

华北中生代岩浆作用与去克拉通化

孙金凤¹ 杨进辉²

(1. 中国科学院大学 中国科学院计算地球动力学重点实验室, 北京 100049; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要: 华北是全球古老克拉通遭受破坏最明显和最典型的地区, 其去克拉通化作用的时间、范围和机制等重要科学问题是国内外研究的热点。大规模岩浆作用是去克拉通化作用的地质表现之一, 通过对华北地区侵入岩侵位时代、源区、成岩过程的研究, 可有效反演其去克拉通化作用的时空范围、过程及可能的动力学机制。华北东部广泛发育大面积的中生代侵入岩, 本文在作者近十年研究的基础上, 通过总结华北东部中生代侵入岩的锆石 U-Pb 年代学资料, 厘定了华北东部中生代岩浆活动主要分为三叠纪、侏罗纪和早白垩世三期, 通过岩浆源区、岩石成因研究, 探讨不同时期岩石圈(地幔和大陆地壳)性质和厚度的转变及破坏的空间范围, 在此基础上, 结合区域地质特征初步探讨了华北去克拉通化的地球动力学机制。

关键词: 华北克拉通; 去克拉通化作用; 中生代; 花岗岩

中图分类号: P542.5; P588.11⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)05-0577-16

Mesozoic magmatism related to decratonization of the North China Craton

SUN Jin-feng¹ and YANG Jin-hui²

(1. Key Laboratory of Computational Geodynamics, Chinese Academy of Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The North China Craton is the most obvious and most typical area for the study of the destruction of the craton. The timing, scale and geodynamics of decratonization are hot issues among the geoscientists both in China and abroad. Large-scale magmatism is one of the geological responses to decratonization. The ages, sources of magmas and petrogenetic processes of magmatic rocks can be used to constrain the timing, scale and possible geodynamics of decratonization. Mesozoic intrusive rocks are widely distributed in the eastern North China Craton. Based on research works conducted in the past ten years or so, the authors summarize zircon U-Pb ages of the Mesozoic intrusive rocks in eastern North China Craton, which show mainly three stages of magmatism in eastern North China Craton, i. e., Triassic, Jurassic and Early Cretaceous. Geochemical features were used to trace their magma sources and petrogenesis, and the transition of the nature and thickness of the lithosphere and the spatial scale of decratonization were further constrained. On such a basis, the possible geodynamic mechanism of decratonization of the North China Craton is discussed in combination with regional geology.

Key words: North China Craton; decratonization; Mesozoic; granitoids

收稿日期: 2013-07-08; 修订日期: 2013-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40925007, 41202046)

作者简介: 孙金凤(1983-), 女, 汉族, 讲师, 主要从事岩浆岩成因和地球化学研究, E-mail: sunjinfeng@mail.igcas.ac.cn; 通讯作者: 杨进辉(1971-), 男, 汉族, 研究员, 主要从事岩石地球化学研究, E-mail: jinhui@mail.igcas.ac.cn.

克拉通是地球上相对稳定的地质单元(占地球陆地面积的 50% 左右),主要形成于前寒武纪(>5.4 亿年),尤其是早前寒武纪(>18 亿年)。近百年的研究表明,典型的克拉通通常具有厚的(约 200 km)密度和热流值较低的岩石圈(Jordan, 1975; Pollack, 1986; Hirth *et al.*, 2000)。这些特征使得克拉通免遭后期地质作用的改造而保持稳定,无明显的壳内韧性变形、岩浆活动和地震活动,也不存在显著的大陆地壳生长。与世界典型克拉通相似,华北克拉通自 18 亿年克拉通化之后至早中生代期间一直保持相对稳定,且具有典型克拉通型巨厚、古老富集的岩石圈地幔。但自中生代以来,华北克拉通东部发生了大规模的构造变形、岩浆和流体活动,形成多种类型的盆地和大规模金属矿产,这意味着华北原有的克拉通性质发生了变化。

早在 20 世纪初,翁文灏先生就根据这一现象提出了“燕山运动”的概念(翁文灏, 1927);之后,陈国达先生又提出了“地台活化”的观点(陈国达, 1956)。直至 20 世纪 90 年代,中外科学家根据对华北克拉通地幔包体的研究,提出了“岩石圈减薄”的概念,并发现岩石圈地幔的物理、化学性质均发生了根本性改变(Menzies *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1998; Xu, 2001; Gao *et al.*, 2002)。伴随着岩石圈地幔的转变,华北克拉通也失去克拉通地区应有的稳定性,这种克拉通稳定性整体丧失的地质现象称为克拉通破坏或去克拉通化(decratonization)(Yang *et al.*, 2008a)。华北去克拉通化作用的时空范围和过程是了解去克拉通化动力学机制的关键。去克拉通化发生时,岩石圈厚度与地幔性质的转变必然导致软流圈地幔物质的上涌、减压部分熔融,而岩石圈地幔中富集组分也增温部分熔融而形成镁铁质岩浆,其底侵诱发地壳物质发生部分熔融,进而形成大规模基性到酸性的岩浆活动(Yang *et al.*, 2008a; Zhu *et al.*, 2012)。对这些岩浆活动的研究可以用于揭示华北克拉通破坏的时间、空间范围及可能动力学机制等关键科学问题。鉴于此,本文综合近年来华北东部中生代花岗岩类岩石的相关研究成果,对华北中生代花岗岩类岩石的时空分布特征、岩浆源区和成因进行初步的总结,探索华北去克拉通化与大规模岩浆作用之间的成因联系以及克拉通破坏的时间和可能的动力学机制。由于受作者知识积累和学术水平的限制,有些问题的讨论不够深刻,请读者指正。

1 华北中生代侵入岩的时空分布

华北克拉通东部广泛分布大面积的中生代岩浆岩(图 1)。前人对大量花岗质岩石进行了精确的定年工作,获得了大量的高精度锆石 U-Pb 年龄结果(林景仟等, 1992; Chen *et al.*, 2004, 2008; Wu *et al.*, 2005a, 2005b; 吴福元等, 2005, 2006; Yang *et al.*, 2005a, 2005b; Yang and Wu, 2009; Chen, 2010)。根据目前已报道的华北克拉通中生代侵入岩锆石 U-Pb 年龄结果,基本可以将华北中生代岩浆作用划分为三个时期:三叠纪(231~199 Ma)、侏罗纪(189~146 Ma)和早白垩世(141~108 Ma)(图 2)。

1.1 三叠纪花岗岩类岩体

三叠纪侵入体零星分布于华北克拉通的东部,区域上仅出露在华北北缘、辽东半岛、胶东半岛以及朝鲜半岛地区(图 1)。

华北北缘三叠纪侵入体主要由近东西向展布的非造山型碱性岩带组成(阎国翰等, 2000)。岩石类型包括正长岩、霞石正长岩、石英正长岩及 A 型花岗岩等(Peng *et al.*, 2008; 任荣等, 2009; Yang *et al.*, 2005a, 2012a)。典型的岩体如河北凌源河坎子岩体,岩性为含霞石的辉石正长岩,锆石 LA-ICPMS 和 SIMS U-Pb 年龄为 224~226 Ma(任康绪等, 2004; Yang *et al.*, 2012a);河北矾山碱性超镁铁岩-正长岩杂岩体中辉石正长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 218 Ma(牟保磊等, 2001; 任荣等, 2009);平泉光头山碱性花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄为 220 Ma(韩宝福等, 2004)。总体而言,华北北缘三叠纪碱性侵入岩带的形成时代为 231~215 Ma 之间(Yang *et al.*, 2012a; Zhu *et al.*, 2012)。

辽东半岛是三叠纪侵入体发育的典型地区。前人曾认为该区的花岗质岩石主要形成于三叠纪,但近年来所获得的高精度年代学数据表明,该区花岗岩主要形成于晚中生代(林景仟等, 1992; Wu *et al.*, 2005a, 2005b)。辽东半岛三叠纪侵入体可以分为两类:辽宁东部的赛马-柏林川碱性杂岩体,岩石类型包括霞石正长岩、辉石正长岩、粗面岩、假白榴石响岩及黑榴石霞石正长岩等,是我国碱性岩出露较为典型的地区。不同类型碱性岩石的锆石 U-Pb 年龄分布于 224~231 Ma(吴福元等, 2005; 杨进辉等, 2009),暗示该岩体可能为华北北缘早中生

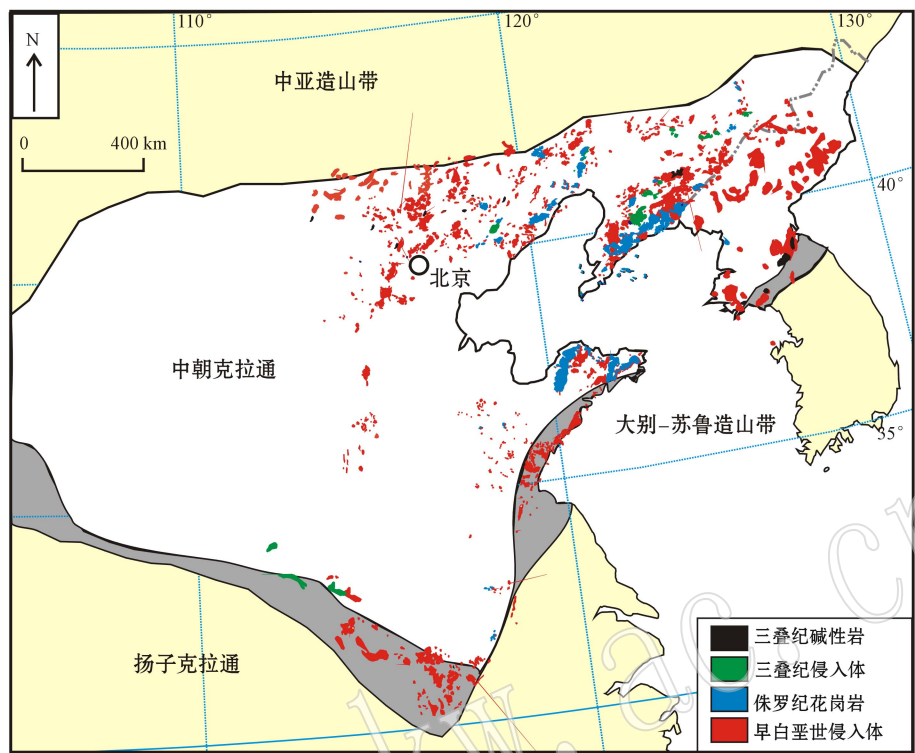


图 1 华北克拉通中生代侵入体分布图

Fig. 1 Distribution of Mesozoic intrusions in the North China Craton

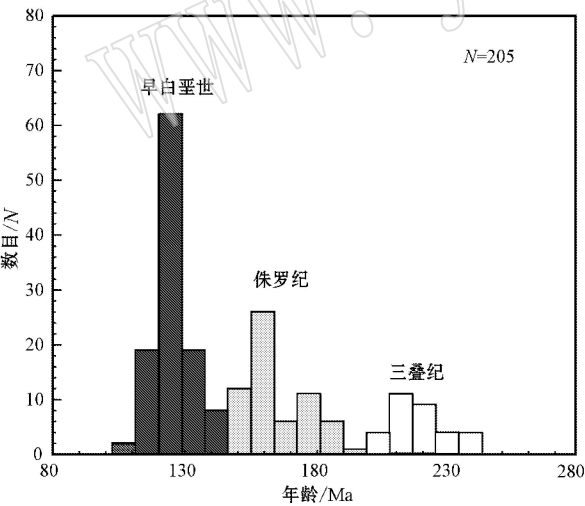


图 2 华北克拉通中生代岩浆岩锆石 U-Pb 年龄统计图

Fig. 2 Zircon U-Pb ages of Mesozoic magmatic rocks in the North China Craton

代碱性岩带的一部分(阎国翰等, 2000; Yang *et al.*, 2012a)。另外一类三叠纪侵入体的岩性主要为花岗岩、正长岩、闪长岩、花岗岩闪长岩等, 且部分岩体中发育基性包体和基性脉体(吴福元等, 2005;

Yang *et al.*, 2007a, 2007b; 杨进辉等, 2009; Yang *et al.*, 2012b), 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、大和尚山辉长岩和吉林南部的龙头石英闪长岩-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-二长花岗岩等(吴福元等, 2005; 杨进辉等, 2009; Yang *et al.*, 2007a, 2007b, 2012b)。详细的锆石 U-Pb 年代学研究表明, 不同岩体、不同岩性的形成时代集中于 210 ~ 221 Ma 之间, 略晚于该区内的赛马-柏林川碱性杂岩体的侵位时代(杨进辉等, 2009)。

在胶东半岛、朝鲜半岛地区, 三叠纪侵入岩仅零星分布(图 1)。在胶东半岛, 目前发现的三叠纪侵入体只有甲子山、槎山岩体及石岛碱性杂岩体(Chen *et al.*, 2003; 郭敬辉等, 2003, 2005; Yang *et al.*, 2005a; Zhao *et al.*, 2012)。甲子山岩体主要岩性为辉石正长岩和石英正长岩, 且两者都遭受了不同程度的变形作用。不同分析方法所获得的年龄略有差异, 但主要集中在 215 Ma 左右, 限定了该岩体的侵位时代。槎山岩体主要为粗粒黑云母钾长花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄测试结果表明它的形成时代约为

205 Ma(Chen *et al.*, 2003; 郭敬辉等, 2005)。石岛碱性杂岩体的锆石 U-Pb 年龄介于 201~212 Ma 之间, 代表了该岩体的形成时代(Zhao *et al.*, 2012)。近年来, 在朝鲜半岛也陆续发现一些三叠纪岩体, 岩性包括二长花岗岩、花岗闪长岩、碱长花岗岩、正长岩等(Ree *et al.*, 2001; Sagong and Kwon, 2005; Wu *et al.*, 2007a; Peng *et al.*, 2008; Williams *et al.*, 2009)。前人统计分析已发表的锆石 U-Pb 年龄及楣石 U-Pb 年龄数据, 结果表明它们的侵位年龄均介于 210~234 Ma 之间(杨进辉等, 2009)。

根据现有的资料, 华北克拉通的其他区域, 如太行山地区、鲁西地区等, 鲜有三叠纪岩体报道, 暗示了这些地区三叠纪期间的岩浆活动极弱。

1.2 侏罗纪花岗岩体

侏罗纪的花岗岩体主要分布于华北克拉通的东北缘, 包括燕辽地区东部(燕山-辽西)、辽东半岛、胶东半岛地区, 而鲁西地区、朝鲜半岛以及克拉通中部仅有少量出露(杨进辉等, 2004, 2007; Wu *et al.*, 2005b, 2007a, 2007b; 吴福元等, 2005, 2006; Yang D B *et al.*, 2010)(图1)。

燕辽地区东部发育大面积中生代侵入体, 是我国中生代地质研究较为详细的地区。该区侏罗纪侵入体的岩石类型主要包括二长花岗岩、石英二长闪长岩、二云母花岗岩、花岗闪长岩等(罗镇宽等, 2001a, 2001b; 吴福元等, 2005), 而未见基性包体报道。辽西碱厂岩体边部石英二长闪长岩、二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄集中于 182~190 Ma, 而岩体核部二长花岗岩、石英闪长岩时代则为 157~165 Ma(吴福元等, 2005, 2006)。杨家杖子岩体不同类型花岗岩的锆石 U-Pb 年龄介于 182~189 Ma; 医巫闾山二云母花岗岩、花岗闪长岩及海棠山岩体花岗岩样品的锆石 U-Pb 年龄则集中于 153~163 Ma(吴福元等, 2006)。这些高精度的年代学数据表明, 该区至少存在 182~190 Ma 和 153~165 Ma 两个不同期次的侏罗纪岩浆侵位活动。在冀东地区, 峪耳崖和牛心山两个与金矿床形成相关的花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果为 172~175 Ma(罗镇宽等, 2001a), 而青山口花岗岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年则获得 199 Ma 的形成年龄(罗镇宽等, 2001b)。值得注意的是, 该区在 140~150 Ma 的晚侏罗世期间, 形成有云蒙山和北岔沟门等一系列岩体, 从而导致侏罗纪与早白垩世岩浆活动的分界不

是很截然(Davis *et al.*, 2001; 吴福元等, 2005)。

辽东半岛是华北克拉通侏罗纪岩体出露较多的地区(图1), 岩石类型极为复杂, 包括花岗闪长岩、石英闪长岩、二云母花岗闪长岩、二云母二长花岗岩及石榴石白云母花岗岩等(Li *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2005b; 杨进辉等, 2004, 2007; 孙德有等, 2005; 吴福元等, 2006)。目前已有报道的侏罗纪岩体在半岛南部有小黑山、于屯、黑沟、九连城岩体、高丽墩台、南韩家岭、北韩家岭岩体(Li *et al.*, 2004; 杨进辉等, 2004; Wu *et al.*, 2005b; 吴福元等, 2006; Yang *et al.*, 2007d); 半岛北部有甬子峪、草山、梨树沟和老秃顶子岩体(孙德有等, 2005)。前人报道辽东半岛南部侏罗纪花岗岩的形成时代介于 180~153 Ma 之间(Li *et al.*, 2004; 杨进辉等, 2004; Wu *et al.*, 2005b; 吴福元等, 2006; Yang *et al.*, 2007d), 而孙德有等(2005)运用锆石 U-Pb 和独居石 CHIME 定年方法获得北部梨树沟岩体、遥林岩体、草山岩体及老秃顶子岩体的形成时代为 175~178 Ma。值得注意的是, 辽东地区以前曾经划分的大量前寒武纪或震旦纪混合岩(陈树良等, 2001), 实际上都是侏罗纪的侵入岩, 例如辽东半岛南部被当作太古宙 TTG 的小黑山岩体(孙景贵等, 1992)后来被证实为侏罗纪侵入体(Wu *et al.*, 2005b; 吴福元等, 2005); 以前曾被确定为古元古宙辽吉花岗岩典型代表的高丽墩台斜长花岗岩, 其锆石年龄为 156 ± 5 Ma(Li *et al.*, 2004)。区内分布有大量的前寒武纪或震旦纪混合岩(陈树良等, 2001), 而研究程度仍较低, 这些岩体的具体时代仍不清楚, 从而导致侏罗纪岩体存在的具体规模还存在不确切性。

胶东半岛也是侏罗纪侵入岩广泛出露的地区, 主要岩性包括花岗闪长岩、二长花岗岩、二云母花岗岩及少量石榴石淡色花岗岩等(Wang *et al.*, 1998; 郭敬辉等, 2003, 2005; Zhang *et al.*, 2003, 2010), 且多与金矿床的形成相关(Zhang *et al.*, 2003)。代表性的岩体昆崙山复式花岗岩体黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄集中于 138~146 Ma, 含石榴石淡色花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 142 ± 3 Ma, 而该地区垛固山花岗闪长岩体和文登二长花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄均集中于 ~160 Ma(郭敬辉等, 2005)。半岛西部的玲珑-栾家河花岗岩体与胶东金矿床的形成密切相关, 如玲珑金矿、仓上金矿等, 详细的锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果表明不同岩体的形成时代介于 150~160 Ma, 与 Rb-Sr 等时线法和

Ar-Ar 法所获得的年龄一致(Wang *et al.* , 1998 ; Zhang *et al.* , 2003)。值得注意的是,该时期不同类型的花岗岩中均含有大量的继承锆石,且 U-Pb 年龄散布于晚太古代、古元古代(1.8~2.2 Ga)、新元古代(773~790 Ma)、早中生代(176~240 Ma)(Wang *et al.* , 1998 ; Zhang *et al.* , 2010 ; Jiang *et al.* , 2012)。

在鲁西地区,目前已报道的侏罗纪花岗岩体仅有铜石岩体(Xu *et al.* , 2004 ; Lan *et al.* , 2012)和蚌埠隆起西部的荆山岩体(许文良等, 2004 ; Xu *et al.* , 2005 ; Yang D B *et al.* , 2010)。铜石杂岩体主要由高钾钙碱系列(细粒石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩)以及钾玄质系列(粗斑、中斑和细斑碱长正长斑岩)组成,锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果表明这些岩石侵位于早侏罗世(180.1~184.7 Ma),并含大量晚太古代-早元古代继承锆石(2 458~2 608 Ma)(Lan *et al.* , 2012)。相比之下,蚌埠荆山黑云母花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为~160 Ma,较铜石杂岩体年轻~20 Ma(许文良等, 2004 ; Xu *et al.* , 2005 ; Yang D B *et al.* , 2010)。

除此之外,朝鲜半岛也发育侏罗纪侵入体,主要岩石类型包括花岗闪长岩、似斑状花岗岩及二云母花岗岩等。详细的锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄结果表明,该区侏罗纪花岗岩的形成年龄介于 173~193 Ma 之间(Wu *et al.* , 2007a, 2007b)。目前已有的年代学资料显示,太行山地区不发育侏罗纪花岗质岩浆活动(吴福元等, 2005)。综上所述,华北东部侏罗纪花岗岩的形成时代,空间上存在由东向西逐渐变新的趋势。

1.3 早白垩世侵入岩体

早白垩世侵入体遍布整个华北克拉通东部及朝鲜半岛地区,且岩石类型和化学成分极为复杂,包括辉长岩、闪长岩、I 型花岗岩、A 型花岗岩和正长岩等(吴福元等, 2005 ; Wu *et al.* , 2005a, 2007a ; Yang *et al.* , 2004, 2005b, 2006, 2007c, 2008b)。从岩体空间分布来看,华北东西部地区的岩石类型存在系统的差别,表现为东部以花岗岩为主,而西部出现较多的镁铁质和碱性岩石(图 1)(吴福元等, 2005)。

辽东半岛地区早白垩世不仅发育大面积的 I 型花岗岩、A 型花岗岩,也出露偏基性的辉长岩、辉绿岩和闪长岩(Yang *et al.* , 2004, 2006, 2007c, 2008a ; 吴福元等, 2005 ; Wu *et al.* , 2005a ; Zhu *et al.* , 2012)。它们常呈大规模的岩体出现,如饮马湾

山岩体、古道岭岩体、德兴街岩体和五龙背岩体等(吴福元等, 2005 ; Wu *et al.* , 2005a ; Yang *et al.* , 2007c)。该区部分岩体曾被划分为三叠纪岩体(如饮马湾山、三股流岩体)或是太古代岩体(如赵屯岩体等)。锆石 SHRIMP 和 LA-ICPMS U-Pb 年龄分析结果表明,这些岩体中不同类型岩石(二长闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩等)的形成时代介于 131~117 Ma,峰期为~125 Ma(Wu *et al.* , 2005a)。辽东半岛北部吉林与辽宁省交界处分布有大量的早白垩世 A 型花岗岩,如四平街碱性角闪石花岗岩、八里甸子-三块石-阎王鼻子-岗山碱长花岗岩或钾长花岗岩等,锆石 SIMS 和 LA-ICPMS U-Pb 年龄介于 121~129 Ma(峰期~125 Ma),而该区同期 I 型花岗岩的形成时代集中于 118~124 Ma(峰期~121 Ma)(作者未发表数据)相比较之下略偏年轻。

胶东半岛早白垩世侵入岩主要岩性为辉石闪长岩、似斑状花岗闪长岩、巨斑状花岗岩及钾长花岗岩等(Wang *et al.* , 1998 ; Zhang *et al.* , 2003 ; 郭敬辉等, 2005 ; Yang *et al.* , 2005b ; Lan *et al.* , 2011b)。从目前的资料来看,胶东半岛西部与辽东半岛早白垩世花岗岩浆作用的年代学格架完全可以对比(吴福元等, 2005),而东部则与朝鲜半岛早白垩世花岗岩相似。典型岩体郭家岭岩体似斑状花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄集中于 126~128 Ma,且发育侏罗纪、三叠纪、元古代和太古代的继承锆石(Wang *et al.* , 1998)。半岛南部石臼所岩体(日照岩体)石场-坊子杂岩体二长花岗岩及基性包体、二长闪长岩及二长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄集中于 122~127 Ma,与³⁹Ar-⁴⁰Ar 法获得的年龄一致,代表了它们的侵位时代(Yang *et al.* , 2005b)。该地区大店碱性杂岩体石英二长岩、角闪正长岩、正长岩、石英正长岩、正长斑岩和正长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 123~125 Ma。相比之下,半岛东部的六度寺辉石闪长岩、泰薄顶钾长巨斑状花岗岩、三佛山钾长斑状花岗岩及伟德山花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄介于 108~114 Ma,与前者相比略年轻(郭敬辉等, 2005)。综上所述,胶东半岛早白垩世不同类型侵入体的时代为 108~128 Ma。

燕辽(燕山-辽西)地区早白垩世侵入岩的岩性主要为石英闪长岩、花岗闪长岩、黑云母花岗岩及碱性正长岩等,并伴生大量火山岩,如安山岩、流纹岩等(Davis *et al.* , 2001 ; Yang *et al.* , 2008b ; Sun *et al.* , 2010)。锆石 U-Pb 法、Ar-Ar 法等不同定年方

法获得它们的形成时代介于 110~140 Ma (Davis *et al.*, 2001)。典型的碱性侵入杂岩体后石湖山(碱性角闪石花岗岩、正长岩等)、千层背-雾灵山(正长岩、角闪石花岗岩)、响山(碱性长石花岗岩、碱性角闪石花岗岩)锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄介于 117~130 Ma 之间 (Yang *et al.*, 2008b)。详细的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄研究表明,辽宁阜新排山楼金矿区闪长玢岩、花岗斑岩脉及黑云母花岗岩的形成年龄也集中于 124~126 Ma (罗镇宽等, 2001c)。与侵入岩相对应,辽西义县组火山岩,如玄武岩、安山岩及火山角砾岩全岩、单矿物³⁹Ar-⁴⁰Ar 年龄集中于 121~128 Ma (王松山等, 2001a),而该区四合屯含脊椎动物化石层位的凝灰岩锆石 U-Pb 年龄为 125 Ma (王松山等, 2001b)。前文已提及,该区一系列岩体的形成年龄介于 138~145 Ma 之间,如云蒙山岩体等,暗示了该区早白垩世岩浆活动与华北其他地区相比较早。综上所述,燕辽地区早白垩世岩浆活动的时间范围较宽,从西向东有变年轻的趋势,但年龄高峰期集中在 120~130 Ma (Wu *et al.*, 2005a)。

鲁西和太行山地区发育的早白垩世侵入体规模相对较小,且岩石类型各异,既有镁铁质辉长岩、辉绿岩、闪长岩,也有规模不等的花岗岩、正长岩等 (许文良等, 1993; 彭头平等, 2004; 陈斌等, 2005; Lan *et al.*, 2011a)。到目前为止,该区积累的高精度年代学数据相对较少。南太行山地区符山角闪闪长岩和东冶角闪闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 ~126 Ma (彭头平等, 2004),而该区王安镇岩体辉长闪长岩、石英二长岩、大河南岩体二长岩等岩石锆石 U-Pb 年龄集中于 127~138 Ma (陈斌等, 2005)。鲁西地区典型岩体龙宝山碱性杂岩体石英正长斑岩、角闪正长斑岩、霓辉正长斑岩、二长斑岩和正长闪长玢岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果表明,不同类型岩石形成于 129~131 Ma (Lan *et al.*, 2011a)。综上所述,太行山及鲁西地区早白垩世岩体的侵位时代为 126~138 Ma,略早于胶东半岛、辽东半岛同时期的岩浆活动。

综上所述,早白垩世岩浆活动遍布整个华北克拉通东部,形成时代集中于 108~140 Ma 之间。根据目前已有的年代学研究,132~120 Ma (峰期~125 Ma)为该区岩浆活动的重要时期 (Wu *et al.*, 2005a),且呈现从东部到西部岩体时代逐渐变老的趋势。值得注意的是,华北东部分布大面积的 A 型花岗岩,其形成时代分别为胶东半岛 121~129 Ma、

燕辽地区 113~130 Ma、胶东-苏北地区 110~122 Ma (孙金凤等, 2009),与辽南变质核杂岩(120~110 Ma) (Yang *et al.*, 2007d)、伸展盆地 (Meng, 2003) 及大规模金矿床的形成 (Wang *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2003) 同期,均代表了该时期华北克拉通东部伸展的构造背景。

2 华北中生代花岗岩类岩石的岩浆源区与岩石成因

2.1 三叠纪侵入岩源区及成因

华北克拉通东部三叠纪侵入岩的岩石类型复杂,主要包括以华北北缘碱性岩带为代表的正长岩-碱长花岗岩等碱性系列岩石 (Peng *et al.*, 2008; 任荣等, 2009; Yang *et al.*, 2012a) 和辽东半岛的辉长岩-闪长岩-花岗岩等钙碱性系列岩石 (Yang *et al.*, 2007a, 2007b, 2012b)。笔者曾对比不同类型岩石的元素地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素组成特征,提出它们具有不同的岩浆源区和成岩过程 (图 3) (杨进辉等, 2009)。

碱性岩: 华北北缘近东西向晚三叠世碱性岩带的岩性包括霞石正长岩、石英正长岩及 A 型花岗岩等。不同类型的岩石均具有较高的 MgO 含量 (~5.3%),富集 LREE、LILE 而亏损 HREE、HFSE,具有 Nb、Ta、Ti 负异常。结合其较低的初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr、高全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 同位素组成特征,揭示了该区碱性岩来源于富角闪石、单斜辉石的岩石圈地幔低比例部分熔融形成的岩浆的结晶分异,并伴有地壳物质的混染 (Yang *et al.*, 2012a)。

华北克拉通其他地区三叠纪正长岩的源区目前还存在争议,但它们具有与来源于富集岩石圈地幔的晚三叠世辉绿岩相似的元素地球化学特征和 Sr-Nd-Hf 同位素组成,且无论 SiO₂ 是否饱和,其同位素组成一致 (Yang *et al.*, 2005a; 杨进辉等, 2009)。此外,部分中性和基性碱性岩具有较高的 MgO 含量,从而排除了其来源于地壳的可能性 (Yang *et al.*, 2005a)。鉴于此,本文认为分布在胶东半岛、辽东半岛以及朝鲜半岛的正长岩来源于古老、富集的岩石圈地幔,是岩石圈地幔在石榴石相深度下小程度部分熔融形成的岩浆,经过结晶分异、围岩混染作用形成 (Yang *et al.*, 2005a, 2012a; 杨进辉等, 2009)。

花岗岩: 华北克拉通三叠纪花岗岩主要为花岗闪长岩、二长花岗岩,并发育暗色微粒包体 (MME)。

不同类型的花岗岩,具有较高的 SiO_2 含量和较低的 MgO 含量,暗示了它们主要来源于地壳源区(吴福元等, 2005; 杨进辉等, 2009; Yang *et al.*, 2007a, 2007b, 2012b)。然而,不同的地球化学特征和同位素组成表明它们来源于不同的岩浆源区(图3): 蚂蚁河花岗闪长岩和二长花岗岩具有正的全岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 、 $\epsilon\text{Hf}(t)$ (可达 +3.0)和锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 同位素组成,揭示了它们来源于新生地壳;而龙头、岔信子等岩体的花岗岩具有极负的全岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 、 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 和锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 同位素组成,且比值范围远大于分析误差,表明它们来源于古老下地壳物质的部分熔融,并且伴随有幔源组分的加入(Yang *et al.*, 2012b)。

在辽宁东部和吉林南部三叠纪花岗岩体中发育细粒闪长质包体(Yang *et al.*, 2007b, 2012b)。详细野外观察发现,包体与寄主花岗岩具有不规则接触边界,且接触带附近可见针柱状角闪石;包体中发育巨大的、来源于寄主岩的钾长石斑晶,这些现象表明花岗岩及包体是长英质岩浆和镁铁质岩浆混合而成(Yang *et al.*, 2007b)。寄主花岗岩具有富 SiO_2 、低 MgO 和 Fe_2O_3^T , 较高初始 Sr 同位素和富集 Nd 同位素 [$\epsilon\text{Nd}(t) < -10$] 的地球化学特征,表明它们主要来源于下地壳物质的部分熔融作用(Yang *et al.*, 2007b; Williams *et al.*, 2009), 而变化范围较大的全岩 Sr、Nd 同位素及锆石 Hf 同位素特征则表明有地幔物质参与了花岗岩成岩作用。相比之下,闪长质包体具有较高的 MgO 含量(高达 7.7%), 表明其母岩浆来源于地幔源区;相对亏损的 Hf 同位素组成 [$\epsilon\text{Hf}(t) > 2.8$], 不同于富集岩石圈地幔来源的大连辉长岩 [$\epsilon\text{Nd}(t) = -11$], 揭示了包体可能来源于亏损的软流圈地幔或者新生的岩石圈地幔(Yang *et al.*, 2007b; 杨进辉等, 2009)。这一结论被同时期分布在吉林南部的蚂蚁河辉长闪长岩的同位素组成 [$\epsilon\text{Nd}(t) = +3.8$] 所证实(Yang *et al.*, 2012b)。

除此之外,华北东部还出露三叠纪镁铁质岩脉或岩株,岩性主要为辉绿岩、辉长闪长岩、闪长岩等(Yang *et al.*, 2007a)。详细的地球化学研究表明,它们具有不同的岩浆源区:高钾钙碱性系列岩石来源于高压下(石榴石相)古老、富集岩石圈地幔的部分熔融(Yang *et al.*, 2012b);拉斑质岩石系列可能来源于低压下(尖晶石相)亏损的软流圈地幔或者新生的岩石圈地幔的部分熔融,且遭受到地壳物质的混染(Yang *et al.*, 2007b, 2012b)。

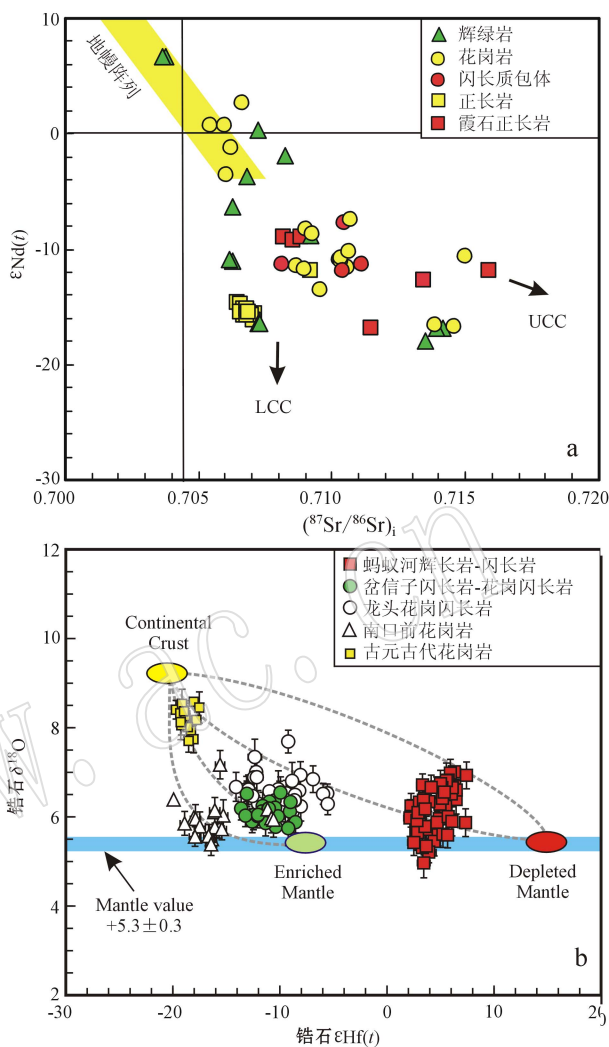


图3 三叠纪侵入岩全岩 Sr-Nd 同位素(a)和锆石 Hf-O 同位素组成(b)

Fig. 3 Whole rock $\epsilon\text{Nd}(t)$ versus $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram (a) and zircon $\delta^{18}\text{O}$ versus $\epsilon\text{Hf}(t)$ diagram (b) for the Late Triassic intrusive rocks from Liaodong Peninsula, North China Craton

数据和图引自杨进辉等(2009)和 Yang *et al.* (2012b)
Data and figures after Yang *et al.* (2009) and Yang *et al.* (2012b)

综上所述,华北东部三叠纪侵入岩分别来源于亏损地幔、富集岩石圈地幔、古老下地壳和新生下地壳。这一源区特征具体表现在辽东和朝鲜地区研究中,它们的岩石圈化学结构复杂,岩石圈地幔的性质表现为浅部为亏损、饱满、年轻地幔,而深部为古老、富集、难熔地幔(Yang *et al.*, 2010);下地壳则表现为古老、新生下地壳共存。

2.2 侏罗纪侵入岩源区及成因

华北侏罗纪中酸性侵入岩主要为花岗闪长岩、

石英闪长岩、二云母花岗闪长岩、二云母二长花岗岩及石榴石白云母花岗岩等,它们大多属于 I 型和高分异 I 型花岗岩(Li *et al.*, 2004; 杨进辉等, 2004, 2007; Wu *et al.*, 2005b; 吴福元等, 2005, 2006; 孙德等有, 2005)。华北不同类型的侏罗纪花岗岩具有较高 Al_2O_3 、Sr、Ba 含量,低 Y、Yb 含量,富集 LREE 和亏损 HREE 的地球化学特征, Sr/Y-Y 图解上投点在埃达克岩区域,表明它们来源于加厚下地壳(石榴石相)物质的部分熔融(杨进辉等, 2004, 2007; Gao *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2005b; Yang D B *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2012)。少量侏罗纪花岗岩体中发育大量石榴石,如遥林岩体等,暗示了岩浆分异特征(孙德等有, 2005)。根据现有的地球化学特征和 Sr-Nd-Hf 同位素组成,华北侏罗纪花岗岩(二长花岗岩、黑云母花岗岩等)主要来源于古老下地壳物质的部分熔融作用(杨进辉等, 2004, 2007; Gao *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2005b; Yang D B *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2012)。然而, Wu 等(2005b)根据辽东地区花岗闪长岩较高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和较低初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素组成特征,提出其岩浆源区可能为新生的下地壳物质。笔者曾对辽东半岛小黑山岩体进行详细的岩石地球化学、Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素组成研究,结果揭示了除古老下地壳物质部分熔融作用外,幔源岩浆为花岗岩的形成提供了物质和热量来源(杨进辉等, 2007)。鲁西地区铜石杂岩体石英二长闪长岩及正长斑岩的地球化学特征,表明岩石圈地幔,甚至软流圈地幔来源岩浆直接参与了侏罗纪花岗岩的成岩过程(Lan *et al.*, 2012)。值得注意的是,华北侏罗纪花岗岩体的一个显著特征是普遍含有太古宙、古元古宙年龄的继承或者捕获锆石(Li *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2005b; 吴福元等, 2005),是古老下地壳物质参与成岩过程的直接证据,也反映了形成的岩浆温度偏低($\sim 750^\circ\text{C}$) (Wu *et al.*, 2005b)。胶东半岛、鲁西地区的侏罗纪花岗岩中普遍含有 700~800 Ma、850 Ma 年龄的继承锆石,与扬子陆块北缘的地壳时代一致,揭示它们可能来源于扬子陆块的部分熔融(郭敬辉等, 2003, 2005; 许文良等, 2004; Yang D B, *et al.*, 2010)。华北克拉通侏罗纪基性岩浆活动极少发育,根据目前的年代学资料,仅北京西部的南大岭碱性玄武岩体形成于这一时期。详细的地球化学研究表明,这些基性岩石主要形成于古老的、富集的岩石圈地幔物质部分熔融(Li *et al.*, 2004),揭示了华北东部侏

罗纪岩石圈地幔的性质。

综上所述,华北东部侏罗纪侵入岩主要来源于古老下地壳及少量新生下地壳的部分熔融,少量的亏损地幔、富集地幔组分也参与了成岩过程。

2.3 早白垩世侵入岩源区及成因

华北东部早白垩世侵入体岩石类型复杂,主要包括花岗闪长岩、二长花岗岩、黑云母钾长花岗岩及花岗斑岩等 I 型花岗岩体,以辽东古道岭岩体(Yang *et al.*, 2004, 2007c)、灌水岩体(Yang *et al.*, 2008a)及燕山地区房山岩体(Sun *et al.*, 2010)为代表;正长岩、霓辉正长斑岩、碱性角闪石花岗岩、碱长花岗岩等 A 型花岗岩体及伴生的碱性岩体(Yang *et al.*, 2008b; 孙金凤等, 2009; Lan *et al.*, 2011a, 2011b),以燕山地区碱性正长岩-花岗岩-流纹岩系列(Yang *et al.*, 2008b)及辽北-吉南大面积 A 型花岗岩、碱性岩(孙金凤等, 2009)为代表。根据前人已有的地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素研究,该时期不同类型的岩石可能来源于不同的岩浆源区(图 4)。

基性脉体/包体:华北东部早白垩世镁铁质岩石多以岩脉状或花岗质岩石中的包体形式产出,岩性主要为辉绿岩、辉长闪长岩及闪长岩等(Yang *et al.*, 2004, 2006, 2007c; Wu *et al.*, 2005a; Sun *et al.*, 2010)。根据目前已发表的数据,它们均表现为贫 SiO_2 、富 MgO 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 的地球化学特征,表明其岩浆源区为地幔物质。详细的全岩 Sr-Nd-Hf 同位素研究结果,揭示不同镁铁质岩石可能来源于不同的岩浆源区。辽东地区古道岭岩体中基性闪长质包体具有初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值(0.705 8~0.707 3)和负 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(~ -7.2),而锆石 Hf 同位素组成(ϵ_{Hf} 高达 +4.5)呈现亏损特征,表明它们来源于亏损地幔物质的部分熔融(Yang *et al.*, 2004, 2006, 2007c)。相比之下,苏鲁地区基性脉体具有高 MgO ($\text{Mg}^{\#} = \sim 75$) Ca ($\sim 1.233 \times 10^{-6}$) 含量,低 TiO_2 和 Fe_2O_3 含量,富集 LILEs、LREEs、亏损 HFSE 的地球化学特征,结合初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.707 6~0.707 8)和负 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-17.6 \sim -18.2$) 同位素组成特征,反映其岩浆源区为含角闪石的难熔富集岩石圈地幔;详细地球化学研究表明,辽东千山岩体(Yang *et al.*, 2006)、燕山地区房山岩体(Sun *et al.*, 2010)中发育的基性包体均具有富集的全岩 Sr、Nd 和锆石 Hf 同位素组成,也揭示了富集岩石圈地幔的岩浆源区特征。

I 型花岗岩:华北克拉通早白垩世 I 型花岗岩的

岩性主要包括石英闪长岩、似斑状花岗闪长岩、似斑状花岗岩、二长花岗岩及钾长花岗岩等,且发育大量的基性包体(Yang *et al.*, 2004, 2005b, 2006, 2007c; Sun *et al.*, 2010)。它们不同的元素地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素组成特征,揭示了它们岩浆源区的多样性(Yang *et al.*, 2004, 2005b, 2006, 2007c; Sun *et al.*, 2010)。燕山地区房山岩体花岗闪长岩富 SiO₂、贫 MgO, 且具有变化的磷灰石初始 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值(0.705 2~0.705 8)、榴石 ε_{Nd}(*t*)值(-19.7~-14.0)及锆石 ε_{Hf}(*t*)值(-25.1~-18.2),表明它们来源于古老下地壳物质的部分熔融,并伴有地幔物质

的加入及围岩物质的混染(Sun *et al.*, 2010);胶东地区二长花岗岩的地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素组成特征,也表明其岩浆来源为晚太古代-古元古代下地壳物质的部分熔融及少量幔源物质的加入(Yang *et al.*, 2005b)。辽东半岛早白垩世灌水岩体花岗闪长岩、二长花岗岩及长英质脉体具有亏损的全岩 Nd、Hf 同位素组成,且长英质脉体锆石 ε_{Hf}值高达 +6.2~+15.0,揭示了其浆源区为亏损地幔近期部分熔融形成的新生地壳物质(Yang *et al.*, 2008a),而长英质脉体中大量的继承锆石(太古代、三叠纪、侏罗纪)反映了围岩物质的混染作用。

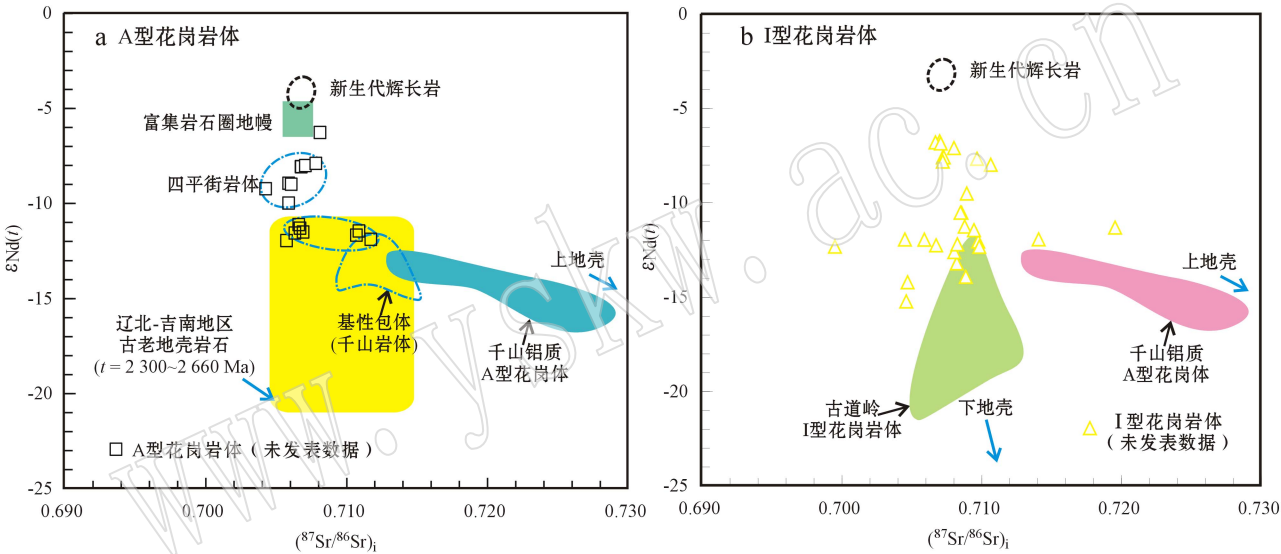


图 4 辽东半岛北部早白垩世侵入岩全岩 Sr-Nd 同位素组成相关图

Fig. 4 Whole rock Sr and Nd isotopic compositions of Early Cretaceous intrusive rocks from Liaodong peninsula
新生代辉长岩数据引自吴福元(未发表); 富集岩石圈地幔数据引自周新华等(2001); 辽北-吉南地区古老地壳岩石数据引自 Wu *et al.* (2005c); 千山铝质 A 型花岗岩及其包体数据引自 Yang *et al.* (2006)
Data for Cenozoic gabbros after Wu Fuyuan (unpublished data); data for enriched lithospheric mantle after Zhou Xinhua *et al.* (2001); data for ancient crustal rocks of the Liaodong Peninsula after Wu *et al.* (2005c); data for Qianshan A-type granite and mafic enclaves after Yang *et al.* (2006)

除此之外,华北早白垩世 I 型花岗岩中发育大量基性包体,野外地质现象暗示了不同来源岩浆的混合作用(Yang *et al.*, 2004, 2007c; Sun *et al.*, 2010)。前文已提及,基性包体的地球化学特征表明其来源可能为亏损地幔,或富集岩石圈地幔。无论是哪一类型的幔源岩浆,都标志着地幔物质不仅为长英质岩浆的形成提供了热,而且参与了 I 型花岗岩的成岩过程。

A 型花岗岩及伴生碱性岩: 华北东部地区广泛发育的早白垩世 A 型花岗岩,如四平街碱性角闪石花岗岩、阎王鼻子碱长花岗岩等(吴福元等, 2005;

孙金凤等, 2009),并且伴生有大量碱性岩,如正长岩、霓辉正长岩等(Yang *et al.*, 2008b; Lan *et al.*, 2011a, 2011b)。根据已有的地球化学特征和同位素组成研究,这些 A 型花岗岩、碱性岩来源于不同的岩浆源区。辽东千山岩体角闪石钾长花岗岩富 SiO₂、FeO/MgO、K₂O + Na₂O、Rb、Zr 和 LREE,但贫 Ba、Sr、Eu,具有较高的初始 Sr 同位素组成(0.721 5~0.728 3)(⁸⁷Rb/⁸⁶Sr=16.8~24.2)、富集的 Nd 同位素组成[ε_{Nd}(*t*)=-14.1~-16.5]和锆石 Hf 同位素组成[ε_{Hf}(*t*)=-18.9~-11.5],这些特征明显不同于下地壳来源的早白垩世 I 型花岗岩(Yang *et al.*,

2004, 2007c), 高的放射性成因 Sr 同位素和低的放射性成因 Nd 同位素及其它地球化学特征表明它们来源于浅部地壳物质在低压下 ($P \leq 4$ kbar) 部分熔融作用, 但经历了结晶分异。此外, 野外地质现象及岩体中基性包体的地球化学特征研究, 表明 A 型花岗岩形成也经历了与幔源岩浆的混合作用 (Yang *et al.*, 2006; 孙金凤等, 2009)。

根据目前已报道的研究成果, 关于碱性岩的源区还存在一定的争议 (Yang *et al.*, 2008b; Lan *et al.*, 2011a, 2011b)。Lan 等 (2011a) 对鲁西龙宝山碱性杂岩体正长岩、霓辉正长斑岩的研究表明, 该杂岩体富集 LREEs 和大离子亲石元素 LILEs, 亏损 HFSE, 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7077 \sim 0.7094$, $\epsilon\text{Nd}(t) = -15.8 \sim -11.8$, $\epsilon\text{Hf}(t) = -19.2 \sim -12.8$ 均与鲁西 EM2 型岩石相似, 表明其主要来自 EM2 型富集地幔的部分熔融, 而晚太古代继承锆石的存在则揭示古老基底岩石同样也参与了岩体的形成, 该作者还对胶东半岛大店碱性杂岩体角闪正长岩、正长岩元素地球化学及同位素组成进行了研究, 也指出其岩浆来源为华北克拉通富集岩石圈地幔, 并混合了部分壳源岩石部分熔融所形成的岩浆 (斜长石作为残留相) (Lan *et al.*, 2011b)。Yang 等 (2008b) 对燕山地区早白垩世 A 型花岗岩及伴生碱性岩的锆石 U-Pb 年代学、全岩地球化学和 Sr-Nd 同位素、锆石 Hf 同位素综合研究表明, 燕山地区后石湖山火山-侵入杂岩体、响山岩体、千层背岩体、雾灵山侵入杂岩体的岩浆源区具有多元性, 是来源于富集岩石圈地幔、下地壳和上地壳的岩浆混合、分离结晶作用的结果。

综上所述, 华北克拉通早白垩世分布广泛、类型复杂的侵入体来源于多个岩浆源区, 主要包括亏损地幔、富集岩石圈地幔、古老下地壳、新生下地壳以及上地壳。在早白垩世期间, 华北东部岩石圈化学结构复杂, 岩石圈地幔的性质表现为富集与亏损地幔共存, 而下地壳则为古老、新生下地壳共存特征。

3 华北中生代岩浆活动与克拉通破坏

华北克拉通中生代发生如此大规模岩浆作用的诱因一直是国内外地学界关注的热点问题之一, 尤其是它与克拉通破坏之间的内在关联, 这也是探索克拉通破坏详细过程和地球动力学机制的关键。在前文总结华北中生代岩浆作用时空格架、岩浆源区

和岩石成因基础上, 本文结合区域地质特征, 对于这一问题进行初步探索。

3.1 三叠纪华北克拉通部分破坏

华北东部三叠纪侵入岩主要分布在胶东、辽东和朝鲜地区, 其形成的地球动力学背景和区域地质意义, 目前仍存在着争议。尽管有不少学者讨论华北东部三叠纪岩浆活动与太平洋板块演化的关系 (崔盛芹等, 1983; 李之彤等, 1985), 但近年来的研究已经证明, 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。此外, 笔者近年来的研究表明, 太平洋板块的俯冲作用对中国东北、华北地区的影响可能起始于早、中侏罗世 (Wu *et al.*, 2007a, 2007b)。另外, 在华北北缘, 与中亚造山带相关的岩浆活动主要集中在早中生代或之前。在三叠纪时期, 华北北缘的侵入岩主要为陆内的霞石正长岩, 而在华北北缘分布的与本文中花岗岩-闪长岩-辉长岩-正长岩相组合相类似的岩石年龄多 > 250 Ma。辽东半岛的赛马-柏林川岩体与同一地区三叠纪岩体相比, 侵位时代相对偏老、岩性也明显不同, 因而推断其有可能是华北北缘早中生代碱性岩带的一部分, 属于板内非造山作用的产物。除该岩体外, 其它岩体的不同类型岩石则是另一构造事件的产物。详细的同位素年代学研究表明, 华北东部三叠纪侵入体侵位时代 (224~205 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), 为华北与扬子的碰撞后的岩浆作用。

华北东部三叠纪花岗岩时空分布和岩石成因的研究表明, 形成晚三叠世侵入岩的岩浆来源复杂, 具有多元性, 与大陆深俯冲、陆陆碰撞作用有关。陆陆碰撞造山必然会导致大别-苏鲁超高压造山带及相邻地区地壳的加厚, 加厚的陆壳底部岩石在超高压条件下形成高密度的榴辉岩, 许文良等 (2006) 在徐淮地区中生代闪长岩发现的三叠纪榴辉岩包体为这一推论提供了可靠的证据。加厚的下地壳榴辉岩由于重力不稳定致使下部岩石圈的拆沉, 软流圈物质的上涌、冷却形成新生岩石圈地幔, 这被朝鲜三叠纪金伯利岩中地幔包体所证实 (Yang *et al.*, 2010)。软流圈的上涌、减压部分熔融形成来源于亏损地幔的镁铁质岩浆, 拆沉的岩石圈地幔和榴辉岩相地壳物质在高压下 (软流圈深度) 发生小程度部分熔融形成镁铁质岩浆和碱性岩浆, 这些深源岩浆的底侵, 为下地壳物质部分熔融提供了热源和能量, 形成长英质岩浆, 从而形成华北东部三叠纪岩性复杂的侵入

体。

如果上述解释合理的话,在三叠纪期间,苏鲁及相邻的胶东半岛、辽东半岛以及朝鲜半岛等地区岩石圈地幔的性质和厚度发生了明显的改变,这种改变引起了华北东部三叠纪强烈的岩浆-构造作用,从而导致该区失去了稳定性,克拉通发生了部分破坏,即大陆深俯冲和扬子-华北之间的陆陆碰撞造山作用所引起的地壳加厚作用可能是后期(三叠纪-早白垩世)克拉通破坏的诱因。然而,与华北东部强烈的晚中生代岩浆作用相比,三叠纪岩浆活动明显具有区域性,主要分布在与大别-苏鲁相邻的胶东、辽东和朝鲜半岛,因此,华北克拉通在三叠纪期间遭受的破坏与晚中生代相比明显偏弱。

3.2 侏罗纪期间华北克拉通的改造

侏罗纪花岗岩主要分布于华北克拉通的东北部,胶东、辽东和辽西等地区。目前,在克拉通内部的燕辽造山带西部、太行山等地区没有发现侏罗纪岩浆作用的文献报导。华北侏罗纪侵入岩以中酸性岩石为主,主要来源于古老下地壳物质源区(Wu *et al.*, 2005b; Yang D B *et al.*, 2010)。同期的基性岩仅有北京西部南大岭组碱性玄武岩和辽东煌斑岩出露,地球化学特征表明它们来源于古老岩石圈地幔的源区。

有关侏罗纪岩浆活动的动力学背景一直存在很大争议,Wu等(2005b)认为辽东半岛和燕辽造山带东部侏罗纪花岗岩来源于加厚下地壳物质的部分熔融,与古太平洋俯冲作用有关,这一论述得到了Gao等(2004)和Yang D B *et al.*(2010)的支持。然而,值得注意的是侏罗纪花岗岩的分布规律及其岩浆形成温度。华北东部侏罗纪花岗岩与东北张广才岭等地区连成一个呈NE向展布的花岗岩带,平行于欧亚大陆边缘的古太平洋俯冲带,侏罗纪花岗岩锆饱和温度为750℃左右,明显低于早白垩世花岗岩,为低温花岗岩,说明在岩浆形成过程中,源区具有富水的特征,而水的来源可能与俯冲作用相关。因此,初步认为华北克拉通东部侏罗纪花岗岩与古太平洋板块俯冲作用相关。

侏罗纪期间,古太平洋板块的俯冲作用改造了华北东部岩石圈的厚度和性质,引起了东部侏罗纪花岗岩的形成。同时,岩相古地理的资料研究表明,华北克拉通东部侏罗纪地层明显缺失,标志着该区在侏罗纪期间处于隆升的构造背景(Zhu *et al.*, 2012)。这些现象表明华北克拉通在侏罗纪期间岩

石圈发生了改造作用,但仅局限于华北东部、辽西以东北地区,即古太平洋板块俯冲初期,克拉通大部分地区未发生明显破坏。

3.3 早白垩世克拉通强烈破坏

早白垩世侵入岩广泛分布于克拉通东部,岩石类型复杂,包括辉长岩、闪长岩、I型花岗岩、A型花岗岩和碱性岩,并且华北广泛发育与此同期的火山岩和大规模金成矿作用(Wang *et al.*, 1998; Yang *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2003)。系统的地球化学和同位素(尤其是锆石原位微区Hf同位素)研究表明,华北早白垩世岩浆岩源区具有多元性,包括亏损地幔、富集地幔、古老下地壳、新生地壳和浅部地壳,是壳幔强烈相互作用的产物(Yang *et al.*, 2004, 2005b, 2006, 2007c, 2008a)。值得注意的是亏损地幔源区的识别,标志着华北岩石圈地幔性质的改变,原先巨厚、古老、难熔的岩石圈地幔被新生的、饱满的岩石圈地幔所代替,这也被中生代玄武岩中地幔包体的研究所证实(Yang *et al.*, 2010及其参考文献)。而来源于亏损地幔的基性岩浆侵位于地壳则标志着大陆地壳的生长(Yang *et al.*, 2008a)。与早白垩世大规模岩浆作用和巨量金成矿作用同期,华北东部广泛发育大量变质核杂岩(Yang *et al.*, 2007d)和伸展盆地(Meng, 2003)。变质核杂岩通常标志着中下地壳物质被抬升至地壳浅部,这也意味着早白垩世期间华北东部发生了SE-NW向的强烈伸展作用。早白垩世强烈的岩浆、构造、成矿热事件和大陆地壳生长等现象标志着华北克拉通在早白垩世期间已经失去了它的稳定性,发生了强烈的去克拉通化作用(Yang *et al.*, 2008a; Zhu *et al.*, 2012)。

有关华北克拉通破坏的地球动力学机制一直悬而未决,虽然多数学者都认为克拉通破坏与古太平洋板块俯冲有关,但具体的观点和模型很多,包括拆沉、热-化学侵蚀、熔体和橄榄岩相互作用等等。至目前为止,任何一种模型都难以全面解释观察的所有现象,因此,华北陆块作为克拉通破坏的典型实例(Carlson *et al.*, 2005),需要加强全球对比研究,在详细查明世界典型克拉通演化规律的基础上,重新审视华北克拉通中生代各种地质现象,探索克拉通破坏的内在动力学机制。

致谢 朱光教授和赵子福教授评阅了论文,并提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢。

References

- Carlson R W , Pearson D G and James D E. 2005. Physical , chemical , and chronological characteristics of continental mantle[J]. *Reviews of Geophysics* 43 : 2004RG00156).
- Chen Bin , Jahn B M , Arakawa Y , *et al.* 2004. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang orogen , north China craton : elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 148 : 489~501.
- Chen Bin , Tian Wei , Jahn B M , *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb ages and in-situ Hf isotopic analysis for the Mesozoic intrusions in South Taihang , North China craton : evidence for hybridization between mantle-derived magmas and crustal components[J]. *Lithos* , 102 : 118~137.
- Chen Bin , Tian Wei , Zhai Mingguo , *et al.* 2005. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mesozoic magmatism in the Taihang Mountains and other places of the North China Craton , with implications for petrogenesis and geodynamic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 21 : 13~24 (in Chinese with English abstract).
- Chen Guoda. 1956. Examples of " activated region " in the Chinese Plate-form with special reference to the " Cathaysia " problem[J]. *Acta Geologica Sinica* , 36(3) : 239~274 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jiangfeng , Xie Zhi , Li Huimin , *et al.* 2003. U-Pb ages for a collision-related K-rich complex at Shidao in the Sulu ultrahigh pressure terrane , China[J]. *Geochemical Journal* , 37 : 35~46.
- Chen Ling. 2010. Concordant structural variations from the surface to the base of the upper mantle in the North China Craton and its tectonic implication[J]. *Lithos* , 120 : 96~115.
- Chen Shuliang , Huan Yanqing and Bing Zhibo. 2001. Characteristics of Paleoproterozoic intrusive rocks and continental dynamic evolution pattern of tectonomagma in East Liaoning[J]. *Liaoning Geology* , 18 : 43~51 (in Chinese with English abstract).
- Cui Shengqing and Li Jinrong. 1983. On the circum-Pacific Indosinian Movement in China[J]. *Acta Geologica Sinica* , 57 : 51~64 (in Chinese with English abstract).
- Davis G A , Zheng Y D , Wang C , *et al.* 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan Fold and Thrust Belt , with emphasis on Hebei and Liaoning Provinces , northern China[A]. *Hendrix M S and Davis G A. Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia : From Continental Assembly to Intracontinental Deformation* [C]. *Geological Society of American , Memoir* , 194 : 171~198.
- Gao Shan , Rudnick R L , Carlson R W , *et al.* 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 198 : 307~322.
- Gao Shan , Rudnick R L , Yuan Honglin , *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton[J]. *Nature* , 432 : 892~897.
- Griffin W L , Zhang Andi , O'Reilly S Y , *et al.* 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton[A]. *Flower M F J , Chung S L , Lo C H , et al. Mantle Dynamics and Plate Interaction in East Asia Geodynamics Series* [C]. 27 : 107~126.
- Guo Jinghui , Chen Fukun , Siebel W , *et al.* 2003. Evolution of the syn- and post-collisional granites in the Sulu UHP belt[A]. *Zheng Y F. Abstracts of Symposium on Geodynamics of Plate Subduction and Exhumation* [C]. Hefei : 43~46 (in Chinese).
- Guo Jinghui , Chen Fukun , Zhang Xiaoman , *et al.* 2005. Evolution of syn- to post-collisional magmatism from north Sulu UHP belt , eastern China : zircon U-Pb geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 21(4) : 1281~1301 (in Chinese with English abstract).
- Han Baofu , Kagami H and Li Huimin. 2004. Age and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Guangtoushan alkaline granite , Hebei Province , China : implications for early Mesozoic crust mantle interaction in North China Block[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 20 : 1375~1388 (in Chinese with English abstract).
- Hirth G , Evans R L and Chave A D. 2000. Comparison of continental and oceanic mantle electrical conductivity : Is the Archean lithosphere dry ? [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems* , 1 : doi : 10.1029/2000GC000048.
- Jiang Neng , Chen Jingzhi , Guo Jinghui , *et al.* 2012. In situ zircon U-Pb , oxygen and hafnium isotopic compositions of Jurassic granites from the North China craton : Evidence for Triassic subduction of continental crust and subsequent metamorphism-related ^{18}O depletion [J]. *Lithos* , 142~143 : 84~94.
- Jordan T H. 1975. The continental tectosphere[J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics* , 13 : 1~12.
- Lan Tingguang , Fan Hongrui , Hu Fangfang , *et al.* 2011a. Multiple crust-mantle interactions for the destruction of the North China Craton : Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic evidence from the Longbaoshan alkaline complex[J]. *Lithos* , 183 : 695~705.
- Lan Tingguang , Fan Hongrui and Santoshi M. 2011b. Geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of the Mesozoic Dadian alkaline intrusive complex in the Sulu orogenic belt , eastern China : Implications for crust-mantle interaction[J]. *Chemical Geology* , 285 : 97~114.
- Lan Tingguang , Fan hongrui , Santoshi M , *et al.* 2012. Early Jurassic high-K calc-alkaline and shoshonitic rocks from the Tongshi intrusive complex , eastern North China Craton : Implication for crust-mantle interaction and post-collisional magmatism[J]. *Lithos* , 140~141 : 183~199.
- Li Sanzhong , Zhao Guochun , Sun Min , *et al.* 2004. Mesozoic , not paleoproterozoic SHRIMP U-Pb zircon ages of two Liaoji granites , Eastern Block , North China Craton[J]. *International Geology Review* , 46 : 162~176.

- Li Shuguang, Jagoutz E, Chen Yizhi, *et al.* 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[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 64: 1077~1093.
- Li Zhitong and Zhao Chunjing. 1985. Indosinian Movement in north-eastern China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 20: 211~223(in Chinese with English abstract).
- Lin Jingqian, Tan Dongjuan, Chi Xiaoguo, *et al.* 1992. Mesozoic Granites in Jiao-Liao Peninsula[M]. Beijing: Science Publishing House, 1~208(in Chinese with English abstract).
- Liu Fulai, Xu Zhiqin, Liu J G, *et al.* 2004. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh-pressure and retrograde metamorphism of gneisses, south-western Sulu terrane, eastern China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 22: 315~326.
- Luo Zhenkuan, Qiu Youshou, Guan Kang, *et al.* 2001a. SHRIMP U-Pb dating on zircon from Yuerya and Niuxinshan granite intrusions in eastern Hebei Province[J]. *Bulletin of Mineralogy. Petrology and Geochemistry*, 20: 278~285(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhenkuan, Guan Kang, Qiu Youshou, *et al.* 2001b. Zircon SHRIMP U-Pb dating of albite dyke in Jinchangyu gold mine, Jidong area, Hebei, China[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 16(4): 226~231(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhenkuan, Miao Laicheng, Guan Kang, *et al.* 2001c. SHRIMP U-Pb zircon age of magmatic rock in Paishanlou gold mine district, Fuxin, Liaoning Province, China[J]. *Geochimica*, 30: 483~490(in Chinese with English abstract).
- Meng Qingren. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract[J]. *Tectonophysics*, 369: 155~174.
- Menzies A, Fan Weiming and Zhang Ming. 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China[A]. Prichard H M, *et al.* Magmatic Processes and Plate Tectonics[C]. Geological Society(London) Special Publications, 76: 71~81.
- Mu Baolei, Shao Ji'an, Chu Zhuyin, *et al.* 2001. Sm, Nd age and Sr, Nd isotopic characteristics of the Fanshan potassic alkaline ultramafic, syenite complex in Hebei Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 7: 358~365(in Chinese with English abstract).
- Peng Peng, Zhai Mingguo, Guo Jinghui, *et al.* 2008. Petrogenesis of Triassic postorogenic syenite plutons in the Sino-Korean craton: an example from North Korea[J]. *Geological Magazine*, 145: 637~647.
- Peng Toupeng, Wang Yuejun, Fan Weiming, *et al.* 2004. SHRIMP zircon U, Pb geochronology of the diorites for southern Taihang Mountains in the north China interior and its petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 1253~1262(in Chinese with English abstract).
- Pollack H N. 1986. Cratonization and thermal evolution of the mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 80: 175~182.
- Ree J H, Kwon S H, Park Y, *et al.* 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[J]. *Tectonics*, 20: 850~867.
- Ren Kangxu, Yan Guohan, Mu Baolei, *et al.* 2004. Geochemical characteristics and geological implications of the Hekanzi alkaline complex in Lingyuan County, western Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23: 193~202(in Chinese with English abstract).
- Ren Rong, Mu Baolei, Han Baofu, *et al.* 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Fanshan potassic alkaline ultramafic-syenite complex in Hebei Province[J]. *China Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 599~594(in Chinese with English abstract).
- Sagong H and Kwon S T. 2005. Mesozoic episodic magmatism in South Korean and its tectonic implication[J]. *Tectonics*, 24: TC5002.
- Sun Deyou, Suzuki K, Wu Fuyuan, *et al.* 2005. CHIME dating and its application for Mesozoic granites of Huanggoushan, Jilin Province [J]. *Geochimica*, 24(4): 305~314(in Chinese with English abstract).
- Sun Jinggui, Lin Qiang and Ge Winchun. 1992. Tectonic setting during the deformation and emplacement of the Archean tonalite in Jinzhou, Liaoning province[J]. *Jilin Geology*, 11(4): 28~35(in Chinese with English abstract).
- Sun Jinfeng and Yang Jinhui. 2009. Early Cretaceous A-type granites in the eastern North China Block with relation to destruction of the craton[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 137~147(in Chinese with English abstract).
- Sun Jinfeng, Yang Jinhui, Wu Fuyuan, *et al.* 2010. Magma mixing controlling the origin of the Early Cretaceous Fangshan granitic pluton, North China Craton: In situ U-Pb age and Sr-, Nd-, Hf- and O-isotope evidence[J]. *Lithos*, 120: 421~438.
- Wang L G, Qiu Y M, McNaughton N J, *et al.* 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids [J]. *Ore Geology Review*, 13: 275~291.
- Wang Songshan, Hu Huaguang, Li Peixian, *et al.* 2001a. Further discussion on the geologic age of Sihetun vertebrate assemblage in western Liaoning, China: evidence from Ar-Ar dating[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 663~668(in Chinese with English abstract).
- Wang Songshan, Wang Yuanqing, Hu Huaguang, *et al.* 2001b. The existing time of Sihetun vertebrate in western Liaoning, China: evidence from U-Pb age of zircon[J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(9): 779~782(in Chinese with English abstract).
- Williams I S, Cho D L and 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[J]. *Lithos*, 107 : 239~256.
- Wong Wenhao. 1927. Crustal movement and igneous activities of Eastern China since Mesozoic time[J]. *Bulletin of Geological Society of China*, 6(1): 9~36(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Han R H, Yang Jinhui, *et al.* 2007a. Initial constraints on granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 238 : 232~248.
- Wu Fuyuan, Lin Jingqian, Wilde S A, *et al.* 2005a. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in Eastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233 : 103~119.
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui and Liu Xiaoming. 2005. Geochronological framework of the Mesozoic granitic magmatism in the Liaodong Peninsula, Northeast China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11 : 305~317(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Lo C H, *et al.* 2007b. The Jiamusi Massif : a Jurassic accretionary terrane along the western Pacific margin of NE China[J]. *Island Arc*, 16 : 156~172.
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Wilde S A, *et al.* 2005b. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China[J]. *Chemical Geology*, 221 : 127~156.
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Zhang Yanbin, *et al.* 2006. Emplacement ages of the Mesozoic granites in southeastern part of the Western Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 : 315~325(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Zhao Guochun, Wilde S A, *et al.* 2005c. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, (24): 523~545.
- Xu Wenliang, Chi Xiaoguo, Yuanchao, *et al.* 1993. Mesozoic Dioritic Rocks and Deep-Seated Enclaves in Central North China Platform [M]. Beijing : Geological Publishing House, 1~164(in Chinese with English abstract).
- Xu Wenliang, Wang Qinghai, Yang Debin, *et al.* 2005. SHRIMP zircon U-Pb dating in Jingshan " migmatitic granite " Bengbu and its geological significance[J]. *Science of China(D)*, 48 : 185~191.
- Xu Wenliang, Yang Chenghai, Yang Debin, *et al.* 2006. Mesozoic high-Mg diorites in eastern North China craton : constraints on the mechanism of lithospheric thinning[J]. *Earth Science Frontiers*, 13 (2): 120~129(in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath eastern China : evidence, timing and mechanism[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A*, 26 : 747~757.
- Xu Yigang, Huang Xiaolong, Ma Jinlong, *et al.* 2004. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China Craton : Constrains from SHRIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147 : 750~767.
- Yan Guohan, Mu Baolei, Xu Baoliang, *et al.* 2000. Triassic alkaline intrusives in the Yanliao-Yinshan area : Their chronology, Sr, Nd and Pb isotope characteristics and their implication[J]. *Science of China(D)*, 30(4): 383~387(in Chinese with English abstract).
- Yang Debin, Xu Wenliang, Wang Qinghai, *et al.* 2010. Chronology and geochemistry of Mesozoic granitoids in the Bengbu area, central China : constraints on the tectonic evolution of the eastern North China Craton[J]. *Lithos*, 114 : 200~216.
- Yang Jinhui, Chung Sunlin, Wilde S A, *et al.* 2005a. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China : geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence[J]. *Chemical Geology*, 214 : 99~125.
- Yang Jinhui, O'Reilly S, Walker R, *et al.* 2010. Diachronous decratonization of the Sino-Korean craton : Geochemistry of mantle xenoliths from North Korea[J]. *Geology*, 38(9): 799~802.
- Yang Jinhui, Sun Jinfeng, Chen Fukun, *et al.* 2007a. Sources and petrogenesis of Late Triassic dolerite dikes in the Liaodong Peninsula : implications for postcollisional lithosphere thinning of Eastern North China Craton[J]. *Journal of Petrology*, 48 : 1973~1997.
- Yang Jinhui, Sun Jinfeng, Zhang Min, *et al.* 2012a. Petrogenesis of silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern North China Craton related to post-collisional and intraplate extension[J]. *Chemical Geology*, 328 : 149~167.
- Yang Jinhui, Sun Jinfeng, Zhang Jiheng, *et al.* 2012b. Petrogenesis of Late Triassic intrusive rocks in the northern Liaodong Peninsula related to decratonization of the North China Craton : Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence[J]. *Lithos*, 153 : 108~128.
- Yang Jinhui and Wu Fuyuan. 2009. Triassic magmatism and its relation to decratonization in the eastern North China Craton[J]. *Science of China(Series D : Earth Sciences)*, 52, doi : 10.1007/s11430-009-0137-5.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, *et al.* 2004. Multiple sources for the origin of granites : geochemical and Nd/Sr isotopic evidence from the Gudaoling granite and its mafic enclaves, northeast China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68 : 4469~4493.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, *et al.* 2005b. Petrogenesis of Early Cretaceous intrusions in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, East China and their relationship to lithospheric thinning[J]. *Chemical Geology*, 222 : 200~231.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, *et al.* 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China : Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 89 : 89~106.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Liu Xiaoming, *et al.* 2007. Petrogenesis and Geological significance of the Jurassic Xiaoheishan pluton in the Liaodong Peninsula, East China : In situ zircon U-Pb dating and Hf isotopic analysis[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochem-*

- istry, 26(1):30~43 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Lo Chinghua, *et al.* 2004. Deformation age of Jurassic granites in the Dandong area, eastern China: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 1205~1214 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan and Wilde S A. 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: an association with lithospheric thinning [J]. *Ore Geology Reviews*, 23: 125~152.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Wilde S A, *et al.* 2007b. Petrogenesis of Late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong Peninsula, North China Craton [J]. *Chemical Geology*, 242: 155~175.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Wilde S A, *et al.* 2007c. Tracing magma mixing in granite genesis: in situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircon [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153: 177~190.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, *et al.* 2007d. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 119: 1405~1414.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Wilde S A, *et al.* 2008a. Mesozoic decratonization of the North China block [J]. *Geology*, 36: 467~470.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Wilde S A, *et al.* 2008b. 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]. *Journal of Petrology*, 49: 315~351.
- Zhang Juan, Zhao Zifu, Zheng Yongfei, *et al.* 2010. Postcollisional magmatism: Geochemical constraints on the petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Sulu orogen, China [J]. *Lithos*, 119: 512~536.
- Zhang Xiaou, Cawood P A, Wilde S A, *et al.* 2003. Geology and timing of mineralization at the Cangshang gold deposit, north-western Jiaodong Peninsula, China [J]. *Mineralium deposita*, 38: 141~153.
- Zhao Zifu, Zheng Yongfei, Zhang Juan, *et al.* 2012. Syn-exhumation magmatism during continental collision: evidence from alkaline intrusives of Triassic age in the Sulu orogen [J]. *Chemical Geology*, 328: 70~88.
- Zhou Xinhua, Zhang Guohui, Yang Jinhui, *et al.* 2001. Sr-Nd-Pb isotope mapping of Late Mesozoic volcanic rocks across northern margin of North China Craton and implications to geodynamic processes [J]. *Geochimica*, 30: 10~23 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Rixiang, Yang Jinhui and Wu Fuyuan. 2012. Timing of destruction of the North China Craton [J]. *Lithos*, 149: 51~60.
- ## 附中文参考文献
- 陈斌, 田伟, 翟明国, 等. 2005. 太行山和华北其它地区中生代岩浆作用的锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其岩浆成因和地球动力学意义 [J]. *岩石学报*, 21: 13~24.
- 陈国达. 1956. 中国地台“活化区”的实例并着重讨论华夏古陆问题 [J]. *地质学报*, 36: 239~272.
- 陈树良, 邹彦清, 郝志波. 2001. 辽东地区元古代侵入岩特征及构造岩浆大陆动力学演化 [J]. *辽宁地质*, 18: 43~51.
- 崔盛芹, 李锦蓉. 1983. 试论中国滨太平洋带的印支运动 [J]. *地质学报*, 57(1): 51~61.
- 郭敬辉, 陈福坤, Siebel W, 等. 2003. 苏鲁超高压带同碰撞和碰撞后花岗岩类演化 [A]. 郑永飞. 板块俯冲和折返的地球动力学 [C]. 论文摘要汇编. 合肥, 43~46.
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 等. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后造山过程: 锆石 U-Pb 年代学 [J]. *岩石学报*, 21(04): 1281~1301.
- 韩宝福, 加加美宽雄, 李惠民. 2004. 河北光头山碱性花岗岩的时代、Nd-Sr 同位素特征及其对华北早中生代壳幔相互作用的意义 [J]. *岩石学报*, 20: 1375~1388.
- 李之彤, 赵春荆. 1985. 东北地区的印支运动 [J]. *地质科学*, 20: 211~223.
- 林景仟, 谭东娟, 迟效国, 等. 1992. 胶辽半岛中生代花岗岩 [M]. 北京: 科学出版社, 1~208.
- 罗镇宽, 裘有守, 关康, 等. 2001a. 冀东峪耳崖和牛心山花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 20: 278~285.
- 罗镇宽, 关康, 裘有守, 等. 2001b. 冀东金厂峪金矿区钠长岩脉及青山口花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其意义 [J]. *地质找矿论丛*, 16(4): 226~231.
- 罗镇宽, 苗来成, 关康, 等. 2001c. 辽宁阜新排山楼金矿区岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其意义 [J]. *地球化学*, 30: 483~490.
- 牟保磊, 邵济安, 储著银, 等. 2001. 河北矾山钾质碱性超镁铁岩-正长岩杂岩体 Sm-Nd 年龄和 Sr, Nd 同位素特征 [J]. *岩石学报*, 17: 358~365.
- 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 等. 2004. 南太行山闪长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及岩石成因研究 [J]. *岩石学报*, 20: 1253~1262.
- 任康绪, 阎国翰, 牟保磊, 等. 2004. 辽西凌源河坎子碱性杂岩体地球化学特征及地质意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 23: 193~202.
- 任荣, 牟保磊, 韩宝福, 等. 2009. 河北矾山钾质碱性超镁铁岩-正长岩杂岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 [J]. *岩石学报*, 25(3): 588~594.
- 孙德有, 铃木和博, 吴福元, 等. 2005. 吉林省南部荒沟山地区中生代花岗岩 CHIME 定年 [J]. *地球化学*, 34: 305~314.

- 孙金凤, 杨进辉. 2009. 华北东部早白垩世 A 型花岗岩与克拉通破坏[J]. 地球科学, 34(1): 137~147.
- 孙景贵, 林强, 葛文春. 1992. 辽宁金州地区太古宙英云闪长岩体的变形与侵位的构造环境[J]. 吉林地质, 11(4): 28~35.
- 王松山, 胡华光, 李佩贤, 等. 2001a. 再论辽西四合屯脊椎动物生存时代: Ar-Ar 年龄证据[J]. 岩石学报, 17(4): 663~668.
- 王松山, 王元青, 胡华光, 等. 2001b. 辽西四合屯脊椎动物生存时代: 锆石 U-Pb 年龄证据[J]. 科学通报, 46(4): 330~333.
- 翁文灏. 1927. 中国东部中生代以来之地壳运动及火山活动[J]. 中国地质学会志, 6: 9~37.
- 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[J]. 高校地质学报, 11(3): 305~317.
- 吴福元, 杨进辉, 张艳斌, 等. 2006. 辽西东南部中生代花岗岩时代[J]. 岩石学报, 22(2): 315~325.
- 许文良, 迟效国, 袁朝, 等. 1993. 华北地台中部中生代闪长质岩石及深源岩石包体[M]. 北京: 地质出版社.
- 许文良, 王清海, 杨德斌, 等. 2004. 蚌埠荆山“混合花岗岩” SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 中国科学(D), 34: 423~428.
- 许文良, 杨承海, 杨德彬, 等. 2006. 华北克拉通东部中生代高 Mg 闪长岩——对燕山期减薄机制的制约[J]. 地学前缘, 13: 120~129.
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 等. 2000. 燕辽阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr、Nd、Pb 同位素特征及意义[J]. 中国科学(D), 30: 383~387.
- 杨进辉, 吴福元. 2009. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39(7): 910~921.
- 杨进辉, 吴福元, 罗清华, 等. 2004. 辽宁丹东地区侏罗纪花岗岩的变形时代: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学制约[J]. 岩石学报, 20: 1205~1241.
- 杨进辉, 吴福元, 柳小明, 等. 2007. 辽东半岛小黑山岩体成因及其地质意义: 锆石 U-Pb 年龄和铅同位素证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 26: 29~43.
- 周新华, 张国辉, 杨进辉, 等. 2001. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩[J]. 地球化学, 30(1): 10~23.