

华北东部早白垩世 A 型花岗岩与克拉通破坏

孙金凤, 杨进辉*

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: A 型花岗岩是非造山的、无水的碱性花岗岩, 具有独特的矿物学、岩石学和地球化学特征, 形成于造山后、板内非造山或者地幔热柱等伸展动力学背景, 蕴涵着大陆地壳生长、岩石圈演化及区域构造发展等大陆动力学的重要信息。在华北东部广泛分布着一期中生代 A 型花岗岩及伴生的碱性岩, 结合前人的研究成果以及笔者近年来的研究发现: 它们主要侵位于早白垩世(130~110 Ma), 来源于上地壳、下地壳和地幔等多元源区, 是不同成分的岩浆经过分离结晶、岩浆混合作用形成; 综合区域地球动力学研究和 A 型花岗岩本身的地球化学特征, 认为华北东部早白垩世 A 型花岗岩形成于地壳伸展背景之下, 是岩石圈减薄和克拉通破坏的浅部地质响应, 标志着华北东部岩石圈减薄和克拉通破坏作用的峰期。

关键词: A 型花岗岩; 早白垩世; 华北克拉通; 去克拉通化作用。

中图分类号: P588

文章编号: 1000-2383(2009)01-0137-11

收稿日期: 2008-10-15

Early Cretaceous A-Type Granites in the Eastern North China Block with Relation to Destruction of the Craton

SUN Jin-feng, YANG Jin-hui*

State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract: A-type granite is anorogenic, anhydrous and alkaline granite and has unique mineralogical, petrological and geochemical characteristics, which is considered to be emplaced in post-orogenic, within-plate or plume-related extensional setting. A-type granites and related alkaline rocks imply important information of geodynamics and are the key to understand the growth of continental crust, the lithospheric evolution and the development of regional tectonics. Late Mesozoic A-type granites and related alkaline rocks are widespread in the eastern North China craton. Previous studies and our recently published data show that they formed via a complex process involving mixing of magmas derived from mantle and upper and lower crust sources, crystal fractionation and intracrustal melting during Early Cretaceous (130–110 Ma). On the basis of the study of regional geology, it is suggested that the A-type granites and related alkaline rocks were formed in an extensional setting and were the shallow responses to the lithospheric thinning and decratonization, which indicate the peak time of lithospheric thinning and destruction of the North China craton.

Key words: A-type granite; Early Cretaceous; North China craton; decratonization.

0 引言

花岗岩(及伴生的镁铁质岩石)是构成大陆地壳的重要组成部分,是大陆形成、演化的标志物之一,可形成于各种不同地球动力学环境(Barbarin, 1990, 1999; Bonin *et al.*, 1998). 地球上大面积出露的花岗岩主要类型为 I 型和 S 型花岗岩, A 型花

岗岩所占的比例相对较小,但 A 型花岗岩所具有的独特矿物学、岩石学和地球化学特征及所代表的造山后、板内非造山或者地幔热柱伸展动力学背景(Eby, 1990, 1992),蕴涵着大陆动力学的重要信息,对大陆地壳生长、岩石圈演化及区域构造发展等研究具有至关重要的作用(Cloeman *et al.*, 1992; Jahn *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2002; Hawkesworth

and Kemp, 2006; Yang *et al.*, 2008a).

在华北克拉通东部广泛发育着一期早白垩世 A 型花岗岩,虽然前人对这期 A 型花岗岩及相伴生的碱性岩作了大量的年代学、岩石学和地球化学工作,并取得显著的研究成果(许保良等,1994,1998;阎国瀚等,2001; Wei *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2006, 2008b),但有关 A 型花岗岩成因以及地球动力学背景等方面还存在一定的争议。

本文在总结近年来 A 型花岗岩成因研究的基础上,通过仔细阅读有关华北克拉通东部早白垩世 A 型花岗岩的相关研究文献,对华北东部早白垩世 A 型花岗岩的源区、成岩过程进行了初步的总结,并提出华北东部早白垩世 A 型花岗岩及伴生碱性岩的形成与克拉通破坏之间的成因关系。

1 A 型花岗岩研究进展

1.1 A 型花岗岩的定义

A 型花岗岩是非造山的、无水的碱性花岗岩,其定义是由 Loiselle and Wones(1979)最先提出的,指侵位于大陆裂谷环境、在低氧逸度条件下结晶的偏碱性花岗岩。通常情况下,A 型花岗岩具有典型的标志矿物——碱性暗色矿物,如钠闪石—钠铁闪石、霓石—霓辉石、铁橄榄石等。与其他类型花岗岩相比,A 型花岗岩高 Fe/Mg、(K+Na)/Al 和 K/Na 比值,富含 F、Zr、Nb、Ga、稀土元素(REE)、Y 和 Zn 等元素,相对贫缺 Mg、Ca、Al、Cr 和 Ni 等元素(Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987),即 A 型花岗岩富集不相容元素(LILE 和 HFSE),但亏损镁铁质硅酸盐(Co、Sc、Cr、Ni 等)和长石(Ba、Sr、Eu)等矿物相容的元素(Bonin, 2007)。

高分异的 I、S 型花岗岩与过碱性 A 型花岗岩具有相似的地球化学特征(Chappell and White, 1992; Wu *et al.*, 2003a, 2003b),从而导致成因类型判断困难。常用的 Whalen *et al.* (1987)所提出的 $1000 \times (Ga/Al) = 2.6$ 的判别标准也无能为力。一般根据 A 型花岗岩具有典型的碱性暗色矿物和较高的 Zr ($> 250 \times 10^{-6}$)、Nb、Ce 和 Y ($Nb + Zr + Ce + Y > 350 \times 10^{-6}$)的含量与强分异的 I 型花岗岩 ($Zr < 100 \times 10^{-6}$)相区分。另外,A 型花岗岩的原始岩浆形成温度明显比 I、S 花岗岩高,如 Clemens *et al.* (1986)分析 A 型花岗岩岩浆形成于 > 900 °C、含水 2.4%的条件下,而 Creaser *et al.* (1991)报道澳大利亚南部 A 型火山岩的形成温度为 $900 \sim$

1010 °C 和含水(1~2)wt%的条件下,远比 I、S 型花岗岩岩浆形成的温度高。因此,通过反演岩浆形成温度,并结合其他地球化学特征,可能有效区分 A 型花岗岩与高分异的 I 型花岗岩。

1.2 A 型花岗岩的源区、成因与壳幔相互作用

A 型花岗岩的成因是目前 A 型花岗岩研究中争议较大的问题之一,这种争议主要集中在物源和成岩过程上,归结起来主要有以下 4 类:(1)幔源碱性基性岩浆分离结晶形成(Turner *et al.*, 1992, 1996; Mushkin *et al.*, 2003);(2)长英质岩石在地壳浅部脱水部分熔融形成(Creaser *et al.*, 1991; Skjerlie and Johnston, 1992; Patino Douce, 1997),多属铝质 A 型花岗岩;(3)花岗岩熔体抽离后的富含 F 和 Cl 的下地壳麻粒岩残留体(residual-source)在高压下的小程度部分熔融作用(Collins *et al.*, 1982; Clemens *et al.*, 1986);(4)幔源、壳源不同来源岩浆混合、分离结晶作用的产物(Bedard, 1990; Kerr and Fryer, 1993; Mingram *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2006, 2008b)。

实验岩石学资料和锆石饱和温度计算已经证明(Clemens *et al.*, 1986; King *et al.*, 1997),A 型花岗岩是高温的。这一基本的形成条件暗示该类岩石不可能是 I 型花岗岩分异而来。无论是高分异还是未分异的类型,部分 A 型花岗岩都表现出低 Sr、Eu 和富集 Nb、Zr 等元素的特点,反映其源区存在斜长石的残留(形成的压力较低),因此它也不可能是幔源岩浆分异而来(在极端情况下,幔源岩浆的强烈结晶分异可能会产生有限的低 Sr、Eu 的碱性岩石,但此时应与大规模的镁铁质岩石伴生),或来源于镁铁质源岩的部分熔融。实验岩石学资料表明,A 型花岗岩源区可能是长英质地壳(Creaser *et al.*, 1991; Skjerlie and Johnston, 1992; Patino Douce, 1997),由地壳岩石中含水矿物的脱水熔融形成。但是,在该条件下所形成的熔体基本上都属于铝质 A 型花岗岩。因此,King *et al.* (1997)认为铝质 A 型花岗岩的源岩可能是长英质的,而过碱性 A 型花岗岩的源岩则可能是镁铁质的。A 型花岗岩成因争论的实质就是它们是否单一地来源于地壳或者地幔?地幔岩浆在 A 型花岗岩成因中的作用如何?这不仅涉及到 A 型花岗岩岩浆产生的热源等基本问题,而且对岩石圈演化、大陆地壳生长以及区域构造演化等方面的研究具有十分重要的意义。

1.3 A 型花岗岩的构造环境判别

目前,对花岗岩构造环境的判别主要基于岩石

学和地球化学方法,不少学者认为一定的花岗岩类型对应特定的构造环境(Pitcher, 1997; Barbarin, 1999),如 I 型花岗岩对应于俯冲、S 型花岗岩对应于碰撞和 A 型花岗岩对应于伸展的认识。A 型花岗岩自命名之日起至今,近 30 年的研究表明,它形成于碰撞后、板内或者地幔热柱等的伸展环境(Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1990, 1992; Bonin, 2007)。但最近几年的工作已经发现,不仅是 A 型花岗岩,还是其他类型的花岗岩都主要是在拉张环境中形成,挤压环境下形成的花岗岩非常有限,即使在俯冲带,花岗岩的形成多与挤压背景下地壳的拉张和底侵作用相关(吴福元等, 2007b)。

在地球化学方法中,目前最为普及和被滥用的是地球化学投点,如 Pearce *et al.* (1984) 和 Maniar and Piccoli (1989) 等提出的各式图解。但需要注意的是,花岗岩的地球化学成分取决于其源岩的矿物组成和化学成分、熔融时的物理化学条件(包括温度、压力和挥发份)和其后岩浆的演化(如分离结晶作用、岩浆混合作用、同化混染作用等),这些因素没有一个简单代表构造意义的。因此,花岗岩的地球化学成分与构造背景并不直接挂钩,构造背景更可能只是控制了 A 型花岗岩岩浆过程的某些方面。但由于这种控制性并不是一一对应的,从而导致花岗岩构造环境的判别往往是多解的(Pearce, 1996; Förster *et al.*, 1997)。因此,目前国际上已经抛弃了花岗岩形成构造环境的地球化学判别方法,取而代之的是各种方法的综合运用。

2 华北东部早白垩世 A 型花岗岩成因

2.1 华北东部早白垩世花岗岩时空分布

华北克拉通分布有大面积的显生宙花岗岩和伴生的镁铁质岩石(图 1)。近年来,国内外学者就年代学、岩石成因和成岩动力学背景等方面研究发表了大量的研究成果,但多数集中在 I 型花岗岩的研究上,而华北东部中生代 A 型花岗岩及相伴生的碱性岩研究相对较少。本文在前人年代学、岩石学和地球化学的基础上(许保良等, 1994, 1998; 阎国瀚等, 2001; Wei *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2006, 2008b),初步总结华北东部早白垩世 A 型花岗岩及伴生碱性岩的时空分布特征(图 1, 表 1)。

在辽东半岛早白垩世 A 型花岗岩以岗山、阎王鼻子、千山、凤凰山、四平街等岩体为代表,其岩性主要为角闪石花岗岩、正长花岗岩、钾长花岗岩,伴生

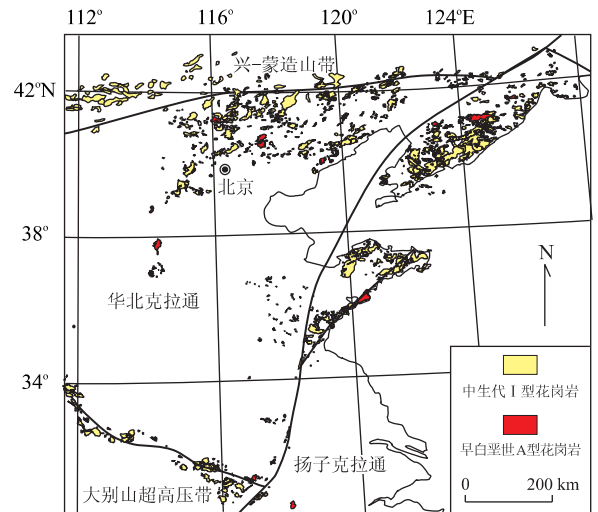


图 1 华北克拉通东部早白垩世 A 型花岗岩分布

Fig. 1 Sketch map showing the distribution of Early Cretaceous A-type granites in the eastern North China craton

少量的正长岩,在千山 A 型花岗岩中常见细粒镁铁质包体。详细的锆石 U-Pb 年代学测定结果表明,它们侵位于 125~130 Ma(Wu *et al.*, 2005a, 吴福元等, 2005b)。

燕山地区 A 型花岗岩公开报道得最早,主要以后石湖山(山海关)火山—侵入杂岩体、响山岩体、雾灵山侵入杂岩体、千层背岩体、甲山岩体和窟窿山岩体为代表。其中后石湖山岩体岩性较为复杂,包括角闪石花岗岩、正长岩、碱长粗面岩、碱性流纹岩等类岩石,锆石 U-Pb 年龄测定表明角闪石花岗岩、正长岩和碱性流纹岩的结晶年龄为 118 ± 1 Ma、 120 ± 1 Ma 和 119 ± 1 Ma(Yang *et al.*, 2008b)。雾灵山侵入杂岩体岩性主要为碱长正长岩和石英正长岩,侵位时代为 130 ± 1 Ma 和 129 ± 1 Ma(锆石 U-Pb 年龄, Davis *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2008b)。千层背、响山、窟窿山岩体主要由角闪石花岗岩造成,其侵位时代分别为 129 ± 1 Ma、 117 ± 1 Ma 和 127 ± 1 Ma(锆石 U-Pb 年龄; Davis *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2008b 和未发表数据)。甲山岩体主要岩性为正长岩,侵位时代为 113 ± 2 Ma(锆石 U-Pb 年龄; Davis *et al.*, 2001)。

胶东—苏北地区以崂山、苏州岩体为代表,岩性主要为晶洞花岗岩,其侵位时代为 113 ± 1 Ma 和 110 ± 1 Ma(赵广涛等, 1997)。大别山地区以响洪甸正长岩、西汤池碱长花岗岩、婆婆寨碱长花岗岩、崇山咀钾长花岗岩、陈家桥石英正长岩、沙村 A 型花岗岩岩体为代表(周泰禧等, 1995; 王强等, 2000; 谢

表 1 华北东部早白垩世 A 型花岗岩的锆石 U-Pb 年龄

Table 1 Zircon U-Pb ages data of the Early Cretaceous A-type granites in the eastern North China craton

区域	岩体	岩性	锆石 U-Pb 年龄	分析方法	文献
辽 东 半 岛	千山	角闪石钾长花岗岩 黑云母钾长花岗岩	126±2 Ma	LA-ICP-MS	Wu <i>et al.</i> , 2005a
	四平街	角闪石花岗岩 正长花岗岩	130±1 Ma	TIMS	Wu <i>et al.</i> , 2005a
燕 山	后石湖山 (山海关)	角闪石花岗岩	118±1 Ma	LA-ICP-MS	Yang <i>et al.</i> , 2008b
		正长岩	120±1 Ma		
		碱性流纹岩	120±1 Ma		
		碱长粗面岩	119±1 Ma		
山	响山	角闪石花岗岩 石英正长岩	117±1 Ma	LA-ICP-MS	Yang <i>et al.</i> , 2008b
	雾灵山	中细粒正长岩	129±1 Ma	LA-ICP-MS	Yang <i>et al.</i> , 2008b
中粗粒正长岩		130±1 Ma			
正长斑岩		130±1 Ma			
地 区	千层背	角闪石花岗岩	131.7±1.5 Ma	TIMS	Davis <i>et al.</i> , 2001
			129±1 Ma	LA-ICP-MS	Yang <i>et al.</i> , 2008b
			128.8±1.5 Ma	TIMS	Davis <i>et al.</i> , 2001
	窟窿山	晶洞花岗岩	127±1 Ma	LA-ICP-MS	本文
	甲山	正长岩	113±2 Ma	TIMS	Davis <i>et al.</i> , 2001
胶东	崂山	晶洞花岗岩	113±1 Ma	TIMS	赵广涛等, 1997
	苏州	晶洞花岗岩	110±1 Ma	TIMS	赵广涛等, 1997
大别山	响洪甸	正长岩	122 Ma	TIMS	周泰禧等, 1995
	沙村	A 型花岗岩	119.0±3.2 Ma	TIMS	谢智等, 2004
太行山	洪山	正长岩	135.0±2.7 Ma	SHRIMP	Zhou and Chen, 2006
	紫金山	霞石正长岩 二长花岗岩	127.2±2.7 Ma	LA-ICP-MS	Ying <i>et al.</i> , 2007

智等, 2004), 但只有响洪甸正长岩和沙村 A 型花岗岩有准确的年代学测定, 其锆石 U-Pb 年龄为 122 Ma(周泰禧等, 1995)和 119.0±3.2 Ma(谢智等, 2004)。

近几年详细的锆石 U-Pb 年代学研究表明, 华北东部中生代 A 型花岗岩主要形成于早白垩世 (110~130 Ma)。

2.2 华北东部早白垩世花岗岩源区及成岩过程

有关华北东部早白垩世 A 型花岗岩的源区争议较大, 部分学者认为华北东部的 A 型花岗岩及其伴生的碱性岩主要来源于地幔源区, 来源于富集岩石圈地幔的岩浆经过结晶分异直接形成(周玲棣和赵振华, 1994; 许保良等, 1998; 阎国翰等, 2001), 但野外地质观察发现华北东部早白垩世 A 型花岗岩及碱性岩不与大规模的镁铁质岩石伴生。通过对 A 型花岗岩的 Nd、Sr、O 等同位素研究发现, 华北东部, 乃至整个中国东部早白垩世 A 型花岗岩的岩浆源区可能为受到高温热液蚀变的初生地壳, 并经历了由浅部到深部的两阶段地壳过程(魏春生等, 2001; Wei *et al.*, 2002)。然而, 经过笔者近几年详细的研究发现, 华北东部早白垩世 A 型花岗岩及伴

生的碱性岩的岩浆源区并不是单纯来源于岩石圈地幔或地壳(Yang *et al.*, 2006; 2008b)。

Yang *et al.* (2006)对辽东半岛早白垩世千山岩体详细的野外考察发现, 该岩体主要由角闪石钾长花岗岩和黑云母钾长花岗岩组成, 并在其中普遍含有大量的细粒镁铁质包体(图 2)。细粒镁铁质包体与寄主岩之间的矿物组成呈渐变关系, 在接触带附近可见两种岩浆相互作用而形成的柱状角闪石; 另外在包体中见巨大的、来源于寄主岩的钾长石斑晶, 镜下观察发现磷灰石呈针、柱状, 代表着淬冷作用。所有这些现象表明千山 A 型花岗岩及其包体是长英质岩浆和镁铁质岩浆混合而成。进一步对 A 型花岗岩和细粒镁铁质包体所进行的全岩地球化学、Sr-Nd 同位素和锆石的 Hf 同位素分析发现: 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(0.7215~0.7283)、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)。这些地球化学特征表明它们的源区明显不同于来源于下地壳的早白垩世 I 花岗岩(Yang *et al.*, 2004; 2007a)(图 2), 高的放

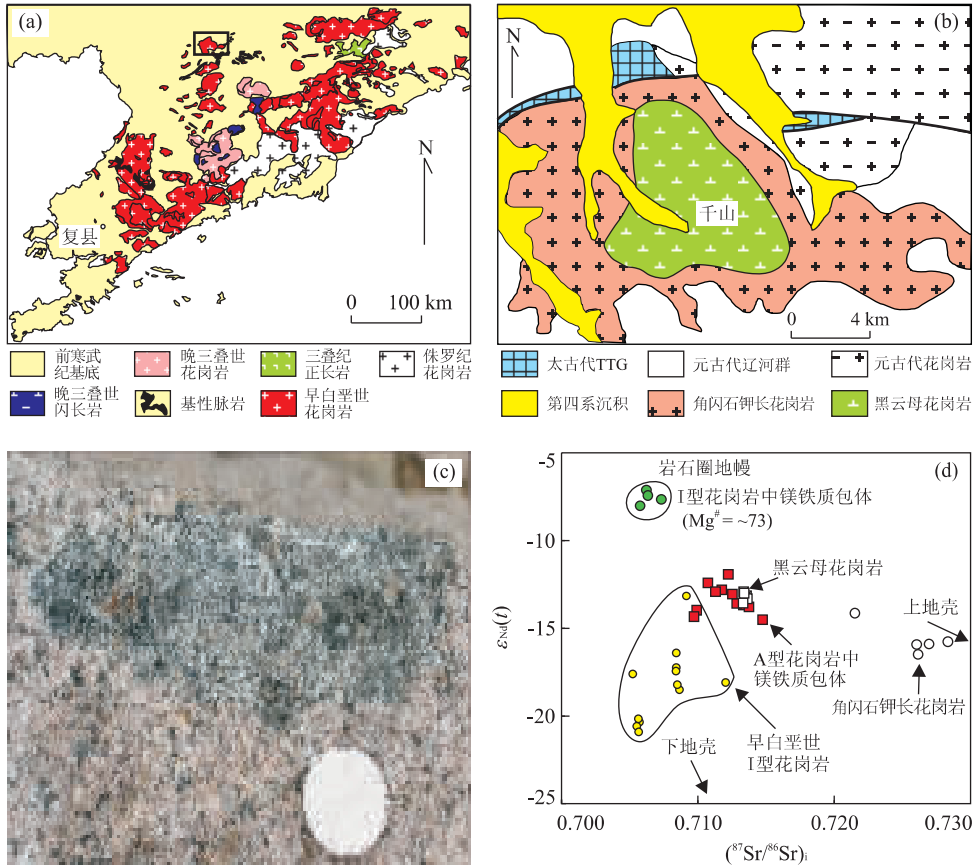


图 2 辽东半岛千山 A 型花岗岩岩体地质图(a, b), 镁铁质包体与花岗岩野外照片(c)及其 Sr-Nd 同位素组成(d) (据 Yang *et al.*, 2006)

Fig. 2 Geological map (a, b), field picture of A-type granite and mafic enclave (c) and Sr-Nd isotopic compositions (d)

放射性成因 Sr 同位素和低的放射性成因 Nd 同位素及其他地球化学特征表明它们来源于上地壳物质在低压下 ($p \leq 0.4$ GPa) 部分熔融作用, 但经历了结晶分异和镁铁质岩浆的混合作用. 而细粒镁铁质包体则具有较高的 Mg 指数 ($Mg^\#$ 可达 54), 表明它们来源于岩石圈地幔源区, 而包体的富集的 Sr、Nd (图 2) 和锆石 Hf 同位素组成表明这个源区为富集的岩石圈地幔. 这些特征表明, 辽东半岛早白垩世千山 A 型花岗岩是来源于上地壳和富集岩石圈地幔的长英质岩浆和镁铁质岩浆混合、分离结晶作用的结果.

最近, Yang *et al.* (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. 总结华北东部早白垩世 A 型花岗岩的 Sr、Nd 同位素资料 (图 3) 也发现, 这些花岗岩的 Sr、Nd 同位素变化范围很大

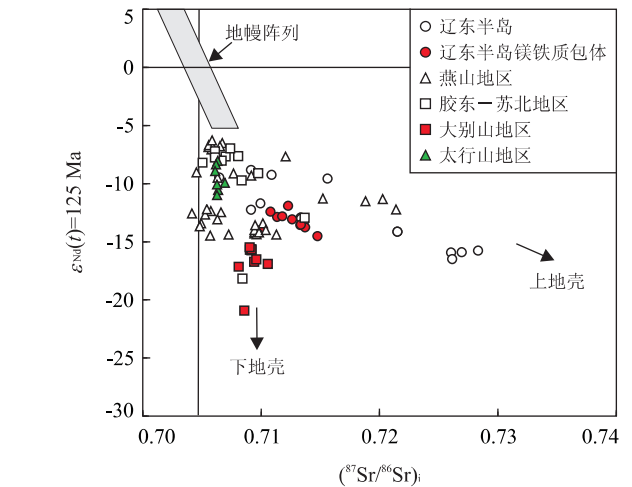


图 3 华北东部早白垩世 A 型花岗岩的 Sr、Nd 同位素组成
Fig. 3 Sr and Nd isotopic compositions of Early Cretaceous A-type granites in the eastern North China craton

(周泰禧等, 1995; 许保良等, 1998; 魏春生等, 2001; 阎国翰等, 2001; Zhou and Chen, 2006; Yang *et al.*, 2006, 2008b), 也说明它们来源于多种源区. 因此, 华北东部早白垩世 A 型花岗岩及其伴生的碱性

岩的岩浆源区和成岩过程复杂,是来源于不同源区的多种岩浆经过分离结晶、岩浆混合而成。

3 早白垩世 A 型花岗岩与克拉通破坏

3.1 华北东部早白垩世 A 型花岗岩形成的构造背景

在华北克拉通东部广泛发育着一期早白垩世(110~130 Ma) A 型花岗岩及伴生的碱性岩,它们来源于多种源区(上地壳、下地壳和岩石圈地幔),是不同的岩浆经过分离结晶、岩浆混合形成。前人根据地球化学投图,提出它们是 A1 型花岗岩,但前文已经提及花岗岩的地球化学成分取决于其源岩的矿物组成和化学成分、熔融时的物理化学条件(包括温度、压力和挥发份)和其后岩浆的演化(如分离结晶作用、岩浆混合作用、同化混染作用等),花岗岩的地球化学成分和构造背景并不直接挂钩,目前国际上已经抛弃了花岗岩形成构造环境的地球化学判别方法,取而代之的是各种方法的综合运用。

根据近年来构造、盆地等方面研究发现,华北东部早白垩世 A 型花岗岩的形成时代(130~110 Ma)与 I 型花岗岩形成时代(135~113 Ma, 峰期 125 Ma, Wu *et al.*, 2005a)和华北东部大规模金成矿时代(~120 Ma, Yang *et al.*, 2003)基本相同,说明它们形成于同一构造背景之下。笔者最近在辽东半岛进行的花岗岩研究中,发现古道岭、饮马湾山等众多早白垩世(130~120 Ma)岩体就位于辽南变质核杂岩拆离断层中,且其变形线理与变质核杂岩糜棱岩中线理的产状相同,详细的热年代学研究表明这期岩体与变质核杂岩的变形、冷却年龄为 120~110 Ma,反映它们是同构造岩体(郭春丽等, 2004; Yang *et al.*, 2007b; 杨进辉等, 2008c)。变质核杂岩本身代表了区域伸展的地球动力学背景(Davis *et al.*, 2001),另外,与此同期在华北东部广泛发育着一系列 NNE 向的早白垩世拉分盆地(Meng, 2003)。再者,实验岩石学研究表明,岩石部分熔融形成花岗质岩浆与挥发份、压力和温度有关。挥发份的加入可降低岩石的熔点,这也是为何俯冲带发育强烈的岩浆活动的原因。但近年的研究已经发现花岗质岩浆是水不饱和的(Thompson, 1999),因此降压和升温可能是花岗质岩浆形成的更主要元素。挤压构造过程中,岩石是升压的,产生岩浆的可能性相对较小。因此,华北东部早白垩世 A 型花岗岩以及同期的 I 型花岗岩和大规模金成矿作用形成于一个伸展的地球动力学背景之下。

3.2 华北克拉通破坏与 A 型花岗岩成因

近年的研究表明华北克拉通东部在中新生代发生强烈的岩石圈减薄作用,岩石圈地幔的性质和厚度发生了改变,大约有 100 km 厚的岩石圈地幔丢失,并且由古老的(~2.5 Ga)、冷的、密度低的、难熔的、同位素富集的岩石圈地幔转变为年轻的、热的、密度大的、饱满的、同位素亏损的岩石圈地幔(Fan and Menzies, 1992; Menzies *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1998; 郑建平, 1999; Xu, 2001; Wu *et al.*, 2003c, 2006b; Zhang, 2005; Zheng *et al.*, 2007)。根据克拉通的定义和性质,它是地球上重要的构造单元,多具有密度和热流值低、刚性大、巨厚(>200 km)的岩石圈根(Jordan, 1975; Carlson *et al.*, 2005),其上覆沉积盖层呈近水平状产出,克拉通化之后无明显的地壳增生和构造—岩浆—成矿和地震活动。虽然地壳伸展不能简单地与岩石圈减薄和克拉通破坏作用一一对应,但华北克拉通破坏或者岩石圈减薄必然导致岩石圈地幔性质的改变、岩石圈甚至软流圈范围内强烈的热扰动,软流圈物质上涌、减压部分熔融或岩石圈地幔的增温部分熔融形成镁铁质岩浆。这些岩浆上升至地壳深度,为地壳范围内地壳物质发生部分熔融提供热源,形成长英质岩浆,同时伴有强烈的构造运动、盆地的形成和流体的活动(Davis *et al.*, 2001; Meng *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2003; Wu *et al.*, 2005a)。而来自地幔的岩浆底侵到地壳深部或者参与花岗岩的成岩中,必然导致显著的地壳增生(Yang *et al.*, 2008a)。因此,在华北东部广泛发育的中生代大规模的岩浆活动(早白垩世最为强烈)、早白垩世成矿作用和伸展作用是克拉通破坏的浅部地质响应。

前文已提及,分布在华北东部的早白垩世 A 型花岗岩形成于伸展构造背景。在拉张环境下,压力的降低非常有利于源区岩石的部分熔融,同时岩石圈的减薄、岩石圈地幔性质的改变必然导致深部高温软流圈、岩石圈物质上涌和地幔岩浆的底侵,从而使地壳物质加热而进一步发生熔融。就早白垩世 A 型花岗岩而言,前面已经综述部分 A 型花岗岩来源于长英质的地壳浅部,其源区存在斜长石的残留(A 型花岗岩的贫 Ba、Sr 和 Eu 等元素),形成深度一般不会大于 30 km,但 A 型花岗质岩浆形成的温度要求较高(>900 °C),表明在早白垩世时期华北东部具有较高的地温梯度,这与华北东部大规模金成矿作用所表现的高地温梯度(Yang *et al.*, 2003)相吻合,而如此高的地温梯度是地幔物质上涌和地幔岩

浆底侵的结果.地幔岩浆不仅为 A 型花岗岩的形成提供了热源,而且野外地质观察和室内的地球化学分析表明地幔岩浆为 A 型花岗岩提供了大量的物质(Yang *et al.*, 2006, 2008b),甚至部分 A 型花岗岩及伴生碱性岩直接来源于地幔源区,从而导致在早白垩世时期在华北东部存在一期显著的地壳增生.因此,根据 A 型花岗岩的综合研究,笔者认为华北东部早白垩世 A 型花岗岩及伴生的碱性岩与华北东部岩石圈强烈减薄、克拉通破坏作用具有密切的成因联系,这些 A 型花岗岩是华北东部岩石圈强烈减薄、克拉通破坏作用的浅部响应.

虽然绝大部分学者认为华北岩石圈减薄发生在中新生代,但具体发生的时间存在三叠纪(Yang *et al.*, 2007a, 2007b)、侏罗纪—早白垩世(吴福元和孙德有, 1999; Yang *et al.*, 2003; Gao *et al.*, 2004)和晚白垩世—新生代(Fan *et al.*, 1992; Menzies *et al.*, 1993; Xu, 2001)等不同的认识.而根据中生代花岗岩的时、空分布特征研究,发现在晚三叠世,岩浆活动主要集中在胶东、辽东和朝鲜半岛(吴福元等, 2005b; Yang *et al.*, 2005, 2007c, 2007d; Wu *et al.*, 2007a),其他地区则鲜有分布,表明华北克拉通在晚三叠世由于大陆深俯冲作用的影响遭受了破坏,但破坏的范围仅限于与大别—苏鲁相邻的地区.侏罗纪岩浆活动主要分布在胶东、辽东和辽西地区(吴福元等, 2005b, 2006a; Yang *et al.*, 2005),并且绝大多数侏罗纪花岗岩和火山岩主要来源于地壳物质的熔融(Wu *et al.*, 2005a).早白垩世 I 型和 A 型花岗岩广泛分布于华北克拉通东部,且有大量地幔物质的加入(Yang *et al.*, 2004, 2007a, 2008b),反映在早白垩世时期华北东部发生了广泛的岩石圈改造和克拉通破坏作用.鉴于华北东部 A 型花岗岩主要集中在早白垩世,推断华北克拉通破坏的峰期可能为早白垩世.

4 结语

通过总结近年来有关华北克拉通东部 A 型花岗岩及碱性岩的资料,发现它们主要形成于早白垩世(130~110 Ma),并且源区具有多元性,是不同成分的岩浆经过分离结晶、岩浆混合作用形成;结合综合区域地球动力学研究,提出华北东部早白垩世 A 型花岗岩形成于地壳伸展环境,是岩石圈减薄和克拉通破坏的浅部地质响应,标志着华北东部岩石圈减薄和克拉通破坏作用的峰期.

A 型花岗岩及其伴生的碱性岩虽然只占花岗岩的一小部分,但它蕴含着大陆地壳生长、岩石圈演化等基础地质研究的重要信息.需要重点指出的是, A 型花岗岩的研究不是一个简单的野外采样和室内地球化学分析过程,需要进行多学科的深入研究和实质性的交叉融合综合研究.受知识背景等方面的限制,有些问题的讨论不够深刻,但希望能够引起国内同行的注意,以促进国内 A 型花岗岩和碱性岩的研究.

References

- Barbarin, B., 1990. Granitoids main petrogenetic classification in relation to origin and tectonic setting. *Geochemical Journal*, 25:227—238.
- Barbarin, B., 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46:605—626.
- Bedard, J., 1990. Enclaves from the A-type granite of the Megantic complex, White Mountain magma series: Clues to granite magmagenesis. *J. Geophys. Res.*, 95:17797—17819.
- Bonin, B., 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, 97:1—29.
- Bonin, B., Azzouni, S. A., Bussy, F., et al., 1998. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: Petrologic constraints and geodynamic settings. *Lithos*, 45(1—4):45—70.
- Carlson, R. W., Pearson, D. G., James, D. E., 2005. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle. *Rev. Geophys.*, 43, doi: 10.1029/2004RG000156.
- Chappell, B. W., White, A. J. R., 1992. I and S-type granites in the Lachlan fold belt. *Trans. Royal Soc. Edinburgh: Earth Sci.*, 83:1—26.
- Clemens, J. D., Holloway, J. R., White, A. J. R., 1986. Origin of an A-type granite: Experimental constraints. *American Mineralogist*, 71(3—4):317—324.
- Coleman, D. S., Frost, T. P., Glazner, A. F., 1992. Evidence from the Lamarck granodiorite for rapid Late Cretaceous crust formation in California. *Science*, 258(5090):1924—1926.
- Collins, W. J., Beams, S. D., White, A. J. R., et al., 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2):189—200.
- Creaser, R. A., Price, R. C., Wormald, R. J., 1991. A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model. *Geology*, 19:163—166.

- 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. 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, Memoirs*, 194: 171–198.
- Eby, G. N., 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26: 115–134.
- Eby, G. N., 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7): 641–644.
- Fan, W. M., Menzies, M. A., 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China. *Geotectonic et Metallogenia*, 16: 171–180.
- Förster, H. J., Tischendorf, G., Trumbull, R. B., 1997. An evaluation of the Rb vs. (Y+Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks. *Lithos*, 40: 261–293.
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892–897.
- Griffin, W. L., Zhang, A. D., O'Reilly, S. Y., et al., 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In: Flower, M. F. J., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. *Am. Geophys. Union, Washington D. C., Geodyn.*, 27: 107–126.
- Guo, C. L., Wu, F. Y., Yang, J. H., et al., 2004. The extensional setting of the Early Cretaceous magmatism in eastern China: Example from the Yinmawanshan pluton in southern Liaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1193–1204 (in Chinese with English abstract).
- Hawkesworth, C. J., Kemp, A. I. S., 2006. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution. *Chemical Geology*, 226 (3–4): 144–162.
- Jahn, B. M., Griffin, W. L., Windley, B. F., 2000. Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asian. *Tectonophysics*, 328: 1–227.
- Jordan, T. H., 1975. The continental tectosphere. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 13: 1–12.
- Kerr, A., Fryer, B. J., 1993. Nd isotopic evidence for crust-mantle interaction in the generation of A-type granitoid suites in Labrador, Canada. *Chem. Geol.*, 104: 39–60.
- King, P. L., White, A. J. R., Chappell, B. W., et al., 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia. *J. Petrol.*, 38(3): 371–391.
- Loisselle, M. C., Wones, D. R., 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geological Society of America*, 11: 468.
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *GSA Bull.*, 101(5): 635–643.
- Meng, Q. R., 2003. What drove Late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 369: 155–174.
- Menzies, M. A., Fan, W. M., Zhang, M., 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithosphere and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Pritchard, H. M., Alabaster, T., Harris, N. B. W., et al., eds., Magmatic processes and plate tectonics. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 76: 71–81.
- Mingram, B., Trumbull, R. B., Littman, S., et al., 2000. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis Ring complex, Namibia: Evidence for mixing of crust and mantle-derived components. *Lithos*, 54: 1–22.
- Mushkin, A., Navon, O., Halicz, L., et al., 2003. The petrogenesis of A-type magmas from the Amram massif, southern Israel. *Journal of Petrology*, 44 (5): 815–832.
- Patino Douce, A. E., 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. *Geology*, 25(8): 743–746.
- Pearce, J. A., 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19(4): 120–125.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956–983.
- Pitcher, W. S., 1997. The nature and origin of granite. Chapman and Hall, London, 1–386.
- Skjerlie, K. P., Johnston, A. D., 1992. Vapor-absent melting at 10 kbar of a biotite-and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites. *Geology*, 20(3): 263–266.
- Thompson, A. B., 1999. Some time-space relationships for crustal melting and granitic intrusion at various depths. In: Castro, A., Fernandez, C., Vigneresse, J. L., eds., Understanding granites: Integrating new and classical techniques. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 168: 7–25.

- Turner, S. P., Arnaud, N., Liu, J., et al., 1996. Post collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau; Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. *Journal of Petrology*, 37: 45—71.
- Turner, S. P., Foden, J. D., Morrison, R. S., 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma; An example from the Padthaway Ridge, South Australia. *Lithos*, 28: 151—179.
- Wang, Q., Zhao, Z. H., Xiong, X. L., 2000. The Ascertainment of Late Yanshanian A-type Granite in Tongbai-Dabie orogenic belt. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19: 297—315 (in Chinese with English abstract).
- Wei, C. S., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., 2001. Nd-Sr-O isotopic geochemistry constraints on the age and origin of the A-type granites in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 95—111 (in Chinese with English abstract).
- Wei, C. S., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., et al., 2002. Oxygen and neodymium isotope evidence for recycling of Juvenile crust in Northeast China. *Geology*, 30: 375—378.
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-type granites; Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407—419.
- Wu, F. Y., Han, R. H., Yang, J. H., et al., 2007a. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. *Chem. Geol.*, 238(3—4): 232—248.
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S. A., et al., 2003a. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66(3—4): 241—273.
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S. A., et al., 2003b. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67: 191—204.
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007b. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217—1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Lin, J. Q., Wilde, S. A., et al., 2005a. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 233: 103—119.
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China. *Changchun Uni. Sci. Tech.*, 29(4): 313—318 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Li, H. M., et al., 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187: 143—173.
- Wu, F. Y., Walker, R. J., Ren, X. W., et al., 2003c. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China. *Chem. Geol.*, 196(1—4): 107—129.
- Wu, F. Y., Walker, R. J., Yang, Y. H., et al., 2006b. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China craton. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 70: 5013—5034.
- Wu, F. Y., Yang, J. H., Liu, X. M., 2005b. Geochronological framework of the Mesozoic granitic magmatism in the Liaodong Peninsula, northeast China. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 305—317 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Yang, J. H., Zhang, Y. B., et al., 2006a. Emplacement ages of the Mesozoic granites in southeastern part of the western Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 315—325 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Z., Zheng, Y. F., Yan, J., et al., 2004. Source evolution relationship between A-type granites and mafic rocks from Shacun in Dabieshan. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1175—1184 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B. L., Wang, S. G., Han, B. F., et al., 1998. A-type granites with the character of enrichment and loss with particular reference to both suites of the Yanshan, North China and Wulunguhe, Northwest China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 34(2—3): 352—362 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B. L., Yan, G. H., Huang, F. S., et al., 1994. Rock-forming minerals and magmatic history of evolution and crystallization of Wulingshan A-type granitic complex. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 30(6): 703—716 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China; Evidence, timing and mechanism. *Phys. Chem. Earth. (A)*, 26: 747—757.
- Yan, G. H., Xu, B. L., Mu, B. L., et al., 2001. Characteristics and implications of Nd, Sr, Pb in Mesozoic Alkaline-rich intrusion in North China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 234—237 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., 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. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68:4469—4483.
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2005. Petrogenesis and tectonic significance of Early Cretaceous granitic magmatism in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, East China. *Chem. Geol.*, 222:200—231.
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granites, Northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence. *Lithos*, 89(1—2): 89—106.
- Yang, J. H., Wu, F. Y., 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. *Ore. Geol. Rev.*, 23: 125—152.
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S. A., et al., 2007a. Tracing magma mixing in granite genesis: In situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 153:177—190.
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2007b. 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. *GSA Bulletin*, 119(11): 1405—1414.
- Yang, J. H., Sun, J. F., Chen, F. K., et al., 2007c. Sources and petrogenesis of Late Triassic dolerite dikes in the Liaodong Peninsula: Implications for post-collisional lithosphere thinning of eastern North China craton. *J. Petrol.*, 48(10):1973—1997.
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S. A., et al., 2007d. Petrogenesis of Late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong Peninsula, North China craton. *Chem. Geol.*, 242(1—2):155—175.
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2008c. The extensional geodynamic setting of Early Cretaceous granitic intrusions in the eastern North China craton: Evidence from laser ablation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of K-bearing minerals. *Acta Petrologica Sinica*, 24: 1175—1184 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S. A., et al., 2008a. Mesozoic decratonization of the North China block. *Geology*, 36(6):467—470.
- Yang, J. H., Wu, F. Y., 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. *Journal of Petrology*, 49(2):315—351.
- Ying, J. F., Zhang, H. F., Sun, M., et al., 2007. Petrology and geochemistry of Zijinshan alkaline intrusive complex in Shanxi Province, western North China craton: Implication for magma mixing of different sources in an extensional regime. *Lithos*, 98(1—4):45—66.
- Zhang, H. F., 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 237:768—780.
- Zhao, G. T., Wang, D. Z., Cao, Q. C., 1997. The geochemistry and genesis of the Laoshan granitoids, Shandong Province. *Geological Journal of China Universities*, 3(1):1—15 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2007. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China craton: Peridotitic xenoliths from the 100 Ma Fuxin basalts and a regional synthesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71(2): 5203—5225.
- Zheng, J. P., 1999. Mesozoic-Cenozoic mantle replacement and lithospheric thinning beneath the eastern China. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhou, L., Chen, B., 2006. Petrogenesis and significance of the Hongshan syenitic pluton, South Taihang: Zircon SHRIMP U-Pb age, chemical compositions and Sr-Nd isotopes. *Progress in Natural Science*, 16(2):192—200.
- Zhou, L. D., Zhao, Z. H., 1994. Petrographic and petrochemical characteristics of alkali-rich intrusions in China. *Science in China (Ser. B)*, 24(10):1093—1101 (in Chinese).
- Zhou, T. X., Chen, J. F., Zhang, X., et al., 1995. Geochemistry of the North Huaiyang granite-syenite zone and its tectonic implication. *Geological Review*, 41(2):144—151 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 郭春丽, 吴福元, 杨进辉, 等, 2004. 中国东部早白垩世岩浆作用的伸展构造性质——以辽东半岛南部饮马湾山岩体为例. *岩石学报*, 20(5): 1193—1204.
- 王强, 赵振华, 熊小林, 2000. 桐柏—大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定. *岩石矿物学杂志*, 19: 297—315.
- 魏春生, 郑永飞, 赵子福, 2001. 中国东部 A 型花岗岩形成时代及物质来源的 Nd-Sr-O 同位素地球化学制约. *岩石学报*, 17(1): 95—111.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等, 2007b. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23(6): 1217—1238.
- 吴福元, 孙德有, 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. *长春科技大学学报*, 29(4): 313—318.

- 吴福元,杨进辉,柳小明,2005b.辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架.高校地质学报,11(3):305—317.
- 吴福元,杨进辉,张艳斌,等,2006a.辽西东南部中生代花岗岩的时代.岩石学报,22(2):315—325.
- 谢智,郑永飞,闫峻,等,2004.大别山沙村中生代 A 型花岗岩和基性岩的源区演化关系.岩石学报,20(5):1175—1184.
- 许保良,王式洸,韩宝福,等,1998.富集性和亏损性 A 型花岗岩——以华北燕山和新疆乌伦古河地区岩石为例.北京大学学报(自然科学版),34(2—3):352—362.
- 许保良,阎国瀚,黄福生,等,1994.雾灵山 A 型花岗岩系的矿物学特征及成因意义.北京大学学报(自然科学版),30(6):703—716.
- 阎国瀚,许保良,牟保磊,等,2001.中国北方中生代富碱侵入岩钨、锶、铅同位素特征及其意义.矿物岩石地球化学通报,20:234—237.
- 杨进辉,吴福元,钟孙霖,等,2008.华北东部早白垩世花岗岩侵位的伸展地球动力学背景:激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学证据.岩石学报,24:1175—1184.
- 赵广涛,王德滋,曹钦臣,1997.崂山花岗岩岩石地球化学与成因.高校地质学报,3(1):1—15.
- 郑建平,1999.中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄.武汉:中国地质大学出版社.
- 周玲棣,赵振华,1994.我国富碱侵入岩的岩石学和岩石化学特征.中国科学(B辑),24(10):1093—1101.
- 周泰禧,陈江峰,张翼,等,1995.北淮阳花岗岩—正长岩带地球化学特征及其大地构造意义.地质论评,41(2):144—151.