中国科学: 地球科学 2018 年 第 48 卷 第 5 期: 549 ~ 583
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 克拉通破坏与西太平洋板块俯冲专题

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

唐杰[1], 许文良[1,2*], 王枫[1], 葛文春[1]

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061;
2. 国土资源部东北亚矿产资源评价重点实验室, 长春 130061
* 通讯作者, E-mail: xuwl@jlu.edu.cn

收稿日期: 2017-06-27; 收修改稿日期: 2017-12-17; 接受日期: 2018-01-31; 网络版发表日期: 2018-03-29
国家自然科学基金项目(批准号: 41330206; 41702051)、国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0600403)和中国博士后科学基金项目(编号: 2017T100204; 2017M611314)资助

摘要 系统总结了东北亚陆缘中生代-古近纪火成岩的岩石组合、地球化学特征及其空间变异, 讨论了中生代多构造体系影响的时空范围以及古太平洋板块向欧亚大陆下俯冲作用的起始时间及其俯冲历史. 东北亚陆缘中生代-古近纪火成岩可划分为九期: 早-中三叠世、晚三叠世、早侏罗世、中侏罗世、晚侏罗世、早白垩世早期、早白垩世晚期、晚白垩世和古近纪. 东北亚陆缘三叠纪埃达克质岩石、双峰式火山岩、碱性岩、A-型花岗岩和A-型流纹岩的形成主要与古亚洲洋闭合及闭合后的伸展作用有关, 而额尔古纳-兴安地块上三叠纪钙碱性火成岩组合揭示了蒙古-鄂霍茨克大洋板块南向俯冲作用的发生. 三叠纪期间, 东北亚陆缘处于被动陆缘背景; 东北亚陆缘早侏罗世钙碱性火成岩具有弧型火成岩的地球化学特征, 陆内为双峰式火成岩和A-型花岗岩组合, 自陆缘向陆内火成岩成分极性变化与早侏罗世陆缘增生杂岩一起, 揭示了古太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲作用始于早侏罗世; 东北亚陆缘普遍缺少中侏罗世-早白垩世早期(主要为晚侏罗世)岩浆作用, 结合早白垩世陆缘增生杂岩低纬度的生物组合与碎屑锆石年龄组合, 暗示该阶段东北亚陆缘与古太平洋板块之间主要处于走滑的构造属性; 东北亚陆缘广泛分布的早白垩世晚期钙碱性火山岩、I-型花岗岩和埃达克质岩石指示古太平洋板块向东北亚开启大范围低角度俯冲作用; 东北亚陆缘晚白垩世-古近纪火成岩分布范围向东明显缩小, 并且由陆内向沿海地区迁移, 指示欧亚大陆向东漂移和古太平洋俯冲板块逐渐回撤的构造过程.

关键词 东北亚陆缘, 中生代-古近纪, 火成岩, 古太平洋板块, 俯冲作用

1 引言

东北亚陆缘大地构造单元包括兴蒙造山带、华北克拉通东部、锡霍特-阿林造山带、日本岛和朝鲜半岛, 地质构造极其复杂(李锦轶等, 1999; Wu等, 2011). 在古生代-中生代期间, 该区存在古亚洲洋、古太平洋和蒙古-鄂霍茨克洋三大构造体系, 其中蒙古-鄂霍茨克洋普遍被认为是古太平洋的大型海湾(Zorin, 1999;

中文引用格式: 唐杰, 许文良, 王枫, 葛文春. 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. 中国科学: 地球科学, 48: 549–583, doi: 10.1360/N072017-00243
英文引用格式: Tang J, Xu W L, Wang F, Ge W C. 2018. Subduction history of the Paleo-Pacific slab beneath Eurasian continent: Mesozoic-Paleogene magmatic records in Northeast Asia. Science China Earth Sciences, 61: 527–559, https://doi.org/10.1007/s11430-017-9174-1

© 2018 《中国科学》杂志社

Parfenov等, 2001), 在晚古生代-早中生代期间分隔西伯利亚克拉通和中朝-蒙古板块. 由于蒙古-鄂霍茨克洋和古太平洋在构造演化上具有独立性, 因此本文将二者分开进行讨论. 东北亚陆缘在古生代期间经历了古亚洲构造体系的演化(Sengör和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(Xiao等, 2003; Li, 2006; Windley等, 2007). 中生代期间, 东北亚陆缘的构造演化主要受环太平洋构造体系的影响, 这已得到众多地质学家研究的共识. 然而, 东北亚陆缘早中生代期间还受到了蒙古-鄂霍茨克构造体系以及古亚洲洋闭合作用的影响. 近年来, 虽然对东北亚陆缘中生代火山岩与陆缘增生杂岩的研究取得了重要成果(Wu等, 2007a; Xu等, 2013; Wang F等, 2015, 2017), 但是, 对古太平洋板块在欧亚大陆下俯冲起始的时间以及俯冲历史仍然存在争论(Wu等, 2011; Xu等, 2013; Sun等, 2015; Wilde, 2015). 要想查明中生代期间环太平洋构造体系的俯冲演化历史, 首先必须搞清楚中生代期间不同构造体系对欧亚大陆东缘影响的时空范围. 因此, 本文的基本研究思路是: 通过综合分析东北亚陆缘中生代-古近纪不同期次岩浆作用火成岩组合的时空变异, 同时结合中生代陆缘增生杂岩和区域沉积建造组合的研究成果, 初步查明中生代不同期次火成岩组合形成的构造背景, 进而确定不同构造体系对东北亚陆缘影响的时空范围. 在此基础上, 以便揭示中生代-古近纪期间古太平洋板块在东北亚陆缘下的俯冲历史.

2 东北亚陆缘区域地质概况

本文所述东北亚陆缘包括中国东北、华北东部、俄罗斯远东、日本以及南北朝鲜. 在大地构造上, 包括以下构造单元: 兴蒙造山带、华北克拉通东部、锡霍特-阿林造山带、日本岛和朝鲜半岛, 它们位于太平洋西缘, 构成环太平洋大陆边缘的沟-弧-盆体系.

兴蒙造山带位于中亚造山带的东段, 由一系列微陆块和其间的构造带组成, 自西北向东南这些微陆块包括额尔古纳地块、兴安地块、松嫩-张广才岭地块、佳木斯地块以及兴凯地块(李锦轶等, 1999; Wu等, 2011). 古生代期间, 该区经历了古亚洲构造体系的演化. 随着古亚洲洋的持续俯冲收缩, 各微陆块先后发生碰撞拼贴, 虽然对微陆块的最终拼合时间还有不同认识, 但这一过程主要发生在古生代已得到多数学者的认可(许文良等, 2012; Liu等, 2016). 额尔古纳地块东缘早古生代花岗质岩石以及头道桥蓝片岩标志着额尔古纳地块与兴安地块之间的碰撞拼合发生在早古生代早期(Ge等, 2005; Zhao等, 2014; Zhou等, 2015); 兴安地块与松嫩-张广才岭地块的碰撞拼合时间目前还没有统一的认识, 主要观点有: 早石炭世晚期(Li等, 2014)、晚古生代末期-早中生代(苗来成等, 2003)、二叠纪之前(Wu等, 2002)和白垩纪(Nozaka和Liu, 2002); 对于松嫩-张广才岭地块与佳木斯地块的拼合时间仍存在争议: 早泥盆世之前(Meng等, 2010)、中志留世(Wang等, 2012)、中奥陶世(颉颃强等, 2008)、早-中侏罗世(Wu等, 2007a; Zhou等, 2010)、早古生代末(李锦轶等, 1999)、前寒武纪(曹熹等, 1992); 佳木斯地块与兴凯地块于早寒武世(赵寒冬, 2009)或早泥盆世(孙德有等, 2001)或中二叠世(Meng等, 2008)碰撞拼合.

华北克拉通位于兴蒙造山带的南侧, 基于晚二叠世磨拉石建造(Li, 2006)、沿索伦-西拉木伦-长春缝合线产出的晚二叠世-早三叠世同碰撞花岗岩(Cao等, 2013; Wang Z J等, 2015)以及吉林中部呼兰群变质作用(~250Ma; Wu等, 2007a)的研究, 认为古亚洲的最终闭合发生在晚二叠世-中三叠世(Xiao等, 2009), 致使华北克拉通与兴蒙造山带碰撞拼合(张拴宏等, 2010; Wu等, 2011). 根据榴辉岩和片麻岩中锆石TIMS法定年结果(Ames等, 1996)以及对Sm-Nd定年的榴辉岩矿物进行激光氟化氧同位素分析(Zheng等, 2002, 2003), 确定了大别-苏鲁造山带超高压变质发生的时间为三叠纪, 据此, 华北克拉通与扬子板块于三叠纪沿秦岭-大别-苏鲁造山带碰撞拼贴(Wu和Zheng, 2013).

朝鲜半岛传统上划分为三个陆块, 从北到南分别为狼林、京畿和岭南地块, 分别被临津江和沃川构造带分割(翟明国, 2016). 三个地块都具有前寒武纪基底, 其上发育古生代沉积盆地. 狼林地块与华北克拉通具有相似的基底和沉积盖层(Zhao等, 2006; Wu等, 2007b); 京畿地块具有与华南板块相似的震旦纪-古近纪沉积盖层和基底岩石(Kim等, 2013; 武昱东和侯泉林, 2016). 此外, 京畿地块西部下中生界Daedong超群古地磁极与华南板块非常一致(Uno和Chang, 2000); 沉积特征、基底中碎屑锆石的年龄组成和古地磁资料显示, 岭南地块却与华北克拉通具有相似性(Uno, 2000;

Kim等, 2013). 目前, 两个可能的构造模式可用来解释朝鲜半岛构造发展: (1) 临津江带、京畿地块、沃川带构成了较完整的中生代碰撞造山带, 即大别-苏鲁造山带的东延部分, 狼林地块和岭南地块分别对应于华北克拉通和扬子板块, 然而在造山后的伸展拆离过程中, 原本属于华北克拉通的外来构造岩片覆于岭南地块上, 同时造山带下伏的扬子陆壳不断隆升, 使得岭南地块和京畿地块分别显示出华北克拉通和扬子板块的相似性(武昱东和侯泉林, 2016); (2) 翟明国等(2007)提出地壳拆离-逆掩模式, 该模式假设朝鲜半岛整体上属于华北克拉通(即中朝板块), 朝鲜半岛上与苏鲁造山带相似的洪城杂岩属于外来岩石构造单元(翟明国, 2016), 华北克拉通和扬子板块的碰撞带沿着朝鲜半岛西缘近南北向深断裂延伸, 没有深入到朝鲜半岛内部(Hao等, 2007).

日本列岛是中生代以来洋、陆汇聚和来自赤道低纬度地体拼贴增生的产物, 在日本海作为弧后盆地中新世(约15Ma)打开以前, 日本列岛曾是亚洲东部大陆边缘的一部分(Lee等, 1999). Otofuji等(1985, 1991)根据古地磁成果提出日本列岛以东北日本逆时针、西南日本顺时针转动的双开门式旋转造就了现今的面貌. 根据Sr-Nd同位素特征, Wu等(2017)认为在日本海形成之前东北日本和锡霍特-阿林具有亲缘性, 然而, 根据西南日本侏罗纪碎屑岩中碎屑锆石年龄以及中新生代花岗岩的Sr-Nd同位素特征显示西南日本与华夏地块具有亲缘性(Jahn, 2010). 位于能登半岛的飞弹地体与西南日本具有不同的构造属性, 对于飞弹地体的古构造位置存在以下几种观点: (1) 根据飞弹地体上片麻岩中碎屑锆石核部年龄(1.85和2.65Ga), 认为飞弹地体曾位于华北克拉通东缘(Takahashi等, 2018), 后来成为华南-华北缝合带的向东延伸部分(Tsujimori等, 2006; Ernst等, 2007); (2) 飞弹地体是中亚造山带东缘的一部分(Oh, 2006; Zhao等, 2013); (3) 根据变形特征, 一些学者则认为飞弹地体和沃川带相联系(Takahashi等, 2010).

锡霍特-阿林造山带位于布列亚-佳木斯-兴凯地块的东侧. 带内广泛出露构造推覆体、蛇绿混杂岩和滑塌堆积层(Khanchuk等, 1988; Zonenshain等, 1990a, 1990b). Parfenov(1984)提出锡霍特-阿林带是一条增生造山带, 它是由侏罗纪-白垩纪时期的古太平洋板块向欧亚大陆下西向俯冲的拼贴地体组成. 这些地体中产出晚白垩世-始新世花岗岩和大面积同时代火山岩和火山碎屑岩. 锡霍特-阿林造山带内还产出一系列左旋走滑断裂, 其中最大型的是中央锡霍特-阿林断裂带, 该断裂在早白垩世期间最为活跃, 于晚白垩世停止活动(Jahn等, 2015).

3　东北亚陆缘中生代-古近纪岩浆作用期次

本文对东北亚陆缘中生代-古近纪火成岩定年结果进行了统计(网络版附表1, http://earthcn.scichina.com), 对东北亚陆缘及各个分区分别做了火成岩年龄频谱图(图1), 根据频谱图中火成岩年龄峰期值, 结合各期次火成岩组合以及区域性不整合, 本文将东北亚陆缘中生代-古近纪火成岩划分为九期: 早-中三叠世(~245Ma)、晚三叠世(~226Ma)、早侏罗世(~185Ma)、中侏罗世(~168Ma)、晚侏罗世(~151Ma)、早白垩世早期(145~135Ma)、早白垩世晚期(~125Ma)、晚白垩世(~80Ma)和古近纪(~51Ma). 从频谱中可以看出: (1) 东北亚陆缘中生代岩浆作用强烈, 古近纪岩浆作用微弱, 古近纪火成岩仅出露东北亚大陆边缘区; (2) 东北亚陆缘的东部, 包括朝鲜半岛、日本岛、小兴安岭-张广才岭以及吉黑东部都缺乏晚侏罗世-早白垩世早期岩浆作用; (3) 中国东北和俄罗斯远东地区自陆内到陆缘(大兴安岭-小兴安岭-张广才岭-吉黑东部-锡霍特-阿林造山带)中生代-古近纪岩浆作用开始时间逐渐变新.

4　东北亚陆缘中生代-古近纪火成岩组合及其时空变异: 对形成构造背景的制约

4.1　早-中三叠世岩浆作用

东北亚陆缘早-中三叠世火成岩主要分布在两个区域(图2): 一是呈北东-南西向分布在额尔古纳-兴安地块上; 二是呈东西向带状分布在华北克拉通北缘. 此外, 在朝鲜半岛和日本飞弹地体也有少量出露.

4.1.1　额尔古纳-兴安地块

额尔古纳-兴安地块上早-中三叠世火成岩以花岗质岩石为主, 并伴随少量辉长闪长岩、闪长岩和玄武安山岩(Tang等, 2014; Li等, 2017; 网络版附表2). 其中玄武安山岩来自于兴安地块上黑河地区的塔木兰沟组

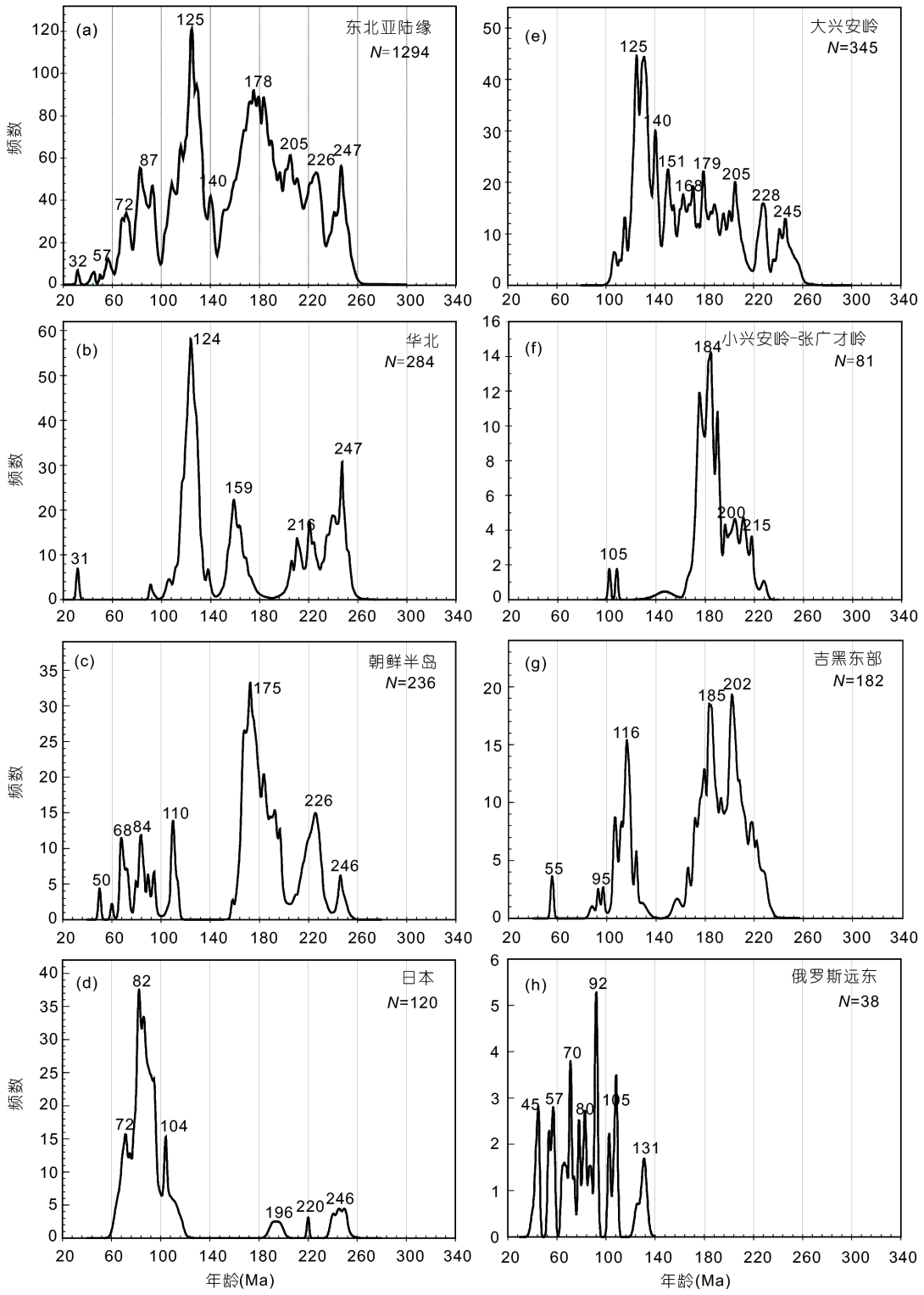

图 1　东北亚陆缘及各个分区中生代-古近纪岩浆作用年龄频谱图

(a) 东北亚陆缘; (b) 华北克拉通; (c) 朝鲜半岛; (d) 日本岛; (e) 大兴安岭; (f) 小兴安岭-张广才岭; (g) 吉黑东部; (h) 锡霍特-阿林造山带. 引用数据详见网络版附表1, *N*为统计火成岩年龄个数

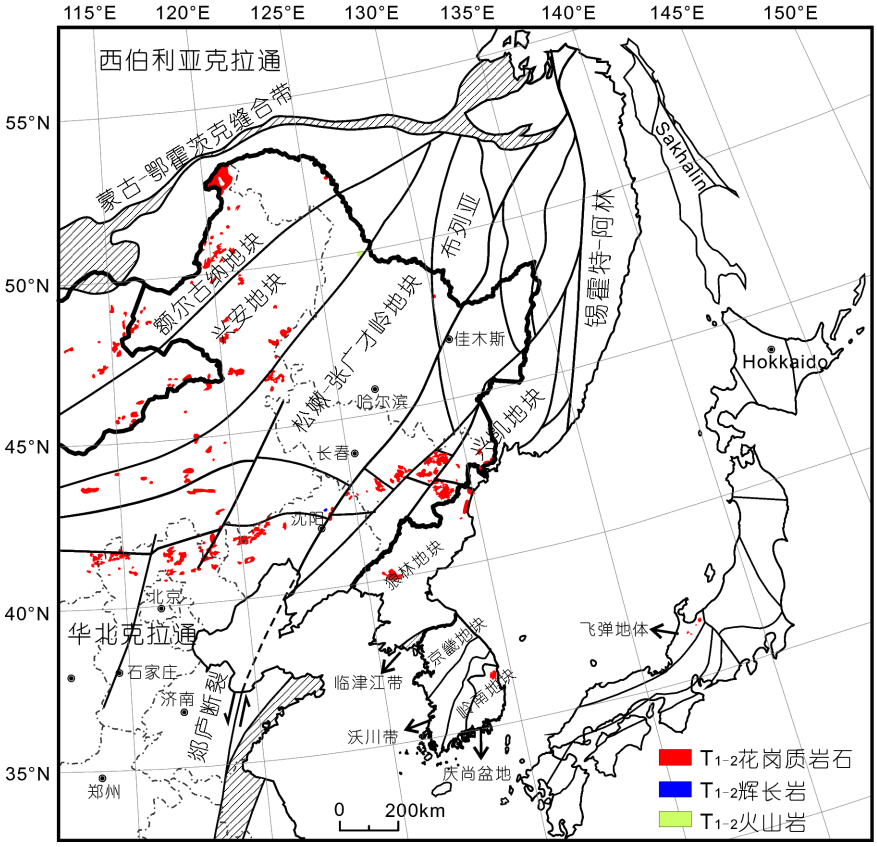

图 2　(网络版彩图)东北亚陆缘早-中三叠世火成岩分布图

(Li等, 2017), 它们具有较低的SiO_2(50.66~53.98wt.%)含量, 较高的Cr(13.7~62.9ppm)、Co(29~40ppm)和Ni(32.4~34.6ppm)含量, 并且富集轻稀土元素和大离子亲石元素、亏损高场强元素和重稀土元素, 此外, 玄武安山岩的锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$值为8.5~12.7, 表明玄武安山岩起源于受俯冲流体交代的亏损地幔楔部分熔融.

本文以额尔古纳地块上恩和-九卡-莫尔道嘎地区的闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩为例(Tang等, 2014), 对额尔古纳-兴安地块上早-中三叠世火成岩特征及其形成的构造背景进行分析. 恩和-九卡-莫尔道嘎地区早-中三叠世中酸性侵入岩的SiO_2=57.71~72.86wt.%、$Mg^{\#}$=19~52、Al_2O_3=14.27~17.23wt.%、Na_2O+K_2O=6.77~9.28wt.%, 属于高钾钙碱性系列, 为准铝质-过铝质I-型花岗岩, 它们具有相近的锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$值(−2.0~6.6), 表明它们起源于新增生下地壳物质的部分熔融. 此外, 它们的SiO_2含量与其他主量元素之间存在明显的线性关系, 说明在岩浆演化过程中存在分离结晶作用(Tang等, 2014). 在地球化学上, 它们属于一套高钾钙碱性系列(图3a和b), 富集轻稀土和大离子亲石元素、亏损重稀土和高场强元素、无明显Eu异常(图3c和d), 这与活动大陆边缘环境火成岩组合相似(Pitcher, 1983, 1997). 此外, 在该区及邻区产出与早-中三叠世火成岩成因密切相关的斑岩型-矽卡岩型矿床, 包括额尔古纳地块上的八八一斑岩型铜钼矿床(237Ma)、中蒙古地块上的图木尔廷敖包矽卡岩型锌矿床(241Ma; 江思宏等, 2010). 综上所述, 额尔古纳-兴安地块上早-中三叠世火成岩应形成于活动大陆边缘环境.

额尔古纳地块-兴安地块上早-中三叠世火成岩平行蒙古-鄂霍茨克缝合带呈北东-南西向带状展布, 并且岩石组合和地球化学特征明显区别于华北克拉通北缘同期的碱性系列火成岩和埃达克质岩石(详见4.1.2). 因此, 本文认为额尔古纳地块-兴安地块上早-中三叠世火成岩的形成与古亚洲构造体系无关, 而是形成于蒙古-鄂霍茨克大洋板块向南俯冲于额尔古纳地块下的活动大陆边缘环境, 这也标志着蒙古-鄂霍茨克大洋板块南向俯冲作用的存在.

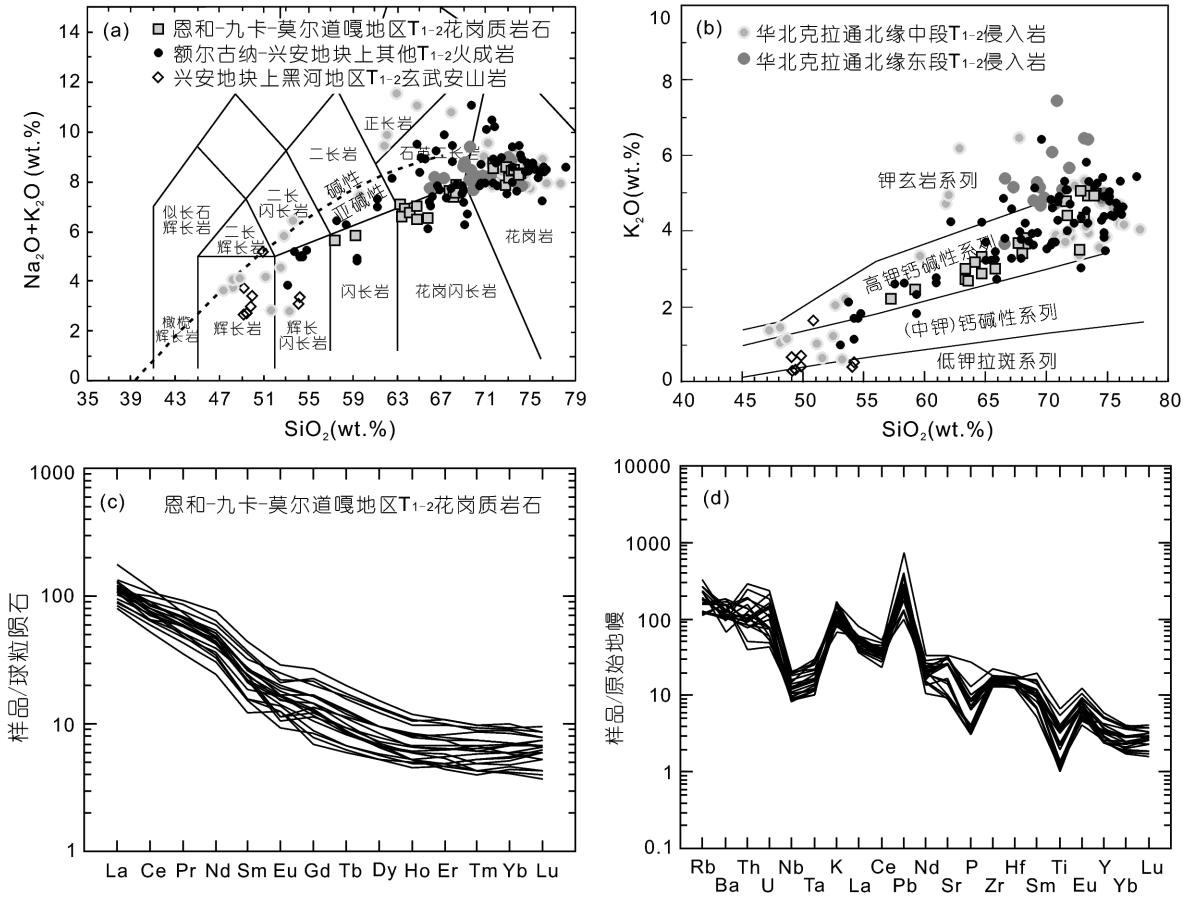

图 3　额尔古纳-兴安地块和华北克拉通北缘早-中三叠世火成岩的TAS图解(a)、SiO_2-K_2O图解(b)、恩和-九卡-莫尔道嘎地区火成岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(c)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(d)

(a) 据Maitre(1989); (b) 据Peccerillo和Taylor(1976); (c) Boynton(1984); (d) 据Sun和McDonough(1989)

4.1.2　华北克拉通北缘

根据华北克拉通北缘早-中三叠世火成岩岩石组合及其地球化学特征差异, 可将该区早-中三叠世火成岩按出露位置分为华北克拉通北缘中段(属于华北克拉通范围的燕-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、碱长花岗岩和正长岩, 属于碱性系列(图3a和b); 部分花岗质岩石属于高钾钙碱性系列, 与该区同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), 表明早二叠世末-晚二叠世之间本区进入挤压收缩的造山作用时期; (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, 如康宝地区含石榴石二长花岗岩(281~266Ma; 王鑫琳等, 2007)、大青山哈拉合少岩体(261Ma; 赵庆英等, 2007)和内蒙古中部四子王旗大庙岩体(265Ma; 章永梅等, 2009); (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作用(曹花花, 2013). 以上资料均表明, 华北克拉通北缘中段早二叠世末-晚二叠世火成岩形成于古亚洲洋闭合形成的挤压造山环境(曹花花, 2013), 而早-中三叠世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古生代陆缘增生带中(吉林中东部)早-中三叠世花岗岩地球化学属性与中段同时代花岗岩不同. 东段辽源地区建平镇花岗岩(249Ma)、椅山二长花岗岩(247Ma)、磐石-桦甸地区大玉山花岗岩(248Ma)、伊通石榴石白云母二长花岗岩(244Ma)、延边柳树沟二长花岗岩(245Ma)、百里坪二长花岗岩(249~245Ma)均具有低的重稀土元素含量和高Sr低Y特征, 显示埃达克质岩石的地球化学属性(图4; 孙德有等, 2004; Zhang等, 2004; 曹花花, 2013; Wang Z J等, 2015). 它们的Na_2O/K_2O比值小于2, $Mg^{\#}$值普遍小于0.5, 并且具有较低的Cr、Co和Ni含量,表明该区早-中三叠世埃达克质岩石应起源于加厚陆壳物质的部分熔融. 此外, 东段早-中三叠世花岗岩的形成略晚于周围呼兰群峰期变质年龄(晚二叠世), 进一步说明该区早-中三叠世花岗岩为同碰撞型花岗岩, 暗示在早-中三叠世发生了华北克拉通和北部微陆块群(兴蒙造山带)的最终碰撞拼合, 以及古亚洲洋的最终闭合(Wu等, 2007a; Wang Z J等, 2015).

综上所述, 早二叠世末-中二叠世华北克拉通北缘中段的古亚洲洋首先发生闭合, 该区早-中三叠世岩浆作用形成于造山后岩石圈伸展环境; 华北克拉通北缘东段的古亚洲洋于早-中三叠世最终闭合. 华北克拉通北缘中东段岩石组合差异进一步说明古亚洲洋自西向东呈剪刀式逐渐闭合的过程.

4.1.3　朝鲜半岛-日本飞弹地体

早-中三叠世火成岩在朝鲜半岛和日本飞弹地体零星出露, 包括朝鲜半岛狼林地块北缘的冠帽花岗岩(248~240Ma; 张艳斌等, 2016)和Unsan正长岩(234Ma; Wu等, 2007b)、岭南地块庆尚盆地内Yeongdeok花岗岩(250~245Ma; Yi等, 2012), 以及日本飞弹地体片麻状花岗岩(250~240Ma; Takahashi等, 2010; 毛建仁, 2013). 其中, 冠帽花岗岩、Yeongdeok花岗岩和飞弹地体片麻状花岗岩均具有高Sr低Y、亏损重稀土元素的特点, 显示埃达克岩的地球化学属性(图4; Yi等, 2012). 那么, 它们形成于同一构造背景还是不同构造背景呢?

狼林地块与华北克拉通具有相似的基底和沉积盖层属性, 普遍被认为是华北克拉通的一部分(Zhao等, 2006; Wu等, 2007b). 冠帽岩体与华北克拉通北缘东段(吉林中东部)同时代花岗岩具有相似的地球化学属性(图4; 张艳斌等, 2016). 因此, 本文认为冠帽岩体与华北克拉通北缘东段同时代花岗岩形成于相似构造背景, 即古亚洲洋最终闭合形成的造山环境, 而中三叠世晚期Unsan正长岩则表明华北克拉通北缘东段和朝鲜半岛北部自中三叠世晚期进入造山后伸展环境(Wu等, 2007b).

庆尚盆地所在的岭南地块的构造归属目前存在争议: 扬子板块的一部分(武昱东和侯泉林, 2016)或华北克拉通的一部分(翟明国, 2016). Yeongdeok花岗岩为埃达克质岩石, 其地球化学特征与朝鲜半岛北缘冠帽花岗岩和华北克拉通北缘东段同时代花岗岩具有相似的地球化学属性(图4), 而与华南陆块同时代花岗岩特征差别较大(Wang等, 2005, 2007; Zhou等, 2006). 此外, 沃川带中Cheongsan剪切带为中-晚三叠世活动的右旋剪切带(Ree等, 2001; Takahashi等, 2010, 2018). 因此, 本文认为岭南地块与华北克拉通具有亲缘性, 可能是在中-晚三叠世从华北克拉通东北缘由于剪切作用分离出来, 早-中三叠世Yeongdeok花岗岩与华北克拉通北缘东段和朝鲜半岛北部同时代花岗岩一样, 均形成于与古亚洲洋最终闭合有关的造山环境.

日本飞弹地体的构造归属是查明地体上早三叠世片麻状花岗岩形成构造背景的前提. 然而其构造归属一直存在争议: 曾是华北克拉通的一部分、与苏鲁超高压变质带相联系、与沃川带相联系和与中亚造山带相联系(详见正文第2部分). 刘福来和许志琴(2004)通过对含柯石英的锆石幔部进行SHRIMP法U-Pb定年, 确定出大别-苏鲁造山带超高压变质事件的确切年龄为240~ 225Ma, 晚于飞弹地体片麻状花岗岩的形成时代. 因此, 本文认为飞弹地体早三叠世片麻状花岗岩的形成与苏鲁-大别造山带无关. 此外, 沃川带缺乏早-中三叠世岩浆事件, 而华北克拉通北缘东段发育该期花岗岩(图2), 因此, 根据火成岩的分布及岩石学特征, 本文认为飞弹地体应是华北克拉通东北缘的一部分, 可能是由右旋剪切带(Funatsu Shear)在晚三叠世将其从华北克拉通东北缘分离出来(Takahashi等, 2010, 2018). 飞弹地体上早三叠世片麻状花岗岩同样形成于与古亚洲洋最终闭合有关的造山环境.

4.1.4　早-中三叠世火成岩形成的构造背景

东北亚陆缘早-中三叠世火成岩主要分布在额尔古纳-兴安地块和华北克拉通北缘, 少量出露在朝鲜半岛和日本飞弹地体. 额尔古纳-兴安地块上早-中三叠

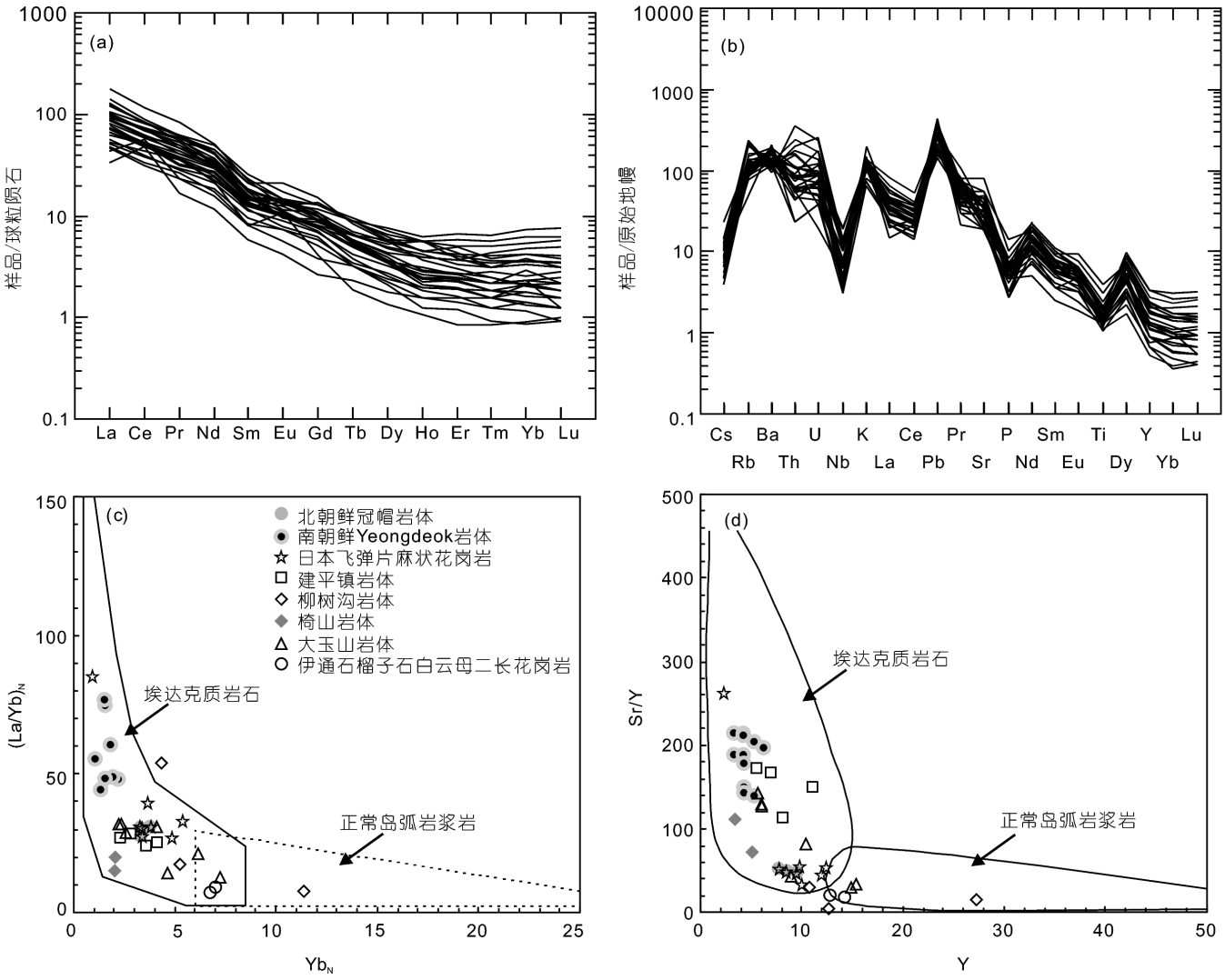

图 4　华北克拉通、朝鲜半岛和日本飞弹早-中三叠世埃达克质岩石的球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)、原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)、$(Yb)_N$-$(La/Yb)_N$图解(c)和Y-Sr/Y图解(d)

(d) 据Defant和Drummond(1990)

世火成岩主要是一套高钾钙碱性中酸性火成岩组合(网络版附表2), 且平行于蒙古-鄂霍茨克缝合带呈北东-南西向带状展布, 它们形成于蒙古-鄂霍茨克大洋板块向南俯冲于额尔古纳地块下的活动大陆边缘环境. 华北克拉通北缘中段早-中三叠世火成岩包括碱性岩和双峰式火成岩组合, 形成于古亚洲洋闭合后的伸展环境. 华北克拉通北缘东段、朝鲜半岛和日本飞弹地体早-中三叠世火成岩主要为埃达克质岩石, 形成于与古亚洲洋最终闭合相关的造山环境. 华北克拉通北缘中段和东段火成岩形成构造环境的差异表明古亚洲洋自西向东呈剪刀式闭合.

4.2　晚三叠世岩浆作用

东北亚陆缘晚三叠世火成岩主要分布在额尔古纳-兴安地块、小兴安岭-张广才岭-吉黑东部、华北克拉通北缘和胶东半岛-辽东半岛-朝鲜半岛四个区域(图5).

4.2.1　额尔古纳-兴安地块

额尔古纳-兴安地块上晚三叠世侵入岩以花岗质岩石为主, 呈岩基产出, 中基性岩石较少(网络版附表2), 同时期火山岩仅在兴安地块上罕达气-扎兰屯-蘑菇

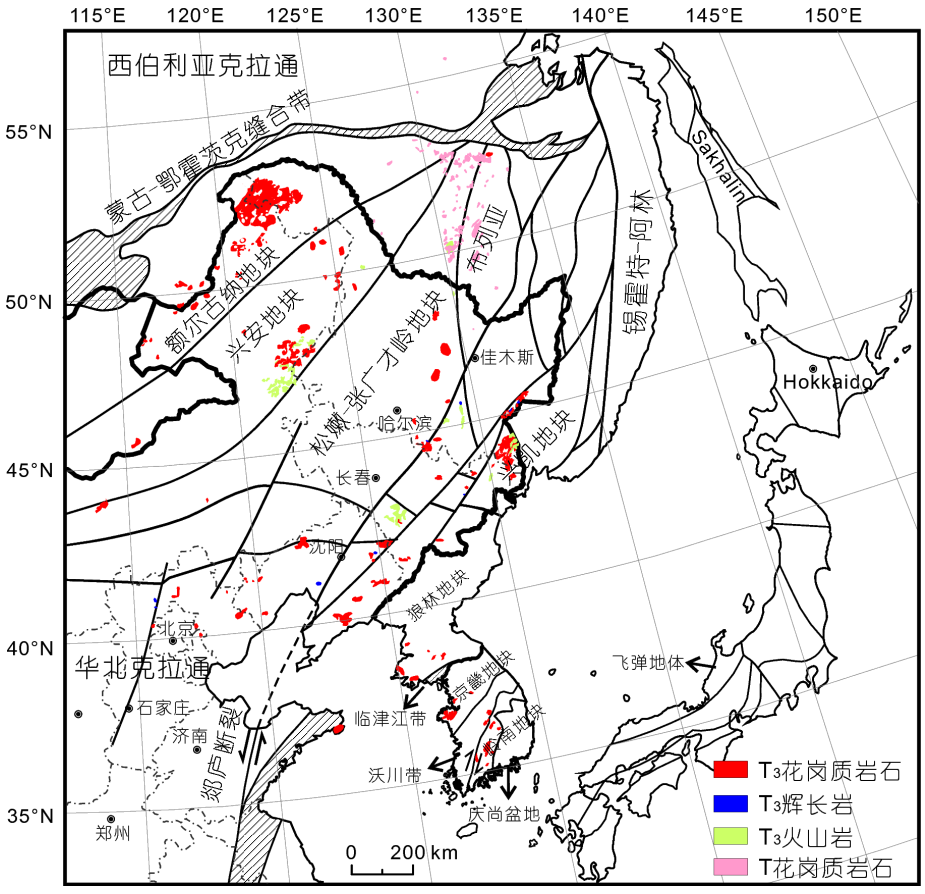

图 5　(网络版彩图)东北亚陆缘晚三叠世火成岩分布图

气地区有少量出露(Li等, 2017). 额尔古纳-兴安地块上晚三叠世火成岩岩石组合及地球化学特征与早-中三叠世火成岩类似: 首先, 晚三叠世火成岩岩石组合与安第斯型活动陆缘侵入岩组合类似; 第二, 它们属于中钾-高钾钙碱性系列(图6a和b); 第三, 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; 第四, 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, 暗示俯冲板片的存在(Tang等, 2016a); 第五, 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(202Ma; 陈志广等, 2010)和八大关斑岩型铜钼矿床(228~218Ma; Tang等, 2016a), 中蒙古地块上的阿林诺尔斑岩型钼矿床(227Ma; 刘翼飞等, 2010); 第六, 该区晚三叠世火成岩沿蒙古-鄂霍茨克缝合带呈北东-南西向带状展布(图5). 这些特征均说明额尔古纳-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.

4.2.2　小兴安岭-张广才岭-吉黑东部

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(网络版附表2), 从TAS图解中可以看出小兴安岭-张广才岭晚三叠世火成岩的SiO_2含量出现明显的间断(图6a和b), 显示出双峰式火成岩组合特点. 结合该区产出的同期A-型花岗岩(Wu等, 2002), 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等, 2013; Wang F等, 2015; Guo等, 2016).

吉黑东部(东宁-汪清-珲春一线)晚三叠世火成岩主要分布在敦化-密山断裂东南区, 属于兴凯地块西缘(图5), 岩性以花岗质岩石和流纹岩为主, 伴随少量正长岩和辉长岩(网络版附表2). 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矿床有关的镁铁质-超镁铁质岩石(Wu等, 2004; Xu等, 2009, 2013), 指示该区晚三叠世火成岩形成于伸展环境(Wang F等, 2015; Yang H等, 2015).

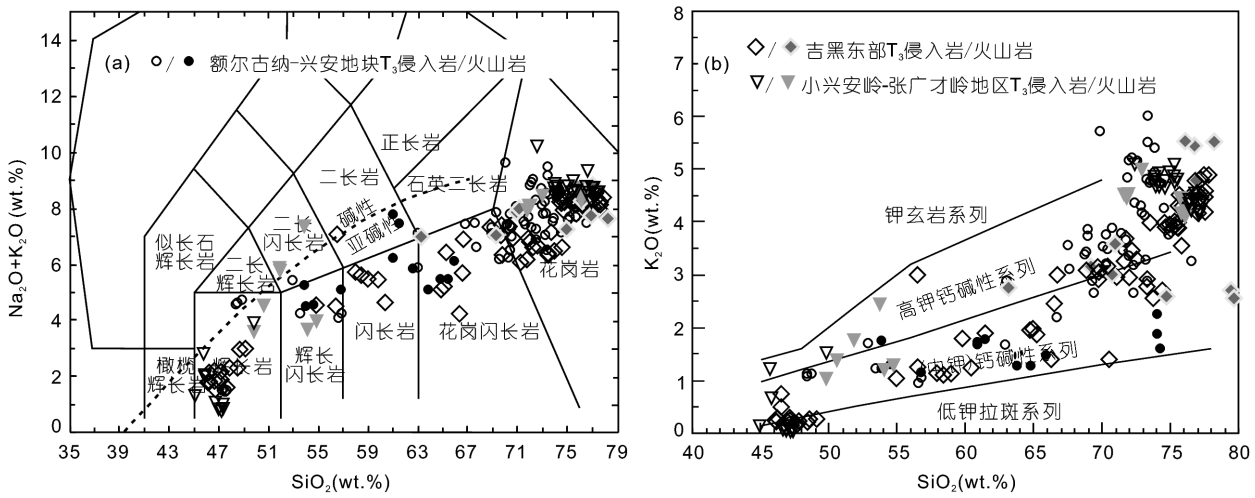

图 6　额尔古纳-兴安地块和小兴安岭-张广才岭-吉黑东部晚三叠世火成岩的TAS图解(a)和SiO_2-K_2O图解(b)

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-密山断裂左行平移的距离约为300km. 据此，对吉黑东部的古地理位置进行恢复，推测其可能与张广才岭南部相邻. 因此，本文认为小兴安岭-张广才岭和吉黑东部晚三叠世火成岩形成于相似的构造背景. 一些学者认为小兴安岭-张广才岭-吉黑东部晚三叠世岩浆作用与古太平洋板块向欧亚大陆下俯冲有关(Wu等, 2011; Zhou和Wilde, 2013; Yang H等, 2015). 然而，东北亚大陆东缘不存在晚三叠世钙碱性火成岩和同期的增生杂岩，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相的沉积建造，显示被动陆缘背景的沉积环境(Zhang等, 2015)，暗示它们的形成与古太平洋板块俯冲作用无关. 本文认为小兴安岭-张广才岭-吉黑东部晚三叠世火成岩形成的伸展构造环境有两种可能: 一是该区晚三叠世古地理位置复原后与蒙古-鄂霍茨克缝合带近平行，额尔古纳-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-吉黑东部同期火成岩为双峰式组合、A-型花岗岩和A-型流纹岩，呈现出自陆缘向陆内火成岩成分极性的变化，可能分别与蒙古-鄂霍茨克大洋板块南向俯冲形成的活动大陆边缘环境和类似弧后的伸展环境相对应；二是古亚洲洋闭合后岩石圈伸展作用可持续到晚三叠世(见4.2.3). 因此，小兴安岭-张广才岭-吉黑东部晚三叠世火成岩还可能形成于古亚洲洋最终闭合后的伸展环境.

4.2.3　华北克拉通北缘

华北克拉通北缘中段晚三叠世火成岩包括碱性杂岩及共生的超镁铁质岩(网络版附表2)，以出现碱性矿物如霓辉石、霞石及碱性角闪石为特征(张拴宏等, 2010). 华北克拉通北缘东段吉林中部晚三叠世花岗岩为A-型，与同时代基性-超基性火成岩构成双峰式火成岩组合(网络版附表2; 图7a和b; Wu等, 2002, 2011; 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240~225Ma的沉积事件，而晚三叠世普遍发育磨拉石建造，标志着由造山隆起环境向造山后伸展环境的转变. 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的伸展环境. 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5)，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.

4.2.4　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5). 胶东半岛的晚三叠世火成岩包括甲子山石英正长岩(215Ma)、辉石正长岩(215Ma)和晚期基性岩脉(201Ma)，以及槎山黑云母钾长花岗岩(205Ma, 网络版附表1). 辽东半岛的晚三叠世火成岩为一套基性-中性-酸性侵入岩(网络版附表2)，形成时代主要集中在

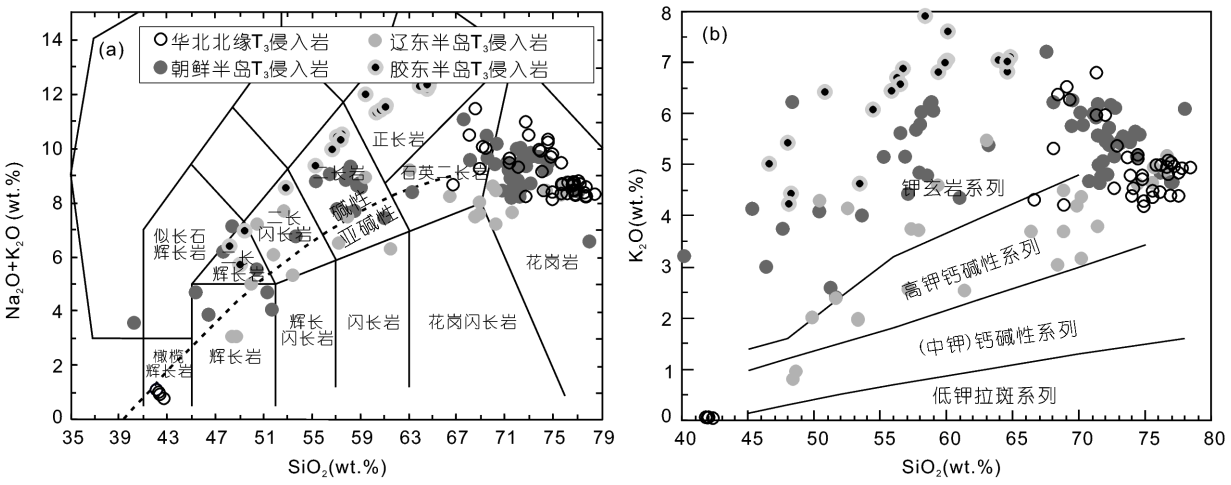

图 7　华北克拉通北缘和胶东半岛-辽东半岛-朝鲜半岛晚三叠世火成岩的TAS图解(a)和SiO_2-K_2O图解(b)

226~210Ma(网络版附表1), 以岫岩花岗岩及其镁铁质包体为代表, 辽东半岛正长岩中可见霞石. 朝鲜半岛晚三叠世火成岩同样为一套基性-中性-酸性侵入岩(网络版附表2), 形成时代主要集中在234~210Ma(网络版附表1). 胶东半岛-辽东半岛-朝鲜半岛晚三叠世火成岩在化学上属于碱性系列和钾玄岩系列(图7a和b), 其中花岗岩大多数显示A-型花岗岩的特点(毛建仁, 2013; Yang等, 2005), 表明该区晚三叠世火成岩形成于伸展环境. 那么该伸展环境是与古太平洋板块的俯冲作用相关, 还是与华北克拉通与兴蒙造山带的碰撞拼合有关, 亦或是与华北克拉通与扬子板块的俯冲碰撞有关?

首先, 东北亚大陆边缘晚三叠世火成岩主体为形成于非造山伸展环境的碱性岩、A-型花岗岩、A-型流纹岩、双峰式火成岩, 与典型活动大陆边缘环境产出的火成岩组合不同, 表明晚三叠世不存在古太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲作用, 因此, 胶东-辽东-朝鲜半岛晚三叠世火成岩的形成应与环太平洋构造体系无关. 第二, 古亚洲洋的最终闭合导致华北克拉通与兴蒙造山带沿着索伦-西拉木伦-长春-延吉缝合线拼合, 与其相关的火成岩呈东西向带状展布, 岩性主要为花岗质岩石、石英二长岩和超基性岩, 缺少中基性岩. 而胶东-辽东-朝鲜半岛晚三叠世火成岩主要为碱性系列的基性-中性-酸性火成岩, 呈北东向带状展布, 明显不同于华北克拉通北缘与古亚洲洋最终闭合有关的东西向带状展布的晚三叠世火成岩. 此外, 胶东-辽东-朝鲜半岛晚三叠世岩体侵位时代(231~205Ma, 多数小于225Ma), 明显晚于苏鲁造山带超高压变质时间(240~225Ma; Liu等, 2004; Wan等, 2005; 杨进辉和吴福元, 2009). 因此, 本文认为它们形成于扬子与华北克拉通俯冲碰撞后岩石圈拆沉引起的伸展环境.

4.2.5　晚三叠世火成岩形成的构造背景

东北亚陆缘晚三叠世火成岩主要分布在额尔古纳-兴安地块、小兴安岭-张广才岭-吉黑东部、华北克拉通北缘和胶东半岛-辽东半岛-朝鲜半岛四个区域. 额尔古纳-兴安地块上晚三叠世火成岩是一套钙碱性基性-中性-酸性火成岩组合(网络版附表2), 它们平行蒙古-鄂霍茨克缝合带呈北东-南西向带状展布, 形成于蒙古-鄂霍茨克大洋板块持续南向俯冲的活动大陆边缘环境. 华北克拉通北缘晚三叠世火成岩包括碱性杂岩和共生的超镁铁质岩、A-型花岗岩和双峰式火成岩, 它们沿索伦-西拉木伦-长春-延吉缝合带呈东西向带状展布, 形成于与古亚洲洋最终闭合有关的造山后伸展环境. 小兴安岭-张广才岭-吉黑东部晚三叠世的双峰式火成岩组合、A-型花岗岩和A-型流纹岩形成于伸展环境, 可能对应于蒙古-鄂霍茨克大洋板块南向俯冲形成的弧后伸展环境, 也可能形成于古亚洲洋最终闭合后的伸展环境. 胶东半岛-辽东半岛-朝鲜半岛晚三叠世火成岩属于碱性系列和钾玄岩系列, 其中大多数花岗岩显示A-型花岗岩, 形成时代明显晚于苏鲁造山带超高压变质作用时间, 它们形成于扬子与华

北克拉通俯冲碰撞后岩石圈拆沉引起的伸展环境.

4.3 早侏罗世岩浆作用

东北亚陆缘早侏罗世火成岩主要分布在额尔古纳-兴安地块、小兴安岭-张广才岭、吉黑东部以及朝鲜半岛的岭南地块和狼林地块上. 华北克拉通有极少量的早侏罗世火成岩产出, 位于辽东半岛(图8).

4.3.1 吉黑东部-朝鲜半岛-飞弹地体

吉黑东部早侏罗世火成岩是一套基性-中性-酸性的岩石组合(图9a和b), 既包括侵入岩又包括火山岩(网络版附表1和2; Xu等, 2013), 这也包括在佳木斯地块东缘新发现的早侏罗世钙碱性火山岩(Wang等, 2017).

朝鲜半岛早侏罗世火成岩主要分布在狼林地块的东北端和岭南地块. 狼林地块东北端的早侏罗世岩体包括大德岩体(193Ma)、远山岩体(198~191Ma)、宫心岩体(185Ma)、胜院岩体(199Ma)和茂山岭岩体的花岗质岩石(184Ma; Wu等, 2007b; 张艳斌等, 2016). 岭南地块上的代表性岩体有Beonam(196~190Ma)、Deochang(198Ma)、Sunchang(189~177Ma)和Hapcheon(194Ma)花岗质岩石(网络版附表1和2; Kee等, 2010; 毛建仁, 2013), 以及Yeonghae(196~195Ma)和Satkabong(192Ma)闪长岩(Yi等, 2012).

日本飞弹地体出露少量早侏罗世花岗岩, 以Okumayama花岗闪长岩(191Ma; Takahashi等, 2010)和黑云母花岗岩(197Ma; Zhao等, 2013)为代表, 岩体中产出同时代闪长岩包体(193Ma; Takahashi等, 2010).

吉黑东部-朝鲜半岛-飞弹地体上的早侏罗世火成岩均属于中钾-高钾钙碱性系列(图9a和b), 富集大离子亲石元素、亏损高场强元素(图10), 具有弧型火成岩的地球化学属性, 其中早侏罗世基性岩的岩浆源区曾受到俯冲流体交代作用的改造(Guo等, 2015; Wang等, 2017). 此外, 近年来在欧亚大陆东缘和日本鉴别出与板块俯冲有关的早侏罗世增生杂岩(Fukuyama等, 2013; Safonova和Santosh, 2014), 这不仅包括位于我国境内的黑龙江杂岩, 其变形时代主要介于186~176Ma(李锦轶等, 1999; Wu等, 2007a), 而且也包括俄罗斯远东的哈巴杂岩(Safonova和Santosh, 2014)以及日本的美浓地体(Isozaki, 1997). 这些特征均说明吉黑东部-朝鲜半岛-辽东半岛-飞弹地体早侏罗世火成岩形成于活动大陆边缘环境. 早侏罗世火成岩呈北东-南西向带状展布, 且平行于东北亚陆缘, 说明它们形成于古太平洋板块西向俯冲下的活动大陆边缘环境, 标志着古太平洋板块俯冲作用的开始.

4.3.2 小兴安岭-张广才岭

小兴安岭-张广才岭早侏罗世火成岩以基性和酸性火成岩为主(网络版附表1和2; 图9a和b). 主体属于钙碱性系列, 部分属于碱性系列(图9a和b). 该地区早侏罗世中性火山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). 该区早侏罗世火成岩具有双峰式火成岩组合特点(Yu等, 2012; Wang等, 2017), 形成于伸展环境. 从图8中可以看出小兴安岭-张广才岭早侏罗世火成岩呈北东-南西向带状展布. 从吉黑东部早侏罗世陆缘钙碱性火成岩到小兴安岭-张广才岭的双峰式火成岩组合, 构成了平行东北亚陆缘的成分分带, 分别对应于古太平洋板块向欧亚大陆下俯冲形成的活动大陆边缘环境和弧后伸展环境, 进一步说明古太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲作用起始于早侏罗世.

4.3.3 额尔古纳-兴安地块

额尔古纳地块-兴安地块上早侏罗世火成岩主要由一套中酸性侵入岩构成, 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(网络版附表1和2; Wang W等, 2015).

额尔古纳地块-兴安地块上早侏罗世花岗质岩石属于中钾-高钾钙碱性系列(图9a和b), 显示I-型花岗岩的特点; 该区早侏罗世中基性火山岩同样属于中钾-高钾钙碱性系列(Wang W等, 2015; 图9a和b), 显示出弧型火山岩的地球化学属性(Gill, 1981; Wilson, 1989; Kelemen等, 2003; Wang W等, 2015); 此外, 在额尔古纳-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(183~178Ma; Chen等, 2011; 王伟等, 2012)和兴安地块上产出三矿沟矽卡岩型铜铁矿床(176Ma; 葛文春等, 2007). 综上所述, 额尔古纳-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-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作用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

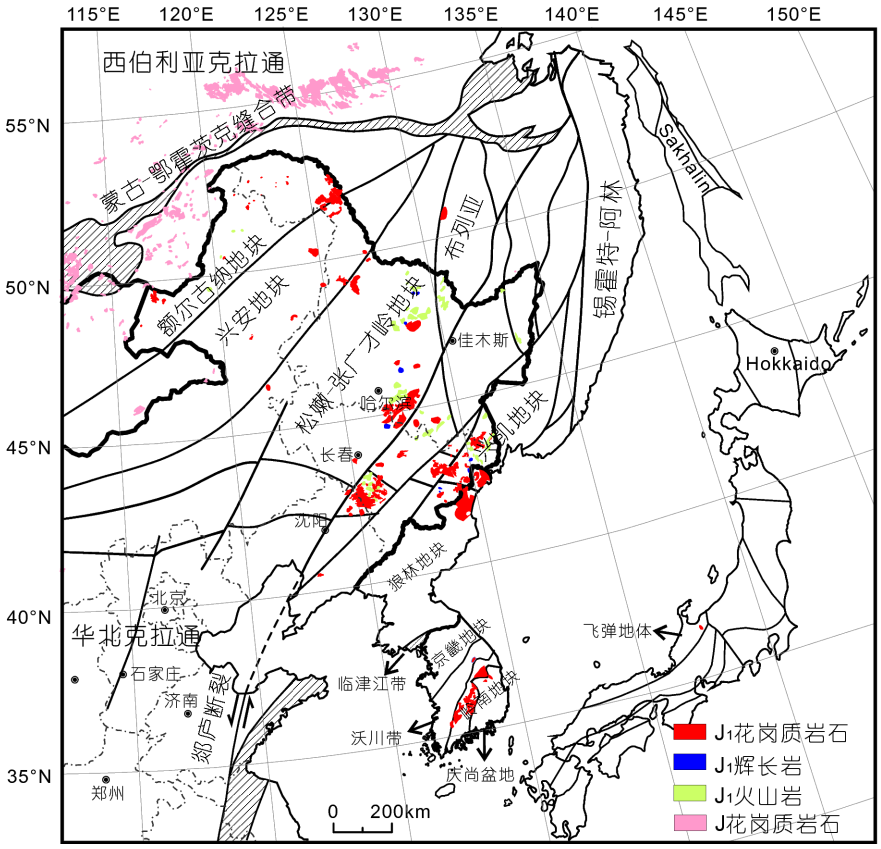

图 8　(网络版彩图)东北亚陆缘早侏罗世火成岩分布图

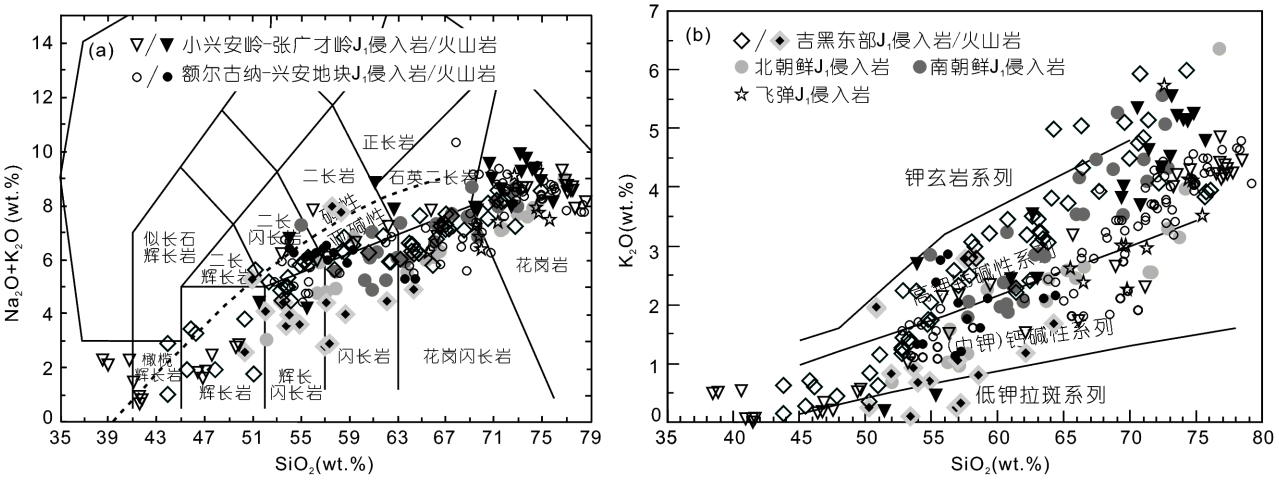

图 9　东北亚陆缘早侏罗世火成岩的TAS图解(a)和SiO_2-K_2O图解(b)

广才岭存在一套同期的双峰式火成岩组合, 说明它们的形成与古太平洋板块的俯冲作用无关. 额尔古纳-兴安地块上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

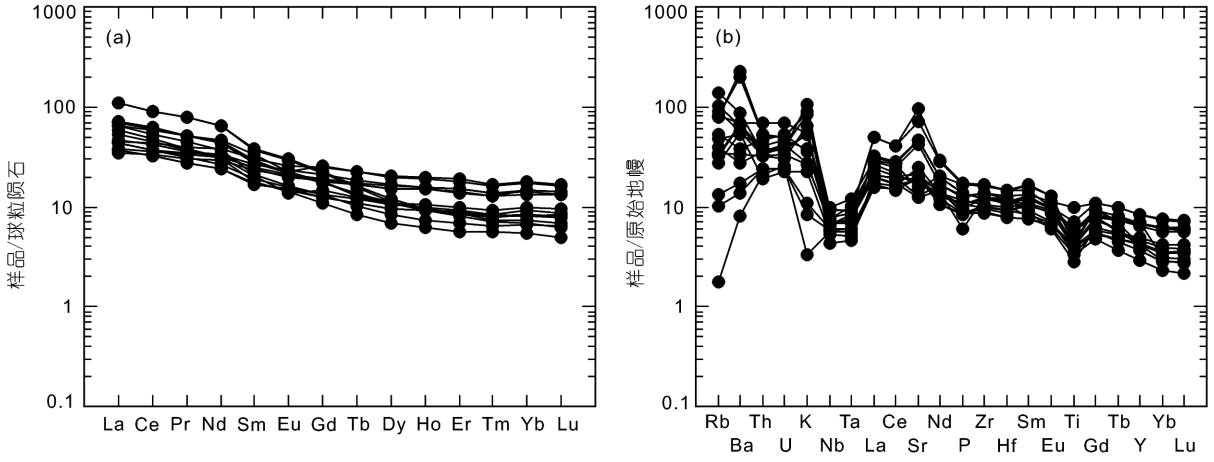

图 10　吉黑东部早侏罗世火山岩稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

板块持续南向俯冲作用下的活动大陆边缘环境.

4.3.4　早侏罗世火成岩形成的构造背景

吉黑东部-朝鲜半岛-飞弹地体上的早侏罗世火成岩是一套钙碱性基性-中性-酸性的火成岩组合, 具有弧型火成岩的地球化学属性, 小兴安岭-张广才岭同时代火成岩具有的双峰式火成岩组合特征, 它们分别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和弧后伸展环境, 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, 这也得到了早侏罗世陆缘增生杂岩的证实. 额尔古纳地块-兴安地块上早侏罗世火成岩主要由一套钙碱性中酸性侵入岩组合构成, 同时包括少量钙碱性中基性火山岩组合, 呈北东-南西向带状展布, 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.

4.4　中侏罗世岩浆作用

东北亚陆缘中侏罗世火成岩主要分布在华北克拉通和朝鲜半岛南部, 在额尔古纳-兴安地块有少量产出(图11).

4.4.1　额尔古纳-兴安地块

兴安地块上中侏罗世火成岩主要出露在黑河地区, 在嫩江、阿荣旗、柴河等地零星出露, 岩性以花岗质岩石为主(网络版附表1和2; 图11; 175~164Ma). 额尔古纳地块上仅在满洲里地区出露一处中侏罗世二长花岗岩(171Ma; 王伟等, 2012).

兴安地块中侏罗世白云母花岗岩(168Ma)具有埃达克质岩石的地球化学属性, 暗示岩浆源区可能存在石榴子石的残留. 结合冀北-辽西地区广泛存在的区域性自北向南中侏罗世逆冲推覆构造(燕山运动A幕; 张岳桥等, 2007; 张长厚等, 2011)以及兴安地块北部中-晚侏罗世变质作用的发生(Miao等, 2015), 本文认为兴安地块在中侏罗世期间发生了陆壳加厚事件(李宇等, 2015). 额尔古纳-兴安地块中侏罗世火成岩总体呈北东向展布, 仅出露在松辽盆地及其以西地区(钻孔数据显示松辽盆地存在165~161Ma花岗岩; 网络版附表1), 中国东北东部陆缘区缺少该期岩浆作用. 因此, 中侏罗世陆壳加厚事件和同期岩浆作用的形成应与蒙古-鄂霍茨克构造体系演化相关. 由于西伯利亚板块相对于中蒙地块的旋转, 蒙古-鄂霍茨克洋自西向东呈剪刀式闭合(Zorin, 1999; Cogné等, 2005; Tomurtogoo等, 2005). 本文认为额尔古纳-兴安地块中侏罗世岩浆作用形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合形成的挤压环境, 并认为蒙古-鄂霍茨克洋在额尔古纳地块西北缘的闭合时间为中侏罗世(李宇等, 2015).

4.4.2　华北克拉通北缘-朝鲜半岛-辽东半岛

华北克拉通北缘冀北-辽西地区中侏罗世火成岩以花岗质岩石为主, 出露少量闪长岩、正长岩和辉长岩(图12; Zhang等, 2014; Zhang等, 2016), 以及少量的安山岩和流纹岩(Zhang等, 2014). 该区中侏罗世火成岩具有高的Al_2O_3、Na_2O和Sr含量, 低的MgO、Y和Yb含量, 以及高的Sr/Y和La_N/Yb_N比值, 显示出埃达克质

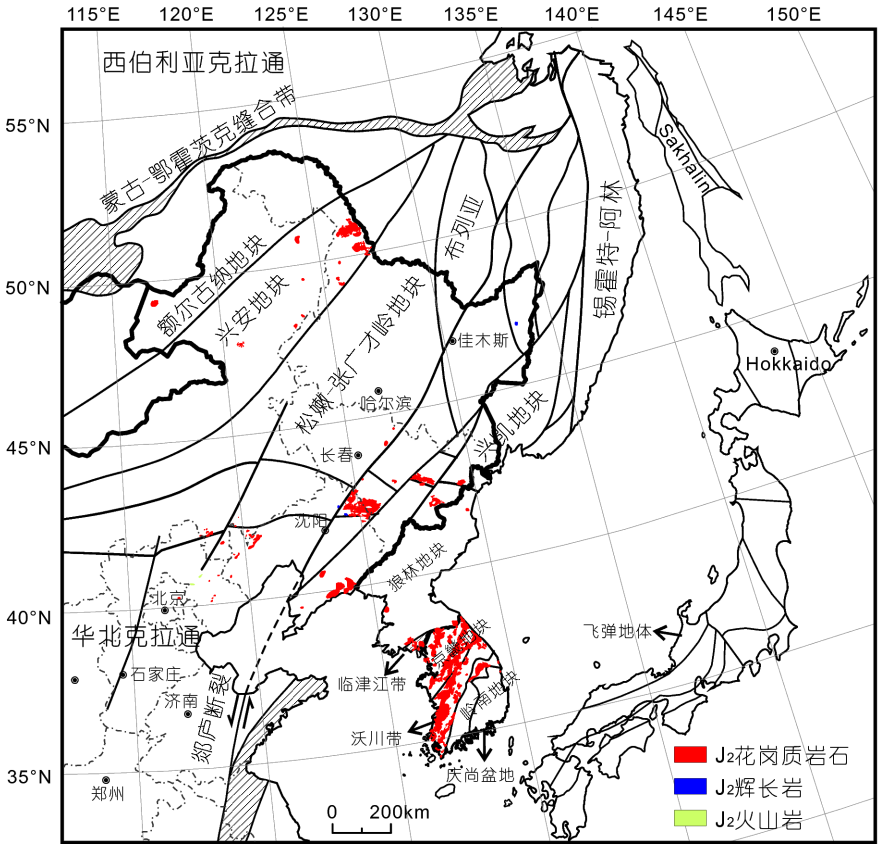

图 11　(网络版彩图)东北亚陆缘中侏罗世火成岩分布图

岩石的特征(图13; Zhang等, 2014; Zhang等, 2016), 岩浆起源于加厚陆壳的部分熔融, 结合大兴安岭北段同时期埃达克质岩石和含石榴石花岗岩的产出, 以及冀北-辽西地区广泛存在的区域性自北向南中侏罗世逆冲推覆构造, 可以判定研究区在中侏罗世期间发生了陆壳加厚事件. 那么, 该次陆壳加厚事件与哪种构造体系有关呢? 根据中国东部, 尤其是东北地区东部中侏罗世岩浆作用的缺乏, 推断中侏罗世期间中国东北陆缘与古太平洋板块可能为走滑的构造属性. 结合蒙古-鄂霍茨克洋在中侏罗世闭合, 本文认为华北克拉通北缘中侏罗世火成岩的形成可能是蒙古-鄂霍茨克洋闭合的远程效应.

朝鲜半岛中侏罗世火成岩主要产出在京畿地块、沃川带和临津江带, 岩性以花岗质岩石为主(图12), 根据岩石构造特征, 可将其分为片理化花岗岩和块状花岗岩, 代表性岩体有IKsan(168Ma; Oh等, 2004)、Jeonju(173Ma; Hee等, 2005)、Seoul(170Ma; Hee等, 2005; Kwon等, 1999)和Daebo(含石榴石)黑云母花岗岩和花岗闪长岩(网络版附表1和2). 朝鲜半岛中侏罗世花岗质岩石大多数具有埃达克质岩石的地球化学属性(图13; Kim等, 2015). 它们具有较高的初始$^{87}Sr/^{86}Sr$值(0.7048~0.7262)、较大范围的K_2O含量(0.50~5.88wt.%)和K_2O/Na_2O比值(0.34~2.1), 表明岩浆并不是起源于加厚陆壳的部分熔融(Kim等, 2015). 朝鲜半岛中侏罗世火成岩在化学上属于高钾钙碱性系列(图12a和b), 其中花岗质岩石相对富集大离子亲石元素, 而亏损高场强元素(如Nb、Ta、Hf、Ti等; 毛建仁, 2013; Kim等, 2015), 以I-型花岗岩为主, 说明朝鲜半岛中侏罗世火成岩可能形成于大陆弧环境. 此外, 朝鲜半岛沃川带中侏罗世褶皱和逆冲断层走向为北东向, 表明中侏罗世朝鲜半岛受到NW-SE向区域挤压作用影响(Hee等, 2005). 综上所述, 本文认为朝鲜半岛中侏罗世火成岩的形成可能与古太平洋板块北西向俯冲作用有关.

辽东半岛和吉林东部(位于陆缘增生带内)的中侏罗世花岗质岩石同样具有埃达克质岩石的地球化学特征(图13; Wu等, 2005a), 结合前文对华北克拉通北缘和

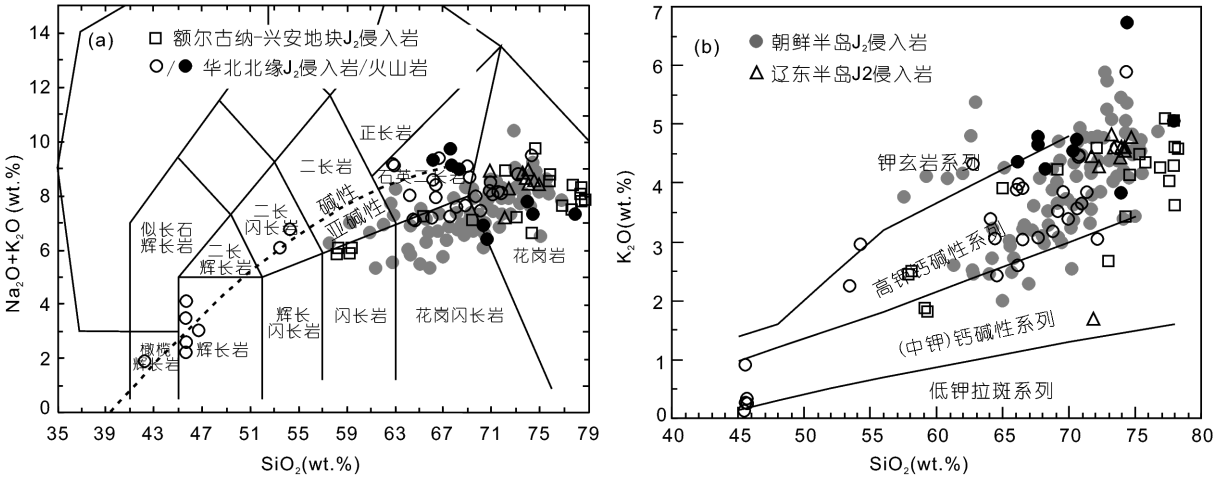

图 12　东北亚陆缘中侏罗世火成岩的TAS图解(a)和SiO_2-K_2O图解(b)

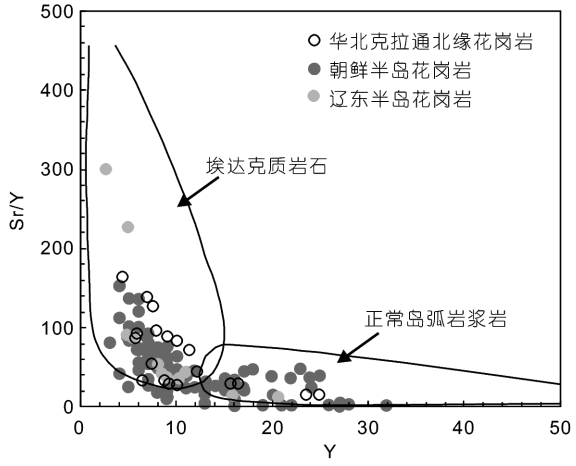

图 13　华北克拉通北缘-朝鲜半岛-辽东半岛中侏罗世花岗质岩石的Sr/Y-Y变异图

朝鲜半岛同时代埃达克质岩石的讨论，本文推测辽东半岛和吉林东部的中侏罗世花岗质岩石的形成可能与蒙古-鄂霍茨克洋闭合的远程效应有关，也可能与古太平洋板块北西向俯冲作用有关，或是二者共同作用的结果.

4.4.3　中侏罗世火成岩形成的构造背景

东北亚陆缘中侏罗世火成岩在额尔古纳-兴安地块有少量产出，主要为具有埃达克质岩石地球化学属性的花岗质岩石，结合同时代区域性自北向南中侏罗世逆冲推覆构造的发生以及中-晚侏罗世变质作用的发生，认为兴安地块在中侏罗世期间发生了陆壳加厚事件. 结合中国东北中侏罗世火成岩仅分布在松辽盆地以西地区，认为该陆壳加厚事件应与蒙古-鄂霍次克构造体系演化有关，与环太平洋构造体系无关，额尔古纳-兴安地块中侏罗世火成岩形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合过程的挤压环境. 华北克拉通北缘同时代的埃达克质花岗岩的形成则可能是蒙古-鄂霍茨克洋闭合的远程效应. 朝鲜半岛中侏罗世火成岩主要为I-型花岗岩，可能形成于古太平洋板块北西向俯冲于欧亚大陆下的活动大陆边缘环境.

4.5　晚侏罗世岩浆作用

东北亚陆缘晚侏罗世火成岩主要分布在额尔古纳-兴安地块和华北克拉通上(图14). 该阶段以出露大面积火山岩为特征.

4.5.1　额尔古纳-兴安地块

额尔古纳-兴安地块晚侏罗世火成岩包括一套中酸性侵入岩和一套中基性-酸性火山岩(网络版附表1和2). 中酸性侵入岩代表性岩体包括位于额尔古纳地块上的室韦二长岩(155Ma)、满归石英二长岩(156~155Ma)、八大关正长花岗岩(155~150Ma, Tang等, 2015); 位于兴安地块上的柴河二长花岗岩(152~149Ma, Shi等, 2015)、查巴奇二长花岗岩(151Ma; Dong等, 2016)和林西正长花岗岩(149~148Ma; Liu等, 2005). 晚侏罗世火山岩主要是来自塔木兰沟组的中基性火山岩(160~147Ma, 部分塔木兰沟组时代为早-中侏罗世, Wang等, 2006)和满克头鄂

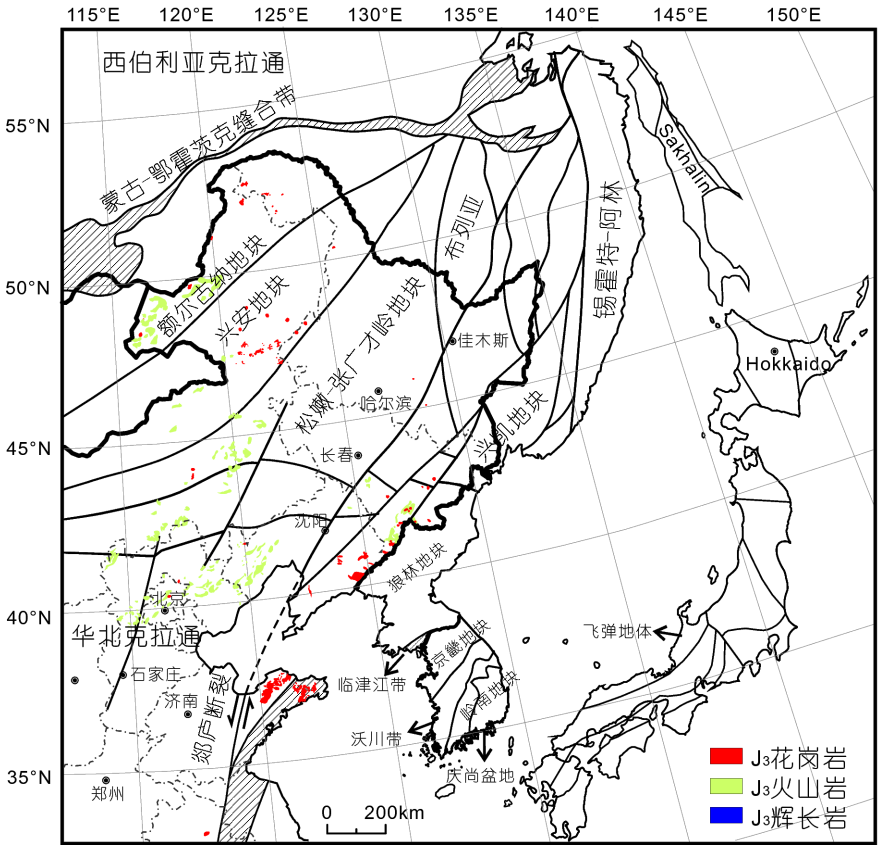

图 14　(网络版彩图)东北亚陆缘晚侏罗世火成岩分布图

博组的酸性火山岩(160~152Ma, 部分满克头鄂博组时代为早白垩世; Ying等, 2010; 张超等, 2014).

额尔古纳-兴安地块晚侏罗世火成岩形成于怎样的构造环境呢? 八大关正长花岗岩和林西正长花岗岩强烈亏损Eu, 具有高的10^4Ga/Al比值, 显示A-型花岗岩的地球化学属性(Tang等, 2015; Liu等, 2005); 室韦二长岩具有较高的(Na_2O+K_2O)含量, 属于碱性系列(图15a和b; Tang等, 2015); 满归石英二长岩具有高Sr和低Y和Yb特征, 显示埃达克质岩石的地球化学属性, 结合其较高的$Mg^{\#}$值, 暗示岩浆起源于拆沉下地壳的部分熔融. 上述特征暗示该区晚侏罗世花岗质岩石形成于伸展环境. 此外, 研究区晚侏罗世塔木兰沟组中基性火山岩起源于受俯冲流体交代的富集岩石圈地幔的部分熔融, 形成于岩石圈伸展减薄或裂谷环境(Wang等, 2006; Ying等, 2010; 孟恩等, 2011). 综上所述, 额尔古纳-兴安地块晚侏罗世岩浆作用应形成于伸展环境.

从东北亚陆缘晚侏罗世火成岩的分布可以看出, 在中国东北, 晚侏罗世火成岩主要分布在松辽盆地以西地区, 呈北东向带状展布, 而在松辽盆地以东张广才岭仅报道有两处晚侏罗世的酸性岩脉(147Ma, Wu等, 2011), 吉黑东部普遍缺乏该期岩浆事件. 因此, 额尔古纳-兴安地块晚侏罗世岩浆作用的形成应与蒙古-鄂霍茨克构造体系演化有关, 而与环太平洋构造体系无关. 正如前文讨论, 蒙古-鄂霍茨克洋在额尔古纳地块西北部的闭合时间为中侏罗世, 发生陆壳加厚事件(李宇等, 2015), 结合冀北-辽西地区海房沟组之下中侏罗世区域不整合的广泛存在以及海房沟组之上晚侏罗世髫髻山组碱性-亚碱性火山岩的形成, 可以判定额尔古纳-兴安地块晚侏罗世岩浆作用应形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合后加厚陆壳坍塌、拆沉所引起的岩石圈伸展环境.

4.5.2　华北克拉通

华北克拉通晚侏罗世火成岩主要分布在华北克拉通北缘中段的冀北-辽西地区、辽东半岛和胶东半岛有少量出露(图14).

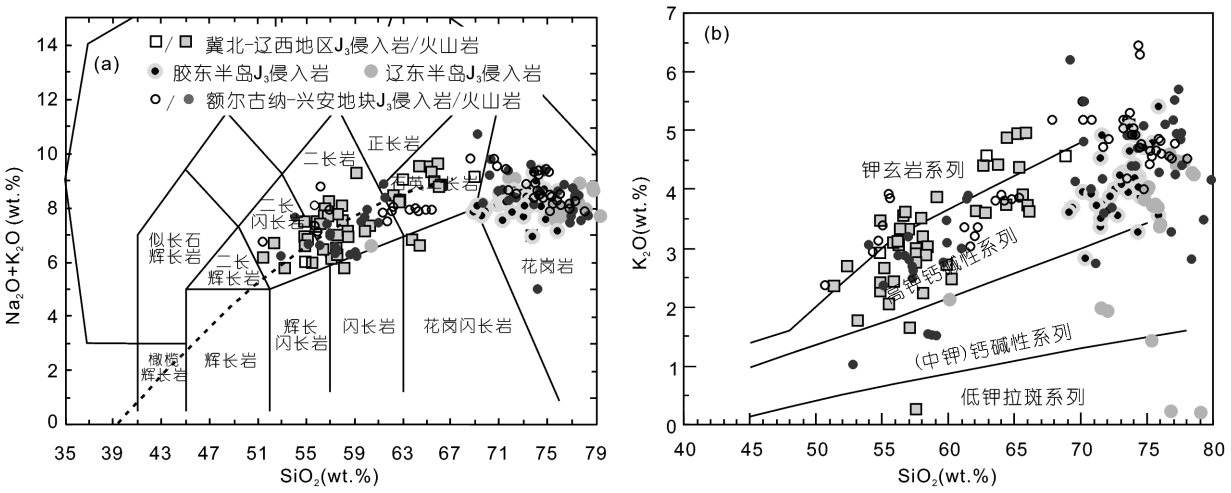

图 15　东北亚陆缘晚侏罗世火成岩的TAS图解(a)和SiO_2-K_2O图解(b)

冀北-辽西地区广泛出露晚侏罗世蓝旗组和髫髻山组中酸性火山岩, 形成为时代为160~152Ma(网络版附表1), 主体属于碱性系列(图15a和b). 蓝旗组火山岩具有埃达克质岩石的地球化学属性(Sr/Y值大多介于30~150; Ma等, 2015), Ma等(2015)认为该特征继承了源岩性质, 而非起源于加厚下地壳的部分熔融.

辽东半岛晚侏罗世火成岩包括于屯糜棱岩化花岗岩(157Ma; Wu等, 2005a)、九连城二长花岗岩(157~156Ma; Li等, 2004; Wu等, 2005a)以及高丽墩台斜长花岗岩(156Ma, Li等, 2004). 于屯糜棱岩化花岗岩中含有普通角闪石, 具有I-型花岗岩的特征; 九连城二长花岗岩的A/CNK值介于1.0~1.1, 并且富集轻稀土元素和Sr, 强烈亏损重稀土元素, 具有埃达克质岩石的特征; 高丽墩台花岗闪长岩和奥长花岗岩具有较低的稀土元素含量和Eu正异常, 属于高分异花岗岩(Wu等, 2005a). 胶东半岛晚侏罗世代表性火成岩有玲珑花岗闪长岩和花岗岩(160~153Ma; Yang等, 2012; Ma等, 2013)和栾家河花岗岩(158~154Ma; Yang等, 2012). 它们属于弱过铝质I-型花岗岩(Yang等, 2012), 具有较高的轻稀土元素和Sr含量、较低的重稀土元素含量, 显示埃达克质岩石的地球化学属性(Yang等, 2012; Ma等, 2013). 辽东半岛-胶东半岛大多数晚侏罗世岩体具有埃达克质岩石性质, Sr/Y值高达378, 具有较高的SiO_2含量, 较低的MgO、Cr、Ni含量, 高的初始$^{87}Sr/^{86}Sr$值(>0.710)和负的$\varepsilon_{Nd}(t)$值(Wu等, 2005a; Ma等, 2013), 表明岩浆起源于加厚下地壳的部分熔融.

对于华北克拉通上晚侏罗世火成岩形成的构造背景存在不同观点: (1) 形成于古太平洋板块俯冲挤压下的活动大陆边缘环境(Zhou和Li, 2000; Wu等, 2005a); (2) 形成于华北克拉通与扬子板块碰撞后伸展环境(毛景文等, 2003; Yang等, 2012); (3) 形成于蒙古-鄂霍次克大洋闭合后的伸展环境(Xu等, 2013). 苏鲁造山带及邻区存在晚侏罗世火成岩, 而大别带则缺少同时代火成岩, 说明在辽东半岛-胶东半岛晚侏罗世火成岩的形成与华北克拉通和扬子板块之间碰撞后的伸展作用无关(Ma等, 2013). 结合吉黑东部(松辽盆地以东地区)、日本岛和朝鲜半岛晚侏罗世岩浆作用的缺乏、冀北-辽西地区髫髻山组火山岩下存在的区域性不整合——即该区广泛存在区域性自北向南中侏罗世逆冲推覆构造(于海飞等, 2016), 以及胶东半岛-辽东半岛晚侏罗世埃达克质岩石起源于加厚陆壳的部分熔融等特征, 本文认为华北克拉通晚侏罗世火成岩形成于加厚陆壳坍塌形成的伸展环境, 而该伸展环境既可与蒙古-鄂霍茨克洋的闭合作用相联系, 又可与古太平洋板块由俯冲转变为走滑相联系.

4.5.3　晚侏罗世火成岩形成的构造背景

东北亚陆缘晚侏罗世火成岩主要分布额尔古纳-兴安地块和华北克拉通. 额尔古纳-兴安地块晚侏罗世火成岩包括A-型花岗岩、碱性系列的二长岩和石英二长岩, 以及塔木兰沟组和满克头鄂博组偏碱性火山岩, 它们形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合后加厚陆壳坍

塌、拆沉所引起的岩石圈伸展环境. 华北克拉通晚侏罗世火成岩大多数具有埃达克质岩石的地球化学属性, 它们形成于加厚陆壳坍塌阶段的伸展环境. 日本岛、朝鲜半岛以及中国东北松辽盆地以东地区缺乏该期岩浆事件, 暗示晚侏罗世岩浆作用可能主要与蒙古-鄂霍茨克洋闭合作用有关, 而此时的东北亚陆缘与古太平洋板块之间可能处于一种走滑的构造属性.

4.6　早白垩世早期岩浆作用

早白垩世早期岩浆作用(145~135Ma)在东北亚陆缘零星出露(图16), 主要分布在松辽盆地以西的大兴安岭和华北克拉通北缘.

大兴安岭-华北克拉通北缘早白垩世早期火成岩以酸性火成岩为主(网络版附表1和2; 图16). 代表性花岗质岩石有蛤蟆沟林场碱长花岗岩、黑云母正长花岗岩和花岗斑岩(137~136Ma; 施璐等, 2013), 恩和正长花岗岩(137Ma; Tang等, 2015), 以及涿鹿地区花岗岩(139Ma; Zhang等, 2014), 它们均为A-型花岗岩. 火山岩主要是来自吉祥峰组(142Ma; Zhang等, 2008; 孟恩等, 2011; 徐美君等, 2011)、白音高老组(141Ma; 王建国等, 2013)和张家口组(143~136Ma; 韦忠良等, 2008)的A-型流纹岩或碱性流纹岩(图17). 这些岩石组合说明早白垩世早期大兴安岭-华北克拉通北缘处于伸展环境.

根据对额尔古纳地块北部漠河盆地和南部海-塔盆地中地层序列的研究表明盆地内下白垩统不整合覆盖于上侏罗统之上(Li等, 1999; 蒙启安等, 2012); 在冀北-辽西地区, 基底变质岩系和中元古界逆冲于晚侏罗世土城子组之上(张长厚等, 2011). 这些地层的区域性不整合代表了另一次自北向南的推覆事件, 推覆时间为侏罗纪晚期-白垩纪早期(Yang Y T等, 2015). 早白垩世早期火山岩形成于该推覆事件之后, 说明早白垩世早期火成岩的形成应与这次加厚陆壳的坍塌或拆沉阶段相对应, 即形成于伸展构造背景(韦忠良等, 2008; 许文良等, 2013).

早白垩世早期岩浆作用仅分布在中国东北松辽盆地以西地区及华北克拉通北缘中段, 呈北东向带状展布, 在松辽盆地以东的陆缘区以及日本和朝鲜半岛缺少该期岩浆作用. 鉴于此, 可以判定该期岩浆事件与蒙古-鄂霍茨克洋闭合后的又一次加厚陆壳坍塌所形成的伸展环境有关, 而与古太平洋板块的俯冲作用无关.

4.7　早白垩世晚期岩浆作用

早白垩世晚期火成岩在东北亚陆缘广泛出露, 呈面型分布(图18), 该阶段火成岩以花岗质岩石和火山岩为主. 俄罗斯远东、日本、中国东北、华北和朝鲜半岛的早白垩世晚期火成岩特征及形成构造背景如下:

俄罗斯远东早白垩世晚期岩浆作用主要分布在中锡霍特阿林地区, 岩性包括I-型花岗岩(131Ma; Jahn等, 2015), 以及英安岩和流纹岩(131~102Ma; 图19a和b, Wu等, 2017), 其中英安岩和流纹岩富集轻稀土元素和Sr, 亏损重稀土元素, 具有较高的Sr/Y比值(33~145), Na_2O/K_2O比值介于1.15~7.74, 地球化学特征表明早白垩世晚期火山岩为埃达克岩, 岩浆起源于俯冲洋壳的部分熔融(Wu等, 2017), 形成于古太平洋板块俯冲所形成的活动大陆边缘环境. 上述认识也得到了俄罗斯远东地区多条早白垩世构造就位的陆缘增生杂岩带的支持(Zyabrev和Matsuoka, 1999; Safonova和Santosh, 2014).

日本早白垩世晚期岩浆作用主要分布在东北日本的北上地区和西南日本的九州地区(图18). 北上地区早白垩世晚期侵入岩包括埃达克质花岗岩(Na_2O/K_2O比值介于1.34~8.79, 普遍大于2)和中钾钙碱性花岗岩(图19a和b), 以及少量辉长岩和石英闪长岩(125~108Ma; Tsuchiya等, 2007), 该区还产出同时期玄武岩和高镁安山岩(121~100Ma; Tsuchiya等, 2005), 北上地区早白垩世晚期火成岩主要起源于俯冲洋壳的部分熔融. 九州地区同时代火成岩主要为花岗质岩石, 以及关门群安山岩和流纹岩(125~106Ma; 毛建仁, 2013), 其中花岗岩同样具有埃达克质岩石的地球化学属性, 但是九州地区花岗岩的Na_2O/K_2O比值普遍小于1, 与北上地区埃达克质花岗岩存在明显差异, 关门群火山岩具有弧型火山岩的微量元素组成. 日本北上和九州地区早白垩世晚期岩浆作用均与古太平洋板块俯冲作用下的活动大陆边缘环境有关. 西南日本和东北日本岛外侧白垩纪陆缘增生杂岩带(如Shimanto带和Hidaka带)的存在进一步证实该时期古太平洋板块在欧亚大陆下俯冲作用的发生(Saito, 1992).

中国东北产出大面积早白垩世晚期火山岩(133~106Ma; 许文良等, 2013), 该期火山岩不仅在大兴

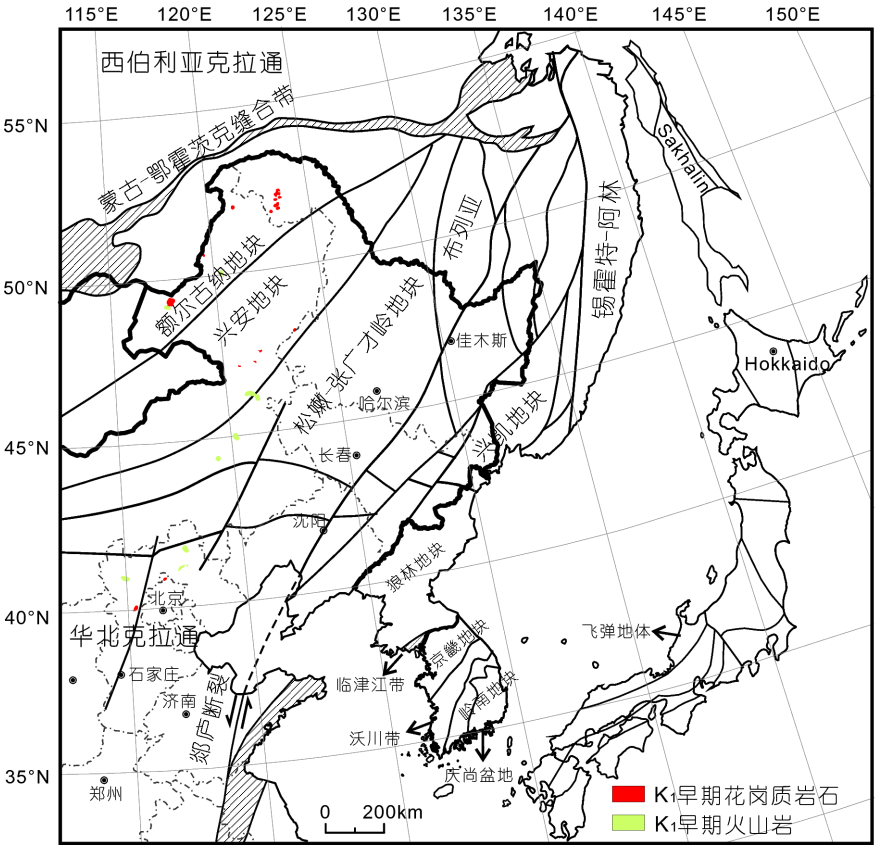

图 16 (网络版彩图)东北亚陆缘早白垩世早期火成岩分布图

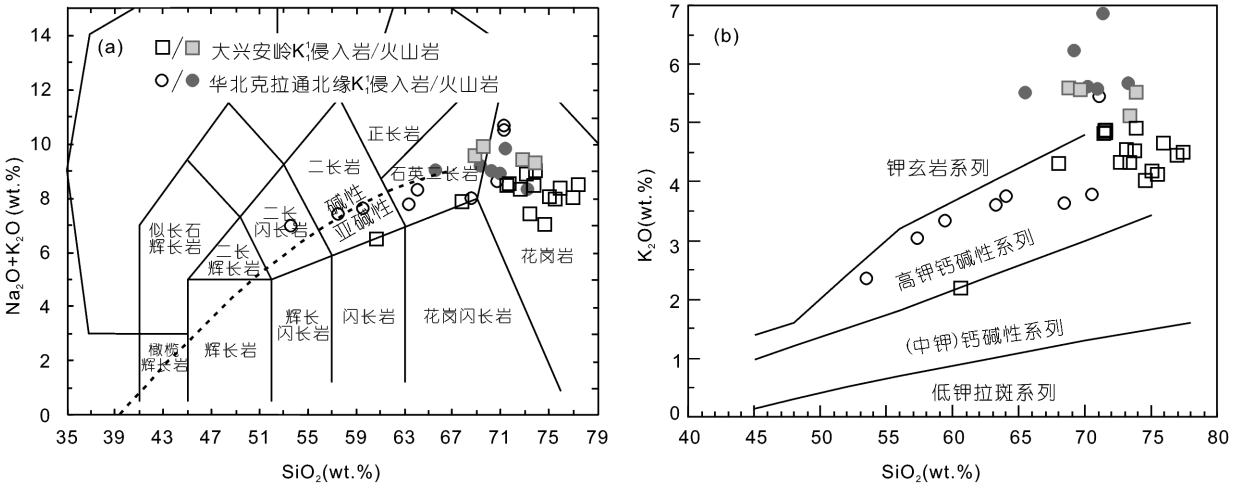

图 17 东北亚陆缘早白垩世早期火成岩的TAS图解(a)和SiO_2-K_2O图解(b)

安岭和吉黑东部广泛分布，而且在松辽盆地底部断陷层也广泛产出. 在东北地区的不同区域该期火山岩的成分具有明显变异. 在吉黑东部代表性地层有: 自北向南包括皮克山组、裴德组、东山组、金沟岭组、二股砬子组和果松组，除出露于佳木斯地块上的部分样品具有相对较高的碱性组分外，该期火山岩主要属于

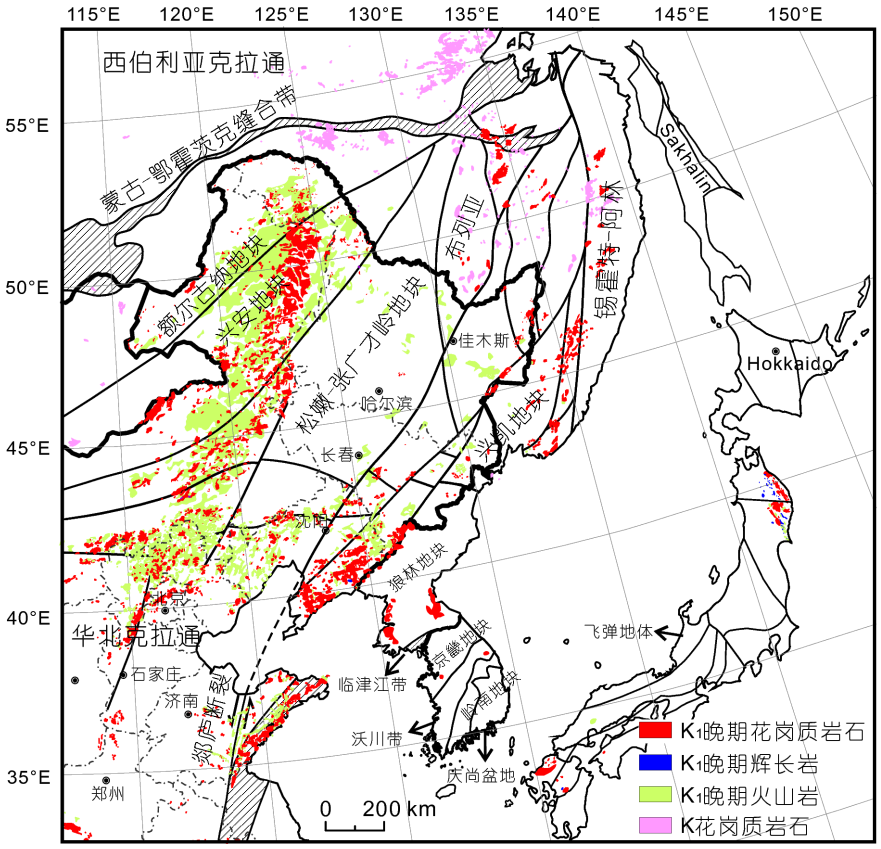

图 18　**(网络版彩图)东北亚陆缘早白垩世晚期火成岩分布图**

钙碱性系列(图19a和b; Yu等, 2009), 反映了古太平洋板块俯冲作用的存在. 而同时代的火山岩在松辽盆地和大兴安岭地区主要表现为双峰式火山岩组合(图19c和d; Wang等, 2006; 裴福萍等, 2008; Zhang等, 2008, 2010), 同时代的花岗岩主要为碱性或碱长花岗岩(Wu等, 2011). 自陆缘向陆内, 火山岩中的碱性组分具有增高的成分极性变化, 表明了来自东部板块俯冲作用的发生. 东北最东部饶河陆缘增生杂岩的早白垩世早期(147~130Ma)的构造就位再次证实该时期古太平洋板块在欧亚大陆下俯冲作用的发生(Zhou等, 2014; Wang Z H等, 2015).

华北克拉通早白垩世晚期火成岩主要分布在克拉通的中东部, 其中大多数早白垩世晚期花岗岩为A-型花岗岩(Wu等, 2005b; Sun和Yang, 2009), 正长岩、二长岩和粗面岩属于碱性系列(图19e和f), 表明它们形成于伸展环境. 此外, 华北克拉通中东部还存在大量同时代变质核杂岩(Yang等, 2007), 例如冀北的云蒙山、密云和承德变质核杂岩(Davis等, 2001)、辽西楼子店-大城子变质核杂岩(133~118Ma; Zhang等, 2002)、华北克拉通南缘的小秦岭变质核杂岩(127~107Ma)等, 这进一步说明华北克拉通中东部早白垩世晚期处于岩石圈减薄的伸展环境(Yang等, 2008; Sun和Yang, 2009; Liu等, 2012), 并且该岩石圈大范围减薄事件应与古太平洋板块的俯冲作用有关(Wu等, 2005b; Zhu等, 2012).

朝鲜半岛北部和南部岩浆作用分别在170~115Ma和155~115Ma出现间断(Kiminami和Imaoka, 2013). 因此, 朝鲜半岛早白垩世晚期火成岩时代为115~100Ma. 相对东北亚陆缘其他地区, 朝鲜半岛早白垩世晚期火成岩出露面积较小, 岩性以花岗质岩石为主(Wu等, 2007b; 翟明国, 2016). 在朝鲜半岛南部, 早白垩世晚期火成岩主要出露在拉分盆地或伸展盆地中(Lee, 1999; Chough等, 2000), 并且花岗岩属于A-型花岗岩(Kim和Kim, 1997). 此外, 朝鲜半岛北部存在同时期低角度正断层. 上述特征表明朝鲜半岛早白垩世晚期火成岩形成于伸展环境, 与华北克拉通相似, 它们的形成与古太平洋板块俯冲作用有关(Wu等, 2007b).

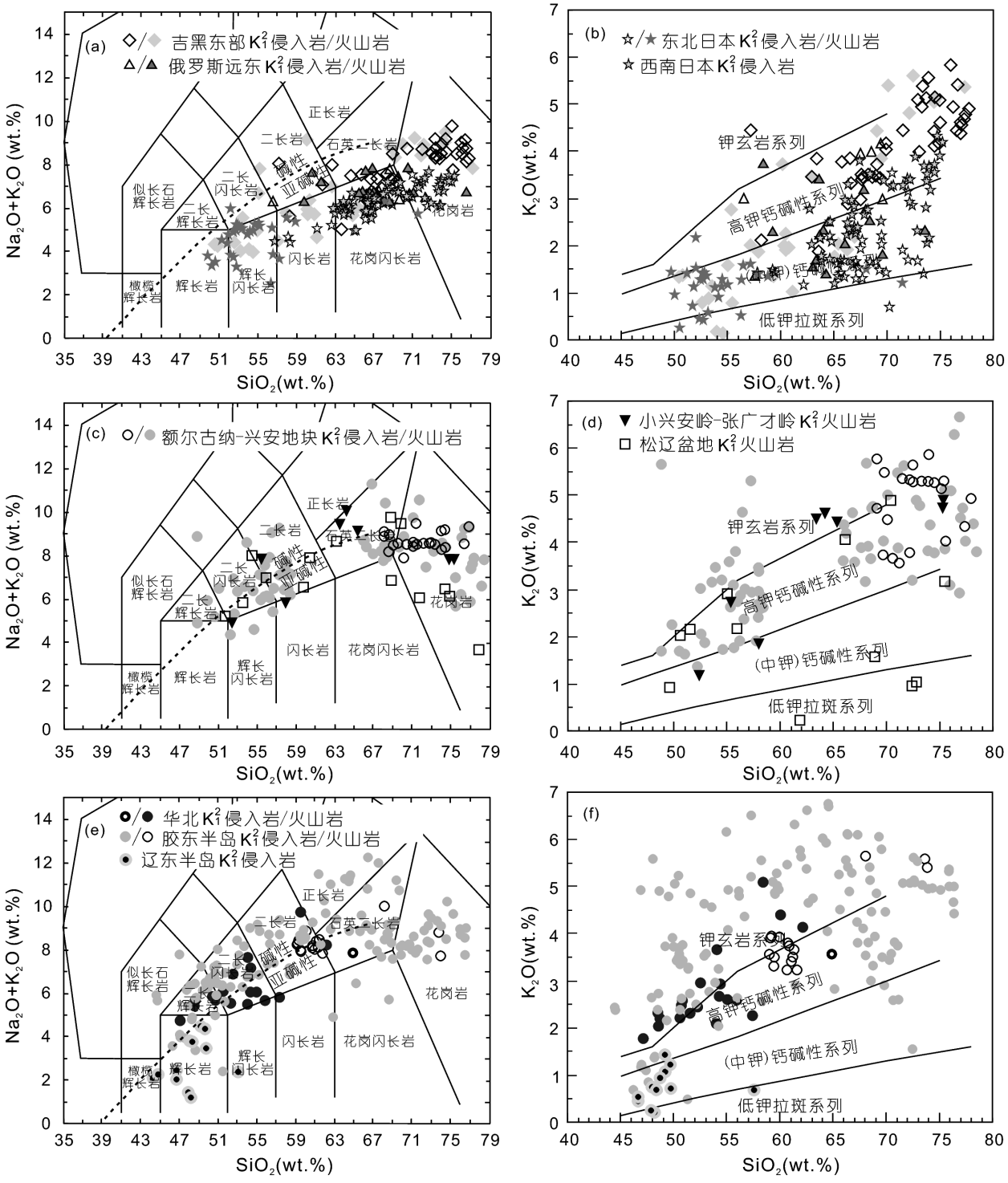

图 19　东北亚陆缘早白垩世晚期火成岩的TAS图解和SiO_2-K_2O图解

(a), (b) 吉黑东部、俄罗斯远东和日本; (c), (d) 额尔古纳-兴安地块、小兴安岭-张广才岭和松辽盆地; (e), (f) 华北、胶东半岛和辽东半岛

综上所述, 东北亚陆缘早白垩世晚期火成岩的形成均与古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲作用有关. 俄罗斯远东、日本和中国吉黑东部上的火成岩形成于活动大陆边缘环境, 而松辽盆地和大兴安岭、华北克

拉通和朝鲜半岛上早白垩世晚期火成岩形成于伸展环境，与古太平洋板块俯冲导致的大规模岩石圈减薄有关.

4.8　晚白垩世岩浆作用

晚白垩世火成岩仅分布在东北亚陆缘东部，包括俄罗斯远东、西南日本、南朝鲜、中国东北东部和华北东部(图20).

俄罗斯远东地区晚白垩世火成岩主要分布在东锡霍特阿林, 包括中酸性侵入岩(93~66Ma; 网络版附表1和2; Jahn等, 2015; Tang等, 2016b)和中酸性火山岩(80~67Ma, 网络版附表1和2; Zhao等, 2017), 地球化学特征显示俄罗斯远东晚白垩世花岗质岩石和中酸性火山岩以钙碱性系列为主(图21a和b)，形成于古太平洋板块俯冲下的活动大陆边缘环境.

西南日本晚白垩岩浆作用强烈(图20)，晚白垩世辉长岩-闪长岩-花岗质岩石组合形成于汇聚板块边缘区(毛建仁, 2013). 同时代火山岩主要包括阿武群的流纹岩和英安岩以及浓飞流纹岩(Yuge等, 1998; Sonehara和Harayama, 2007)，流纹岩和英安岩与同时代花岗岩具有相似的地球化学属性, 为中钾-高钾钙碱性系列(图21a和b), 形成于活动大陆边缘环境.

晚白垩世火成岩在朝鲜半岛南部广泛分布，主要出露在庆尚盆地和沃川带. 庆尚盆地晚白垩世花岗质岩石属于高钾钙碱性系列(图21a和b)，与大陆边缘弧花岗岩相似(毛建仁, 2013)；庆尚盆地晚白垩世基性-中性-酸性火山岩属于中钾到高钾钙碱性系列(网络版附表2; 图21a和b), 具有典型活动陆缘区钙碱性火山岩的地球化学属性. 沃川带晚白垩世花岗岩属于钙碱性系列，为弱过铝质-强过铝质花岗岩(Lee等, 2010). 综上所述，朝鲜半岛南部晚白垩世火成岩形成于古太平洋板块俯冲下的活动大陆边缘环境.

分布在中国东北东部的晚白垩世火成岩，陆缘区(东宁-珲春一线)代表性火山岩地层有绥芬河组和部分屯田营组安山岩和英安岩(97~88Ma; Ji等, 2007; Xu等, 2013), 在化学上, 属于钙碱性系列(图21a和b). 在陆内则产出同时代的基性岩，包括长春大屯碱性玄武岩(92Ma; 张辉煌等, 2006)和双鸭山地区属于钾玄岩系列的二长辉长岩(98Ma; 张磊等, 2009), 自陆缘向陆内火成岩碱性组分的增高，表明古太平洋板块在欧亚大陆下俯冲作用的存在.

华北克拉通东部仅有少量晚白垩世火山岩，包括辽南曲家屯碱性玄武岩(82Ma; 王微等, 2006)、辽西义县大兴庄组中酸性火山岩(81Ma; 邢志波等, 2003)、辽西阜新碱性玄武岩(92~85Ma; 许文良等, 1999; 王冬艳等, 2002)、抚顺老虎台碱性玄武岩(70Ma; Kuang等, 2012) 以及胶东大西庄碱性玄武岩(73Ma; 闫峻等, 2003)、莱阳盆地粗安岩和粗面英安岩(93~91Ma; Guo等, 2005). 华北克拉通上晚白垩世火山岩主要属于碱性系列(图21a和b)，它们形成于伸展环境, 可能与古太平洋板块俯冲形成的弧后伸展相对应.

晚白垩世火成岩沿着东北亚大陆东缘分布，它们的形成均与古太平洋板块的俯冲作用有关. 中国东北东部、俄罗斯远东、西南日本、朝鲜半岛南部可能都是当时活动大陆边缘的组成部分. 而中国东北陆内和华北克拉通东部则可能对应于弧后地区. 从早白垩世晚期到晚白垩世，火成岩的分布范围向东明显缩小，并且由陆内向沿海地区迁移，指示欧亚大陆的向东飘移和古太平洋俯冲板块的回撤.

4.9　古近纪岩浆作用

古近纪火成岩在中国东北和华北东部、俄罗斯远东、日本、南朝鲜零星出露(图22).

俄罗斯远东地区存在古近纪早期I-型花岗岩(57~56Ma; Jahn等, 2015; Tang等, 2016b), 属于高钾钙碱性系列，具有弧型火成岩的地球化学属性，形成于(古)太平洋板块俯冲形成的活动大陆边缘环境. 此外, 中国东北三江盆地富锦地区产出一处花岗闪长岩岩体(54Ma; 王智慧等, 2016), 为高钾钙碱性I-型花岗岩(图23a和b), 具有高Sr含量、低Y含量、无Eu异常, 显示埃达克质岩石的地球化学属性(王智慧等, 2016), 起源于下地壳的部分熔融；延吉地区安山岩形成时代为58~55Ma，具有高镁埃达克质岩石的地球化学特征($Mg^{\#}$=65~70; Sr=2013~2282ppm; Y=10~11ppm)(Guo等, 2007), 为伸展环境下岩浆混合作用的产物；华北克拉通北缘东段的古近纪早期火成岩包括辽东乱石山子碱性玄武岩(58Ma; 王微等, 2006)和抚顺地区老虎台组拉斑玄武岩(60Ma; Kuang等, 2012)；朝鲜半岛南部庆尚盆地内Kyeongju地区产出66~47Ma A-型花岗岩, 形成于伸展环境(Kim和Kim, 1997). 因此, 中国东北、华北克拉通北缘东段、朝鲜半岛南部古近纪早期火成岩形成于与(古)太平洋板块逐渐回撤有关的伸展环境,

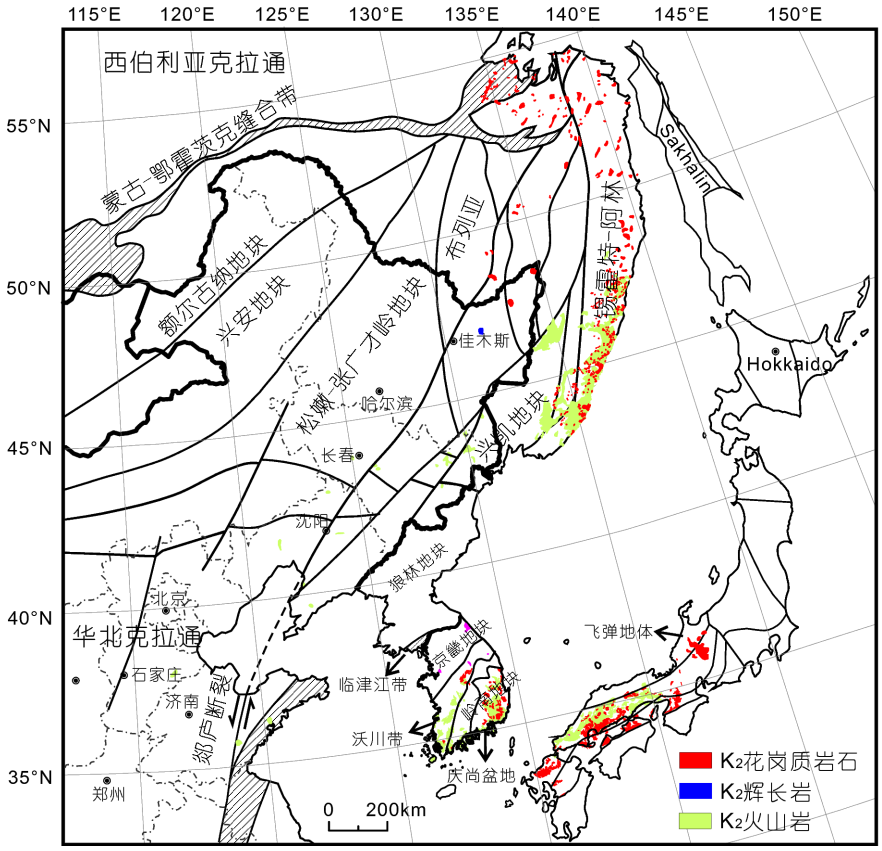

图 20 (网络版彩图)东北亚陆缘晚白垩世火成岩分布图

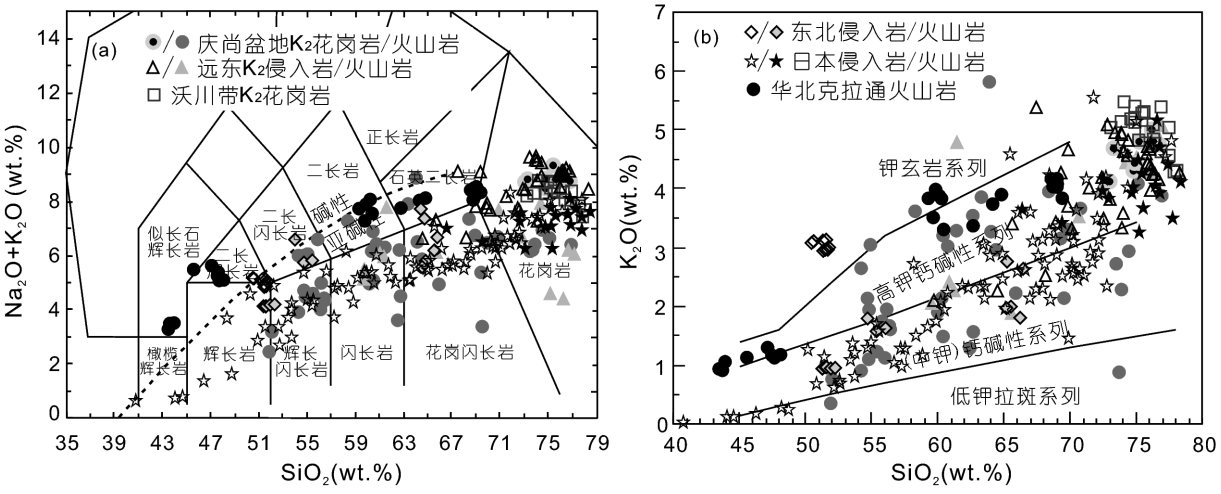

图 21 东北亚陆缘晚白垩世火成岩的TAS图解(a)和SiO_2-K_2O图解(b)

该阶段仅在俄罗斯远东地区发育弧型岩浆作用.

古近纪晚期火成岩主要出露在俄罗斯远东地区, 为一套基性-中性-酸性火山岩(网络版附表1和2), 形成时代为46~39Ma, 其中中酸性火山岩具有埃达克岩的地球化学属性(Wu等, 2017); 此外, 在中国东北也有少量出露, 包括桦甸地区永胜霓霞正长岩(31Ma; 袁洪林

等, 2003)和辽东饮马湾山辉长岩(32Ma; 袁洪林等, 2003); 在东北日本Kitakami地区存在44~38Ma高镁安山岩, 具有埃达克岩的特征, 是俯冲板块熔体与地幔橄榄岩反应的结果(Tsuchiya等, 2005). 该阶段东北亚不存在典型弧岩浆作用. 因此, 中国东北东部、俄罗斯远东和东北日本古近纪晚期火成岩形成于欧亚大陆东移和(古)太平洋板块进一步回撤的伸展环境.

5　古太平洋板块中生代-古近纪在东北亚陆缘下的俯冲历史

古太平洋板块在欧亚大陆下俯冲的起始时间一直存在争议, 目前主要有三种观点: 俯冲开始于二叠纪(Ernst等, 2007; Sun等, 2015; Yang H等, 2015)、三叠纪(彭玉鲸和陈跃军, 2007; Zhou等, 2014; Wilde, 2015)和早侏罗世(Xu等, 2009, 2013; Safonova和Santosh, 2014; Guo等, 2015). 本文通过分析东北亚陆缘中生代-古近纪火成岩岩石组合、地球化学特征及其时空变异, 对古太平洋板块俯冲起始时间、俯冲历史及其影响的空间范围给予初步限定(图24).

三叠纪: 额尔古纳-兴安地块上的三叠纪火成岩以高钾钙碱性I-型花岗岩为主, 沿着蒙古-鄂霍茨克缝合带呈北东向带状展布, 形成于蒙古-鄂霍茨克大洋板块南向俯冲下的活动大陆边缘环境; 华北克拉通北缘三叠纪火成岩沿索伦-西拉木伦-长春-延吉缝合带呈东西向带状展布, 它们的形成主要与古亚洲洋闭合及闭合后的伸展作用相关; 胶东半岛-辽东半岛-朝鲜半岛晚三叠世火成岩属于碱性系列, 并呈北东向带状展布, 形成于华北克拉通与扬子板块俯冲碰撞后岩石圈拆沉引起的伸展环境; 吉黑东部和小兴安岭-张广才岭晚三叠世火成岩包括双峰式火山岩、A-型花岗岩和A-型流纹岩(Xu等, 2013; Wang F等, 2015), 与该区晚三叠世被动陆缘沉积一起(Zhang等, 2015), 揭示该区晚三叠世期间处于伸展环境, 该伸展环境可能与蒙古-鄂霍茨克大洋板块南向俯冲形成的弧后伸展环境有关, 也可能与古亚洲洋最终闭合后的伸展环境有关. 综上所述, 可以判定东北亚陆缘三叠纪岩浆作用的形成与环太平洋构造体系无关, 暗示三叠纪期间, 欧亚大陆东缘可能不存在古太平洋板块的俯冲作用.

早侏罗世: 吉黑东部-朝鲜半岛-日本飞弹地体上早侏罗世钙碱性火成岩组合及其弧型火成岩的地球化学属性, 表明它们形成于活动陆缘环境, 而小兴安岭-张广才岭早侏罗世双峰式火成岩和A-型花岗岩(Yu等, 2012; Wang等, 2017)则形成于伸展环境. 自陆缘向陆内火成岩成分的极性变化揭示了来自东部俯冲作用的发生(许文良等, 2013), 欧亚大陆东缘早侏罗世增生杂岩的出现进一步证明古太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲作用起始于早侏罗世. 而额尔古纳-兴安地块上早侏罗世钙碱性火成岩呈北东-南西向带状展布, 形成于蒙古-鄂霍茨克大洋板块持续南向俯冲下的活动大陆边缘环境. 早侏罗世古太平洋板块俯冲作用影响的空间范围主要在松辽盆地以东地区.

中侏罗世-早白垩世早期: (1) 对于中国东北地区, 这一阶段的火成岩主要分布在松辽盆地以西地区, 中侏罗世火成岩主要为埃达克质岩石, 与蒙古-鄂霍茨克洋闭合有关, 晚侏罗世-早白垩世早期火成岩主要为碱性系列岩石、双峰式火成岩和A-型花岗岩, 形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合后的伸展环境, 而陆缘区(吉黑东部)缺少中侏罗世-早白垩世早期的火成岩, 暗示在中侏罗世-早白垩世早期东北亚陆缘与古太平洋板块可能为走滑的构造属性. (2) 华北克拉通北缘中侏罗世埃达克质岩石可能是蒙古-鄂霍茨克洋闭合的远程效应, 而华北克拉通晚侏罗世-早白垩世早期火成岩形成于加厚陆壳坍塌阶段的伸展环境, 该伸展环境既可与蒙古-鄂霍茨克洋闭合后的加厚陆壳的坍塌有关, 又可能与古太平洋板块由俯冲转变为走滑的构造属性相联系. (3) 朝鲜半岛产出大量中侏罗世埃达克质岩石, 可能形成于古太平洋板块北西向俯冲于欧亚大陆下的活动大陆边缘环境, 而该区同样缺乏晚侏罗世-早白垩世早期岩浆作用, 暗示不存在古太平洋板块俯的冲作用. 综上所述, 可以判定中侏罗世-早白垩世早期, 中国东北陆缘与古太平洋板块之间可能为走滑的构造属性, 而在朝鲜半岛南部, 中侏罗世期间可能存在古太平洋板块的俯冲作用, 到晚侏罗世-早白垩世早期转变为走滑的构造属性.

早白垩世晚期: 吉黑东部、俄罗斯远东和日本广泛分布的早白垩世晚期钙碱性火山岩、I-型花岗岩和埃达克质岩石指示古太平洋板块向欧亚大陆俯冲作用的发生, 这也得到了日本、俄罗斯远东和我国东北早白垩世构造就位的陆缘增生杂岩的证实(Saito, 1992; Zyabrev和Matsuoka, 1999; Safonova和Santosh, 2014; Wang Z H等, 2015; Zhou等, 2015). 吉黑东部、俄罗斯

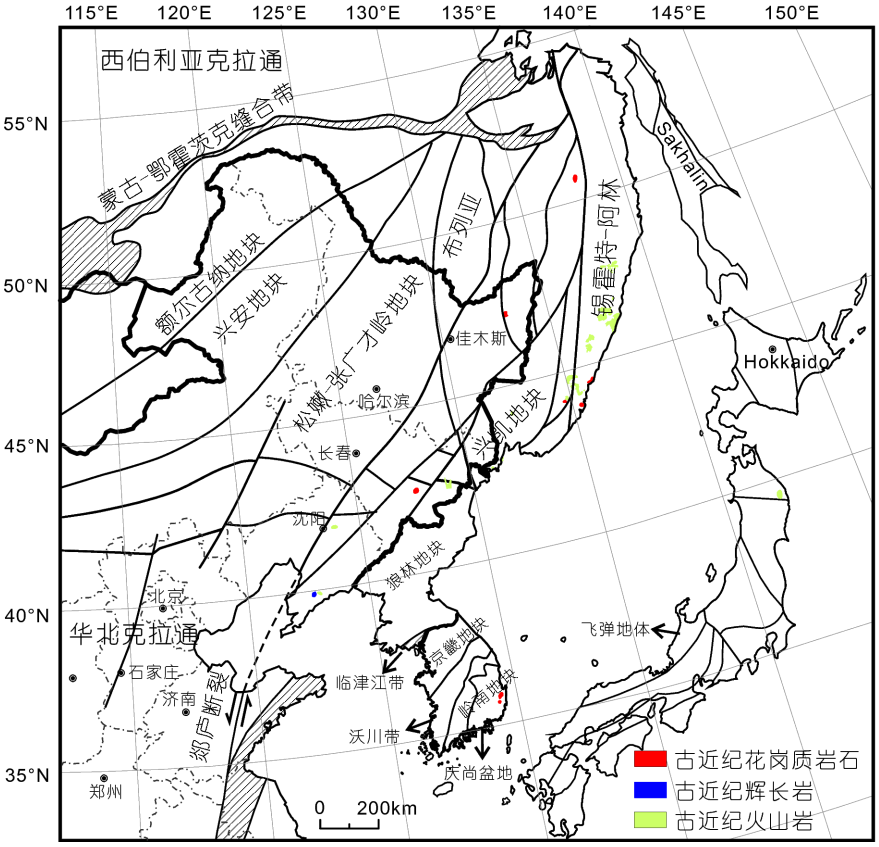

图 22 (网络版彩图)东北亚陆缘古近纪火成岩分布图

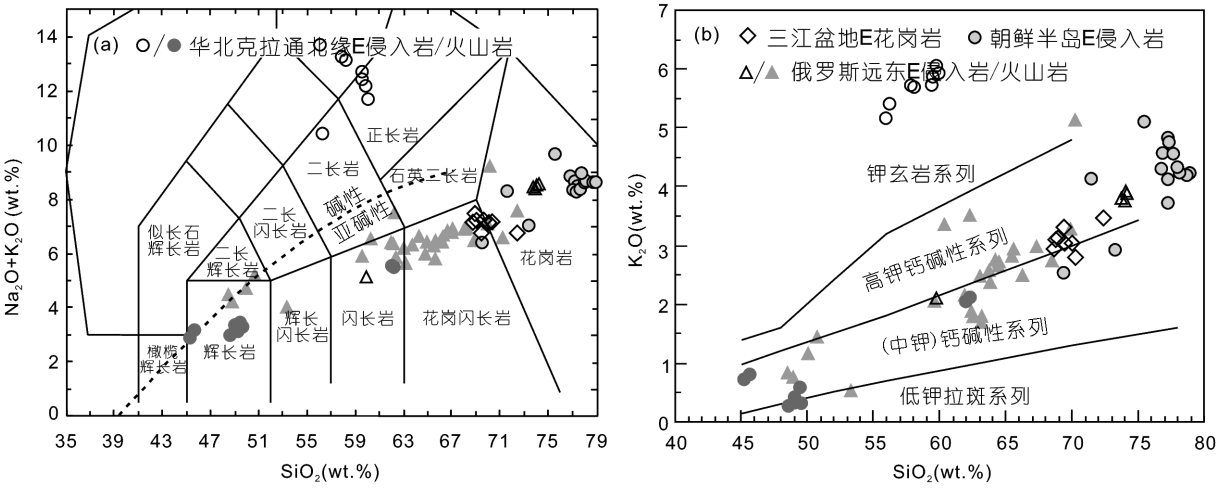

图 23 东北亚陆缘古近纪火成岩的TAS图解(a)和SiO_2-K_2O图解(b)

远东和日本构成了早白垩世晚期的活动大陆边缘,而松辽盆地-大兴安岭、华北克拉通和朝鲜半岛的早白垩世晚期A-型花岗岩、碱性岩以及变质核杂岩则形成于古太平洋板块俯冲下的陆内岩石圈伸展环境. 自陆缘向陆内, 火成岩中碱性组分具有增高的成分极性变化, 这进一步表明来自东部古太平洋板块低角度俯

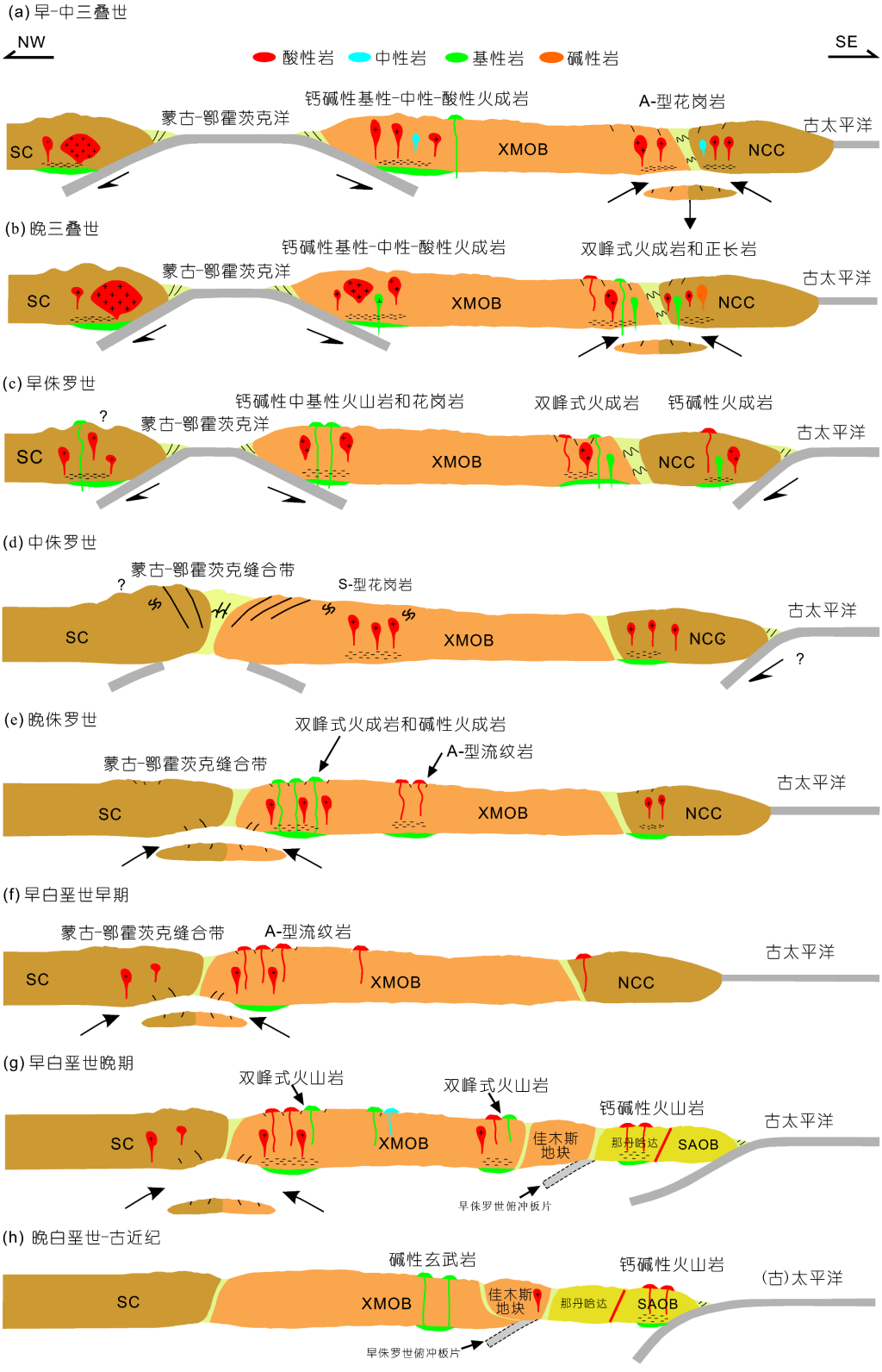

图 24　古太平洋板块中生代构造演化模型图

NCC, 华北克拉通; SAOB, 锡霍特-阿林造山带; SC, 西伯利亚克拉通; XMOB, 兴蒙造山带

冲作用的发生. 早白垩晚期岩浆作用广泛分布在大兴安岭-太行山-武陵山重力梯度带以东地区, 表明早白垩世晚期古太平洋板块俯冲作用影响的空间范围可达该重力梯度带.

晚白垩世-古近纪: 晚白垩世火成岩沿着东北亚大陆边缘分布, 中国东北东部、俄罗斯远东、西南日本、朝鲜半岛南部可能是当时活动大陆边缘的组成部分. 古近纪早期仅在俄罗斯远东地区存在弧型岩浆作用, 而古近纪晚期则缺少弧型岩浆作用. 从早白垩世晚期到古近纪, 火成岩的分布范围向东逐渐缩小, 并且由陆内向沿海地区迁移, 指示欧亚大陆向东漂移和古太平洋俯冲板块的逐渐回撤.

6 结论

通过对东北亚陆缘中生代-古近纪火成岩组合及其时空变异的研究, 结合陆缘增生杂岩和沉积建造属性以及区域性不整合等特征, 本文得出如下认识:

(1) 东北亚陆缘中生代-古近纪岩浆作用可划分成9个阶段: 早-中三叠世、晚三叠世、早侏罗世、中侏罗世、晚侏罗世、早白垩世早期、早白垩世晚期、晚白垩世和古近纪.

(2) 东北亚陆缘三叠纪岩浆作用与古亚洲洋闭合以及蒙古-鄂霍茨克大洋板块南向俯冲作用有关, 而与环太平洋构造体系无关.

(3) 中生代期间, 古太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲作用起始于早侏罗世.

(4) 中侏罗世-早白垩世早期(主要为晚侏罗世)东北亚陆缘与古太平洋板块之间可能为走滑的构造属性.

(5) 早白垩世晚期古太平洋板块向欧亚大陆开启大范围的低角度俯冲作用.

(6) 自早白垩世晚期至古近纪岩浆作用范围向东收缩, 暗示欧亚大陆向东漂移和古太平洋俯冲板块的回撤.

参考文献

邴志波, 刘文海, 黄志安, 张福生. 2003. 辽西上白垩统大兴庄组地层层序及时代. 地质通报, 22: 351–355

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

曹熹, 党增欣, 张兴洲, 姜继圣, 王洪德. 1992. 佳木斯复合地体. 长春: 吉林科学技术出版社

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: 1437–1449

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: 2407–2417

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: 321–330

颉颃强, 张福勤, 苗来成, 陈福坤, 刘敦一. 2008. 东北牡丹江地区"黑龙江群"中斜长角闪岩与花岗岩的锆石SHRIMP U-Pb及其地质意义. 岩石学报, 24: 1237–1250

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

李宇, 丁磊磊, 许文良, 王枫, 唐杰, 赵硕, 王子进. 2015. 孙吴地区中侏罗世白云母花岗岩的年代学与地球化学: 对蒙古-鄂霍茨克洋闭合时间的限定. 岩石学报, 31: 56–66

刘福来, 许志琴. 2004. 南苏鲁超高压岩石含柯石英锆石中的流体包裹体. 科学通报, 49: 181–189

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: 343–349

毛建仁. 2013. 中国东南部及邻区中新生代岩浆作用与成矿. 北京: 科学出版社

毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 289–299

蒙启安, 朱德丰, 陈均亮, 漆家福. 2012. 陆内裂陷盆地的复式断陷结构类型及其油气地质意义: 以海-塔盆地早白垩世盆地为例. 地学前缘, 19: 76–85

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: 1209–1226

苗来成, 范蔚茗, 张福勤, 刘敦一, 简平, 施光海, 陶华, 石玉若. 2003. 小兴安岭西北部新开岭-科洛杂岩锆石SHRIMP年代学研究及其意义. 科学通报, 48: 2315–2323

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

裴福萍, 许文良, 杨德彬, 纪伟强, 于洋, 张兴洲. 2008. 松辽盆地南部中生代火山岩: 锆石U-Pb年代学及其对基底性质的制约. 地球科学, 33: 603–617

彭玉鲸, 陈跃军. 2007. 吉黑造山带与华北地台开原-山城镇段构造边界位置. 世界地质, 26: 1–6

施璐, 郑常青, 姚文贵, 李娟, 徐久磊, 高源, 崔芳华. 2013. 大兴安岭中段五岔沟地区蛤蟆沟林场A型花岗岩年代学、岩石地球化学

及构造背景研究. 地质学报, 87: 1264–1276
隋振民, 葛文春, 吴福元, 张吉衡, 徐学纯, 程瑞玉. 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: 461–480
孙德有, 吴福元, 林强, 路孝平. 2001. 张广才岭燕山早期白石山岩体成因与壳幔相互作用. 岩石学报, 17: 227–235
孙德有, 吴福元, 张艳斌, 高山. 2004. 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: 174–181
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: 508–520
王冬艳, 许文良, 冯宏, 林景仟, 郑常青. 2002. 辽西中生代晚期岩石圈地幔的性质: 来自玄武岩和地幔捕虏体的证据. 吉林大学学报, 32: 319–324
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: 1129–1140
王建国, 和钟铧, 许文良. 2013. 大兴安岭南部钠闪石流纹岩的岩石成因: 年代学和地球化学证据. 岩石学报, 29: 853–863
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: 88–105
王微, 许文良, 纪伟强, 杨德彬, 裴福萍. 2006. 辽东中生代晚期和古近纪玄武岩及深源捕虏晶——对岩石圈地幔性质的制约. 高校地质学报, 12: 30–40
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: 817–822
王智慧, 杨浩, 葛文春, 毕君辉, 张彦龙, 许文良. 2016. 东北三江盆地始新世花岗闪长岩的发现及其地质意义: 锆石U-Pb年代学、地球化学和Sr-Nd-Hf同位素证据. 岩石学报, 32: 1823–1838
韦忠良, 张宏, 郭文敏, 柳小明. 2008. LA-ICP-MS锆石U-Pb测年对辽西-冀北地区晚中生代区域性角度不整合时代的约束. 自然科学进展, 18: 1119–1127
武昱东, 侯泉林. 2016. 大别-苏鲁造山带在朝鲜半岛的延伸方式——基于$^{40}Ar/^{39}Ar$构造年代学的约束. 岩石学报, 32: 3187–3204
徐美君, 许文良, 孟恩, 王枫. 2011. 内蒙古东北部额尔古纳地区上护林-向阳盆地中生代火山岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄和地球化学特征. 地质通报, 30: 1321–1338
许文良, 郑常青, 王冬艳. 1999. 辽西中生代粗面玄武岩中地幔和下地壳捕虏体的发现及其地质意义. 地质论评, 45(S1): 444–449
许文良, 王枫, 孟恩, 高福红, 裴福萍, 于介江, 唐杰. 2012. 黑龙江省东部古生代-早中生代的构造演化: 火成岩组合与碎屑锆石U-Pb年代学证据. 吉林大学学报(地球科学版), 42: 1378–1389
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: 339–353
闫峻, 陈江峰, 谢智, 周泰禧. 2003. 鲁东晚白垩世玄武岩中的幔源捕虏体: 对中国东部岩石圈减薄时间制约的新证据. 科学通报, 48: 1570–1574
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, 7: 910–921
于海飞, 张志诚, 帅歌伟, 陈彦, 汤文豪. 2016. 北京十三陵——西山髫髻山组火山岩年龄及其地质意义. 地质论评, 62: 807–826
袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针U-Pb年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报, 48: 1511–1520
翟明国. 2016. 朝鲜半岛与华北地质之对比研究: 进展与问题. 岩石学报, 32: 2915–2932
翟明国, 郭敬辉, 李忠, 陈代钊, 彭澎, 李铁胜, 张艳斌, 侯泉林, 樊祺诚, 胡波. 2007. 苏鲁造山带在朝鲜半岛的延伸: 造山带、前寒武纪基底以及古生代沉积盆地的证据与制约. 高校地质学报, 13: 415–428
张超, 郭巍, 徐仲元, 刘正宏, 刘永江, 雷聪聪. 2014. 吉林东部延边地区二长花岗岩年代学、岩石成因学及其构造意义研究. 岩石学报, 30: 512–526
张磊, 韩宝福, 朱永峰, 徐钊, 陈家富, 宋彪. 2009. 黑龙江省东部双鸭山二长辉长岩的年代学、矿物学、结晶过程及其地质意义. 岩石学报, 25: 577–587
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: 824–842
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: 1059–1073
张艳斌, 吴福元, 杨正赫, 金正男, 韩龙渊. 2016. 朝鲜半岛北部显生宙花岗岩成因研究及地质意义. 岩石学报, 32: 3098–3022
张长厚, 李程明, 邓洪菱, 刘阳, 刘磊, 魏波, 李寒滨, 刘孜. 2011. 燕山-太行山北段中生代收缩变形与华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 5: 593–617
张辉煌, 徐义刚, 葛文春, 马金龙. 2006. 吉林伊通-大屯地区晚中生代-新生代玄武岩的地球化学特征及其意义. 岩石学报, 22: 1579–1596
张岳桥, 董树文, 赵越, 张田. 2007. 华北侏罗纪大地构造:综评与新认识. 地质学报, 81: 1462–1480
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: 3165–3181
赵寒冬. 2009. 东北地区小兴安岭南段-张广才岭北段古生代火成岩组合与构造演化. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学
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: 46–51
Ames L, Zhou G Z, Xiong B C. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China.

Tectonics, 15: 472–489

Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P, ed. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier. 63–114

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 Z G, Zhang L C, Wan B, Wu H, Cleven N. 2011. Geochronology and geochemistry of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit in NE china, and their geological significance. Ore Geol Rev, 43: 92–105

Chough S K, Kwon S T, Ree J H, Choi D K. 2000. Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: A review and new view. Earth-Sci Rev, 52: 175–235

Cogné J P, Kravchinsky V A, Halim N, Hankard F. 2005. Late Jurassic-Early Cretaceous closure of the Mongol-Okhotsk Ocean demonstrated by new Mesozoic palaeomagnetic results from the Trans-Baïkal area (SE Siberia). Geophys J Int, 163: 813–832

Davis G A, Zheng Y D, Wang C, Darby B J, Zhang C H, Gehrels G E. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, Northern China. In: Hendrix M S, Davis G A, eds. Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation. Geological Society of America Memoir, 194: 171–197

Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347: 662–665

Dong Y, Ge W C, Yang H, Xu W L, Zhang Y L, Bi J H, Liu X W. 2016. Geochronology, geochemistry, and Hf isotopes of Jurassic intermediate-acidic intrusions in the Xing'an Block, northeastern China: Petrogenesis and implications for subduction of the Paleo-Pacific oceanic plate. J Asian Earth Sci, 118: 11–31

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. Annu Rev Earth Planet Sci, 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. J Asian Earth Sci, 63: 206–217

Ge W C, Wu F Y, Zhou C Y, Abdel R A A. 2005. Emplacement age of the Tahe granite and its constraints on the tectonic nature of the Ergun block in the northern part of the Da Hinggan Range. Chin Sci Bull, 50: 2097–2105

Gill J B. 1981. Orogenic Andesites and Plate Tectonics. New York: Springer

Guo F, Fan W M, Wang Y J, Li C W. 2005. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous high-K calc-alkaline volcanic rocks in the Laiyang Basin of the Sulu Belt, eastern China. Isl Arc, 14: 69–90

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 F, Nakamuru E, Fan W M, Kobayoshi K, Li C W. 2007. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing; Yanji Area, NE China. J Petrol, 48: 661–692

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. Int Geol Rev, 58: 196–215

Hao T Y, Xu Y, Suh M, Xu Y, Liu J H, Zhang L L, Dai M G. 2007. East marginal fault of the Yellow Sea: A part of the conjunction zone between Sino-Korea and Yangtze Blocks? In: Zhai M G, Windley B F, Kusky T, Meng Q R, eds. Mesozoic Sub-continental Lithospheric Thinning under Eastern Asia. Geological Society London Special Publication. 281–292

Hee S Q, Sung T K, Ree J H. 2005. Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. Tectonics, 24: TC5002

Isozaki Y. 1997. Contrasting two types of orogen in Permo-Triassic Japan: Accretionary versus collisional. Isl Arc, 6: 2–24

Jahn B M. 2010. Accretionary orogen and evolution of the Japanese Islands: Implications from a Sr-Nd isotopic study of the Phanerozoic granitoids from SW Japan. Am J Sci, 310: 1210–1249

Jahn B M, Valui G, Kruk N, Gonevchuk V, Usuki M, Wu J T J. 2015. Emplacement ages, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic characterization of Mesozoic to early Cenozoic granitoids of the Sikhote-Alin Orogenic Belt, Russian Far East: Crustal growth and regional tectonic evolution. J Asian Earth Sci, 111: 872–918

Ji W Q, Xu W L, Yang D B, Pei F P, Jin K, Liu X M. 2007. Chronology and geochemistry of volcanic rocks in the Cretaceous Suifenhe formation in Eastern Heilongjiang, China. Acta Geol Sin-Engl Ed, 81: 266–277

Kee W S, Won Kim S, Jeong Y J, Kwon S. 2010. Characteristics of Jurassic continental arc magmatism in South Korea: Tectonic implications. J Geol, 118: 305–323

Kelemen P B, Hangh J K, Greene A R. 2003. One view of the geochemistry ofsubduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. In: Rudnick R L, ed. Treatise

on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier. 593–659

Khanchuk A I, Panchenko I V, Kemkin I V. 1988. Geodynamic Evolution of Sikhote-Alin and Sakhalin in the Paleozoic and Mesozoic. Vladivostok: Far East Branch of the USSR Academy of Sciences. 56

Kim C S, Kim G S. 1997. Petrogenesis of the early Tertiary A-type Namsan alkali granite in the Kyongsang Basin, Korea. Geosci J, 1: 99–107

Kim H S, Hwang M K, Ree J H, Yi K. 2013. Tectonic linkage between the Korean Peninsula and mainland Asia in the Cambrian: Insights from U-Pb dating of detrital zircon. Earth Planet Sci Lett, 368: 204–218

Kim S W, Kwon S, Ko K, Yi K, Cho D L, Kee W S, Kim B C. 2015. Geochronological and geochemical implications of Early to Middle Jurassic continental adakitic arc magmatism in the Korean Peninsula. Lithos, 227: 225–240

Kiminami K, Imaoka T. 2013. Spatiotemporal variations of Jurassic-Cretaceous magmatism in eastern Asia (Tan-Lu Fault to SW Japan): Evidence for flat-slab subduction and slab rollback. Terra Nova, 25: 414–422

Kuang Y S, Wei X, Hong L B, Ma J L, Pang C J, Zhong Y T, Zhao J X, Xu Y G. 2012. Petrogenetic evaluation of the Laohutai basalts from North China Craton: Melting of a two-component source during lithospheric thinning in the late Cretaceous-early Cenozoic. Lithos, 154: 68–82

Kwon S T, Lan C Y, Lee T. 1999. Rb-Sr and Sm-Nd isotopic study of the Seoul granitic batholith in middle Korea. Geosci J, 3: 107–114

Lee D W. 1999. Strike-slip fault tectonics and basin formation during the Cretaceous in the Korean Peninsula. Isl Arc, 8: 218–231

Lee S G, Shin S C, Kim K H, Lee T, Koh H, Song Y S. 2010. Petrogenesis of three Cretaceous granites in the Okcheon Metamorphic Belt, South Korea: Geochemical and Nd-Sr-Pb isotopic constraints. Gondwana Res, 17: 87–101

Lee Y S, Ishikawa N, Kim W K. 1999. Paleomagnetism of Tertiary rocks on the Korean Peninsula: Tectonic implications for the opening of the East Sea (Sea of Japan). Tectonophysics, 304: 131–149

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. J Asian Earth Sci, 26: 207–224

Li J Y, He Z J, Mo S G, Zhemg Q D. 1999. The Late Mesozoic orogenic processes of Mongolia-Okhotsk Orogen: Evidence from field investigations into deformation of the Mohe Area, NE China. J Geosci Res NE Asia, 2: 172–178

Li S Z, Zhao G C, Sun M, Wu F, Liu J Z, Hao D F, Han Z Z, Luo Y. 2004. Mesozoic, not Paleoproterozoic SHRIMP U-Pb zircon ages of two Liaoji granites, eastern block, North China Craton. Int Geol Rev, 46: 162–176

Li Y, Xu W L, Wang F, Pei F P, Tang J, Zhao S. 2017. Triassic volcanism along the eastern margin of the Xing'an Massif, NE China: Constraints on the spatial-temporal extent of the Mongol-Okhotsk tectonic regime. Gondwana Res, 48: 205–223

Li Y, Xu W L, Wang F, Tang J, Pei F P, Wang Z J. 2014. Geochronology and geochemistry of late Paleozoic volcanic rocks on the western margin of the Songnen-Zhangguangcai Range Massif, NE China: Implications for the amalgamation history of the Xing'an and Songnen-Zhangguangcai Range massifs. Lithos, 205: 394–410

Liu J L, Xu Z Q, Liou J G, Song B. 2004. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh-pressure and retrograde metamorphism of gneisses, south-western Sulu terrane, eastern China. J Metamorph Geol, 22: 315–326

Liu S A, Li S, Guo S, Hou Z, He Y. 2012. The Cretaceous adakitic-basaltic-granitic magma sequence on south-eastern margin of the North China Craton: Implications for lithospheric thinning mechanism. Lithos, 134-135: 163–178

Liu W, Siebel W, Li X J, Pan X F. 2005. Petrogenesis of the Linxi granitoids, northern Inner Mongolia of China: Constraints on basaltic underplating. Chem Geol, 219: 5–35

Liu Y J, Li W M, Feng Z Q, Wen Q B, Neubauer F, Liang C Y. 2016. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt. Gondwana Res, 43: 123–148

Ma L, Jiang S Y, Dai B Z, Jiang Y H, Hou M L, Pu W, Xu B. 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, 162-163: 251–263

Ma Q, Zheng J P, Xu Y G, Griffin W L, Zhang R S. 2015. Are continental "adakites" derived from thickened or foundered lower crust? Earth Planet Sci Lett, 419: 125–133

Maitre R W L. 1989. A Classification of igneous rocks and glossary of terms. In: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Blackwell

Meng E, Xu W L, Pei F P, Yang D B, Yu Y, Zhang X Z. 2010. Detrital-zircon geochronology of Late Paleozoic sedimentary rocks in eastern Heilongjiang Province, NE China: Implications for the tectonic evolution of the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt. Tectonophysics, 485: 42–51

Meng E, Xu W L, Yang D B, Pei F P, Yang Y, Zhang X Z. 2008. Permian volcanisms in eastern and southeastern margins of the Jiamusi Massif, northeastern China: Zircon U-Pb chronology,

geochemistry and its tectonic implications. Chin Sci Bull, 53: 1231–1245

Miao L C, Zhang F Q, Zhu M S, Liu D Y. 2015. Zircon SHRIMP U-Pb dating of metamorphic complexes in the conjunction of the Greater and Lesser Xing'an ranges, NE China: Timing of formation and metamorphism and tectonic implications. J Asian Earth Sci, 114: 634–648

Nozaka T, Liu Y. 2002. Petrology of the Hegenshan ophiolite and its implication for the tectonic evolution of northern China. Earth Planet Sci Lett, 202: 89–104

Oh C W. 2006. A new concept on tectonic correlation between Korea, China and Japan: Histories from the late Proterozoic to Cretaceous. Gondwana Res, 9: 47–61

Oh C W, Kim S W, Ryu I C, Okada T, Hyodo H, Itaya T. 2004. Tectono-metamorphic evolution of the Okcheon Metamorphic Belt, South Korea: Tectonic implications in East Asia. Isl Arc, 13: 387–402

Otofuji Y, Hayashida A, Torii M. 1985. When was the Japan Sea opened? Paleomagnetic evidences for Southwest Japan. In: Nasu N, Uyeda S, Kushiro I, Kobayashi K, Kagami H, eds. Formation of Active Ocean Margins. Tokyo: Terrapub. 551–566

Otofuji Y I, Itaya T, Matsuda T. 1991. Rapid rotation of southwest Japan-palaeomagnetism and K-Ar ages of Miocene volcanic rocks of southwest Japan. Geophys J Int, 105: 397–405

Parfenov L M. 1984. Continental Margins and Island Arcs of the Mesozoides of Northeastern Asia. Novosibirsk: Nauka. 192

Parfenov L M, Popeko L I, Tomurtogoo O. 2001. Problems of tectonics of the Mongol-Okhotsk orogenic belt. Geol Pacific Ocean, 16: 797–830

Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. Contrib Mineral Petrol, 58: 63–81

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. Pretectonic and posttectonic emplacements of the granitoids in the south central Okchon belt, South Korea: Implications for the timing of strike-slip shearing and thrusting. Tectonics, 20: 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 Res, 25: 126–158

Saito S. 1992. Stratigraphy of Cenozoic strata in the southern terminus area of Boso Peninsula, central Japan, Contributions of Instutite Geology and Paleontology Tohoku University, 93: 1–37

Sengör A M C, Natalin B A. 1996. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis. In: Yin A, Harrison T M, eds. The tectonic evolution of Asia. Cambridge: Cambrige University Press. 486–641

Shi L, Zheng C Q, Yao W G, Li J, Cui F H, Gao F, Gao Y, Xu J L, Han X M. 2015. Geochronological framework and tectonic setting of the granitic magmatism in the Chaihe-Moguqi region, central Great Xing'an Range, China. J Asian Earth Sci, 113: 443–453

Sonehara T, Harayama S. 2007. Petrology of the Nohi Rhyolite and its related granitoids: A Late Cretaceous large silicic igneous field in central Japan. J Volcanol Geotherm Res, 167: 57–80

Sun J F, Yang J H. 2009. Early Cretaceous A-type granites in the eastern North China Craton with relation to destruction of the craton. Earth Sci, 34: 137–147

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

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Geol Soc Lond Spec Publ, 42: 313–345

Takahashi Y, Cho D L, Kee W S. 2010. Timing of mylonitization in the Funatsu Shear Zone within Hida Belt of southwest Japan: Implications for correlation with the shear zones around the Ogcheon Belt in the Korean Peninsula. Gondwana Res, 17: 102–115

Takahashi Y, Cho D L, Mao J, Zhao X, Yi K. 2018. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Hida metamorphic and plutonic rocks, Japan: Implications for late Paleozoic to Mesozoic tectonics around the Korean Peninsula. Island Arc, 27: e12220

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, Li Y. 2015. Geochronology, geochemistry, and deformation history of Late Jurassic-Early Cretaceous intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China: Constraints on the late Mesozoic tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk orogenic belt. Tectonophysics, 658: 91–110

Tang J, Xu W L, Wang F, Zhao S, Wang W. 2016a. Early Mesozoic southward 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 Res, 31: 218–240

Tang J, Xu W L, Niu Y L, Wang F, Ge W C, Sorokin A A, Chekryzhov I Y. 2016b. Geochronology and geochemistry of Late Cretaceous-Paleocene granitoids in the Sikhote-Alin Orogenic Belt: Petrogenesis and implications for the oblique subduction of the paleo-Pacific

plate. Lithos, 266-267: 202–212

Tomurtogoo O, Windley B F, Kroner A, Badarch G, Liu D Y. 2005. Zircon age and occurrence of the Adaatsag ophiolite and Muron shear zone, central Mongolia: Constraints on the evolution of the Mongol-Okhotsk ocean, suture and orogen. J Geol Soc, 162: 125–134

Tsuchiya N, Suzuki S, Kimura J I, Kagami H. 2005. Evidence for slab melt/mantle reaction: Petrogenesis of Early Cretaceous and Eocene high-Mg andesites from the Kitakami Mountains, Japan. Lithos, 79: 179–206

Tsuchiya N, Kimura J I, Kagami H. 2007. Petrogenesis of Early Cretaceous adakitic granites from the Kitakami Mountains, Japan. J Volcanol Geotherm Res, 167: 134–159

Tsujimori T, Liou J G, Ernst W G, Itaya T. 2006. Triassic paragonite- and garnet-bearing epidote-amphibolite from the Hida Mountains, Japan. Gondwana Res, 9: 167–175

Uno K. 2000. Clockwise rotation of the Korean Peninsula with respect to the North China Block inferred from an improved Early Triassic palaeomagnetic pole for the Ryeongnam Block. Geophys J Int, 143: 969–976

Uno K, Chang K H. 2000. Paleomagnetic results from the lower Mesozoic daedong supergroup in the Gyeonggi Block, Korean Peninsula: An eastern extension of the South China Block. Earth Planet Sci Lett, 182: 49–59

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. Geochim Cosmochim Acta, 69: 4333–4348

Wang F, Xu W L, Meng E, Cao H H, Gao F H. 2012. Early Paleozoic amalgamation of the Songnen-Zhangguangcai Range and Jiamusi massifs in the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt: Geochronological and geochemical evidence from granitoids and rhyolites. J Asian Earth Sci, 49: 234–248

Wang F, Xu W L, Xu Y G, Gao F H, Ge W C. 2015. Late Triassic bimodal igneous rocks in eastern Heilongjiang Province, NE China: Implications for the initiation of subduction of the Paleo-Pacific Plate beneath Eurasia. J Asian Earth Sci, 97: 406–423

Wang F, Xu Y G, Xu W L, Yang L, Wu W, Sun C Y. 2017. Early Jurassic calc-alkaline magmatism in northeast China: Magmatic response to subduction of the Paleo-Pacific Plate beneath the Eurasian continent. J Asian Earth Sci, 143: 249–268

Wang F, Zhou X H, Zhang L C, Ying J F, Zhang Y T, Wu F Y, Zhu R X. 2006. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia. Earth Planet Sci Lett, 251: 179–198

Wang W, Tang J, Xu W L, Wang F. 2015. 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 Y J, Fan W M, Liang X Q, Peng T P, Shi Y R. 2005. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of Indosinian granites in Hunan Province and its petrogenetic implications. Chin Sci Bull, 50: 1395–1403

Wang Y J, Fan W M, Sun M, Liang X Q, Zhang Y H, Peng T P. 2007. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province. Lithos, 96: 475–502

Wang Z H, Ge W C, Yang H, Zhang Y L, Bi J H, Tian D X, Xu W L. 2015. Middle Jurassic oceanic island igneous rocks of the Raohe accretionary complex, northeastern China: Petrogenesis and tectonic implications. J Asian Earth Sci, 111: 120–137

Wang Z J, Xu W L, Pei F P, Wang Z W, Li Y, Cao H H. 2015. 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. 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

Wilson B M. 1989. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach. London: United Kingdom

Windley B F, Alexeiev D, Xiao W, Kroner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. J Geol Soc, 164: 31–47

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 north-eastern China. J Asian Earth Sci, 41: 1–30

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. Chem Geol, 187: 143–173

Wu F Y, Wilde S A, Sun D Y, Zhang G L. 2004. Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complexes in Jilin Province, NE China. J Asian Earth Sci, 23: 781–797

Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Zhang X O. 2005a. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. Chem Geol, 221: 127–156

Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X, Yang J H. 2005b. Nature and

significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. Earth Planet Sci Lett, 233: 103–119

Wu F Y, Zhao G C, Sun D Y, Wilde S A, Yang J H. 2007a. The Hulan Group: Its role in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China. J Asian Earth Sci, 30: 542–556

Wu F Y, Han R H, Yang J H, Wilde S A, Zhai M G, Park S C. 2007b. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. Chem Geol, 238: 232–248

Wu J T J, Jahn B, Nechaev V, Chashchin A, Popov V, Yokoyama K, Tsutsumi Y. 2017. Geochemical characteristics and petrogenesis of adakites in the Sikhote-Alin area, Russian Far East. J Asian Earth Sci, 145: 512–529

Wu Y B, Zheng Y F. 2013. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China. Gondwana Res, 23: 1402–1428

Xiao W J, Windley B F, Hao J, Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. Tectonics, 22: 1069

Xiao W J, Windley B F, Huang B C, Han C M, Yuan C, Chen H L, Sun M, Sun S, Li J L. 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. Int J Earth Sci-Geol Rundsch, 98: 1189–1217

Xu W L, Ji W Q, Pei F P, Meng E, Yu Y, Yang D B, Zhang X. 2009. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin provinces, NE China: Chronology, geochemistry, and tectonic implications. J Asian Earth Sci, 34: 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. J Asian Earth Sci, 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 Res, 27: 1509–1533

Yang J H, Chung S L, Wilde S A, Wu F, 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. Chem Geol, 214: 99–125

Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Lo C H, Wilde S A, Davis G A. 2007. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from $^{40}Ar/^{39}Ar$ thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton. Geol Soc Am Bull, 119: 1405–1414

Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Chen F, Liu X M, Xie L W. 2008. Petrogenesis of an alkali syenite-granite-rhyolite suite in the Yanshan Fold and Thrust Belt, eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Sr-Hf isotopic evidence for lithospheric thinning. J Petrol, 49: 315–351

Yang K F, Fan H R, Santosh M, Hu F F, Wilde S A, Lan T G, Lu L N, Liu Y S. 2012. Reactivation of the Archean lower crust: Implications for zircon geochronology, elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of late Mesozoic granitoids from northwestern Jiaodong Terrane, the North China Craton. Lithos, 146-147: 112–127

Yang Y T, Guo Z X, Song C C, Li X B, He S. 2015. A short-lived but significant Mongol-Okhotsk collisional orogeny in latest Jurassic-earliest Cretaceous. Gondwana Res, 28: 1096–1116

Yi K, Cheong C S, Kim J, Kim N, Jeong Y J, Cho M. 2012. Late Paleozoic to Early Mesozoic arc-related magmatism in southeastern Korea: SHRIMP zircon geochronology and geochemistry. Lithos, 153: 129–141

Ying J F, Zhou X H, Zhang L C, Wang F. 2010. Geochronological framework of Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, NE China, and their geodynamic implications. J Asian Earth Sci, 39: 786–793

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 Geol Sin, 83: 245–257

Yuge T, Imaoka T, Iizumi S. 1998. Whole-rock chemistry and Sr and Nd isotope ratios of Cretaceous rhyolites and granitoids in Abu district, Yamaguchi Prefecture, Southwest Japan. J Geol Soc Jpn, 104: 159–170

Zhang H H, Wang F, Xu W L, Cao H H, Pei F P. 2016. Petrogenesis of Early-Middle Jurassic intrusive rocks in northern Liaoning and central Jilin provinces, northeast China: Implications for the extent of spatial-temporal overprinting of the Mongol-Okhotsk and Paleo-Pacific tectonic regimes. Lithos, 256-257: 132–147

Zhang J H, Gao S, Ge W C, Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Li M. 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: Implications for subduction-induced delamination. Chem Geol, 276: 144–165

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: 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-Sci Rev, 131: 49–87

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. Russ J Pac Geol, 9: 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. Isl Arc, 13: 484–505

Zhang X H, Li T S, Pu Z P, Wang H. 2002. ^{40}Ar-^{39}Ar ages of the Louzidian-Dachengzi ductile shear zone near Chifeng, Inner Mongolia and their tectonic significance. Chin Sci Bull, 47: 1292

Zhao G C, Cao L, Wilde S A, Sun M, Choe W J, Li S Z. 2006. Implications based on the first SHRIMP U-Pb zircon dating on Precambrian granitoid rocks in North Korea. Earth Planet Sci Lett, 251: 365–379

Zhao P, Jahn B M, Xu B. 2017. Elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry of Cretaceous to Early Paleogene granites and volcanic rocks in the Sikhote-Alin Orogenic Belt (Russian Far East): Implications for the regional tectonic evolution. J Asian Earth Sci, 146: 383–401

Zhao S, Xu W L, Wang W, Tang J, Zhang Y H. 2014. Geochronology and geochemistry of Middle-Late Ordovician granites and gabbros in the Erguna region, NE China: Implications for the tectonic evolution of the Erguna Massif. J Earth Sci, 25: 841–853

Zhao X L, Mao J R, Ye H M, Liu K, Takahashi Y. 2013. New SHRIMP U-Pb zircon ages of granitic rocks in the Hida Belt, Japan: Implications for tectonic correlation with Jiamushi massif. Island Arc, 22: 508–521

Zheng Y F, Wang Z R, Li S G, Zhao Z F. 2002. Oxygen isotope equilibrium between eclogite minerals and its constraints on mineral Sm-Nd chronometer. Geochim Cosmochim Acta, 66: 625–634

Zheng Y F, Zhao Z F, Li S G, Gong B. 2003. Oxygen isotope equilibrium between ultrahigh-pressure metamorphic minerals and its constraints on Sm-Nd and Rb-Sr chronometers. Geol Soc Lond Spec Publ, 220: 93–117

Zhou J B, Wilde S A, Zhao G C, Zhang X Z, Zheng C Q, Wang H. 2010. SHRIMP U-Pb zircon ages from the Heilongjiang high-pressure belt: Constraints on the Mesozoic evolution of NE China. Am J Sci, 310: 1024–1053

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 Res, 23: 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: 2444–2466

Zhou J B, Wang B, Wilde S A, Zhao G C, Cao J L, Zheng C Q, Zeng W S. 2015. Geochemistry and U-Pb zircon dating of the Toudaoqiao blueschists in the Great Xing'an Range, northeast China, and tectonic implications. J Asian Earth Sci, 97: 197–210

Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. Tectonophysics, 326: 269–287

Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S, Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. Episodes, 29: 26–33

Zhu R X, Yang J H, Wu F Y. 2012. Timing of destruction of the North China Craton. Lithos, 149: 51–60

Zonenshain L P, Kuzmin M I, Natapov L M. 1990a. Geology of the USSR: A Plate Tectonic Synthesis. AGU Publications. 21: 242

Zonenshain L P, Kuzmin M I, Natapov L M. 1990b. Plate Tectonics of the USSR Territory, 2. Moscow: Nedra. 334

Zorin Y A. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia. Tectonophysics, 306: 33–56

Zyabrev S, Matsuoka A. 1999. Late Jurassic (Tithonian) radiolarians from a clastic unit of the Khabarovsk complex (Russian Far East): Significance for subduction accretion timing and terrane correlation. Isl Arc, 8: 30–37

(责任编委: 郑永飞)