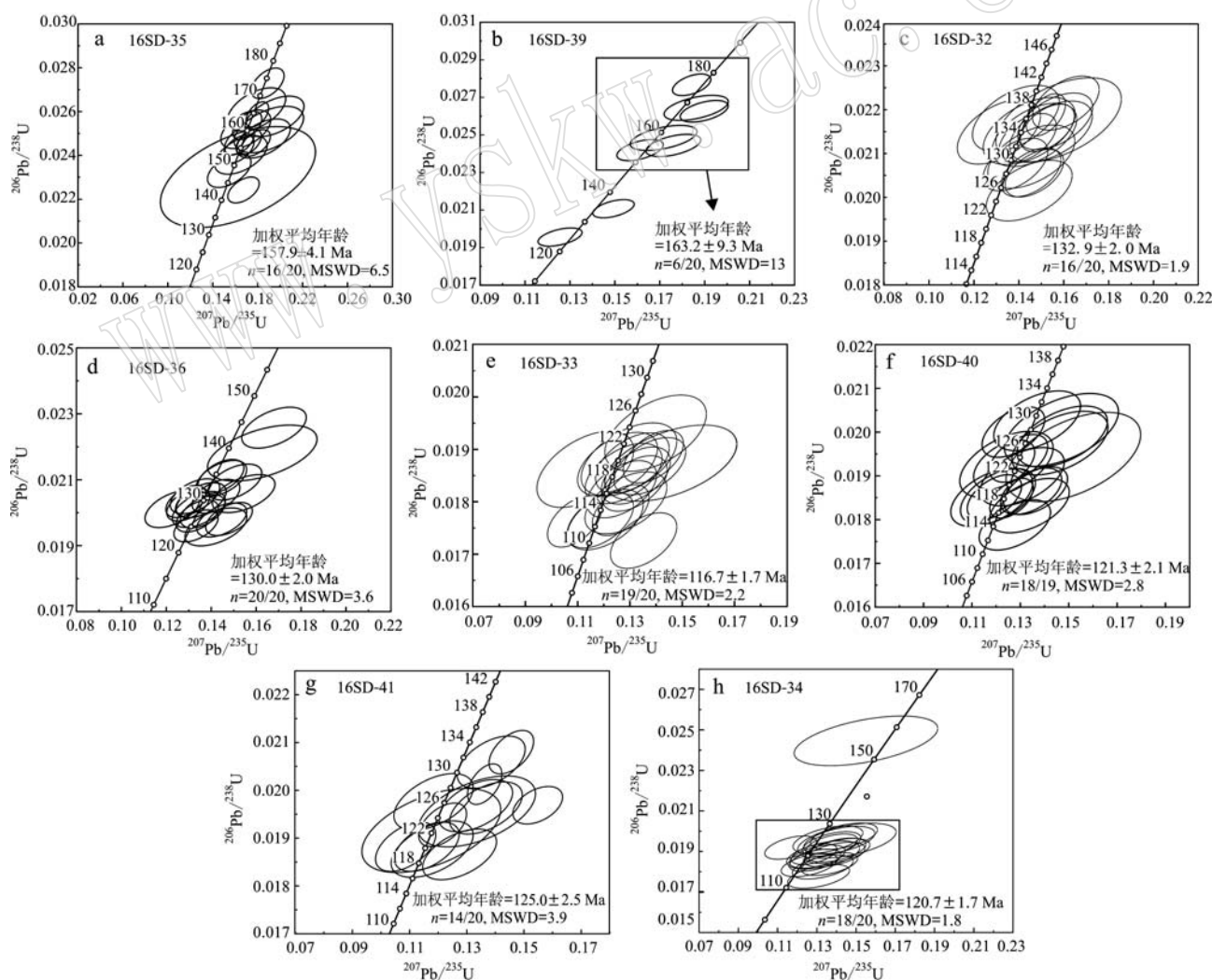


图 8 晚中生代花岗岩的锆石 U-Pb 同位素年龄谐和图

Fig. 8 Zircon U-Pb concordia diagrams and dating results of Late Mesozoic granites in Jiaodong area, Shandong Province

其余 16 个锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值集中在早白垩世早期,加权平均年龄值 132.9 ± 2.0 Ma (MSWD = 1.9, $n=16$) (图 8c)。16SD-36 样品中 20 个分析点所得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值集中在早白垩世,年龄变化范围较小,加权平均年龄为 130.0 ± 2.0 Ma (MSWD = 3.6, $n=20$) (图 8d)。上述 2 个样品分析结果说明,郭家岭型花岗岩的侵位年龄介于 $132.9 \pm 2.0 \sim 130 \pm 2.0$ Ma 之间,属早白垩世。

4.2.3 伟德山型花岗岩

16SD-33 和 16SD-40 两个样品分别有 20 和 19 个分析点,分别剔除 1 个谐和度较低的分析点 (16SD-33-08 和 16SD-40-19),其余分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $129 \pm 3 \sim 113 \pm 2$ Ma 之间(表 3),加权平均年龄分别为 116.7 ± 1.7 Ma (MSWD = 2.2, $n=19$) 和 121.3 ± 2.1 Ma (MSWD = 2.8, $n=18$) (图 8e、8f),代表了岩石结晶年龄。测年结果表明,伟德山型花岗岩的侵位年龄在 $121.3 \sim 116.7$ Ma 左右,属早白垩世。

4.2.4 崂山型花岗岩

样品 16SD-41 的 20 个分析点中 6 个测点 (16SD-41-02、08、12、13、15、17) 偏离谐和线较远,谐和度较低,其年龄并不能代表锆石形成的年龄。剩余测点落在谐和线上或附近,获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

变化于 $133 \pm 2 \sim 119 \pm 2$ Ma 之间(表 3),加权平均年龄为 125.0 ± 2.5 Ma (MSWD = 3.9, $n=14$) (图 8g),代表了岩石结晶年龄。测年结果表明,崂山型花岗岩的侵位年龄在 125 Ma 左右,属早白垩世。

4.2.5 脉岩

样品 16SD-34 的 20 个分析点所得年龄值中有 1 个侏罗纪年龄 (16SD-34-07),应为捕获锆石年龄。1 个锆石数据 (16SD-34-17) 在谐和图中偏离谐和线较远,谐和度较低。其余锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值加权平均年龄值为 120.7 ± 1.7 Ma (MSWD = 1.8, $n=18$) (图 8h),代表了岩浆侵位年龄。

4.3 全岩 Sr-Nd 同位素测试结果

样品的 Sr、Nd 同位素组成测试结果见表 4。经计算崂山型花岗岩初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.714 186,低于大陆地壳平均值 (0.717),高于地幔平均值 (0.709, Faure *et al.*, 1986),显示其具 A 型花岗岩特征,与玄武岩源区岩浆岩相似。与典型 A 型花岗岩比较,崂山型花岗岩的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值较低 (-18.71), ϵSr 值较高 (137.49),指示岩浆起源于下地壳基底变质岩和岩石圈地幔熔融(宋明春等, 2017)。白垩纪脉岩初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.709 892,接近地幔平均值,但脉岩的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值较低 (-21.24), ϵSr 值较高 (76.54),指示岩浆具有下地壳物质成分(图 6b)。

表 4 白垩纪崂山型花岗岩和脉岩 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素组成

Table 4 The Rb-Sr, Sm-Nd isotope compositions of the Cretaceous Laoshan-type granite and dike rock

样号	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	I_{Sr}	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	t_{DM1}	t_{DM2}	$\epsilon\text{Nd}(0)$	$\epsilon\text{Nd}(t)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$\epsilon\text{Sr}(t)$
16SD-34	0.3837	0.709 892	0.000 013	0.709 2	0.079 5	0.511 457	0.000 013	1 917	2 641	-23.0	-21.24	-0.60	76.54
16SD-41	2.854 1	0.714 186	0.000 015	0.709 1	0.089 1	0.511 591	0.000 008	1 902	2 439	-20.4	-18.71	-0.55	137.49

$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 参数的计算使用的是全岩的 Rb、Sr、Sm 和 Nd 微量元素含量; $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值计算采用 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.196 7$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512 638$, 计算公式为 $\epsilon\text{Nd}(t) = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样}} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1] \times 10 000$; $\epsilon\text{Sr}(t) = [(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{样}} / (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{CHUR}} - 1] \times 10 000$; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{CHUR}}$ 采用 0.704 5; t 代表成岩年龄; 同位素亏损地幔模式年龄 (t_{DM2}) 计算采用 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.213 7$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.513 15$; $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11}/\text{a}$, $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12}/\text{a}$ 。

5 讨论

花岗岩是大陆复杂动力学过程的产物,主要起源于地壳及壳幔过渡带岩石的部分熔融,花岗质岩浆可能因经历壳幔岩浆混合作用而使其地球化学特征与众不同,因而对花岗岩地球化学特征、岩石成因和地球动力学背景的综合研究有助于深入了解地球深部壳幔相互作用以及岩浆起源与演化过程中发生的构造活动事件(Brown *et al.*, 1995; Pitcher, 1997; Thompson, 2001; 崔芳华等, 2020)。

5.1 岩浆源区及演化

5.1.1 玲珑型花岗岩

玲珑型花岗岩样品 16SD-35 具有高 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 、 Al_2O_3 , 低 MgO , 富集 LREE、LILE, 亏损 HFSE 的地球化学特征,是具有陆壳特征的钾质花岗岩,属高钾钙碱性岩系。岩石的主量元素 TFe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 TiO_2 、 P_2O_5 与 SiO_2 呈明显的负相关关系,说明为同源岩浆演化的产物。微量元素具高 Ba、Sr 特征。Rb/Sr 均值为 0.31, Rb/Ba 均值为 0.10,更接近下地壳值 (0.17 和 0.07),明显不同于地幔值(表 1, McDonough and Sun, 1995)。Nb、Ta 负异常和 Pb 正异

常显示为大陆地壳特征(图 5b)。Sr 高且 Y 偏低,为高 Sr 低 Y 型花岗岩(张旗等, 2001, 2005)。在 Sr/Y - Y 图解(图 9b)中,数据点均落入埃达克岩区域,同时岩石无明显的负铕异常($\delta\text{Eu} = 0.92 \sim 1.58$),均指示玲珑型花岗岩具有埃达克岩特征。一般认为,埃达克岩源于俯冲洋壳熔融或下地壳熔融。玲珑型花岗岩具有较高的 K_2O 含量(3.88%~4.87%, 表 1), $\text{Mg}^\#$ 值一般小于 40, Cr、Ni 含量较低,这些特征接近下地壳熔融形成的埃达克岩(Rapp and Watson, 1999; Xu *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2005)。另外,玲珑型花岗岩中大量的继承锆石指示其既有华北板块新太古代结晶基底部分熔融的产物,也有苏鲁超高压变质带深俯冲物质的残留,因此认为,玲珑型花岗岩主要为华北下地壳重熔的 S 型花岗岩类,并有苏鲁超高压变质带深俯冲物质的参与。

5.1.2 郭家岭型花岗岩

郭家岭型花岗岩岩石化学成分以高钾钙碱岩系

列为主,属钠质花岗岩,富集 CaO 、 TFe_2O_3 、 MgO 、LREE、LILE,亏损 HFSE,无明显的负铕异常等,为典型的高 Ba、Sr 花岗岩。在 Sr/Y - Y 图解(图 9b)上所有样品点都落入埃达克岩区域, K_2O 含量为 3.15%~4.29%,这些特征与下地壳来源的埃达克岩接近; $\text{Mg}^\#$ 值介于 52.15~53.28, Cr、Ni 含量较玲珑型花岗岩大幅提高,可能与幔源物质的底侵作用或加厚的下地壳拆沉作用有关。另外,郭家岭型花岗岩的 La/Ta 平均值为 73.49(表 1),大于 25,显示出幔源岩浆岩的特点(Lassiter and Depaolo, 1997); Nb/Ta 平均值为 16.64(表 1),明显高于陆壳岩石(11 左右),接近幔源岩石(17.5 ± 2)(Taylor and McLennan, 1985; Green, 1995),也显示出壳幔混合成因的特点。郭家岭型花岗岩 Sr 同位素特征和氧同位素特征指示岩浆可能来自不同的源区且暗示壳源成分较多(宋明春等, 2009)。对花岗岩中普遍含有的微粒闪长岩包体研究表明,包体来自于幔源源区(关康等, 1998)。

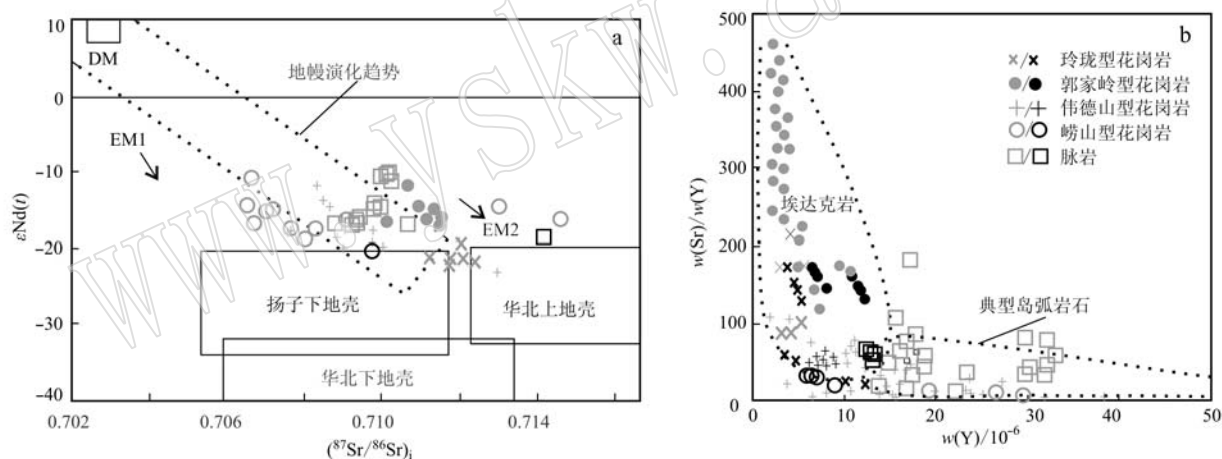


图 9 胶东中生代花岗岩类的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解(a, 底图据 Defant and Drummond, 1990)和 Sr/Y - Y 图解(b, 底图据 Yang *et al.*, 2012)

Fig. 9 Plots of $\varepsilon\text{Nd}(t)$ versus $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (a, after Defant and Drummond, 1990) and Sr/Y versus Y (b, after Yang *et al.*, 2012) of Mesozoic granites in Jiaodong

除本文数据外,还收集其他数据(灰色符号):玲珑型和郭家岭型花岗岩及 a 图中的基性岩脉数据来源于 Yang 等(2012)和宋英昕等(2018), a 图中的伟德山型花岗岩数据来源于黄洁等(2005)和董学等(2020), a 图中的崂山型花岗岩数据来源于赵广涛等(1997), b 图中的伟德山型和崂山型花岗岩数据来源于 Goss 等(2010), b 图中的基性岩脉数据来源于 Ma 等(2014a, 2014b)

In addition to the data from this study, other data (gray) are collected: in a, data for the Linglong and Guojialing-type granite and mafic dike are from Yang *et al.*, 2012 and Song Yingxin *et al.*, 2018, data for the Weideshan and Laoshan-type granite are from Huang Jie *et al.*, 2005, Zhao Guangtao *et al.*, 1998 and Dong Xue *et al.*, 2020; in b, data for the Weideshan and Laoshan-type granite are from Goss *et al.*, 2010, data for the mafic dike are from Ma *et al.*, 2014a, 2014b

郭家岭型花岗岩 Sr、Nd 同位素特征反映在岩浆上升或形成过程中受到中、上地壳物质的混染(杨进辉等, 2003)。钠质花岗岩是由年轻的底侵作用形

成的镁铁质岩石部分熔融形成,郭家岭型花岗岩岩浆可能是源于基性岩浆底侵作用形成的下地壳镁铁质岩石脱水部分熔融作用,融入了岩石圈地幔的地

球化学性质(杨进辉等, 2003), 属 I 型花岗岩。

5.1.3 伟德山型花岗岩

伟德山型花岗岩岩石化学组成富硅、铝、碱, 贫 MgO、MnO 和 CaO, 属于陆壳色彩的高钾钙碱性岩和橄榄安粗岩系列。岩石富集 LILE 和 LREE, 亏损 Nb、Ta, 暗示岩浆源区曾遭受地壳物质的混染或俯冲残留洋壳流体的交代 (Fitton *et al.*, 1991); 大部分样品的 Rb/Sr 值 (均值 0.24) 和 Rb/Ba 值 (均值 0.13) 接近于下地壳值 (0.17, 0.07) (McDonough and Sun, 1995)。在 Sr/Y - Y 图上样品点在埃达克岩区域和岛弧岩石区域均有分布 (图 9b)。

前人研究认为牙山岩体的岩浆来源于下地壳 (Yang *et al.*, 2004; 张华锋等, 2006a)。但是伟德山型花岗岩的 Sr-Nd 同位素特征指示, 可能除古老地壳的熔融外, 还有少量幔源岩浆的混合 (Cheng *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2019; 董学等, 2020), 这与伟德山型花岗岩中普遍含有具有幔源地球化学特征的微粒闪长质包体现象相符 (宋明春等, 2000; 胡芳芳等, 2005; 张华锋等, 2006a; Goss *et al.*, 2010)。Goss 等 (2010) 测试的牙山岩体中包体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 116 ± 1 Ma, 与寄主岩石同位素年龄基本一致, 指示包体与寄主岩石是同时形成的。岩相学和地球化学特征表明, 伟德山型花岗岩是壳源酸性岩浆与幔源基性岩浆混合的产物 (Landi *et al.*, 2004; 胡芳芳等, 2005; 张华峰等, 2006b; 张田等, 2007), 是壳幔混合成因的 I 型花岗岩。

5.1.4 崂山型花岗岩

崂山型花岗岩岩石地球化学成分中明显富硅、碱, 贫钙, 富集 LILE, 亏损 HFSE, 负 Eu 异常明显, 为 A 型花岗岩的典型特征, 属钾质花岗岩, 高钾钙碱性岩系列。微量元素具高 Rb 和低 Ba、Sr 花岗岩特点, 在 Sr/Y - Y 图上样品点在埃达克岩区域和岛弧岩石区域均有分布且更趋向后者 (图 9b)。K₂O 含量为 4.54%~4.95%, Mg[#] 值介于 36.93~37.92, Cr、Ni 含量较低, 说明与下地壳物质关系密切, 与幔源物质关系不大。花岗岩的 La/Ta 平均值为 24.72, 小于 25, 未显示出幔源岩浆岩的特点 (Lassiter and Depaolo, 1997), Nb/Ta 平均值为 11.78, 接近于陆壳 (~11) (Taylor and McLennan, 1985; Green, 1995), 显示出陆壳重熔型花岗岩特点。岩石中初始 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.714 186 (表 4), 低于大陆地壳平均值 (0.717), 高于地幔平均值 (0.709, Faure, 1986), 与玄武岩源区岩浆岩相似, 与古老地壳物质密切相关 (图 6b)。野

外地质考察发现, 崂山型与伟德山型花岗岩在空间上常紧密伴生, 形成 I-A 型复合花岗岩体, 因此推断, 在壳幔岩浆混合形成伟德山型花岗岩时, 下地壳古老基底岩石重熔, 产生 SiO₂ 饱和的崂山型花岗岩 (宋明春等, 2015)。

5.1.5 脉岩

岩石中相对富集 LILE 和 LREE, 相对亏损 HFSE, 贫 Ti, 与大陆弧钙碱性玄武岩相似, 指示其形成于陆弧构造环境 (宋明春等, 2017)。岩石的初始 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.709 892, 与玄武岩源区岩浆岩相似。其 ϵ Nd(t) 值较低 (-21.24), ϵ Sr(t) 值较高 (76.54), t_{DM2} 值为 2 641 Ma (表 4), 显示了与胶东早前寒武纪基底岩石关系密切 (图 6b), 指示岩浆起源于下地壳基底变质岩的部分熔融。在 Sr/Y - Y 图 (图 9b) 上样品点大都落入埃达克岩与岛弧岩石的交汇区域。K₂O 含量为 3.91%~4.05%, Mg[#] 值介于 51.96~52.28, Cr、Ni 含量较高, 暗示存在幔源组分, 或许与幔源物质的底侵或加厚的下地壳拆沉有关。岩石的 La/Ta 值介于 77.50~87.37 之间, 平均 80.67, 大于 25, 显示出幔源特征 (Lassiter and Depaolo, 1997); Nb/Ta 值介于 12.38~13.14 之间, 平均为 12.82, 接近于陆壳岩石 (11 左右) (Green, 1995; Taylor and McLennan, 1985)。综上, 正长斑岩脉的源区物质具有壳幔混合特点。

5.1.6 岩石地球化学成分及岩浆源区演化

胶东地区晚中生代花岗岩地球化学特征显示, 岩浆演化的规律性非常明显, 由早期的玲珑型花岗岩至晚期的崂山型花岗岩, 岩石化学成分由高钾钙碱性系列→橄榄安粗岩系列, 由过铝质→偏铝质 (图 3b、3c); 微量元素由高 Ba-Sr→低 Ba-Sr, 由高 Sr 低 Y→低 Sr 高 Y (图 6a、9b); 稀土元素由无或弱正铈异常→显著负铈异常 (图 5); 花岗岩类型由 S 型→I 型→A 型; 地幔性状由 EM2 型向 EM1 型演化, 由富集地幔转向亏损地幔或由岩石圈转向软流圈演变 (图 9a; 闫峻等, 2003; 刘建明等, 2003; 宋明春等, 2009)。玲珑型花岗岩和郭家岭型花岗岩具埃达克岩地球化学特征, 玲珑型花岗岩源区为下地壳的部分熔融, 而郭家岭型花岗岩源区为下地壳镁铁质岩石脱水部分熔融, 叠加岩石圈地幔物质组成; 伟德山型和崂山型花岗岩具有弧花岗岩特征, 伟德山型花岗岩源区为富集岩石圈地幔和地壳部分熔融, 崂山型花岗岩源区为伟德山型花岗岩形成过程中的下地壳岩石重熔。

5.2 花岗岩侵位时代及其与金成矿的时空关系

前人对胶东晚中生代岩浆岩开展了大量同位素测试研究工作,宋明春等(2019)统计了侏罗纪-白垩纪测试精度较高、运用不同测试方法的年龄数据。玲珑、郭家岭、伟德山、崂山4种类型花岗岩和脉岩成岩时代分别为164~140 Ma、130~125 Ma、126~108 Ma、120~107 Ma和121~114 Ma(胡世玲等,1987;徐洪林等,1997;关康等,1998;苗来成等,1998;Wang *et al.*, 1998;Zhao *et al.*, 1998;Zhang *et al.*, 2003a, 2003c;周建波等,2003;Hu *et al.*, 2004;郭敬辉等,2005;李俊建等,2005;邱连贵等,2008;谭俊等,2008;张田等,2008;Goss *et al.*, 2010;Zhang *et al.*, 2010;王世进等,2010, 2011;Yang *et al.*, 2012;丁正江等,2013;Ma *et al.*, 2013, 2014a;罗贤冬等,2014;董学等,2020;宋英昕等,2020)。此外,胶莱盆地莱阳群火山岩样品同位素年龄为~129 Ma(张岳桥等,2008),青山群火山岩形成时代为123~98 Ma(邱检生等,2001;Ling *et al.*, 2007;张岳桥等,2008;Liu *et al.*, 2009;匡永生等,2012)。本次测试得到的玲珑型花岗岩、郭家岭型花岗岩、伟德山型花岗岩、崂山型花岗岩和脉岩的侵位时代基本位于前人测试的年龄范围内。

胶东金矿在早白垩世早期及之前形成的地质体中均有产出,成矿期显然晚于围岩的成岩期。许多学者对胶东金矿的成矿时代进行了研究,对矿体中的黄铁矿、绢云母、石英等矿物进行测年,获取Ar-Ar同位素年龄和Rb-Sr等时线年龄,经统计,胶东西北部金矿床成矿年龄为123.0~110.6 Ma(杨进辉等,2000;Yang and Zhou, 2000, 2001;李厚民等,2003;Zhang *et al.*, 2003a, 2003b, 2003c;Hu *et al.*, 2004;Bi and Zhao, 2017)。比较发现,在胶东晚中生代花岗岩中,与金成矿年龄最为接近的是伟德山型花岗岩、崂山型花岗岩和脉岩,说明岩浆剧烈活动之期也是金的爆发式成矿期。宋明春等(2018, 2019)根据金矿化与晚中生代花岗岩类的时空关系,将侏罗纪玲珑型花岗岩和早白垩世早期郭家岭型花岗岩称为赋矿地质体,而将早白垩世中期的伟德山型花岗岩、崂山型花岗岩和中基性脉岩称为成矿期地质体,并认为胶东金矿的形成与伟德山型花岗岩及同期脉岩有关,强烈的岩浆活动为金成矿提供了热能和部分流体(宋明春,2014;宋明春等,2015;Song *et al.*, 2014, 2015)。

根据上述成岩成矿时代,结合晚中生代花岗岩侵位深度的研究成果,探讨反演花岗岩侵位与大规模金成矿的过程是:~160 Ma,玲珑型花岗岩岩浆侵位,侵位深度约为10~15 km(张华锋等,2006a),花岗岩固结成岩后缓慢隆升(图10a);~130 Ma,郭家岭型花岗岩岩浆侵位,侵位深度约为13 km(图10b;豆敬兆等,2015);~120 Ma,伟德山型、崂山型花岗岩及同期中基性脉岩侵位,伟德山型花岗岩侵位深度约为3 km(图10c;张华锋等,2006a;豆敬兆等,2015;宋明春等,2020a),此阶段的强烈岩浆活动诱发广泛的流体循环,随着地壳快速隆升导致流体因降温、降压而沸腾,发生大规模金成矿作用。由于金成矿温度显著低于岩浆温度,因此金矿主要产于同期的花岗岩(伟德山型和崂山型花岗岩)的外围,而不在其内部,主要赋存于因早白垩世中期岩浆快速隆升而在玲珑型和郭家岭型花岗岩与早前寒武纪变质岩之间产生的拆离断层中和花岗岩内部的张裂隙中(图10c)。之后地壳缓慢隆升剥蚀,直至目前各花岗岩岩体和部分金矿被剥露出地表(图10d,柳振江等,2010)。

5.3 成岩、成矿构造环境及演化

在构造环境判别图解中,胶东晚中生代花岗岩样品均投入火山弧花岗岩、同碰撞花岗岩区域,明显区别于板内和洋中脊花岗岩类,具有活动大陆边缘火成岩特点(图11)。4种类型花岗岩的地球化学特征、物源和成岩构造背景具有良好的连续性,基本揭示了胶东中生代地球动力学演化历史(宋明春等,2015)。

三叠纪时,华北板块与扬子板块强烈碰撞使本区处于强烈造山构造背景下(宋明春等,2015),侏罗纪玲珑型花岗岩成岩时仍受板块碰撞后续效应的影响,反映在 $\epsilon\text{Nd}(t) - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解上样品投点于扬子下地壳与华北上地壳之间,接近于EM2型富集地幔,与白垩纪花岗岩类明显不同(图9a),指示其物源比较复杂;在相关微量元素图解上,显示了同碰撞-后碰撞特征(图11c),且接近于板内花岗岩(图11d);在 $R_2 - R_1$ 图解(图11e)中,落入同碰撞花岗岩附近,其S型花岗岩特征及普遍存在的片麻理现象指示成岩时处于挤压构造状态。郭家岭型花岗岩与玲珑型花岗岩的Sr、Y含量均具有埃达克岩特征(图9b),但郭家岭型花岗岩物源兼具幔源成分和华北古陆壳物质,Sr、Nd同位素特征与伟德山型花岗岩、崂山型花岗岩、脉岩接近(宋明春等,2015)。伟德

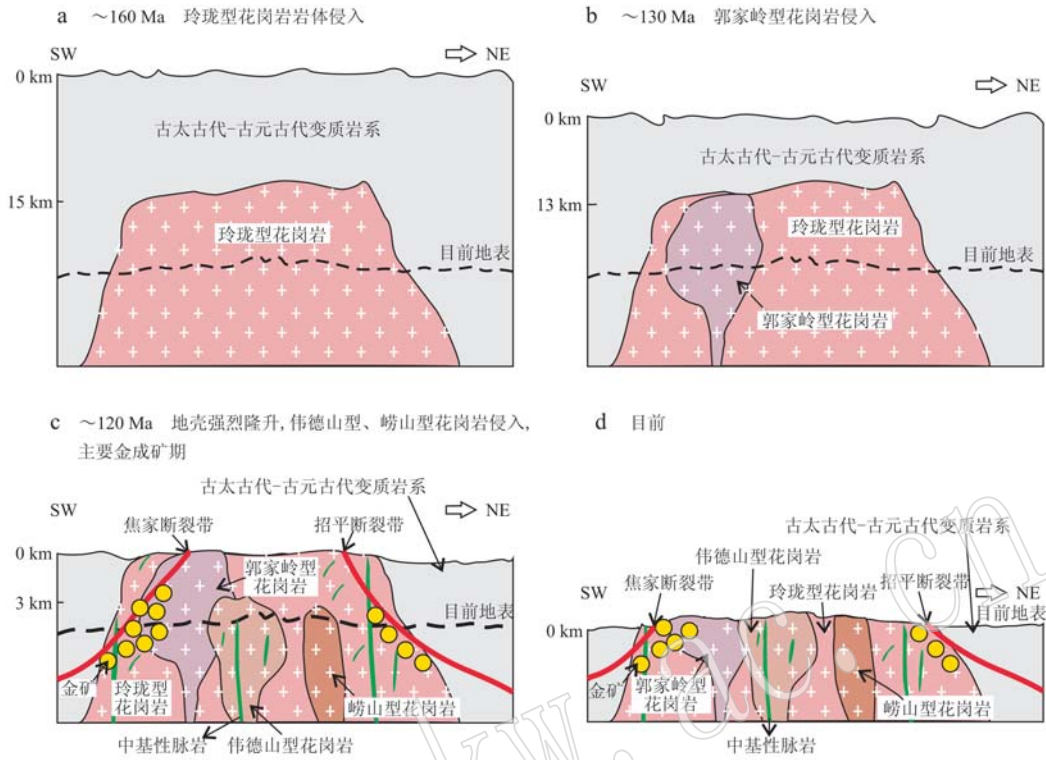


图 10 胶东地区中生代花岗岩侵位过程与金成矿关系示意图[据 Li 等(2018)修改]

Fig. 10 Emplacement and exhumation histories of Mesozoic granites in Jiaodong area(modified after Li *et al.*, 2018)

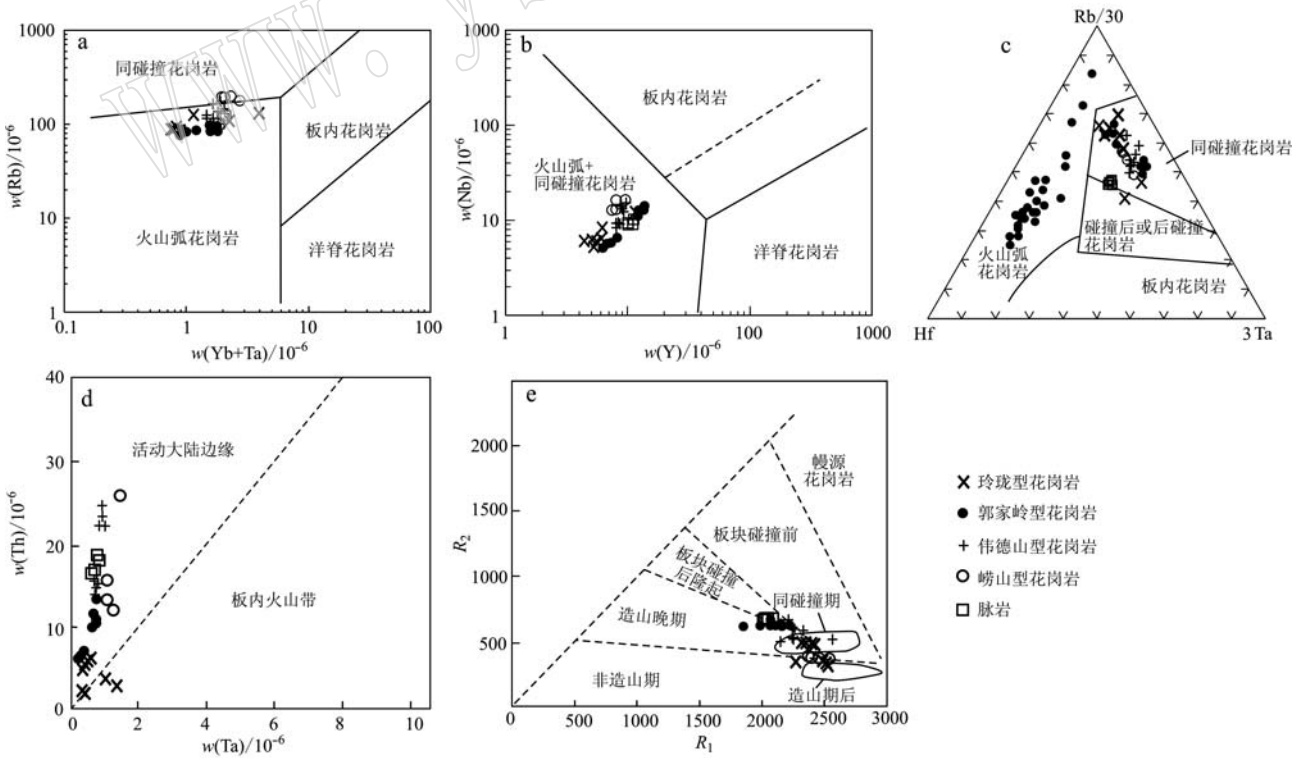


图 11 晚中生代花岗岩构造环境判别图解[据 Pearce 等(1984)、Batchelor 和 Bowden(1985)、Harris 等(1986)、Gorton 和 Schandl(2002), c 中部分数据引自宋英昕等(2020)]

Fig. 11 Tectonic discrimination diagrams for the Late-Mesozoic granites in Jiaodong Peninsula (base map after Pearce *et al.*, 1984; Batchelor and Bowden, 1985; Harris *et al.*, 1986; Gorton and Schandl, 2002 and some data in c after Song Yingxin *et al.*, 2020)

山型花岗岩在地球化学方面呈现出岛弧或大陆弧花岗岩的特征(图 9b),物质来源于华北古地壳和富集岩石圈地幔部分熔融,与郭家岭型花岗岩、崂山型花岗岩和脉岩具有连续演化趋势。伟德山型花岗岩形成过程中,下地壳岩石重熔形成的崂山 A 型花岗岩,具有典型的岛弧岩石特征和非造山特征(图 9b、图 11;宋明春等, 2015),A 型花岗岩多出于地壳伸展减薄环境下,崂山型花岗岩即是太平洋板块向欧亚板块俯冲之后,俯冲板块后撤引发地壳减薄伸展的产物。伟德山型花岗岩与崂山型花岗岩近乎同时产生,而且二者在空间上常伴生在一起构成 I-A 复合型岩体,指示其同样形成于伸展构造背景。郭家岭型花岗岩既具有类似于玲珑型花岗岩的埃达克岩特征,又具有与伟德山型花岗岩相似的地球化学特征,指示其形成于构造环境转换过程中,即形成于由挤压向伸展的过渡环境。胶东的脉岩显示典型的岛弧岩石特征(图 9b),应具大陆弧构造背景,形成于古太平洋板块俯冲作用下的伸展环境,物质来源于富集岩石圈地幔部分熔融,源区或有海水参与(刘洪文等, 2002)。可见,由侏罗纪到白垩纪,胶东地区经历了大地构造体系(华北-扬子→欧亚-太平洋)和构造应力机制(挤压→伸展)的转换。同位素示踪显示胶东早白垩世具有富集地幔特征(图 9a),推测与受同期岩石圈拆沉和板块俯冲的影响有关(宋明春等, 2015)。

综上,推断了胶东地区晚中生代构造-岩浆-成矿过程。三叠纪,扬子板块与华北板块碰撞挤压(陈衍景等, 2004),形成苏鲁超高压变质岩系(图 12a;郭敬辉等, 2005)。其后,伴随强烈的折返和板块断离,区内进入后造山期,超高压变质带快速抬升。侏罗纪,受太平洋板块俯冲影响,地壳持续增厚,晚侏罗世时,因地幔隆起导致增厚地壳局部发生减薄,造山带根部垮塌,由造山带物质或扬子和华北克拉通基底物质混合组成的新生下地壳活化,引发大范围陆壳重熔,岩浆上侵形成了玲珑型花岗岩(图 12a;宋明春等, 2015)。早白垩世,断离的太平洋板块俯冲板片扰动软流圈促使构造-岩浆活动强烈发育(宋明春等, 2015)。俯冲板块的前端回撤致使大陆岛弧裂离,岩石圈地幔失稳拆沉,软流圈上涌引起大规模减压熔融(Ma *et al.*, 2014b)和局部伸展,富集岩石圈地幔部分熔融产生的基性岩浆底侵作用于底部古老或新生地壳,促使地壳底部岩石部分熔融产生花岗质岩浆(邱连贵等, 2008),为包括胶东地区在

内的华北克拉通东部晚中生代花岗质岩石提供岩浆来源(图 12b)。此外,幔源基性岩浆上侵分异出煌斑岩及其它暗色脉岩,最近在文登市柳林庄发现了幔源的高镁闪长岩(宋明春等, 2020b);幔源和壳源岩浆不同程度混合及结晶分异,先后形成郭家岭型、伟德山型及崂山型花岗岩(宋明春等, 2015),郭家岭型花岗岩可能形成于俯冲板块回撤早期,呈现出挤压-伸展过渡状态;伟德山型及崂山型花岗岩形成于俯冲板块回撤过程中,是岩石圈伸展减薄的产物。

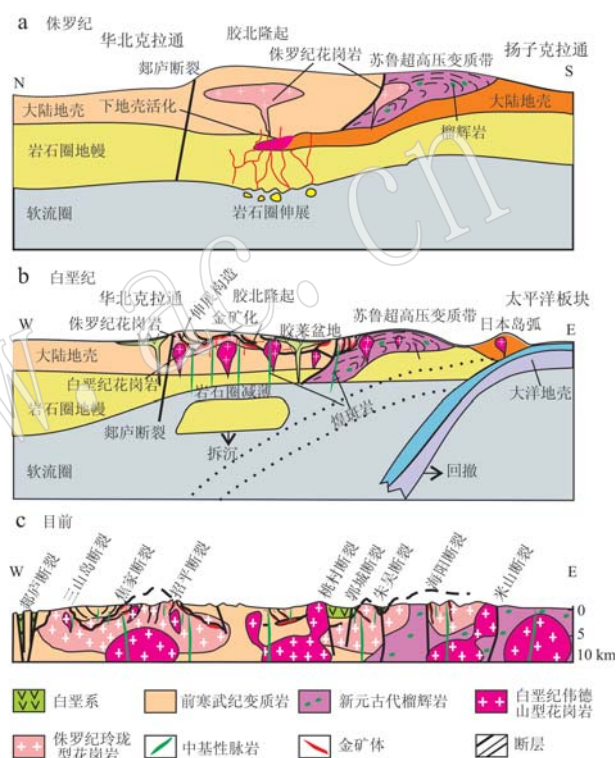


图 12 胶东地区构造-岩浆-成矿作用过程[改自 Yang 等 (2012), Ma 等 (2014b), 宋明春 (2014), 宋明春等 (2015)]
Fig. 12 A tectonic model for gold mineralization and magmatism in the Jiaodong Peninsula (modified after Yang *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2014b; Song Mingchun, 2014; Song Mingchun *et al.*, 2015)

在晚中生代大规模岩浆活动的同时,胶东地区发生了强烈的地壳隆升,其中白垩纪地壳隆升和降温速率明显大于侏罗纪,尤其伟德山型花岗岩侵位过程中地壳隆升速率非常快(张华锋等, 2006a, 2006b;林少泽等, 2013;豆敬兆等, 2015;宋明春等, 2017)。地壳强烈隆升导致先成玲珑型花岗岩岩基之上的早前寒武纪变质岩层发生大幅度拆离滑脱,形成大致沿花岗岩岩基顶部发育的拆离断层,三山岛断裂、焦家断裂和招平断裂均是热隆-伸展体制

下的铲形下滑断裂,属拆离断层的组成部分,同时产生的还有张裂隙、早前寒武纪变质岩系中的层间滑动构造、高角度正断层、伸展断陷盆地盆缘断裂等组成伸展构造系统(宋明春等, 2017)。早白垩世岩浆热隆-伸展构造系统造成的构造-岩浆-流体耦合作用构成了胶东大规模金矿成矿的重要因素,强烈的岩浆活动既为流体活化提供热源,又是形成伸展拆离构造的动力源之一,对金矿的形成起到“引擎”作用(宋明春等, 2020a);拆离断层系统不但为成矿流体提供了良好的运移通道,而且为流体富集、矿体定位提供了有利的空间。沿玲珑花岗岩体与早前寒武纪变质基底发育的焦家断裂、三山岛断裂、招平断裂等规模大、连续性好,向深部断裂倾角变缓,为金矿床的形成提供了充足的储存空间,形成大量金矿与玲珑型花岗岩相伴分布的空间格局(图 12c)。

6 结论

(1) 依据胶东地区晚中生代花岗岩地球化学特征推断岩浆起源与演变趋势:玲珑型花岗岩物质来源于造山带俯冲杂岩和华北克拉通下地壳的部分熔融;郭家岭型花岗岩物质来源于下地壳镁铁质岩石脱水部分熔融,部分继承了岩石圈地幔物质组成;伟德山型花岗岩物质来源于华北地壳和富集岩石圈地幔的部分熔融;崂山型花岗岩物质来源于伟德山型花岗岩形成过程中的下地壳岩石重熔。由侏罗纪至早白垩世,地球化学特征的演化趋势是:岩石化学成分由高钾钙碱性系列→橄榄安粗岩系列、由过铝质→偏铝质;微量元素由高 Ba-Sr→低 Ba-Sr、由高 Sr 低 Y→低 Sr 高 Y,稀土元素由无或弱正铈异常→显著负铈异常,花岗岩类型由 S→I→A 型,指示地幔性状由 EM2 型向 EM1 型演化,由富集地幔转向亏损地幔或由岩石圈转向软流圈演变。

(2) 本次测试得出玲珑型花岗岩、郭家岭型花岗岩、伟德山型花岗岩的侵位时代分别为 163.2~157.9 Ma、132.9~130.0 Ma、121.3~116.7 Ma;崂山型花岗岩和脉岩的侵位时代分别为 125.0 Ma 和 120.7 Ma,与前人年龄测试数据基本相符。其中伟德山型花岗岩、崂山型花岗岩和脉岩的形成时代与金成矿年龄最为接近,指示此阶段的岩浆活动与金成矿关系密切。

(3) 胶东 4 种类型花岗岩类的地球化学特征、物质来源和形成构造背景连续演变特征,指示胶

东地区由侏罗纪到白垩纪经历了由华北-扬子构造体系向欧亚-太平洋构造体系和由挤压机制向伸展机制的转换。玲珑型花岗岩形成于挤压构造背景,具有受华北板块与扬子板块碰撞影响的后碰撞特征花岗岩特征;郭家岭型、伟德山型及崂山型花岗岩形成于太平洋板块的俯冲构造环境,是伸展构造活动的产物。早白垩世强烈的热隆-伸展构造为胶东大规模金成矿提供了有利条件。

致谢 感谢审稿专家对本文提出的宝贵修改意见,研究工作中得到领导和同事的启发和指导,在此一并致以诚挚的感谢。

References

- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters[J]. *Chemical Geology*, 48: 43~55.
- Bi S J and Zhao X F. 2017. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Jiehe gold deposit in the Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton: Implications for regional gold metallogeny[J]. *Ore Geology Reviews*, 86: 639~651.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; meteorite studies[A]. Henderson P. Rare earth Element Geochemistry[C]. Elsevier, Amsterdam, 63~114.
- Brown M, Averkin Y A, McLellan E L, et al. 1995. Melt segregation in migmatites[J]. *Journal of Geophysical Research*, 100(B8): 15 655~15 679.
- Chen Yanjing, Pirajno F, 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).
- Cheng S B, Liu Z J, Wang Q F, et al. 2017. Mineralization age and geodynamic background for the Shangjiazhuang Mo deposit in the Jiaodong gold province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 876~890.
- Cui Fanghua, Xu Xuechun, Zheng Changqing, et al. 2020. The paleo-Pacific plate subduction and slab roll back beneath eastern North China Craton: Insights from the Late Mesozoic granitoids in Xingcheng area, western Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(8): 2 463~2 492 (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, 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).
- Dong Xue, Li Dapeng, Zhao Rui, *et al.* 2020. Zircon U-Pb chronology and petrogenesis of Zetou pluton in the Jiaodong Peninsula: Implications for regional petrogenesis and mineralization in the Aptian to Albian [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(5): 1 501~1 514 (in Chinese with English abstract).
- Dou Jingzhao, Fu Shun and Zhang Huafeng. 2015. Consolidation and cooling paths of the Guojialing granodiorites in Jiaodong Peninsula: Implication for crustal uplift and exhumation [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(8): 2 325~2 336 (in Chinese with English abstract).
- Faure G. 1986. Principles of Isotope Geology [J]. New York: John Wiley and Sons, 183~199.
- Fitton J G, James D and Leeman W P. 1991. Basic magmatism associated with the late Cenozoic extension in the western United States, compositional variations in space and time [J]. *Lithos*, 120(3): 221~241.
- Gorton M P and Schandl E S. 2002. From continents to island arc: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within plate felsic to intermediate volcanic rocks [J]. *Canadian Mineralogist*, 38: 1 065~1 073.
- Goss C S, Wilde S A, Wu F Y, *et al.* 2010. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton [J]. *Lithos*, 120(3~4): 309~326.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system [J]. *Chemical Geology*, 120: 347~359.
- Guan Kang, Luo Zhenkuan, Miao Laicheng, *et al.* 1998. SHRIMP in zircon chronology for Guojialing suite granite in Jiaodong Zhaoye district [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 33(3): 318~328 (in Chinese with English abstract).
- Guo Chunli, Wu Fuyuan, Yang Jinhui, *et al.* 2004. The extensional setting of the Early Cretaceous magmatism in eastern China: Rexample from the Yinmawanshan pluton in southern Liaoning Peninsula [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1 193~1 204 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jinghui, Chen Fukun, Zhang Xiaoman, *et al.* 2005. Evolution of syn- to post-collisional magmatism from north Sulu UHP belt eastern China: Zircon U-Pb geochronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1 281~1 301 (in Chinese with English abstract).
- Harris N B W, Pearce J A and Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision~zone magmatism [A]. Coward M P and Ries A C. Collision Tectonics [C]. Geological Society, London, Special Publication, 19(1): 67~81.
- Hu F F, Fan H R, Yang J H, *et al.* 2004. Mineralizing age of the Rushan lode gold deposit in the Jiaodong Peninsula: SHRIMP U-Pb dating on hydrothermal zircon [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1 629~1 636.
- Hu Fangfang, Fan Hongrui, Yang Jinhui, *et al.* 2005. Magma mixing for the origin of granodiorite: Geochemical, Sr-Nd isotopic and zircon Hf isotopic evidence of dioritic enclaves and host rocks from Changshannan granodiorite in the Jiaodong Peninsula, eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 569~586 (in Chinese with English abstract).
- Hu Shiling, Wang Songshan, Sang Haiqing, *et al.* 1987. Isotopic ages of Linglong and Guojialing batholiths in Shandong Province and their geological implication [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 3(3): 38~42 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jie, Zheng Yongfei, Wu Yuanbao, *et al.* 2005. Geochemistry of elements and isotopes in igneous rocks from the Wulian region in the Sulu Orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 545~568 (in Chinese with English abstract).
- Kuang Yongsheng, Pang Chongjin, Luo Zhenyu, *et al.* 2012. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology and geochemistry of mafic rocks from Qingshan group, Jiaodong area: Implication for the destruction of the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1 073~1 091 (in Chinese with English abstract).
- Landi P, Métrich N, Bertagnini A, *et al.* 2004. Dynamics of magma mixing and degassing recorded in plagioclase at Stromboli (Aeolian Archipelago, Italy) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147(5): 629~631.
- Lassiter J C and Depaolo D J. 1997. Plumes/lithosphere interaction in the generation of continental and ocranic flood basalts: Chemical and isotope constraitions [J]. *Geophysical Monography 100*, American Geophysical Union, 26(5): 335~355.
- Li Hongkui, Geng Ke, Zhuo Chuanyuan, *et al.* 2016. Tectonic Environment and Mineralization of Jiaodong Gold Deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~472 (in Chinese).
- Li Houmin, Mao Jingwen, Shen Yuanchao, *et al.* 2003. Ar-Ar ages of K-feldspar and quartz from Dongji gold deposit, northwest Jiaodong, and their significance [J]. *Mineral Deposits*, 22(1): 72~77 (in Chinese with English abstract).
- Li Junjian, Luo Zhenkuan, Liu Xiaoyang, *et al.* 2005. Geodynamic setting for formation of large-superlarge gold deposits and Mesozoic granites in Jiaodong area [J]. *Mineral Deposits*, 24(4): 361~372 (in Chinese with English abstract).

- Li X H, Fan H R, Hu F F, *et al.* 2019. Linking lithospheric thinning and magmatic evolution of late Jurassic to early cretaceous granitoids in the Jiaobei Terrane, southeastern North China Craton[J]. *Lithos*, 324~325: 280~296.
- Li X H, Fan H R, Zhang Y W, *et al.* 2018. Rapid exhumation of the northern Jiaobei Terrane, North China Craton in the Early Cretaceous: Insights from Al-in-hornblende barometry and U-Pb geochronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160: 365~379.
- 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 and Technology Edition)*, 40 (2): 147~160(in Chinese with English abstract).
- Lin Shaoze, Zhu Guang, Yan Lejia, *et al.* 2013. Discussion on uplifting mechanism of the Linglong batholith in eastern Shandong [J]. *Geological Review*, 59 (5): 832~844 (in Chinese with English abstract).
- Ling W L, Xie X J, Liu X M, *et al.* 2007. Zircon U-Pb Dating on the Mesozoic Volcanic Suite from the Qingshan Group Stratotype Section in Eastern Shandong Province and Its Tectonic Significance[J]. *Science China Earth Sciences*, 50(6): 813~824.
- Liu Hongwen, Xing Shuwen and Sun Jinggui. 2002. Oxygen and carbon isotope geochemistry of dark dikes in two types of gold deposits of northwest Jiaodong Peninsula[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 32 (1): 11~15 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianming, Zhang Hongfu, Sun Jinggui, *et al.* 2003. C-O and Sr-Nd isotopic geochemistry of mantle derived magmatic rocks in Shandong Province[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 33(10): 921~930(in Chinese with English abstract).
- Liu S, Hu R Z, Gao S, *et al.* 2009. Zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of adakitic volcanic rocks from Jiaodong, Shandong Province, Eastern China: Constraints on petrogenesis and implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 445~458.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257: 34~43.
- Liu Zhenjiang, Wang Jianping, Zheng Dewen, *et al.* 2010. Exploration prospect and post-ore denudation in the northwestern Jiaodong Gold Province, China: Evidence from apatite fission track thermochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3 597~3 611(in Chinese with English abstract).
- Luo Xiandong, Yang Xiaoyong, Duan Liu'an, *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).
- 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*, 162~163 (Complete): 251~263.
- Ma L, Jiang S Y, Hofmann A W, *et al.* 2014b. Lithospheric and asthenospheric sources of lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: A consequence of rapid lithospheric thinning beneath the North China Craton? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 124: 250~271.
- Ma L, Jiang S Y, Hou M L, *et al.* 2014a. Geochemistry of Early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: Implications for lithospheric evolution of the eastern North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 25(2): 859~872.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The Composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120: 223~253.
- Miao Laicheng, Luo Zhenkuan, Guan Kang, *et al.* 1998. The implication of the SHRIMP U-Pb age in zircon to the petrogenesis of the Linglong granite, east Shandong Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14 (2): 198~206(in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 37: 215~224.
- 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: 956~983.
- Pitcheur W S. 1997. *The Nature and Origin of Granite*[M]. Dordrecht: Springer.
- Qian Q, Zhong S L, Li T Y, *et al.* 2002. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Badaling high Ba-Sr granitoids: A comparison of igneous rocks from North China and the Dabie-Sulu Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 275~292.
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Luo Qinghua, *et al.* 2001. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating for volcanic rocks of Qingshan formation in Jialai basin, eastern Shandong Province: A case study of the Fenlingshan volcanic apparatus in Wulian county[J]. *Geological Journal of China Universities*, 7 (3): 351~355(in Chinese with English abstract).
- Qiu Liangui, Ren Fenglou, Cao Zhongxiang, *et al.* 2008. Late Mesozoic magmatic activities and their constraints on geotectonics of Jiaodong region[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(1): 117~123(in Chinese with English abstract).

- Rapp R P and Watson E B. 1999. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: Implications for continental growth and crust mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36(4): 891~931.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22: 247~263.
- Saunders A D, Norry M J and Tarney J. 1988. Origin of MORB and chemically depleted mantle reservoirs: Trace element constraints[J]. *Journal Petrology, Special Lithosphere Issue*, 1: 415~445.
- Song Mingchun. 2008. Composition, background and evolution of geotectonic units in Shandong Province [J]. *Geological Survey and Research*, 3: 165~175(in Chinese).
- Song Mingchun. 2014. Jiaodong type gold deposit and its metallogenic tectonic magmatic background[J]. *Mineral Deposit*, 33(S1): 131~132(in Chinese).
- Song M C, Deng J, Yi P H, *et al.* 2014. The kiloton class Jiaojia gold deposit in eastern Shandong Province and its genesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(3): 801~824.
- Song Mingchun, Li Jie, Li Shiyong, *et al.* 2018. Late Mesozoic thermal upwelling-extension structure in east Shandong Province and its geodynamic setting[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 48(4): 941~964(in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Li Jie, Zhou Jianbo, *et al.* 2020b. The discovery and tectonic setting of the Early Cretaceous high-Mg diorites in the Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(1): 279~296(in Chinese with English abstract).
- Song M C, Li S Z, Santosh M, *et al.* 2015. Types, characteristics and metallogenesis of gold deposits in the Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 612~625.
- Song Mingchun, Lin Shaoyi, Yang Liqiang, *et al.* 2020a. Metallogenic model of Jiaodong Peninsula gold deposits[J]. *Mineral Deposits*, 39(2): 215~236(in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Song Yingxin, Ding Zhengjiang, *et al.* 2018. Jiaodong gold deposits: Essential characteristics and major controversy [J]. *Gold Science and Technology*, 26(4): 406~422(in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Song Yingxin, Ding Zhengjiang, *et al.* 2019. The discovery of The Jiaojia and the Sanshandao giant gold deposits in Jiaodong Peninsula and discussion on the relevant issues[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(1): 92~110(in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun and Wang Peicheng. 2013. *Regional Geology in Shandong Province*[M]. Jinan: Shandong Provincial Map Publishing House, 25~720(in Chinese).
- Song Mingchun, Xu Junxiang, Wang Peicheng, *et al.* 2009. *Tectonic Framework and Tectonic Evolution of Shandong Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~274(in Chinese).
- Song Mingchun and Yan Qingli. 2000. Characteristics of dioritic inclusions in Weideshan superunit and its magma origin in Jiaonan Area [J]. *Shandong Geology*, 16(4): 16~21(in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Zhang Junjun, Zhang Pijian, *et al.* 2015. Discovered and tectonic-magmatic background of superlarge gold deposit in offshore of northern Sanshandao, Shandong Peninsula, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 365~383(in Chinese with English abstract).
- Song Yingxin, Song Mingchun, Sun Weiqing, *et al.* 2018. Metallogenic epoch and regional crust evolution in the Jiaodong gold deposit, Shandong Province: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb ages of mafic dykes[J]. *Geological Bulletin of China*, 37(5): 908~919(in Chinese with English abstract).
- Song Yingxin, Yu Xuefeng, Li Dapeng, *et al.* 2020. Petrogenesis of the Beijie pluton from the northwestern Jiaodong Peninsula: Constraints from zircon U-Pb age, petrogeochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(5): 1477~1500(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 [J]. *Geological Society of Special Publication, London*, 42(1): 313~345.
- Tan Jun, Wei Junhao, Guo Lingli, *et al.* 2008. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and phenocryst EPMA study of dikes in Guocheng area, Jiaodong: Implications for lithospheric evolution[J]. *Science in China (Series D)*, 38(8): 913~929(in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[J]. Oxford: Blackwell, 91~92.
- Thompson A B. 2001. Clockwise P-T paths for crustal melting and H₂O recycling in granite source regions and migmatite terrains[J]. *Lithos*, 56(1): 33~45.
- Wang L G, Qiu Y M, Mc Naughton N J, *et al.* 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northeastern Jiaodong peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids [J]. *Ore Geology Reviews*, 13: 275~291.
- Wang Q, McDermott F, Xu J F, *et al.* 2005. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: Lower-crustal melting in an intra-continental setting[J]. *Geology*, 33: 465~468.
- Wang Shijin, Wan Yusheng, Guo Ruipeng, *et al.* 2011. SHRIMP zircon dating of Linglong type (super unit) granite in eastern Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 27(4): 1~7(in Chinese).

- nese with English abstract).
- Wang Shijin, Wan Yusheng, Wang Wei, *et al.* 2010. Forming ages of granites in Laoshan area of Shandong Province: Zircon SHRIMP U-Pb dating[J]. Shandong Land and Resources, 26(10): 1~6(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhongliang, Zhao Rongxin, Zhan Qing, *et al.* 2014. Magma mixing for the high Ba-Sr Guojiling type granitoids in northwest Jiaodong Peninsula: Constraints from petrogeochemistry and Sr-Nd isotopes [J]. Acta Petrologica Sinica, 30(9): 2 595~2 608(in Chinese with English abstract).
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constraints[J]. Earth & Planetary Science Letters, 104(2~4): 381~397.
- Xu Guizhong, Zhou Rui, Yan Zhen, *et al.* 2001. Discussion on the evidence of Mesozoic lithosphere thinning and its dynamic mechanism in Jiaodong Area[J]. Geotectonica et Metallogenia, 25 (4): 368~380 (in Chinese with English abstract).
- Xu Honglin, Zhang Dequan and Sun Guiying. 1997. Characteristics and genesis of Kunyushan granite and its relation with gold deposits in Jiaodong[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 16(2): 131~143(in Chinese with English abstract).
- Xu J F, Shinjio R, Defant M J, *et al.* 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust[J]. Geology, 12: 1 111~1 114.
- Yan Jun, Chen Jiangfeng, Xie Zhi, *et al.* 2003. Mantle derived xenoliths from Late Cretaceous basalts in eastern Shandong: New evidence for timing of lithospheric thinning in eastern China[J]. Chinese Science Bulletin, 48(14): 1 570~1 574(in Chinese with English abstract).
- Yang J H. 2003. A Review of the Geodynamic Setting of large scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: An association with lithospheric thinning [J]. Ore Geology Review, 23: 125~152.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, *et al.* 2004. Multiple sources for the origin of granites: Geochemical and Nd/Sr isotopic evidence from the Gudaoling granite and its mafic enclaves, northeast China [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 68: 4 469~4 483.
- Yang J H and Zhou X H. 2000. The Rb-Sr isochron of ore and pyrite subsamples from Linglong gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China and their geological significance[J]. Chinese Science Bulletin, 45 (24): 2 272~2 276.
- Yang J H and Zhou X H. 2001. Rb-Sr, Sm-Nd and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of lode gold deposits [J]. Geology, 29(8): 711~714.
- Yang Jinhui, Zhou Xinhua and Chen Lihui. 2000. Dating of gold mineralization for super-large altered tectonotype gold deposits in Northwestern Jiaodong Peninsula and its implications for gold metallogeny[J]. Acta Petrologica Sinica, 16(3): 454~458(in Chinese with English abstract).
- Yang Jinhui, Zhu Meifei, Liu Wei, *et al.* 2003. Geochemistry and petrogenesis of Guojialing granodiorites from the northwestern Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 19 (4): 692~700(in Chinese with English abstract).
- Yang K F, Fan H R and Santosh M. 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, 146~147: 112~127.
- Yang Q Y and Santosh M. 2015. Early Cretaceous magma flare-up and its implications on gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China [J]. Ore Geology Reviews, 65: 626~642.
- Zhang H, Sun M, Zhou X, *et al.* 2003b. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 67: 4 373~4 387.
- Zhang Huaifeng, Li Shengrong, Zhai Mingguo, *et al.* 2006a. Crust uplift and its implications in the Jiaodong Peninsula, eastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 22 (2): 285~295(in Chinese with English abstract).
- Zhang Huaifeng, Zhai Mingguo, Tong Ying, *et al.* 2006b. Petrogenesis of the Sanfoshan high Ba-Sr granite, Jiaodong Peninsula, eastern China [J]. Geological Review, 52 (1): 43~53(in Chinese with English abstract).
- Zhang J, Zhao Z F, Zheng Y F, *et al.* 2010. Postcollisional magmatism: Geochemical constraints on the petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Sulu orogen, China[J]. Lithos, 119(3~4): 512~536.
- Zhang L C, Shen Y C, Liu T B, *et al.* 2003a. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Rb-Sr isochron dating of the gold deposits on northern margin of the Jialai Basin, Shandong, China[J]. Science China: Earth Science, 46(7): 708~718.
- Zhang Qi, Li Chongdong, Wang Yan, *et al.* 2005. Mesozoic high-Sr and Low-Yb granitoids and low-Sr and high-Yb granitoids in eastern China: Comparison and geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(6): 1 527~1 537(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, *et al.* 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 17(2): 236~244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tian and Zhang Yueqiao. 2007. Geochronological sequence of

- Mesozoic intrusive magmatism in Jiaodong Peninsula and its tectonic constraints[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 323~336(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 X O, Cawood P A, Wilde S A, *et al.* 2003c. Geology and timing of mineralization at the Cangshang gold deposit, north-western Jiaodong Peninsula, China[J]. *Mineralium Deposit*, 38(2): 141~153.
- Zhang Yueqiao, Li Jinliang, Zhang Tian, *et al.* 2008. Cretaceous to Paleocene tectono-sedimentary evolution of the Jiaolai basin and the contiguous areas of the Shandong Peninsula (North China) and its geodynamic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(9): 1 229~1 257(in Chinese with English abstract).
- Zhao G T, Wang D Z and Cao Q C. 1998. Thermal evolution and its significance of I -A type granitoid complex: The Laoshan granitoid as an example[J]. *Science China Earth Sciences*, 41(5): 529~536.
- Zhao Guangtao, Wang Dezi and Cao Qinchen. 1997. The geochemistry and genesis of the Laoshan granitoids, Shandong Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 3(1): 1~15(in Chinese with English abstract).
- Zhou Jianbo, Zheng Yengfei and Zhao Zifu. 2003. Zircon U-Pb dating on Mesozoic granitoids at Wulian, Shandong Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(2): 185~194(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinhua. 2006. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath eastern China in the Cenozoic-Mesozoic: Review and prospect [J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 50~64(in Chinese with English abstract).
- 陈衍景, Pirajno F, 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.
- 崔芳华, 徐学纯, 郑常青, 等. 2020. 华北克拉通东部古太平洋板块俯冲与回撤作用——来自辽西兴城地区晚中生代花岗岩岩石的记录与启示[J]. *岩石学报*, 36(8): 2 463~2 492.
- 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.
- 董 学, 李大鹏, 赵 睿, 等. 2020. 胶东泽头岩体锆石 U-Pb 年代学和岩石成因: 对区域早白垩世晚期成岩成矿作用的指示[J]. *岩石学报*, 36(5): 1 501~1 514.
- 豆敬兆, 付 顺, 张华锋, 等. 2015. 胶东郭家岭岩体固结冷却轨迹与隆升剥蚀[J]. *岩石学报*, 31(8): 2 325~2 336.
- 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.
- 郭春丽, 吴福元, 杨进辉, 等. 2004. 中国东部早白垩世岩浆作用的伸展构造性质——以辽东半岛南部饮马湾山岩体为例[J]. *岩石学报*, 5: 204~215.
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 等. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学[J]. *岩石学报*, 21(4): 1 281~1 301.
- 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 2005. 胶东文登长山南花岗闪长岩体的岩浆混合成因: 闪长质包体及寄主岩石的地球化学、Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素证据[J]. *岩石学报*, 21(3): 569~586.
- 胡世玲, 王松山, 桑海清, 等. 1987. 山东玲珑和郭家岭岩体的同位素年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 3(3): 38~42.
- 黄 洁, 郑永飞, 吴元保, 等. 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[J]. *岩石学报*, 21(3): 545~568.
- 匡永生, 庞崇进, 罗震宇, 等. 2012. 胶东青山群基性火山岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学和地球化学特征: 对华北克拉通破坏过程的启示[J]. *岩石学报*, 28(4): 1 073~1 091.
- 李洪奎, 耿 科, 褚传源, 等. 2016. 胶东金矿构造环境与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1~472.
- 李厚民, 毛景文, 沈远超, 等. 2003. 胶西北东季金矿床钾长石和石英的 Ar-Ar 年龄及其意义[J]. *矿床地质*, 22(1): 72~77.
- 李俊建, 罗镇宽, 刘晓阳, 等. 2005. 胶东中生代花岗岩及大型-超大型金矿床形成的地球动力学环境[J]. *矿床地质*, 24(4): 361~372.
- 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.
- 林少泽, 朱 光, 严乐佳, 等. 2013. 胶东地区玲珑岩基隆升机制探讨[J]. *地质论评*, 59(5): 832~844.
- 刘洪文, 邢树文, 孙景贵. 2002. 胶西北两类金矿床暗色脉岩的碳、氧同位素地球化学[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 32(1): 11~15.
- 刘建明, 张宏福, 孙景贵, 等. 2003. 山东幔源岩浆岩的碳-氧和铍-铍同位素地球化学研究[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 10: 921~930.
- 柳振江, 王建平, 郑德文, 等. 2010. 胶东西北部金矿剥蚀程度及找矿潜力和方向——来自磷灰石裂变径迹热年代学的证据[J]. *岩石学报*, 26(12): 3 597~3 611.
- 罗贤冬, 杨晓勇, 段留安, 等. 2014. 胶北地块与金成矿有关的郭家

附中文参考文献

- 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): 1 874~1 888.
- 苗来成, 罗镇宽, 关 康, 等. 1998. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱 U-Pb 年龄及其岩石学意义[J]. 岩石学报, 14(2): 198~206.
- 邱检生, 王德滋, 罗清华, 等. 2001. 鲁东胶莱盆地青山组火山岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年——以五莲分岭山火山机构为例[J]. 高校地质学报, 7(3): 351~355.
- 邱连贵, 任凤楼, 曹忠祥, 等. 2008. 胶东地区晚中生代岩浆活动及对大地构造的制约[J]. 大地构造与成矿学, 32(1): 117~123.
- 宋明春. 2008. 山东省大地构造单元组成、背景和演化[J]. 地质调查与研究, 3: 165~175.
- 宋明春. 2014. 胶东型金矿及其成矿的构造岩浆背景[J]. 矿床地质, 33(S1): 131~132.
- 宋明春, 李 杰, 李世勇, 等. 2017. 鲁东晚中生代热隆伸展构造及其动力学背景[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 48(4): 941~964.
- 宋明春, 李 杰, 周建波, 等. 2020b. 胶东早白垩世高镁闪长岩类的发现及其构造背景[J]. 岩石学报, 36(1): 279~296.
- 宋明春, 林少一, 杨立强, 等. 2020a. 胶东金矿成矿模式[J]. 矿床地质, 39(2): 215~236.
- 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 等. 2018. 胶东金矿床: 基本特征和主要争议[J]. 黄金科学技术, 26(4): 406~422.
- 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 等. 2019. 胶东焦家和三山岛巨型金矿床的发现及有关问题讨论[J]. 大地构造与成矿学, 43(1): 92~110.
- 宋明春, 王沛成. 2003. 山东省区域地质[M]. 济南: 山东省地图出版社, 25~720.
- 宋明春, 徐军祥, 王沛成, 等. 2009. 山东省大地构造格局和地质构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 1~237.
- 宋明春, 严庆利. 2000. 胶南地区伟德山超单元中闪长质包体的特征及岩浆成因[J]. 山东地质, 16(4): 16~21.
- 宋明春, 张军进, 张丕建, 等. 2015. 胶东三山岛北部海域超大型金矿床的发现及其构造-岩浆背景[J]. 地质学报, 89(2): 365~383.
- 宋英昕, 宋明春, 孙伟清, 等. 2018. 胶东金矿成矿时代及区域地壳演化——基性脉岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 37(5): 908~919.
- 宋英昕, 于学峰, 李大鹏, 等. 2020. 胶东西北部北截岩体岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学与 Sr-Nd-Pb 同位素制约[J]. 岩石学报, 36(5): 1 477~1 500.
- 谭 俊, 魏俊浩, 郭玲利, 等. 2008. 胶东郭城地区脉岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及斑晶 EPMA 研究: 对岩石圈演化的启示[J]. 中国科学(D 辑), 38(8): 913~929.
- 王世进, 万渝生, 郭瑞朋, 2011. 等. 鲁东地区玲珑型(超单元)花岗岩的锆石 SHRIMP 定年[J]. 山东国土资源, 27(4): 1~7.
- 王世进, 万渝生, 王 伟, 等. 2010. 山东崂山花岗岩形成时代——锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 山东国土资源, 26(10): 1~6.
- 王中亮, 赵荣新, 张 庆, 等. 2014. 胶西北高 Ba-Sr 郭家岭型花岗岩岩浆混合成因: 岩石地球化学与 Sr-Nd 同位素约束[J]. 岩石学报, 30(9): 2 595~2 608.
- 徐贵忠, 周 瑞, 闫 臻, 等. 2001. 论胶东地区中生代岩石圈减薄的证据及其动力学机制[J]. 大地构造与成矿学, 25(4): 368~380.
- 徐洪林, 张德全, 孙桂英. 1997. 胶东昆崙山花岗岩的特征、成因及其与金矿的关系[J]. 岩石矿物学杂志, 16(2): 131~143.
- 闫 峻, 陈江峰, 谢 智, 等. 2003. 鲁东晚白垩世玄武岩中的幔源捕虏体: 对中国东部岩石圈减薄时间制约的新证据[J]. 科学通报, 48(14): 1 570~1 574.
- 杨进辉, 周新华, 陈立辉. 2000. 胶东地区破碎带蚀变岩型金矿时代的测定及其地质意义[J]. 岩石学报, 16(3): 454~458.
- 杨进辉, 朱美妃, 刘 伟, 等. 2003. 胶东地区郭家岭花岗岩长岩的地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 19(4): 692~700.
- 张华锋, 李胜荣, 翟明国, 等. 2006a. 胶东半岛早白垩世地壳隆升剥蚀及其动力学意义[J]. 岩石学报, 22(2): 285~295.
- 张华锋, 翟明国, 童 英, 等. 2006b. 胶东半岛三佛山高 Ba-Sr 花岗岩成因[J]. 地质论评, 52(1): 43~53.
- 张 旗, 李承东, 王 焰, 等. 2005. 中国东部中生代高 Sr 低 Yb 和低 Sr 高 Yb 型花岗岩: 对比及其地质意义[J]. 岩石学报, 6: 1 527~1 537.
- 张 旗, 王 焰, 钱 青, 等. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 17(2): 236~244.
- 张 田, 张岳桥. 2007. 胶东半岛中生代侵入岩浆活动序列及其构造制约[J]. 高校地质学报, 13(2): 323~336.
- 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.
- 张岳桥, 李金良, 张 田, 等. 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[J]. 地质学报, 82(9): 1 229~1 257.
- 赵广涛, 王德滋, 曹钦臣. 1997. 崂山花岗岩岩石地球化学与成因[J]. 高校地质学报, 3(1): 1~15.
- 周建波, 郑永飞, 赵子福. 2003. 山东五莲中生代岩浆岩的锆石 U-Pb 年龄[J]. 高校地质学报, 9(2): 185~194.
- 周新华. 2006. 中国东部中生代岩石圈转型与减薄研究若干问题[J]. 地学前缘, 13(2): 50~64.