

胶北地体侏罗纪花岗岩的成因及其构造意义

周 珊¹, 孟凡雪¹, 谢士稳²

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 中国地质科学院 地质研究所, 北京离子探针中心, 北京 100037)

摘 要: 胶北地体中生代花岗岩广泛分布, 以晚侏罗世最为发育, 花岗岩形成时代、成因和地球动力学背景的深入研究对认识研究区构造演化有重要意义。本文选取胶北地体东部和北部侏罗纪花岗岩进行全岩主微量元素、锆石 U-Pb 年龄和 O 同位素研究, 结果表明, 花岗岩样品锆石 U-Pb 年龄主要分布在 166~156 Ma 之间, 代表岩体的结晶年龄。此外, 含有大量 3 650~3 294 Ma、2 660~2 445 Ma、770~600 Ma 和 245~197 Ma 的继承锆石。这些花岗岩具有埃达克岩的地球化学特征[高 Sr/Y 和 (La/Yb)_N 值, 低 Y 和 Yb 含量]。本次报道的侏罗纪花岗岩的锆石年龄和地球化学特征与前人报道的玲珑、栾家河花岗岩一致, 表明胶北不同地区侏罗纪花岗岩的形成时代和成因没有明显的区别, 胶北侏罗纪花岗岩可能由加厚地壳物质部分熔融而成。不同样品的继承锆石年龄分布特征和氧同位素组成具有明显的差异, 结合前人资料, 认为胶北侏罗纪花岗岩源区的物质来源存在差异, 部分花岗岩的源区主要为胶北古老的基底, 另一部分源区主要为深俯冲的扬子板块地壳岩石。古太平洋板块或 Izanagi 板块的俯冲作用可能直接或间接地诱发了加厚地壳的熔融。

关键词: 胶北地体; 花岗岩; 锆石氧同位素; 中生代岩浆活动

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)05-0874-23

Genesis of Jurassic granites in Jiaobei terrane and its tectonic implications

ZHOU Shan¹, MENG Fan-xue¹ and XIE Shi-wen²

(1. College of Earth Sciences and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Beijing SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Mesozoic granites, especially Late Jurassic, are widely distributed in Jiaobei terrane. To further understanding the formation age, genesis and geodynamic background of these granites has great significance to the crustal evolution of study area. In this paper, the major and trace elements, zircon U-Pb ages and O isotopes of the Jurassic granites in the eastern and northern Jiaobei terrane are reported. The results show that the zircon U-Pb ages of the granites studied in this paper are mainly distributed between 166 Ma and 156 Ma, representing the crystallization age of the granites. In addition, there are a large number of inherited zircons with age peaks of 3 650~3 294 Ma, 2 660~2 445 Ma, 770~600 Ma and 245~197 Ma. These granites shown adakite-like geochemical characteristics. The formation ages and geochemical characteristics of Jurassic granites in this study are similar to those of Linglong and Luanjiahe Jurassic granites from western Jiaobei terrane, indicating a similar source from partial melting of thickened continental lower crust. Furthermore, based on the variation of the U-Pb age and O isotope

收稿日期: 2021-02-19; 接受日期: 2021-08-09; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402167, 41772193, 41876037); 自然资源部深地动力学重点实验室自主研究课题(J1901-20-9, J1901-8); 山东省重大科技创新工程项目

作者简介: 周 珊(1996-), 女, 硕士研究生, 岩石地球化学专业, E-mail: shanzhou821@163.com; 通讯作者: 谢士稳(1983-), 男, 副研究员, 主要从事岩石地球化学研究, E-mail: swxie210@163.com。

of inherited zircons from different samples, we concluded that the Jurassic granites in Jiaobei terrane have multiple sources, some of them derived from the thickened continental lower crust in Jiaobei terrane and the others from subducted Yangtze block. Then, the subduction of Paleo-Pacific or Izanagi plate might play a direct or indirect role in causing the partial melting of the thickened continental lower crust.

Key words: Jiaobei terrane; granites; zircon oxygen isotope; Mesozoic magmatism

Fund support: The National Natural Science Foundation of China (41402167, 41772193, 41876037); The Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources (J1901-20-9, J1901-8); The Key Scientific and Technological Innovation Project of Shandong Province

胶北地体发育强烈的中生代岩浆作用,它们被认为与华北克拉通岩石圈的减薄、苏鲁造山带造山后伸展作用或古太平洋的俯冲过程等重大地质事件有关,其成因和形成构造环境等问题一直是众多学者关注的热点(Hou *et al.*, 2007; 张田等, 2008; Zhang *et al.*, 2010; Jiang *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2013; 黄涛等, 2014; 李洪奎等, 2017; 宋英昕等, 2019; Li *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020)。胶北中生代岩浆岩主要形成于侏罗纪和早白垩世两个阶段,侏罗纪花岗岩是胶北地体已识别的最早的中生代岩浆岩,且最为发育,确定它们的岩浆源区、演化过程以及形成的构造背景对认识华北克拉通中生代构造转换的起始时限和动力学机制具有重要的意义。目前,胶北地区侏罗纪花岗岩的研究主要集中在胶北西部的玲珑花岗岩和栾家河花岗岩,已发表了一系列年代学和地球化学资料,但岩浆源区、成因等问题仍存在不同认识(Hou *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2010; Jiang *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2013)。例如,Hou 等(2007)认为玲珑花岗岩由华北克拉通加厚的下地壳部分熔融而成。但是,玲珑花岗岩中识别出新元古代的继承锆石,指示源区可能有来源于扬子板块的物质加入(Zhang *et al.*, 2010; Jiang *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020)。由于报道的继承锆石年龄相对较少,且不同研究人员获得的继承锆石年龄分布特征存在差异,以致对岩浆岩源区扬子板块物质贡献的比例存在不同认识。例如,Zhang 等(2010)仅获得少量新元古代的继承锆石,没有获得太古宙的继承锆石,认为玲珑花岗岩主要由深俯冲的扬子板块地壳物质部分熔融而成。除新元古代继承锆石外,太古宙和古元古代继承锆石的发现,表明源区也存在华北地壳物质,结合同岩浆锆石很低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和古老的 Hf 二阶段模式年龄,一些研究人员认为胶北晚侏罗世花岗岩的主要源区为华北

下地壳岩石(Yang *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2019)。

另一方面,前人对胶北地体其他地区侏罗纪花岗岩的研究相对较少,胶北其他地区侏罗纪花岗岩的形成时代、源区和成因与玲珑、栾家河花岗岩是否存在差异尚不清楚,这也制约了更加全面地认识胶北地区侏罗纪花岗岩源区物质来源和形成构造环境的研究。由于缺少可靠的年代学资料,除西部广泛出露的玲珑和栾家河岩体外,胶北地体其他地区识别出的侏罗纪花岗岩相对有限,特别在其东部。通过地质调查和 SHRIMP 锆石测年,笔者在胶北地体的北部和东部新识别出几处中晚侏罗世花岗岩露头(图1),部分样品中还含有丰富的继承锆石,为探讨胶北地体侏罗纪岩浆岩源区性质提供了重要的研究对象。本文报道了新识别出的侏罗纪花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、全岩地球化学特征以及锆石氧同位素组成,并结合前人研究结果,为整体探讨胶北地体侏罗纪花岗岩的成因和大地构造背景提供一些新的制约。

1 地质背景

胶北地体位于华北克拉通东南缘,东南侧以五莲-即墨-牟平断裂与苏鲁造山带相连,南侧与中生代胶莱盆地相邻(图1)。胶北隆起区出露大量古老的变质基底,主要包括中-新太古代的岩浆岩,古元古代荆山群、粉子山群以及新元古代蓬莱群。太古宙岩浆岩主要由 TTG(英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩)片麻岩组成,其中含有呈包体、透镜体出露的黑云变粒岩、黑云斜长片麻岩、角闪变粒岩和斜长角闪岩等表壳岩。古元古代粉子山群和荆山群不整合于太古宙基底之上。粉子山群由含石墨岩系、富铝片岩-片麻岩、钙硅酸盐大理岩、大理岩和少量角闪岩组成。荆山群由富铝的片岩-片麻岩、变粒岩、长石石英岩、钙硅酸盐岩、大理岩和少量镁铁质

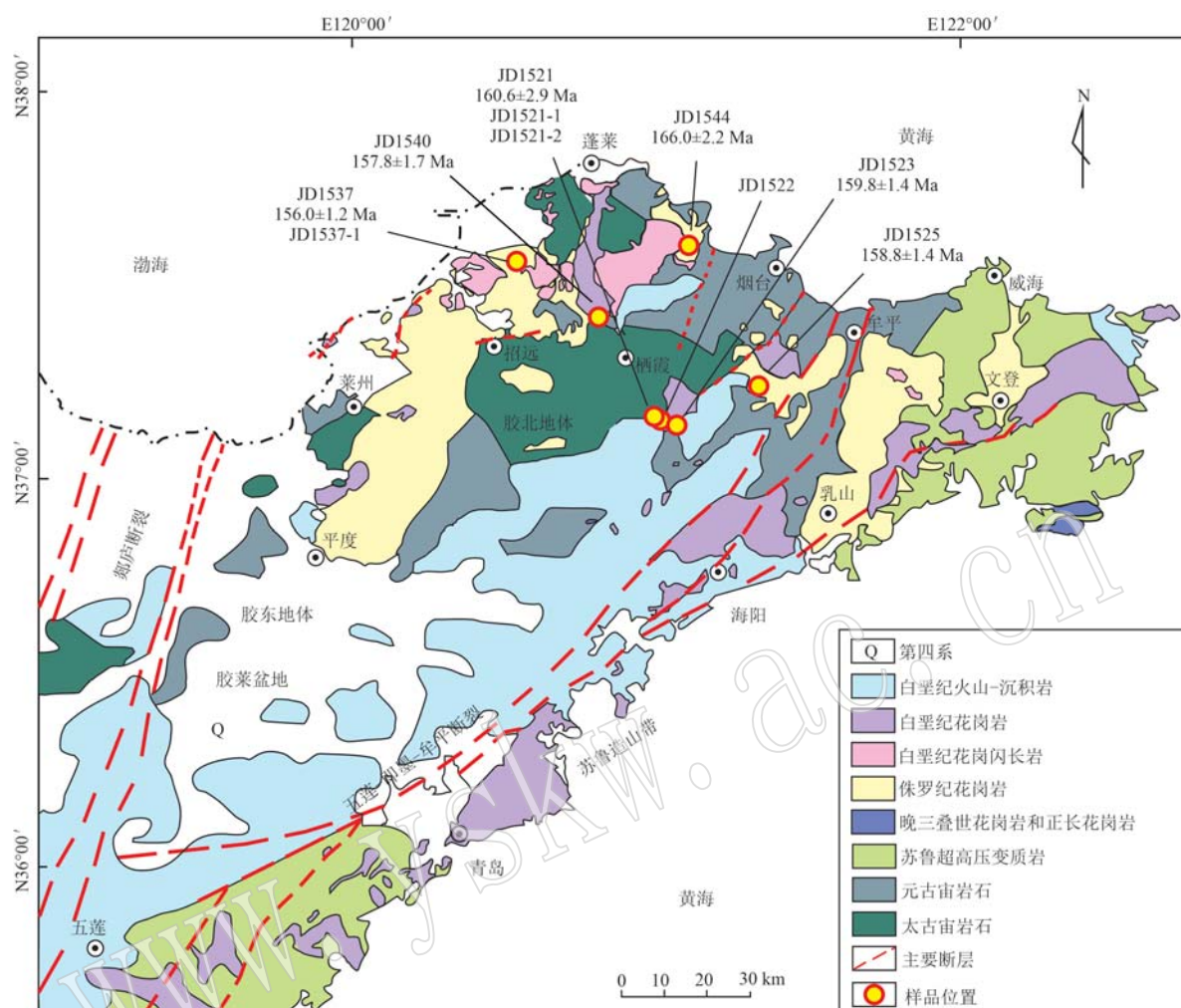


图1 胶北地体地质简图(据 Jiang *et al.*, 2016 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the Jiaobei terrane (after Jiang *et al.*, 2016)

岩石组成。蓬莱群是胶北地体最年轻的基底单元,主要由结晶石灰岩、板岩和石英岩组成 (Faure *et al.*, 2001)。胶北隆起区中生代花岗质岩石广泛出露,约占总面积的 3/4,年代学结果表明,该地区中生代岩浆岩主要形成于晚侏罗世 (160~150 Ma) 和早白垩世 (130~110 Ma) 两个时期 (Miao *et al.*, 1997; Wang *et al.*, 1998; Goss *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2019)。晚侏罗世岩浆岩以出露在胶北地体西部的玲珑花岗岩和栾家河花岗岩为代表,玲珑花岗岩分布最为广泛,呈北东向分布,为一套偏铝质-过铝质花岗岩,主要由斜长石、钾长石、石英和黑云母组成,偶尔可以见到石榴子石和白云母。早白垩世花岗岩以分布在胶北北部和中部的郭家岭、艾山和牙山花

岗岩为代表。

在胶北地体东部的榆山、回里、烟台以及福山等地出露大量规模相对较小的花岗岩体,岩性主要为弱片麻状的中-细粒的二长花岗岩。这些岩体早期被认为形成于新元古代 (山东省地质调查院, 2003)^①,最近的研究表明它们形成于古元古代晚期和侏罗纪 (Li *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2017; 本次研究)。

2 样品及特征

本文报道的花岗岩样品采自胶北东部的唐家泊镇、牟平区观水镇以及北部古现镇、龙口市下丁家镇等地,样品详细采样位置和 GPS 坐标见表 1。样品 JD1521 和 JD1523 采自唐家泊镇南侧的榆山岩体,该

① 山东省地质调查院. 2003. 1:25 万烟台市幅地质图.

表 1 胶北地体侏罗纪花岗岩采样位置及 GPS 点位
Table 1 Sampling location and GPS of Jurassic granites in the Jiaobei terrane

样品号	采样位置	北纬	东经
JD1521	栖霞唐家泊镇东五叫山村	37°09'00"	120°59'42"
JD1521-1	栖霞唐家泊镇东五叫山村	37°09'00"	120°59'45"
JD1521-2	栖霞唐家泊镇东五叫山村	37°09'00"	120°59'45"
JD1522	栖霞唐家泊镇东五叫山村	37°08'24"	120°59'28"
JD1523	栖霞唐家泊镇榆山后村	37°08'45"	121°00'29"
JD1525	烟台牟平区观水镇八甲村	37°13'44"	121°20'58"
JD1537	龙口市下丁家镇北邢家村	37°33'36"	120°29'45"
JD1537-1	龙口市下丁家镇北邢家村	37°33'36"	120°29'45"
JD1540	栖霞苏家店镇小蔡家村	37°24'36"	120°37'34"
JD1544	烟台开发区古现镇石岚村	37°35'20"	121°04'47"

岩体原被认为形成于新元古代(山东省地质调查院, 2003)^①。JD1521 采自东五叫山村南,该地岩石出露很好,采样露头长约 50 m,出露岩石为新鲜的弱变形二长花岗岩(图 2a)。JD1523 采自唐家泊镇南侧的榆山后村南,为弱变形的二长花岗岩,侵入太古宙胶东群齐山组。JD1525 采自烟台市牟平区八甲村东北

山坡上,出露大量新鲜弱变形的二长花岗岩(图 2b),该岩石单元原被认为是新元古代花岗岩,但采样露头原给出的锆石 U-Pb 年龄为 2 694 Ma(山东省地质调查院, 2003)^①。JD1537 采自玲珑花岗岩北侧,露头位于龙口市下丁家镇北邢家村西南,岩石出露良好,沿公路分布约 100 m,出露岩石为片麻状二长花岗岩,片麻理走向为 110°。JD1540 采自苏家店镇小蔡家村口,露头规模大,长约 150 m,出露岩石主体为弱-中等风化二长花岗片麻岩,岩石表面风化成土黄色,岩石内部相对新鲜,该处原被认为是印支期花岗岩(山东省地质矿产局第六地质队, 1997)^②。JD1544 采自古现镇石岚村,出露岩石为弱变形的含石榴子石二长花岗岩,露头较大,长约 30 余米,出露岩石弱风化,挑选相对新鲜的位置采样(图 2c),该岩石原被认为属于新元古代花岗岩。但采样露头原给出的锆石 U-Pb 年龄为 2 277 Ma(山东省第三地质矿产勘查院, 2000)^③。

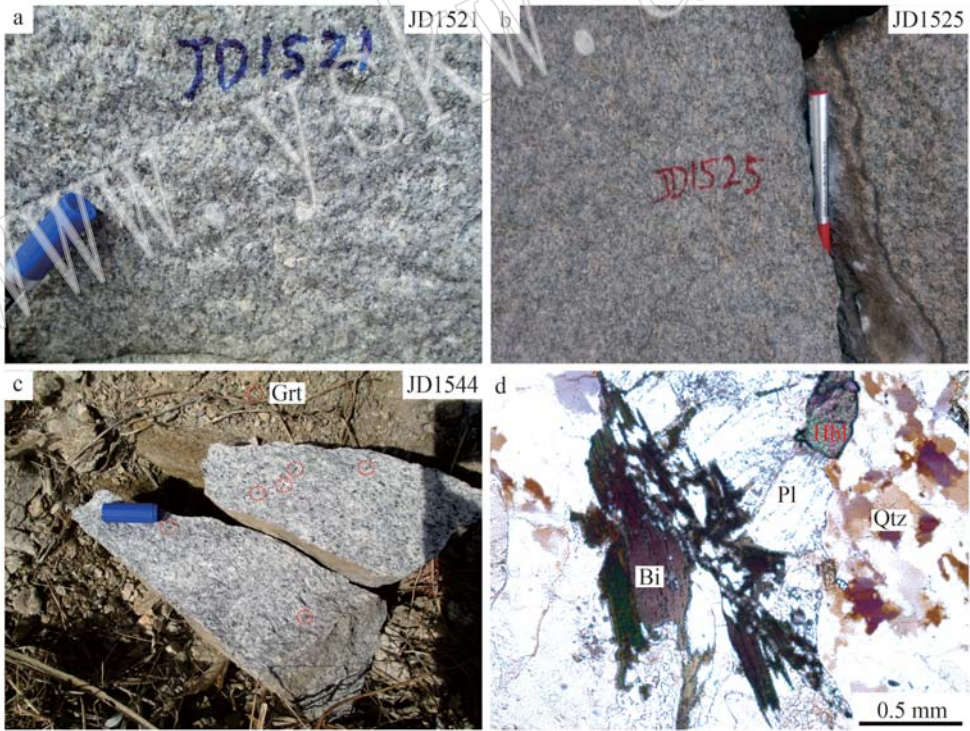


图 2 胶北地体侏罗纪花岗岩野外照片和正交偏光照片

Fig. 2 Representative field photographs and cross-polarized microscopic photomicrograph of Jurassic granites from the Jiaobei terrane
a, b—weakly deformed granite; c—weakly deformed garnet-bearing granite; d—photomicrograph of granite; Bi—biotite; Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Grt—garnet

① 山东省地质调查院. 2003. 1:25 万烟台市幅地质图.
② 山东省地质矿产局第六地质队. 1997. 1:5 万赵格庄幅地质图.
③ 山东省第三地质矿产勘查院. 2000. 1:5 万岗崂、巨峰幅地质图.

这些样品新鲜面呈灰白色,发育弱的片麻理,手标本尺度可见弱的矿物定向排列。镜下呈花岗结构,局部见蠕虫结构,矿物定向不明显,部分样品局部可见石英拉长和云母定向排列,主要由石英(30%~40%,体积分数)、斜长石(20%~30%)、碱性长石(15%~25%)、黑云母(5%~10%)、角闪石(~5%)组成,副矿物可见白云母、锆石、榍石和不透明矿物(~5%)等(图2d),样品JD1544含少量石榴子石(~5%)。石英以他形粒状为主,粒径约0.05~2 mm;斜长石呈板状分布,部分发生绢云母化,黑云母深褐色-浅绿色片状分布,多色性明显。

3 分析方法

全岩主、微量元素在中国地质科学院国家地质实验测试中心实验室完成。挑选新鲜、均匀的样品细碎至200目。主量元素分析采用XRF玻璃熔片法完成,分析不确定度为2%~8%,FeO由湿化学法获得,换算后,用XRF法获得的 $^{\text{T}}\text{Fe}_2\text{O}_3$ 减去FeO获得 Fe_2O_3 。烧失量由将样品在1000℃加热2 h,复称确定。微量元素采用ICP-MS溶液法分析。将粉末样放入溶样弹中,用 $\text{HF}+\text{HNO}_3$ 消解,然后将加好酸的溶样弹放入钢套,放置在烘箱中,190℃加热48 h以上。大多数微量元素的精确度和准确度分别优于5%和4%。

锆石U-Pb定年在北京离子探针中心采用SHRIMP II完成。详细分析方法见Williams(1998)。测试时一次流 O^{-2} 强度为3~5 nA,束斑直径为25~30 μm 。标样M257($U = 840 \times 10^{-6}$, Nasdala *et al.*, 2008)和TEMORA 2(年龄为417 Ma, Black *et al.*, 2004)分别用于锆石U含量和年龄校正。每分析3~4个未知样品数据,分析1次标准锆石TEM。每个分析点采用5组扫描。数据处理采用SQUID和ISOPLLOT程序。根据实测 ^{204}Pb 含量进行普通铅校正,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为锆石年龄,同位素比值和单点年龄误差均为 1σ 。加权平均年龄误差为95%置信度。

锆石原位氧同位素分析在北京离子探针中心采用多接收SHRIMP II完成。将样品靶重新抛光,抛去测年留下的坑,氧同位素在原测年位置分析。采用强度为~13.5 nA的一次 Cs^+ 离子束通过加速电压15 keV轰击锆石表面,束斑直径为~25 μm 。分析过程中, ^{18}O 和 ^{16}O 由两个法拉第杯同时接收,每个测试

点进行两组扫描,每组扫描6次,单次扫描积分时间为10 s,总积分时间约为120 s。两组扫描之间,仪器自动优化一次离子流和二次离子流参数。在每个分析点测试之前,调整二次离子流和测定静电计的背景噪声150 s。标准锆石TEMORA 2($\delta^{18}\text{O} = 8.20\text{‰}$; Black *et al.*, 2004)用于校正仪器的质量分馏(IMF)。每分析3个未知样品,分析1次标准锆石。详细的分析流程见Ickert等(2008)。

4 分析结果

4.1 全岩主、微量元素

全岩主、微量元素分析结果见表2。样品 SiO_2 含量为70.89%~73.58%,全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)含量为7.90%~8.64%,在TAS图解中全部落在花岗岩范围内(图3a)。除样品JD1522的 K_2O 含量较低(1.51%)外,其他样品的 K_2O 含量较高(3.80%~4.70%),在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中均落在高钾钙碱性系列区域(图3b)。 $\text{SiO}_2-\text{A.R.}$ 图解显示这些样品为碱性花岗岩(图3d)。样品的铝饱和指数(A/CNK)为1.02~1.26,呈弱-强过铝质花岗岩(图3c)。样品 MgO 含量较低(0.19%~0.43%),对应的 $\text{Mg}^\#$ 值为19.30~35.80。在哈克图解中, SiO_2 和 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 、 CaO 呈负相关关系(图4)。

样品多表现为高Sr含量($220.00 \times 10^{-6} \sim 763.00 \times 10^{-6}$)和低Y含量($3.43 \times 10^{-6} \sim 20.60 \times 10^{-6}$)及高Sr/Y值(85~222)的特征。稀土元素配分图上,除JD1544具有较高的重稀土元素含量外,其余所有样品均显示轻稀土元素相对于重稀土元素富集的右倾趋势,轻重稀土元素分异明显(图5b), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为24.2~71.3,显示弱的负Eu异常到正Eu异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.83 \sim 1.23$)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中,所有样品具有明显的Nb、Ta、Ti等高场强元素亏损,富集大离子亲石元素,具有明显的Pb和Sr正异常(图5a)。

4.2 锆石U-Pb年龄

对胶北地区6件花岗岩样品进行锆石U-Pb定年,分析结果见表3。锆石均较自形,为长柱状或短柱状(长100~200 μm ,宽50~125 μm)(图6)。阴极发光图像表明大多数锆石具有明显的震荡环带(图6),为典型岩浆成因锆石,这与其较高的Th/U值(0.07~1.24)相一致。部分锆石保留清晰的继承核,继承核的年龄变化较大,对于年龄小于1 Ga的锆

表 2 胶北地体侏罗纪花岗岩全岩主量 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 数据Table 2 Whole-rock major ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) data of Jurassic granites from the Jiaobei terrane

样品	JD1521	JD1521-1	JD1521-2	JD1522	JD1523	JD1525	JD1537	JD1537-1	JD1540	JD1544
SiO ₂	71.63	71.68	70.89	72.78	72.15	72.76	73.01	73.58	71.77	72.75
TiO ₂	0.19	0.21	0.21	0.24	0.21	0.20	0.16	0.14	0.19	0.13
Al ₂ O ₃	14.81	15.11	15.57	15.69	15.42	14.46	14.57	14.09	15.73	14.57
^T Fe ₂ O ₃	1.61	1.70	1.70	1.53	1.49	1.40	1.75	1.44	1.10	1.58
MnO	0.04	0.04	0.04	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.10
MgO	0.30	0.30	0.31	0.43	0.25	0.28	0.30	0.25	0.20	0.19
CaO	2.06	1.93	1.97	0.45	0.65	1.68	1.69	1.59	0.74	1.79
Na ₂ O	3.82	4.00	4.07	6.51	3.95	3.93	4.19	3.92	3.94	3.73
K ₂ O	4.09	4.18	4.32	1.51	4.23	4.01	3.80	3.98	4.70	4.27
P ₂ O ₅	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.02
LOI	0.52	0.65	0.16	0.91	1.13	0.33	0.39	0.36	1.07	0.30
Total	99.12	98.85	99.29	100.12	99.55	99.11	99.93	99.41	99.50	99.43
FeO	1.10	0.88	1.10	0.99	0.84	1.02	1.13	1.13	0.92	1.06
Na ₂ O+K ₂ O	7.91	8.18	8.39	8.02	8.18	7.94	7.99	7.90	8.64	8.00
Na ₂ O/K ₂ O	0.93	0.96	0.94	4.31	0.93	0.98	1.10	0.98	0.84	0.87
Mg [#]	26.90	25.90	26.50	35.80	24.90	28.30	25.40	25.60	26.40	19.30
Sc	1.60	1.46	1.61	1.61	1.59	1.45	2.04	1.52	1.85	1.25
V	3.53	3.48	2.84	6.91	4.28	5.68	6.05	3.55	5.33	2.11
Cr	1.00	1.12	1.74	1.48	2.01	1.72	2.50	0.98	1.18	1.00
Co	0.84	0.96	1.02	0.89	0.58	1.01	1.13	0.75	0.51	0.70
Ni	1.60	1.51	1.91	1.06	1.05	1.49	1.73	1.32	0.91	1.51
Ga	18.10	18.80	17.50	20.30	18.80	16.70	18.00	15.00	19.40	16.70
Rb	101.00	95.10	89.40	36.60	107.00	67.00	87.50	79.00	115.00	129.00
Sr	600.00	673.00	691.00	220.00	441.00	763.00	553.00	508.00	424.00	473.00
Y	7.09	5.03	5.01	4.72	3.65	3.43	4.49	4.31	4.56	20.60
Zr	146.00	160.00	174.00	150.00	150.00	133.00	140.00	125.00	131.00	119.00
Nb	12.30	11.90	11.90	12.60	11.60	3.22	5.25	4.18	9.45	14.50
Cs	1.30	0.78	0.77	0.64	1.32	0.44	1.12	0.56	1.54	0.80
Ba	2 033.00	3 028.00	3 426.00	753.00	2 022.00	2 374.00	1 893.00	2 113.00	1 608.00	2 042.00
La	33.50	38.50	43.70	28.40	33.80	37.20	34.50	40.40	16.50	26.30
Ce	54.90	60.00	65.60	50.70	57.90	64.10	61.00	64.30	43.80	46.90
Pr	5.79	6.15	7.18	4.82	5.64	6.19	6.40	7.03	2.81	4.92
Nd	18.70	19.70	22.60	15.20	16.70	18.50	20.60	21.60	9.71	14.70
Sm	3.96	4.64	5.46	2.43	3.61	3.72	3.74	4.01	2.49	4.05
Eu	0.96	1.14	1.20	0.64	0.83	0.68	0.67	0.77	0.52	0.85
Gd	1.97	1.72	1.87	1.35	1.27	1.15	1.46	1.58	1.01	2.40
Tb	0.27	0.21	0.22	0.18	0.17	0.15	0.15	0.18	0.15	0.39
Dy	1.45	1.03	1.06	0.93	0.77	0.65	0.83	0.87	0.88	3.00
Ho	0.23	0.16	0.17	0.16	0.12	0.11	0.15	0.16	0.16	0.70
Er	0.63	0.46	0.50	0.45	0.33	0.37	0.49	0.51	0.47	2.56
Tm	0.09	0.07	0.07	0.07	<0.05	0.06	0.07	0.08	0.07	0.43
Yb	0.58	0.48	0.47	0.48	0.34	0.40	0.50	0.44	0.49	2.93
Lu	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.07	0.08	0.07	0.08	0.45
Hf	4.37	4.44	4.78	4.48	4.48	3.96	3.92	3.52	4.25	4.00
Ta	1.04	0.86	0.75	1.10	0.53	0.20	0.26	0.25	0.70	1.09
Pb	31.10	26.50	28.20	5.58	29.80	17.00	21.10	20.70	26.50	28.20
Th	4.42	3.86	3.95	5.27	4.48	7.13	5.22	5.48	5.63	5.89
U	1.32	0.98	0.63	1.07	0.62	0.62	0.69	0.66	0.74	1.29

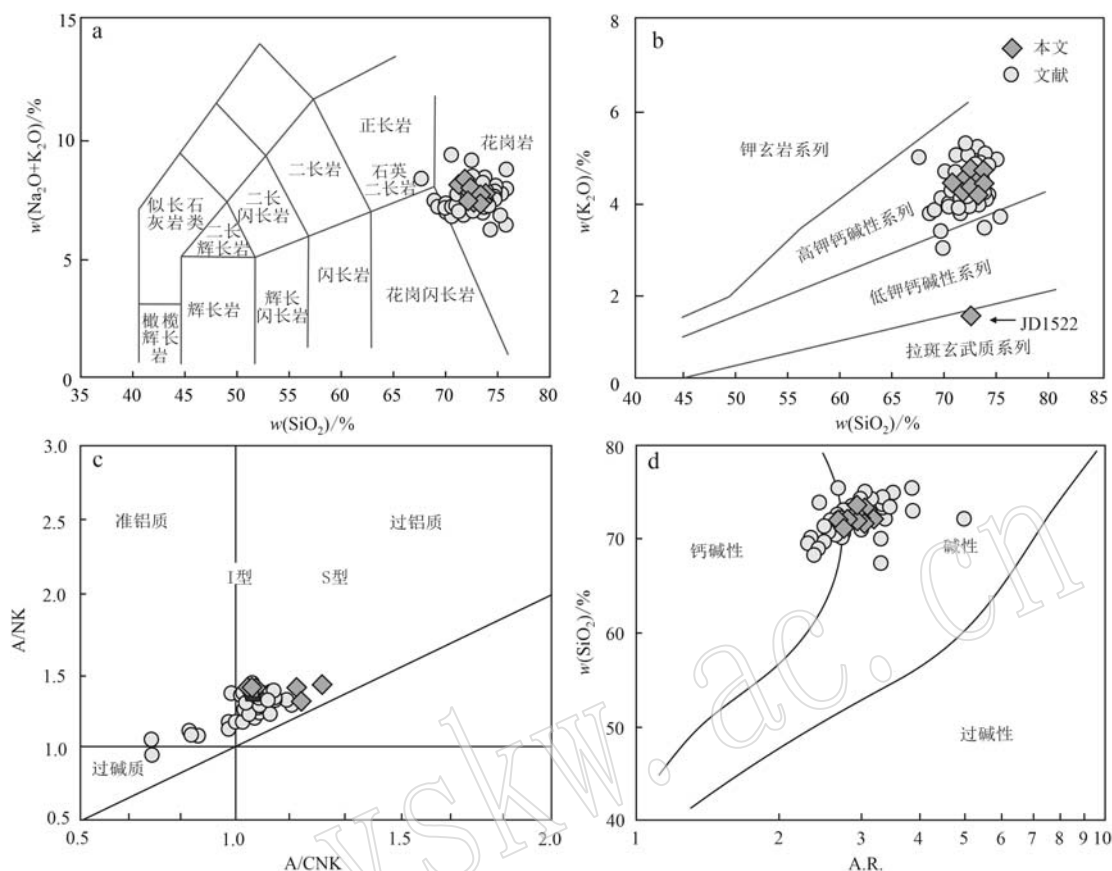


图3 胶北地体侏罗纪花岗岩 TAS 图(a, 底图据 Middlemost, 1994)、 K_2O-SiO_2 图(b, 底图据 Peccerillo and Taylor, 1976)、 $A/NK-A/CNK$ 图(c, 底图据 Maniar and Piccoli, 1989)和 $SiO_2-A.R.$ 图(d, 底图据 Xia *et al.*, 2016)
Fig. 3 TAS diagram (a, after Middlemost, 1994), K_2O-SiO_2 diagram (b, after Peccerillo and Taylor, 1976), $A/NK-A/CNK$ diagram (c, after Maniar and Piccoli, 1989) and SiO_2 versus A.R. diagram (d, after Xia *et al.*, 2016) of Jurassic granites in Jiaobei terrane

$A.R. = w[Al_2O_3 + CaO + (Na_2O + K_2O)] / w[Al_2O_3 + CaO - (Na_2O + K_2O)]$ (文献数据根据 Yang *et al.*, 2012; 林博磊等, 2013; Ma *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2020)

$A.R. (alkalinity ratio) = w[Al_2O_3 + CaO + (Na_2O + K_2O)] / w[Al_2O_3 + CaO - (Na_2O + K_2O)]$ (data from Yang *et al.*, 2012; Lin Bolei *et al.*, 2013; Ma *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2020)

石采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄; 对于大于 1 Ga 的锆石, 采用 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄。

选取样品 JD1521 中 14 颗锆石进行 17 个样点的年龄分析, 它们的 U 含量为 $25 \times 10^{-6} \sim 2648 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.06 ~ 1.24。14 个同岩浆锆石测试点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 165 ~ 146 Ma, 剔除误差较大、明显离群的数据点(1.1、3.1、6.1、9.2、10.1、11.1), 8 个相对集中的测试点给出的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 160.6 ± 2.9 Ma (MSWD = 1.9, $n = 8$) (图 7a), 解释为岩浆结晶年龄。其余 3 个测点给出的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄分别为 608.8 ± 7.7 Ma、 242.3 ± 7.9 Ma 和 177.3 ± 2.2 Ma (图 7a、8b)。

对样品 JD1523 中 23 颗锆石进行 34 个年龄分析, 其中 21 颗锆石 U-Pb 年龄集中在 165 ~ 155 Ma 之间, 这些锆石的 Th/U = 0.05 ~ 1.00, 其低的 Th/U 值主要是高的 U 含量造成的, 其加权平均年龄为 159.8 ± 1.4 Ma (MSWD = 1.7, $n = 21$) (图 7b), 代表岩体结晶年龄。13 颗锆石给出相对较老的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄 (770.0 ~ 179.3 Ma), 应代表继承锆石年龄 (图 7b、8c)。值得注意的是, 8 颗继承锆石的年龄分布在 230.8 ~ 197.1 Ma, 且这些锆石的 Th/U 值均较低 (除一颗 Th/U 值为 0.31 外, 其他为 0.02 ~ 0.11), 应为继承的变质锆石。

选取样品 JD1525 中 16 颗锆石测试了 19 个

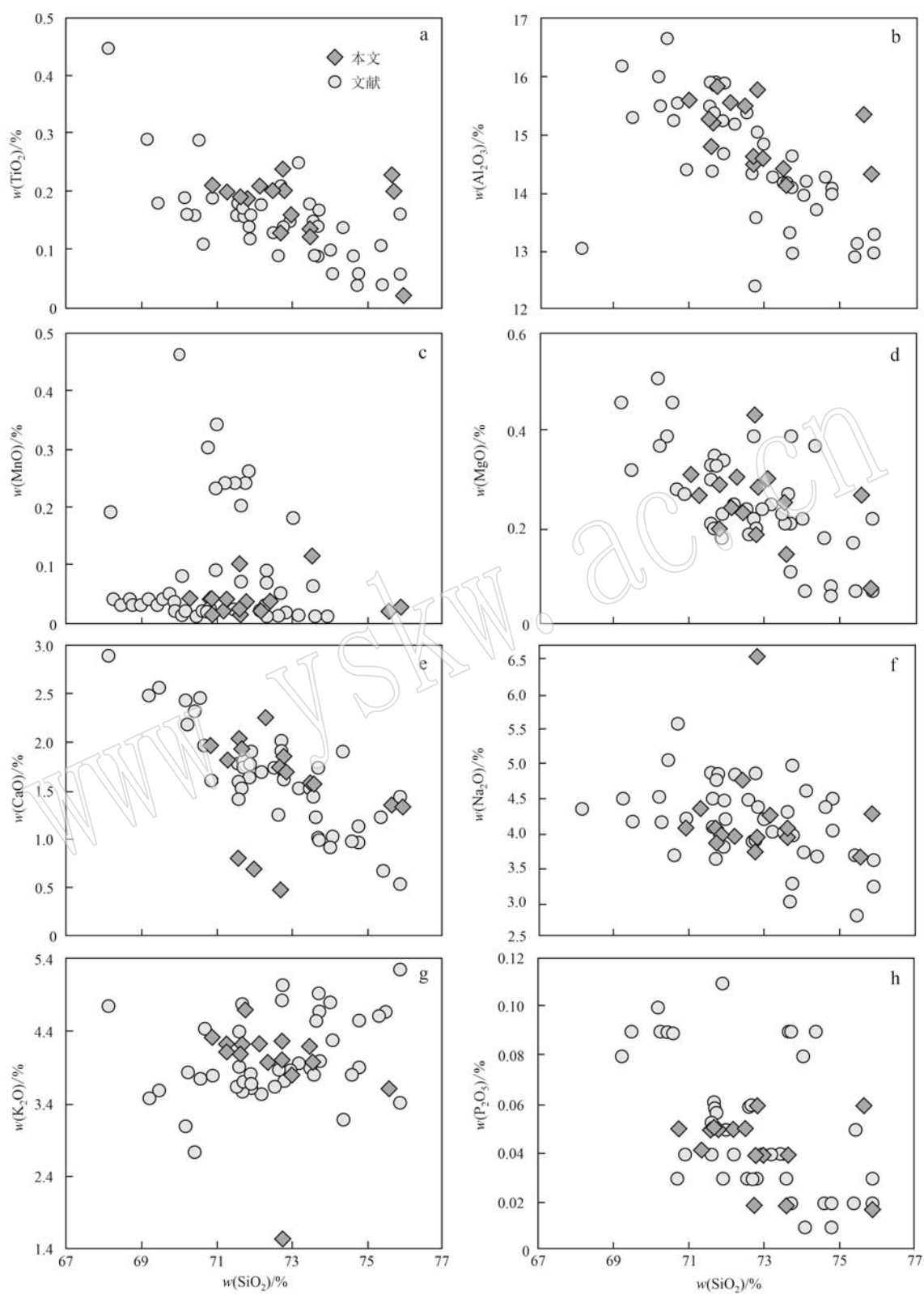


图 4 胶北地体侏罗纪花岗岩哈克图解(数据引自 Yang *et al.*, 2012; 林博磊等, 2013; Ma *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2020)

Fig. 4 Harker diagrams of Jurassic granites in Jiaobei terrane (data from Yang *et al.*, 2012; Lin Bolei *et al.*, 2013; Ma *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2020)

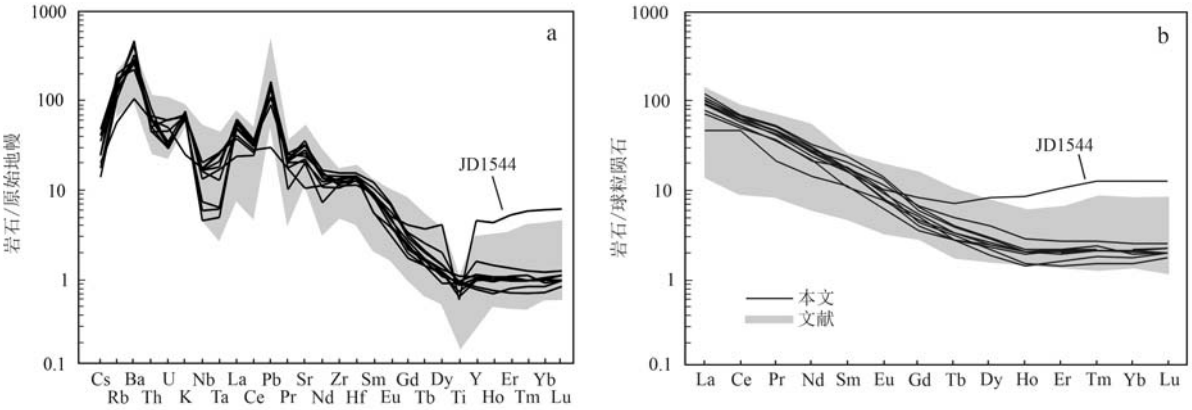


图 5 胶北地体侏罗纪花岗岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)及球粒陨石标准化稀土元素配分模式(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989; 文献数据引自 Yang *et al.*, 2012; 林博磊等, 2013; Ma *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2020)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized spider diagram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of Jurassic granites from the Jiaobei terrane (normalization values after Sun and McDonough, 1989; data from Yang *et al.*, 2012; Lin Bolei *et al.*, 2013; Ma *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2020)

表 3 胶北地体侏罗纪花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学数据

Table 3 SHRIMP zircon U-Pb age data of Jurassic granites from the Jiaobei terrane

测点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值								年龄/Ma			
	Pb *	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ		
JD1521																
1. 1	1. 08	27	48	0. 59	0. 065 0	20. 0	0. 230 0	20. 0	0. 025 67	3. 0	773	± 420	163. 4	$\pm 4. 8$		
2. 1	1. 86	47	84	0. 58	0. 050 9	11. 0	0. 179 0	12. 0	0. 025 53	2. 1	234	± 260	162. 5	$\pm 3. 3$		
3. 1	0. 58	16	25	0. 67	0. 055 0	28. 0	0. 196 0	28. 0	0. 026 02	3. 6	397	± 630	165. 6	$\pm 5. 9$		
4. 1	0. 96	40	45	0. 93	0. 056 2	8. 5	0. 193 0	8. 8	0. 024 98	2. 5	459	± 190	159. 1	$\pm 3. 9$		
5. 1	1. 83	36	85	0. 44	0. 053 4	6. 6	0. 184 0	6. 9	0. 025 01	2. 0	348	± 150	159. 2	$\pm 3. 1$		
7. 1	3. 04	85	137	0. 64	0. 050 0	14. 0	0. 176 0	14. 0	0. 025 45	1. 9	196	± 320	162. 0	$\pm 3. 0$		
6. 1	13. 30	165	670	0. 25	0. 048 0	3. 2	0. 152 8	3. 5	0. 023 07	1. 3	101	± 76	147. 0	$\pm 1. 9$		
7. 2	55. 10	211	2 477	0. 09	0. 050 1	1. 6	0. 178 9	2. 0	0. 025 91	1. 2	199	± 38	164. 9	$\pm 2. 0$		
8. 1	11. 80	82	562	0. 15	0. 048 6	2. 7	0. 164 6	3. 0	0. 024 57	1. 3	128	± 64	156. 5	$\pm 2. 1$		
9. 1	27. 70	390	325	1. 24	0. 061 5	2. 4	0. 840 0	2. 7	0. 099 00	1. 3	656	± 51	608. 8	$\pm 7. 7$		
9. 2	55. 60	181	2 648	0. 07	0. 050 1	1. 2	0. 168 8	1. 7	0. 024 45	1. 2	198	± 29	155. 7	$\pm 1. 9$		
10. 1	0. 69	10	32	0. 33	0. 060 0	34. 0	0. 203 0	34. 0	0. 024 40	5. 8	616	± 730	155. 4	$\pm 9. 0$		
10. 2	27. 80	74	1 313	0. 06	0. 049 6	1. 7	0. 168 6	2. 2	0. 024 65	1. 4	176	± 40	157. 0	$\pm 2. 2$		
11. 1	0. 99	36	50	0. 73	0. 061 0	9. 1	0. 193 0	9. 5	0. 022 95	2. 5	641	± 200	146. 2	$\pm 3. 6$		
12. 1	2. 25	18	67	0. 27	0. 051 8	9. 8	0. 273 0	10. 0	0. 038 30	3. 3	276	± 220	242. 3	$\pm 7. 9$		
13. 1	11. 20	84	511	0. 17	0. 050 2	4. 4	0. 177 3	4. 6	0. 025 62	1. 3	204	± 100	163. 1	$\pm 2. 2$		
14. 1	25. 30	97	1 057	0. 09	0. 049 8	1. 9	0. 191 5	2. 3	0. 027 88	1. 3	186	± 43	177. 3	$\pm 2. 2$		
JD1523																
1. 1	3. 94	5	134	0. 04	0. 050 6	6. 5	0. 237 0	6. 7	0. 033 99	1. 8	221	± 150	215. 5	$\pm 3. 7$		
1. 2	89. 40	223	3 891	0. 06	0. 049 5	9. 6	0. 167 0	9. 7	0. 024 47	1. 3	173	± 220	155. 9	$\pm 2. 0$		
2. 1	44. 90	100	1 953	0. 05	0. 050 0	10. 0	0. 173 0	10. 0	0. 025 07	1. 4	193	± 230	159. 6	$\pm 2. 2$		
3. 1	0. 87	24	40	0. 63	0. 053 0	39. 0	0. 182 0	39. 0	0. 025 06	3. 7	313	± 890	159. 5	$\pm 5. 8$		
3. 2	38. 80	88	1790	0. 05	0. 048 4	1. 6	0. 168 1	2. 0	0. 025 18	1. 2	121	± 37	160. 3	$\pm 2. 0$		

续表 3-1

Continued Table 3-1

测点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Pb *	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
4.1	2.26	102	106	1.00	0.052 3	13.0	0.179 0	13.0	0.024 87	2.1	299	±300	158.4	±3.2
5.1	10.00	156	169	0.95	0.055 2	4.0	0.525 0	4.3	0.069 00	1.5	419	±90	430.1	±6.2
5.2	27.20	58	1 243	0.05	0.048 5	3.8	0.169 3	4.0	0.025 34	1.3	122	±89	161.3	±2.1
6.1	37.20	217	396	0.56	0.063 3	1.4	0.953 0	1.9	0.109 20	1.3	718	±29	668.0	±8.2
7.1	1.04	24	47	0.51	0.053 9	18.0	0.185 0	18.0	0.024 96	2.7	366	±410	158.9	±4.2
8.1	26.00	251	837	0.31	0.050 6	2.7	0.252 3	3.5	0.036 14	2.2	224	±61	228.9	±5.0
8.2	3.79	24	169	0.15	0.049 2	10.0	0.174 0	10.0	0.025 63	1.7	159	±240	163.1	±2.8
9.1	2.83	49	123	0.41	0.050 0	21.0	0.180 0	21.0	0.025 94	2.2	216	±490	165.1	±3.6
10.1	10.40	94	447	0.22	0.049 4	20.0	0.171 0	20.0	0.025 07	2.1	166	±460	159.6	±3.2
11.1	67.00	40	2 180	0.02	0.050 8	2.8	0.248 3	3.1	0.035 41	1.2	234	±65	224.3	±2.7
11.2	6.50	32	280	0.12	0.052 0	21.0	0.180 0	21.0	0.025 33	2.0	267	±480	161.2	±3.1
12.1	20.90	271	958	0.29	0.049 0	2.9	0.170 9	3.2	0.025 33	1.3	146	±69	161.2	±2.0
13.1	24.70	222	226	1.02	0.064 8	3.2	1.133 0	3.5	0.126 80	1.4	768	±67	770.0	±10.0
14.1	46.00	373	2 069	0.19	0.047 8	10.0	0.160 0	10.0	0.024 26	1.4	88	±240	154.5	±2.1
15.1	75.30	271	3 438	0.08	0.049 1	4.2	0.169 0	4.3	0.024 94	1.2	155	±98	158.8	±1.9
16.1	22.60	318	1 075	0.31	0.049 2	2.1	0.166 0	2.5	0.024 46	1.3	158	±49	155.8	±2.0
17.1	14.70	50	655	0.08	0.050 6	3.7	0.180 9	3.9	0.025 92	1.4	223	±85	165.0	±2.2
18.1	2.93	74	119	0.65	0.048 0	19.0	0.187 0	19.0	0.028 20	2.3	99	±440	179.3	±4.0
18.2	56.40	129	2 528	0.05	0.049 3	3.6	0.174 9	3.8	0.025 70	1.2	164	±83	163.6	±2.0
19.1	3.71	12	120	0.11	0.049 9	8.1	0.244 0	8.8	0.035 50	3.3	189	±190	225.2	±7.3
19.2	2.50	6	89	0.07	0.048 2	8.3	0.213 0	8.6	0.032 07	2.0	107	±200	203.5	±4.0
19.3	41.50	143	1905	0.08	0.049 1	1.6	0.171 6	2.0	0.025 38	1.2	150	±37	161.6	±2.0
20.1	4.61	43	63	0.70	0.068 5	11.0	0.798 0	11.0	0.084 40	2.1	885	±230	522.0	±11.0
20.2	41.30	110	1 935	0.06	0.049 4	3.4	0.167 8	3.6	0.024 64	1.3	166	±79	156.9	±1.9
21.1	29.70	28	1111	0.03	0.050 2	2.0	0.214 6	2.4	0.031 04	1.3	202	±47	197.1	±2.5
22.1	20.40	16	691	0.02	0.051 2	10.0	0.235 0	11.0	0.033 27	1.4	250	±240	211.0	±3.0
22.2	45.10	135	2 106	0.07	0.048 2	2.0	0.165 3	2.4	0.024 87	1.2	109	±48	158.4	±1.9
23.1	3.84	12	121	0.10	0.048 7	11.0	0.245 0	12.0	0.036 46	2.0	134	±270	230.8	±4.5
23.2	56.50	151	2 548	0.06	0.049 6	3.8	0.174 8	4.0	0.025 57	1.2	175	±89	162.7	±2.0
JD1525														
1.1	19.90	254	254	0.29	0.049 3	3.0	0.170 5	3.4	0.025 08	1.7	163	±69	159.7	±2.7
2.1	44.70	147	147	0.08	0.049 3	1.3	0.179 4	2.1	0.026 41	1.6	161	±31	168.0	±2.7
3.1	38.80	377	377	0.22	0.049 2	1.4	0.172 9	2.1	0.025 47	1.6	159	±32	162.1	±2.6
3.2	3.90	8	8	0.04	0.050 6	9.6	0.175 0	9.8	0.025 06	2.0	221	±220	159.5	±3.2
4.1	20.50	54	54	0.09	0.051 1	4.2	0.273 0	4.5	0.038 70	1.7	248	±96	244.8	±4.1
4.2	34.30	157	157	0.10	0.048 7	3.2	0.163 3	3.6	0.024 31	1.7	133	±74	154.9	±2.5
5.1	5.54	10	10	0.04	0.050 2	3.3	0.172 2	3.8	0.024 88	1.9	205	±76	158.4	±2.9
6.1	19.20	41	41	0.05	0.050 2	2.0	0.173 9	2.6	0.025 11	1.7	205	±45	159.9	±2.7
7.1	24.20	166	166	0.16	0.049 0	2.8	0.172 3	3.3	0.025 50	1.7	148	±66	162.3	±2.7
8.1	2.62	44	44	0.40	0.052 0	12.0	0.190 0	12.0	0.026 52	2.3	286	±270	168.7	±3.8
9.1	14.70	134	134	0.20	0.049 1	2.3	0.166 4	2.9	0.024 52	1.7	154	±54	156.5	±2.7
10.1	12.70	47	47	0.54	0.095 2	1.9	2.163 0	2.7	0.164 70	1.9	1 533	±36	983.0	±17.5
10.2	21.40	124	124	0.13	0.049 4	2.4	0.166 9	3.0	0.024 52	1.7	166	±57	156.1	±2.6
11.1	5.23	11	11	0.05	0.050 3	7.4	0.176 0	7.7	0.025 34	2.0	211	±170	161.3	±3.1
12.1	19.20	139	139	0.16	0.049 0	2.0	0.165 6	2.7	0.024 53	1.7	146	±48	156.2	±2.6
13.1	21.20	265	265	0.28	0.049 9	1.9	0.172 6	2.5	0.025 09	1.7	189	±44	159.8	±2.7
14.1	14.70	195	195	0.30	0.050 4	5.7	0.174 0	6.0	0.025 08	1.8	213	±130	159.7	±2.8
15.1	21.10	152	152	0.16	0.049 3	1.8	0.168 6	2.5	0.024 83	1.7	160	±43	158.1	±2.7
16.1	29.90	118	118	0.09	0.050 0	2.2	0.171 9	2.7	0.024 93	1.5	196	±51	158.7	±2.4

续表 3-2

Continued Table 3-2

测点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Pb *	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
JD1537														
1.1	8.12	91	384	0.24	0.047 2	7.8	0.159 0	7.9	0.024 42	1.6	58	± 190	155.5	± 2.4
2.1	3.28	34	154	0.23	0.053 0	20.0	0.178 0	20.0	0.024 27	2.1	331	± 450	154.6	± 3.2
3.1	3.50	132	159	0.86	0.050 7	17.0	0.175 0	18.0	0.025 10	1.9	226	± 400	159.8	± 3.1
4.1	1.90	42	83	0.52	0.055 0	29.0	0.191 0	29.0	0.025 12	2.8	414	± 650	159.9	± 4.5
5.1	0.80	24	35	0.72	0.051 0	55.0	0.174 0	56.0	0.024 60	4.4	260	$\pm 1\ 300$	156.4	± 6.8
6.1	1.18	35	54	0.68	0.068 0	18.0	0.231 0	18.0	0.024 70	2.7	865	± 380	157.3	± 4.3
6.2	9.10	29	436	0.07	0.051 4	5.8	0.171 0	6.0	0.024 14	1.6	261	± 130	153.8	± 2.4
7.1	1.43	30	61	0.51	0.050 0	42.0	0.175 0	42.0	0.025 42	3.3	190	± 970	161.8	± 5.3
8.1	0.78	18	32	0.58	0.120 6	8.2	0.457 0	8.7	0.027 48	2.9	1 965	± 150	174.8	± 5.0
6.3	23.90	293	1 111	0.27	0.049 5	3.9	0.169 2	4.2	0.024 80	1.4	170	± 91	157.9	± 2.2
9.1	2.26	74	101	0.76	0.051 0	23.0	0.175 0	23.0	0.025 01	2.4	225	± 530	159.2	± 3.8
10.1	87.40	34	442	0.08	0.115 8	0.8	3.670 0	1.6	0.229 80	1.4	1 893	± 14	1 333	± 17
11.1	1.09	22	48	0.48	0.058 0	40.0	0.197 0	41.0	0.024 80	3.6	518	± 890	157.9	± 5.6
12.1	0.74	20	34	0.61	0.064 0	22.0	0.217 0	22.0	0.024 67	3.0	734	± 470	157.1	± 4.6
13.1	0.74	17	34	0.53	0.053 0	34.0	0.179 0	34.0	0.024 67	3.1	315	± 770	157.1	± 4.8
14.1	9.44	108	448	0.25	0.048 8	4.5	0.164 2	4.7	0.024 42	1.3	137	± 110	155.5	± 2.0
16.1	1.53	41	72	0.58	0.049 4	9.1	0.165 0	9.4	0.024 25	2.4	165	± 210	154.5	± 3.6
15.1	18.60	93	856	0.11	0.049 1	6.4	0.167 0	6.6	0.024 72	1.3	153	± 150	157.4	± 2.0
17.1	1.83	69	86	0.83	0.047 2	19.0	0.157 0	19.0	0.024 19	2.0	60	± 440	154.1	± 3.1
18.1	1.52	42	71	0.61	0.051 0	18.0	0.171 0	19.0	0.024 30	2.8	239	± 430	154.8	± 4.3
19.1	16.00	213	763	0.29	0.049 4	3.2	0.165 7	3.4	0.024 30	1.3	169	± 74	154.8	± 1.9
20.1	21.50	260	1 004	0.27	0.049 2	3.7	0.167 8	3.9	0.024 75	1.3	156	± 87	157.6	± 2.0
21.1	9.21	78	450	0.18	0.049 1	3.7	0.160 8	4.0	0.023 75	1.5	153	± 86	151.3	± 2.3
JD1540														
1.1	14.30	209	134	1.62	0.064 5	3.1	1.099 0	3.5	0.123 70	1.6	757	± 66	752	± 11
1.2	21.80	279	993	0.29	0.048 9	2.0	0.171 6	2.5	0.025 46	1.4	141	± 48	162.1	± 2.2
2.1	14.30	111	667	0.17	0.048 1	2.6	0.164 7	3.0	0.024 85	1.4	102	± 62	158.2	± 2.2
3.1	28.10	348	1 281	0.28	0.049 6	2.6	0.174 4	2.9	0.025 50	1.3	177	± 60	162.3	± 2.2
4.1	98.50	114	228	0.52	0.168 6	0.6	11.710 0	1.5	0.503 70	1.4	2 543	± 9	2 630	± 30
5.1	20.80	256	966	0.27	0.049 1	1.8	0.169 8	2.3	0.025 06	1.3	155	± 43	159.6	± 2.1
5.2	25.00	242	302	0.83	0.063 8	1.6	0.846 0	2.2	0.096 10	1.4	736	± 35	591.8	± 8.0
6.1	26.40	203	1 228	0.17	0.047 9	2.7	0.164 9	3.1	0.024 96	1.3	95	± 65	158.9	± 2.1
7.1	26.50	311	1 261	0.25	0.049 6	2.2	0.167 0	2.6	0.024 41	1.4	178	± 52	155.4	± 2.1
8.1	1.14	14	54	0.28	0.053 0	36.0	0.180 0	36.0	0.024 44	3.3	350	± 810	155.7	± 5.0
9.1	0.92	38	46	0.86	0.052 4	15.0	0.165 0	15.0	0.022 78	2.5	302	± 340	145.2	± 3.6
10.1	1.78	64	82	0.81	0.051 6	7.5	0.179 0	7.8	0.025 16	2.0	268	± 170	160.2	± 3.1
11.1	36.30	610	1 740	0.36	0.053 3	3.1	0.177 0	3.4	0.024 06	1.3	344	± 70	153.3	± 2.0
12.1	834.00	481	1 388	0.36	0.337 2	0.3	32.500 0	1.3	0.698 91	1.3	3 650	± 5	3 416	± 35
13.1	39.90	527	2 240	0.24	0.049 9	6.8	0.136 3	7.0	0.019 81	1.4	189	± 160	126.5	± 1.8
14.1	1.01	29	48	0.63	0.050 0	21.0	0.166 0	21.0	0.024 07	2.4	201	± 480	153.3	± 3.7
15.1	20.90	427	400	1.10	0.059 8	1.8	0.501 0	2.3	0.060 75	1.4	596	± 39	380.2	± 5.2
16.1	109.00	136	285	0.49	0.167 1	0.7	10.280 0	1.7	0.446 00	1.6	2 529	± 12	2 377	± 31
17.1	1.68	54	79	0.70	0.048 9	16.0	0.165 0	16.0	0.024 51	2.2	141	± 380	156.1	± 3.4
18.1	78.10	175	200	0.90	0.162 3	0.6	10.180 0	1.6	0.454 90	1.5	2 480	± 10	2 417	± 29
18.2	24.90	70	384	0.19	0.110 3	3.3	1.109 0	3.6	0.072 90	1.5	1 804	± 60	453.7	± 6.5
19.1	4.73	84	226	0.38	0.047 3	5.2	0.159 3	5.5	0.024 42	1.6	65	± 120	155.6	± 2.5
20.1	4.30	93	205	0.47	0.051 4	3.7	0.173 3	4.1	0.024 47	1.6	258	± 86	155.8	± 2.5
21.1	1.31	86	61	1.45	0.057 0	19.0	0.191 0	19.0	0.024 42	2.5	482	± 420	155.6	± 3.8
22.1	17.80	258	811	0.33	0.048 8	3.1	0.170 9	3.4	0.025 41	1.4	137	± 72	161.8	± 2.2
23.1	2.15	153	103	1.53	0.050 8	10.0	0.168 0	10.0	0.024 02	1.9	233	± 240	153.0	± 2.9

续表 3-3

Continued Table 3-3

测点号	$w_{\text{B}}/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Pb *	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
JD1544														
1.1	5.29	79	231	0.36	0.049 4	6.9	0.180 0	7.1	0.026 47	1.6	167	± 160	168.4	± 2.6
1.2	23.70	190	700	0.28	0.083 2	1.5	0.451 2	2.0	0.039 33	1.3	1274	± 30	248.7	± 3.2
2.1	132.00	167	345	0.50	0.159 3	0.5	9.830 0	1.5	0.447 30	1.4	2 448	± 9	2 383	± 27
2.2	47.40	717	2 328	0.32	0.047 5	7.4	0.150 0	7.5	0.022 95	1.3	76	± 170	146.3	± 1.9
3.1	3.05	66	133	0.51	0.047 9	7.9	0.173 0	8.1	0.026 22	1.7	96	± 190	166.8	± 2.9
4.1	3.71	61	169	0.37	0.049 5	7.5	0.173 0	7.6	0.025 35	1.7	169	± 170	161.4	± 2.7
5.1	19.10	174	834	0.22	0.049 4	2.7	0.181 1	3.1	0.026 58	1.4	168	± 64	169.1	± 2.3
5.2	262.00	185	399	0.48	0.300 2	0.7	31.610 0	1.4	0.763 60	1.3	3 472	± 6	3 658	± 36
6.1	4.67	98	206	0.49	0.051 5	4.9	0.186 2	5.1	0.026 24	1.6	262	± 110	167.0	± 2.6
7.1	203.00	245	505	0.50	0.165 1	0.43	10.630 0	1.4	0.466 90	1.3	2 509	± 7	2 470	± 27
8.1	2.31	90	103	0.90	0.048 5	9.2	0.172 0	9.3	0.025 75	1.9	125	± 220	163.9	± 3.0
9.1	686.00	808	1 220	0.68	0.267 9	0.3	24.170 0	1.3	0.654 40	1.3	3 294	± 5	3 245	± 33
10.1	579.00	262	1 481	0.18	0.159 0	0.4	9.980 0	1.3	0.455 40	1.3	2 445	± 6	2 419	± 26
10.2	54.50	272	2 356	0.12	0.049 5	6.5	0.181 0	6.6	0.026 52	1.4	169	± 150	168.7	± 2.3
11.1	91.90	164	227	0.75	0.163 6	0.6	10.610	1.5	0.470 60	1.4	2 493	± 10	2 486	± 29
11.2	56.40	601	2 897	0.21	0.049 1	6.1	0.148 9	6.3	0.021 98	1.6	154	± 140	140.2	± 2.2
12.1	66.00	722	2 797	0.27	0.049 8	1.1	0.188 6	1.7	0.027 48	1.3	184	± 26	174.7	± 2.3
13.1	393.00	181	1 089	0.17	0.159 1	0.4	9.210 0	1.4	0.419 80	1.3	2 446	± 6	2 260	± 25
14.1	9.64	397	438	0.94	0.048 3	6.4	0.169 0	6.6	0.025 34	1.5	115	± 150	161.3	± 2.4
15.1	56.10	637	2 363	0.28	0.050 0	2.2	0.188 9	2.6	0.027 43	1.3	193	± 52	174.4	± 2.3
16.1	55.90	49	97	0.52	0.279 0	2.4	25.740 0	2.8	0.669 00	1.5	3 358	± 37	3 302	± 39
16.2	19.70	179	861	0.22	0.049 3	2.4	0.180 6	2.8	0.026 60	1.3	160	± 56	169.2	± 2.3
17.1	5.68	198	259	0.79	0.046 6	7.1	0.163 0	7.3	0.025 39	1.6	27	± 170	161.6	± 2.5
18.1	107.00	129	270	0.49	0.180 8	0.5	11.470 0	1.5	0.460 10	1.4	2 660	± 9	2 440	± 29
19.1	4.72	153	208	0.76	0.050 7	9.6	0.183 0	9.8	0.026 09	1.7	229	± 220	166.0	± 2.8
20.1	34.90	32	86	0.38	0.169 2	0.9	11.040 0	1.8	0.473 30	1.6	2 550	± 15	2 498	± 33

U-Pb 年龄,其中 17 个锆石分析点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 169~155 Ma,剔除两颗年龄相对较老的锆石外(4.1、10.1),其余 15 个测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 158.8 $\pm$ 1.4 Ma (MSWD=0.7, $n=15$) (图 7c),代表岩浆形成年龄。另外两颗继承锆石年龄分别为 244.8 $\pm$ 4.1 Ma (点 4.1)、983.0 $\pm$ 17.5 Ma (点 10.1)。值得注意的是,点 4.1 的 Th/U 值为 0.09,为继承的变质锆石,而点 10.1 明显偏离谐和线(图 7c)。

对样品 JD1537 中 21 颗锆石进行 23 个点分析。21 个测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布在 162~151 Ma 之间,加权平均年龄为 156.0 $\pm$ 1.2 Ma (MSWD=1.7, $n=21$) (图 7d),代表其结晶年龄。另外两个测试点年龄较老(8.1、10.1),但均偏离谐和线(图 7d)。

选取样品 JD1540 中的 23 颗锆石进行 26 个年龄测试。除去两个偏年轻的数据点,16 个同岩浆测

试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 162~153 Ma,加权平均年龄为 157.8 $\pm$ 1.7 Ma (MSWD=1.7, $n=16$) (图 7e),代表岩体结晶年龄。其余 8 个测试点给出的年龄较老,除 3 个明显偏离谐和线外,另外 5 颗的年龄分别为 3 650 $\pm$ 5 Ma、2 543 $\pm$ 9 Ma、2 529 $\pm$ 12 Ma、2 480 $\pm$ 10 Ma 和 752 $\pm$ 11 Ma (图 7e、8f)。

对样品 JD1544 进行 20 颗锆石的 26 个年龄测试。15 个分析在同岩浆锆石区域。除 4 个测试点 U 含量较高,年龄离群外(2.2、11.2、12.1、15.1),其余 11 个测试点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 169~161 Ma,加权平均年龄为 166.0 $\pm$ 2.2 Ma (MSWD=1.7, $n=11$),代表岩体形成年龄(图 7f)。11 个测试点给出较老的继承年龄,除 1 个测试点明显偏离谐和线外,其他继承年龄分布在 3 472~2 445 Ma 之间,可分为 2.55~2.45 Ga 和 3.47~3.29 Ga 两组(图 7f、8g)。



图6 胶北地体侏罗纪花岗岩典型锆石阴极发光图像

Fig. 6 Representative cathodoluminescence (CL) images of zircons from Jurassic granites from the Jiaobei terrane

4.3 锆石 O 同位素

本次共对 147 个锆石点进行氧同位素分析, 分析结果见表 4。数据表明大部分锆石显示高于典型地幔锆石氧同位素的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($5.3\text{‰} \pm 0.6\text{‰}$, Valley, 2003; Page *et al.*, 2007), 部分锆石显示较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 结合锆石 U-Pb 年龄, 其主要为继承锆石 (图 9)。

样品 JD1521, 22 个样品点分析在同岩浆锆石区域, 得到的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围较大 ($4.3\text{‰} \sim 8.7\text{‰}$), 加权

平均值是 $7.5\text{‰} \pm 0.2\text{‰}$, 一颗新元古代和一颗三叠纪继承锆石氧同位素较低, $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $3.6\text{‰} \pm 0.2\text{‰}$ 和 $0.5\text{‰} \pm 0.3\text{‰}$ (图 9a)。此外, 一颗未测年的继承锆石给出的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $4.1\text{‰} \pm 0.4\text{‰}$ 。样品 JD1523, 22 个同岩浆锆石区域样品点给出 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $4.5\text{‰} \sim 8.8\text{‰}$, 加权平均值为 $7.3\text{‰} \pm 0.4\text{‰}$, 继承锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围较大, 尤其新元古代和三叠纪的继承锆石具有低氧同位素特征, $\delta^{18}\text{O}$ 值从 $-4.4\text{‰} \sim$

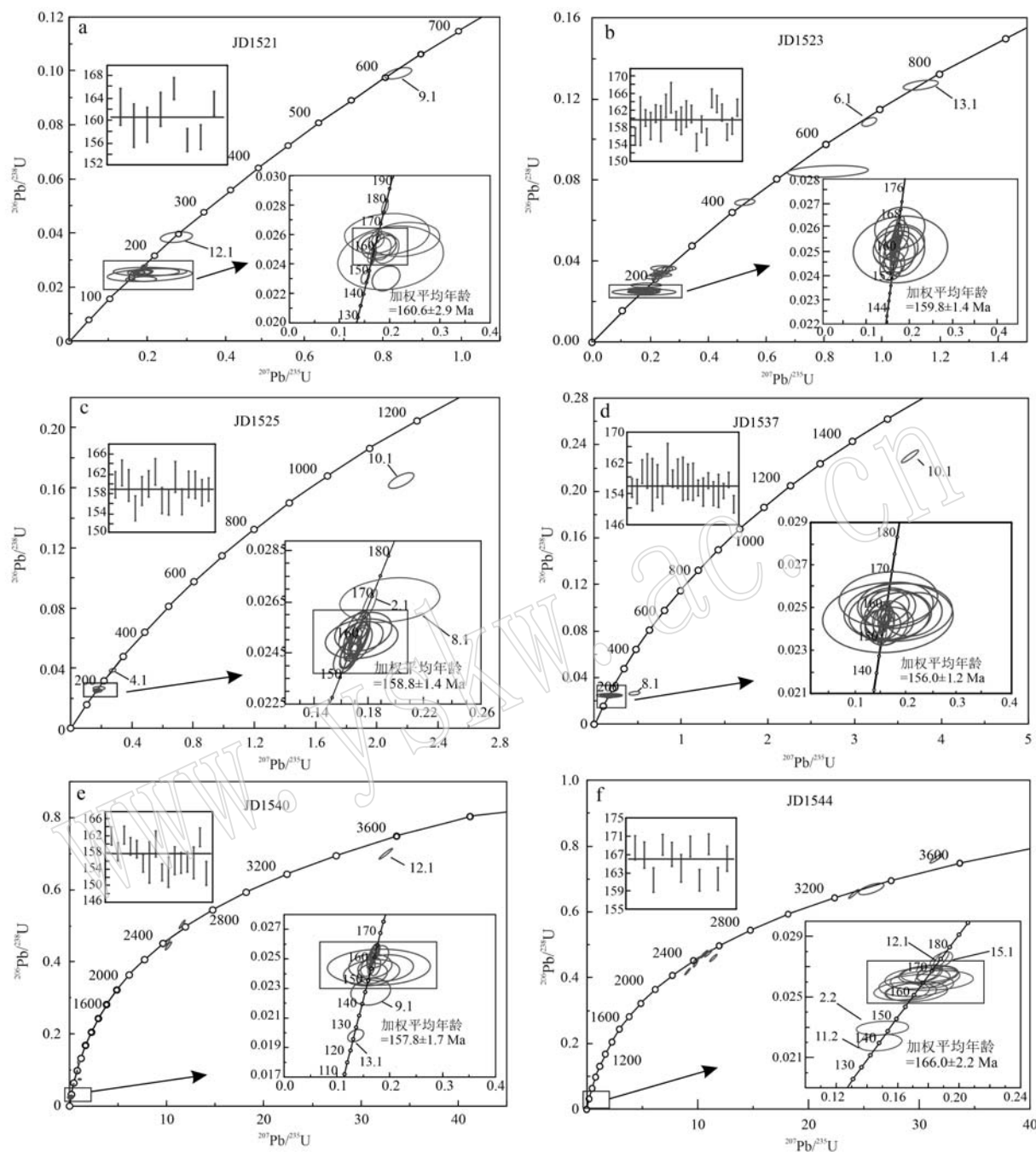


图7 胶北地体侏罗纪花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 7 Zircon U-Pb concordia age diagrams of Jurassic granites from the Jiaobei terrane

8.4‰ (图 9b)。样品 JD1525 中, 18 个样品点分析在同岩浆锆石区域, 其 $\delta^{18}\text{O}$ 分布在 6.5‰~7.9‰ 之间, 加权平均值为 $7.3\text{‰} \pm 0.2\text{‰}$ 。两个继承锆石氧同位素偏轻, $\delta^{18}\text{O}$ 值分别是 $4.9\text{‰} \pm 0.2\text{‰}$ (244.8 Ma) 和 $5.9\text{‰} \pm 0.5\text{‰}$ (983 Ma, 不谐和) (图 9c)。样品 JD1537 的 18 个分析在同岩浆锆石区域测试点的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 7.2‰~8.3‰, 加权平均值为 $7.9\text{‰} \pm$

0.2‰。两颗继承锆石均不谐和, 给出 $\delta^{18}\text{O}$ 值均为 7.4‰ (图 9d)。样品 JD1540 中, 18 个测试点分析在同岩浆锆石区域, 它们的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 6.6‰~9.0‰, 加权平均值为 $7.5\text{‰} \pm 0.3\text{‰}$ 。7 颗太古宙-新元古代继承锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 0.8‰~6.7‰ (图 9e)。除一个测试点外 (点 17.1 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低, 为 4.0‰), 样品 JD1544 其他 11 个同岩浆锆石区域测试点的 $\delta^{18}\text{O}$ 值

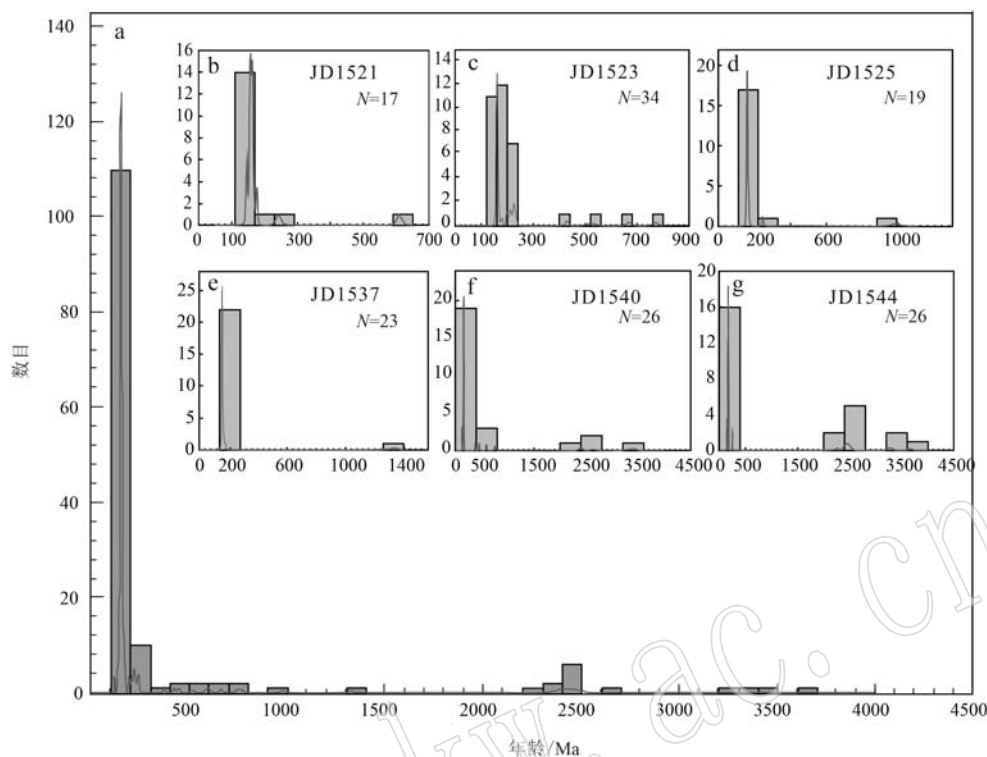


图8 胶北地体侏罗纪花岗岩锆石年龄分布直方图

Fig. 8 Histograms of zircon U-Pb ages of Jurassic granites in the Jiaobei terrane

介于 $6.9‰ \sim 8.4‰$ 之间, 加权平均值为 $7.7‰ \pm 0.3‰$ 。11 个继承锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 分布在 $4.5‰ \sim 8.3‰$ 之间(图 9f)。

5 讨论

5.1 胶北地体侏罗纪岩浆作用

胶北地体侏罗纪岩浆岩主要包括玲珑花岗岩和栾家河花岗岩, 针对这些岩浆岩的形成时代, 前人开展了一系列的测年工作, 目前所获得的岩浆年龄主要集中在 $160 \sim 156 \text{ Ma}$ 之间 (Wang *et al.*, 1998; Yang *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020)。例如, Wang 等 (1998) 通过 SHRIMP 锆石测年, 获得玲珑花岗岩结晶年龄为 $160 \sim 153 \text{ Ma}$, 栾家河花岗岩结晶年龄为 $154 \sim 152 \text{ Ma}$ 。Yang 等 (2012) 报道的 2 件玲珑花岗岩结晶年龄均为 159 Ma , 2 件栾家河花岗岩结晶年龄为 $158 \sim 157 \text{ Ma}$ 。Ma 等 (2013) 对焦家金矿钻孔中的玲珑花岗岩进行锆石测年, 获得的年龄为 $160 \sim 157 \text{ Ma}$ 。最近, Wu 等 (2020) 报道的玲珑花岗岩年龄为 $156.7 \pm 1.3 \text{ Ma}$, 2 件栾家河花岗岩的年龄为 $161 \sim 159 \text{ Ma}$ 。本次对胶北东部

和北部 6 件弱变形的花岗岩进行锆石 SHRIMP 测年, 其中 5 件样品给出的结晶年龄为 $161 \sim 156 \text{ Ma}$, 与前人报道的玲珑和栾家河花岗岩结晶年龄一致。除以上晚侏罗世花岗岩外, 古现镇石岚村的花岗岩 (JD1544) 给出了略早的中侏罗世晚期的结晶年龄 ($166.0 \pm 2.2 \text{ Ma}$), 与胶北北部 1 件玲珑花岗岩 ($166 \pm 1 \text{ Ma}$; Li *et al.*, 2019) 和 1 件磁山花岗岩 ($166.2 \pm 1.4 \text{ Ma}$; Wu *et al.*, 2020) 的形成时代一致。综合以上结果可以发现, 胶北地体侏罗纪花岗岩的形成时代较为集中, 主体形成于晚侏罗世, 不同地区晚侏罗世花岗岩的形成时代未见明显区别。除晚侏罗世花岗岩外, 胶北地体还发育少量中侏罗世花岗岩。

5.2 源区性质和岩石成因

本次研究的花岗岩样品均具有高 SiO_2 ($>70.89\%$)、低 MgO ($<0.43\%$)、 $\text{A/CNK} > 1.0$, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 的特征。高硅、低镁的特征与陆壳来源或岩浆源区经历高度演化相关; 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 的特征, 以及明显的 Pb、Sr 正异常 (图 5a) 指示其地壳来源。样品普遍具有高 Na_2O ($>3.5\%$)、Sr (均 $>400 \times 10^{-6}$)、Sr/Y 值 (>20) 和相对低

表 4 胶北地体侏罗纪花岗岩锆石氧同位素分析结果
Table 4 Oxygen isotopes of zircon from Jurassic granites from the Jiaobei terrane

样品/分析点	年龄/Ma	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	2σ	样品/分析点	年龄/Ma	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	2σ
JD1521				JD1523-20.1	522±11	8.4	±0.2
JD1521-1.1	163.4±4.8	7.2	±0.5	JD1523-20.2	156.9±1.9	7.6	±0.4
JD1521-2.1	162.5±3.3	8.0	±0.4	JD1523-21.1	197.1±2.5	4.1	±0.2
JD1521-3.1	165.6±5.9	7.2	±0.3	JD1523-22.1	211.0±3.0	1.7	±0.3
JD1521-4.1	159.1±3.9	4.3	±0.7	JD1523-22.2	158.4±1.9	7.2	±0.7
JD1521-6.1	147.0±1.9	7.5	±0.4	JD1523-23.1	230.8±4.5	-4.4	±0.5
JD1521-7.1	162.0±3.0	6.3	±2.2	JD1523-23.2	162.7±2.0	7.6	±0.4
JD1521-7.2	164.9±2.0	8.7	±0.5	JD1523-24.1		6.2	±0.5
JD1521-8.1	156.6±2.1	7.3	±0.3	JD1523-25.2		7.2	±0.1
JD1521-9.1	608.8±7.7	3.6	±0.2	JD1525			
JD1521-9.2	155.7±1.9	7.1	±0.3	JD1525-1.1	159.7±2.7	7.1	±0.2
JD1521-10.1	155.4±9.0	8.0	±0.3	JD1525-2.1	168.0±2.7	6.8	±0.2
JD1521-10.2	157.0±2.2	7.3	±0.2	JD1525-3.1	162.1±2.6	7.9	±0.4
JD1521-11.1	146.2±3.6	7.0	±0.5	JD1525-3.2	159.5±3.2	7.4	±0.2
JD1521-12.1	242.3±7.9	0.5	±0.3	JD1525-4.1	244.8±4.1	4.9	±0.2
JD1521-13.1	163.1±2.2	8.2	±0.2	JD1525-4.2	154.9±2.5	6.5	±0.4
JD1521-14.1	177.3±2.2	6.9	±0.3	JD1525-5.1	158.4±2.9	7.0	±0.6
JD1521-15.1		7.3	±0.2	JD1525-6.1	159.9±2.7	7.3	±0.3
JD1521-16.1		7.8	±0.4	JD1525-7.1	162.3±2.7	6.8	±0.6
JD1521-16.2		7.3	±0.2	JD1525-8.1	168.7±3.8	7.8	±0.3
JD1521-17.1		4.1	±0.4	JD1525-9.1	156.5±2.7	7.0	±0.4
JD1521-17.2		6.9	±0.4	JD1525-10.1	983±18	5.9	±0.5
JD1521-18.1		7.5	±0.5	JD1525-10.2	156.1±2.6	7.3	±0.7
JD1521-19.1		7.0	±0.2	JD1525-11.1	161.3±3.1	7.5	±0.5
JD1521-20.1		7.6	±0.2	JD1525-12.1	156.2±2.6	7.2	±0.5
JD1523				JD1525-13.1	159.8±2.7	7.6	±0.3
JD1523-1.1	215.5±3.7	6.1	±0.3	JD1525-14.1	159.7±2.8	7.2	±0.3
JD1523-1.2	155.9±2.0	6.6	±0.3	JD1525-15.1	158.1±2.7	7.5	±0.2
JD1523-2.1	159.6±2.2	6.8	±0.3	JD1525-16.1	158.7±2.4	7.3	±0.2
JD1523-3.1	159.5±5.8	8.8	±0.3	JD1525-17.1		7.9	±0.4
JD1523-3.2	160.3±2.0	7.1	±0.6	JD1537			
JD1523-4.1	158.4±3.2	8.7	±0.4	JD1537-1.1	155.5±2.4	7.2	±0.1
JD1523-5.1	430.1±6.2	3.0	±0.5	JD1537-2.1	154.6±3.2	8.3	±0.2
JD1523-5.2	161.3±2.1	7.0	±0.5	JD1537-3.1	159.8±3.1	7.9	±0.2
JD1523-6.1	668.0±8.2	5.0	±0.3	JD1537-4.1	159.9±4.5	7.6	±0.2
JD1523-7.1	158.9±4.2	8.2	±0.3	JD1537-5.1	156.4±6.8	8.0	±0.3
JD1523-8.1	228.9±5.0	4.7	±1.0	JD1537-6.1	157.3±4.3	8.2	±0.3
JD1523-8.2	163.1±2.8	6.8	±0.8	JD1537-6.2	153.8±2.4	7.3	±0.2
JD1523-9.1	165.1±3.6	8.0	±0.3	JD1537-6.3	157.9±2.2	7.8	±0.2
JD1523-10.1	159.6±3.2	7.6	±0.3	JD1537-7.1	161.8±5.3	8.2	±0.1
JD1523-11.1	224.3±2.7	4.9	±0.5	JD1537-8.1	174.8±5.0	7.4	±0.3
JD1523-11.2	161.2±3.1	5.9	±0.7	JD1537-9.1	159.2±3.8	7.8	±0.3
JD1523-12.1	161.2±2.0	7.5	±0.5	JD1537-10.1	1893±14	7.4	±0.1
JD1523-13.1	770±10	4.7	±0.3	JD1537-11.1	157.9±5.6	7.9	±0.2
JD1523-14.1	154.5±2.1	7.0	±0.3	JD1537-12.1	157.1±4.6	7.9	±0.3
JD1523-15.1	158.8±1.9	7.5	±0.3	JD1537-13.1	157.1±4.8	8.3	±0.2
JD1523-16.1	155.8±2.0	7.7	±0.3	JD1537-14.1	155.5±2.0	7.2	±0.3
JD1523-17.1	165.0±2.2	4.5	±0.3	JD1537-15.1	157.4±2.0	8.0	±0.2
JD1523-18.1	179.3±4.0	4.8	±0.6	JD1537-16.1	154.5±3.6	8.1	±0.2
JD1523-19.1	225.2±7.3	-1.8	±0.3	JD1537-17.1	154.1±3.1	7.9	±0.2
JD1523-19.3	161.6±2.0	7.7	±0.2	JD1537-18.1	154.8±4.3	8.0	±0.2

续表 4

Continued Table 4

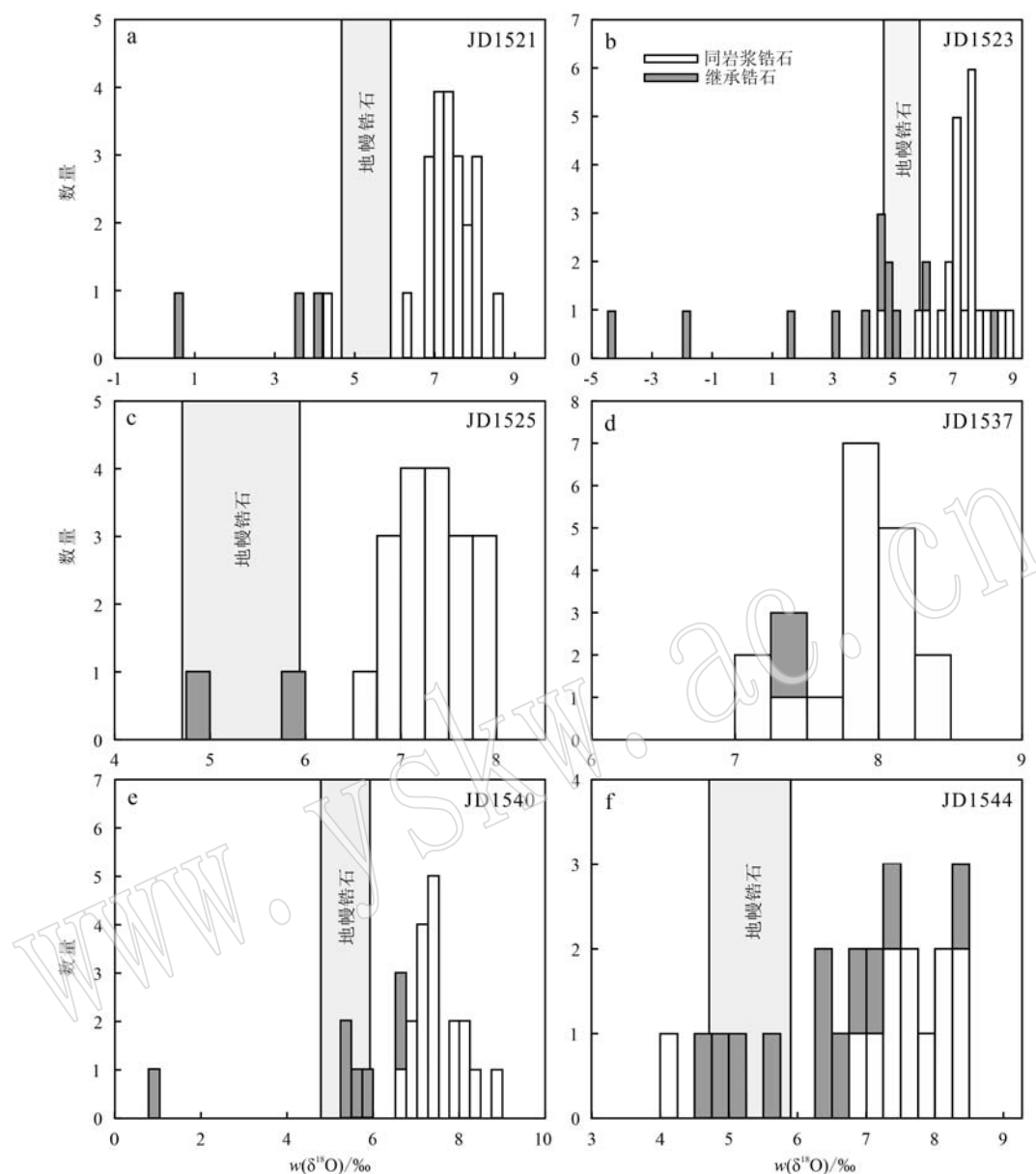
样品/分析点	年龄/Ma	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	2 σ	样品/分析点	年龄/Ma	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	2 σ
JD1540				JD1540-23.1	153.0 $\pm$ 2.9	9.0	$\pm$ 0.3
JD1540-1.1	752 $\pm$ 11	1.1	$\pm$ 5.4	JD1544			
JD1540-1.2	162.1 $\pm$ 2.2	7.1	$\pm$ 0.4	JD1544-1.1	168.4 $\pm$ 2.6	7.8	$\pm$ 0.4
JD1540-2.1	158.2 $\pm$ 2.2	6.6	$\pm$ 0.2	JD1544-2.1	2 448 $\pm$ 9	7.3	$\pm$ 0.2
JD1540-3.1	162.3 $\pm$ 2.2	7.2	$\pm$ 0.3	JD1544-2.2	2 48.7 $\pm$ 3.2	6.9	$\pm$ 0.9
JD1540-4.1	2 543 $\pm$ 9	5.7	$\pm$ 0.2	JD1544-3.1	166.8 $\pm$ 2.9	8.1	$\pm$ 0.1
JD1540-5.1	159.6 $\pm$ 2.1	7.3	$\pm$ 0.1	JD1544-4.1	161.4 $\pm$ 2.7	7.6	$\pm$ 0.3
JD1540-6.1	158.9 $\pm$ 2.1	7.2	$\pm$ 0.3	JD1544-5.1	169.1 $\pm$ 2.3	7.1	$\pm$ 0.1
JD1540-7.1	155.4 $\pm$ 2.1	7.4	$\pm$ 0.3	JD1544-6.1	167.0 $\pm$ 2.6	7.6	$\pm$ 0.2
JD1540-8.1	155.7 $\pm$ 5.0	6.9	$\pm$ 0.3	JD1544-7.1	2 509 $\pm$ 7	6.4	$\pm$ 0.2
JD1540-9.1	145.2 $\pm$ 3.6	8.2	$\pm$ 0.3	JD1544-8.1	163.9 $\pm$ 3.0	8.4	$\pm$ 0.2
JD1540-10.1	160.2 $\pm$ 3.1	8.0	$\pm$ 0.4	JD1544-9.1	3 294 $\pm$ 5	4.5	$\pm$ 0.3
JD1540-11.1	153.3 $\pm$ 2.0	6.8	$\pm$ 0.3	JD1544-10.1	2 445 $\pm$ 6	6.5	$\pm$ 0.2
JD1540-12.1	3 650 $\pm$ 5	6.6	$\pm$ 0.2	JD1544-10.2	168.7 $\pm$ 2.3	7.4	$\pm$ 0.2
JD1540-13.1	126.5 $\pm$ 1.8	7.4	$\pm$ 0.3	JD1544-11.1	2 493 $\pm$ 10	5.7	$\pm$ 0.3
JD1540-14.1	153.3 $\pm$ 3.7	7.9	$\pm$ 0.2	JD1544-11.2	140.2 $\pm$ 2.2	7.5	$\pm$ 0.3
JD1540-15.1	380.2 $\pm$ 5.2	5.3	$\pm$ 0.3	JD1544-12.1	174.7 $\pm$ 2.3	6.7	$\pm$ 0.2
JD1540-16.1	2 529 $\pm$ 12	5.8	$\pm$ 0.3	JD1544-13.1	2 446 $\pm$ 6	5.1	$\pm$ 0.2
JD1540-17.1	156.1 $\pm$ 3.4	7.3	$\pm$ 0.2	JD1544-14.1	161.3 $\pm$ 2.4	8.3	$\pm$ 0.2
JD1540-18.1	2 480 $\pm$ 10	0.8	$\pm$ 0.3	JD1544-15.1	174.4 $\pm$ 2.3	7.1	$\pm$ 0.3
JD1540-18.2	453.7 $\pm$ 6.5	6.7	$\pm$ 0.3	JD1544-16.1	3 358 $\pm$ 37	5.0	$\pm$ 0.2
JD1540-19.1	155.6 $\pm$ 2.5	8.4	$\pm$ 0.3	JD1544-16.2	169.2 $\pm$ 2.3	6.9	$\pm$ 0.3
JD1540-20.1	155.8 $\pm$ 2.5	7.2	$\pm$ 0.2	JD1544-17.1	161.6 $\pm$ 2.5	4.0	$\pm$ 0.2
JD1540-21.1	155.6 $\pm$ 3.8	8.1	$\pm$ 0.2	JD1544-18.1	2 660 $\pm$ 9	8.3	$\pm$ 0.3
JD1540-22.1	161.8 $\pm$ 2.2	7.5	$\pm$ 0.1	JD1544-19.1	166.0 $\pm$ 2.8	8.1	$\pm$ 0.2

的 Y ($<18 \times 10^{-6}$) 和 Yb ($<1.9 \times 10^{-6}$) 含量 (表 2、图 10) 等类似埃达克岩地球化学特征。通过对比,可以发现本次研究的侏罗纪花岗岩与前人研究的玲珑、栾家河花岗岩形成时代一致,并具有相似的地球化学特征 (图 3、图 4、图 5)、锆石氧同位素组成,暗示胶北不同地区侏罗纪花岗岩的成因机制可能没有显著的区别 (Hou *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020)。

关于埃达克岩的成因,目前仍有争议,一般认为其来自: ① 俯冲洋壳的部分熔融 (Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990; Yogodzinski *et al.*, 1995; Wang *et al.*, 2007); ② 加厚下地壳的部分熔融 (Atherton and Petford, 1993; Xu *et al.*, 2002; Chung *et al.*, 2003; Gao *et al.*, 2004; Hou *et al.*, 2004) 以及 ③ 玄武质母岩浆高压结晶分异 (Prouteau and Scaillet, 2003; Macpherson *et al.*, 2006; Rodríguez *et al.*, 2007; Rooney *et al.*, 2011; Meng *et al.*, 2018)。胶北侏罗纪花岗岩低的 MgO 和 Cr、Ni 含量,演化的全岩 Nd 和锆石 Hf 同位素特征,普遍含有多期次古老的岩浆继承锆石 (Hou *et al.*, 2007; Jiang *et al.*,

2012; Yang *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020; 本次研究) 以及高于地幔值的同岩浆锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (Jiang *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2019; 本次研究), 均不支持俯冲洋壳部分熔融和玄武质母岩浆高压结晶分异成因。演化的放射性同位素特征、普遍含有古老的继承锆石,暗示这些花岗岩可能由古老地壳物质部分熔融而成。同岩浆锆石重的氧同位素组成,暗示源区中有地表沉积物的贡献。在埃达克岩成因判别图解中,所有样品也均落在加厚下地壳起源的埃达克岩区域 (图 10)。以上结果表明胶北侏罗纪花岗岩可能是加厚下地壳部分熔融的结果。

尽管研究人员普遍接受胶北侏罗纪花岗岩是由壳源岩石在相对高压的条件下部分熔融而成的观点,但是其源区的物质来源仍存在不同认识 (Hou *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020)。一种观点认为胶北侏罗纪花岗岩源岩主要来自华北克拉通加厚的下地壳,岩浆中混染了扬子板块的地壳物质 (Hou *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2012; Li *et al.*,

图9 胶北地体侏罗纪花岗岩锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值直方图Fig. 9 Histograms of zircon $\delta^{18}\text{O}$ values of Jurassic granites from the Jiaobei terrane

2019); 另一种观点认为岩浆源区主要为俯冲的扬子板块地壳物质 (Zhang *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2020)。深俯冲的扬子板块物质以新元古代花岗质岩石为主, 且发育低 $\delta^{18}\text{O}$ 岩浆岩 (Tang *et al.*, 2008a, 2008b; Zheng *et al.*, 2009; Liu and Liou, 2011; He *et al.*, 2016), 而胶北地体发育大量太古宙-古元古代岩浆岩 (Jahn *et al.*, 2008; 刘建辉等, 2011; Xie *et al.*, 2014)。因此, 继承锆石年龄和 $\delta^{18}\text{O}$ 特征可以有效地区分岩浆源区物质来自扬子克拉通还是华北克拉通。本文报道的样品 JD1544 中

含多颗继承锆石, 除两颗年龄为 ~ 174 Ma、一颗年龄不谐和外, 其余 10 颗的年龄为 $3\,471 \sim 2\,446$ Ma (图 7、图 8), $\delta^{18}\text{O}$ 为 $4.5\text{‰} \sim 8.3\text{‰}$, 表明岩浆源区可能主要来自华北克拉通古老下地壳。与 JD1544 明显不同, 样品 JD1523 中 13 个继承锆石给出的最古老 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 770 Ma, 不含太古宙-古元古代继承锆石 (图 7、图 8)。值得注意的是, 该样品中 8 颗继承锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $230.8 \sim 197.1$ Ma, 与苏鲁造山带的超高压变质峰期-退变质作用的年龄相当。此外, 这几颗三叠纪的继承锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值

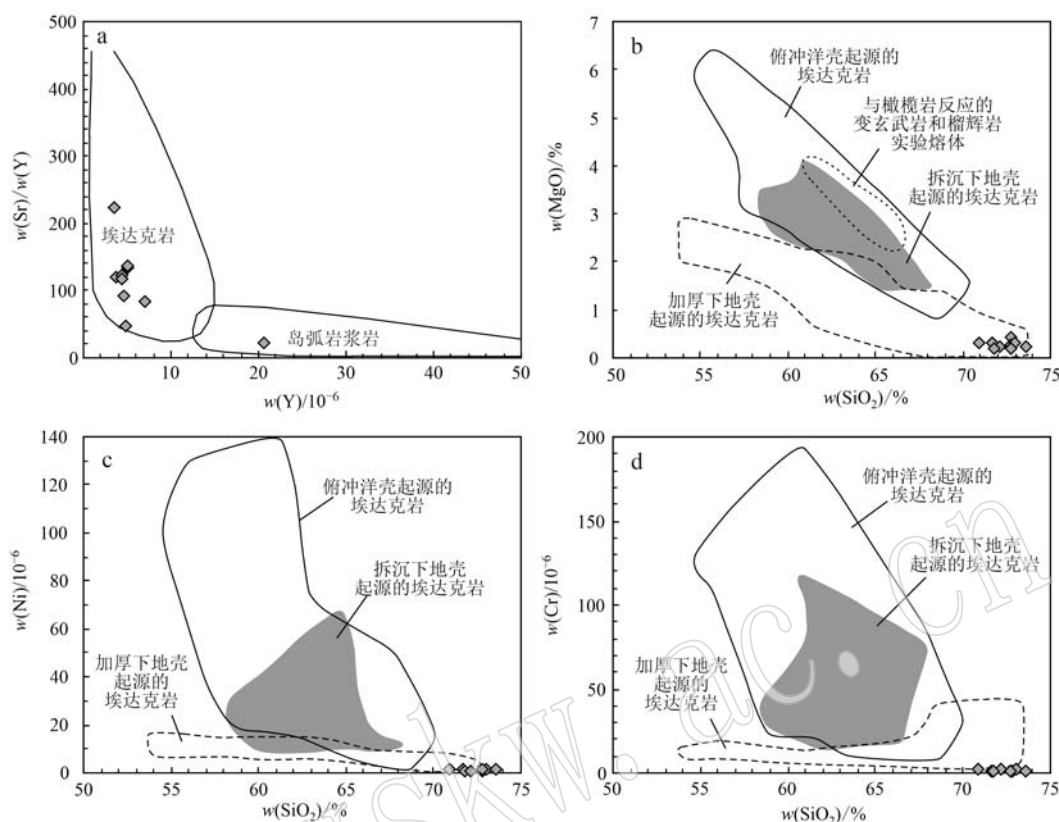


图 10 胶北地体侏罗纪花岗岩成因类型判别图(a 底图据 Defant and Drummond, 1990; b~d 底图据 Wang *et al.*, 2006)

Fig. 10 Discrimination diagrams of the genetic types of Jurassic granites from the Jiaobei terrane (a after Defant and Drummond; b~d after Wang *et al.*, 2006)

为 $-4.4‰ \sim -6.1‰$ 。这些特征表明, JD1523 的源区可能主要来自深俯冲的扬子板块。此外, 样品 JD1540 中, 同时含有新元古代和太古宙-新元古代的继承锆石, 表明可能来自扬子和华北的混合源区。与本文认识相似, 胶北部分侏罗纪花岗岩同岩浆锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值很低(绝大多数小于 -20), 落在太古宙-古元古代继承锆石以及胶北太古宙基底的 Hf 同位素大陆地壳演化值范围内, 指示可能主要由胶北加厚的古老下地壳部分熔融而成(Jiang *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012, 2018; Li *et al.*, 2019)。而部分侏罗纪花岗岩同岩浆锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值明显偏高(大多数分布在 $-20 \sim -10$ 之间), 与新元古代-三叠纪继承锆石以及苏鲁造山带新元古代花岗片麻岩的 Hf 同位素大陆地壳演化值一致, 表明该部分花岗岩可能主要来自扬子板块地壳物质的部分熔融(Zhang *et al.*, 2010; Jiang *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2013)。综合以上资料可见, 胶北侏罗纪花岗岩的源区并不是单一的来自胶北地体下地壳或俯冲的扬子地壳岩石, 而是来自多源区。扬子板块地壳物质在三叠纪

时发生大陆地壳的俯冲-折返作用, 在这些过程中, 扬子板块的地壳物质会混入并停留在胶北地体因造山作用而加厚的下地壳中, 在之后的部分熔融过程中, 胶北下地壳以及混入胶北下地壳的扬子地壳残片均可发生部分熔融。由于胶北下地壳和扬子地壳残片在岩浆源区中所占比例不同, 导致了胶北侏罗纪花岗岩同位素组成以及继承锆石年龄分布特征的差异。

5.3 胶北地区古老结晶基底年龄信息

古老的地壳物质的发现和识别对认识地球早期陆壳形成过程、演化历史具有重要的意义。华北克拉通是全球最古老的克拉通之一, 在鞍山地区出露和保存 ~ 3.8 Ga 的古老岩石(Liu *et al.*, 1992; Song *et al.*, 1996; Wan *et al.*, 2012)。近年来, 研究人员在华北克拉通多地识别出古太古代-始太古代的继承/碎屑锆石(Wan *et al.*, 2019 及文中参考文献)。尽管胶北地体出露大量太古宙基底岩石, 但最古老岩石为 ~ 2.9 Ga 的 TTG 片麻岩(例如, Jahn *et al.*, 2008; Xie *et al.*, 2014)。本次研究在采自苏家店小

蔡家村的侏罗纪花岗岩中识别出年龄为 $3\,650 \pm 5$ Ma 的古老继承锆石。该锆石发育岩浆成因的振荡环带(图 6e), Pb 丢失较弱(不谐和度为 6%), 指示胶北地体可能存在始太古代的结晶基底。此外, 样品 JD1544 中含有 3 颗 $3.47 \sim 3.29$ Ga 的继承锆石。前人在玲珑花岗岩中识别出 3.45 Ga 的继承锆石(Wang *et al.*, 1998)。除中生代花岗岩中的古老继承锆石外, 前人在古元古代粉子山群、中元古代芝罘群等变沉积岩中也识别出多颗 $3.68 \sim 3.00$ Ga 的碎屑/继承锆石(Liu *et al.*, 2013; 刘建辉等, 2014; 谢士稳等, 2014), 部分古太古代锆石的两阶段 Hf 模式年龄高达 ~ 4.1 Ga(Liu *et al.*, 2013; 刘建辉等, 2014), 这些结果也表明胶北地区可能存在古太古代早期甚至冥古宙的古老结晶基底(Liu *et al.*, 2013; 刘建辉等, 2014)。

5.4 地球动力学意义

如前文所述, 扬子板块和华北板块在三叠纪时发生拼合, 扬子板块超高压变质的峰期年龄为 $240 \sim 220$ Ma(例如, Hacker *et al.*, 1998; Xu *et al.*, 2006; Zheng *et al.*, 2009; Liu and Liou, 2011)。胶北侏罗纪花岗岩结晶年龄大多集中在晚侏罗世 $160 \sim 156$ Ma 之间, 晚于超高压变质年龄峰期 $80 \sim 60$ Ma。扬子板块的俯冲碰撞过程导致华北克拉通南缘(山东半岛为胶北地体)地壳的加厚。因此, 胶北地体侏罗纪花岗岩被认为形成于碰撞后的岩石圈伸展过程(Zhang *et al.*, 2010; Jiang *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012)。但是除胶北地体外, 华北克拉通辽东、辽西、蚌埠等地也均发育晚侏罗世花岗岩(Wu *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2008, 2014; Yang *et al.*, 2010), 而同样由三叠纪扬子板块和华北板块俯冲—碰撞作用形成的大别造山带却未见侏罗纪花岗岩报道, 表明胶北侏罗纪花岗岩可能不是简单的由碰撞后的伸展作用导致的加厚地壳熔融而成。晚侏罗世, 向华北克拉通俯冲的 Izanagi 板块发生回撤, 引起大陆弧—裂谷作用(continental arc-rifting), 该过程被认为可能诱发了胶北侏罗纪的岩浆作用(Jiang *et al.*, 2010; Ma *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2018)。最近, Wu 等(2020)发现胶北侏罗纪花岗岩的形成时代与郯庐断裂带大规模走滑的活动时代一致, 提出胶北侏罗纪岩浆作用与郯庐断裂带的左旋走滑有关, 郯庐断裂带的左旋走滑由古太平洋板块西北向的俯冲引发。值得注意的是, 华北不同地区侏罗纪花岗岩被认为形成于不同的动力学过程(Wu *et al.*,

2005; Zhang *et al.*, 2008, 2014; Jiang *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2014)。除华北克拉通外, 华南板块发育更大规模的晚侏罗世花岗岩, 岩石类型多样, 形成的构造机制也存在差异(例如, Huang *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2018)。尽管这些侏罗纪岩浆岩被认为形成于多种动力学过程, 但普遍认为它们的成因直接或间接地与古太平洋板块或 Izanagi 板块的俯冲作用有关(Wu *et al.*, 2005; Jiang *et al.*, 2010; Mao *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2018)。现有资料还很难准确限定导致胶北地体侏罗纪岩浆活动精细的动力学过程, 但该过程应该与古太平洋或 Izanagi 板块的俯冲作用有关。

6 结论

(1) 胶北地体东部和北部新报道的侏罗纪花岗岩的结晶年龄为 $166 \sim 156$ Ma, 含有 $3\,650 \sim 3\,294$ Ma、 $2\,660 \sim 2\,445$ Ma、 $770 \sim 600$ Ma 以及 $245 \sim 197$ Ma 的继承锆石。

(2) 本文报道的侏罗纪花岗岩具有埃达克岩的地球化学特征, 与玲珑、栾家河花岗岩的地球化学特征、形成时代未见明显区别, 胶北不同地区侏罗纪花岗岩具有相同的成因机制, 是加厚的地壳物质部分熔融的产物。这些侏罗纪花岗岩源区的物质来源存在差异, 部分花岗岩源区主要为胶北地体加厚的下地壳, 部分花岗岩主要由俯冲的扬子板块地壳岩石熔融而成。

(3) 胶北侏罗纪花岗岩形成的动力学机制可能不是简单的碰撞后伸展过程, 古太平洋或 Izanagi 板块的俯冲作用可能直接或间接地诱发了加厚地壳的熔融。

References

- Atherton M P and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 362(6 416): 144~146.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, *et al.* 2004. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards[J]. *Chemical Geology*, 205: 115~140.
- Chung S L, Liu D Y, Ji J Q, *et al.* 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet [J]. *Geology*, 31(11): 1 021~1 024.

- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347(6 294): 662~665.
- Faure M, Lin W and Le Breton N. 2001. Where is the North China-South China block boundary in eastern China? [J]. *Geology*, 29: 119~122.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. *Nature*, 432(7 019): 892~897.
- Goss S C, Wilde S A, Wu F, *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.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, *et al.* 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 161: 215~230.
- He Q, Zhang S B and Zheng Y F. 2016. High temperature glacial melt-water-rock reaction in the Neoproterozoic: Evidence from zircon in-situ oxygen isotopes in granitic gneiss from the Sulu orogen[J]. *Precambrian Research*, 284: 1~13.
- Hou M L, Jiang Y H, Jiang S Y, *et al.* 2007. Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, east China: Implications for crustal thickening to delamination [J]. *Geological Magazine*, 144(4): 619~631.
- Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, *et al.* 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1~2): 139~155.
- Huang H Q, Li X H, Li Z X, *et al.* 2015. Formation of the Jurassic South China Large Granitic Province: Insights from the genesis of the Jiufeng pluton[J]. *Chemical Geology*, 401: 43~58.
- Huang Tao, Yang Liqiang, Liu Xiangdong, *et al.* 2014. Crustal evolution of the Jiaobei terrane: Evidence from U-Pb ages, trace element compositions and Hf isotopes of inherited zircons of the Linglong biotite granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 130~150 (in Chinese with English abstract).
- Ickert R B, Hiess J, Williams I S, *et al.* 2008. Determining high precision, in situ, oxygen isotope ratios with a SHRIMP II: Analyses of MPI-DING silicate-glass reference materials and zircon from contrasting granites[J]. *Chemical Geology*, 257: 114~128.
- Jahn B M, Liu D Y, Wan Y S, *et al.* 2008. Archean crustal evolution of the Jiaodong Peninsula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology, elemental and Nd-isotope geochemistry [J]. *American Journal of Science*, 308(3): 232~269.
- Jiang N, Chen J Z, Guo J H, *et al.* 2012. In situ zircon U-Pb, oxygen and hafnium isotopic compositions of Jurassic granites from the North China craton: Evidence for Triassic subduction of continental crust and subsequent metamorphism-related ^{18}O depletion[J]. *Lithos*, 142~143: 84~94.
- Jiang P, Yang K F, Fan H R, *et al.* 2016. Titanite-scale insights into multistage magma mixing in early Cretaceous of NW Jiaodong terrane, north China craton[J]. *Lithos*, 258~259: 197~214.
- Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, *et al.* 2010. Petrogenesis and tectonic implications of Late Jurassic shoshonitic lamprophyre dikes from the Liaodong Peninsula, NE China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 100: 127~151.
- Kay R W. 1978. Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted Pacific Ocean crust [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4(1~2): 117~132.
- Li H, Palinkas L A, Watanabe K, *et al.* 2018. Petrogenesis of Jurassic A-type granites associated with Cu-Mo and W-Sn deposits in the central Nanling region, South China: Relation to mantle upwelling and intra-continental extension[J]. *Ore Geology Reviews*, 92: 449~462.
- Li Hongkui, Li Dapeng, Geng Ke, *et al.* 2017. Yanshan magmatic activity and tectonic setting in Jiaodong area: Records from SHRIMP zircon dating of single zircon[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(1): 165~181 (in Chinese with English abstract).
- Li S G, Wang S J, Guo S S, *et al.* 2014. Geochronology and geochemistry of leucogranites from the southeast margin of the North China Block: Origin and migration [J]. *Gondwana Research*, 26(3): 1114~1128.
- 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 Y L, Zhang H F, Guo J H, *et al.* 2017. Petrogenesis of the Huili Paleoproterozoic leucogranite in the Jiaobei Terrane of the North China Craton: A highly fractionated albite granite forced by K-feldspar fractionation[J]. *Chemical Geology*, 450: 165~182.
- Lin Bolei and Li Bile. 2013. Geochemistry, U-Pb dating, Lu-Hf isotopic analysis and geological significance of Linglong granites in Jiaodong Peninsula[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 40(2): 147~160 (in Chinese with English abstract).
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, *et al.* 1992. Remnants of ≥ 3.8 Ga crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton[J]. *Geology*, 20: 339~342.
- Liu F L and Liou J G. 2011. Zircon as the best mineral for P-T-time history of UHP metamorphism: A review on mineral inclusions and U-Pb SHRIMP ages of zircons from the Dabie-Sulu UHP rocks[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40: 1~39.
- Liu F L, Liu C H, Itano K, *et al.* 2017. Geochemistry, U-Pb dating, and Lu-Hf isotopes of zircon and monazite of porphyritic granites within the Jiao-Liao-Ji orogenic belt: Implications for petrogenesis and tectonic setting[J]. *Precambrian Research*, 300: 78~106.
- Liu J H, Liu F L, Ding Z J, *et al.* 2013. U-Pb dating and Hf isotope study of detrital zircons from the Zhifu Group, Jiaobei Terrane, North China Craton: Provenance and imply cations for Precambrian crustal

- growth and recycling[J]. *Precambrian Research*, 235: 230~250.
- Liu Jianhui, Liu Fulai, Ding Zhengjiang, *et al.* 2014. Early Archean zircon U-Pb dating and Hf isotopes in Jiaodong: Evidence for the growth and recycling of the ancient continental crust in the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2 941~2 950 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianhui, Liu Fulai, Liu Pinghua, *et al.* 2011. Polyphase magmatic and metamorphic events from Early Precambrian metamorphic basement in Jiaobei area: Evidences from the Zircon U-Pb dating of TTG and granitic gneisses[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 943~960 (in Chinese with English abstract).
- Mao L, Jiang S Y, Dai B Z, *et al.* 2013. Multiple sources for the origin of Late Jurassic Linglong adakitic granites in the Shandong Peninsula, eastern China: Zircon U-Pb geochronological, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 126~163: 251~263.
- Macpherson C G, Dreher S T and Thirlwall M F. 2006. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3~4): 581~593.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- Mao J W, Cheng Y B, Chen M H, *et al.* 2013. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings[J]. *Miner. Deposita*, 48: 267~294.
- Meng F X, Gao S, Song Z J, *et al.* 2018. Mesozoic high-Mg andesites from the Daohugou area, Inner Mongolia: Upper-crustal fractional crystallization of parental melt derived from metasomatized lithospheric mantle wedge[J]. *Lithos*, 302~303: 535~548.
- Miao L C, Luo Z K, Huang J Z, *et al.* 1997. Zircon sensitive high resolution ion microprobe (SHRIMP) study of granitoid intrusions in Zhaoye Gold Belt of Shandong Province and its implication[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 40(4): 361~369.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 37: 215~224.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, *et al.* 2008. Zircon M257—a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32: 247~265.
- Page F Z, Fu B, Kita N T, *et al.* 2007. Zircons from kimberlite: New insights from oxygen isotopes, trace elements, and Ti in zircon thermometry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 3 887~3 903.
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63~81.
- Prouteau G and Scaillet B. 2003. Experimental constraints on the origin of the 1991 Pinatubo dacite[J]. *Journal of Petrology*, 44(12): 2 203~2 241.
- Rodríguez C, Selles D, Dungan M, *et al.* 2007. Adakitic dacites formed by intracrustal crystal fractionation of water-rich parent magmas at Nevado de Longaví volcano (36.2 °S; Andean Southern Volcanic Zone, central Chile) [J]. *Journal of Petrology*, 48(11): 2 033~2 061.
- Rooney T O, Franceschi P and Hall CM. 2011. Water-saturated magmas in the Panama Canal region: A precursor to adakite-like magma generation? [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161(3): 373~388.
- Song B, Nutman A P, Liu D Y, *et al.* 1996. 3 800 to 2 500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China [J]. *Precambrian Research*, 78: 79~94.
- Song Yingxi, Song Mingchun, Li Shiyong, *et al.* 2019. Discovery of Late Mesozoic third stage metallogenic rock and 3.5 Ga zircon and metallogenic dynamic background in Jiaodong area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(2): 160~178 (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, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Tang J, Zheng Y F, Gong B, *et al.* 2008a. Extreme oxygen isotope signature of meteoric water in magmatic zircon from metagranite in the Sulu orogen, China: Implications for Neoproterozoic rift magmatism[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(13): 3 139~3 169.
- Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, *et al.* 2008b. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the tectonic affinity of the Jiaodong terrane in the Sulu orogen, China [J]. *Precambrian Research*, 161(3~4): 389~418.
- Valley J W. 2003. Oxygen isotopes in zircon[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 343~385.
- Wan Y S, Liu D Y, Nutman A, *et al.* 2012. Multiple 3.8~3.1 Ga tectono-magmatic events in a newly discovered area of ancient rocks (the Shengousi Complex), Anshan, North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 54~55: 18~30.
- Wan Y S, Xie H Q, Dong C Y, *et al.* 2019. Hadean to Paleoproterozoic rocks and zircons in China [A]. Van Kranendonk M, Bennett V C and Hoffmann J E. *Earth's Oldest Rocks (second edition)* [C]. Elsevier, Amsterdam, 293~327.
- Wang G C, Jiang Y H, Liu Z, *et al.* 2016. Multiple origins for the Middle Jurassic to Early Cretaceous high-K calc-alkaline I-type granites in northwestern Fujian province, SE China and tectonic implications [J]. *Lithos*, 246~247: 197~211.
- Wang L G, Qiu Y M, McNaughton N J, *et al.* 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids [J]. *Ore Geology Reviews*, 13(1~5): 275~291.
- Wang Q, Wyman D A, Zhao Z H, *et al.* 2007. Petrogenesis of carboniferous adakites and Nb-enriched arc basalts in the Alataw area, northern Tianshan Range (western China): Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia Orogenic Belt [J]. *Chemical Geology*

- gy, 236(1~2): 42~64.
- Wang Q, Xu J F, Jian P, *et al.* 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization[J]. *Journal of Petrology*, 47(1): 119~144.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe [A]. McKibben M A, Shanks III W C and Ridley W I. *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes* [C]. Colorado: Reviews in Economic Geology, 7: 1~35.
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, *et al.* 2005. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China[J]. *Chemical Geology*, 221: 127~156.
- Wu H J, He Y S, Li S G, *et al.* 2020. Partial Melts of Intermediate-Felsic Sources in a Wedged Thickened Crust: Insights from Granites in the Sulu Orogen[J]. *Journal of petrology*, 61(5): 1~35.
- Xia Y, Xu X S and Liu L. 2016. Transition from adakitic to bimodal magmatism induced by the paleo-Pacific plate subduction and slab rollback beneath SE China: Evidence from petrogenesis and tectonic setting of the dike swarms[J]. *Lithos*, 244: 182~204.
- Xie Shiwen, Wang Shijin, Xie Hangqiang, *et al.* 2014. SHRIMP U-Pb dating of detrital zircons from Fenzishan Group in Jiaodong terrane, North China craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2 989~2 998 (in Chinese with English abstract).
- Xie S W, Xie H Q, Wang S J, *et al.* 2014. Ca. 2.9 Ga granitoid magmatism in eastern Shandong, North China Craton: Zircon dating, Hf-in-zircon isotopic analysis and whole-rock geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 255: 538~562.
- Xu J F, Shinjo 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*, 30(12): 1 111~1 114.
- Xu Z Q, Zeng L S, Liu F L, *et al.* 2006. Polyphase subduction and exhumation of the Sulu high-pressure-ultrahigh-pressure metamorphic terrane[A]. Hacker B R, McClelland W C and Liou J G. *Ultrahigh-Pressure Metamorphism: Deep Continental Subduction* [C]. Geological Society of America, Special Papers, 93~114.
- Yang D B, Xu W L, Wang Q H, *et al.* 2010. Chronology and geochemistry of Mesozoic granitoids in the Bengbu area, central China: Constraints on the tectonic evolution of the eastern North China Craton [J]. *Lithos*, 114: 200~216.
- Yang K F, Fan H R, Santosh M, *et al.* 2012. Reactivation of the Archean lower crust: Implications for zircon geochronology, elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of late Mesozoic granitoids from north-western Jiaodong Terrane, the North China Craton[J]. *Lithos*, 146~147: 112~127.
- Yang L Q, Dilek Y, Wang Z L, *et al.* 2018. Late Jurassic, high Ba-Sr Linglong granites in the Jiaodong Peninsula, East China: Lower crustal melting products in the eastern North China Craton[J]. *Geological Magazine*, 155(5): 1 040~1 062.
- Yogodzinski G M, Kay R W, Volynets O N, *et al.* 1995. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge[J]. *GSA Bulletin*, 107(5): 505~519.
- Zhang J, Zhao Z F, Zheng Y F, *et al.* 2010. Post-collisional magmatism: Geochemical constraints on the petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Sulu orogen, China[J]. *Lithos*, 119: 512~536.
- Zhang X H, Mao Q, Zhang H F, *et al.* 2008. A Jurassic peraluminous leucogranites from Yiwulushan, western Liaoning, North China craton: Age, origin and tectonic significance[J]. *Geological Magazine*, 145(3): 305~320.
- Zhang X H, Yuan L L and Wilde S A. 2014. Crust/mantle interaction during the construction of an extensional magmatic dome: Middle to Late Jurassic plutonic complex from western Liaoning, North China Craton[J]. *Lithos*, 205: 185~207.
- Zhang Tian and Zhang Yueqiao. 2008. Late Mesozoic tectono-magmatic evolution of Jiaobei uplift[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(9): 52~70 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F, Chen R X and Zhao Z F. 2009. Chemical geodynamics of continental subduction zone metamorphism: Insights from studies of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) core samples[J]. *Tectonophysics*, 475: 327~358.

附中文参考文献

- 黄涛, 杨立强, 刘向东, 等. 2014. 胶北地体地壳演化: 玲珑黑云母花岗岩继承锆石 U-Pb 年龄、微量元素和 Hf 同位素证据[J]. *岩石学报*, 30(9): 130~150.
- 李洪奎, 李大鹏, 耿科, 等. 2017. 胶东地区燕山期岩浆活动及其构造环境——来自单颗锆石 SHRIMP 年代学的记录[J]. *地质学报*, 91(1): 165~181.
- 林博磊, 李碧乐. 2013. 胶东玲珑花岗岩的地球化学、U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素及地质意义[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 40(2): 147~160.
- 刘建辉, 刘福来, 刘平华, 等. 2011. 胶北早前寒武纪变质基底多期岩浆-变质热事件: 来自 TTG 片麻岩和花岗质片麻岩中锆石 U-Pb 定年的证据[J]. *岩石学报*, 27(4): 943~960.
- 刘建辉, 刘福来, 丁正江, 等. 2014. 胶北太古宙早期锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素研究: 华北克拉通古老陆壳增生及再循环的证据[J]. *岩石学报*, 30(10): 2 941~2 950.
- 宋英昕, 宋明春, 李世勇, 等. 2019. 胶东晚中生代三期成矿岩体和 3.5 Ga 锆石的发现及成矿动力学背景[J]. *地质学报*, 93(2): 160~178.
- 谢士稳, 王世进, 颜颂强, 等. 2014. 华北克拉通胶东地区粉子山群碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. *岩石学报*, 30(10): 2 989~2 998.
- 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*, 89(9): 52~70.