

东北亚早中生代火成岩组合的时空变异： 对古太平洋板块俯冲开始时间的制约

唐杰, 许文良*, 王枫

吉林大学 地球科学学院, 长春 130061

摘要: 本文系统总结了东北亚早中生代火成岩的岩石组合及其空间变异, 讨论了古太平洋板块向欧亚大陆下俯冲作用开始的时间和早中生代岩浆作用与古亚洲洋构造体系、蒙古-鄂霍茨克构造体系以及扬子与华北克拉通俯冲碰撞作用之间的关系。东北亚早中生代岩浆作用划分成3期: 早-中三叠世、晚三叠世和早侏罗世。额尔古纳地块上早中生代钙碱性岩浆作用揭示了蒙古-鄂霍茨克大洋板块南向俯冲作用的发生; 华北克拉通北缘三叠纪碱性和双峰式岩浆作用揭示了古亚洲洋最终闭合后的伸展环境; 吉黑东部晚三叠世A型流纹岩、双峰式岩浆作用与稳定陆缘沉积一起暗示了伸展环境和被动陆缘背景, 而早侏罗世钙碱性岩浆作用及其成分极性与陆缘增生杂岩一起揭示了古太平洋板块向欧亚大陆下俯冲作用的开始。

关键词: 东北亚; 早中生代; 火成岩; 古太平洋板块; 俯冲开始时间; 蒙古-鄂霍茨克构造体系; 古亚洲洋构造体系
中图分类号: P541 **文章编号:** 1007-2802(2016)06-1181-14 **doi:** 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.06.009

Rock Associations and Their Spatial-Temporal Variations of the Early Mesozoic Igneous Rocks in the NE Asia: Constraints on the Initial Subduction Timing of the Paleo-Pacific Plate

TANG Jie, XU Wen-liang*, WANG Feng

College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract: This paper summarizes rock associations and spatial-temporal variations of the early Mesozoic igneous rocks in the NE Asia, with the aim of revealing the initial subduction timing of the Paleo-Pacific Plate beneath the Eurasia, and the relationships between the early Mesozoic magmatisms and the Paleo-Asian tectonic system, Mongol-Okhotsk tectonic system, and amalgamation of the Yangtze and North China cratons. Dating results indicate that the early Mesozoic magmatisms in the NE Asia can be subdivided into three stages, i.e., Early-Middle Triassic, Late Triassic, and Early Jurassic. The early Mesozoic calc-alkaline magmatisms within the Erguna Massif reveal southward subduction of the Mongol-Okhotsk oceanic plate. The Triassic alkaline and bimodal magmatisms within the northern margin of the North China Craton indicate an extensional environment related to the final closure of the Paleo-Asian Ocean. The Late Triassic A-type rhyolites and bimodal magmatisms, together with the Late Triassic stable sedimentary rocks, in eastern Heilongjiang-Jilin provinces, reveal an extensional environment and passive continental margin setting, whereas the Early Jurassic calc-alkaline magmatisms and its compositional variations, together with the coeval accretionary complex, reveal the onset of the Paleo-Pacific plate beneath the Eurasian continent.

Key words: NE Asia; early Mesozoic; igneous rocks; Paleo-Pacific plate; initial subduction timing; Mongol-Okhotsk tectonic system; Paleo-Asian tectonic system

东北亚属于中亚造山带的东段, 主要包括中国东北地区、俄罗斯锡霍特阿林和朝鲜半岛, 它们由一系列微陆块和其间的构造带组成(图1), 地质构

造极其复杂(李锦轶等, 1999; 吴福元和曹林, 1999; Wilde *et al.*, 2000, 2001, 2003; Wu *et al.*, 2011; 吴福元等, 2001)。该区古生代期间经历了古亚洲洋构

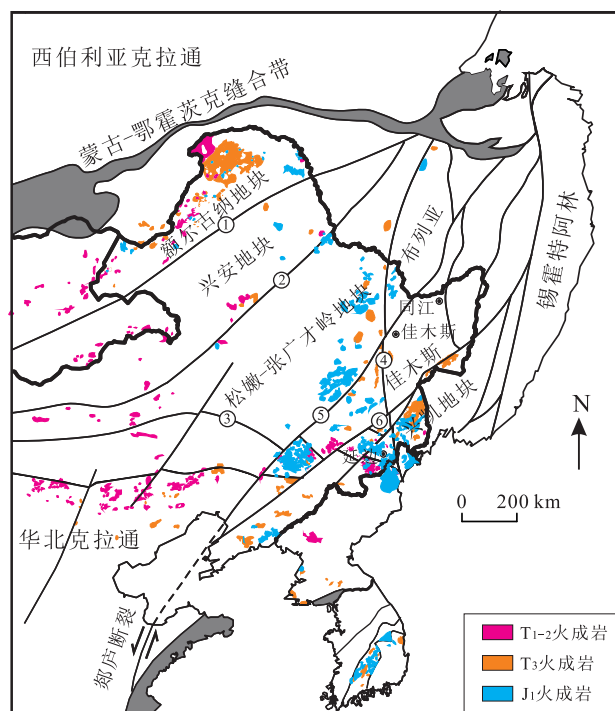
收稿日期: 2016-08-16 收到, 2016-10-14 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目(41330206); 中国地质调查局地质调查项目(12120113098300, 12120114085401)

第一作者简介: 唐杰(1989-), 女, 博士, 研究方向: 火成岩岩石学. E-mail: 893335234@qq.com.

* 通讯作者简介: 许文良(1959-), 男, 教授, 研究方向: 火成岩岩石学. E-mail: xuwl@jlu.edu.cn.

造体系的演化 (Sengör and Natalin, 1996; Li, 2006), 以多个微陆块之间的碰撞-拼合和古亚洲洋的最终闭合为特征, 陆壳增生方式以侧向增生为主 (Sengör *et al.*, 1993; Xiao *et al.*, 2004; Li, 2006; Windley *et al.*, 2007)。中生代期间, 东北亚经历了环太平洋构造体系和蒙古-鄂霍茨克构造体系的双重叠加和改造 (孙德有等, 1994; 孙卫东等, 2008; 孟恩等, 2011; Xu *et al.*, 2009, 2013; Wu *et al.*, 2011)。



①喜桂图-塔源断裂; ②黑河-贺根山断裂; ③索伦-西拉木伦-长春缝合带; ④牡丹江断裂; ⑤伊通-依兰断裂; ⑥敦化-密山断裂
图1 东北亚大地构造略图及早中生代火成岩空间分布
(据 Wu *et al.*, 2007b 修改)

Fig.1 Tectonic sketch map of the NE Asia and distribution of the early Mesozoic igneous rocks in the NE Asia(modified after Wu *et al.*, 2007b)

东北亚大陆边缘新生代的构造演化主要受古太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲作用所制约。然而, 古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲作用是何时发生的? 对于这一问题目前并没有得到地质学家们的共识。主要认识有: ①基于对东北亚超高压-高压变质岩的研究或岩浆作用的研究认为古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲作用开始于二叠纪 (Ernst *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2015); ②基于对东北三叠纪岩浆作用和变质作用的研究, 认为古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲作用开始于三叠纪 (Zhou *et al.*, 2014; Wilde *et al.*, 2015); ③基于对东北中生代岩浆作用的时空变异

研究以及陆缘增生杂岩的研究, 认为古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲作用发生在早侏罗世 (Xu *et al.*, 2009, 2013; Safonova and Santosh, 2014)。从上述研究可以看出, 之所以对古太平洋板块在欧亚大陆下俯冲作用开始时间有不同观点, 主要是不同学者研究的侧重点不同, 同时缺乏对不同地质记录的综合研究以及古太平洋形成时间与演化历史认识的不同。大洋板块俯冲作用的最直接物质记录是岩浆作用和陆缘增生杂岩以及沉积作用。因此, 中生代岩浆作用形成的不同类型火成岩组合的时空变异, 结合陆缘增生杂岩和沉积建造的分析, 是限定古太平洋板块俯冲开始时间的关键。

鉴于此, 本文对东北亚早中生代火成岩的岩石组合及空间分布进行系统总结, 查明了早中生代各期次火成岩形成的构造背景, 揭示了古太平洋板向欧亚大陆下俯冲作用开始的时间和早中生代岩浆作用与古亚洲洋构造体系、蒙古-鄂霍茨克构造体系以及扬子与华北克拉通俯冲碰撞作用之间的关系。

1 东北亚早中生代岩浆作用的年代学格架

根据对东北亚早中生代火成岩定年结果的统计 (电子版附表), 从频谱图中可以看出早中生代岩浆作用有 4 个峰期年龄 (图 2): 247 Ma、224 Ma、205 Ma 和 185 Ma。然而, 根据各期次火成岩组合特征及其形成的构造背景, 本文将 224 Ma 和 205 Ma 两期岩浆作用进行合并讨论。因此, 本文将东北亚早中生代岩浆作用划分成 3 期: 早-中三叠世 (247 Ma)、晚三叠世 (224 Ma 和 205 Ma) 和早侏罗世 (185 Ma)。

2 早-中三叠世岩浆作用: 古亚洲洋最终闭合后的伸展环境和蒙古-鄂霍茨克大洋板块的南向俯冲

从已有的火成岩定年结果来看 (电子版附表), 东北亚早-中三叠世火成岩主要分布在松辽盆地以西地区和华北克拉通北缘 (图 3), 这暗示此阶段的岩浆事件与古太平洋构造体系无关。从图 3 可以看出, 东北亚早-中三叠世火成岩主要有 2 个展布方向: 一是呈东西向带状展布分布在华北克拉通北缘; 二是呈北东-南西向展布分布在蒙古-额尔古纳地块-兴安地块。

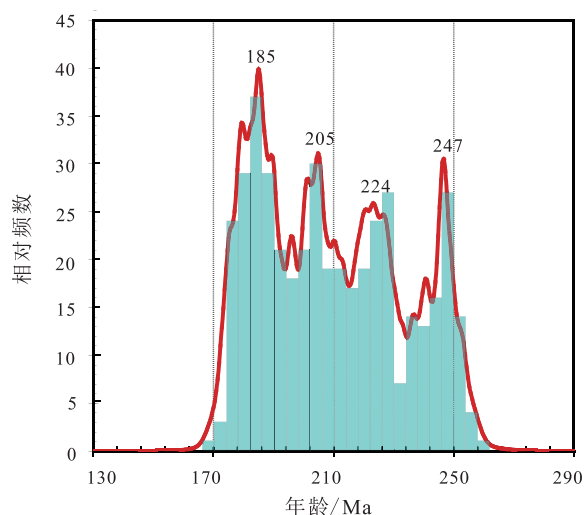


图2 东北亚早中生代火成岩年龄频谱图

Fig.2 Relative probability plot for the early Mesozoic igneous rocks in the NE Asia

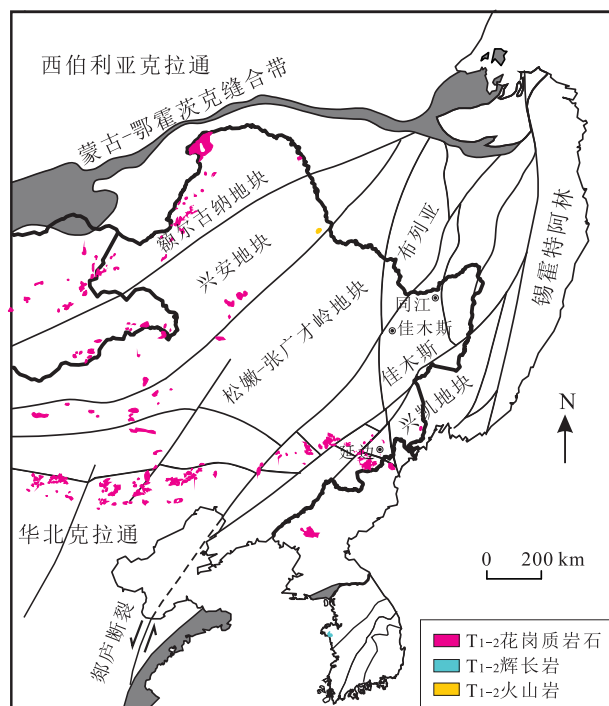


图3 东北亚早-中三叠世火成岩空间分布图

Fig.3 Distribution map of the early-middle Triassic igneous rocks in the NE Asia

2.1 华北克拉通北缘

华北克拉通北缘早-中三叠世火成岩以花岗质岩石为主体,均呈较大的岩基产出,岩性主要有碱性花岗岩、碱长花岗岩、正长岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩(电子版附表)。该期火成岩还包括少量的正长岩、闪长岩、辉长岩及辉石安山岩。根据地球化学特征差异该地区早-中三叠世

火成岩可分为华北克拉通北缘中段(燕-辽和内蒙古地区)和华北克拉通北缘东段(实际为华北克拉通北缘古生代陆缘增生带-吉林中东部)两部分。

华北克拉通北缘中段早-中三叠世火成岩包括碱性花岗岩、碱长花岗岩、正长岩,属于碱性系列;部分花岗质岩石落入高钾钙碱性系列中,与该地区同时期辉长岩构成了双峰式火成岩组合,它们共同揭示早-中三叠世期间该地区处于伸展环境。那么,它们的形成与哪种构造体系相关?①索伦-林西地区晚二叠世地层沉积零星出露,与早二叠世地层为角度不整合接触(内蒙古自治区地质矿产局,1991;汪新文和刘友元,1997),表明早二叠世末-晚二叠世之间本区进入挤压收缩与造山作用时期;②内蒙古地区产出大量中二叠世与碰撞造山相关的火成岩,如康宝地区含石榴二长花岗岩(281~266 Ma;王鑫琳等,2007)、大青山哈拉合少岩体(261 Ma;赵庆英等,2007)、内蒙古中部四子王旗大庙岩体(265 Ma;章永梅等,2009)、四子王旗花岗岩(264 Ma)与过铝质花岗岩相伴生构成典型的KCG(富钾的钙碱性花岗岩,Barbarin,1999)岩石组合(柳长峰,2010);③沿索伦-西拉木伦-长春一线,早二叠世华北克拉通北缘发育冷水和暖水动物群的混生,表明早二叠世南北板块间的距离已经很近,到了早二叠世末期该区发生了南北陆-陆碰撞对接作用(彭向东等,1999;曹花花,2013)。以上资料均表明,华北克拉通北缘中段内蒙古地区中二叠世处于挤压造山的构造环境,表明松嫩-张广才岭地块与华北克拉通之间发生了陆-陆碰撞造山作用,同时内蒙古地区一线的古亚洲洋闭合(曹花花,2013)。因此,华北克拉通北缘中段早-中三叠世火成岩形成于松嫩-张广才岭地块和华北克拉通碰撞造山后的伸展环境。

华北克拉通北缘东段吉林中部地区早三叠世建平镇花岗岩(249 Ma)和椅山岩体(247 Ma)的二长花岗岩均为高钾钙碱性I型花岗岩,高Sr低Y,具有埃达克质岩石的地球化学属性(曹花花,2013);吉林中部磐石-桦甸地区大玉山花岗岩(248 Ma)具有高Sr低Y的地球化学特征,其形成时代略晚于周围呼兰群由于碰撞造山作用所致的峰期变质年龄(晚二叠世),说明大玉山花岗岩为同碰撞型花岗岩(孙德有等,2004b);吉林中部伊通石榴石白云母二长花岗岩(244 Ma)具有较高的 SiO_2 、 Al_2O_3 和碱含量,较低的TFeO和MgO,起源于加厚下地壳物质的部分熔融(Wang *et al.*,2015c);吉林东部延边地区柳树沟二长花岗岩(245 Ma)为埃达克质岩石(Wang *et al.*,2015c);延边地区百里坪二

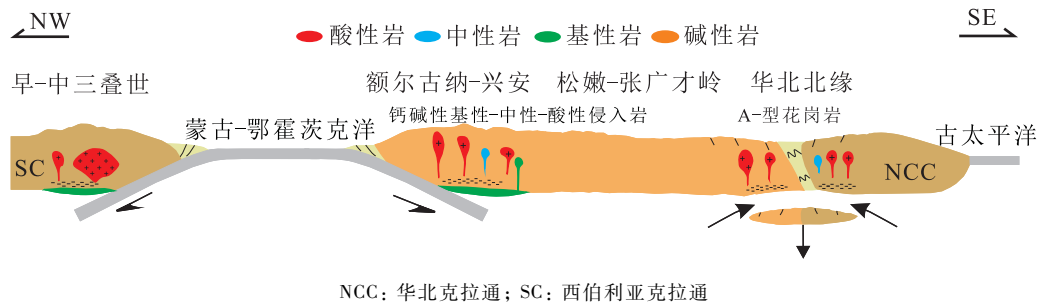


图5 东北亚早-中三叠世构造演化模型图

Fig.5 Tectonic evolution model of the NE Asia during the early-middle Triassic

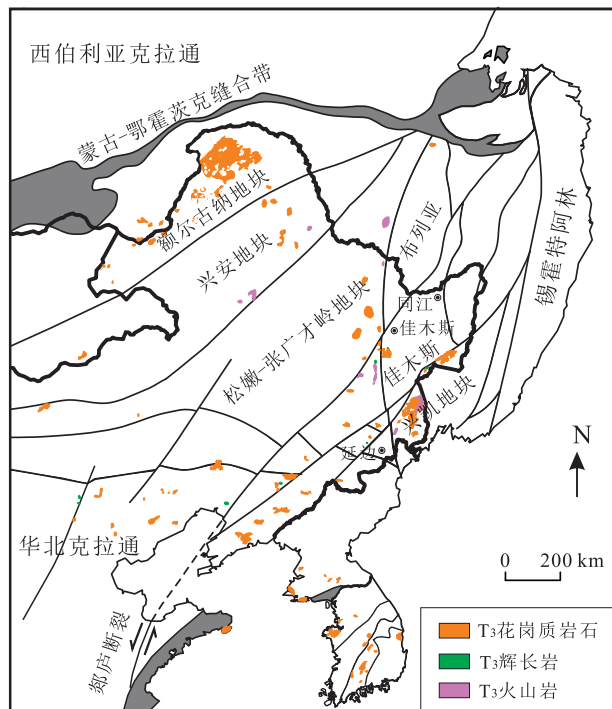


图6 东北亚晚三叠世火成岩分布图

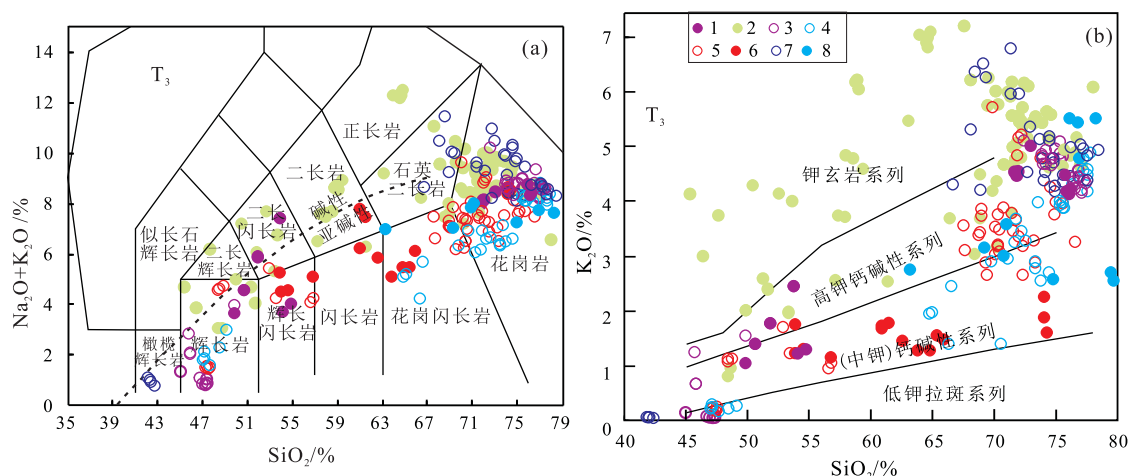
Fig.6 Distribution map of the Late Triassic igneous rocks in the NE Asia

杂岩(霞石正长岩、霓辉正长岩、石英正长岩、正长岩及碱性花岗岩等)及共生的碱性超镁铁质岩,以出现碱性矿物如霓辉石、霓石、霞石及碱性角闪石等为特征(张拴宏等,2010)。华北克拉通北缘东段吉林中部地区晚三叠世岩浆事件以开原八棵树方辉橄榄岩、桦甸红旗岭镁铁-超镁铁质侵入岩、漂河川辉石岩和蛟河三道河 A₂ 型正长花岗岩(Wu *et al.*, 2004, 2011) 为代表,具有双峰式侵入岩的岩石组合特征(图 7; 曹花花, 2013)。此外,华北克拉通北缘东段及其拼接缝合带上均缺乏 240~225 Ma 的沉积事件,而晚三叠世普遍发育磨拉石建造沉积地层,标志着由造山隆起环境向造山后伸展拉张环境的转变。这些碱性系列岩石、双峰式火成岩组合及

磨拉石建造的存在说明华北克拉通北缘晚三叠世期间处于造山后伸展环境。该期火成岩沿索伦-西拉木伦-长春-延吉缝合带呈东西向带状展布(图 6),进一步说明华北克拉通北缘晚三叠世火成岩形成于与古亚洲洋最终闭合有关的造山后伸展环境(图 8)。

3.2 蒙古-额尔古纳地块-兴安地块

蒙古-额尔古纳地块-兴安地块上晚三叠世以侵入岩为主,在兴安地块上罕达气-扎兰屯-蘑菇气地区产出少量火山岩(Li *et al.*, 2016),具体的岩石组合包括角闪辉长岩、辉长闪长岩、闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和正长花岗岩,以及玄武安山岩、安山岩、粗玄岩和流纹岩。该期火成岩以花岗质岩石为主,呈巨大的岩基状产出,中基性岩石较少。蒙古-额尔古纳地块-兴安地块上晚三叠世火成岩石组合及地球化学特征与早-中三叠世火成岩类似:①晚三叠世火成岩石组合与太平洋东岸南美的安第斯型活动大陆边缘产出的侵入岩组合类似;②它们属于中钾-高钾钙碱性系列(图 7);③晚三叠世花岗质岩石的 A/CNK 值普遍小于 1.1,显示出 I-型花岗岩的特点;④晚三叠世基性岩浆起源于受俯冲流体交代的岩石圈地幔的部分熔融作用(Tang *et al.*, 2016),暗示俯冲板片的存在(Stern, 2002; Martin *et al.*, 2005);⑤该区产出同期的斑岩型矿床,包括额尔古纳地块上的太平川斑岩型铜钼矿床(202 Ma; 陈志广等, 2010)和八大关斑岩型铜钼矿床(228~218 Ma; 侯召硕, 2014; Tang *et al.*, 2016),中蒙古地块上的阿林诺尔斑岩型钼矿床(227 Ma; 刘翼飞等, 2010);⑥该地区晚三叠世火成岩沿着蒙古-鄂霍茨克缝合带呈北东-南西向带状展布(图 6)。这些特征均说明蒙古-额尔古纳地块-兴安地块上晚三叠世火成岩形成于活动大陆边缘环境,揭示了蒙古-鄂霍茨克大洋板块持续南向俯冲作用的存在(图 8)。

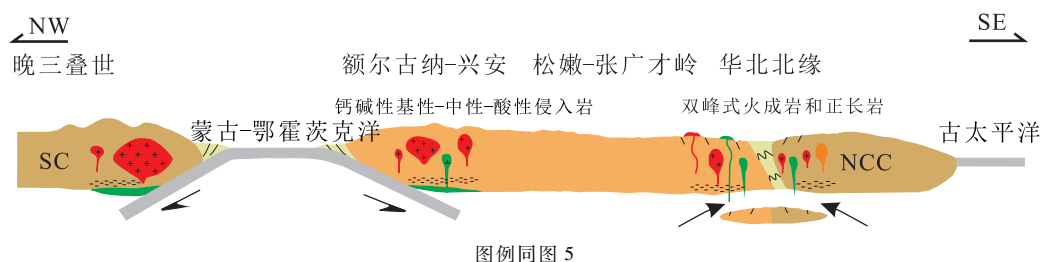


1-小兴安岭-张广才岭地区火山岩;2-辽东半岛-胶东半岛-朝鲜半岛侵入岩;3-小兴安岭-张广才岭地区侵入岩;4-吉黑东部侵入岩;
5-蒙古-额尔古纳地块-兴安地块侵入岩;6-蒙古-额尔古纳地块-兴安地块火山岩;7-华北北缘侵入岩;8-吉黑东部火山岩

图7 东北亚晚三叠世火成岩的TAS图解(a-据 Le Maitre, 1989)和 SiO_2 - K_2O 图解(b-据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig.7 Plots of TAS (a-cited after Le Maitre, 1989) and SiO_2 - K_2O (b-cited after Peccerillo and Taylor, 1976)

for the late Triassic igneous rocks in the NE Asia



图例同图5

图8 东北亚晚三叠世构造演化模型图

Fig.8 Tectonic evolution model of the NE Asia during the late Triassic

3.3 胶东半岛-辽东半岛-朝鲜半岛

晚三叠世侵入岩在胶东、辽东和朝鲜半岛零星分布(图6)。在胶东半岛,目前发现的只有甲子山的正长岩(215 Ma)和槎山的黑云母钾长花岗岩(205 Ma)(图6,电子版附表; Chen *et al.*, 2003; 郭敬辉等, 2005; Yang *et al.*, 2005)。辽东半岛的晚三叠世岩体包括岫岩花岗岩及其镁铁质包体、双牙山花岗岩、老尖顶子闪长岩、于家村正长岩、尹家村辉长岩、大和尚山辉长岩、龙头石英闪长岩-花岗闪长岩、小苇沙河二长花岗岩、岔信子花岗闪长岩和蚂蚁河辉石闪长岩-二长花岗岩, 辽东半岛晚三叠世岩体的时代主要集中在226~210 Ma(电子版附表; 路孝平等, 2003; 吴福元等, 2005; 裴福萍等, 2008; Yang *et al.*, 2007a, 2007b)。朝鲜半岛晚三叠世火成岩的岩性包括花岗闪长岩、二长花岗岩、碱长花岗岩、正长岩、辉长岩, 其同位素年代学资料表明它们的形成时代主要集中在234~210 Ma(电子版附表; Turek and Kim, 1995; Kim and Turek, 1996; Ree *et al.*, 2001; Sagong *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2007a;

Cho *et al.*, 2008; Peng *et al.*, 2008; Williams *et al.*, 2009)。

尽管有不少学者讨论该地区晚三叠世岩浆活动与太平洋板块演化的关系(崔盛芹和李锦蓉, 1983; 李之彤和赵春荆, 1985; 任纪舜等, 1992), 但近年研究表明华北东部并不存在平行于太平洋板块边界的三叠纪花岗岩带(Li and Li, 2007), 说明它们的形成与古太平洋板块的俯冲作用无关。胶东半岛-辽东半岛-朝鲜半岛晚三叠世主要落入碱性系列中(图7), 表明它们形成于伸展环境。该地区晚三叠世火成岩分布在苏鲁造山带的南北两侧, 沿着造山带呈北东-南西向展布(图6)。此外, 胶东半岛-辽东半岛-朝鲜半岛晚三叠世岩体侵位时代(231~205 Ma, 多数小于225 Ma), 明显晚于苏鲁造山带超高压变质时代(244~226 Ma; Li *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2004; Wan *et al.*, 2005; 杨进辉和吴福元, 2009), 进一步说明它们形成于扬子与华北克拉通俯冲碰撞后岩石圈折沉引起的伸展环境(杨进辉和吴福元, 2009)。

3.4 小兴安岭-张广才岭

小兴安岭-张广才岭既发育晚三叠世侵入岩又

发育晚三叠世火山岩,侵入岩的岩石类型主要包括辉长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和碱长花岗岩,火山岩的岩石类型包括玄武岩、玄武安山岩、安山岩和流纹岩。从 TAS 图解中可以看出小兴安岭-张广才岭地区晚三叠世火成岩的 SiO_2 含量出现明显的间断(图 7),显示出典型双峰式火成岩组合的特点。结合该地区产出同时期 A 型花岗岩(Wu *et al.*, 2004),共同揭示小兴安岭-张广才岭晚三叠世火成岩形成于伸展环境(Xu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015b; Guo *et al.*, 2016)。

一些学者认为小兴安岭-张广才岭晚三叠世岩浆作用与古太平洋板块向欧亚大陆下俯冲密切相关(Wu *et al.*, 2011; 彭玉鲸等, 2012; Zhou and Wilde, 2013; Yang *et al.*, 2015)。然而,东北亚东部大陆边缘不存在晚三叠世钙碱性火成岩和同期的增生杂岩,表明它们的形成与古太平洋板块的俯冲作用无关。此外,佳木斯地块东缘和俄罗斯远东地区发育晚三叠世海陆交互沉积地层,显示被动陆缘的沉积组合(Zhang *et al.*, 2015)。

小兴安岭-张广才岭地区晚三叠世火成岩主要分布松辽盆地以东、牡丹江断裂以西地区,沿着牡丹江断裂呈近南北向带状分布(图 6)。小兴安岭-张广才岭晚三叠世火成岩形成的构造环境有 3 种可能:一是北东-南西向的展布方向与蒙古-鄂霍茨克缝合带平行,蒙古-额尔古纳地块-兴安地块上晚三叠世火成岩属于钙碱性系列,小兴安岭-张广才岭同时期火成岩为双峰式火成岩组合,呈现出自陆缘(额尔古纳地块)向陆内(小兴安岭-张广才岭)火成岩成分极性的变化,可能分别对应于蒙古-鄂霍茨克大洋板块南向俯冲所形成的活动大陆边缘环境和类似弧后的伸展环境;二是小兴安岭-张广才岭地区晚三叠世火成岩可与胶东半岛-辽东半岛-朝鲜半岛同时期火成岩相联系,共同构成了平行于苏鲁造山带的呈北东-南西向展布的岩浆岩带,它们可能形成于扬子与华北克拉通之间俯冲碰撞后的伸展环境;通过前文讨论可知古亚洲洋闭合后岩石圈伸展作用可持续到晚三叠世(详见 3.1),因此,小兴安岭-张广才岭地区晚三叠世火成岩还可能形成于与古亚洲洋最终闭合有关的造山后伸展环境。

3.5 吉黑东部

吉黑东部晚三叠世火成岩主要分布在敦化-密山断裂以东地区(图 6),岩石类型以花岗质岩石(石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩)和流纹岩为主,伴随少量正长岩和辉长岩(电子版附表)。吉黑东部这些晚三叠世火

成岩主要表现为 A 型花岗岩、A 型流纹岩以及与 Cu、Ni 矿床有关的镁铁-超镁铁质岩石(Wu *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2013),指示该区晚三叠世火成岩形成于伸展环境。

根据松嫩-张广才岭地块东缘、佳木斯地块以及兴凯地块之上古生代-中生代火成岩的锆石 U-Pb 年代学资料及其空间分布特征,王枫等(2016)推测晚三叠世之后敦化-密山断裂的左行平移的距离约为 300 km。据此对吉黑东部晚三叠世火成岩的古地理位置进行恢复,可知它们应处于小兴安岭-张广才岭、胶东半岛、华北克拉通北缘三大地区交汇处。因此,吉黑东部晚三叠世火成岩可能形成于古亚洲洋闭合后的伸展环境,亦可能与扬子和华北克拉通之间俯冲碰撞后伸展环境有关,还可能形成于蒙古-鄂霍茨克大洋板块南向俯冲所形成的类似弧后的伸展环境。

4 早侏罗世岩浆作用:古太平洋板块的初始俯冲与蒙古-鄂霍茨克大洋板块的持续南向俯冲

东北亚早侏罗世火成岩主要分布在额尔古纳地块-兴安地块、小兴安岭-张广才岭-辽东半岛、吉黑东部-朝鲜半岛北端和朝鲜半岛南部(图 9)。

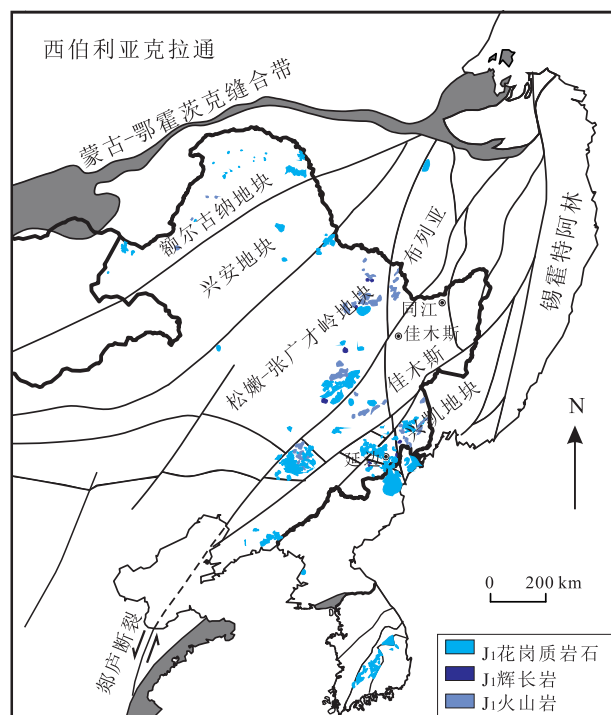


图 9 东北亚早侏罗世火成岩分布图
Fig.9 Distribution map of the Early Jurassic igneous rocks in the NE Asia

4.1 吉黑东部-朝鲜半岛北端

吉黑东部-朝鲜半岛北端早侏罗世火成岩是一套碱性-中性-酸性的岩石组合(图 10),侵入岩的岩石类型包括辉长岩闪长岩、闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩;火山岩地层包括天桥岭组、罗圈站组、双桥子组和满河组,岩石类型有玄武安山岩、安山岩、英安岩、流纹岩(Xu *et al.*, 2013)。

吉黑东部-朝鲜半岛北端早侏罗世火成岩属于钙碱性系列(图 10),其中花岗质岩石属于 I-型花岗岩,具有活动大陆边缘及火山弧花岗岩的特点;早侏罗世基性岩在形成过程中受到俯冲流体交代作用(Guo *et al.*,2015; Wang *et al.*,2016),暗示俯冲板片在早侏罗世岩浆作用中的贡献。此外,近年来在欧亚大陆东缘和日本地区鉴别出大量与板块俯冲有关的早侏罗世增生杂岩(Fukuyama *et al.*, 2013; Safonova and Santosh, 2014)。这些特征均说明吉黑东部-朝鲜半岛北端早侏罗世火成岩形成于活动大陆边缘环境。本地区早侏罗世火成岩呈北东-南西向展布,与东北亚东部大陆边缘平行,说明它们形成于古太平洋板块向欧亚大陆下俯冲所形成的活

动大陆边缘环境(图 11),标志着古太平洋板块俯冲作用的开始。

4.2 小兴安岭-张广才岭-辽东半岛

小兴安岭-张广才岭-辽东半岛地区产出大量早侏罗世火成岩(图 9),岩石类型以基性和酸性火成岩为主,产出少量中性火成岩。侵入岩的具体岩石类型包括橄榄辉长岩、角闪辉长岩、辉长闪长岩、闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩、碱长花岗岩;火山岩地层包括上黑龙宫组、五道岭组、帽儿山组、太安屯组、宁远村组(Xu *et al.*,2013),岩石类型有玄武岩、玄武安山岩、粗安岩、流纹岩、英安岩。

小兴安岭-张广才岭-辽东半岛地区早侏罗世火成岩主体落入钙碱性系列中,部分落入碱性系列中(图 8)。该地区早侏罗世粗安岩被认为是玄武质岩浆和流纹质岩浆混合作用的产物(唐杰等, 2011)。此外,闪长质包体的产出进一步说明小兴安岭-张广才岭-辽东半岛地区存在岩浆混合作用(Wu *et al.*,2011)。因此,排除岩浆混合成因的中性岩,小兴安岭-张广才岭-辽东半岛地区火成岩显示出典型双峰式火成岩组合的特点(Yu *et al.*, 2012;

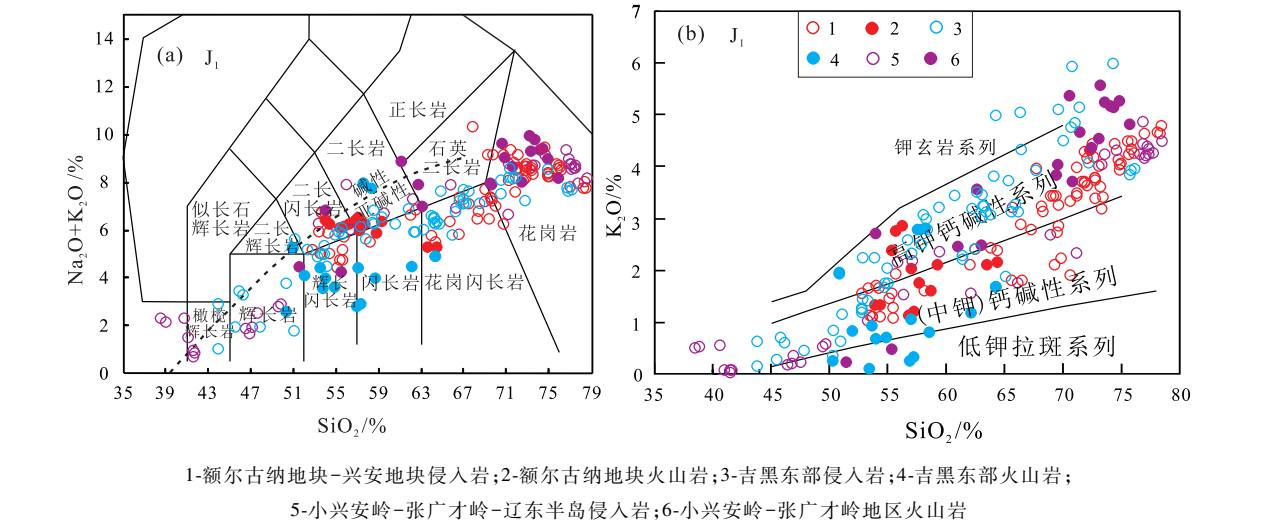


图 10 东北亚早侏罗世火成岩的 TAS 图解(a-据 Le Maitre,1989)和 SiO₂-K₂O 图解(b-据 Peccerillo and Taylor,1976)

Fig.10 Plots of TAS(a-cited after Le Maitre,1989) and SiO₂ vs. K₂O(b-cited after Peccerillo and Taylor, 1976) for the early Jurassic igneous rocks in the NE Asia

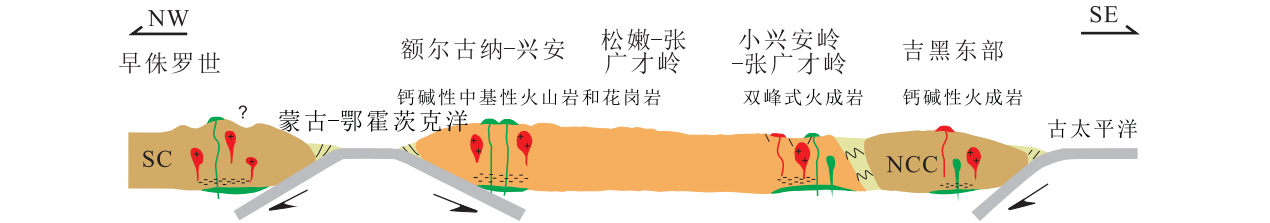


图 11 东北亚早侏罗世构造演化模型图(图例同图 5)

Fig.11 Tectonic evolution model of the NE Asia during the early Jurassic(symbols are the same as those in Fig. 5)

Wang *et al.*, 2016), 说明它们形成于伸展环境。从图 9 中可以看出小兴安岭-张广才岭-辽东半岛地区早侏罗世火成岩呈北东-南西向带状展布。吉黑东部-朝鲜半岛北端的早侏罗世陆缘钙碱性火成岩到小兴安岭-张广才岭-辽东半岛的双峰式火山岩组合, 构成了平行东北亚东部大陆边缘的成分分带, 指示了俯冲的方向, 分别对应于古太平洋板块向欧亚大陆下俯冲所形成的活动大陆边缘环境和弧后伸展环境(图 11), 进一步说明古太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲作用始于早侏罗世。

在古太平洋板块俯冲于欧亚大陆之下的过程中形成了大量斑岩型钼矿以及少量矽卡岩型钼矿, 如小兴安岭-张广才岭-辽东半岛霍吉河斑岩型钼矿(184 Ma; 陈静等, 2012)、鹿鸣斑岩型钼矿(176 Ma; 杨言辰等, 2012)、翠岭斑岩型钼矿(178 Ma, 杨言辰等, 2012)、169 Ma 姚家沟矽卡岩型钼矿(方俊钦等, 2012)、吉黑东部大黑山斑岩型钼矿(168 Ma; 王成辉等, 2009)、福安堡斑岩型钼矿(167 Ma; 李立兴等, 2009)、刘生店斑岩型钼矿(169 Ma; 王辉等, 2011)、东风矽卡岩型钼矿(179 Ma; 张勇等, 2011)、大石河斑岩型钼矿(187 Ma; 鞠楠等, 2012)。上述早侏罗世岩浆作用和同期斑岩型矿床的形成应与古太平洋板块俯冲作用下的活动陆缘环境有关(许文良等, 2013)。

4.3 额尔古纳地块-兴安地块

额尔古纳地块-兴安地块上早侏罗世火成岩主要是由一套中酸性侵入岩构成, 包括闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩、石英斑岩和花岗斑岩。此外, 在额尔古纳地块上还产出一套早侏罗世中基性火山岩, 包括玄武岩、玄武安山岩和安山岩(Wang *et al.*, 2015a)。

首先, 早侏罗世花岗质岩石属于中钾-高钾钙碱性系列(图 10), 不含有过铝质矿物和碱性暗色矿物, 显示出 I 型花岗岩的特点; 其次, 早侏罗世中基性火山岩属于中钾-高钾钙碱性系列, 其主量元素与 SiO_2 含量之间具有线性变化规律(见 Wang *et al.*, 2015a, 图 9), 显示出活动大陆边缘火山岩的地球化学特征(Gill, 1981; Wilson, 1989; Kelemen *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2015a); 第三, 在额尔古纳地块-兴安地块上发育早侏罗世斑岩型和矽卡岩型矿床, 包括额尔古纳地块上乌奴格吐山斑岩型铜钼矿床(183~178 Ma; 王伟等, 2012; Chen *et al.*, 2011) 和兴安地块上产出三矿沟矽卡岩型铜铁矿床(176 Ma; 葛文春等, 2007; 褚少雄等, 2012)。综上所述, 额尔古纳地块-兴安地块上早侏罗世火成岩

形成于活动大陆边缘环境。

额尔古纳地块-兴安地块上早侏罗世火成岩总体上呈北东-南西向展布, 一些学者认为它们形成于古太平洋板块向欧亚大陆下俯冲所形成的活动大陆边缘环境(隋振民等, 2007; 张彦龙等, 2010)。然而, 在小兴安岭-张广才岭-辽东半岛地区存在一套同时期双峰式火成岩组合(5.2), 说明它们的形成与古太平洋板块的俯冲作用无关。该地区早侏罗世火成岩的展布方向与蒙古-鄂霍茨克缝合带平行, 表明它们应形成于蒙古-鄂霍茨克大洋板块持续南向俯冲作用下的活动大陆边缘环境(图 11)。

5 结论

(1) 吉黑东部-朝鲜半岛北端早侏罗世钙碱性火成岩的存在揭示古太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲作用始于早侏罗世。

(2) 华北克拉通北缘中段三叠纪碱性系列火成岩和双峰式火成岩形成于古亚洲洋闭合后的伸展环境; 华北克拉通北缘东段三叠纪火成岩的空间变异揭示了该区古亚洲洋自西向东剪刀式闭合过程。

(3) 蒙古-额尔古纳-兴安地块早三叠世-早侏罗世钙碱性火成岩组合形成于蒙古-鄂霍茨克洋南向俯冲的活动大陆边缘环境。

(4) 胶东半岛-辽东半岛-朝鲜半岛北部晚三叠世碱性系列火成岩形成于扬子与华北克拉通俯冲碰撞后的伸展环境。

(5) 小兴安岭-张广才岭和吉黑东部晚三叠世火成岩可能形成于蒙古-鄂霍茨克大洋板块南向俯冲的弧后伸展环境, 也可能与扬子和华北克拉通俯冲碰撞后的伸展环境有关, 还可能形成于古亚洲洋最终闭合后的伸展环境。

参考文献 (References):

- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46(3): 605-626
- Cao H H, Xu W L, Pei F P, Wang Z W, Wang F, Wang Z J. 2013. Zircon U-Pb geochronology and petrogenesis of the Late Paleozoic-Early Mesozoic intrusive rocks in the eastern segment of the northern margin of the North China Block. *Lithos*, 170-171: 191-207
- Chen B, Jahn B M, Tian W. 2009. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction-and collision-related magmas and forearc sediments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 245-257
- Chen J F, Xie Z, Li H M, Zhang X D, Zhou T X, Park Y S, Ahn K S, Chen D G, Zhang X. 2003. U-Pb zircon ages for a collision-related

- K-rich complex at Shidao in the Sulu ultrahigh pressure terrane, China. *Geochemical Journal*, 37(1): 35–46
- Chen Z G, Zhang L C, Wan B, Wu H Y, Cleven N. 2011. Geochronology and geochemistry of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit in NE China, and their geological significance. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 92–105
- Cho D L, Lee S R, Armstrong R. 2008. Termination of the Permo-Triassic Songrim (Indosinian) orogeny in the Ogcheon belt, South Korea: Occurrence of ca. 220 Ma post-orogenic alkali granites and their tectonic implications. *Lithos*, 105(3–4): 191–200
- Cho D L, Suzuki K. 1999. Theory and techniques of the CHIME dating and a CHIME zircon dating of the Daegang alkali granite. In: Paper presented at 54th Annual Meeting. Dangjin, South Korea; Geological Society of Korea (请核对会议标题)
- Cho K H, Takagi H, Suzuki K. 1999. Chime monazite age of granitic rocks in the Sunchang shear zone, Korea: Timing of dextral ductile shear. *Geosciences Journal*, 3(1): 1–15
- Ernst W G, Tsujimori T, Zhang R, Liou J G. 2007. Permo-triassic collision, subduction-zone metamorphism, and tectonic exhumation along the East Asian continental margin. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35: 73–110
- Fukuyama M, Ogasawara M, Horie K, Lee D C. 2013. Genesis of jadeite-quartz rocks in the Yorii area of the Kanto Mountains, Japan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63: 206–217
- Gill J B. 1981. *Orogenic andesites and plate tectonics*. New York: Springer
- Gou J, Sun D Y, Ren Y S, Liu Y J, Zhang S Y, Fu C L, Wang T H, Wu P F, Liu X M. 2013. Petrogenesis and geodynamic setting of Neoproterozoic and Late Paleozoic magmatism in the Manzhouli-Erguna area of Inner Mongolia, China: Geochronological, geochemical and Hf isotopic evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 67–68: 114–137
- Guo F, Li H X, Fan W M, Li J Y, Zhao L, Huang M W, Xu W L. 2015. Early Jurassic subduction of the Paleo-Pacific Ocean in NE China: Petrologic and geochemical evidence from the Tumen mafic intrusive complex. *Lithos*, 224–225: 46–60
- Guo P, Xu W L, Yu J J, Wang F, Tang J, Li Y. 2016. Geochronology and geochemistry of Late Triassic bimodal igneous rocks at the eastern margin of the Songnen-Zhangguangcai Range Massif, Northeast China: Petrogenesis and tectonic implications. *International Geology Review*, 5(2): 196–215
- Jiang N, Liu Y S, Zhou W G, Yang J H, Zhang S Q. 2007. Derivation of Mesozoic adakitic magmas from ancient lower crust in the North China Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(10): 2591–2608
- Kelemen P B, Hangh J K, Greene A R. 2003. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. In: Rudnick R L, ed. *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 3: 1–70
- Kim C B, Turek A. 1996. Advances in U-Pb zircon geochronology of Mesozoic plutonism in the southwestern part of Ryeongnam massif, Korea. *Geochemical Journal*, 30(6): 323–338
- Le Maitre R W. 1989. *A Classification of igneous rocks and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. New York: Blackwell Science Inc
- Li J Y. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian ocean and subduction of the Paleo-Pacific plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3–4): 207–224
- Li S G, Jagoutz E, Chen Y Z, Li Q L. 2000. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, central China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(6): 1077–1093
- Li Y, Xu W L, Wang F, Pei F P, Tang J, Zhao S. 2016. Triassic volcanism at the eastern margin of the Xing'an Massif, NE China: Constraints on the spatial-temporal extent of the influence of the Mongol-Okhotsk tectonic regime. *Lithos*, (under review)
- Li Z X, Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179–182
- Liu J L, Xu Z Q, Liou J G, Song B. 2004. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh-pressure and retrograde metamorphism of gneisses, southwestern Sulu terrane, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 22(4): 315–326
- Liu W, Pan X F, Liu D Y, Chen Z Y. 2009. Three-step continental-crust growth from subduction accretion and underplating, through intermediary differentiation, to granitoid production. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1413–1439
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, Moyen J F, Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1–2): 1–24
- Miao L C, Qiu Y M, Fan W M, Zhang F Q, Zhai M G. 2005. Geology, geochronology, and tectonic setting of the Jiapigou gold deposits, southern Jilin Province, China. *Ore Geology Reviews*, 26(1–2): 137–165
- Miao L C, Qiu Y M, McNaughton N, Luo Z K, Groves D, Zhai Y S, Fan W M, Zhai M G, Guan K. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of granitoids from Dongping area, Hebei Province, China: Constraints on tectonic evolution and geodynamic setting for gold metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 19(3–4): 187–204
- 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(1): 63–81
- Peng P, Zhai M G, Guo J H, Zhang H F, Zhang Y B. 2008. Petrogenesis of Triassic post-collisional syenite plutons in the Sino-Korean craton: An example from North Korea. *Geological Magazine*, 145(5): 637–647
- Pitcher W S. 1983. Granite type and tectonic environment. In: Hsu K, ed. *Mountain Building Processes*. London: Academic Press
- Pitcher W S. 1997. *The nature and origin of granite*. 2nd ed. London: Chapman and Hall
- Ree J H, Kwon S H, Park Y, Kwon S T, Park S H. 2001. Pre-tectonic and post-tectonic emplacements of the granitoids in the south central

- Okchon belt, South Korea; Implications for the timing of strike-slip shearing and thrusting. *Tectonics*, 20(6): 850–867
- Safonova I Y, Santosh M. 2014. Accretionary complexes in the Asia-Pacific region: Tracing archives of ocean plate stratigraphy and tracking mantle plumes. *Gondwana Research*, 25(1): 126–158
- Sagong H, Kwon S T, Ree J H. 2005. Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, 24(5): TC5002
- Sengör A M C, Natal'in B A. 1996. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis. Cambridge: Cambridge University Press, 486–641
- Sengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299–307
- Sorokin A A, Kotov A B, Sal'nikova E B, Kudryashov N M, Anisimova I V, Yakovleva S Z, Fedoseenko A M. 2010. Granitoids of the Tyrma-Bureya complex in the northern Bureya-Jiamusi superterrane of the Central Asian fold belt: Age and geodynamic setting. *Russian Geology and Geophysics*, 51(5): 563–571
- Stern R J. 2002. Subduction zones. *Review of Geophysics*, 40(4): 1012
- Sun D Y, Gou J, Wang T H, Ren Y S, Liu Y J, Guo H Y, Liu X M, Hu Z C. 2013. Geochronological and geochemical constraints on the Erguna massif basement, NE China—subduction history of the Mongol-Okhotsk oceanic crust. *International Geology Review*, 55(14): 1801–1816
- Sun M D, Xu Y G, Wilde S A, Chen H L, Yang S F. 2015. The Permian Dongfanghong island-arc gabbro of the Wandashan Orogen, NE China: Implications for Paleo-Pacific subduction. *Tectonophysics*, 659: 122–136
- Tang J, Xu W L, Wang F, Wang W, Xu M J, Zhang Y H. 2014. Geochronology and geochemistry of Early–Middle Triassic magmatism in the Erguna Massif, NE China: Constraints on the tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean. *Lithos*, 184–187: 1–16
- Tang J, Xu W L, Wang F, Zhao S, Wang W. 2016. Early Mesozoic southwards subduction history of the Mongol-Okhotsk oceanic plate: Evidence from geochronology and geochemistry of early Mesozoic intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China. *Gondwana Research*, 31: 218–240
- Turek A, Kim C B. 1995. U-Pb zircon ages of Mesozoic plutons in the Damyang-Geochang area, Ryongnam massif, Korea. *Geochemical Journal*, 29(4): 243–258
- Wan Y S, Li R W, Wilde S A, Liu D Y, Chen Z Y, Yan L, Song T R, Yin X Y. 2005. UHP metamorphism and exhumation of the Dabie Orogen, China: Evidence from SHRIMP dating of zircon and monazite from a UHP granitic gneiss cobble from the Hefei Basin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(17): 4333–4348
- Wang F, Xu W L, Xu Y G, Gao F H, Ge W C. 2015b. Late Triassic bimodal igneous rocks in eastern Heilongjiang Province, NE China: Implications for the initiation of subduction of the Paleo-Pacific Plate beneath Eurasia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 406–423
- Wang F, Xu Y G, Xu W L, Yang L, Wu W, Sun C Y. 2016. Early Jurassic calc-alkaline magmatism in northeast China: Magmatic response to Paleo-Pacific Plate subduction beneath the Eurasian continent. *Journal of Asian Earth Sciences*, (under review)
- Wang W, Tang J, Xu W L, Wang F. 2015a. Geochronology and geochemistry of Early Jurassic volcanic rocks in the Erguna Massif, northeast China: Petrogenesis and implications for the tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk suture belt. *Lithos*, 218–219: 73–86
- Wang Z J, Xu W L, Pei F P, Wang Z W, Li Y, Cao H H. 2015c. Geochronology and geochemistry of middle Permian–Middle Triassic intrusive rocks from central-eastern Jilin Province, NE China: Constraints on the tectonic evolution of the eastern segment of the Paleo-Asian Ocean. *Lithos*, 238: 13–25
- Wilde S A, Zhang X Z, Wu F Y. 2000. Extension of a newly identified 500 Ma metamorphic terrane in North East China: Further U-Pb SHRIMP dating of the Mashan Complex, Heilongjiang Province, China. *Tectonophysics*, 328(1–2): 115–130
- Wilde S A, Wu F Y, Zhang X Z. 2003. Late Pan-African magmatism in northeastern China: SHRIMP U-Pb zircon evidence from granitoids in the Jiamusi Massif. *Precambrian Research*, 122(1–4): 311–327
- Wilde S A. 2015. Final amalgamation of the Central Asian Orogenic Belt in NE China: Paleo-Asian Ocean closure versus Paleo-Pacific plate subduction—A review of the evidence. *Tectonophysics*, 662: 345–362
- Williams I S, Cho D L, Kim S W. 2009. Geochronology, and geochemical and Nd-Sr isotopic characteristics of Triassic plutonic rocks in the Gyeonggi Massif, South Korea: Constraints on Triassic post-collisional magmatism. *Lithos*, 107(3–4): 239–256
- Wilson B M. 1989. Igneous petrogenesis: A global tectonic approach. London: Unwin Hyman
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W J, Kröner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31–47
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S, Sun D Y. 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328(1–2): 89–113
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1–2): 143–173
- Wu F Y, Wilde S A, Zhang G L, Sun D Y. 2004. Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu-Ni, sulfide-bearing mafic-ultramafic complexes in Jilin Province, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 781–797
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Zhang X O. 2005. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chemical Geology*, 221(1–2): 127–156
- Wu F Y, Han R H, Yang J H, Wilde S A, Zhai M G, Park S C. 2007a. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 238(3–4): 232–248
- Wu F Y, Zhao G C, Sun D Y, Wilde S A, Yang J H. 2007b. The Hulan Group: Its role in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(3–4): 542–556
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, Grant M L, Wilde S A, Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1–30

- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, Sun S, Li J Y. 2004. Paleozoic accretionary and collision tectonics of the eastern Tianshan(China): Implications for the continental growth of central Asia. *American Journal of Science*, 304: 370-395
- Xu W L, Ji W Q, Pei F P, Meng E, Yu Y, Yang D B, Zhang X Z. 2009. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin Provinces, NE China: Chronology, geochemistry, and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 392-402
- Xu W L, Pei F P, Wang F, Meng E, Ji W Q, Yang D B, Wang W. 2013. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 167-193
- Yang H, Ge W C, Zhao G C, Yu J J, Zhang Y L. 2015. Early Permian-Late Triassic granitic magmatism in the Jiamusi-Khanka Massif, eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt and its implications. *Gondwana Research*, 27(4): 1509-1533
- Yang J H, Chung S L, Wilde S A, Wu F Y, Chu M F, Lo C H, Fan H R. 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chemical Geology*, 214(1-2): 99-125
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Liu X M. 2007a. Petrogenesis of Late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong Peninsula, North China Craton. *Chemical Geology*, 242(1-2): 155-175
- Yang J H, Sun J F, Chen F K, Wilde S A, Wu F Y. 2007b. Sources and petrogenesis of Late Triassic dolerite dikes in the Liaodong Peninsula: Implications for post-collisional lithosphere thinning of the Eastern North China Craton. *Journal of Petrology*, 48(10): 1973-1997
- Yu J J, Wang F, Xu W L, Gao F H, Pei F P. 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*, 142-143: 256-266
- Yu Y, Xu W L, Pei F P, Yang D B, Zhao Q G. 2009. Chronology and geochemistry of Mesozoic volcanic rocks in the Linjiang area, Jilin Province and their tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 83(2): 245-257
- Zhang J H, Ge W C, Wu F Y, Wilde S A, Yang J H, Liu X M. 2008. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, Northeastern China. *Lithos*, 102(1-2): 138-157
- Zhang S H, Zhao Y, Davis G A, Ye H, Wu F. 2014. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization. *Earth-Science Reviews*, 131: 49-87
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, Hu J M, Liu S W, Yang Y H, Chen F K, Liu X M, Liu J. 2009a. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications. *Geological Society of America Bulletin*, 121(1-2): 181-200
- Zhang X H, Zhang H F, Zhai M G, Wilde S A, Xie L W. 2009b. Geochemistry of Middle Triassic gabbros from northern Liaoning, North China: Origin and tectonic implications. *Geological Magazine*, 146(4): 540-551
- Zhang X Z, Guo Y, Zhou J B, Zeng Z, Pu J B, Fu Q L. 2015. Late Paleozoic-Early Mesozoic tectonic evolution in the east margin of the Jiamusi massif, eastern northeastern China. *Russian Journal of Pacific Geology*, 9(1): 1-10
- Zhang Y B, Wu F Y, Wilde S A, Zhai M G, Lu X P, Sun D Y. 2004. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of 'Early Paleozoic' granitoids at Yanbian, Jilin Province, northeast China. *The Island Arc*, 13(4): 484-505
- Zhou J B, Wilde S A. 2013. The crustal accretion history and tectonic evolution of the NE China segment of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 23(4): 1365-1377
- Zhou J B, Cao J L, Wilde S A, Zhao G C, Zhang J J, Wang B. 2014. Paleo-Pacific subduction-accretion: Evidence from Geochemical and U-Pb zircon dating of the Nadanhada accretionary complex, NE China. *Tectonics*, 33(12): 2444-2466
- 曹花花. 2013. 华北板块北缘东段晚古生代-早中生代火成岩的年代学与地球化学研究. 博士学位论文. 长春: 吉林大学
- 陈静, 孙丰月, 潘彤, 王瑾, 霍亮. 2012. 黑龙江霍吉河钼矿成矿地质特征及花岗闪长岩年代学、地球化学特征. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(S1): 207-215
- 陈志广, 张连昌, 卢百志, 李占龙, 吴华英, 相鹏, 黄世武. 2010. 内蒙古太平川铜钼矿成矿斑岩时代、地球化学及地质意义. *岩石学报*, 26(5): 1437-1449
- 褚少雄, 刘建明, 徐九华, 魏浩, 柴辉佟, 佟匡胤. 2012. 黑龙江三矿沟铁铜矿床花岗闪长岩锆石 U-Pb 定年、岩石成因及构造意义. *岩石学报*, 28(2): 433-450
- 崔盛芹, 李锦蓉. 1983. 试论中国滨太平洋带的印支运动. *地质学报*, 57(1): 51-61
- 方俊钦, 聂海军, 张可, 刘勇, 徐备. 2012. 辽宁姚家沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄测定及其地质意义. *岩石学报*, 28(2): 372-378
- 付长亮, 孙德有, 张兴洲, 魏红艳, 苟军. 2010. 吉林珲春三叠纪高镁闪长岩的发现及地质意义. *岩石学报*, 26(4): 1089-1102
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 2005. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *岩石学报*, 21(3): 749-762
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 2007. 兴蒙造山带东段斑岩型 Cu, Mo 矿床成矿时代及其地球动力学意义. *科学通报*, 52(20): 2407-2417
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, Siebel W, 翟明国. 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. *岩石学报*, 21(4): 1281-1301
- 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的意义. *岩石学报*, 20(6): 1375-1388
- 何晓东, 张超, 耿瑞, 雷聪聪, 关庆彬, 刘杰勋. 2014. 吉林延边地区月山洞闪长岩岩体年代学、岩石地球化学及其地质意义. *地质与资源*, 23(1): 42-50
- 侯召硕. 2014. 内蒙古额尔古纳地区八大关铜钼矿床成因与构造背景. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学
- 胡健民, 赵越, 刘晓文, 石玉若, 赵国春. 2005. 辽西凌源地区水泉

- 沟组辉石安山岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义. 地质通报, 24(2): 104-109
- 江思宏, 聂凤军, 苏永江, 蔡建新, 丁钟. 2010. 蒙古国图木尔廷敖包大型锌矿床地质特征及成因. 地球学报, 31(3): 321-330
- 鞠楠, 任云生, 王超, 王辉, 赵华雷, 屈文俊. 2012. 吉林敦化大石河钼矿床成因与辉钼矿 Re-Os 同位素测年. 世界地质, 31(1): 68-76
- 雷聪聪, 李世超, 刘正宏, 徐仲元, 张超, 白新会. 2014. 延边地区明南洞岩体的成因及构造背景: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄的制约. 中国地质, 41(4): 1328-1340
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 李亚萍, 王彦斌. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. 岩石学报, 23(3): 565-582
- 李锦轶, 牛宝贵, 宋彪, 徐文喜, 张雨红. 1999. 长白山北段地壳的形成与演化. 北京: 地质出版社
- 李立兴, 松权衡, 王登红, 王成辉, 屈文俊, 汪志刚, 毕守业, 于城. 2009. 吉林福安堡钼矿中辉钼矿铼-钨同位素定年及成矿作用探讨. 岩矿测试, 28(3): 283-287
- 李之彤, 赵春荆. 1985. 东北地区的印支运动. 地质科学, 20(3): 211-223
- 刘金龙, 孙丰月, 林博磊, 王英德, 王硕, 胡安新. 2015. 吉林延边地区棉田岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素. 地球科学-中国地质大学学报, 40(1): 49-60
- 刘翼飞, 聂凤军, 江思宏, 薛静, 侯万荣, 云飞. 2010. 蒙古国阿林诺尔钼矿床赋矿花岗岩年代学及地球化学特征. 地球学报, 31(3): 343-349
- 刘勇, 聂凤军, 刘翼飞, 侯万荣. 2012. 内蒙古宝格达乌拉钼(钨)矿区花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义. 岩石学报, 28(2): 401-408
- 柳长峰. 2010. 内蒙古四子王旗地区古生代-早中生代岩浆岩带及其构造意义. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京)
- 路孝平, 吴福元, 赵成弼, 张艳斌. 2003. 通化地区印支期花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其与大别-苏鲁超高压带碰撞造山作用之间的关系. 科学通报, 48(8): 843-849
- 罗镇宽, 李俊建, 关康, 裴有守, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2004. 辽宁凌源柏杖子金矿区花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄. 地质调查与研究, 27(2): 82-85
- 罗镇宽, 苗来成, 关康, 裴有守, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2003. 冀东都山花岗岩基及相关花岗岩斑岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 法定年及其意义. 地球化学, 32(2): 173-180
- 马寅生, 曾庆利, 宋彪, 杜建军, 杨富全, 赵越. 2007. 燕山中段盘山花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定及其构造意义. 岩石学报, 23(3): 547-556
- 毛德宝, 陈志宏, 钟长汀, 左义成, 石森, 胡小蝶. 2003. 冀北北岔沟门地区中生代侵入岩地质年代学和地球化学特征研究. 岩石学报, 19(4): 661-674
- 孟恩, 许文良, 杨德彬, 邱昆峰, 李长华, 祝洪涛. 2011. 满洲里地区灵泉盆地中生代火山岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义. 岩石学报, 27(4): 1209-1226
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社
- 聂凤军, 胡朋, 江思宏, 刘翼飞. 2010. 中蒙边境沙麦-玉古兹尔地区钨和钼(钼)矿床地质特征, 形成时代和成因机理. 地球学报, 31(3): 383-394
- 裴福萍, 许文良, 于洋, 赵全国, 杨德彬. 2008. 吉林南部晚三叠世蚂蚁河岩体的成因: 锆石 U-Pb 年代学和地球化学证据. 吉林大学学报(地球科学版), 38(3): 351-362
- 彭向东, 张梅生, 李晓敏. 1999. 吉黑造山带古生代构造古地理演化. 世界地质, 18(3): 24-28
- 彭玉鲸, 齐成栋, 周晓东, 卢兴波, 董红辰, 李壮. 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. 地质与资源, 21(3): 261-265
- 彭玉鲸, 赵成弼. 2001. 古吉黑造山带的演化与陆壳的增生. 吉林地质, 20(2): 1-9
- 任纪舜, 陈廷恩, 牛宝贵, 刘志刚, 刘凤仁. 1992. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社
- 任荣, 牟保磊, 韩宝福, 张磊, 陈家富, 徐钊, 宋彪. 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. 岩石学报, 25(3): 588-594
- 余宏全, 李进文, 向安平, 关继东, 杨郧城, 张德全, 谭刚, 张斌. 2012. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系. 岩石学报, 28(2): 571-594
- 余宏全, 梁玉伟, 李进文, 关继东, 张德全, 杨郧城, 向安平, 金俊, 谭刚, 张斌. 2011. 内蒙古莫尔道嘎地区早中生代岩浆作用及其地球动力学意义. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6): 1831-1864
- 石玉若, 刘敦一, 张旗, 简平, 张福勤, 苗来成, 施光海, 张履桥, 陶华. 2004. 内蒙古苏左旗地区闪长-花岗岩类 SHRIMP 年代学. 地质学报, 78(6): 789-799
- 石玉若, 刘敦一, 张旗, 简平, 张福勤, 苗来成, 张履桥. 2007. 内蒙古中部苏尼特左旗地区三叠纪 A 型花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其区域构造意义. 地质通报, 26(2): 183-189
- 隋振民, 葛文春, 吴福元, 张吉衡, 徐学纯, 程端玉. 2007. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗质岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因. 岩石学报, 23(2): 461-480
- 孙德有, 许文良, 周燕. 1994. 大兴安岭中生代火山岩的形成机制. 矿物岩石地球化学通报, 13(3): 162-164
- 孙德有, 吴福元, 高山, 路孝平. 2005. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约. 地质前缘, 12(2): 263-275
- 孙德有, 吴福元, 高山. 2004a. 小兴安岭东部清水岩体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定. 地球学报, 25(2): 213-218
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 高山. 2004b. 西拉木伦河—长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间: 来自吉林大玉山花岗岩体的证据. 吉林大学学报(地球科学版), 34(2): 174-181
- 孙卫东, 凌明星, 汪方跃, 丁兴, 胡艳华, 周继彬, 杨晓勇. 2008. 太平洋板块俯冲与中国东部中生代地质事件. 矿物岩石地球化学通报, 27(3): 218-225
- 唐杰, 许文良, 王枫, 高福红, 曹花花. 2011. 张广才岭帽儿山组双峰式火山岩成因: 年代学与地球化学证据. 世界地质, 30(4): 508-520
- 田伟, 陈斌, 刘超群, 张华锋. 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. 岩石学报, 23(3): 583-590
- 汪新文, 刘友元. 1997. 东北地区前中生代构造演化及其与晚中生代盆地发育的关系. 现代地质, 11(4): 434-443
- 王成辉, 松权衡, 王登红, 李立兴, 于城, 汪志刚, 屈文俊, 杜安道,

- 应立娟. 2009. 吉林大黑山超大型钼矿辉钼矿铼-钨同位素定年及其地质意义. 岩矿测试, 28(3): 269-273
- 王芳, 陈福坤, 侯振辉, 彭澎, 翟明国. 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. 岩石学报, 25(11): 3057-3074
- 王枫, 许文良, 葛文春, 杨浩, 裴福萍, 吴韦. 2016. 敦化-密山断裂带的平移距离: 来自松嫩-张广才岭-佳木斯-兴凯地块古生代-中生代岩浆作用的制约. 岩石学报, 32(4): 1129-1140
- 王辉, 任云生, 赵华雷, 鞠楠, 屈文俊. 2011. 吉林安图刘生店钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义. 地球学报, 32(6): 707-715
- 王惠初, 赵凤清, 李惠民, 孙立新, 苗来成, 冀世平. 2007. 冀北闪长质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 晚古生代岩浆弧的地质记录. 岩石学报, 23(3): 597-604
- 王天豪, 张书义, 孙德有, 苟军, 任云生, 武鹏飞, 柳小明. 2014. 满洲里南部中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征. 世界地质, 33(1): 26-38
- 王伟, 许文良, 王枫, 孟恩. 2012. 满洲里-额尔古纳地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年代学与岩石组合: 对区域构造演化的制约. 高校地质学报, 18(1): 88-105
- 王鑫琳, 张臣, 刘树文, 舒桂明. 2007. 河北康保地区花岗岩独居石电子探针定年. 岩石学报, 23(4): 817-822
- 王召林, 金凌, 李占龙, 卢百志, 张忠义, 可旭升, 赵伟, 周亚男, 周菊芳. 2010. 大兴安岭中北段莫尔道嘎地区含矿斑岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及成矿意义. 岩石矿物学杂志, 29(6): 796-810
- Wilde S A, 吴福元, 张兴洲. 2001. 中国东北麻山杂岩晚泛非期变质的锆石 SHRIMP 年龄证据及全球大陆再造意义. 地球化学, 30(1): 35-50
- 吴福元, Wilde S A, 孙德有. 2001. 佳木斯地块片麻状花岗岩的锆石离子探针 U-Pb 年龄. 岩石学报, 17(3): 443-452
- 吴福元, 曹林. 1999. 东北亚地区的若干重要基础地质问题. 世界地质, 18(2): 1-13
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 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
- 吴福元, 杨进辉, 柳小明. 2005. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架. 高校地质学报, 11(3): 305-317
- 武广. 2006. 大兴安岭北部区域成矿背景与有色、贵金属矿床成矿作用. 博士学位论文. 长春: 吉林大学
- 武鹏飞, 孙德有, 王天豪, 苟军, 李蓉, 刘玮, 柳小明. 2013. 延边和龙地区闪长岩的年代学、地球化学特征及岩石成因研究. 高校地质学报, 19(4): 600-610
- 徐美君, 许文良, 王枫, 高福红, 于介江. 2013. 小兴安岭中部早侏罗世花岗岩的年龄学与地球化学及其构造意义. 岩石学报, 29(2): 354-368
- 许立权, 贾和义, 张玉清, 陶继雄. 2004. 白云鄂博地区碱性正长岩特征及其意义. 地质调查与研究, 27(1): 43-47
- 许文良, 王枫, 裴福萍, 孟恩, 唐杰, 徐美君, 王伟. 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
- 杨进辉, 吴福元. 2009. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39(7): 910-921
- 杨言辰, 韩世炯, 孙德有, 郭嘉, 张苏江. 2012. 小兴安岭-张广才岭成矿带斑岩型钼矿床岩石地球化学特征及其年代学研究. 岩石学报, 28(2): 227-235
- 张春艳, 张兴洲, 邱殿明. 2007. 延边地区青龙村群斜长角闪岩中锆石 U-Pb 同位素年龄及地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 37(4): 672-677
- 张炯飞, 朱群, 邵军, 金成洙. 2003. 内蒙古八道卡石英闪长岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 33(4): 430-433
- 张拴宏, 赵越, 刘建民, 胡健民, 宋彪, 刘健, 吴海. 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. 岩石矿物学杂志, 29(6): 824-842
- 张万益, 聂红军, 江思宏, 刘妍, 许东青, 郭灵俊. 2008. 内蒙古查干敖包石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 27(3): 177-184
- 张彦龙, 葛文春, 高妍, 陈井胜, 赵磊. 2010. 龙镇地区花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及地质意义. 岩石学报, 26(4): 1059-1073
- 张勇, 孙景贵, 松权衡, 赵志, 陈冬, 门兰静, 白令安, 韩世炯. 2011. 延边天宝山多金属矿床的矿物流体包裹体激光探针 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年及其地质意义. 矿物岩石, 31(2): 42-47
- 章永梅, 张华锋, 刘文灿, 周志广. 2009. 内蒙古中部四子王旗大庙岩体时代及成因. 岩石学报, 25(12): 3165-3181
- 赵庆英, 刘正宏, 吴新伟, 陈晓锋. 2007. 内蒙古大青山地区哈拉合少岩体特征及成因. 矿物岩石, 27(1): 46-51
- 赵院冬, 迟效国, 车继英, 刘建峰, 赵芝. 2009. 延边-东宁地区晚三叠世花岗岩地球化学特征及其大地构造背景. 吉林大学学报(地球科学版), 39(3): 425-434

(本文责任编辑: 龚超颖, 英文审校: 高剑峰)