

辽西兴城地区早侏罗世花岗质岩浆活动

——华北克拉通东部古太平洋俯冲作用的响应

崔芳华^{1,2}, 徐学纯², 郑常青^{2,3}, 姚文贵², 施璐⁴, 王路远¹

(1. 山东理工大学资源与环境工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 3. 自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室, 吉林 长春 130061; 4. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034)

摘要: 华北克拉通东部中生代期间受到古太平洋板块俯冲并引发一系列的构造-岩浆-成矿作用, 但古太平洋俯冲作用开始的具体时限仍未有定论。本文对辽西兴城地区中生代药王庙-磨盘山岩体进行了系统的岩相学研究、锆石 U-Pb 同位素定年、全岩地球化学和锆石原位 Hf 同位素测试分析, 结果显示, 花岗质岩石中岩浆成因锆石加权平均年龄为 193~186 Ma, 岩体侵位于早侏罗世; 岩石组合为石英二长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩; 岩石全碱含量较高, 属准铝-弱过铝质、高钾钙碱性系列, 具有与 I 型花岗岩类似的岩石地球化学特征; 岩石相对富集轻稀土元素和大离子亲石元素 K、Pb 等, 而相对亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 等及 P 元素; 岩浆成因锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -12.94~-7.39, Hf 同位素二阶段模式年龄为 2.05~1.69 Ga, 其初始岩浆可能来源于古老地壳的部分熔融并可能有幔源物质的参与。辽西兴城地区早侏罗世花岗岩岩石组合、岩石地球化学特征和与俯冲作用有关的活动陆缘花岗岩特征类似, 岩石形成于古太平洋俯冲作用导致的活动陆缘构造背景下, 结合区域研究资料, 认为古太平洋对华北克拉通东部的俯冲作用开始于晚三叠世—早侏罗世, 而早侏罗世花岗质岩浆活动是古太平洋板块对华北克拉通俯冲作用的响应。

关键词: 花岗质岩石; 早侏罗世; 古太平洋俯冲; 华北克拉通东部; 辽西兴城地区

中图分类号: P588.12¹

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)02-0269-19

Early Jurassic granitic magmatism in Xingcheng area, western Liaoning Province: Magmatic response to the subduction of paleo-Pacific plate in eastern North China Craton

CUI Fang-hua^{1,2}, XU Xue-chun², ZHENG Chang-qing^{2,3}, YAO Wen-gui², SHI Lu⁴ and WANG Lu-yuan¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, China; 3. Key Laboratory of Mineral Resources Evaluation in Northeast Asia, Ministry of Land and Resources, Changchun 130061, China; 4. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Shenyang 110034, China)

Abstract: The large-scale tectono-magmatism and mineralization during Mesozoic in eastern North China Craton resulted from the subduction of paleo-Pacific plate, although the starting time of subduction is still in dispute. In this study, the granitoids from Yaowangmiao-Mopan Mountain pluton in Xingcheng area, western Liaoning Province, were

收稿日期: 2020-10-30; 接受日期: 2021-01-13; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(201011083); 山东省自然科学基金项目(ZR2019PD010); 国土资源部东北亚矿产资源评价重点实验室开放课题基金(DBY-KF-19-15)

作者简介: 崔芳华(1986-), 女, 博士, 讲师, 主要从事矿物与岩石成因研究, E-mail: cuifanghua@sdu.edu.cn; 通讯作者: 徐学纯(1954-), 男, 博士, 教授, 主要从事流体地质学和变质地质学方面的研究, E-mail: xuxuechun@jlu.edu.cn。

taken for systematic researches, including petrology, zircon U-Pb dating, geochemistry and zircon Hf isotopic analysis. Magmatic zircons yielded weighted mean ages of 193 Ma and 186 Ma, so the Yaowangmiao-Mopan Mountain pluton was emplaced during Early Jurassic. The granitic rocks are composed of quartz monzonite, granodiorite, monzogranite and syenogranite. All of these rocks have high total alkalis content and quasi-aluminous to weakly peraluminous characteristics, belonging to the high-K calc-alkaline series with geochemical characteristics similar to those of I-type granite. These rocks are enriched in LREE and K, Pb and depleted in Nb, Ta, Ti and P. The magmatic zircons of the Early Jurassic granitoids have negative $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($-12.94 \sim -7.39$) and ancient t_{DM2} values ($2.05 \sim 1.69$ Ga) which indicates that the primary magma was derived from the partial melting of ancient continental crust probably with the mixture of mantle source materials. The Early Jurassic granitic rocks in Xingcheng area of western Liaoning Province have rock assemblages and geochemical characteristics similar to the granitoids formed under the active continental margin related to the subduction of paleo-Pacific plate. The results in this study and regional geological data all indicate that the subduction of paleo-Pacific plate began during Late Triassic-Early Jurassic, and the Early Jurassic granitic magmatism resulted from the response to the subduction of paleo-Pacific plate in eastern North China Craton.

Key words: granitoids; Early Jurassic; subduction of paleo-Pacific plate; eastern North China Craton; Xingcheng area, western Liaoning Province

Fund support: Ministry of Land and Resources Special Research Fund for Non-Profit Sector (201011083); Natural Science Foundation of Shandong Province, China (ZR2019PD010); Opening Foundation of Key Laboratory of Mineral Resources Evaluation in Northeast Asia, Ministry of Land and Resources (DBY-KF-19-15)

位于中国东部的华北克拉通自古元古代克拉通化完成至晚古生代一直保持稳定状态,但中生代期间克拉通稳定性整体遭到破坏,岩石圈地幔物理化学性质发生改变且岩石圈减薄与克拉通破坏显著(王芳等, 2009; 孙金凤等, 2009; 杨进辉等, 2009)。岩浆作用时空分布特征、拉伸断陷盆地和变质核杂岩等构造行迹走向、地震探测与层析成像等多方面研究结果表明,华北克拉通东部中生代诸多地质事件与古太平洋俯冲作用密切相关(Wu *et al.*, 2005, 2019; Zhu Rixiang *et al.*, 2012; Zhu Guang *et al.*, 2012; Dong *et al.*, 2015; 郑永飞等, 2018; 朱日祥等, 2019),包括岩石圈减薄与克拉通破坏、大规模构造-岩浆活动及伴生成矿作用、盆地形成与演化等。众多学者对包括华北克拉通在内的中国东部晚古生代以来遭受了古太平洋的俯冲作用这一认识并无异议,但对于古太平洋板块具体何时开始向欧亚大陆俯冲这一焦点问题却有分歧,主要有以下几种不同观点:①二叠纪。部分学者认为,华南二叠纪沉积岩碎屑锆石 U-Pb 同位素定年和 Hf-O 同位素分析结果显示,华南印支期造山事件与古太平洋板块俯冲有关,东北完达山地体东方红二叠纪蛇绿岩形成于古太平洋俯冲作用构造背景下,东北地区兴凯湖花岗质岩石(~ 250 Ma)记录了古太平洋板块俯

冲的早期阶段(Li *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2017);②晚三叠世。彭玉鲸等(2012)根据构造-岩浆-变质-成矿的耦合关系将吉黑东部太平洋构造体制启动时间限定为 227~222 Ma,另有部分学者通过总结显生宙花岗岩形成时代、兴蒙造山带构造演化历程,认为古太平洋构造演化始于晚三叠世(Wu *et al.*, 2011; Wilde and Zhou, 2015);③早中侏罗世。延边古洞河韧性剪切带晚期变形时代为早侏罗世并具有自南西向北东右行逆冲特征,该韧性剪切带的形成与古太平洋板块俯冲作用有关(张超等, 2019);东北地区广泛分布着记录古太平洋早期俯冲作用的侏罗纪岩浆岩和完整的俯冲-增生杂岩带,中侏罗世末期郯庐断裂带重新活动发生左行平移,这些均表明古太平洋板块于早中侏罗世开始俯冲(Xu *et al.*, 2013; 郭峰, 2016; Zhou and Li, 2017; 周建波等, 2018; 朱光等, 2018)。

辽西地区侏罗纪花岗质侵入岩是华北克拉通东部中生代岩浆岩带重要组成部分,因其与杨家杖子矽卡岩型钼矿等大规模金属矿产的形成密切相关而一直备受关注,但已有研究工作大多仅集中在确定岩石组合与形成时代(吴福元等, 2006; 代军治等, 2008; 赵玉妹, 2012; 李健等, 2014; Liang *et al.*, 2015),因此有必要进行岩石地球化学特征、岩浆来

源、岩石成因、构造背景等多方面综合研究。同时,前文述及的关于古太平洋俯冲作用的证据大多来自东北和华南地区且主要集中在与俯冲有关的岩浆岩方面,华北克拉通东部是否同样存在着岩浆作用的响应?古太平洋板块对华北克拉通东部俯冲作用开始于何时?针对以上问题,本文对华北克拉通东部辽西兴城地区药王庙-磨盘山岩体的花岗质岩石进行了锆石 U-Pb 同位素年代学、岩石地球化学、锆石原位 Hf 同位素等多方面综合研究,意在查明岩浆源区性质与岩石成因,并结合区域研究资料探讨岩浆活动与古太平洋俯冲作用的成因联系,限定古太平洋对华北克拉通东部俯冲作用的起始时间。

1 地质背景

辽西地区位于华北克拉通北缘东段(图 1a),经历了漫长的地质演化过程。古老结晶基底形成于太古宙,出露于东北部葫芦岛和西南部台里地区,主要为含有变质表壳岩系包体的片麻状花岗岩;中新元古代沉积长城系-蓟县系-青白口系巨厚地台型海相沉积盖层,同时发生强烈大陆裂谷作用形成古老隆起(山海关隆起)和裂陷槽(燕山裂陷槽)相间分布的构造格局并导致一定程度的裂谷岩浆作用;古生代期间处于稳定沉积环境,沉积建造发育而构造-岩浆活动极其微弱,形成了巨厚的古生界寒武系-奥陶系-石炭系沉积地层,但缺少同时期的构造行迹与岩浆岩;中生代地壳重新活化,发生燕山运动造成强烈的构造-岩浆活动,区内北东-北北东向断裂构造和中小型断陷盆地发育,广泛分布三叠系红坨子组、侏罗系海房沟组-髫髻山组-土城子组、白垩系义县组等中生界火山-碎屑岩地层,同时大面积出露中生代花岗质岩石;新生代以整体隆升剥蚀为主,风化剥蚀作用强烈,局部发育第四系和现代海岸带沉积。

辽西兴城地区发育新太古代、印支期和燕山期 3 期岩浆活动事件,中生代岩浆岩出露面积约占总面积的 55%,其中侵入岩主要呈北东向分布在中部和东南部(图 1b)。岩相学研究显示,辽西兴城地区中生代侵入岩主要为花岗质岩石,同位素定年结果表明岩石形成于晚三叠世、侏罗纪和早白垩世这 3 个时期(吴福元等, 2006; 代军治等, 2008; 赵玉妹, 2012; 李健等, 2014; Liang *et al.*, 2015; 崔芳华等, 2020),其中出露面积最广的侏罗纪侵入岩整体呈北东或北东东向展布,自东南向西北在宽邦-药王庙-

磨盘山、杨家杖子-兰家沟-虹螺山等地分布有早中侏罗世花岗质岩石,而区内偏东部的碱长-英昌口等地分布有晚侏罗世花岗质岩石(图 1b)。

2 岩相学特征

药王庙-磨盘山岩体位于辽西兴城地区中略偏西北部,大致呈北东向展布,出露面积约 360 km²,呈岩基产出,岩体大多与太古宙结晶基底、元古界雾迷山组-景儿峪组、古生界张夏组-马家沟组-太原组、中生界红坨子组等沉积地层呈侵入接触,局部被后期晚侏罗世花岗质岩体侵入(图 1c),采样位置详见图 1c。野外及室内岩相学研究表明,药王庙-磨盘山岩体主要岩石类型有石英二长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩,岩石整体呈中细粒-中粗粒结晶结构、块状构造(图 2)。

石英二长岩手标本(样号 WH1030)呈灰色,主要由石英(约 15%)、碱性长石(约 35%)、斜长石(约 45%)等矿物组成,碱性长石以具有条纹结构的条纹长石为主且含量略少于斜长石。花岗闪长岩(样号 WH1032)手标本呈灰白色,石英含量约 20%,斜长石含量(55%)明显多于碱性长石(15%)。二长花岗岩手标本(样号 WH1033、WH1049、STWH1050)呈浅灰色(图 2a),石英含量 20%~30%,碱性长石(25%~40%)与斜长石含量(35%~40%)相当或略少于斜长石,斜长石发生轻微高岭土化和绢云母化(图 2b),岩石中见有少量浑圆状细粒暗色包体(图 2a),包体颜色明显深于岩体,二者接触边界截然且清晰,呈浑圆状,大小约 15 cm,具有细粒结晶结构,主要由半自形-自形的斜长石和角闪石组成。正长花岗岩手标本(STTW.5)呈肉红色(图 2c),石英含量约 20%,条纹长石含量(55%)明显大于斜长石(20%),条纹长石发生轻微高岭土化,少量黑云母大多完全蚀变为绿泥石而保留片状假像(图 2d)。上述岩石中均存在少量黑云母(<5%)、角闪石(<5%)及磁铁矿、榍石、锆石等副矿物。

3 分析方法

3.1 锆石 U-Pb 同位素定年

在河北廊坊区域地质调查所实验室进行了样品粉碎、单矿物挑选、锆石制靶工作。岩石样品洗净晾干后经机械粉碎至 80~100 目并运用淘选、重选、磁

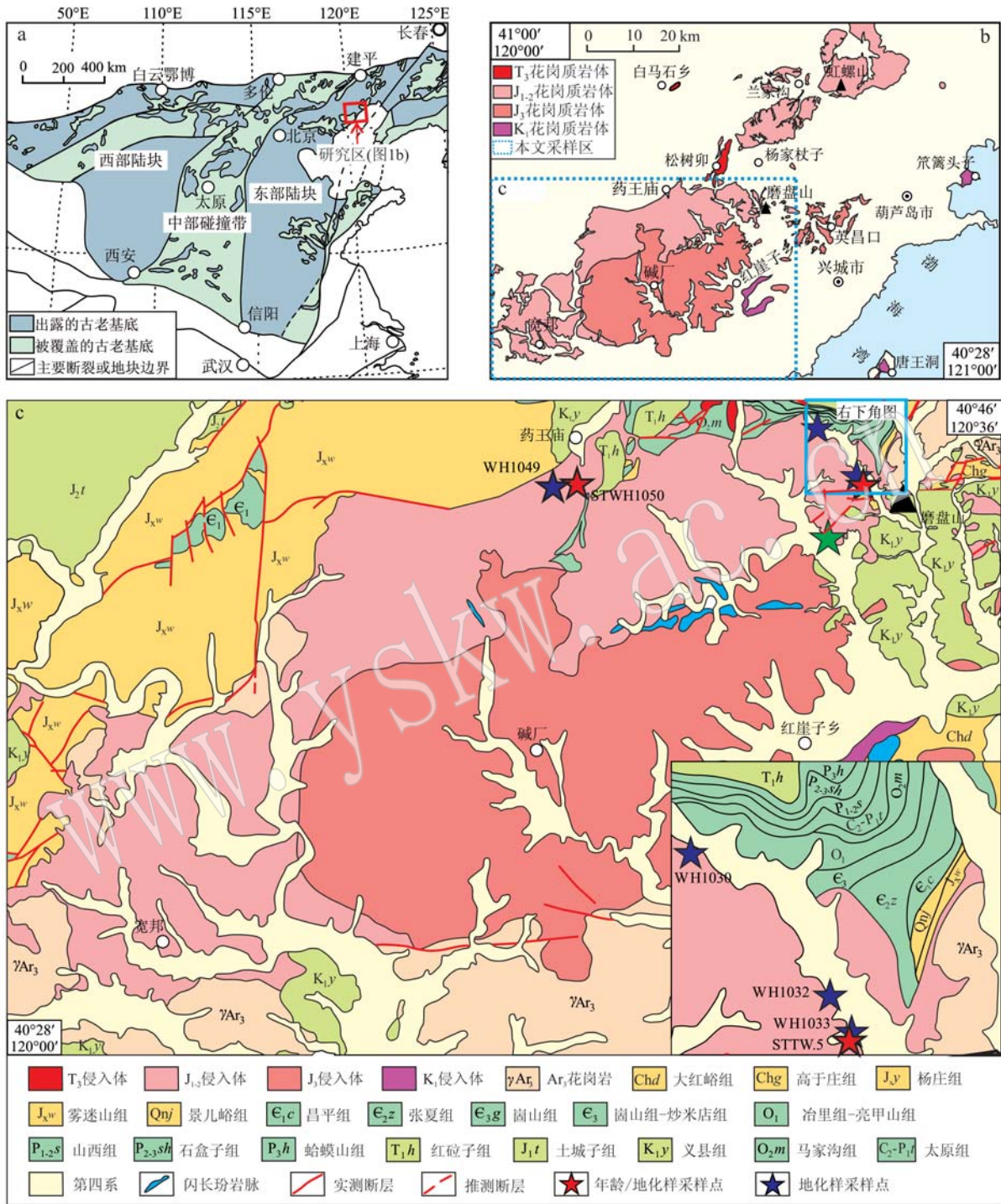


图 1 华北克拉通大地构造简图及研究区位置 [a, 据赵国春 (2009) 修改]、辽西兴城地区中生代花岗质岩石分布 (b) 及研究区地质简图 (c)

Fig. 1 Simplified tectonic map of North China Craton and tectonic location of the study area (a, modified after Zhao Guochun, 2009), the distribution of Mesozoic granitoids (b) and simplified geological map (c) of the study area in Xingcheng area, western Liaoning Province

选等方法分离出锆石并进行手工挑选, 将 100~150 粒透明度相对高、包裹体相对少的锆石颗粒制成环氧树脂靶, 锆石颗粒经打磨至露出中心后进行抛光,

采集阴极发光 (CL) 图像。锆石透反射光图像在吉林大学地球科学学院深部探测野外实验与示范基地实验室采集完成。样品 STTW. 5 的锆石 U-Pb 同位

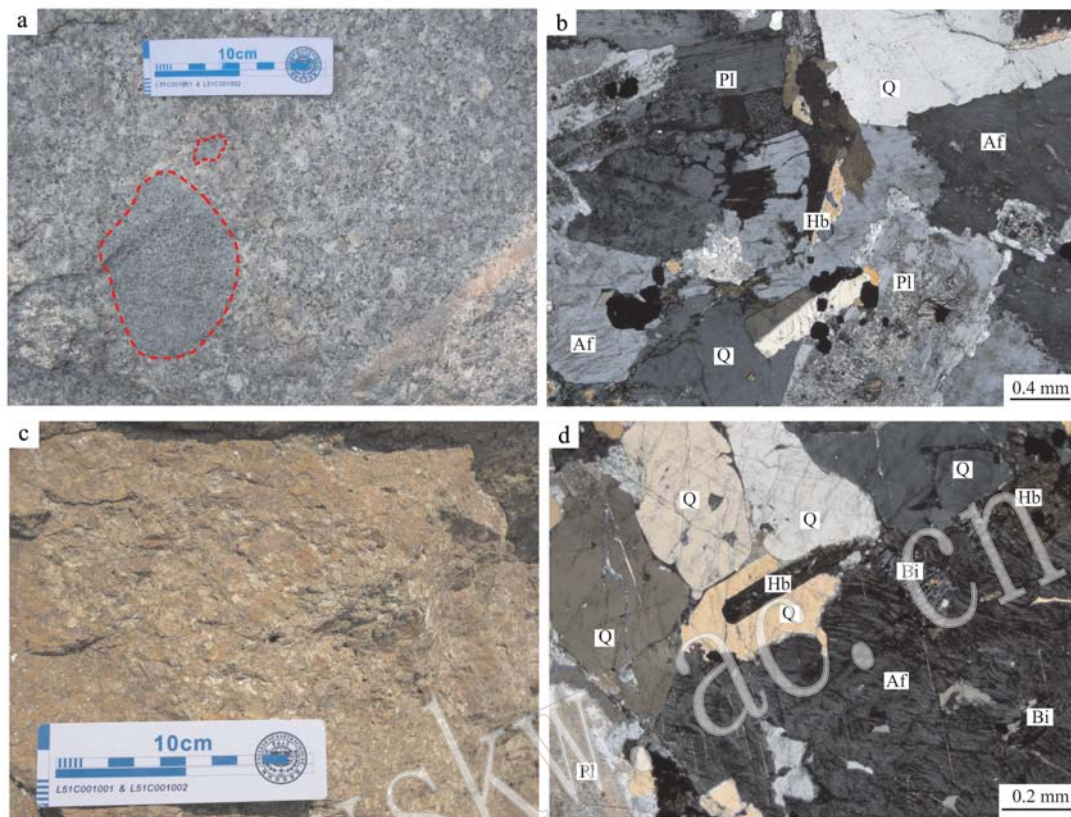


图2 药王庙-磨盘山岩体花岗质岩石野外露头及正交偏光显微照片

Fig. 2 Field outcrops and photomicrographs under crossed nicols of Yaowangmiao-Mopan Mountain granitoids

a, b—二长花岗岩; c, d—正长花岗岩; Q—石英; Pl—斜长石; Af—碱性长石; Hb—角闪石; Bi—黑云母
a and b—quartz monzonite; c and d—monzogranite; Q—quartz; Pl—plagioclase; Af—alkali feldspar; Hb—hornblende; Bi—biotite

素定年在天津地质矿产研究所实验测试中心完成, 仪器有 UP193-FXArF 准分子激光器、Neptune 型质谱仪, 193 nm 激光器能量密度为 $10 \sim 11 \text{ J/cm}^2$, 剥蚀频率为 $8 \sim 10 \text{ Hz}$, 束斑直径 $35 \mu\text{m}$, 剥蚀深度 $20 \sim 40 \mu\text{m}$, 采用 TEMORA、GJ-1 等外部锆石年龄标准校正 U-Pb 同位素分馏并以 NISTSRM610 玻璃标样为外标计算 Th、U、Pb 含量, 采用 ^{208}Pb 校正普通铅, 数据处理、图件绘制程序分别采用 ICPMSDataCal、Isoplot (Ludwig, 2003)。样品 STWH1050 的锆石 U-Pb 同位素定年在吉林大学测试科学实验中心完成, 所用仪器有 193-ArF 准分子激光器、7500A 型质谱仪, 193 nm 激光器能量密度为 10 J/cm^2 , 剥蚀频率为 7 Hz , 束斑直径 $32 \mu\text{m}$, 采用 91500、GJ-1 等外部锆石年龄标准校正 U-Pb 同位素分馏并以 NIST610 玻璃标样为外标计算 Th、U、Pb 含量, 采用 ^{208}Pb 校正普通铅, 数据处理、图件绘制程序分别采用 Glitter、Isoplot (Ludwig, 2003)。

3.2 全岩主、微量测试分析

样品 STTW.5 的主、微量测试分析工作在自然

资源部哈尔滨矿产资源监督检测中心完成, 主量元素测试分析依据 DZG20.01-2011 方法进行, 仪器为电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES); 稀土、微量元素测试分析依据 GB/T17417.1-2010 方法进行, 仪器为电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS)。WH1049、STWH1050、WH1030、WH1032、WH1033 等 5 件样品的主、微量测试分析工作在天津地质矿产研究所实验测试中心完成, 主量元素分析仪器为 X 射线荧光光谱仪 (XRF); 稀土、微量元素分析仪器为 X Series II 离子体质谱仪并以 GHJZ002-2009、GHJZ003-2009、GB/T 14506-2010 为检测依据。

3.3 锆石原位 Lu-Hf 同位素测试分析

STWH1050 和 STTW.5 等 2 件样品的锆石原位 Lu-Hf 同位素测试分析工作在天津地质矿产研究所实验测试中心完成, 仪器有 UP193-FXArF 准分子激光器、Neptune 型质谱仪, 193 nm 激光器能量密度为 $10 \sim 11 \text{ J/cm}^2$, 剥蚀频率为 $8 \sim 10 \text{ Hz}$, 束斑直径 $50 \mu\text{m}$, 具体测试方法、流程、标样、校正方法详见耿建

珍等(2011),参照吴福元等(2007)中的计算公式、参数、方法进行 Hf 同位素计算。

4 测试分析结果

4.1 锆石 U-Pb 同位素年代学

本文对采自药王庙-磨盘山岩体的二长花岗岩(STWH1050)和正长花岗岩(STTW.5)2件样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年,测试结果详见表 1。样品中锆石颗粒多呈自形柱状,阴极发光(CL)图像显示均具有清晰的内部结构并发育岩浆振荡环带(图 3),结合其 Th/U 值大多介于 0.53~1.78 之间,说明锆石为岩浆成因。样品 STWH1050 中 25 个测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 189~183 Ma 之间且在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图中均落在谐和线上或附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 186 ± 2 Ma (MSWD=0.12, $n=25$) (图 4a); 样品 STTW.5 中除 1 颗早期捕获锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 242 Ma 外,其余 23 个测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 198~188 Ma 之间且在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图中均落在谐和线上或附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 193 ± 1 Ma (MSWD=3.30, $n=23$) (图 4b)。

吴福元等(2006)曾对研究区内磨盘山-头道沟附近似斑状花岗闪长岩、细粒花岗岩进行过锆石 U-Pb 定年,结果介于 190~185 Ma 之间,而本文药王庙-磨盘山岩体石英闪长岩、正长花岗岩结晶年龄为 193~186 Ma,表明辽西兴城地区药王庙-磨盘山花岗质岩体侵位于早侏罗世。

4.2 岩石地球化学

本文对药王庙-磨盘山岩体中 6 件花岗质岩石样品进行了全岩主、微量测试分析,测试结果详见表 2。

4.2.1 主量元素

药王庙-磨盘山花岗质岩石的 SiO_2 、 TiO_2 、 FeO^T 、 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 含量分别为 61.55%~68.09%、0.39%~0.91%、2.52%~5.13%、1.89%~3.34%、0.70%~1.73%、14.72%~16.99%, $\text{Mg}^\#$ 值介于 32.80~38.11, A/NK 和 A/CNK 值分别介于 1.20~1.44 和 0.91~1.03 之间,显示准铝-弱过铝特征; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (全碱) 含量为 7.87%~9.81% 且 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, AR (碱度率) 为 2.50~3.39, σ (里特曼指数) 为 2.48~4.24, 分异指数较高 ($\text{DI}=74.37\sim 83.71$), 在 TAS 图解中落入亚碱性或碱性向亚碱性过渡区域(图

5a), 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中大多落入高钾钙碱性系列(图 5b), 个别落入钾玄岩系列。在 TAS 分类图解中, 样品大多落在石英二长岩或向花岗岩过渡区域(图 5a), 岩石化学与岩相学分类结果相一致。

4.2.2 稀土、微量元素

药王庙-磨盘山花岗质岩石稀土元素总量中等略偏高 ($\sum \text{REE}=96.86\times 10^{-6}\sim 200.41\times 10^{-6}$), 稀土元素球粒陨石标准化图解中配分模式整体为右倾型(图 6a), 轻重稀土元素分馏现象明显 [$\text{LREE}/\text{HREE}=8.25\sim 15.34$, $(\text{La}/\text{Yb})_N=6.59\sim 22.72$], 富集轻稀土元素而亏损重稀土元素 ($\text{LREE}=86.39\times 10^{-6}\sim 183.19\times 10^{-6}$, $\text{HREE}=8.87\times 10^{-6}\sim 17.22\times 10^{-6}$); 轻稀土元素内部分馏较强而重稀土元素内部分馏较弱 [$(\text{La}/\text{Sm})_N=3.00\sim 7.14$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=1.24\sim 2.62$]; δEu 介于 0.95~1.12 之间, Eu 异常不明显或略具弱正异常。原始地幔标准化微量元素蛛网图中呈现多峰谷 M 型模式(图 6b), 明显富集大离子亲石元素(LILE) K、Pb 且微弱富集 Ba、Sr 等, 而相对亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSE) 和 P 元素。

4.2.3 锆石原位 Lu-Hf 同位素组成

药王庙-磨盘山花岗质岩石锆石 Hf 同位素测试分析结果见表 3。由表 3 可见, 药王庙-磨盘山花岗质岩石具有较为富集的 Hf 同位素组成和古老的 Hf 同位素二阶段模式年龄。二长花岗岩(STWH1050) 中 17 颗岩浆锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 307~0.282 453, $\varepsilon\text{Hf}(t)=-12.51\sim -7.39$ ($t=186$ Ma), 二阶段模式年龄 $t_{\text{DM}2}=2\ 022\sim 1\ 698$ Ma; 正长花岗岩(STTW.5) 20 颗岩浆锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 291~0.282 435, $\varepsilon\text{Hf}(t)=-12.94\sim -7.82$ ($t=194$ Ma), 二阶段模式年龄 $t_{\text{DM}2}=2\ 054\sim 1\ 730$ Ma。

5 讨论

5.1 岩浆源区性质与岩石成因

辽西药王庙-磨盘山早侏罗世花岗质侵入岩体岩石组合为石英二长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩, 岩石具有高全碱含量 ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=7.87\%\sim 9.81\%$), $\text{A}/\text{CNK}<1.1$, $\text{A}/\text{NK}>1.0$, 准铝-弱过铝质等, 这些岩石地球化学特征暗示其可能属于 A 型或 I 型花岗岩 (Wu *et al.*, 2003), 而在花岗质岩石成因类型判别图解中本文样品和冀东同时代侵入岩大多落入 I 型区域内(图 7), 因此应属于 I

表 1 辽西兴城地区药王庙-磨盘山花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年分析结果
 Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of Yaowangmiao-Mopan Mountain granitoids in Xingcheng area, western Liaoning Province

样品号及点号	$^{10^{-6}}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ		
STWH1050-1	91	79	1.14	0.029 4	0.000 8	0.202 2	0.024 1	0.049 9	0.006 1	187	5	187	20	191	260
STWH1050-2	76	64	1.19	0.029 5	0.000 7	0.201 9	0.022 6	0.049 7	0.005 7	187	4	187	19	182	245
STWH1050-3	51	52	0.99	0.029 4	0.000 7	0.201 4	0.024 6	0.049 8	0.006 2	187	4	186	21	183	265
STWH1050-4	98	66	1.49	0.029 4	0.000 8	0.203 1	0.026 8	0.050 1	0.006 7	187	5	188	23	201	284
STWH1050-5	126	80	1.57	0.029 5	0.000 7	0.202 5	0.021 0	0.049 8	0.005 3	187	4	187	18	187	229
STWH1050-6	67	58	1.15	0.029 1	0.000 7	0.200 2	0.022 1	0.049 9	0.005 6	185	4	185	19	190	242
STWH1050-7	92	58	1.58	0.028 9	0.000 7	0.200 8	0.024 6	0.050 5	0.006 3	183	5	186	21	217	265
STWH1050-8	57	54	1.07	0.029 6	0.000 9	0.202 7	0.031 8	0.049 7	0.007 9	188	6	187	27	182	334
STWH1050-9	96	84	1.15	0.029 4	0.000 7	0.202 5	0.021 1	0.049 9	0.005 3	187	5	187	18	192	230
STWH1050-10	46	46	1.00	0.029 7	0.000 9	0.204 1	0.035 2	0.049 9	0.008 7	188	5	189	30	190	362
STWH1050-11	708	234	3.03	0.028 8	0.000 6	0.198 4	0.014 2	0.050 0	0.003 7	183	4	184	12	195	163
STWH1050-12	74	67	1.10	0.028 8	0.000 7	0.198 6	0.024 2	0.049 9	0.006 2	183	5	184	21	192	265
STWH1050-13	100	88	1.13	0.029 4	0.000 6	0.201 8	0.015 5	0.049 8	0.003 9	187	4	187	13	186	173
STWH1050-14	58	53	1.11	0.029 5	0.000 7	0.202 8	0.021 8	0.049 8	0.005 4	188	4	188	18	187	236
STWH1050-15	133	87	1.54	0.029 2	0.001 0	0.199 5	0.032 7	0.049 6	0.008 3	185	6	185	28	177	349
STWH1050-16	64	57	1.14	0.029 8	0.000 9	0.202 4	0.030 0	0.049 3	0.007 4	189	6	187	25	162	318
STWH1050-17	55	52	1.07	0.029 3	0.001 0	0.202 3	0.035 2	0.050 0	0.008 8	186	6	187	30	197	366
STWH1050-18	108	86	1.26	0.029 5	0.000 6	0.202 3	0.016 8	0.049 7	0.004 2	188	4	187	14	182	187
STWH1050-19	395	127	3.12	0.029 4	0.000 7	0.201 9	0.017 7	0.049 8	0.004 5	187	4	187	15	186	196
STWH1050-20	114	91	1.26	0.029 5	0.001 0	0.202 0	0.030 2	0.049 7	0.007 6	187	6	187	25	183	320
STWH1050-21	55	52	1.06	0.029 3	0.000 9	0.200 1	0.030 7	0.049 6	0.007 7	186	6	185	26	175	327
STWH1050-22	65	73	0.89	0.029 3	0.000 6	0.201 8	0.016 3	0.050 0	0.004 1	186	4	187	14	195	180
STWH1050-23	80	72	1.10	0.029 4	0.000 7	0.202 2	0.019 0	0.049 8	0.004 8	187	4	187	16	187	209
STWH1050-24	53	54	0.98	0.029 5	0.000 7	0.201 1	0.020 9	0.049 4	0.005 2	188	4	186	18	166	230
STWH1050-25	63	67	0.93	0.029 2	0.001 0	0.200 4	0.032 8	0.049 9	0.008 3	185	6	186	28	189	347

续表 1
Continued Table 1

样品号及点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		1σ	
				1σ		1σ	1σ		1σ	1σ		1σ	1σ		1σ
STTW. 5-1	177	273	0.65	0.030 0	0.000 2	0.207 6	0.013 2	0.050 2	0.003 2	191	1	192	12	203	147
STTW. 5-2	157	212	0.74	0.030 1	0.000 2	0.244 8	0.015 0	0.058 9	0.003 6	191	1	222	14	563	132
STTW. 5-3	145	239	0.61	0.030 6	0.000 3	0.210 5	0.027 4	0.049 9	0.006 5	194	2	194	25	192	301
STTW. 5-4	211	347	0.61	0.031 0	0.000 2	0.213 0	0.007 6	0.049 9	0.001 8	197	1	196	7	191	82
STTW. 5-5	198	240	0.82	0.030 8	0.000 2	0.213 1	0.014 6	0.050 3	0.003 4	195	1	196	13	207	157
STTW. 5-6	170	322	0.53	0.038 3	0.000 3	0.591 8	0.011 2	0.112 1	0.001 7	242	2	472	9	1833	28
STTW. 5-7	126	195	0.65	0.030 1	0.000 2	0.212 4	0.017 5	0.051 1	0.004 2	191	1	196	16	245	191
STTW. 5-8	116	202	0.58	0.029 6	0.000 2	0.206 7	0.024 9	0.050 7	0.006 3	188	1	191	23	228	285
STTW. 5-9	148	256	0.58	0.029 6	0.000 3	0.251 9	0.021 9	0.061 8	0.005 4	188	2	228	20	666	186
STTW. 5-10	164	265	0.62	0.031 1	0.000 2	0.211 1	0.021 4	0.049 3	0.005 0	197	1	194	20	161	235
STTW. 5-11	159	233	0.68	0.030 2	0.000 3	0.218 6	0.019 7	0.052 5	0.004 7	192	2	201	18	308	202
STTW. 5-12	255	309	0.82	0.031 2	0.000 2	0.297 9	0.013 6	0.069 3	0.003 1	198	1	265	12	908	93
STTW. 5-13	653	479	1.36	0.029 8	0.000 2	0.196 3	0.009 1	0.047 7	0.002 2	189	1	182	8	87	107
STTW. 5-14	181	306	0.59	0.031 0	0.000 3	0.240 4	0.018 5	0.056 3	0.004 2	197	2	219	17	462	164
STTW. 5-15	111	195	0.57	0.029 6	0.000 3	0.243 5	0.032 7	0.059 7	0.008 1	188	2	221	30	594	292
STTW. 5-16	392	434	0.90	0.030 1	0.000 2	0.213 9	0.007 1	0.051 6	0.001 7	191	1	197	6	267	75
STTW. 5-17	124	233	0.53	0.030 5	0.000 2	0.209 2	0.018 0	0.049 7	0.004 3	194	1	193	17	183	201
STTW. 5-18	158	239	0.66	0.030 0	0.000 2	0.225 0	0.013 9	0.054 3	0.003 3	191	1	206	13	385	137
STTW. 5-19	10	165	0.06	0.030 6	0.000 2	0.321 7	0.024 3	0.076 3	0.005 7	194	2	283	21	1104	149
STTW. 5-20	146	242	0.60	0.030 0	0.000 2	0.259 5	0.018 5	0.062 7	0.004 5	191	1	234	17	699	151
STTW. 5-21	192	287	0.67	0.030 6	0.000 2	0.296 4	0.012 5	0.070 3	0.002 9	194	1	264	11	938	86
STTW. 5-22	116	193	0.60	0.030 4	0.000 2	0.213 7	0.020 8	0.051 0	0.004 9	193	1	197	19	242	222
STTW. 5-23	95	157	0.60	0.030 4	0.000 2	0.213 8	0.013 9	0.051 0	0.003 2	193	2	197	13	240	146
STTW. 5-24	111	187	0.59	0.030 3	0.000 2	0.243 9	0.017 3	0.058 3	0.004 1	193	1	222	16	541	154

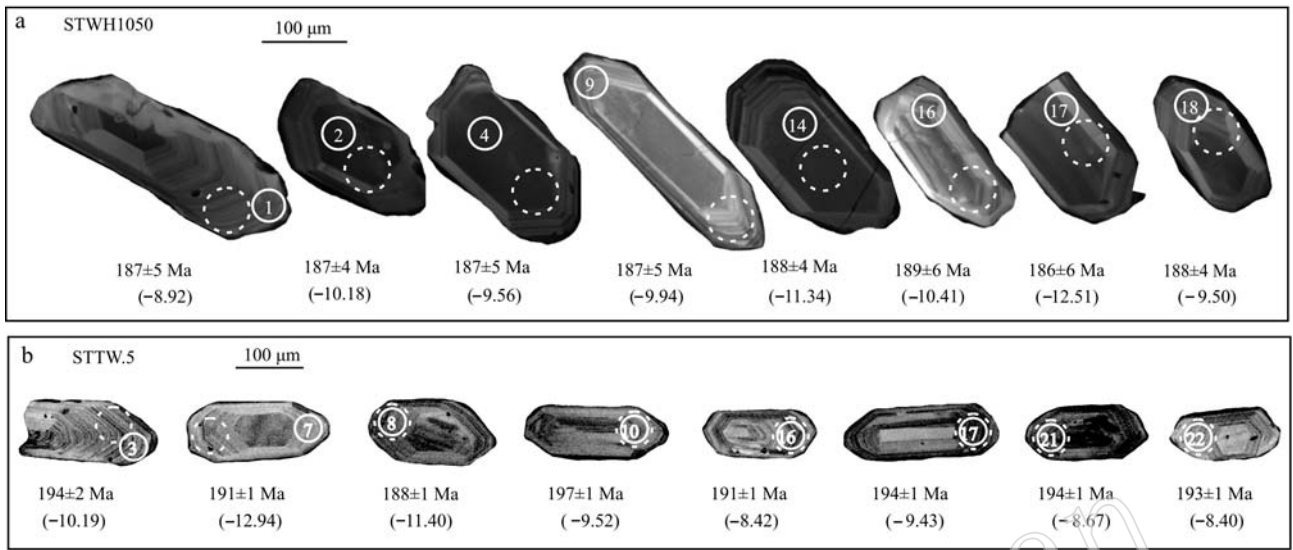


图 3 药王庙-磨盘山花岗岩岩石部分锆石阴极发光 (CL) 图像

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of zircon grains of Yaowangmiao-Mopan Mountain granitoids

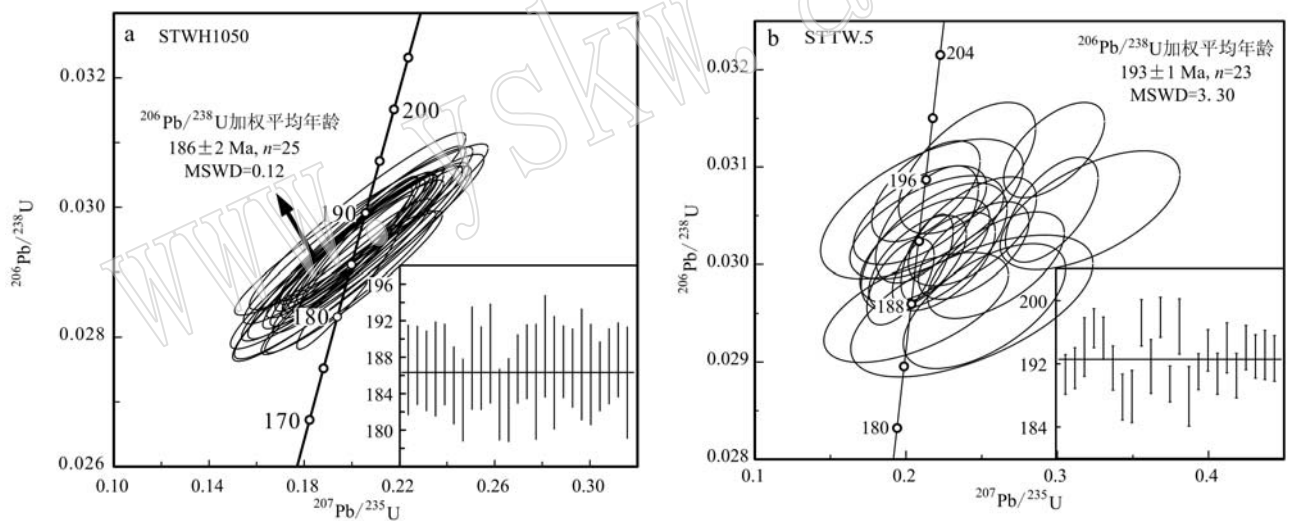


图 4 药王庙-磨盘山花岗岩岩石锆石 U-Pb 年龄谐和图及加权平均年龄

Fig. 4 LA-ICP-MS magmatic zircon U-Pb concordia diagrams and dating results of the Yaowangmiao-Mopan Mountain granitoids

型花岗岩。岩石具有稀土元素总量中等略偏高、富集轻稀土元素而亏损重稀土元素、轻重稀土元素明显分馏的特征,同时明显富集 K、Pb 等大离子亲石元素而相对亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 等(图 6),暗示岩浆可能来源于地壳。在 $MgO - SiO_2$ 和 $Mg^\# - SiO_2$ 图解中岩石样品大多落入大陆下地壳部分熔融区域(图 8);二长花岗岩和正长花岗岩中岩浆成因锆石具有相对富集的 $\epsilon Hf(t)$ 值(-12.94 ~ -7.39)和古老的 Hf 同位素二阶段模式年龄($t_{DM2} = 2054 \sim 1698$ Ma),在 $\epsilon Hf(t) - t$ 图解中样品落在 1.8 Ga 地壳演化

线附近,而在 $^{176}Hf/^{177}Hf - t$ 图解中落在下地壳演化线附近(图 9),均表明其岩石初始岩浆来源于古老地壳。区域资料显示,出露于华北克拉通东部的鲁西铜石岩体早侏罗世(185 ~ 180 Ma)正长斑岩具有高 $\epsilon Nd(t)$ 值(-0.8 ~ +1.5)和 $\epsilon Hf(t)$ 值(-4.4 ~ +4.8),且其初始岩浆来源于软流圈地幔(Lan *et al.*, 2012),暗示早侏罗世华北克拉通东部存在着软流圈地幔物质的活动。相关研究表明,相较于壳源岩浆,幔源岩浆具有更多的放射成因 Hf, Hf 同位素组成的相对不均一可能暗示发生了一定程度的壳

表2 辽西兴城地区药王庙-磨盘山花岗质岩石主量元素 ($w_B/\%$)、微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 测试分析结果Table 2 Major ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) compositions for Yaowangmiao-Mopan Mountain granitoids in Xingcheng area, western Liaoning Province

样品号	WH1030	WH1032	WH1033	WH1049	STWH1050	STTW. 5
岩性	黑云角闪石英二长岩	花岗闪长岩	二长花岗岩	黑云角闪二长花岗岩	二长花岗岩	正长花岗岩
SiO ₂	61.55	68.09	66.67	65.50	65.44	67.52
TiO ₂	0.91	0.46	0.42	0.53	0.53	0.39
Al ₂ O ₃	16.73	14.96	14.72	16.13	16.99	15.91
Fe ₂ O ₃	2.49	1.41	1.54	1.57	2.06	1.55
FeO	2.83	2.09	1.50	2.10	1.38	1.07
CaO	3.34	2.34	2.41	1.89	2.12	2.45
MgO	1.73	1.16	0.79	1.08	1.01	0.70
MnO	0.15	0.09	0.08	0.15	0.11	0.05
K ₂ O	3.71	4.04	3.66	4.89	4.36	3.41
Na ₂ O	5.07	4.20	4.57	4.92	5.25	4.46
P ₂ O ₅	0.39	0.20	0.17	0.21	0.20	0.14
LOI	0.95	1.05	3.95	1.05	0.70	2.14
Total	99.85	100.09	100.48	100.02	100.15	99.79
FeO ^T	5.13	3.39	2.99	3.55	3.25	2.52
Na ₂ O+K ₂ O	8.78	8.24	8.23	9.81	9.61	7.87
Mg [#]	37.82	38.11	32.80	35.40	35.77	33.60
AR	2.56	2.82	2.85	3.39	3.02	2.50
σ	4.10	2.69	2.79	4.24	4.09	2.48
A/NK	1.35	1.33	1.28	1.20	1.27	1.44
A/CNK	0.91	0.96	0.93	0.96	0.99	1.03
DI	74.37	81.32	83.22	83.71	82.87	81.96
La	37.70	21.10	39.40	17.30	25.70	46.23
Ce	88.70	48.60	72.20	40.30	44.80	79.82
Pr	10.00	4.76	7.04	4.89	6.07	8.30
Nd	38.20	17.10	23.10	19.10	22.30	29.37
Sm	6.69	3.00	3.47	3.63	3.88	4.30
Eu	1.90	0.93	0.99	1.17	1.21	1.35
Gd	5.27	2.46	2.93	2.83	3.33	4.45
Tb	0.82	0.38	0.43	0.46	0.51	0.50
Dy	4.58	2.22	2.41	2.78	2.76	2.39
Ho	0.89	0.44	0.46	0.54	0.56	0.45
Er	2.45	1.30	1.36	1.54	1.65	1.47
Tm	0.37	0.21	0.22	0.25	0.26	0.20
Yb	2.45	1.60	1.56	1.77	1.81	1.37
Lu	0.39	0.26	0.26	0.30	0.32	0.21
Y	22.20	12.20	12.20	13.60	15.00	12.61
La/Yb	15.39	13.19	25.26	9.77	14.20	33.70
ΣREE	200.41	104.36	155.83	96.86	115.16	180.41
LREE	183.19	95.49	146.20	86.39	103.96	169.37
HREE	17.22	8.87	9.63	10.47	11.20	11.04
LREE/HREE	10.64	10.77	15.18	8.25	9.28	15.34
(La/Yb) _N	10.37	8.89	17.03	6.59	9.57	22.72
(La/Sm) _N	3.54	4.42	7.14	3.00	4.17	6.77
(Gd/Yb) _N	1.74	1.24	1.52	1.29	1.48	2.62
δEu	0.98	1.05	0.95	1.12	1.03	0.95
Cu	11.70	5.78	10.00	12.70	10.60	3.70
Pb	24.60	10.40	8.99	22.50	29.00	12.70
Zn	53.70	19.20	20.60	40.30	77.10	28.20
Cr	8.09	6.08	8.01	5.47	6.28	5.70

续表 2

Continued Table 2

样品号	WH1030	WH1032	WH1033	WH1049	STWH1050	STTW. 5
岩性	黑云角闪石英二长岩	花岗闪长岩	二长花岗岩	黑云角闪二长花岗岩	二长花岗岩	正长花岗岩
Ni	3.96	4.82	5.95	4.01	2.38	-
Co	7.85	6.26	5.56	4.34	4.67	-
Rb	71.10	93.00	83.50	96.50	89.00	84.00
Cs	1.94	2.32	4.65	2.95	-	-
Sr	565.00	423.00	484.00	396.00	434.00	563.00
Ba	1 170.00	787.00	758.00	1 040.00	1 180.00	873.00
V	72.10	48.70	40.90	42.10	42.50	-
Sc	9.50	7.40	7.20	3.20	10.60	-
Nb	13.80	10.60	9.11	14.00	16.20	10.30
Ta	0.84	1.10	0.89	1.05	0.94	0.79
Zr	189.00	161.00	150.00	243.00	296.00	122.00
Hf	4.70	4.60	4.32	6.39	7.18	1.90
Ga	18.00	14.60	14.90	16.30	17.20	-
U	0.78	0.80	0.88	0.80	0.99	1.21
Th	5.62	5.80	6.36	4.13	4.44	5.05
Sr/Y	25.45	34.67	39.67	29.12	28.93	44.65

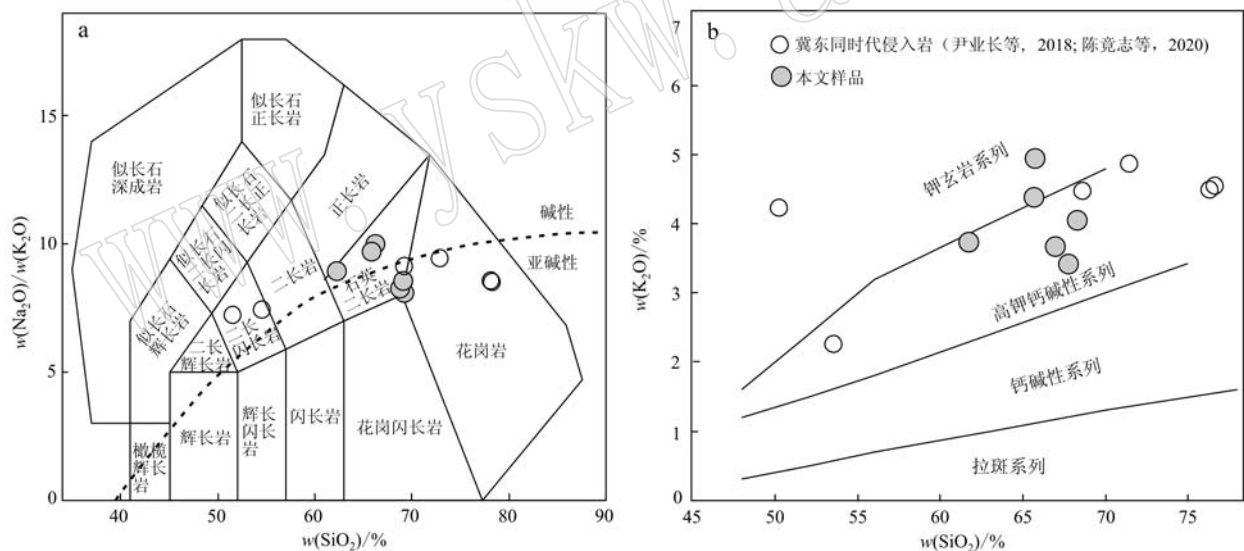


图 5 冀东-辽西地区早侏罗世侵入岩 TAS 图解(a, 据 Irvine and Baragar, 1971) 和 $K_2O - SiO_2$ 图解 (b, 据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 5 TAS (a, modified after Irvine and Baragar, 1971) and $K_2O - SiO_2$ (b, modified after Peccerillo and Taylor, 1976) diagrams of the intruded rocks in east Hebei Province and west Liaoning Province

幔岩浆相互作用 (Bolhar *et al.*, 2008)。辽西药王庙-磨盘山早侏罗世花岗岩质岩石中岩浆成因锆石具有相对不均一的 Hf 同位素组成 [$\epsilon Hf(t) = -12.94 \sim -7.39$], 岩石中见有少量细粒闪长质暗色包体 (图 2a), 包体呈浑圆状, 具流线形轮廓, 显示塑性流变特征, 同时具有细粒结晶结构 (典型岩浆岩结构), 表明其更可能由岩浆混合作用形成而非部分熔融残留体

(Vernon, 1984; 陈检生, 2013), 这些都说明辽西早侏罗世花岗岩质岩石岩浆起源与演化过程中可能有幔源物质的参与。由于华北克拉通地壳中 Nb、Ta、Ti 含量较低 (Gao, 1998), 本文岩石样品亏损 Nb、Ta、Ti 的特征可能继承自岩浆源区, 岩石又具有较高的分异指数 ($DI = 74.37 \sim 83.71$) 且强烈亏损 P 元素, 暗示在其岩浆演化过程中也可能存在富钛矿物 (金

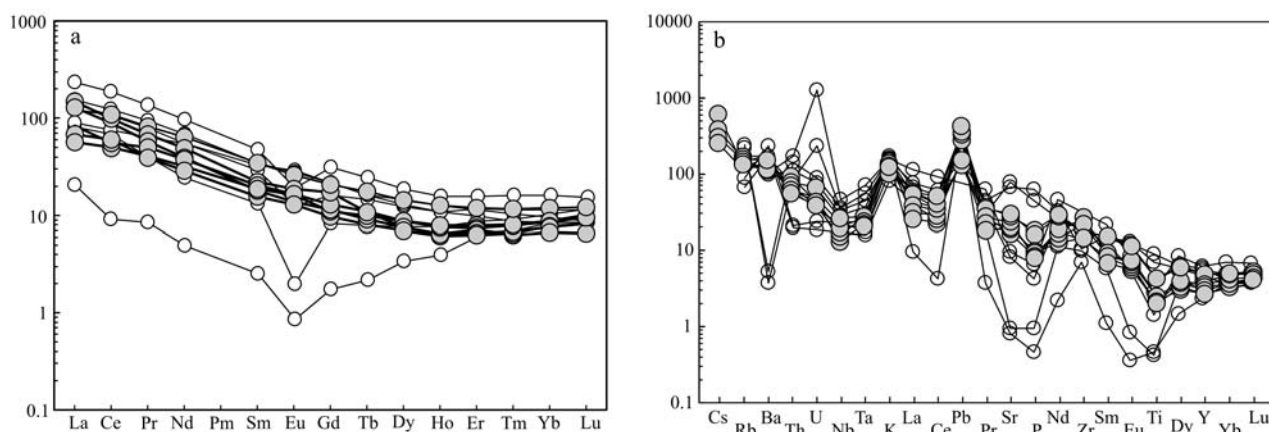


图6 冀东-辽西地区早侏罗世侵入岩稀土元素球粒陨石标准化图解(a, 球粒陨石标准化值据 Boynton, 1984)

和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, 原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)(图例同图5)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE diagram (a, chondrite-normalized values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (b, primitive mantle-normalized values after Sun and McDonough, 1989) of the intruded rocks in east Hebei Province and west Liaoning Province (legends as for Fig. 5)

表3 辽西兴城地区药王庙-磨盘山花岗质岩石锆石 Hf 同位素测试分析结果

Table 3 Zircon Hf isotopic data for Yaowangmiao-Mopan Mountain granitoids in Xingcheng area, western Liaoning Province

样品号及点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	2σ	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
STWH1050-1	186	0.051 175	0.001 503	0.282 409	0.000 022	-8.92	0.78	1 206	1 795	-0.95
STWH1050-2	186	0.052 796	0.001 415	0.282 374	0.000 023	-10.18	0.80	1 254	1 875	-0.96
STWH1050-3	186	0.038 892	0.001 050	0.282 323	0.000 024	-11.91	0.85	1 313	1 984	-0.97
STWH1050-4	186	0.065 690	0.001 679	0.282 392	0.000 025	-9.56	0.88	1 237	1 836	-0.95
STWH1050-6	186	0.042 298	0.001 263	0.282 416	0.000 026	-8.65	0.93	1 189	1 778	-0.96
STWH1050-7	186	0.054 174	0.001 668	0.282 340	0.000 021	-11.41	0.75	1 311	1 952	-0.95
STWH1050-9	186	0.054 908	0.001 768	0.282 382	0.000 022	-9.94	0.77	1 255	1 859	-0.95
STWH1050-13	186	0.049 710	0.001 533	0.282 453	0.000 026	-7.39	0.93	1 146	1 698	-0.95
STWH1050-14	186	0.060 062	0.001 716	0.282 342	0.000 022	-11.34	0.78	1 310	1 948	-0.95
STWH1050-16	186	0.047 526	0.001 480	0.282 367	0.000 022	-10.41	0.79	1 266	1 889	-0.96
STWH1050-17	186	0.049 198	0.001 350	0.282 307	0.000 023	-12.51	0.82	1 346	2 022	-0.96
STWH1050-18	186	0.052 057	0.001 420	0.282 393	0.000 022	-9.50	0.76	1 228	1 832	-0.96
STWH1050-19	186	0.054 722	0.001 516	0.282 341	0.000 024	-11.33	0.83	1 304	1 948	-0.95
STWH1050-21	186	0.040 902	0.001 085	0.282 426	0.000 027	-8.28	0.95	1 170	1 754	-0.97
STWH1050-22	186	0.051 304	0.001 269	0.282 369	0.000 027	-10.32	0.95	1 256	1 884	-0.96
STWH1050-23	186	0.043 290	0.001 128	0.282 333	0.000 027	-11.57	0.96	1 302	1 963	-0.97
STWH1050-24	186	0.046 071	0.001 127	0.282 364	0.000 029	-10.48	1.03	1 258	1 894	-0.97
STTW. 5-2	193	0.042 908	0.001 187	0.282 366	0.000 023	-10.28	0.81	1 257	1 886	-0.96
STTW. 5-3	193	0.045 737	0.001 261	0.282 369	0.000 020	-10.19	0.72	1 256	1 880	-0.96
STTW. 5-4	193	0.042 982	0.001 203	0.282 347	0.000 023	-10.97	0.83	1 285	1 929	-0.96
STTW. 5-5	193	0.038 359	0.001 029	0.282 378	0.000 018	-9.85	0.65	1 236	1 859	-0.97
STTW. 5-7	193	0.046 894	0.001 246	0.282 291	0.000 021	-12.94	0.74	1 365	2 054	-0.96
STTW. 5-8	193	0.043 942	0.001 191	0.282 335	0.000 022	-11.40	0.76	1 302	1 956	-0.96
STTW. 5-9	193	0.046 597	0.001 230	0.282 432	0.000 023	-7.96	0.83	1 166	1 739	-0.96
STTW. 5-10	193	0.042 341	0.001 139	0.282 387	0.000 026	-9.52	0.93	1 226	1 838	-0.97
STTW. 5-11	193	0.048 024	0.001 350	0.282 434	0.000 022	-7.91	0.78	1 167	1 736	-0.96
STTW. 5-13	193	0.064 104	0.001 641	0.282 339	0.000 024	-11.31	0.84	1 312	1 951	-0.95
STTW. 5-14	193	0.047 972	0.001 385	0.282 334	0.000 021	-11.45	0.73	1 310	1 959	-0.96
STTW. 5-15	193	0.029 701	0.000 897	0.282 355	0.000 023	-10.62	0.83	1 263	1 907	-0.97
STTW. 5-16	193	0.062 891	0.001 892	0.282 421	0.000 024	-8.42	0.84	1 202	1 768	-0.94
STTW. 5-17	193	0.045 917	0.001 399	0.282 391	0.000 020	-9.43	0.71	1 229	1 832	-0.96
STTW. 5-18	193	0.036 525	0.001 080	0.282 410	0.000 023	-8.72	0.81	1 192	1 787	-0.97
STTW. 5-19	193	0.028 815	0.000 917	0.282 435	0.000 024	-7.82	0.84	1 152	1 730	-0.97
STTW. 5-21	193	0.042 524	0.001 273	0.282 412	0.000 022	-8.67	0.79	1 195	1 784	-0.96
STTW. 5-22	193	0.048 952	0.001 458	0.282 420	0.000 024	-8.40	0.86	1 190	1 767	-0.96
STTW. 5-23	193	0.043 718	0.001 183	0.282 396	0.000 024	-9.22	0.85	1 215	1 819	-0.96
STTW. 5-24	193	0.042 518	0.001 172	0.282 318	0.000 023	-11.98	0.81	1 324	1 993	-0.96

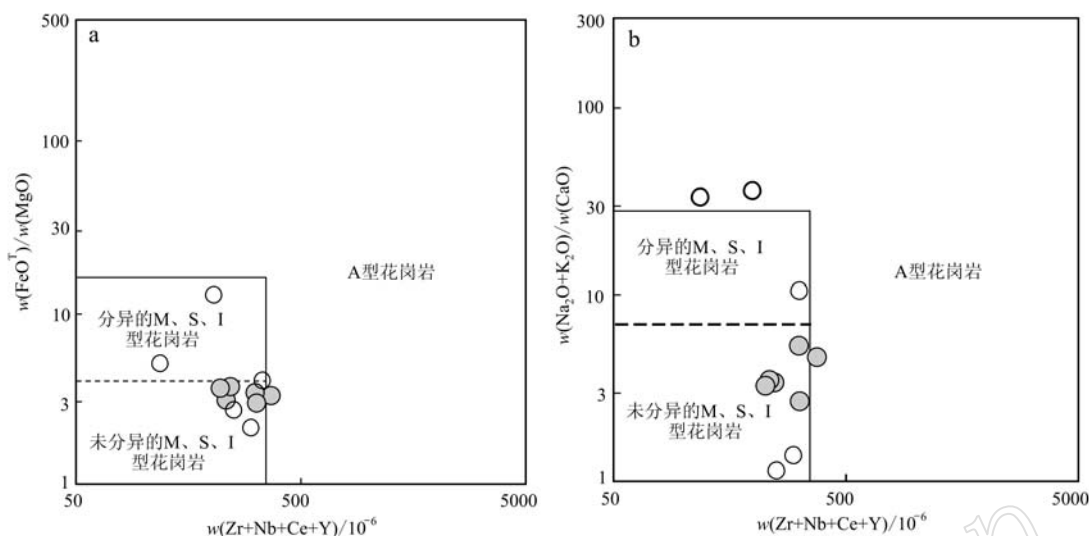


图7 冀东-辽西地区早侏罗世侵入岩成因类型判别图解(据 Whalen *et al.*, 1987; 图例同图5)

Fig. 7 The discrimination diagrams of the intruded rocks in east Hebei Province and west Liaoning Province (after Whalen *et al.*, 1987; legends as for Fig. 5)

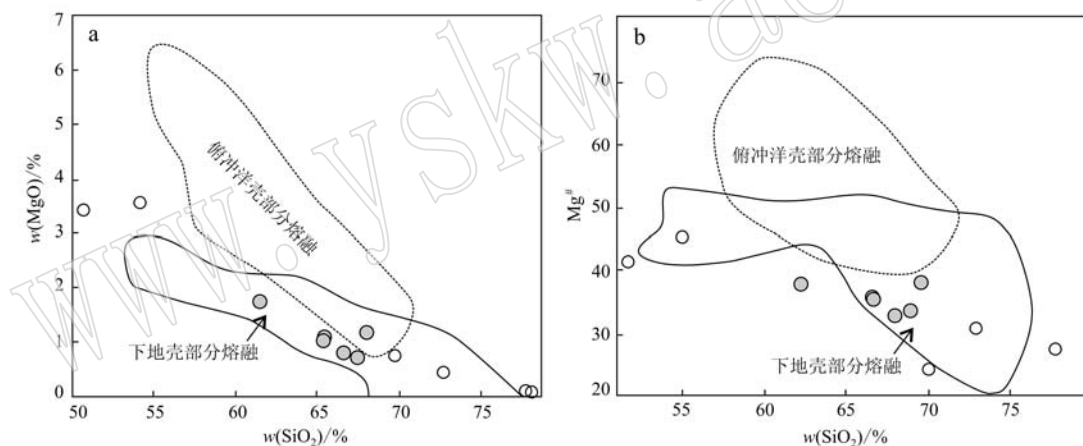


图8 冀东-辽西地区早侏罗世侵入岩岩浆来源判别图解(a 据 Sheppard *et al.*, 2001; b 据 Wang *et al.*, 2007; 图例同图5)

Fig. 8 The magma source discrimination diagrams of the intrusive rocks in east Hebei Province and west Liaoning Province (a after Sheppard *et al.*, 2001; b after Wang *et al.*, 2007; legends as for Fig. 5)

红石、钛铁矿等)和磷灰石的分离结晶作用。综上所述,认为辽西地区早侏罗世花岗岩岩石初始岩浆来源于古老大陆地壳的部分熔融,岩浆起源与演化过程中可能有幔源物质的参与,且在后期岩浆演化和成岩过程中经历了一定程度的分离结晶和分异演化。

5.2 早侏罗世岩浆作用与古太平洋俯冲

现有研究表明古亚洲洋最终于二叠纪末—三叠纪沿着西拉木伦—长春一线闭合(Li, 2006; Windley *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2020),华北克拉通北缘于晚三

叠世进入造山后伸展环境(唐杰等, 2018),而扬子克拉通对华北克拉通的大陆深俯冲于三叠纪完成并发生碰撞拼合形成了苏鲁-大别高压变质带(黄涛等, 2014)。华北克拉通北缘和东缘多处发育晚三叠世碱性-基性岩浆岩,如河北小张家口-光头山-矾山镁铁-超镁铁质或碱性岩体、山东甲子山碱性杂岩体、辽东半岛基性岩脉等(Chen *et al.*, 2003; 韩宝福等, 2004; 郭敬辉等, 2005; Yang *et al.*, 2005; 田伟等, 2007; 任荣等, 2009),岩石具有类似于造山后碱性岩的岩石地球化学、同位素特征(杨进辉等, 2009),表明华北克拉通东部晚三叠世处于造山后伸

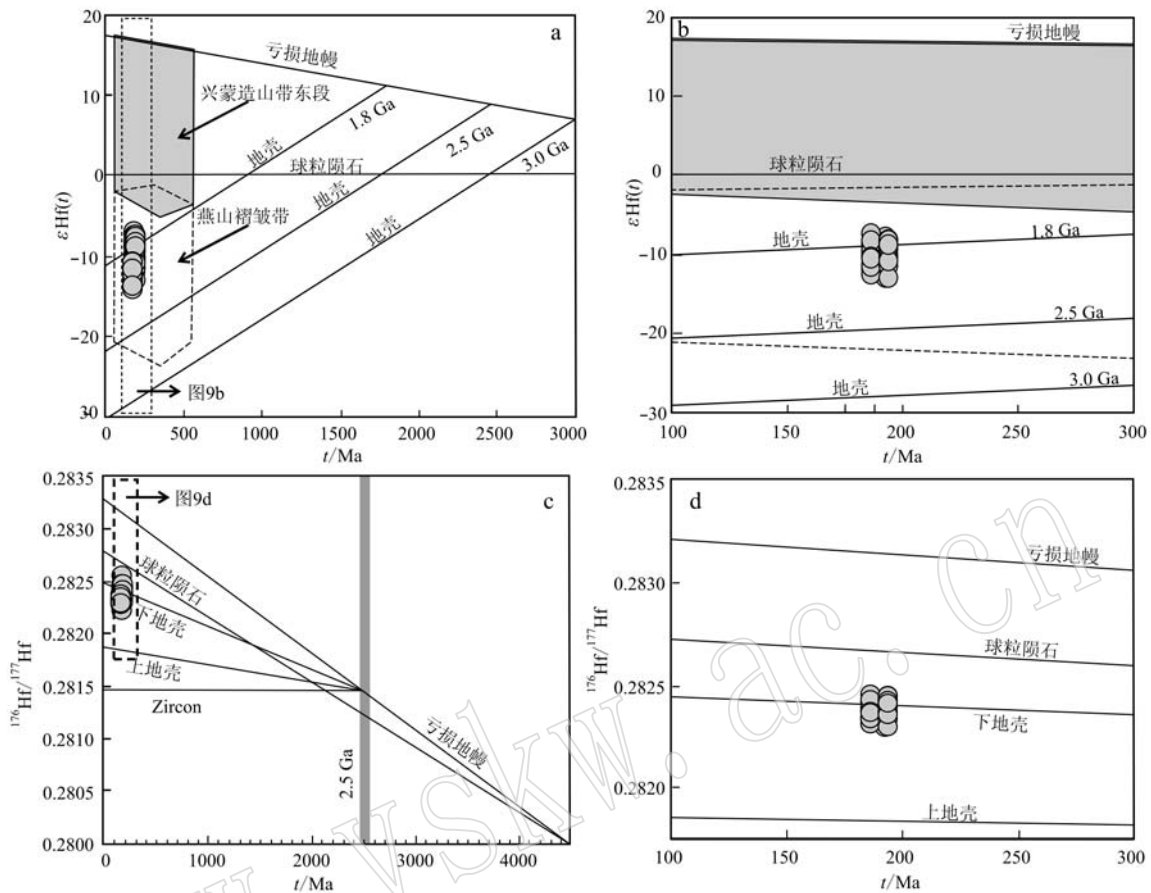


图9 药王庙-磨盘山花岗质岩石锆石 Hf 同位素特征(a、b 据 Yang *et al.*, 2006; c、d 据吴福元等, 2007)

Fig. 9 Hf isotopic characteristics of the Yaowangmiao-Mopan Mountain granitoids (a and b modified after Yang *et al.*, 2006; c and d modified after Wu *et al.*, 2007)

展构造背景下(张拴宏等, 2010),同时标志着晚三叠世以后古亚洲洋构造演化和扬子克拉通大陆深俯冲等地质作用基本结束。此外,有学者利用现代高精度同位素定年技术在额尔古纳地块及中蒙古地块识别出晚古生代-早中生代钙碱性岩浆岩,认为岩石的形成与蒙古-鄂霍茨克洋俯冲作用有关(唐杰, 2016; Li *et al.*, 2017),其中早侏罗世火成岩形成于蒙古-鄂霍茨克洋对额尔古纳地块俯冲作用下的活动陆缘构造背景,且存在局部地区的伸展,本文辽西地区早侏罗世岩石具有与额尔古纳地块形成于~185 Ma 的花岗质岩石(唐杰,2016)较为相似的岩石组合(闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩), $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值($t=193\text{ Ma}/186\text{ Ma}$)介于-12.94~-7.39 之间,而额尔古纳地块早侏罗世花岗质岩石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为+2.8~+11.6,二者 Hf 同位素组成明显不同,并且华北克拉通北缘早侏罗世岩浆活动十分微弱(Zhang *et al.*, 2014),未见有代表伸展构造背景的碱性岩、A 型花

岗岩或是双峰式岩浆岩组合等,这些都表明华北克拉通早侏罗世期间岩浆作用构造背景与蒙古-鄂霍茨克构造体系不具密切相关性。

华北克拉通东部早侏罗世岩浆活动十分微弱,仅于辽东-胶东半岛、燕山-辽西地区东部出露有少量早侏罗世岩浆岩(孙金凤等,2013),其中华北克拉通北缘东段辽东半岛侏罗纪(180~156 Ma) I 型花岗岩为低温花岗岩,可能有流体参与其形成过程中,指示其形成于太平洋俯冲作用构造背景下(Wu *et al.*, 2005)。张军波(2014)综合研究山东沂南花岗岩并结合前人研究结果认为太平洋板块快速扩张导致形成了沿环太平洋分布的早中侏罗世花岗岩(180~155 Ma)。辽西兴城药王庙-磨盘山花岗质体主要岩石类型有石英二长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩,岩石具有准铝质-弱过铝质特征,岩石地球化学特征与 I 型花岗岩类似,属于高钾钙碱性系列,其岩石组合、岩石地球化学特征类似于活

动大陆边缘花岗岩; 岩石明显亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 暗示其形成可能与俯冲有关 (Kelemen *et al.*, 1990; Stolz *et al.*, 1996); 在 $(\text{Sr}/\text{Y}) - \text{Y}$ 和 $(\text{La} + \text{Yb})_{\text{N}} - \text{Yb}_{\text{N}}$ 图解中落入埃达克岩与经典岛弧岩浆岩重叠或过渡区域 (图 10), 表明辽西早侏罗世花岗质岩浆活动的大地构造背景可能为与俯冲有关的活动大陆边缘。系统同位素年代学研究表明辽西地区东南部花岗质岩石形成于 190~150 Ma, 而燕山褶皱带西部云蒙山-北岔沟门岩体侵位于 150~140 Ma (Davis *et al.*, 2001; 吴福元等, 2006), 吴福元等 (2006) 认为燕山褶皱带自东向西岩浆岩形成时代逐渐变年轻的趋势可能与古太平洋板块侏罗纪对华北克拉通东部的俯冲作用有关; 辽西地区印支期 WE 向构造

的形成与古亚洲洋构造体系有关而燕山期 NNE 向构造行迹为古太平洋构造体系作用的结果 (赵玉妹, 2012); 古太平洋对华北克拉通东部的俯冲作用是导致辽西地区燕山早期大面积 I 型花岗岩形成的原因 (Liang *et al.*, 2015); 药王庙-磨盘山花岗质岩石具有与形成于活动大陆边缘花岗岩相类似的岩石组合和岩石地球化学特征, 且呈岩体整体呈 NE 向展布 (图 1c), 与太平洋俯冲带展布方向相一致, 因此其可能形成于古太平洋俯冲作用导致的活动陆缘构造环境。再结合区域研究资料, 可以将古太平洋板块对华北克拉通东部俯冲作用开始时间限定于晚三叠世—早侏罗世, 而辽西兴城药王庙-磨盘山花岗质岩石的形成是古太平洋俯冲作用的岩浆响应。

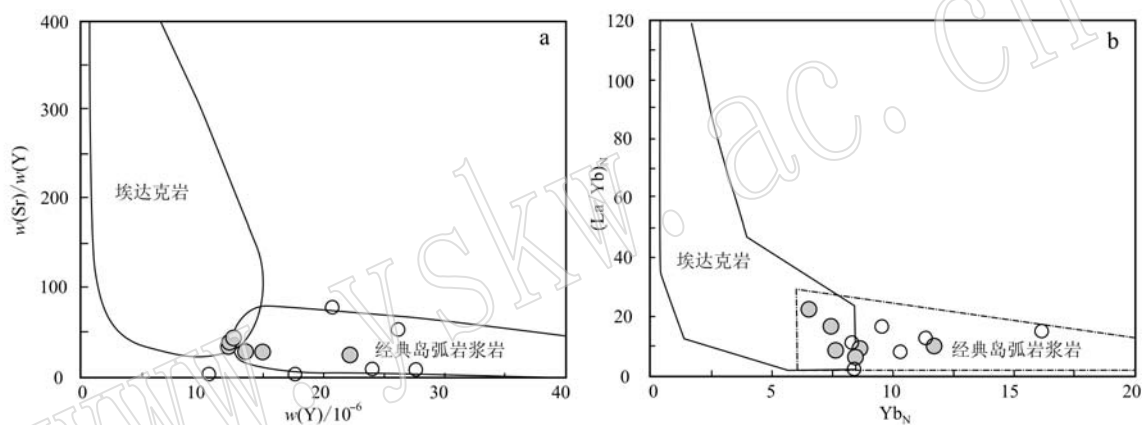


图 10 冀东-辽西地区早侏罗世侵入岩成因判别图解 (据 Whalen *et al.*, 1987; 图例同图 5)

Fig. 10 The petrogenesis diagrams of the intrusive rocks in east Hebei Province and west Liaoning Province (after Whalen *et al.*, 1987; legends as for Fig. 5)

6 结论

(1) 辽西兴城药王庙-磨盘山花岗质岩石形成于 193~186 Ma, 岩石组合为石英二长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩。

(2) 岩石属于高钾钙碱性系列, 具有类似于 I 型花岗岩的岩石地球化学特征和相对富集的 Hf 同位素组成, 初始岩浆来源于古老大陆地壳的部分熔融并可能有幔源物质参与, 岩石形成于古太平洋俯冲作用导致的活动陆缘构造背景下。

(3) 古太平洋板块对华北克拉通东部的俯冲开始于晚三叠世-早侏罗世, 辽西兴城药王庙-磨盘山早侏罗世花岗质岩石的形成是古太平洋俯冲作用的岩浆响应。

致谢 感谢审稿专家和编辑部对本文提出的宝贵修改意见。

References

- Bolhar R, Weaver S D, Whitehouse M J, *et al.* 2008. Sources and evolution of arc magmas inferred from coupled O and Hf isotope systematics of plutonic zircons from the Cretaceous Separation Point Suite (New Zealand) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 268(3): 312~324.
- Boynton W V. 1984. *Geochemistry of the rare earth elements; Meteorite studies* [A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry* [C]. Amsterdam: Elsevier.
- Chen J F, Xie Z, Li H M, *et al.* 2003. U-Pb Zircon ages for a collision-

- related K-rich complex at Shidao in the Sulu ultrahigh pressure terrane, China[J]. *Geochemical Journal*, 37(1): 35~46.
- Chen Jiansheng. 2013. Study of Mafic Microgranular Enclaves—Take the Yuegelu Granite in Eastern Kunlun Belt for Exemple [D]. East China University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Chen Jingzhi, Jiang Neng, Fan Wenbo, *et al.* 2020. Petrogenesis and implications of early Jurassic igneous rocks from eastern Hebei Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(3): 281~292 (in Chinese with English abstract).
- 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): 2463~2492 (in Chinese with English abstract).
- Dai Junzhi, Mao Jingwen, Zhao Caisheng, *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb age and petrogeochemical features of the Lanjiagou granite in western Liaoning province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1555~1564 (in Chinese with English abstract).
- Davis G A, Zheng Yadong, Wang Cong, *et al.* 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China [J]. *Geological Society of America*, 194: 171~197.
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Zhang Fuqin, *et al.* 2015. Late Jurassic-Early Cretaceous continental convergence and intracontinental orogenesis in East Asia: A synthesis of the Yanshan Revolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 750~770.
- Gao Shan. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11): 1959~1975.
- Geng Jianzhen, Li Huaikun, Zhang Jian, *et al.* 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS [J]. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1508~1513 (in Chinese with English abstract).
- Guo Feng. 2016. Geological records of the Pacific plate subduction in the Northeast Asian continental margin: An overview [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(6): 1082~1089 (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): 1281~1301 (in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Kagami H and Li Huimin. 2004. Age and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Guangtoushan alkaline granite, Hebei Province, China: Implications for Early Mesozoic crust-mantle interaction in North China Block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1375~1388 (in Chinese with English abstract).
- Huang Tao, Yang Liqiang, Liu Xiangdong, *et al.* 2014. Crustal evolution of the Jiaobei terrane: Evidence from U-Pb ages, rare element compositions and Hf isotopes of inherited zircons of the Linglong biotite granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2574~2594 (in Chinese with English abstract).
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523~548.
- Kelemen P B, Johnson K T M, Kinzler R J, *et al.* 1990. High-field-strength element depletions in arc basalts due to mantle-magma interaction[J]. *Nature*, 345(6275): 521~524.
- Lan Tingguang, Fan Hongrui, Santosh M, *et al.* 2012. Early Jurassic high-K calc-alkaline and shoshonitic rocks from the Tongshi intrusive complex, eastern North China Craton: Implication for crust-mantle interaction and post-collisional magmatism[J]. *Lithos*, 140~141: 183~199.
- Li Jian, Jin Wei, Zheng Peixi, *et al.* 2014. Geochemical characteristics and zircon U-Pb geochronology of the biotite adamellite in Taili area, Western Liaoning Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(4): 1219~1230 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3): 207~224.
- Li Yu, Xu Wenliang, Wang Feng, *et al.* 2017. Geochronology and geochemistry of late Paleozoic-early Mesozoic igneous rocks of the Erguna Massif, NE China: Implications for the early evolution of the Mongol-Okhotsk tectonic regime[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 144: 205~224.
- Li Zhengxiang, Li Xianhua, Chung Sunlin, *et al.* 2012. Magmatic switch-on and switch-off along the South China continental margin since the Permian: Transition from an Andean-type to a western Pacific-type plate boundary [J]. *Tectonophysics*, 532~535: 271~290.
- Liang Chenyue, Liu Yongjiang, Neubauer Fraz, *et al.* 2015. Structural characteristics and LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the deformed granitic rocks from the Mesozoic Xingcheng-taili ductile shear zone in the North China Craton[J]. *Tectonophysics*, 650: 80~103.
- Liu Kai, Zhang Jinjiang, Wilde S A, *et al.* 2017. Initial subduction of the Paleo-Pacific Oceanic plate in NE China: Constraints from whole-

- rock geochemistry and zircon U-Pb and Lu-Hf isotopes of the Khanka Lake granitoids[J]. *Lithos*, 274~275: 254~270.
- Ludwig K R. 2003. Using isoplot/Ex Version 3. 00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley, CA: Berkeley Geochronology Center.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63~81.
- Peng Yujing, Qi Chengdong, Zhou Xiaodong, *et al.* 2012. Transition from Paleo-Asian Ocean domain to Circum-Pacific Ocean domain for the Ji-Hei composite orogenic belt: Time mark and relationship to global tectonics [J]. *Geology and Resources*, 21(3): 261~265 (in Chinese with English abstract).
- Ren Rong, Mu Baolei, Han Baofu, *et al.* 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Fanshan potassic alkaline ultramafite-syenite complex in Hebei Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 588~594 (in Chinese with English abstract).
- Sheppard S, Griffin T J, Tyler I M, *et al.* 2001. High and low-K granites and adakites at a Palaeoproterozoic plate boundary in northwestern Australia[J]. *Journal of the Geological Society*, 158(3): 547~560.
- Stolz A J, Jochum K P, Spettel B, *et al.* 1996. Fluid- and melt-related enrichment in the subarc mantle: Evidence from Nb/Ta variations in island-arc basalt[J]. *Geology*, 24(7): 587~590.
- Sun Jinfeng and Yang Jinhui. 2009. Early Cretaceous A-type granites in the Eastern North China Block with relation to destruction of the craton[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 137~147 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jinfeng and Yang Jinhui. 2013. Mesozoic magmatism related to decratonization of the North China Craton [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(5): 577~592 (in Chinese with English abstract).
- Sun Mingdao, Xu Yigang, Wilde Simon A, *et al.* 2015. The Permian Dongfanghong island-arc gabbro of the Wandashan Orogen, NE China: Implications for Paleo-Pacific subduction[J]. *Tectonophysics*, 659: 122~136.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313~345.
- Tang Jie. 2016. Geochronology and Geochemistry of the Mesozoic Igneous Rocks in the Erguna Massif, NE China: Constraints on the Tectonic Evolution of the Mongol-Okhotsk Suture Zone [D]. Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Tang Jie, Xu Wenliang, Wang Feng, *et al.* 2018. Subduction history of the Paleo-Pacific slab beneath Eurasian continent: Mesozoic-Paleogene magmatic records in Northeast Asia [J]. *Science China Earth Sciences*, 61: 527~559.
- Tian Wei, Chen Bin, Liu Chaoqun, *et al.* 2007. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the Xiaozhangjiakou ultramafic pluton in northern Hebei[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 583~590 (in Chinese with English abstract).
- Vernon R H. 1984. Microgranitoid enclaves in granites: Globules of hybrid magma quenched in a plutonic environment [J]. *Nature*, 309: 438~439.
- Wang Fang, Chen Fukun, Hou Zhenhui, *et al.* 2009. Zircon ages and Sr-Nd-Hf isotopic composition of late Paleozoic granitoids in the Chongli-Chicheng area, northern margin of the North China Craton block [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3057~3074 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Derek A W, Zhao Zhenhua, *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*, 236(1~2): 42~64.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.
- Wilde S A and Zhou Jianbo. 2015. The Late Paleozoic to Mesozoic evolution of the eastern margin of the Central Asian Orogenic Belt in China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 909~921.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31~47.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, *et al.* 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis [J]. *Lithos*, 66(3): 241~273.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Ge Wenchun *et al.* 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1~30.
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Wilde S A, *et al.* 2005. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China [J]. *Chemical Geology*, 221(1~2):

- 127~156.
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Xu Yigang, *et al.* 2019. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47: 173~195.
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Zhang Yanbin, *et al.* 2006. Emplacement ages of the Mesozoic granites in southeastern part of the Western Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 315~325 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Zhao Guochun, Sun Deyou, *et al.* 2007. The Hulan Group: Its role in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(3~4): 542~556.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Huang B C, *et al.* 2009. End-Permian to mid-Triassic Termination of the accretionary processes of the southern Altaids; Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1 189~1 217.
- Xu Wenliang, Pei Fuping, Wang Feng, *et al.* 2013. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 167~193.
- Yang Jinhui, Chung SL, Wilde Simon A, *et al.* 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence[J]. *Chemical Geology*, 214(1): 99~125.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Shao Ji'an, *et al.* 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3~4): 336~352.
- Yang Jinhui and Wu Fuyuan. 2009. Triassic magmatism and its relation to decratonization in the eastern North China Craton[J]. *Sci. China Ser D-Earth Sci.*, 52(7): 910~921(in Chinese with English abstract)
- Yin Yechang, Hao Libo, Zhao Yuyan, *et al.* 2018. Gaojiadian granite and Shepantu granite in eastern Hebei Province: Chronology, geochemistry and geological significances[J]. *Journal of Jinlin University (Earth Science Edition)*, 48(2): 574~586(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Liu Yongjiang, Zhang Zhaolu, *et al.* 2019. The deformation and geochronological characteristics of Gudonghe Ductile Shear Zone in Yanbian Area[J]. *Earth Science*, 44(10): 3 252~3 264(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Neubauer Fraz, Liu Zhenghong, *et al.* 2020. Final-stage magmatic record of Paleo-Asian oceanic subduction? Insights from Late Permian to Early Triassic intrusive rocks in the Yanbian Area, Easternmost Central Asian Orogenic Belt [J]. *Minerals*, 10(9): 799. <https://doi.org/10.3390/min10090799>.
- Zhang Junbo. 2014. Recycled Lower Continental Crust in the North China Craton: Evidence from Mesozoic/Cenozoic Magmatism in Shandong [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Davis G A, *et al.* 2014. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton; Implications for lithospheric thinning and decratonization[J]. *Earth-Science Reviews*, 131: 49~87.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Liu Jianmin, *et al.* 2010. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: A preliminary review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 824~842.
- Zhao Guochun. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton; Key issues and discussion [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1 772~1 792(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yumei. 2012. Mesozoic Structural Superimposed Deformation and Its Implications in the Southwest Liaoning Province(Master Degree Thesis)[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei, Xu Zheng, Zhao Zifu, *et al.* 2018. Mesozoic mafic magmatism in North China: Implications for thinning and destruction of cratonic lithosphere[J]. *Science China Earth Sciences*, 48: 379~414(in Chinese with English abstract)
- Zhou J B and Li L. 2017. The Mesozoic accretionary complex in Northeast China: Evidence for the accretion history of Paleo-Pacific subduction [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 91 ~100.
- Zhou Jianbo, Pu Xiangang, Hou Hesheng, *et al.* 2018. The Mesozoic accretionary complex in NE China and its tectonic implications for the subduction of the Paleo-Pacific plate beneath the Eurasia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(10): 2 845~2 856 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guang, Jiang Dazhi, Zhang Bilong, *et al.* 2012. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: Evidence from crustal deformation kinematics[J]. *Gondwana Research*, 22: 86~103.
- Zhu Guang, Liu Cheng, Gu Chengchuan, *et al.* 2018. Oceanic plate subduction history in the western Pacific Ocean; Constraint from late Mesozoic evolution of the Tan-Lu Fault Zone [J]. *Science China Earth Sciences*, 61: 386~405.
- Zhu Rixiang, Xu Yigang, Zhu Guang, *et al.* 2012. Destruction of the North China Craton [J]. *Science China Earth Sciences*, 55(10):

1 565~1 587.

Zhu Rixiang and Xu Yigang. 2019. The subduction of the west Pacific plate and the destruction of the North China Craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 49: 1 346~1 356 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈检生. 2013. 花岗岩中暗色微粒包体研究——以东昆仑造山带约格魯岩体为例[D]. 东华理工大学.
- 陈竟志, 姜能, 范文博, 等. 2020. 冀东地区早侏罗世岩浆岩成因及其意义[J]. *岩石学报*, 36(3): 281~292.
- 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质岩石的记录与启示[J]. *岩石学报*, 36(8): 2 463~2 492.
- 代军治, 毛景文, 赵财胜, 等. 2008. 辽西三家沟钼矿床花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及岩石化学特征[J]. *地质学报*, 82(11): 1 555~1 564.
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定[J]. *地质通报*, 30(10): 1 508~1 513.
- 郭峰. 2016. 太平洋板块俯冲作用在东北亚大陆边缘的地质记录述评[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 35(6): 1 082~1 089.
- 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.
- 韩宝福, 加加美宽雄, 李惠民. 2004. 河北平泉光头山碱性花岗岩的时代、Nd-Sr 同位素特征及其对华北早中生代壳幔相互作用的意义[J]. *岩石学报*, 20(6): 74~87.
- 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): 2 574~2 594.
- 李健, 金巍, 郑培玺, 等. 2014. 辽西台里黑云母二长花岗岩地球化学特征及锆石 U-Pb 年代学[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(4): 1 219~1 230.
- 彭玉鲸, 齐成栋, 周晓东, 等. 2012. 吉黑复合造山带古亚洲洋向滨太平洋构造域转换: 时间标志与全球构造的联系[J]. *地质与资源*, 21(3): 261~265.
- 任荣, 牟保磊, 韩宝福, 等. 2009. 河北矾山钾质碱性超镁铁岩-正长岩杂岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. *岩石学报*, 25(3): 588~594.
- 孙金凤, 杨进辉. 2009. 华北东部早白垩世 A 型花岗岩与克拉通破坏[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(1): 137~147.
- 孙金凤, 杨进辉. 2013. 华北中生代岩浆作用与去克拉通化[J]. *岩石矿物学杂志*, 32(5): 577~592.
- 唐杰. 2016. 额尔古纳地块中生代火成岩的年代学与地球化学: 对蒙古-鄂霍茨克缝合带构造演化的制约[D]. 吉林大学.
- 唐杰, 许文良, 王枫, 等. 2018. 古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史: 东北亚陆缘中生代-古近纪岩浆记录[J]. *中国科学: 地球科学*, 48: 549~583.
- 田伟, 陈斌, 刘超群, 等. 2007. 冀北小张家口超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 23(3): 583~590.
- 王芳, 陈福坤, 侯振辉, 等. 2009. 华北陆块北缘崇礼-赤城地区晚古生代花岗岩类的锆石年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 25(11): 3 057~3 074.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 23(2): 185~220.
- 吴福元, 杨进辉, 张艳斌, 等. 2006. 辽西南部中生代花岗岩时代[J]. *岩石学报*, 22(2): 315~325.
- 杨进辉, 吴福元. 2009. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 52(7): 910~921.
- 尹业长, 郝立波, 赵玉岩, 等. 2018. 冀东高家店和蛇盘兔花岗岩体: 年代学、地球化学及地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 48(2): 574~586.
- 张超, 刘永江, 张照录, 等. 2019. 延边地区古洞河韧性剪切带变形特征及变形时代[J]. *地球科学*, 44(10): 3 252~3 264.
- 张军波. 2014. 华北克拉通大陆下地壳再循环——来自山东中-新生代岩浆作用的证据[D]. 中国地质大学.
- 张拴宏, 赵越, 刘建民, 等. 2010. 华北地块北缘晚古生代-早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 824~842.
- 赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论[J]. *岩石学报*, 25(8): 1 772~1 792.
- 赵玉妹. 2012. 辽西南部中生代构造变形叠加及其意义(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 郑永飞, 徐峥, 赵子福, 等. 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏[J]. *中国科学: 地球科学*, 48: 379~414.
- 周建波, 蒲先刚, 侯贺晟, 等. 2018. 东北中生代增生杂岩及对古太平洋向欧亚大陆俯冲历史的制约[J]. *岩石学报*, 34(10): 2 845~2 856.
- 朱光, 刘程, 顾承申, 等. 2018. 郯庐断裂带晚中生代演化对西太平洋俯冲历史的指示[J]. *中国科学: 地球科学*, 48: 415~435.
- 朱日祥, 徐义刚. 2019. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏[J]. *中国科学: 地球科学*, 49: 1 346~1 356.