

吉南金英金矿中侏罗世-早白垩世岩浆作用及其成矿意义

刘博^{1,2*}, 周瑞欣¹, 马婧轩¹, 徐宏伟³, 鞠楠², 施璐², 冯伟³, 胡博艺¹, 莫泉扬¹

1. 东北大学资源与土木工程学院地质系, 辽宁 沈阳 110819

2. 中国地质调查局沈阳地质调查中心(东北地质科技创新中心), 辽宁 沈阳 110034

3. 吉林板庙子矿业有限公司, 吉林 白山 134300

摘要: 吉南金英金矿床位于华北克拉通北缘东北段, 其中侏罗世-早白垩世岩浆活动对研究吉南中生代构造演化和金成矿作用具有重要意义。本文以金英金矿床出露的中侏罗世-早白垩世岩浆岩为研究对象, 通过岩相学、锆石 U-Pb 年代学及全岩主-微量元素地球化学研究, 探究其岩石成因、构造背景及其对金英金矿床的成矿意义。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 驮道沟花岗闪长斑岩的年龄为 $165 \pm 1 \text{ Ma}$, 东大坡花岗闪长斑岩和花岗斑岩岩心的年龄为 $130 \pm 1 \text{ Ma}$ 和 $131 \pm 2 \text{ Ma}$, 代表其侵位时代分别为中侏罗世和早白垩世。中侏罗世和早白垩世花岗闪长斑岩均属于钙碱性系列, 兼具准铝质 I 型埃达克质岩石特点。其中, 前者 $\text{Mg}^\#$ 值 (45~47) 较低, Nb/Ta 比值 (14.35~16.89) 低于原始地幔值, 可能起源于加厚古老下地壳的部分熔融。相比较下, 后者 $\text{Mg}^\#$ 值 (57~59) 和 Nb/Ta 比值 (18.87~19.31) 偏高, 暗示其形成与拆沉下地壳部分熔融有关。结合最新的区域地质资料, 推测中侏罗世岩浆岩的形成与古太平洋板块俯冲而诱发的挤压环境密切相关, 而早白垩世岩浆岩则代表华北克拉通破坏峰期拆沉作用的产物。结合已有矿床学数据, 本文资料支持金英金矿床的成因类型可能为远成低温岩浆热液型金矿的观点, 区域古元古代不整合界面与早白垩世岩浆作用可能是金英金成矿事件的关键成矿要素。

关键词: 华北克拉通; 吉南地区; 岩浆岩; 远成低温岩浆热液型; 金英金矿

中图分类号: P618 收稿日期: 2025-06-18

基金项目: 中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基金项目 (QCJJ2023-8); 辽宁省教育厅基本科研面上项目 (JYTMS20230617); 辽宁省自然科学基金计划面上项目 (2025-MS-037); 国家自然科学基金项目 (42473076); 中央高校基本科研业务费 (N2201014)。第一和通讯作者简介: 刘博 (1988-), 男, 副教授, 主要从事大地构造学与区域成矿作用研究。E-mail: liubo@mail.neu.edu.cn, ORCID:0000-0002-3890-6073

**Middle Jurassic to Early Cretaceous magmatism in the Jinying gold deposit, southern Jilin,
and their implications for the mineralization**

LIU Bo^{1, 2*}, ZHOU Ruixin¹, MA Jingxuan¹, XU Hongwei³, JU Nan², SHI Lu², FENG Wei³,
HU Boyi¹, MO Xiaoyang¹

1. *Department of Geology, School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China*
2. *Shenyang Center, China Geological Survey (Northeast Geological S&T Innovation Center), Shenyang 110034, Liaoning, China*
3. *Jilin Banmiaozi Mining Co., Ltd., Baishan 134300, China*

Abstract: The Jinying gold deposit in southern Jilin Province is located in the northeastern segment of the northern margin of the North China Craton, and its Middle Jurassic-Early Cretaceous magmatism is of great significance for understanding Mesozoic tectonic evolution and gold mineralization. This study focuses on Middle Jurassic-Early Cretaceous igneous rocks from the Jinying gold deposit. By integrating petrography, zircon U-Pb geochronology, and whole-rock major-trace element geochemistry, we investigate the petrogenesis, tectonic setting, and discuss the implications for the gold mineralization. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating indicates that the Tuodaogou granodiorite porphyry was emplaced during the Middle Jurassic, with an age of 165 ± 1 Ma. The Dongdapo granodiorite porphyry and granite porphyry show Early Cretaceous emplacement ages of 130 ± 1 Ma and 131 ± 2 Ma, respectively. Both Middle Jurassic and Early Cretaceous granodiorite porphyries are calc-alkaline series and are identified as metaluminous I-type adakitic rocks. The Middle Jurassic samples display $Mg^\#$ values of 45~47 and Nb/Ta ratios of 14.35~16.89, which are below the primitive mantle value, suggesting derivation from partial melting of thickened ancient lower crust. In contrast, the Early Cretaceous porphyries have higher $Mg^\#$ values of 57~59 and Nb/Ta ratios of 18.87~19.31, implying their generation via partial melting of delaminated lower crust. By integrating recent regional geological evidence, we propose that the Middle Jurassic igneous rocks are closely associated with a compressional setting induced by Paleo-Pacific Plate subduction, while the Early Cretaceous igneous rocks represent products of lithospheric delamination during the peak destruction stage of the North China Craton. Combined with existing ore deposit data, our findings substantiate the Jinying gold deposit as a distal low temperature magmatic-hydrothermal gold deposit. Furthermore, the regional Paleoproterozoic unconformity surface and Early Cretaceous igneous rocks are interpreted as critical metallogenic factors controlling the Jinying gold mineralization event.

Key words: North China Craton; Southern Jilin; Igneous rocks; Distal low temperature magmatic-hydrothermal type; Jinying gold deposit

0 引言

华北克拉通是欧亚大陆东部规模最大、时代最为古老的克拉通（图1），其主要由太古代至古元古代基底和中元古代至新生代盖层组成（图1；Zhao *et al.*, 2005, 2012; Zhai and Santosh, 2011; Zhang *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2025）。中生代以来，华北克拉通遭受了克拉通破坏（去克拉通化），在一系列构造事件的叠加影响下，发生了岩石圈减薄，导致大规模的构造变形和岩浆活动（Gao *et al.*, 2004; 吴福元等, 2008; 朱日祥等, 2011; 许文良等, 2013; Wu *et al.*, 2019; Guan *et al.*, 2022; 汪浪等, 2024）。已有研究通过对华北克拉通中生代伸展构造、岩浆岩岩石组合、地球化学特征和空间展布特征的剖析，认为古太平洋板块俯冲是华北克拉通破坏的主要驱动力（朱日祥等, 2011; 许文良等, 2013; Yang *et al.*, 2018; Pang *et al.*, 2020）。受古太平洋俯冲回撤作用影响，华北克拉通大规模出露早白垩世（130~120Ma）I型和A型花岗岩、双峰式火山岩和埃达克质岩石等（陈煜嵩等, 2020; 玄雨菲等, 2022），并伴随大规模金成矿作用（翟明国等, 2005; 杨立强等, 2014; 朱日祥等, 2015）。已有研究表明，华北克拉通现存的金矿床（如胶东、辽东-吉南-赤峰-朝阳、小秦岭-熊耳山、太行山中段、冀北等）的成矿时代与克拉通破坏峰期相一致，呈现爆发性成矿特征（朱日祥等, 2015）。这些早白垩世金矿被认为与克拉通破坏阶段伸展构造体制下的岩浆活动密切相关，有别于典型的造山型金矿（朱日祥等, 2015; 陈煜嵩等, 2020）。

吉林南部（吉南）位于华北克拉通北缘东北段，欧亚板块东部边缘（图 1），主要包括通化-白山-临江地区。中生代期间，该区域受蒙古-鄂霍茨克构造体系、扬子克拉通与华北克拉通碰撞体系，以及环太平洋构造体系多重构造叠加影响，形成了复杂的地质构造背景。区内中生代侵入岩具有多阶段性特征，是研究吉南中生代构造演化及古太平洋俯冲历史的理想场所（Wu *et al.*, 2005; 许文良等, 2013; Keevil *et al.*, 2019）。早-中侏罗世（179~162Ma）岩浆作用包括草山岩体、老秃顶子岩体、梨树沟岩体、遥林岩体、驮道沟岩体和新路岩体（秦亚, 2010; 高天宇等, 2019; Keevil *et al.*, 2019; 陈煜嵩, 2022; Chen *et al.*, 2023）。有学者认为早侏罗世岩体的形成仍然与华南板块向华北板块的俯冲碰撞有关（秦亚, 2010），而中侏罗世岩体可能形成于古太平洋板块向华北板块俯冲阶段（高天宇

等, 2019; Keevil *et al.*, 2019)。

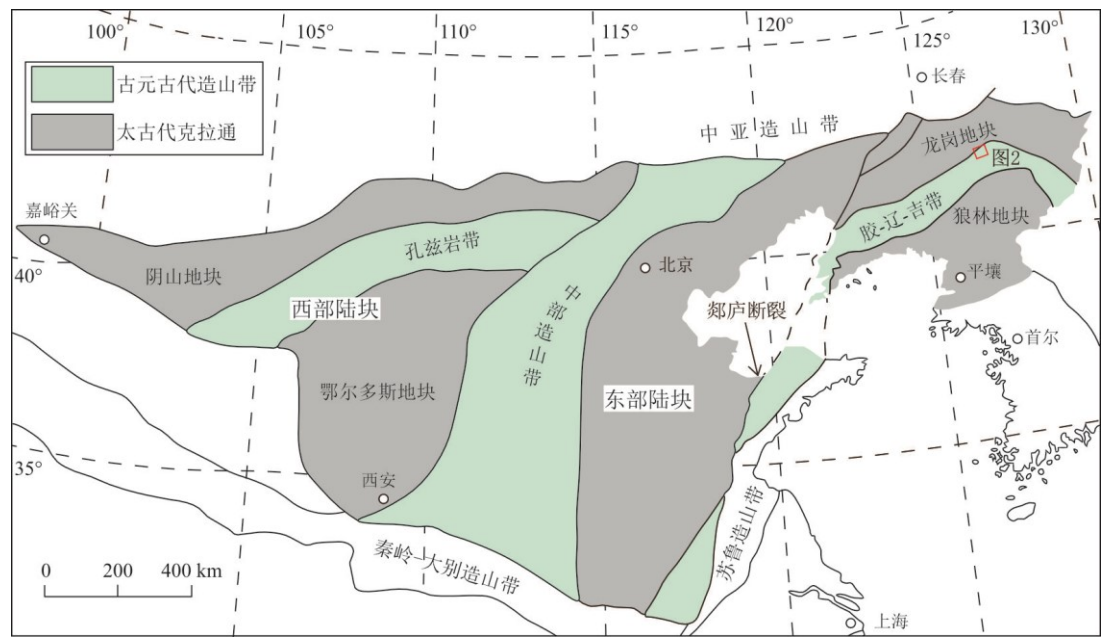


图 1 华北克拉通大地构造单元图

Fig. 1 Tectonic unit map of the North China Craton

据 Zhao *et al.* (2012)和 Liu *et al.* (2025)修改

此外，吉南地区发育老岭成矿带，其中金矿集中分布于北东向断裂带及中生代断陷盆地边缘，代表性矿床除金英和荒沟山大型金矿床外，还包括南岔、小石人、淘金沟、大青沟和八里沟等众多中小型金矿床（点）（李宝毅等，2010）。金英金矿床由金英主矿区和板石沟几处金矿（床）点构成，包括东大坡金矿、吊水壶金矿点和狼洞沟金矿点。其中，金英主矿区（又称板庙子或大板石）为现阶段工业开采的主要矿体，已查明资源矿石量 1377.5 万吨，Au 金属量约 52.25 吨，平均品位 3.79 克/吨。东大坡金矿（又称小板石）坑道已揭露 7 条矿（化）体，是金英主矿区外围找矿的良好区域。不同于胶东和辽东金矿集区，目前对吉南特别是金英金矿床的研究程度仍较低（Hart *et al.*, 2002; 刘文香等，2009; 张建泽，2015; 陈煜嵩等，2020; Zhang *et al.*, 2023; Keevil *et al.*, 2024）。部分学者认为金英金矿床属于浅成低温热液型或造山型金矿，其形成与燕山期尤其是中侏罗世（172~166Ma）花岗闪长斑岩和火山碎屑岩（张建泽，2015; Keevil *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020）或早白垩世（130~123Ma）花岗闪长斑岩和闪长玢岩（Keevil *et al.*, 2019; 陈煜嵩等，2020; Zhang *et al.*, 2023）有关。最近，有学者对该金矿床黄铁矿样品开展了 Rb-Sr 测年，结果显示其等时线年龄为 $120\pm 3\text{Ma}$ ，表明金矿化与早白垩世岩浆作用关系更加密切（Zhang *et al.*, 2023）。

此外，也有国外学者依据金英金矿床深部及周边广泛发育中生代岩浆作用的特点，提出其成因类型可能类似“沉积岩容矿型”（Sedimentary Rock-Hosted）金矿床的新论断（Keevil *et al.*, 2024）。由于吉南白山地区广泛为植被覆盖，有关该区中侏罗世-早白垩世岩浆作用构造产出背景的认识同样没有达成一致，提出的构造模型包括古太平洋板块向华北板块俯冲（张建泽，2015）或伸展背景（陈煜嵩等，2020；玄雨菲等，2022；Zhang *et al.*, 2023）。也有研究认为华北克拉通岩石圈拆沉作用在早白垩世达到了峰期（Zhu *et al.*, 2011；Li and Santosh, 2014；Wu *et al.*, 2019），而其起始岩石圈拆沉作用可能发生在中侏罗世（Keevil *et al.*, 2019）或晚三叠世（陈煜嵩等，2020）。因此，本文以吉南白山地区金英金矿床出露的中侏罗世-早白垩世岩浆岩为研究对象，通过岩相学、锆石 U-Pb 年代学和全岩主-微量元素地球化学研究，探究其岩石成因和构造产出环境。在综述区域中侏罗世-早白垩世岩浆岩产出特征的前提下，本研究重点探讨该区岩浆岩同金成矿作用的关系，进一步约束金英金矿床的成因类型。

1 区域地质概况

华北克拉通通常划分为西部陆块、东部陆块，以及中部造山带（图1），漫长的演化过程包含了多期陆壳生长事件、裂谷作用和岩浆事件（Zhao *et al.*, 2005, 2012；Windley *et al.*, 2010；Zhai and Santosh, 2011；Zhang *et al.*, 2023）。其中，东部陆块由龙岗地块、狼林地块及它们之间的胶-辽-吉带组成，而吉南地区横跨龙岗地块和胶-辽-吉带（图1, Zhai and Santosh, 2011；鞠楠等，2024）。龙岗地块是华北克拉通内典型的太古宙基底出露区之一，岩石组合以太古代TTG岩石（英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩）、钾质花岗岩和少量表壳岩为主，其上记录了3.80~2.50Ga构造-岩浆事件（李鹏川等，2016；Liu *et al.*, 2025）。古元古代胶-辽-吉带由绿片岩相至麻粒岩相变质的火山-沉积岩系组成，记录了古元古代早期裂谷拉张至晚期碰撞造山的全过程，其中包括裂解阶段、俯冲阶段和碰撞阶段（鞠楠等，2024）。吉南地区以老龄群为代表，其下亚群包含林家沟组和珍珠门组。老龄群岩石类型主要包括白云质大理岩、碳质板岩及少量角砾状大理岩，区域上与周边太古宙结晶基底呈断层接触，与新元古代-古生代沉积盖层为角度不整合接触（陈煜嵩等，2020）。其中珍珠

门组以灰白色大理岩、白云质大理岩为代表，含叠层石和核形石，形成于潮坪碳酸盐台地，与周围地质体呈断层接触（陈煜嵩等，2020）。值得注意的是，新元古界青白口系钓鱼台组石英砂岩与下伏珍珠门组大理岩呈角度不整合接触，从白山地区元宝顶子延伸至板石镇，长度约20公里，标志着一区域性构造抬升事件。勘查结果表明，金英金矿矿区中的金矿体赋存在硅化构造角砾岩带中，即钓鱼台组与下伏老岭群珍珠门组的不整合接触带中（陈煜嵩等，2020）。新元古代至古生代，白山地区转入相对稳定的克拉通盖层发育阶段，沉积序列完整。其中，浑江向斜盆地核心部分由晚古生代地层构成，轴向北东，轴面近乎垂直地面；其北西翼地层出露清晰，从核部向外依次展露出晚古生代、早古生代直至新元古代的地层序列。

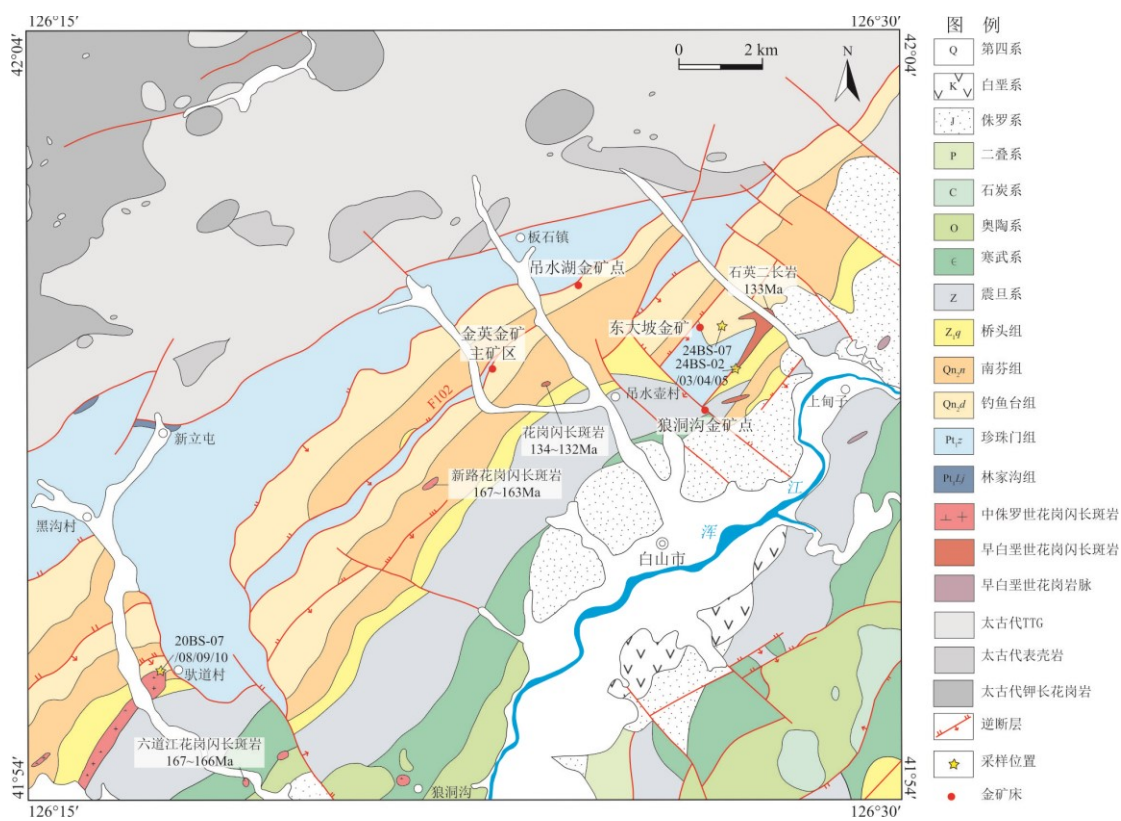


图 2 吉南金英金矿床及周缘地质简图及采样位置

Fig. 2 Geological map of the Jinying gold deposit and its surrounding area, southern Jilin, with sampling locations
修改自吉林省有色金属地质勘查局六〇二队（2021）1：5 万《吉林省白山市板石沟金矿区区域地质图》

中生代是白山地区构造体制转换的关键期，受古太平洋板块俯冲影响，发育浑江断陷盆地，充填有侏罗系-白垩系火山-沉积序列。该区域中生代侵入岩以花岗闪长斑岩为主，主要呈岩墙或小规模岩株的形式分布于六道江、驮道沟、洞沟等地（高天宇等，2019；

Keevil *et al.*, 2019)。这些岩体侵入于新元古代和古生代地层中，具有零星分布的特点。这些中生代岩浆活动主要集中在中侏罗世晚期，早白垩世岩浆岩出露面积很小，仅在研究区东北角吊水壶一带以岩株状零星分布，岩性为花岗闪长斑岩、闪长玢岩、流纹斑岩和石英斑岩（高天宇等, 2019; Keevil *et al.*, 2019; 陈煜嵩等, 2020; 玄雨菲等, 2022）。中侏罗世侵入岩以钙碱性岩石类型为代表，具有高硅、富铝、高钾、低镁为特征，显示出富集大离子亲石元素和亏损高场强元素的典型弧岩浆特征，部分花岗岩表现出埃达克质特征（高天宇等, 2019; 陈煜嵩等, 2020）。相比较下，早白垩世花岗闪长斑岩属准铝质-弱过铝质高钾钙碱性系列高镁埃达克质岩石，据 Pearce *et al.* (1984) 分类属火山弧范围（Keevil *et al.*, 2019）。

2 岩石学特征

本文对吉南金英金矿床驮道沟和东大坡地区出露中生代侵入岩进行采样，具体采样位置见图2。选取驮道沟地区出露的花岗闪长斑岩（20BS-07/08/09/10，GPS：41°55'41"N；126°17'19.94"E），金英金矿东大坡出露的花岗闪长斑岩（24BS-02/03/04/05，GPS：41°59'43"N；126°27'12"E）和KC10号勘查线DZK1005段花岗斑岩岩心（24BS-07，GPS：42°0'2"N；126°26'52"E）开展详细研究。

花岗闪长斑岩样品（20BS-10）新鲜面为灰白色，斑状结构，块状构造（图3a），其中斑晶为斜长石（60%）、角闪石（30%）和黑云母（10%）。基质具微粒或隐晶质结构，成分与斑晶一致，但含量有所出入（图3b）。斜长石呈自形至半自形柱状，粒径为0.3~1.2mm，发育有聚片双晶。角闪石呈自形长柱状，具有强烈的多色性（为浅绿到墨绿），粒径为1~2.5mm，横截面上有两组斜交的完全解理，普遍发生绿泥石化。黑云母呈自形片状，具有强烈的多色性（浅黄到深褐），粒径为0.2~1.0mm，发育一组极完全解理，局部发生绿泥石化（图3c）。

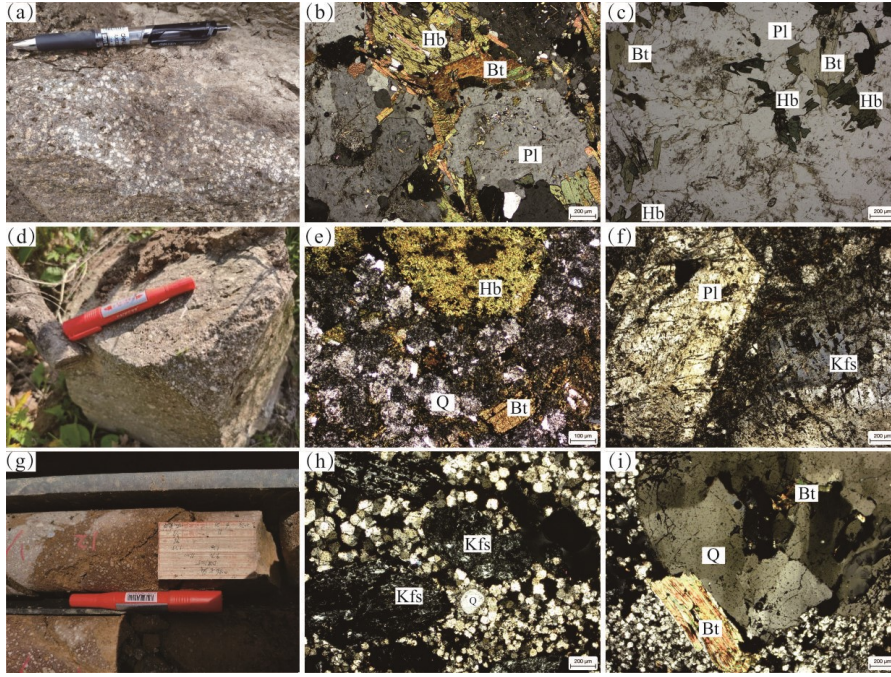


图3 吉南白山地区中生代侵入岩野外和显微照片

Fig. 3 Field and microscopic characteristics of Mesozoic plutonic rocks in the Baishan area of the southern Jilin

图a、b、c为花岗闪长斑岩（20BS-10）；图d、e、f为花岗闪长斑岩（24BS-02）；图g、h、i为花岗斑岩（24BS-07）。Pl-斜长石；Hb-角闪石；Q-石英；Bt-黑云母；Kfs-碱性长石

花岗闪长斑岩样品（24BS-02）新鲜面呈青灰色，风化面呈黄褐色，斑状结构，块状构造（图3d）。斑晶为斜长石（65%）、角闪石（20%）、黑云母（5%）、石英（5%）和碱性长石（5%）（图3e）。基质呈微晶质结构，含量约为65%，此外还含有玻璃质（35%）。斜长石呈自形-半自形板状，无色透明，粒径约为0.2~3mm，部分斜长石可见波状消光，存在不同程度的绢云母化。角闪石具微弱的多色性（淡绿色至黄绿色），呈半自形-他形长柱状，粒径约0.5~2.5mm，分布发生了绿泥石化。黑云母具有较强的多色性（浅黄至深褐），呈半自形-自形片状，粒径约为0.2~1mm，横切面发育有一组极完全解理。石英呈无色透明呈他形粒状，粒径约0.2~1mm，部分呈现波状消光。碱性长石为无色透明，呈半自形-他形板条状，粒径约0.5~1mm，大多呈现高岭土化，具有典型的条纹结构（图3f）。

花岗斑岩样品（24BS-07）新鲜面呈肉红色，呈斑状结构，块状构造（图3g）。斑晶主要为碱性长石（50%）、斜长石（30%）、石英（12%）及黑云母（8%）。基质为暗色矿物及石英集合体（85%）和玻璃质（15%）。碱性长石斑晶呈半自形粒状，无色透明，

粒径约0.5~1.5mm，具有典型的条纹结构（图3h）。斜长石斑晶呈自形-半自形板状，无色透明，粒径约为0.2~4mm，部分发生绢云母化。石英斑晶呈他形粒状，粒径约0.2~2mm，无色透明，正低突起。黑云母呈半自形-自形片状，具有强烈的多色性（从浅黄到深褐），粒径约为0.2~1mm，发育有一组极完全解理（图3i）。

3 分析方法

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

本次对三件中生代侵入岩样品（20BS-10、24BS-02和24BS-07）开展了锆石U-Pb定年分析。首先，委托河北廊坊诚信地质服务有限公司进行样品的粉碎和锆石分选工作。然后，委托北京锆年领航科技有限公司在偏光显微镜下进行透射光、反射光照相以及对锆石靶进行镀金处理，并利用装有英国Gatan 阴极荧光探头的日本电子JSM6510 型电子显微镜采集阴极发光（CL）图像。样品20BS-10的锆石U-Pb定年测试在北京科荟测试技术有限公司完成，数据采集利用激光剥蚀-电感耦合等离子质谱仪（LA-ICP-MS）技术，仪器型号为AnalytikJena PQMS Elite型，配套的激光剥蚀系统为RESolution 193nm。剥蚀过程中，激光斑束直径调控至24 μ m，频率设定为10Hz，能量密度控制在10J/cm²，并以氦气（He）作为载气。实验采用GJ-1作为外部标样。其余两件样品（24BS-02和24BS-07）的锆石U-Pb定年测试在中国地质调查局沈阳地质调查中心（东北地质科技创新中心）完成，激光系统为美国Coherent公司的Geolas Pro 193nmArF准分子激光器，质谱系统采用美国ThermoFisher Scientific公司的ELEMENT II扇形磁场高分辨电感耦合等离子体质谱仪。激光剥蚀过程采用5Hz频率，32 μ m 直径的激光斑束，采用锆石标样Plešovice作为监测标准物质。详细的实验方法和参数见Liu *et al.*（2008）。利用数据处理软件ICPMS DataCal和Isoplot 4.0（Ludwig, 2003）进行数据调试和锆石U-Pb谐和图、年龄加权平均值计算。本文只考虑不谐和度值低于5%的分析点，数据结果见附表1。

3.2 全岩主-微量元素分析

选取 7 件样品在北京科荟测试技术有限公司进行全岩主-微量元素分析。主量元素采用X 射线荧光光谱法（XRF），制备玻璃熔片进行分析。主量元素分析精度和准确度优于 5%。

微量元素采用电感耦合等离子质谱法（ICP-MS）分析。样品制备采用混合酸溶样法完成，并在离子质谱仪上进行测定。微量元素分析精度和准确度一般优于 10%，数据结果见附表 2。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

花岗闪长斑岩样品（20BS-10）锆石以板柱状为主，长150~200 μm ，长宽比1:1~4:1，具有明显的振荡环带（图4a）。除去10个谐和度低于95%的分析点，其余10个分析点的Th含量变化于 44×10^{-6} ~ 267×10^{-6} ，U含量变化于 157×10^{-6} ~ 353×10^{-6} （附表1），Th/U比值在0.26~0.76（附表1）。共计10个谐和分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为163~169Ma，年龄值较一致且均落在谐和线附近（图4a），它们的年龄加权平均值为 $165\pm 1\text{Ma}$ （MSWD=1.10，图4b）。

花岗闪长斑岩样品（24BS-02）锆石以长柱状为主，长155~200 μm ，长宽比3:2~4:1，具有明显的振荡环带（图4c）。除去11个谐和度低于95%的分析点，其余12个分析点的Th含量变化于 33×10^{-6} ~ 486×10^{-6} ，U含量变化于 172×10^{-6} ~ 1936×10^{-6} ，Th/U比值在0.10~0.97（附表1）。除去8颗较老的捕获锆石年龄（ $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为2625Ma、2507Ma、2509Ma； $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为230Ma、229Ma、228Ma、223Ma、193Ma），剩余4个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为129~131Ma，年龄值较一致且均落在谐和线附近（图4c），它们的年龄加权平均值为 $130\pm 1\text{Ma}$ （MSWD=0.17，图4d）。

花岗斑岩样品（24BS-07）锆石以板柱状为主，半自形到自形，长125~220 μm ，长宽比3:2~4:1，具有明显的振荡环带（图4e）。除去12个谐和度低于95%的捕获锆石的分析点，其余8个分析点的Th含量变化于 51×10^{-6} ~ 480×10^{-6} ，U含量变化于 531×10^{-6} ~ 2791×10^{-6} ，Th/U比值在0.10~0.57（附表1）。除去一颗捕获锆石的较老年龄（ $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为2485Ma），剩余7个谐和分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为129~134Ma，年龄值较一致且落在谐和线附近（图4e），其年龄加权平均值为 $131\pm 2\text{Ma}$ （MSWD=1.60，图4f）。

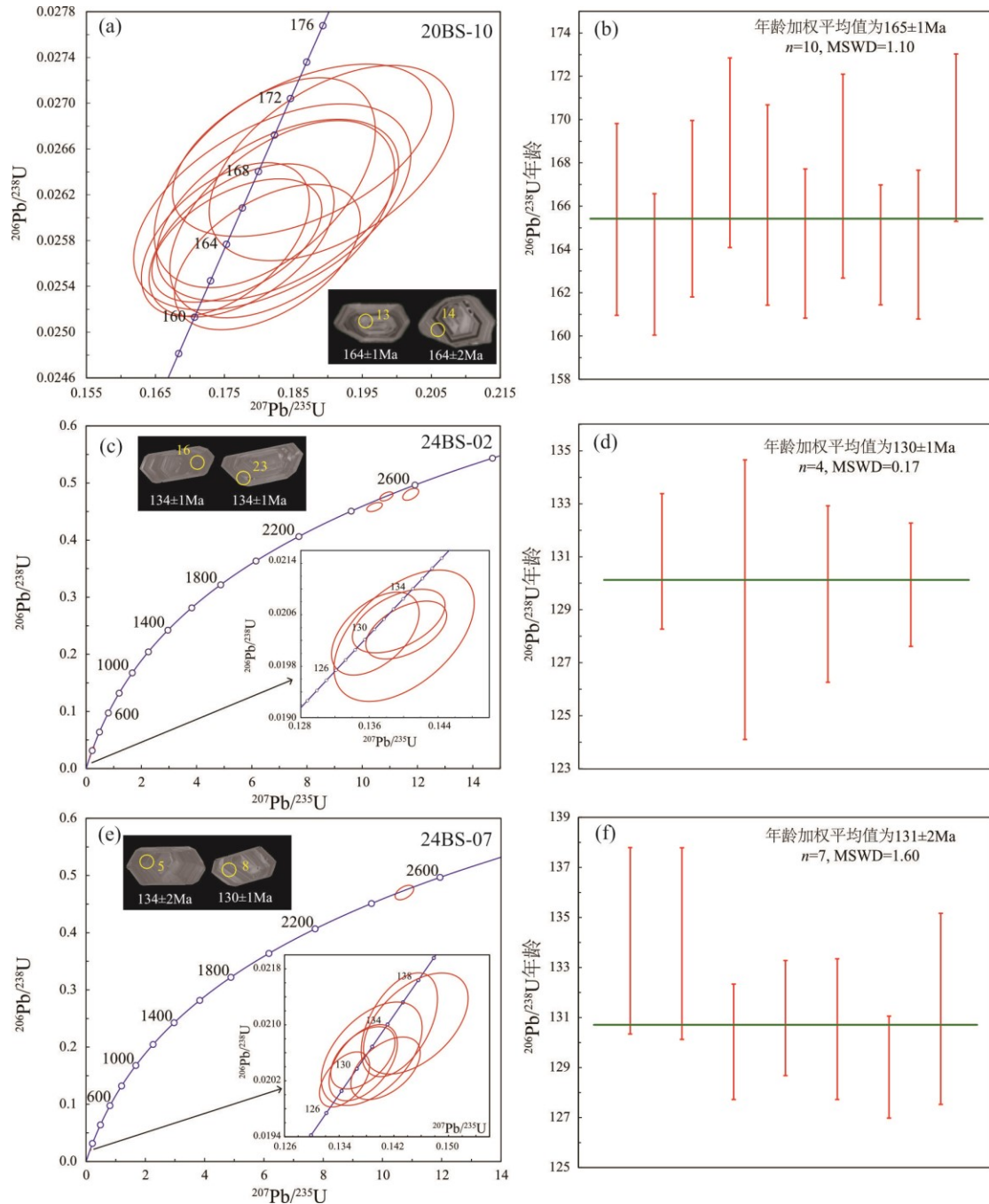


图4 吉南白山地区中生代侵入岩的锆石U-Pb谐和图、代表性锆石阴极发光图像及年龄加权平均值

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams, representative cathodoluminescence (CL) images, and weighted average ages of Mesozoic plutonic rocks from the Baishan area, southern Jilin

4.2 全岩主-微量地球化学特征

中侏罗世花岗闪长斑岩（20BS-07/08/09/10）扣除烧失量（LOI）之后 SiO_2 的含量为 66.03%~66.49%，表明样品为酸性岩类。样品的全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)含量为 6.10%~7.43%，在 TAS 图解中落入花岗闪长岩区域（图 5a）；在 SiO_2 - K_2O 图解中落入钙碱性系列区域（图

5b)。样品的 Al_2O_3 、 MgO 和 CaO 含量分别为 16.65%~17.00%、1.74%~1.83% 和 2.96%~4.51%，铝饱和指数(A/CNK)值介于 0.98~1.05 之间（附表 2），在 A/CNK-A/NK 图中落入准铝质和弱过铝质岩石区域（图 5c）。稀土元素方面，花岗闪长斑岩的稀土元素总量（ ΣREE ）为 81.54×10^{-6} ~ 170.55×10^{-6} ， $\text{LREE}/\text{HREE}=4.35\sim 9.14$ ， $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=18.03\sim 40.32$ （附表 2），轻重稀土元素分馏明显（图 6a）。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图中，花岗闪长斑岩呈显著右倾型（图 6a），铈（ $\delta\text{Eu}=0.96\sim 1.03$ ）和铈（ $\delta\text{Ce}=0.89\sim 0.93$ ）异常均不明显。样品的原始地幔标准化微量元素蛛网图显示，其富集 Ba、K 等大离子亲石元素（LILE），亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素（HFSE）（图 6b）。

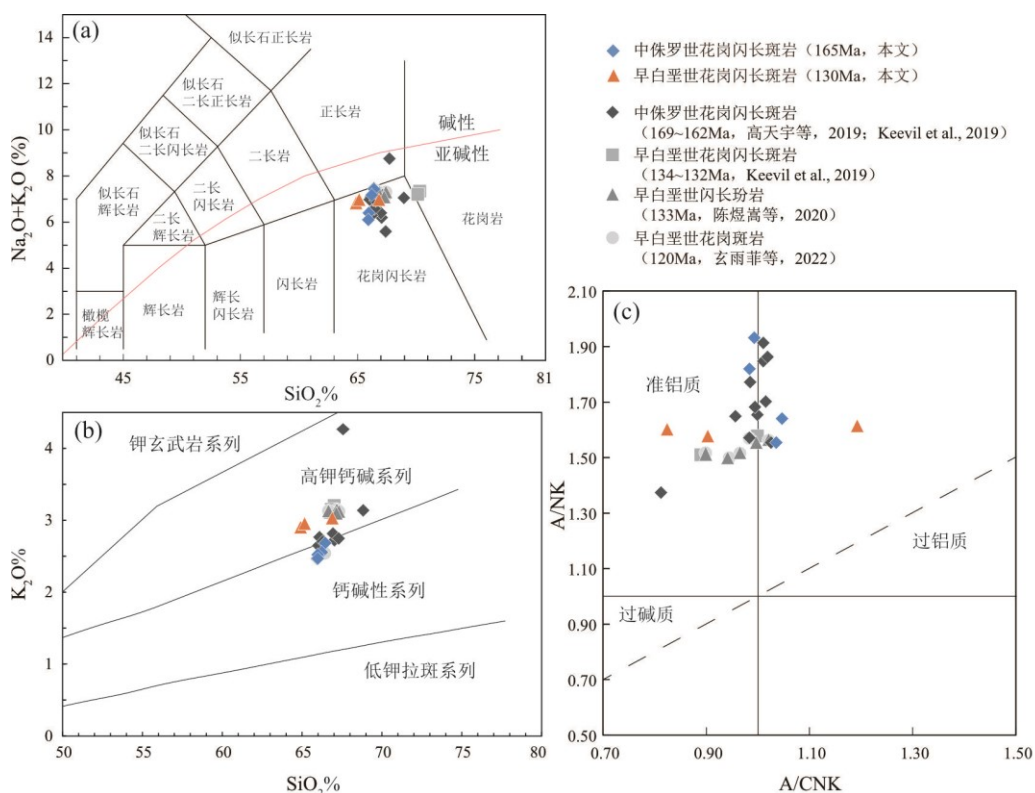


图 5 吉南白山地区中生代侵入岩主量元素图解

Fig. 5 Major element diagrams of Mesozoic plutonic rocks from the Baishan area of the southern Jilin

(a) 硅-全碱 TAS 图解（据 Le Bas *et al.*, 1986），碱性和亚碱性边界据 Irvine and Baragar (1971)；(b) SiO_2 - K_2O 图解，据 Peccerillo and Taylor (1976)；(c) A/CNK-A/NK 图解，据 Pearce (1996)

早白垩世花岗闪长斑岩（24BS-03/04/05）扣除烧失量之后 SiO_2 的含量为 64.94%~66.94%，表明样品介于中性和酸性岩类之间。样品的全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)含量为 6.82%~6.98%，在 TAS 图解中落入花岗闪长岩区域（图 5a）；在 SiO_2 - K_2O 图解中落入高

钾钙碱性系列区域（图 5b）。样品中 Al_2O_3 、 MgO 和 CaO 的含量分别为 15.41%~15.84%、2.84%~3.17%和 1.90%~5.02%，铝饱和指数(A/CNK)为 0.82~1.19（附表 2），在 A/CNK-A/NK 图中落入准铝质岩石区域（图 5c）。稀土元素方面，花岗闪长斑岩的稀土元素总量（ ΣREE ）为 117.64×10^{-6} ~ 139.35×10^{-6} ， $\text{LREE}/\text{HREE}=5.26$ ~ 6.94 ， $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=20.61$ ~ 27.38 （附表 2）。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图中，花岗闪长斑岩的稀土元素配分曲线表现为右倾型（图 6c），铈（ $\delta\text{Eu}=0.90$ ~ 0.92 ）和铈（ $\delta\text{Ce}=0.81$ ~ 0.92 ）异常较弱。样品的原始地幔标准化微量元素蛛网图显示，其富集 Ba、K 等大离子亲石元素（LILE），亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素（HFSE）（图 6d）。

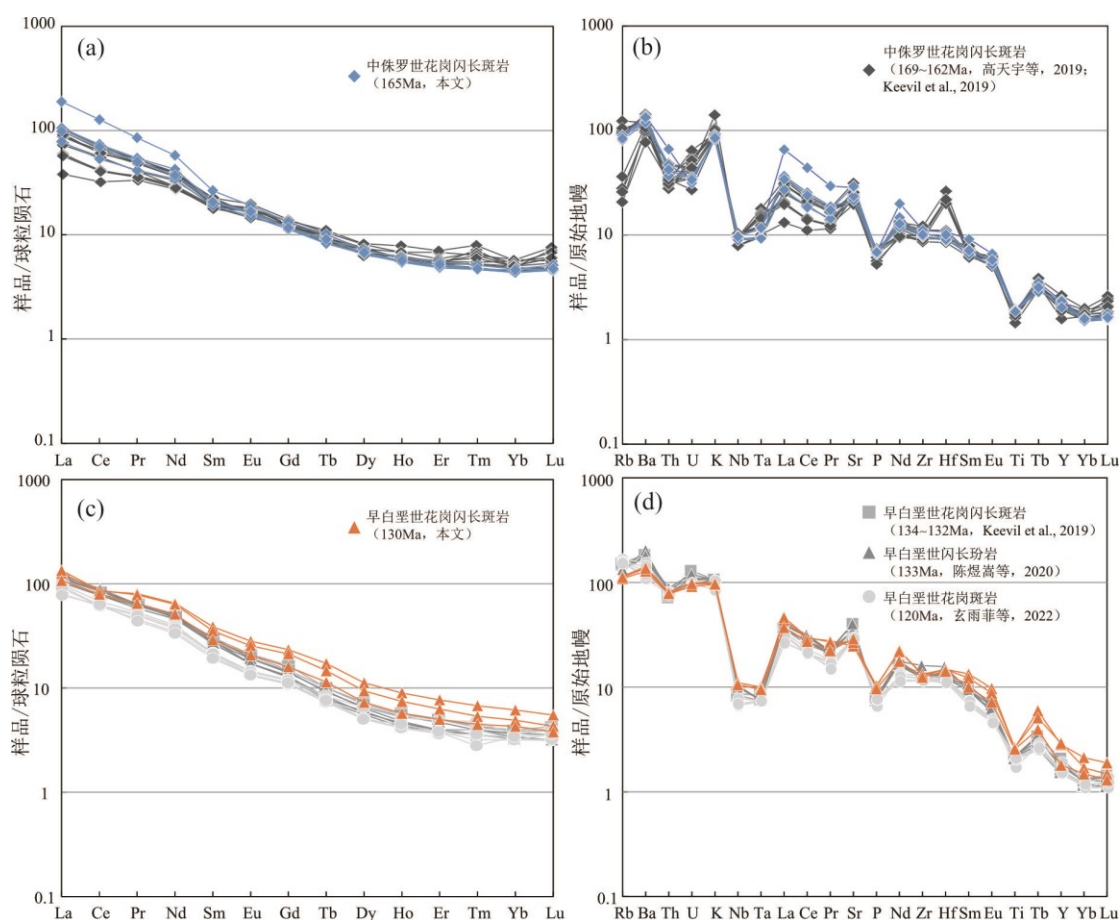


图 6 吉南白山地区中生代侵入岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式（a、c）和原始地幔标准化微量元素蛛网图（b、d）

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spiderdiagrams for Mesozoic plutonic rocks from the Baishan area of the southern Jilin

球粒陨石和原始地幔数值据 Sun and McDonough, 1989

5 讨论

5.1 吉南白山地区中侏罗世-早白垩世岩浆活动

前人曾报道驮道沟花岗闪长斑岩的锆石U-Pb年龄分别为 $169\pm 1\text{Ma}$ (Keevil *et al.*, 2019) 和 $162\pm 2\text{Ma}$ (高天宇等, 2019)。本文驮道沟花岗闪长斑岩样品(20BS-10)的锆石发育振荡环带(图4a), Th/U比值(0.26~0.76)均大于0.1, 表明其为岩浆成因。因此, 样品(20BS-10) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值 $165\pm 1\text{Ma}$ (MSWD=1.10), 连同上述已有年代学资料, 共同指示驮道沟花岗闪长斑岩的形成时代为中侏罗世, 而并非原地质图中定义的晚三叠世(T_3l)。在吉南白山地区, 中侏罗世岩浆岩包括在六道江和新路地区的花岗闪长斑岩, 其锆石年龄范围为169~162Ma (图2, 表1)。此外, 在狼洞沟和姚家沟地区还出露有中侏罗世火山角砾岩, 其锆石年龄范围为172~171Ma (图2, 表1)。吉南白山地区中生代侵入岩已发表锆石U-Pb年龄统计结果显示(图7), 该地区中侏罗世是该区中生代的首个构造-岩浆活动峰期(高天宇等, 2019; Keevil *et al.*, 2019)。

东大坡花岗闪长斑岩样品(24BS-02)锆石具有明显的振荡环带(图4c), Th/U比值在0.10~0.97(附表1)。DZK1005段花岗斑岩岩心样品(24BS-07)锆石发育明显的振荡环带(图4e), Th/U比值在0.10~0.57(附表1)。以上特征表明二者均为岩浆锆石起源。上述两件样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值分别是 $130\pm 1\text{Ma}$ (MSWD=0.17) 和 $131\pm 2\text{Ma}$ (MSWD=1.60), 代表花岗闪长斑岩和花岗斑岩岩心侵位年龄均为早白垩世。区域上, 早白垩世花岗闪长斑岩、闪长玢岩、二长闪长斑岩和斑状石英二长岩在东大坡附近的吊水壶和木局沟已有报道(Keevil *et al.*, 2019; 陈煜嵩等, 2020; 玄雨菲等, 2022), 其锆石年龄范围为134~128Ma (图2, 表1)。根据区域已发表火山岩资料, 同期(早白垩世)凝灰岩和火山角砾岩在胜利村、姚家沟、利民村地区的锆石年龄范围为127~120Ma (图2, 表1)。由此可见, 本文新报道的东大坡花岗闪长斑岩和花岗斑岩岩心样品对进一步完善吉南白山地区早白垩世岩浆活动时空分布具有重要意义, 吉南白山地区中生代构造-岩浆活动在早白垩世达到峰期(图7, Keevil *et al.*, 2019; 陈煜嵩等, 2020; 玄雨菲等, 2022)。

表 1 吉南白山地区中侏罗世-早白垩世岩浆岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄统计

Table 1 A summary of LA-ICP-MS zircon U-Pb ages for the Middle Jurassic to Early Cretaceous igneous rocks from the Baishan area of the southern Jilin

样品号	地名	岩性	GPS 采样位置	年龄± 误差 (Ma)	参考文献
F-151	狼洞沟	火山角砾岩	41°53'57.275"N; 126°21'30.298"E	172±1	Keevil <i>et al.</i> , 2019
F-069	姚家沟	火山角砾岩	41°54'35.844"N; 126°34'48.064"E	171±2	Keevil <i>et al.</i> , 2019
F-025	驮道沟	花岗闪长斑岩	41°55'31.263"N; 126°17'0.948"E	169±1	Keevil <i>et al.</i> , 2019
F-031	新路	花岗闪长斑岩	41°57'32.053"N; 126°20'47.763"E	167±1	Keevil <i>et al.</i> , 2019
F-039	六道江	花岗闪长斑岩	126°18'51.538"N; 41°54'3.932"E	167±1	Keevil <i>et al.</i> , 2019
F-037	六道江	花岗闪长斑岩	41°54'5.359"N; 126°18'51.565"E	166±1	Keevil <i>et al.</i> , 2019
20BS-10	驮道沟	花岗闪长斑岩	41°55'41"N; 126°17'19.94"E	165±1	本文
XN-1	新路	花岗闪长斑岩	42°01'12"N; 126°27'30"E	163±1	高天宇等, 2019
TD-1	驮道沟	花岗闪长斑岩	41°53'25"N; 126°14'29"E	162±2	高天宇等, 2019
F-092	吊水壶	花岗闪长斑岩	41°59'39.102"N; 126°23'52.884"E	134±1	Keevil <i>et al.</i> , 2019
DN-1	吊水壶	闪长玢岩	41°59'37"N; 126°24'9"E	133±1	陈煜嵩等, 2020
F-051	东大坡	斑状石英二长岩	42°0'13.21"N; 126°28'0.689"E	133±1	Keevil <i>et al.</i> , 2019
C-P-1	吊水壶	花岗闪长斑岩	41°59'20.98"N; 126°22'50.262"E	132±1	Keevil <i>et al.</i> , 2019
24BS-02	东大坡	花岗闪长斑岩	41°59'43"N; 126°27'12"E	130±1	本文
24BS-07	东大坡	花岗斑岩	42°0'2"N; 126°26'52"E	131±2	本文
F-131	横道河	凝灰岩	41°51'36.948"N; 126°18'10.553"E	128±1	Keevil <i>et al.</i> , 2019
F-065	木局沟	二长闪长斑岩	42°5'7.313"N; 126°34'42.199"E	128±1	Keevil <i>et al.</i> , 2019
F-027	胜利村	凝灰岩	41°53'22.989"N; 126°20'38.994"E	127±1	Keevil <i>et al.</i> , 2019
F-079	姚家沟	火山角砾岩	41°55'7.861"N; 126°34'18.16"E	123±1	Keevil <i>et al.</i> , 2019
F-054	利民村	火山角砾岩	42°2'33.066"N; 126°34'4.394"E	122±1	Keevil <i>et al.</i> , 2019
20JN13-1	果松组	凝灰岩	42°3'4"N; 126°34'5"E	120±1	玄雨菲等, 2022

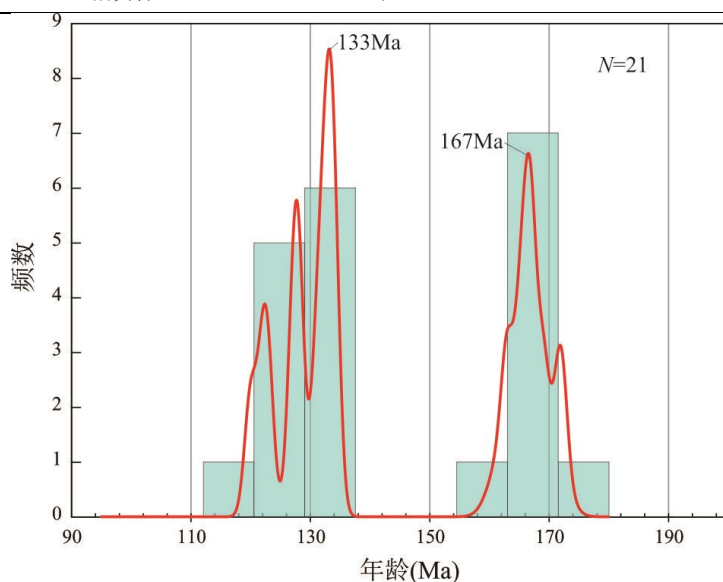


图7 吉南白山地区中生代岩浆岩锆石U-Pb年龄概率密度图

Fig. 7 Probability density diagram of zircon U-Pb ages of Mesozoic magmatic rocks from the Baishan area of the southern Jilin

数据来源见表1

5.2 岩石成因

5.2.1 中侏罗世花岗闪长斑岩

驮道沟花岗闪长斑岩的烧失量 (LOI) 较低 (1.41%~3.46%, 附表 2), 暗示未受显著后期蚀变作用影响。花岗闪长斑岩 (图 5a) 具高硅 ($\text{SiO}_2=66.03\%\sim66.49\%$)、富碱 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=6.10\%\sim7.43\%$) 特征, 属于钙碱性 (图 5b) 和准铝质花岗岩 (图 5c)。样品矿物组合以石英、长石和角闪石为主 (图 3b), 含少量黑云母, 未见 S 型或 A 型花岗岩标志矿物。此外, 样品 $10000\times\text{Ga}/\text{Al}$ 比值 (2.00~2.23) 低于 <2.60 (Whalen *et al.*, 1987), 在 $10000\times\text{Ga}/\text{Al}-\text{Nb}$ 图解中落入 I 型花岗岩区域 (图 8a), 而在 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ 图解中投入未分异 I 型花岗岩区域 (图 8b)。综上, 推测吉南白山地区中侏罗世花岗闪长斑岩应为准铝质 I 型花岗岩。

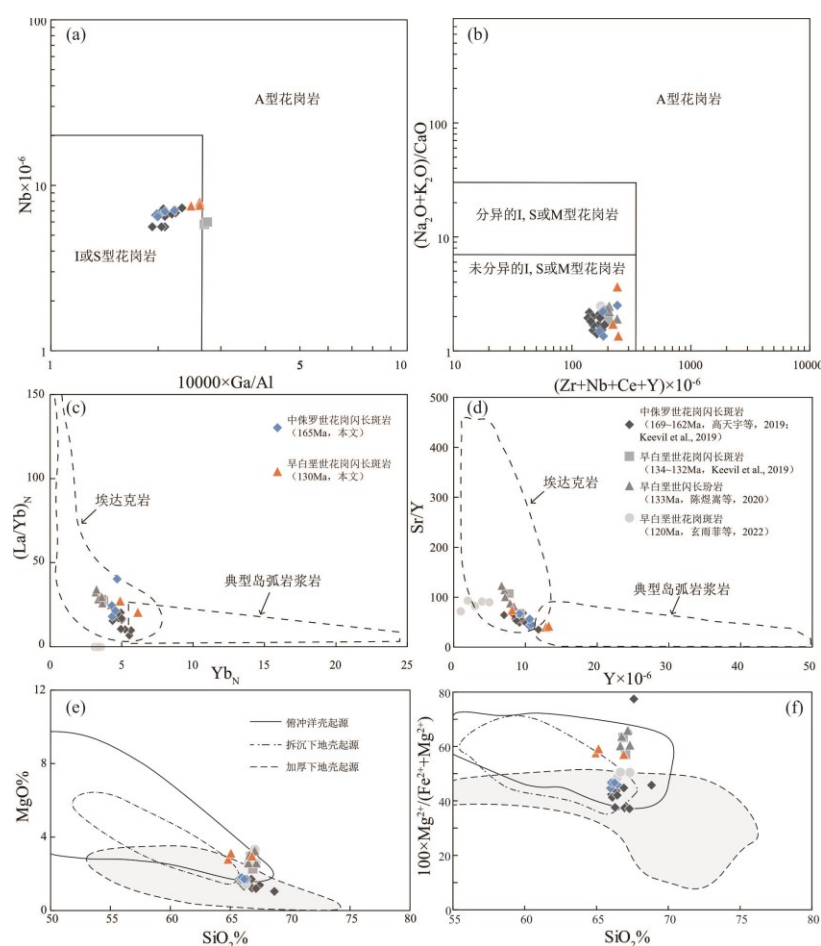


图 8 吉南白山地区中生代侵入岩成因类型判别图 (据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 8 Petrogenetic discrimination diagrams of Mesozoic plutonic rocks from the Baishan area of the southern Jilin

花岗闪长斑岩样品富集轻稀土 ($\text{LREE/HREE}=4.35\sim9.14$) 和大离子亲石元素 (例如 Ba、K 等), 而亏损高场强元素 (例如 Nb、Ta、Ti 等) (图 6b)。它们的 $\text{Mg}^\#$ ($45\sim47$) 值较低, Nb/Ta 比值 ($14.35\sim16.89$) 低于原始地幔值 (17.5), 表明其可能为镁铁质地壳部分熔融的产物, 幔源熔体贡献较为有限 (Ma *et al.*, 2013; 张宇婷等, 2022)。Nb 和 Ti 负异常表明源区可能含有角闪石和金红石。此外, 中侏罗世花岗闪长斑岩具有较高的 Sr 含量 ($453.88\times10^{-6}\sim618.99\times10^{-6}$) 和较低的 Y 含量 ($9.23\times10^{-6}\sim10.87\times10^{-6}$), 其较高的 $(\text{La/Yb})_N$ ($18.03\sim40.32$) 和 Sr/Y ($42.87\sim67.06$) 值类似于埃达克质岩石 (图 8c, 8d), 反映了榴辉岩或石榴角闪岩的熔融作用 (Richards and Kerrich, 2007)。通常来讲, 埃达克质岩石的形成可能归因于四种不同的成因机制: 俯冲洋壳的部分熔融 (Defant and Drummond, 1990); 经历玄武质母岩浆的结晶分异和岩浆混合 (AFC 过程) 所产生 (Wareham *et al.*, 1997; 张宇婷等, 2022); 拆沉下地壳部分熔融 (Kay *et al.*, 1993; Gao *et al.*, 2004; Ma *et al.*, 2013); 加厚下地壳部分熔融 (Hou *et al.*, 2004; Ma *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2020)。

首先, 驮道沟花岗闪长斑岩富钾且表现出较低的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值 ($1.43\sim1.81$), 而典型俯冲洋壳部分熔融成因的埃达克岩具有贫钾、富钠和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值 >12 等特征 (Defant and Drummond, 1990), 证明其很可能不是俯冲洋壳部分熔融所形成的。玄武质岩浆经历 AFC 过程通常形成一系列从基性到酸性的岩石。然而, 在研究区域内目前并未发现同期的中基性侵入岩, 同时本文样品并不具有明显的铕异常 ($\delta\text{Eu}=0.96\sim1.03$), 共同指示中侏罗世花岗闪长斑岩并非源于典型的玄武质岩浆 AFC 过程 (Wareham *et al.*, 1997)。驮道沟花岗闪长斑岩贫镁 ($\text{MgO}=1.74\%\sim1.83\%$) 和 Cr ($10.31\times10^{-6}\sim13.02\times10^{-6}$) 且 $\text{Mg}^\#$ ($45\sim47$) 值偏低, 这些特征与由拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克质岩石特征 ($\text{MgO}>3\%$, 高 Cr 含量, $\text{Mg}^\#$ 值 >50) 不符。已有实验岩石学研究显示, 加厚下地壳部分熔融的产物一般具有 $\text{Mg}^\#$ 值 <45 (Rapp and Watson, 1995), 并且驮道沟花岗闪长斑岩样品全部落入加厚下地壳部分熔融的埃达克质岩石区域 (图 8e, 8f)。值得提及的是, 驮道沟花岗闪长斑岩的锆石 Hf 同位素研究显示, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-26.42\sim-23.70$, 二阶段模式年龄 T_{DM2} 为 $2872\sim2704\text{Ma}$ (Chen *et al.*, 2023)。综上所述, 本文认为吉南白山驮道沟花岗闪长斑岩可能起源于加厚古老下地壳部分熔融。

5.2.2 早白垩世花岗闪长斑岩

东大坡花岗闪长斑岩的烧失量 (LOI) 为 4.25%~6.48% (附表 2), 烧失量数值略高, 可能受轻微蚀变影响。但花岗闪长斑岩的 SiO_2 (64.94%~66.94%) 与全碱 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=6.82\%\sim 6.98\%$) 仍呈高硅富碱特征。样品在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解中落入高钾钙碱性系列区域内 (图 5b), Al_2O_3 含量中等 (15.41%~15.84%), A/CNK 值介于 0.82~1.19, 跨度较大, 主体为准铝质 (A/CNK<1.1) (图 5c)。样品在 TAS 图解中落入花岗闪长岩区域 (图 5a), 矿物组合以长石为主, 含角闪石、黑云母和石英, 未见 S 型或 A 型花岗岩标志矿物。地球化学参数中, 本文样品 $10000\times\text{Ga}/\text{Al}$ 比值为 2.49~2.63 略高于 I 型花岗岩阈值 (2.60, Whalen *et al.*, 1987), 但在 $10000\times\text{Ga}/\text{Al-Nb}$ 图解中落入 I 型花岗岩区域内 (图 8a), $\text{Zr+Nb+Ce+Y-(Na}_2\text{O+K}_2\text{O)}/\text{CaO}$ 图解仍支持未分异 I 型花岗岩 (图 8b)。综上, 吉南白山地区花岗闪长斑岩应为准铝质 I 型花岗岩。

花岗闪长斑岩样品富集轻稀土 ($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=20.61\sim 27.38$, LREE/HREE=5.26~6.94) (图 6c), 并显示弱 Eu ($\delta\text{Eu}=0.90\sim 0.92$) 和 Ce ($\delta\text{Ce}=0.81\sim 0.92$) 负异常。微量元素蛛网图 (图 6d) 显示, 样品富集大离子亲石元素 Ba 和 K, 而强烈亏损高场强元素 Nb、Ta 和 Ti。花岗闪长斑岩样品 La/Sm 值 (5.07~5.89) 指示下地壳熔融岩浆特征 (>4.50, Lassiter and DePaolo, 1997)。这些花岗闪长斑岩也展示出较高的 Sr 含量 ($521.78\times 10^{-6}\sim 609.33\times 10^{-6}$) 和较低的 Y 含量 ($8.19\times 10^{-6}\sim 13.30\times 10^{-6}$), 其较高的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ (20.61~27.38) 和 Sr/Y (40.45~74.43) 值同样类似于埃达克质岩石 (图 8c, 8d)。早白垩世花岗闪长斑岩同样具有较低的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值 (1.33~1.38), 而与典型俯冲洋壳部分熔融所形成的贫钾、富钠的岩石明显不同 (Defant and Drummond, 1990)。然而, 相较于中侏罗世花岗闪长斑岩, 早白垩世花岗闪长斑岩样品的 MgO 含量 ($\text{MgO}=2.84\%\sim 3.17\%$)、 $\text{Mg}^{\#}$ (57~59) 值以及 Cr 含量 ($144.55\times 10^{-6}\sim 169.07\times 10^{-6}$) 明显偏高, 使得它们落入加厚下地壳部分熔融的埃达克质岩石以外的区域 (图 8e, 8f)。早白垩世花岗闪长斑岩的 Nb/Ta 比值 (18.87~19.31) 也显著高于中侏罗世花岗闪长斑岩 (14.35~16.89), 而接近原始地幔 (17.5)。上述地球化学特征共同暗示, 花岗闪长斑岩与拆沉的榴辉岩质下地壳部分熔融所形成的埃达克质岩石相类似, 其形成与地幔橄榄岩的相互作用有关 (Kay *et al.*, 1993; Gao *et al.*, 2004; Ma *et al.*,

2013)。特别的是,研究区东侧同时代天桥花岗斑岩(130Ma)的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-2.39~+1.60 ($T_{\text{DM2}}=1337\sim1084\text{Ma}$) 显著高于早侏罗世驮道沟花岗闪长斑岩 (Chen *et al.*, 2023), 同样说明了地幔物质的贡献。因此,东大坡早白垩世花岗闪长斑岩来自中元古代新生下地壳的部分熔融,是拆沉的榴辉岩质地壳的部分熔融后经与地幔橄榄岩发生反应的产物。值得说明的是,在吉南白山地区并非全部早白垩世岩浆岩均表现出高 MgO 及 Cr 含量的特点(图 8e, 8f), 部分花岗斑岩可能仅经历了加厚下地壳部分熔融过程,而缺少之后的地幔橄榄岩相互作用过程 (Keevil *et al.*, 2019; 玄雨菲等, 2022; Chen *et al.*, 2023)。

5.3 构造背景

5.3.1 中侏罗世花岗闪长斑岩

本文及已发表锆石 U-Pb 年代学数据统计显示,吉南白山地区中生代岩浆作用包括中侏罗世和早白垩世两期(图 7)。中侏罗世岩石类型以花岗闪长斑岩为主,其富集轻稀土元素 ($(\text{La/Yb})_{\text{N}}=18.03\sim40.32$) 和大离子亲石元素 Ba、K (图 6a), 而亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti (图 6b), 符合活动大陆边缘弧岩浆岩特征。其成因类型属钙碱性 I 型花岗岩(图 5b), 具埃达克质岩石特征,可能源于加厚古老下地壳部分熔融(图 8e, 8f)。在构造环境判别图解上,驮道沟花岗闪长斑岩连同本区新路和六道江岩体均落入了火山弧花岗岩范畴(图 9), 进一步确认了吉南地区中侏罗世岩浆岩可能是在活动大陆边缘环境下形成的 (高天宇等, 2019; Keevil *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2023)。

区域上,研究区周缘的老岭和开原地区同样出露有埃达克质 I 型花岗岩,例如李家台岩体(173Ma)、梨树沟岩体(167Ma)和遥林岩体(169Ma) (秦亚, 2010; Liu *et al.*, 2018)。此外,中侏罗世岩浆活动还分布在研究区附近的狼洞沟和姚家沟的火山角砾岩(172~171Ma, Keevil *et al.*, 2019)。尽管有学者将吉南地区的早-中侏罗世岩体的形成与华南板块向华北板块的俯冲碰撞相关联(秦亚, 2010), 但主流观点认为华南板块与华北板块间的碰撞拼合可能在晚三叠世之前就已经完成(吴福元等, 2008)。因此,上述岩浆岩共同组成了该区域中侏罗世钙碱性 I 型花岗岩,并且具有埃达克质岩石的地球化学性质,

其产出构造背景更可能与古太平洋板块俯冲而诱发的挤压环境密切相关 (Liu *et al.*, 2018; 高天宇等, 2019; Keevil *et al.*, 2019; 陈煜嵩, 2022; Chen *et al.*, 2023)。

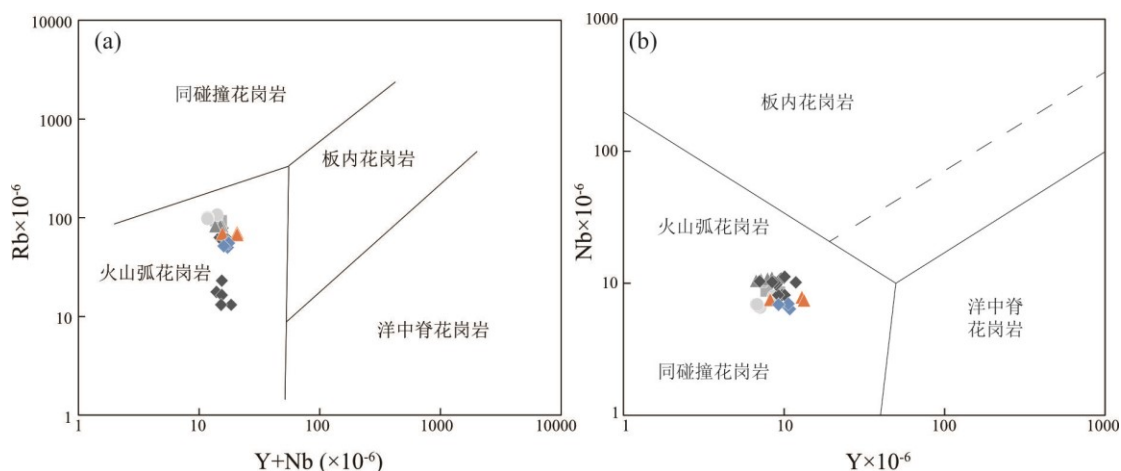


图 9 吉南白山地区中生代侵入构造环境判别图解

Fig. 9 Tectonic environment discrimination diagrams for Mesozoic plutonic rocks from the Baishan area of the southern Jilin

据 Pearce *et al.* (1984); Pearce (1996)

注: 图例同图 8

5.3.2 早白垩世花岗闪长斑岩

早白垩世岩浆活动构成了吉南地区最为重要的岩浆活动主体 (图7), 这与东亚地区大面积出露早白垩世伸展相关岩浆作用的事实相符合 (Wu *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2012; Keevil *et al.*, 2019)。在吉南白山地区, 早白垩世岩浆作用的岩石类型多样, 包括花岗闪长斑岩、闪长玢岩、花岗斑岩、凝灰岩和火山角砾岩 (Keevil *et al.*, 2019; 陈煜嵩等, 2020; 玄雨菲等, 2022; Chen *et al.*, 2023)。尽管研究区早白垩世和中侏罗世花岗闪长斑岩同样表现为钙碱性系列 (图5b)、准铝质 (图5c)、未分异I型花岗岩 (图8b)、类似埃达克质岩石的地球化学特征 (图8c, 8d)。然而如前所述, 早白垩世花岗闪长斑岩具有独特的较高MgO含量 ($\text{MgO}=2.84\%\sim 3.17\%$)、 $\text{Mg}^\#$ (57~59) 值以及Cr含量 ($144.55\times 10^{-6}\sim 169.07\times 10^{-6}$), 暗示其形成与拆沉下地壳部分熔融有关 (图8e, 8f), 并伴随有地幔橄榄岩相互作用 (Keevil *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2023)。尽管有关拆沉作用起始时间仍存有争议, 多数研究认为该拆沉作用在早白垩世达到了峰值 (Wu *et al.*, 2005, 2019; Zhu *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2012; Li and Santosh, 2014)。早白垩世 (130~120Ma) 拆沉速率达到了峰值, 伴随大规模I型、A型花岗岩及双峰式火山岩活动, 同期变质核杂岩和大型拆离断层、松辽盆地等大型

伸展盆地的形成，可能代表了华北克拉通破坏峰期（吴福元等，2008）。有关早白垩世大规模的拆沉机制，有学者提出古太平洋板块斜向俯冲的模式（Goldfarb *et al.*, 2014）或俯冲板片回撤模式（许文良等，2013）。本文由拆沉下地壳部分熔融而形成的花岗闪长斑岩（130Ma）刚好落入该时期，代表了经拆沉作用后而诱发的壳幔相互作用过程。而早白垩世花岗斑岩则可能代表了未能达到拆沉密度的加厚下地壳直接部分熔融的产物（Keevil *et al.*, 2019; 玄雨菲等，2022; Chen *et al.*, 2023）。这一成因模式上的差别支持小规模滴水式拆沉模式（张旗等，2006; 玄雨菲等，2022）。

5.4 成矿意义

有关金英金矿床的成矿时代和成因类型仍没有达成共识，其成矿时代被认为是中侏罗世（张建泽，2015; Keevil *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020）或早白垩世（Keevil *et al.*, 2019; 陈煜嵩等，2020; Zhang *et al.*, 2023），而其成因类型存在浅成低温热液型（张建泽，2015; 陈煜嵩等，2020）、造山型（Li *et al.*, 2020）或沉积岩容矿型（Keevil *et al.*, 2024）之争。本文将结合最新发表的矿床学数据，试图讨论金英金矿区两期中生代岩浆事件（中侏罗世和早白垩世）对金成矿作用的贡献。

中侏罗世驮道沟花岗闪长斑岩（165Ma）临近六道江铜矿，该样品与采自六道江铜斑岩矿床中的花岗闪长斑岩（167~166Ma, Keevil *et al.*, 2019）年龄结果相吻合。由于斑岩型铜矿床中斑岩体的形成时代与成矿时代一致，因此中侏罗世是吉南白山地区铜矿床形成的重要时期。据此，有学者指出该时期花岗闪长斑岩可能与金英金矿的形成关联性并不大（Keevil *et al.*, 2022）。相比较下，早白垩世花岗闪长斑岩（130Ma）和DZK1005段花岗斑岩岩心（131Ma）采自金英金矿东大坡地区（图10）。特别值得提及的是，金英金矿365巷道矿脉中与金矿化有关的黄铁矿Rb-Sr等时线年龄为 120 ± 3 Ma（Zhang *et al.*, 2023），这提供了金英金矿化可能发生在早白垩世的关键证据。此外，来自金英金矿床中黄铁矿-白铁矿的硫同位素（ $\delta^{34}\text{S}$ 值=+0.1‰~+2.8‰）指示其成矿流体来源于岩浆热液（Zhang *et al.*, 2023; Keevil *et al.*, 2024）。该矿床石英中流体包裹体的激光拉曼光谱数据暗示初始成矿流体具有低温（180°~220°）和中-低盐度（1%~4% NaCl_{eqv}）特点（Keevil *et al.*, 2024），总体显著

低于典型造山型金矿的成矿温度（200°~650°，王庆飞等，2019）。鉴于以上低温岩浆来源热液流体的独特属性，有国外学者新近提出“沉积岩容矿”模式来解释金英金矿床的成因类型，认为其成矿作用与源自远端斑岩侵入体的岩浆热液密切相关（Keevil *et al.*, 2024）。支持此模式的进一步证据如下：（1）金英金矿体产出于钓鱼台组与下伏珍珠门组不整合接触带硅化构造角砾岩带中（图10），而不同于浅成低温热液型脉状或网脉矿体。（2）金英金矿区仅零星出露早白垩世花岗闪长斑岩岩株（图2），且在金矿品位较高的硅化构造角砾岩中未观察到早白垩世岩浆活动的直接迹象。这说明与金英金矿成矿作用有关的斑岩侵入体可能距离矿化中心有一定的空间距离（图10，Keevil *et al.*, 2024）。（3）金英金矿床的金主要呈现微粒-次显微金特点（0.005~0.001mm），并且多赋存于硫化物白铁矿和黄铁矿中（陈煜嵩等，2020；Keevil *et al.*, 2024），这与美国西部和东南亚地区已报道的“沉积岩容矿型”金矿实例十分类似（Sillitoe and Bonham, 1990；Cunningham *et al.*, 2004）。

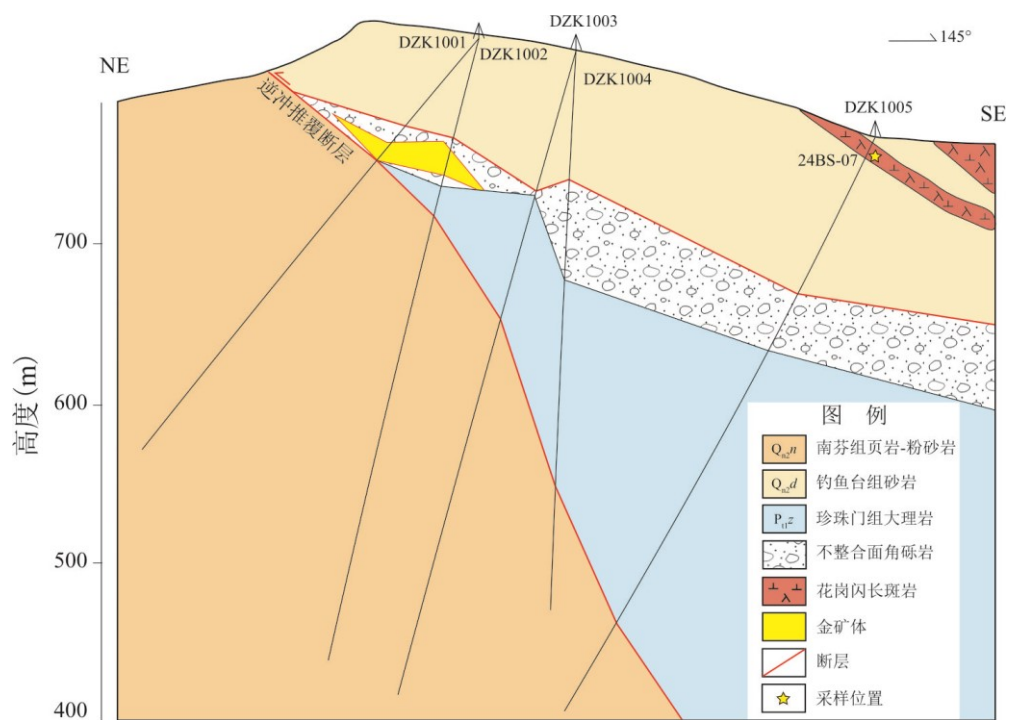


图 10 吉南白山金英金矿 KC10 号勘查线成矿模式图

Fig. 10 Mineralization model diagram of KC10 exploration line of Jinying gold mine in Baishan, southern Jilin

需要指出的是，“沉积岩容矿型”模式在定义上更侧重于金英金矿体赋存于不整合接触带硅化构造角砾中的事实（Keevil *et al.*, 2024），其成因类型更符合“远成低温岩浆热液型”金矿床（薛建玲等，2025）。研究区包括本文所厘定的东大坡早白垩世花岗闪长斑岩

和花岗斑岩，乃至矿区深部隐伏的早白垩世斑岩侵入体都可能为金矿化提供了岩浆-热液来源。在该模式下，区域上的逆冲推覆断层同时也是金英金矿床重要的导矿构造（图10，陈煜嵩等，2020；Keevil *et al.*, 2024）。

显然，有关华北克拉通吉南地区类似金英金矿床成因类型的研究工作仍需要持续进行。笔者认为探寻区域隐伏的早白垩世浅成斑岩侵入体，同时追踪古元古代不整合界面（钓鱼台组与下伏老岭群珍珠门组），对于区域金矿进一步勘探具有重要意义。华北克拉通东部吉南地区所保留的独特元古宙沉积盖层、与克拉通破坏峰期拆沉作用密切相关的早白垩世岩浆岩，可能是导致金英大型金成矿事件的关键成矿要素。

6 结论

(1) LA-ICP-MS锆石U-Pb定年显示驮道沟花岗闪长斑岩的年龄为 $165\pm 1\text{Ma}$ ，东大坡花岗闪长斑岩和花岗斑岩岩心的年龄为 $130\pm 1\text{Ma}$ 和 $131\pm 2\text{Ma}$ ，代表其侵位时代分别为中侏罗世和早白垩世。

(2) 全岩地球化学结果和资料表明，中侏罗世和早白垩世花岗闪长斑岩均表现为钙碱性系列，兼具准铝质I型埃达克质岩石特点。前者可能起源于加厚古老下地壳的部分熔融，推测其形成与古太平洋板块俯冲而诱发的挤压环境密切相关；后者代表华北克拉通破坏峰期的拆沉作用的产物，暗示其形成与拆沉下地壳部分熔融有关。

(3) 已有矿床学数据和本文实验结果支持金英金矿床成因类型可能为远成低温岩浆热液型金矿的观点，区域古元古代不整合界面与早白垩世岩浆岩可能是金英大型金成矿事件的关键成矿要素。

致谢：本研究受中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基金项目（QCJJ2023-8）、辽宁省教育厅基本科研面上项目（JYTMS20230617）、辽宁省自然科学基金计划面上项目（2025-MS-037）、国家自然科学基金项目（42473076）和中央高校基本科研业务费（N2201014）联合资助。

作者贡献度说明：作者 1（论文正文撰写、通讯）；作者 2（图件绘制，正文撰写）；作者 3（图件绘制，数据处理）；作者 4（野外地质调查）；作者 5（测试分析）；作者 6（测试分析）；作者 7（野外地质调查）；作者 8（正文撰写）；作者 9（正文撰写）

References

- Chen, Y. S., Liu, Z. H., Guan, Q. B., et al., 2023. Mesozoic Tectonic Transition of the Northeastern North China Craton: Evidence from Adakitic Rocks in Southeastern Jilin Province, China. *International Geology Review*, 65(1): 1-20. <https://doi.org/10.1080/00206814.2022.2028269>
- Cunningham, C. G., Austin, G. W., Naeser, C. W., et al., 2004. Formation of a Paleothermal Anomaly and Disseminated Gold Deposits Associated with the Bingham Canyon Porphyry Cu-Au-Mo system, Utah. *Economic Geology*, 99(4): 789-806. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.4.789>
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892-897. <https://doi.org/10.1038/nature03162>
- Goldfarb, R. J., Taylor, R. D., Collins, G. S., et al., 2014. Phanerozoic Continental Growth and Gold Metallogeny of Asia. *Gondwana Research*, 25(1): 48-102. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.03.002>
- Guan, Q., Liu, Z., Liu, Y., et al., 2022. A Tectonic Transition from Closure of the Paleo-Asian Ocean to Subduction of the Paleo-Pacific Plate: Insights from Early Mesozoic Igneous Rocks in Eastern Jilin Province, NE China. *Gondwana Research*, 102: 332-353. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.05.001>
- Hart, C. J., Goldfarb, R. J., Qiu, Y., et al., 2002. Gold Deposits of the Northern Margin of the North China Craton: Multiple Late Paleozoic–Mesozoic Mineralizing Events. *Mineralium Deposita*, 37: 326-351. <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-001-0239-2>.
- 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. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1-2): 139-155. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(04\)00007-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(04)00007-X)
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A. F., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523-548. <https://doi.org/10.1139/E71-055>
- Kay, S. M., Ramos, V. A., Marquez, M., 1993. Evidence in Cerro Pampa Volcanic Rocks for Slab-Melting Prior to Ridge-Trench Collision in Southern South America. *The Journal of Geology*, 101(6): 703-714. <https://doi.org/10.1086/648269>
- Keevil, H. A., Monecke, T., Goldfarb, R. J., et al., 2019. Geochronology and Geochemistry of Mesozoic Igneous Rocks of the Hunjiang Basin, Jilin Province, NE China: Constraints on Regional Tectonic Processes and Lithospheric Delamination of the Eastern North China Block. *Gondwana Research*, 68: 127-157. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.11.010>
- Keevil, H. A., Monecke, T., Goldfarb, R. J., et al., 2022. Metallogeny of the Hunjiang Basin, Northeastern North China Block. *Ore Geology Reviews*, 148: 104995. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104995>

- Keevil, H. A., Monecke, T., Goldfarb, R. J., et al., 2024. Genesis of the White Mountain Gold Deposit, Jilin Province, China, and Exploration Implications for Sedimentary Rock-Hosted Gold. *Economic Geology*, 119(8): 1715-1743. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5113>
- Bas, M. L., Maitre, R. L., Streckeisen, A., et al., 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745-750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Li, J. W., Bi, S. J., Selby, D., et al., 2012. Giant Mesozoic Gold Provinces Related to the Destruction of the North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 349: 26-37. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.06.058>
- Li, S. R., Santosh, M., 2014. Metallogeny and craton destruction: Records from the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 56: 376-414. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.03.002>
- Li, X., Sun, G., Sun, F., et al., 2020. Zircon U-Pb Chronology, Petrochemistry Characteristics and Metallogenic Significance of Granodiorite Porphyry in the Banmiaozi Gold Deposit in the NE Margin of the North China Craton. *Arabian Journal of Geosciences*, 13: 1-20. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05997-1>
- Liu, B., Ma, J., Li, P., et al., 2025. First Boron Isotopes in the Southern Jilin TTG Series Uncover a Neoproterozoic Oceanic Arc in the Eastern North China Craton. *Gondwana Research*, 139: 243-259. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2024.11.008>
- Liu, B., Han, B. F., Ren, R., et al., 2020. Late Carboniferous to Early Permian Adakitic Rocks and Fractionated I - Type Granites in the Southern West Junggar Terrane, NW China: Implications for the Final Closure of the Junggar - Balkhash Ocean. *Geological Journal*, 55(3): 1728-1749. <https://doi.org/10.1002/gj.3508>
- Liu, J., Zhang, J., Liu, Z., et al., 2018. Petrogenesis of Jurassic Granitoids at the Northeastern Margin of the North China Craton: New Geochemical and Geochronological Constraints on Subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 158: 287-300. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2018.03.006>
- Liu, Y., Hu, Z., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS Without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Ludwig, K. R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel (No. 4). <https://doi.org/10.3133/ofr85141>
- Ma, L., Jiang, S. Y., Dai, B. Z., et al., 2013. Multiple Sources for the Origin of Late Jurassic Linglong Adakitic Granite in the Shandong Peninsula, Eastern China: Zircon U-Pb Geochronological, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Evidence. *Lithos*, 162: 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.01.009>
- Ma, Q., Zheng, J. P., Xu, Y. G., et al., 2015. Are Continental "Adakites" Derived from Thickened or Foundered Lower Crust?. *Earth and Planetary Science Letters*, 419: 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.02.036>

- Pang, Y., Guo, X., Zhang, X., et al., 2020. Late Mesozoic and Cenozoic Tectono-Thermal History and Geodynamic Implications of the Great Xing'an Range, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 189: 104155. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2019.104155>
- Pearce, J. A., 1996. Sources and Settings of Granitic Rocks. *Episodes*, 19: 120-125. <https://doi.org/10.18814/epiugs/1996/v19i4/005>
- Pearce, J. A., Harris, N. B., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63-81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8-32 Kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891-931. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891>
- Richards, J. P., Kerrich, R., 2007. Special Paper: Adakite-Like Rocks: Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogenesis. *Economic Geology*, 102(4): 537-576. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.537>
- Sillitoe, R. H., Bonham Jr, H. F., 1990. Sediment-Hosted Gold Deposits: Distal Products of Magmatic-Hydrothermal Systems. *Geology*, 18(2): 157-161. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0157:shgddp>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0157:shgddp>2.3.co;2)
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Wareham, C. D., Millar, I. L., Vaughan, A. P., 1997. The Generation of Sodic Granite Magmas, Western Palmer Land, Antarctic Peninsula, Antarctic Peninsula. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128: 81-96. <https://doi.org/10.1007/s004100050295>
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407-419. <https://doi.org/10.1007/bf00402202>
- Windley, B. F., Maruyama, S., Xiao, W. J., 2010. Delamination/Thinning of Sub-Continental Lithospheric Mantle Under Eastern China: The Role of Water and Multiple Subduction. *American Journal of Science*, 310(10): 1250-1293. <https://doi.org/10.2475/10.2010.03>
- Wu, F. Y., Lin, J. Q., Wilde, S. A., et al., 2005. Nature and Significance of the Early Cretaceous Giant Igneous Event in Eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1-2): 103-119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.019>

- Wu, F. Y., Yang, J. H., Xu, Y. G., et al., 2019. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47(1): 173-195. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060342>
- Yang, J., Zhao, L., Kaus, B. J., et al., 2018. Slab-Triggered Wet Upwellings Produce Large Volumes of Melt: Insights into the Destruction of the North China Craton. *Tectonophysics*, 746: 266-279. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.04.009>
- Yu, J. J., Wang, F., Xu, W. L., et al., 2012. Early Jurassic Mafic Magmatism in the Lesser Xing'an-Zhangguangcai Range, NE China, and Its Tectonic Implications: Constraints from Zircon U-Pb Chronology and Geochemistry. *Lithos*, 142: 256-266. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.03.016>
- Zhao, G., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177-202. - <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.10.002>
- Zhao, G., Cawood, P. A., Li, S., et al., 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key Issues and Discussion. *Precambrian Research*, 222: 55-76. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.016>
- Zhai, M. G., Santosh, M., 2011. The Early Precambrian Odyssey of the North China Craton: A Synoptic Overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6-25. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.02.005>
- Zhu, R., Chen, L., Wu, F., et al., 2011. Timing, Scale and Mechanism of the Destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 54: 789-797. <https://doi.org/10.1007/s11430-011-4203-4>
- Zhou, J. B., Cao, J. L., Wilde, S. A., et al., 2014. Paleo - Pacific Subduction-Accretion: Evidence from Geochemical and U - Pb Zircon Dating of the Nanhada Accretionary Complex, NE China. *Tectonics*, 33(12): 2444-2466. <https://doi.org/10.1002/2014tc003637>
- Zhang, Y., Wu, Y., Li, H., et al., 2023. Genesis of the Jinying Gold Deposit, Southern Jilin Province, NE China: Constraints from Geochronology and Isotope Geochemistry. *Geological Magazine*, 160(9): 1761-1774. <https://doi.org/10.1017/s0016756823000705>
- Zhang X. W., Zhang H. F., Tong Y., 2023. Multistage Formation of Neoproterozoic Potassic Meta-Granites and Evidence for Crustal Growth on the North Margin of the North China Craton. *Journal of Earth Science*, 34(3): 658-673. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1419-x>

附中文参考文献

- 陈煜嵩, 董晓杰, 刘正宏, 等, 2020. 克拉通破坏型金矿成矿机制: 吉南板庙子金矿床闪长玢岩与重晶石流体包裹体、H-O-S 同位素证据. *岩石学报*, 36(8): 2537-2557.
- 陈煜嵩, 2022. 吉南地区早中生代构造岩浆作用与动力学背景(博士学位论文). 长春: 吉林大学.

- 高天宇, 刘正宏, 关庆彬, 等, 2019. 吉林白山新路花岗闪长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 地球化学特征及构造意义. 世界地质, 38(1): 80-93.
- 鞠楠, 刘博, 马婧轩, 等, 2024. 辽宁生铁岭稀土矿磁铁变粒岩年代学和地球化学特征及其稀土成因类型初探: 地学前缘. 1-33.
- 李宝毅, 杨振宇, 王玉芬, 2010. 吉南老岭成矿带荒沟山、板庙子金矿床地质特征与成因. 世界地质, 29(3): 392-399.
- 刘文香, 满永路, 王兴昌, 2009. 吉林省白山市金英金矿床地质特征及成因探讨. 地质与资源, 18(4): 279-283.
- 秦亚, 2010. 吉南老岭地区中生代花岗岩形成的构造环境研究(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 唐克东, 邵济安, 李永飞, 2011. 松嫩地块及其研究意义. 地学前缘, 18(3): 57-65.
- 王庆飞, 邓军, 赵鹤森, 等, 2019. 造山型金矿研究进展: 兼论中国造山型金成矿作用. 地球科学, 44(6): 2155-2186.
- 汪浪, 汤华云, 汪翔, 等, 2024. 华北克拉通东部早白垩世火山岩: 再循环物质差异性改造的记录. 地球科学, 49(2): 669-684.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 等, 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 24(6): 1145-1174.
- 许文良, 王枫, 裴福萍, 等, 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约. 岩石学报, 29(2): 339-353.
- 玄雨菲, 董晓杰, 王长兵, 等, 2022. 吉南白山地区早白垩世岩浆岩 U-Pb 年代学、岩石地球化学、Hf 同位素证据: 对华北克拉通破坏的制约. 岩石学报, 38(8): 2442-2466.
- 薛建玲, 庞振山, 程志中, 等, 2025. 中低温岩浆热液型金矿床找矿预测地质模型. 岩石学报, 41(1): 4-30.
- 杨立强, 邓军, 王中亮, 等, 2014. 胶东中生代金成矿系统. 岩石学报, 30(9): 2447-2467.
- 翟明国, 樊祺诚, 张宏福, 等, 2005. 华北东部岩石圈减薄中的下地壳过程: 岩浆底侵、置换与拆沉作用. 岩石学报, 21(6): 1509-1526.
- 张建泽, 2015. 吉林省白山市板庙子金矿床地质, 地球化学特征及成因研究(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 张宇婷, 孙丰月, 李予晋, 等, 2022. 吉南中侏罗世花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄, 地球化学及 Hf 同位素组成. 吉林大学学报 (地球科学版), 52(5): 1675-1687.
- 张旗, 金惟俊, 王元龙, 等, 2006. 大洋岩石圈拆沉与大陆下地壳拆沉: 不同的机制及意义——兼评“下地壳+岩石圈地幔拆沉模式”. 岩石学报, 22(11): 2631-2638.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等, 2011. 华北克拉通破坏的时间, 范围与机制. 中国科学: 地球科学, 41(5): 583-592.
- 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等, 2015. 克拉通破坏型金矿床. 中国科学: 地球科学, 45(8): 1153-1168.