中国科学: 地球科学 2021 年 第 51 卷 第 9 期: 1558 ~ 1593
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

伸展构造与华北克拉通破坏——花岗岩磁组构和变质核杂岩的构造分析

林伟[1,2*], 曾纪培[1,2], 孟令通[1,2], 邱华标[1,3], 卫巍[1,2], 任志恒[4], 褚杨[1,2], 李双建[3], 宋超[2], 王清晨[1,2]

1. 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, 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029;
2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;
3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083;
4. 中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037
* 通讯作者, E-mail: linwei@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2020-10-30; 收修改稿日期: 2021-02-03; 接受日期: 2021-03-09; 网络版发表日期: 2021-08-02
国家重点研发计划"深地资源勘查开采"重点专项项目(编号: 2016YFC0600102和2016YFC0600401)和国家自然科学基金项目(批准号: 91855212，91755205，41872208)资助

摘要 中生代以来, 华北克拉通岩石圈发生大规模减薄, 岩石圈地幔的物理、化学性质发生显著改变, 这一过程通常被称为华北克拉通破坏. 目前在华北克拉通东部大规模发育的岩浆岩是岩石圈深部减薄过程在浅部的重要响应, 也是克拉通破坏在浅部的直接表现. 岩体侵位机制和侵位过程与大地构造背景密切相关, 并记录同期区域大地构造信息. 15年来, 通过对华北克拉通东部不同岩浆发育阶段(晚三叠世、早侏罗世、晚侏罗世、早白垩世早期及早白垩世晚期) 22个花岗岩体开展磁化率各向异性(AMS)的研究, 反演岩体的就位过程; 结合早白垩世早期广泛发育的变质核杂岩, 探讨岩体侵位的构造背景, 进一步约束华北克拉通在不同阶段的构造背景及其与克拉通破坏的相关性. 其中, 晚三叠世、早侏罗世和晚侏罗世岩体均具有一致的N(E)-S(W)向的磁线理, 早白垩世早期岩体和变质核杂岩以NW-SE向(磁)线理为主, 早白垩世晚期岩体的磁线理则比较分散. 结合区域构造, 我们推断晚三叠世、早侏罗世和晚侏罗世岩体侵位受区域N(E)-S(W)向弱伸展构造体系的控制, 早白垩世早期岩体侵位则受区域NW-SE向伸展构造体系的控制, 而早白垩世晚期岩体就位与先期浅表弱伸展已经产生空间相关. 总而言之, 华北克拉通中生代伸展构造经历了从N(E)-S(W)向NW-SE的转变, 并体现出阶段性由弱渐强的表现. 上述伸展构造发育方向的转变可能代表蒙古-鄂霍茨克带和古太平洋板块与欧亚大陆东部相互作用过程.

关键词 中生代花岗岩, 花岗岩各向异性, 华北克拉通东部, 伸展构造, 克拉通破坏

中文引用格式: 林伟, 曾纪培, 孟令通, 邱华标, 卫巍, 任志恒, 褚杨, 李双建, 宋超, 王清晨. 2021. 伸展构造与华北克拉通破坏——花岗岩磁组构和变质核杂岩的构造分析. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1558–1593, doi: 10.1360/SSTe-2020-0306
英文引用格式: Lin W, Zeng J, Meng L, Qiu H, Wei W, Ren Z, Chu Y, Li S, Song C, Wang Q. 2021. Extensional tectonics and North China Craton destruction: Insights from the magnetic susceptibility anisotropy (AMS) of granite and metamorphic core complex. Science China Earth Sciences, 64(9): 1557–1589, https://doi.org/10.1007/s11430-020-9754-1

© 2021 《中国科学》杂志社

1　引言

在古元古代晚期(1.8~1.9 Ga), 由新太古代和古元古代岩石组成的东部和西部陆块拼合, 形成华北克拉通(Zhao等, 2001, 2005; Faure等, 2007; 翟明国, 2011). 晚古生代-早中生代, 伴随着北部古亚洲洋和南部古特提斯洋闭合, 在华北克拉通北部和南部形成巨型中亚造山带和大别-苏鲁超高压造山带(Yin和Nie, 1996; Davis等, 2001; Xiao等, 2003; Faure等, 1999, 2003; Ratschbacher等, 2003; Hacker等, 2006; Kusky, 2011). 晚中生代, 伴随着更北部的蒙古-鄂霍茨克洋的闭合, 华北克拉通经历了复杂的收缩构造, 这种收缩构造最为明显的表现为燕山及其相邻地区广泛发育褶皱和冲断构造, 即通常所说的燕山运动(Wong, 1927, 1929; 赵越等, 2004; 董树文等, 2007; 张长厚等, 2011; 王瑜等, 2018). 早白垩世早期, 伴随着大规模岩浆活动和伸展构造, 华北克拉通岩石圈发生了显著的物理和化学特征变化: 古老的、富集的、难熔的岩石圈地幔被年轻的、亏损的所取代(徐义刚, 1999; Zhang等, 2000, 2003; Wu等, 2005, 2019), 从而失去了克拉通的稳定性, 这个过程通常被称为华北克拉通破坏(destruction, 吴福元等, 2008)或是去克拉通化(decratonization, Yang等, 2008a). 这一岩石圈尺度的地球动力学过程伴随着强烈的火山、岩浆和盆地的形成, 大型走滑断裂、陆块大规模旋转、大规模伸展穹隆(变质核杂岩)构造及成矿作用发育, 在全球极为罕见, 成为当前国际地球科学研究的热点问题和科学前沿(Liu等, 2004; Li等, 2012; Zhu等, 2017, 林伟等, 2019).

华北克拉通破坏的概念提出至今已十几年, 不同专业的科研人员对这一主题进行了非常深入的研究(郑永飞等, 2018; 朱日祥等, 2020及相关参考文献). 这些研究工作主要集中于岩石学、地球化学和地球物理, 并为华北克拉通岩石圈的改变提供了诸多证据(何丽娟等, 2001; 陈斌等, 2002; Lin等, 2005; Wu等, 2005, 2006; Yang等, 2005; Chen等, 2006; Priestley等, 2006; Zhai等, 2007; Zheng等, 2012). 关于克拉通破坏的动力学机制, 则争议更为鲜明, 目前提出的模型主要是两类: 热-化学侵蚀(郑建平, 1999; 徐义刚, 1999; 路凤香等, 2000; Zhang等, 2003)和拆沉(delamination)或沉坠(foundering)作用(邓晋福等, 1996, 2003; Gao等, 1998, 2002; 吴福元和孙德有, 1999; 吴福元等, 2000, 2003; Lin和Wang, 2006; Lin等, 2013a, 2013b, Lin和Wei, 2020). 此外, 还有学者认为其是岩石圈尺度拉张作用(陈斌等, 2002)、古太平洋板块发生俯冲回退作用(roll back)或斜向俯冲造成大陆一侧的伸展等(Davis等, 2002; Ren等, 2002; Zhu等, 2015).

地壳中发育的伸展构造是岩石圈深部减薄过程在浅部的重要响应, 也是克拉通破坏在浅部的直接表现(Lin和Wang, 2006). 广义的伸展构造包括伸展断层构造、断陷盆地、同构造岩浆穹隆、变质核杂岩、大规模发育的岩浆岩及相伴生的金属成矿等, 它们是区域伸展环境最直接的证据(图1, Liu等, 2005; 王涛等, 2007; Wang等, 2012; 朱日祥等, 2020). 其中, 大规模发育的岩浆岩作为华北中生代最为显著的表现, 其侵位机制和过程与大地构造背景密切相关, 可能记录了同期的区域大地构造信息(Wu等, 2019). 前人对侵位于不同构造体制下的岩体进行了系统的多学科研究, 并指出岩体侵位机制可能明显受控于区域构造, 岩体磁组构模式以及形态能够区分岩体侵位时所处的区域构造背景(例如, Bouchez和Gleizes, 1995; Aurejac等, 2004; Talbot等, 2004, 2005; Joly等, 2008; de Oliveira等, 2010; Wei等, 2014). 一般而言, 挤压体制下侵位的岩体, 由于受到区域挤压应力(σ_1)的影响, 其磁面理集中、陡立并垂直于区域压应力方向(Bouchez和Gleizes, 1995); 而伸展体制下侵位的岩体, 受到区域张应力(σ_3)作用, 岩体磁线理发育较为集中, 近水平展布, 且平行于区域张应力方向(Turrillot等, 2011); 在走滑体制下侵位的岩体, 由于岩体各部位结晶快慢有别, 在走滑作用影响下造成旋转程度具有相应的差别, 因而造成岩体磁组构分区, 区内组构统一, 区与区之间存在差别(Aurejac等, 2004); 在弱构造或无构造体制下侵位的岩体, 由于侵位过程未受明显的区域应力影响, 其组构为岩浆上涌作用的结果, 因而其磁组构呈同心圆状平行于岩体边界(de Oliveira等, 2010). 这些岩体的构造研究已经被广泛用于分析欧洲华力西造山带中发育的造山后岩浆作用及其侵位相关的构造体制的研究(如, Bouchez和Gleizes, 1995; Sant'Ovaia等, 2000; de Saint Blanquat等, 2011). 对岩体磁组构的研究, 可以揭示地质体的构造几何学特征, 进而反演岩体侵位过程的构造背景. 锆石U-Pb方法可以获得较为精确的岩体结晶年龄, 为我们确定(挤压或伸展)构造发生时间提供极为精确的限定. 华北克拉通东部发育的大量中生

代花岗岩类为我们了解中生代地壳演化提供了有效窗口(图1). 因此, 我们可以对侵位于华北克拉通的中生代岩浆岩进行系统的磁组构分析, 以期了解该地区中生代构造体制的演化.

前人对华北地区中生代岩浆作用进行了大量而深入的岩石学和同位素地球化学的研究. 从年代学上, 中生代岩浆作用大致可以划分为晚三叠世、早-中侏罗世、晚侏罗世及早白垩世四个峰值(图2). 相应地, 关于华北克拉通破坏开始的时间也存在晚三叠世(韩宝福等, 2004; Wu等, 2006)、侏罗纪(Griffin等, 1998; Gao等, 2002; Zhang等, 2005)、晚侏罗世-早白垩世(吴福元等, 2003; 翟明国等, 2003; Zhai等, 2007)、早白垩世(Wu等, 2005)、新生代(Menzies等, 1993; Xu, 2001)等不同的认识. 为此, 我们在华北克拉通内部选取了不同时代的花岗岩体, 通过对其开展磁化率各向异性(AMS)的研究, 探讨岩体的侵位机制, 进一步约束华北克拉通在不同时代的构造背景及其与华北克拉通破坏的关联性. 在研究过程中, 我们选取的岩体横跨华北克拉通东部, 即辽东、胶东、燕山和太行山地区(图1和表1). 尽可能选取区域上具有代表性(去除局部应力场的影响)、规模较大的岩体(除了北京东部的四干顶岩体外均大于100km^2)进行磁组构研究. 这些岩体在侵位时代方面反映区域岩浆作用较为活跃的时期, 并尽可能对这一岩浆活跃期的连续性表征进行刻画.

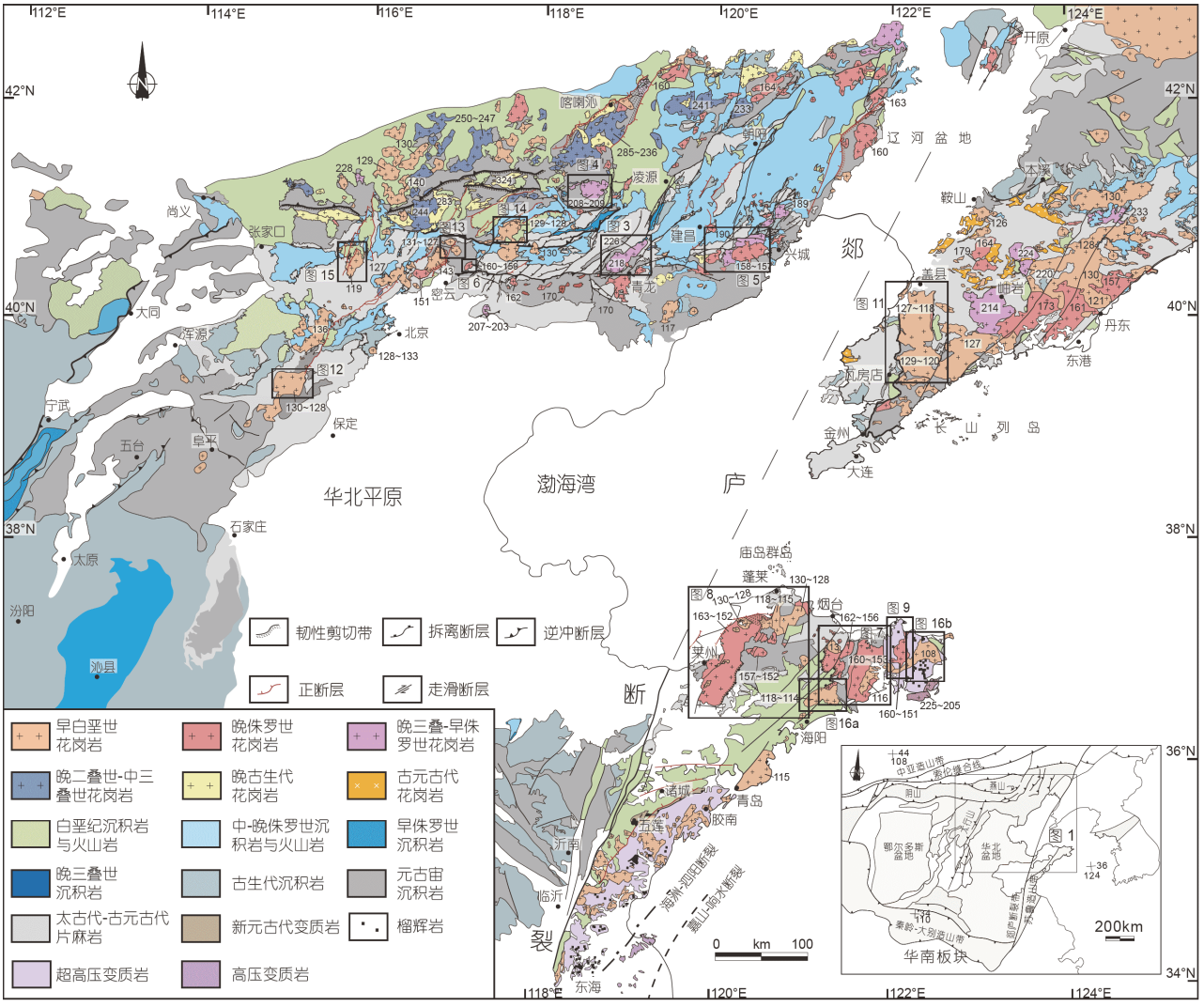

图 1　华北克拉通东部构造地质简图

图上的数字表示年龄(Ma)

表 1　华北克拉通东部磁化率各向异性研究岩体及围岩特征简表[a)]

岩体		出露面积 (km^2)	年龄(Ma)	样品		围岩	
名称	岩性			采样点	岩芯柱	岩性	侵位前构造线展布
都山	二长花岗岩	318	217.6±1.5	41	308	太古代片麻岩	近E-W走向(吴珍汉, 2000)
大石柱	花岗岩和花岗闪长岩	147	225.6±1.5	9		新元古代碳酸盐岩	
王土房	闪长岩	390	208.8±1.8	36	204	太古代片麻岩和混合岩	
	正长花岗岩		209±1.4				
旧门	二长花岗岩	385	189.9±2.7	35	467	新元古代-二叠纪沉积岩和太古代片麻岩	
碱厂		380	158~157	41			
四干顶	二长花岗岩和闪长岩	46	160~159	20	111	新太古-古元古片麻岩, 中-新元古界白云岩和砂岩	近E-W向(河北省地质矿产局, 1989)
昆嵛山	黑云母二长花岗岩	1210	160~153	47	299	新太古代-古元古代片麻岩和古元古代变沉积岩	近E-W走向(Li等, 2012)
鹊山		630	162~156	34	205		
玲珑		2440	163~152	59	395		
栾家河		138	157~152	10	61		
文登		310	160~151	29	167	晚三叠世超高压变质岩石	NE-SW走向(Faure等, 2003)
郭家岭	似斑状花岗闪长岩	414	130~128	42	246	晚侏罗世玲珑花岗岩和新太古代-古元古代片麻岩	NE-SW走向(Wu等, 2020)
丛家		113	130~128	14	102		
古道岭	黑云母二长花岗岩	1290	127~118	78	708	新太古代-古元古代片麻岩和古元古代变沉积岩	NE-SW走向(Charles等, 2012)
饮马湾山	似斑状花岗岩	760	129~120	50	403		
王安镇	花岗闪长岩和二长花岗岩	609	130~128	72	353	元古界白云岩和太古代片麻岩	NE-SW走向(河北省地质矿产局, 1989)
冯家峪和西白莲峪	二长花岗岩和闪长岩	126	131~127	41	243	新太古代-古元古代片麻岩	
古北口	花岗岩	350	129~128	42	252	晚侏罗世和早白垩世火山-沉积岩	
大海坨	石英二长岩和二长花岗岩	254	119±2	41	248	晚侏罗世火山-沉积岩和太古代片麻岩	近E-W走向(河北省地质矿产局, 1989)
海阳	似斑状花岗闪长岩	450	118~114	57	480	太古代片麻岩和早白垩世火山-沉积岩	NE-SW走向(Faure等, 2003)
韦德山		510	108±2	47	520	晚三叠世超高压变质岩石	
艾山		216	118~115	15	86	早白垩世郭家岭花岗岩、新太古代-古元古代片麻岩和古元古代变沉积岩	NE-SW走向(Wu等, 2020)

a) 年代学数据来源: Davis等(2001); Zhang等(2014); Zhu等(2015); 邱华标(2020); Meng和Lin(2021)

2　晚三叠世岩体磁组构特征

华北克拉通北缘晚三叠世构造背景目前仍存在较大争议. 传统上, 许多学者认为华北克拉通北缘晚三叠世经历了强烈南北向挤压变形, 导致华北北缘古元古界-古生界沉积盖层大规模剥蚀和太古代基底岩石广泛出露(Davis等, 2001), 并形成以上三叠统杏石口组为代表的东西向分布的粗碎屑沉积(赵越, 1990; 李忠等, 2003; Liu等, 2004, 2007). 而一些学者认为杏石口组粗碎屑沉积形成于伸展背景(Davis等, 2009; Hu等, 2010; Meng等, 2014, 2019). 同时, 克拉通北缘大规模出露了东西向展布的晚三叠世碱性杂岩带(包括霞石正长岩、石英正长岩和相关的基性-超基性岩). 碱性杂岩和基性-超基性岩主要来自于俯冲改造的富集岩石圈

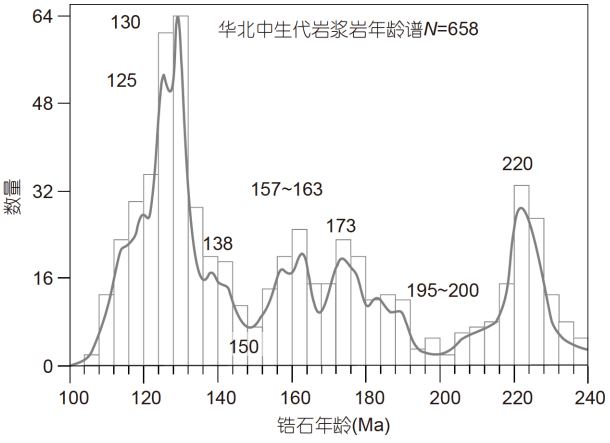

图 2　华北地区中生代岩浆作用年龄谱

数据来源: Davis等, 2001; 罗镇宽等, 2001a, 2001b, 2001c; Miao等, 2002; 毛景文等, 2003; 罗镇宽等, 2003; 韩宝福等, 2004; Deng等, 2004; 罗镇宽等, 2004; 吴福元等, 2005; 马寅生等, 2007; 田伟等, 2007; 黄华等, 2007; 吴福元等, 2008; 杨进辉等, 2008; Yang等, 2008a, 2008b; 代军治等, 2008; Zhang等, 2009; Davis和Darby, 2010; 刘胤, 2010; 王彦斌等, 2010; Zhang J等, 2010; Zhang X等, 2010; 蔡剑辉等, 2011; 侯万荣等, 2011; 邵济安和杨进辉, 2011; Wang T等, 2011; Ying等, 2011; Guo等, 2012; Li等, 2012; Liu等, 2012; Niu等, 2012; Yang J H等, 2012; Yang K F等, 2012; 付乐兵, 2012; Zhang S H等, 2012; Zhang X H等, 2012; 焦守涛等, 2013; Meng等, 2014; Zhang等, 2014; Zhao等, 2016; Xiong等, 2018; Jiang等, 2018

地幔和古老下地壳部分熔融，同时存在一些亏损软流圈地幔成分，被认为形成于伸展背景(Yan等, 1999; 牟保磊等, 2001; Niu等, 2012; Yang J H等, 2012; Zhang S H等, 2012; Zhang等, 2014). 同时，由于晚中生代多期强烈挤压变形, 早中生代盆地被强烈地肢解、改造, 仅有少量以残余盆地的形式表现出来(Meng等, 2019), 使得研究晚三叠世的区域构造分析存在较多的不确定性. 岩体由于侵位于中上地壳, 避免了浅表构造及剥蚀等不确定性的影响，最大可能地记录了地壳尺度的应力状态. 我们通过对晚三叠世极具代表性的都山岩体、大石柱岩体和王土房岩体的侵位机制开展研究, 以期揭示华北克拉通早中生代的构造背景.

2.1　都山岩体和大石柱岩体

都山岩体和大石柱岩体位于燕山褶皱冲断带中段马兰峪背斜东北部，在平面上呈椭圆状(图1). 都山岩体和大石柱岩体是燕山构造带内出露规模比较大的晚三叠世岩体. 其中都山岩体的SIMS锆石U-Pb年龄为(217.6±1.5)Ma，大石柱岩体的SIMS锆石U-Pb年龄为(225.6±1.5)Ma(邱华标, 2020). 都山岩体侵位于太古代片麻岩之中，岩体主要由二长花岗岩和黑云母二长花岗岩组成，二者之间没有清晰的边界. 都山岩体呈长轴为NE-SE向的椭圆形北东-南西向、长的椭圆形，长轴约30km，短轴约16km，出露面积约为318km^2，中部及其东北部主要为均质的花岗岩, 无明显的变形(图3). 向西南方向, 逐渐变为面理化的二长花岗岩, 甚至在西南边缘局部发育面理倾向SW、SE的糜棱岩. 糜棱岩化的花岗岩中发育NE-SW向的矿物拉伸线理(图3). 沿着垂直于面理、平行于矿物拉伸线理的方向, σ型的钾长石碎斑指示了上部向SW的剪切变形(邱华标, 2020). 值得注意的是，同样的糜棱状构造没有发育在靠近岩体正片麻岩所组成的围岩中. 从岩体西南边缘到北东, 逐渐由糜棱岩、片麻状花岗岩向均质的花岗岩过渡. 大石柱岩体呈约22km长、8km宽的矩形，出露面积约为147km^2，主要由花岗岩和花岗闪长岩组成，整体呈块状，仅局部发育弱的面理化(图3). 大石柱岩体主要侵位于新元古代的碳酸盐岩中，东北侧发育约1km宽的大理岩接触变质带.

除了都山岩体西南缘外，大石柱岩体和都山岩体的主体部分没有发生明显变形(图3). 有限的构造特征使我们无法从细节上进一步分析其构造几何学特征. 花岗岩各向异性的研究为我们了解其构造形态提供了有利的手段. 具体方法是使用便携式汽油钻机对都山和大石柱岩体进行了系统采样(后续的所有岩体均采取此类野外采样方式). 本次研究共获得50个采样点(都山岩体41个和大石柱岩体9个)，共计308个岩芯柱, 采样点间隔2~3km；每个采样点采取5~8个长约3cm、直径为2.5cm岩芯，相邻的岩芯相隔0.2~0.5m，并使用太阳罗盘对所采岩芯进行定向. 在实验室, 这些岩芯被切割为长2.2cm、直径为2.5cm的标准岩芯进行AMS分析测试. 本次研究测试在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁与年代学实验室完成(后续的所有岩体均采取此类野外采样及室内测试方式).

都山岩体和大石柱岩体磁组构分布图及赤平投影结果如图3所示. 在岩体南部和东部，磁面理总体以中等角度倾向SW、S或SE；在岩体北部，磁面理主要以高角度倾向NNW、NE、SW；在岩体的西部磁面理则以倾向NW为主. 整体而言, 磁面理以中-高角度向岩体外侧倾为主，平行于岩体边界展布，呈现长轴为NE-SW向的岩浆穹隆构造. 同时, 磁线理以中-低的倾伏角

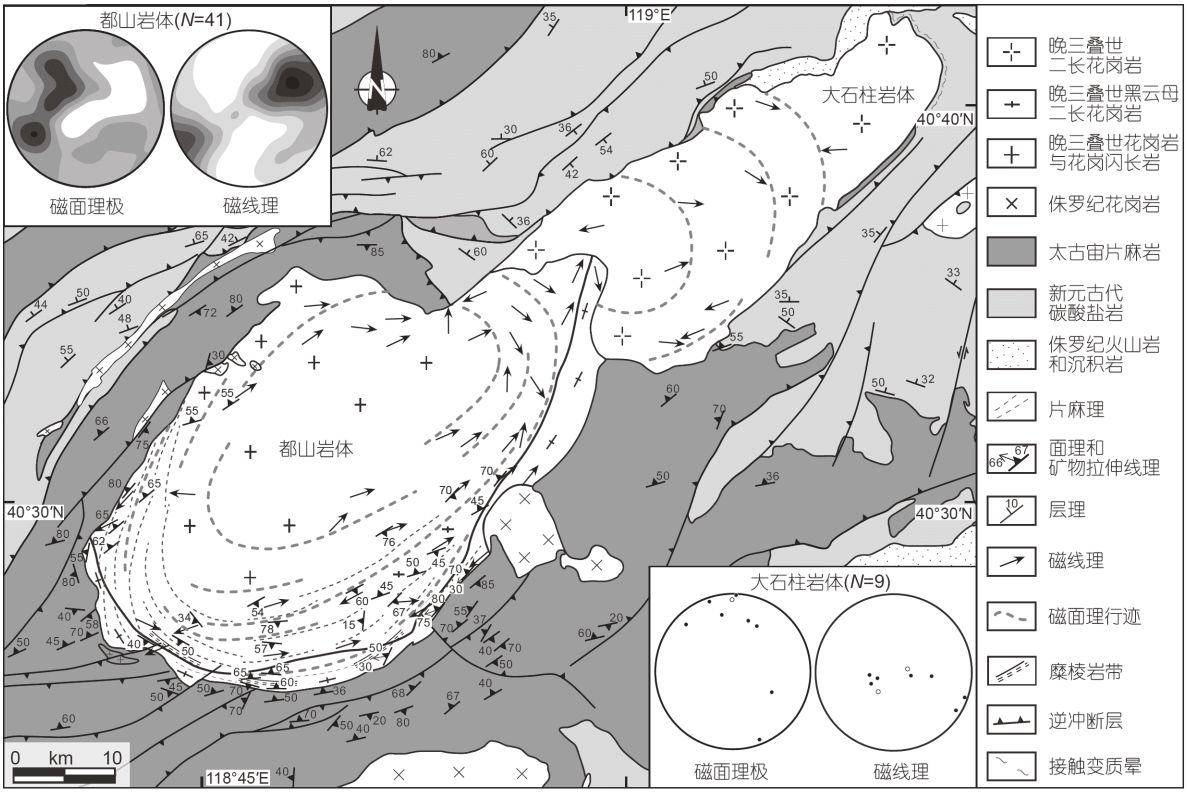

图 3　晚三叠世都山-大石柱岩体构造地质简图及其磁组构分布图

图中赤平投影为下半球等面积投影

为主，并具有一致的NE-SW的侧伏向，仅在岩体的东北部，磁线理较分散. 对于大石柱岩体而言，岩体的西南部具有陡立的磁面理，以倾向NW或SE为主，东北部磁面理则倾角变缓、倾向SW，且平行于岩体边界. 同时，大石柱岩体的磁线理则比较分散，仅在岩体东南部呈现一致的NE-SW向.

2.2　王土房岩体

王土房岩体位于燕山褶皱冲断带的中北部，呈一个半径约为12km的近似圆形，出露面积约390km^2(图1). 王土房岩体主要由西南部淡红色的正长花岗岩和东北部的深灰色闪长岩组成(图4)，其中正长花岗岩的SIMS锆石U-Pb年龄为(209.0±1.4)Ma，闪长岩的SIMS锆石U-Pb年龄为(208.8±1.8)Ma(Qiu等，2020). 岩体侵位于强烈面理化甚至糜棱岩化的片麻岩和混合岩中(图4). 靠近岩体，片麻岩的面理大致同岩体边界平行. 正长花岗岩和闪长岩表现为均质块状构造，未见由矿物定向形成的面状和线性构造. 王土房岩体36个采样点(共204个岩芯柱)的磁组构分布和赤平投影结果如图4所示. 其中，正长花岗岩磁面理和磁线理十分集中. 正长花岗岩的磁面理平行于岩体的边界分布，呈现同心环状的特征，大部分样品(70%)的磁面理近水平或具有低角度(3°~40°)的倾角，仅在岩体边界磁面理为中高角度(45°~70°). 同时，正长花岗岩具有一致近水平(9°~29°)NE-SW倾伏向的磁线理(图4). 而闪长岩的磁面理大致平行于岩体边界，但是倾角变化较大. 同时具有倾角变化大、分散的磁线理.

3　晚中生代早期(侏罗纪)岩体磁组构特征

华北克拉通晚侏罗世的构造背景(挤压或者伸展)存在较大的争议. 燕山西部的一系列东西向分布的晚侏罗世原型盆地沉积了一套陆相粗碎屑沉积，被认为是东西向尚义-平泉断裂的同构造沉积(刘少峰等，2018). 而位于燕山中部的承德地区的晚侏罗世近东西向的原型火山-沉积盆地被广泛认为形成于伸展背景

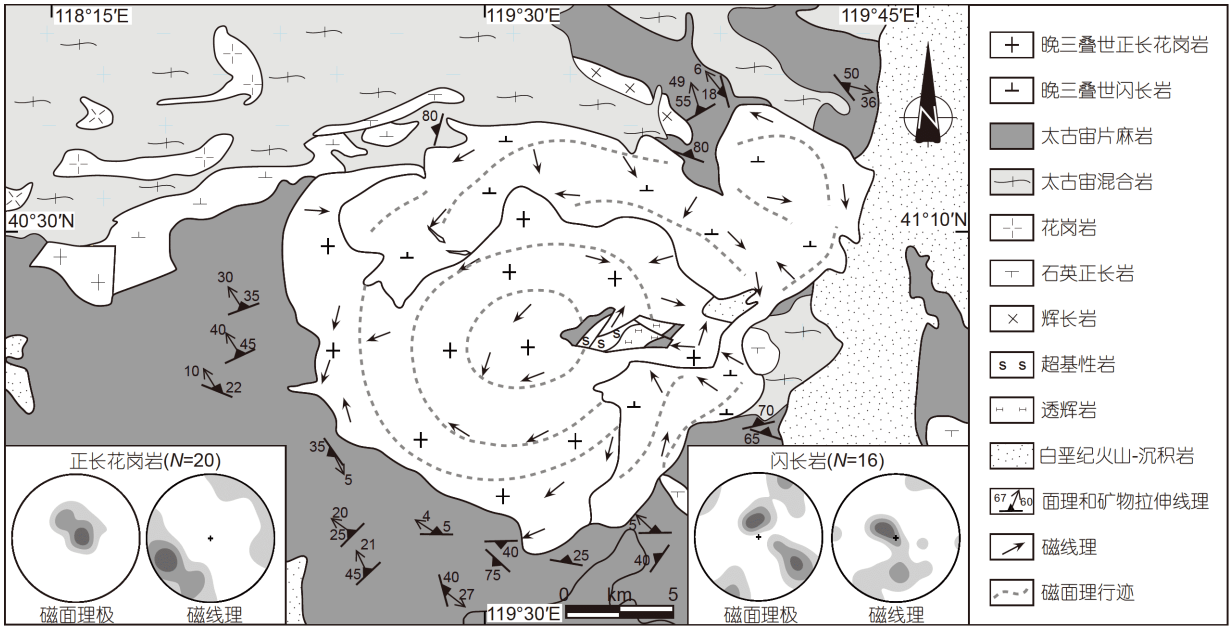

图 4　晚三叠世王土房岩体构造地质简图及其磁组构分布图

图中赤平投影为下半球等面积投影

(Davis等, 2001; Cope等, 2007; 孟庆任, 2017). 对于形成于中晚侏罗世的褶皱和逆冲断层的时限主要通过地层、岩体和岩脉与挤压构造之间的切割关系来确定, 因此获得年龄范围较为宽泛, 难以精确地限定变形时限, 这给晚侏罗世早期的地壳应变状态精确刻画造成了很大的困难, 从而导致意见不一(Davis和Darby, 2010; Wang Y等, 2011; Faure等, 2012; Li等, 2016). 侏罗纪的岩浆作用主要分布在燕山、辽东和胶东地区(图1). 这些岩浆主要起源于大陆地壳的部分熔融, 并使华北克拉通发生了改造(Wu等, 2005; Zhu等, 2012). 由于盆地所记录的为浅表层次的伸展构造, 而岩体的侵位则能够反映地壳尺度的构造状态. 因此, 我们希望通过对华北侏罗纪的花岗岩体的侵位机制进行研究, 为理解华北克拉通晚中生代早期的构造背景提供切实有效的数据.

3.1　碱厂-旧门岩体

碱厂-旧门岩体位于辽宁省西部, 构造位置处于燕山褶皱冲断带东段(图1), 由早侏罗世旧门岩体和晚侏罗世碱厂岩体组成, 总体呈NE-SW向长轴状展布. 西北侧的旧门岩体约385km^2, 主体由浅肉红色块状中细粒二长花岗岩组成; 东南侧的碱厂岩体约380km^2, 主要由二长花岗岩组成(崔芳华, 2015). 旧门岩体和碱厂岩体均为均质的块状构造, 面状和线性构造不发育, 主要的造岩矿物表现为自形或者半自形结构, 缺乏明显的优选定向. 前人对碱厂-旧门岩体的形成时代做了大量的年代学研究工作(吴福元等, 2005; 崔芳华, 2015), SIMS定年给出了旧门岩体((189.9±2.7)Ma)、碱厂岩体((157.4±2.3)~(158.3±2.8)Ma)更为精确的年龄(邱华标, 2020).

为了明确碱厂-旧门岩体的构造几何学特征, 我们对其开展了AMS研究, 共获得了76个采样点(其中, 旧门岩体35个采样点, 碱厂岩体41个采样点), 共计467个岩芯样品. 旧门岩体中部, 磁面理较陡; 在岩体的东北部和西南部则以中等角度倾向于NE或SW, 近平行于岩体的边界(图5). 磁线理则总体呈中-低角度, 在靠近岩体边界的地方变陡, 倾伏向的一致性并不明显, 缺乏较为明确的优势定向(图5). 碱厂岩体的磁面理呈中-高角度向岩体外侧倾, 即在岩体西部向W、SW倾, 向东逐渐变为向SE、E倾, 整体平行于岩体的东南边界, 呈弧形分布(图5). 岩体具有较为一致的、缓倾的、NE-SW向的磁线理(图5). 总体上, 碱厂-旧门岩体可分辨出两个方向的磁线理, 即早侏罗世旧门岩体具有N(W)-S(E)向的磁线理, 晚侏罗世的碱厂岩体具有NE-SW向的磁线理.

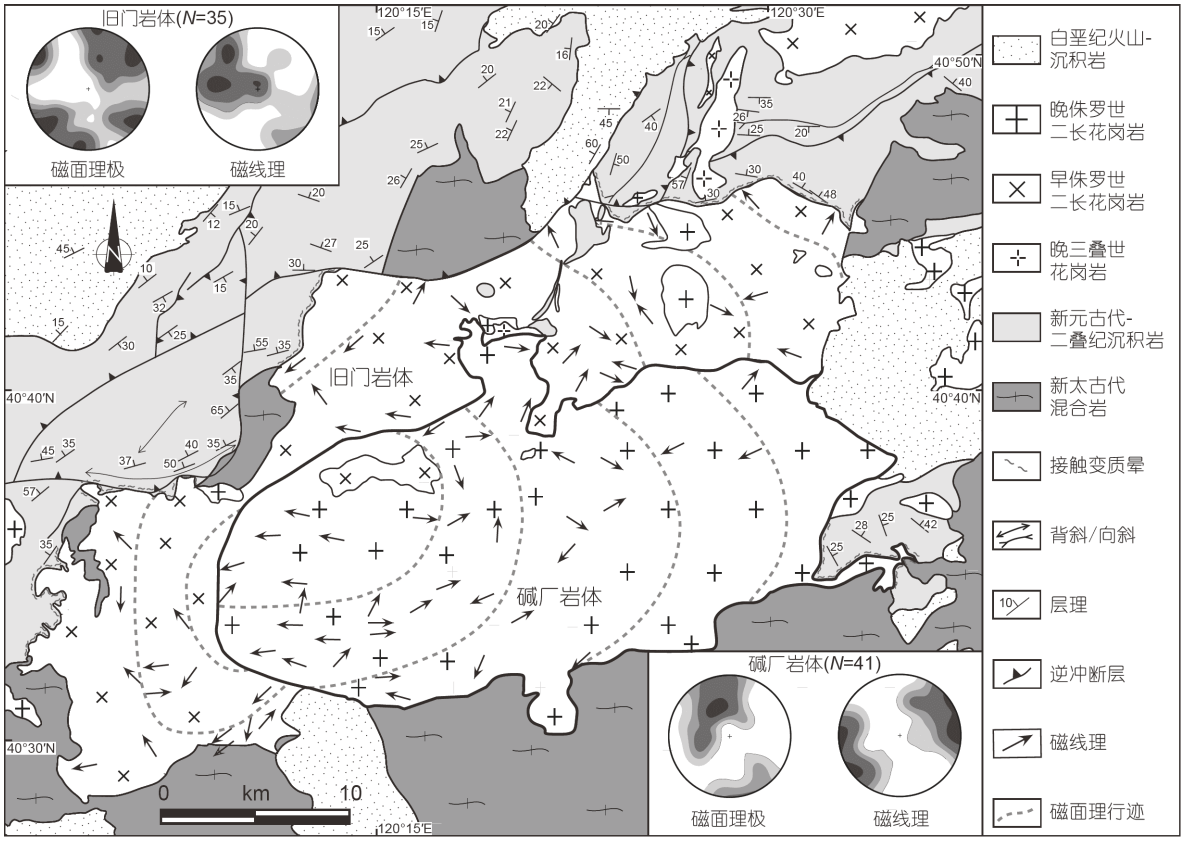

图 5　**早侏罗世碱厂岩体和晚侏罗世旧门岩体构造地质简图及其磁组构分布图**

图中赤平投影为下半球等面积投影

3.2　四干顶岩体

四干顶岩体位于北京密云水库东，构造位置位于褶皱冲断带西段(图1). 在平面上呈椭圆状的环状杂岩体, 出露面积约为46km^2. 围岩为元古宙白云岩、砂岩和页岩，太古宙片麻岩和混合岩(图6). 四干顶岩体从外到内主要由以下4个岩相组成: 石英闪长岩、石英二长闪长岩、石英二长岩和二长花岗岩(图6). 其中石英二长闪长岩和二长岩的锆石SHRIMP U-Pb年龄分别为(160±5)Ma和(159.3±1.9)Ma(Deng等, 2004; Zhang等, 2014). 此外二长花岗岩的角闪石压力计表明其结晶压力为1.19~1.76kbar, 对应的就位深度为4.2~5.1km (张拴宏等, 2007). 野外和室内显微构造观察表明四干顶岩体总体呈均匀的块状构造，由矿物定向形成的面状和线性构造均不发育.

我们对岩体开展了磁组构的研究，共获得20个采样点共计111个岩芯样品(Zeng等, 2021). 四干顶岩体的磁面理走向以NNE-SSW为主, 倾角均大于55°, 在岩体边缘较陡. 在地质图上磁面理与岩体边界近平行, 并呈环状向岩体外侧倾, 构成岩浆穹隆的几何学形态(图6). 同时, 四干顶岩体的磁线理主体呈NE-SW向, 并具有中等-低的倾角(14°~61°)(图6).

3.3　鹊山-昆嵛山岩体

鹊山岩体和昆嵛山岩体位于华北克拉通东部的胶东地区，前者呈不规则的菱形状，后者呈NNE-SSW向展布椭圆形，出露面积分别为630和1210km^2(图1). 二者均由黑云母二长花岗岩构成，锆石U-Pb年代学工作给出了162~153Ma的结果，代表了岩体的结晶年龄，即晚侏罗世(Hu等, 2004; 郭敬辉等, 2005; Zhang J等, 2010). 其围岩为新太古代-古元古代片麻岩和古元古代变沉积岩.

昆嵛山岩体北缘表现为片麻状花岗岩，局部可达糜棱岩化花岗岩. 面状构造主体以中等-低角度向N、NE或NNW倾，向东变为倾向E、(S)E，局部发育NE-

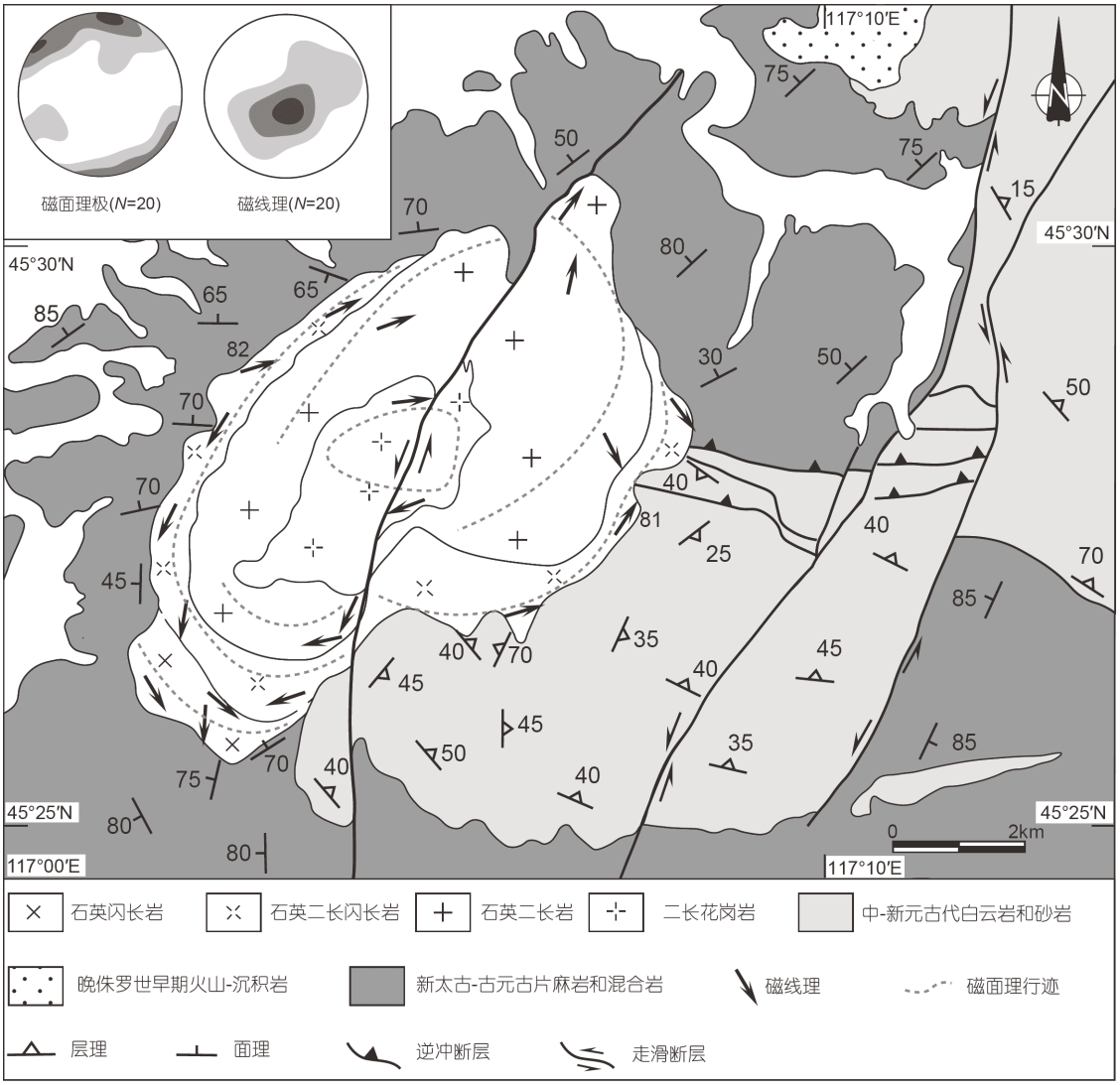

图 6　晚侏罗世四干顶岩体构造地质简图及其磁组构分布图

图中赤平投影为下半球等面积投影(修改自Zeng等, 2021)

SW向近水平的矿物拉伸线理(图7). 岩体北缘的围岩(片麻岩)也表现为NW-SE走向的面理, 且平行于岩体同围岩接触带, 并发育NE-SW向的线性构造(图7). 沿着NE-SW向的矿物拉伸线理, 片麻状花岗岩和片麻岩中发育的剪切标志指示了上部向NE的运动学特征. 同时, 显微组构和石英*c*轴组构揭示了该期韧性变形在花岗岩中具有较高的变形温度(550~650℃), 而在围岩(片麻岩)中具有低温变形(300~400℃)的特征. 同时, 在昆嵛山岩体北部, 岩体的磁面理主要表现为倾向NE或NNW, 倾角以中等-低角度为主(10°~55°), 并具有NNE-SSW向的、近水平的磁线理, 与野外观察到的面理和矿物拉伸线理相一致(图7). 在昆嵛山岩体的中部和南部, 岩体表现为均质的块状构造, 面状和线性构造不发育. 昆嵛山岩体中部的磁面理主体以中等-低角度倾向SE、SW, 磁线理的方向则比较分散; 昆嵛山岩体南部的磁面理以中等-高角度(45°~85°)倾向SE或NW, 磁线理表现为一致的ENE-WSE向, 并具有中等-低角度的倾伏角(图7). 从构造几何形态上, 昆嵛山岩体内部磁组构构成三个次级穹隆构造, 磁面理呈现出同心环状分布的特征, 磁线理则以(E)NE-(W)SW向为主. 结合岩体边部的变形特征和磁组构的整体特征, 我们认为岩体北缘的高温变形时代与岩体结晶时代相近,

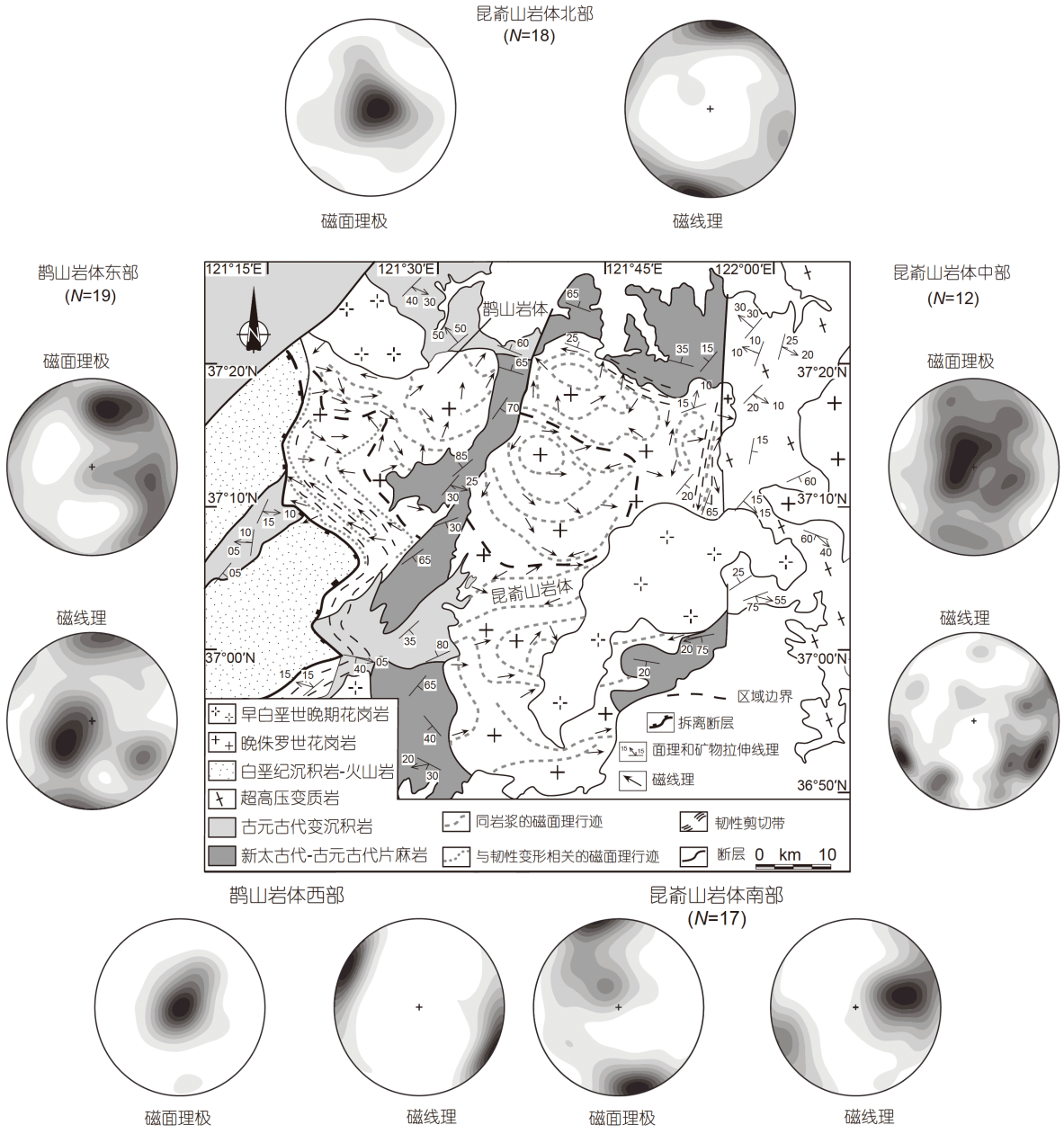

图 7　晚侏罗世鹊山-昆嵛山岩体构造地质简图及其磁组构分布图

图中赤平投影为下半球等面积投影

即晚侏罗世(Meng和Lin, 2021).

在鹊山岩体的西部, 花岗岩经历了强烈的韧性变形, 发育糜棱岩化. 糜棱岩面理表现为向SW、NW或WNW缓倾, 近平行于岩体边界(图7). 尽管面理有所变化, 但糜棱岩发育稳定的NW-SE向的矿物拉伸线理(图7). 无论在野外还是显微镜下, 糜棱岩中长石的旋转碎斑以及S-C组构均指示了上部向NW的剪切变形. 显微组构和石英*c*轴组构反映了该期变形具有低的变形温度(300~400℃). 结合前人对糜棱岩中黑云母和白云母的$^{40}Ar/^{39}Ar$定年结果(Li等, 2006; Zhang等, 2007; 吴林, 2014), 我们将其变形年龄限定在130~120Ma. 同时, 在鹊山岩体西部, 磁组构以近水平的磁面理和稳定的、近水平的、NW-SE向的磁线理为特征, 与糜棱面理和矿物拉伸线理一致(图7). 因而, 我们认为鹊山岩体西

部的磁组构遭受了早白垩世韧性变形的改造，代表了岩石的次生组构，不能用来讨论岩体就位时的应变状态. 而鹊山岩体的东部主体由均质的黑云母二长花岗岩构成，野外未观察到明显的面状和线性构造. 其磁面理主体倾向NE或SW, 倾角变化较大(20°~80°), 并具有较为分散的磁线理.

3.4 玲珑-栾家河岩体

玲珑岩体位于胶东半岛的西北部，出露面积约2440km^2，呈NE-SW向长轴状展布(图1). 玲珑岩体主体由黑云母二长花岗岩组成, 其围岩主要为新太古代-古元古代片麻岩和古元古代变沉积岩. 岩体北部为早白垩世郭家岭岩体所侵入(图8). 前人对玲珑岩体开展了大量的年代学研究工作，其中锆石U-Pb年代学工作给出了163~152Ma的结果，代表了岩体的结晶年龄，即晚侏罗世(苗来成等, 1998; Zhang J等, 2010; Yang K F等, 2012; Zhao等, 2016). 栾家河岩体位于玲珑岩体东侧2km处, 出露面积约为138km^2, 由黑云母二长花岗岩组成，侵位于新太古代-古元古代片麻岩之中(图8), 其侵位年龄为157~152Ma(苗来成等, 1998), 与玲珑岩

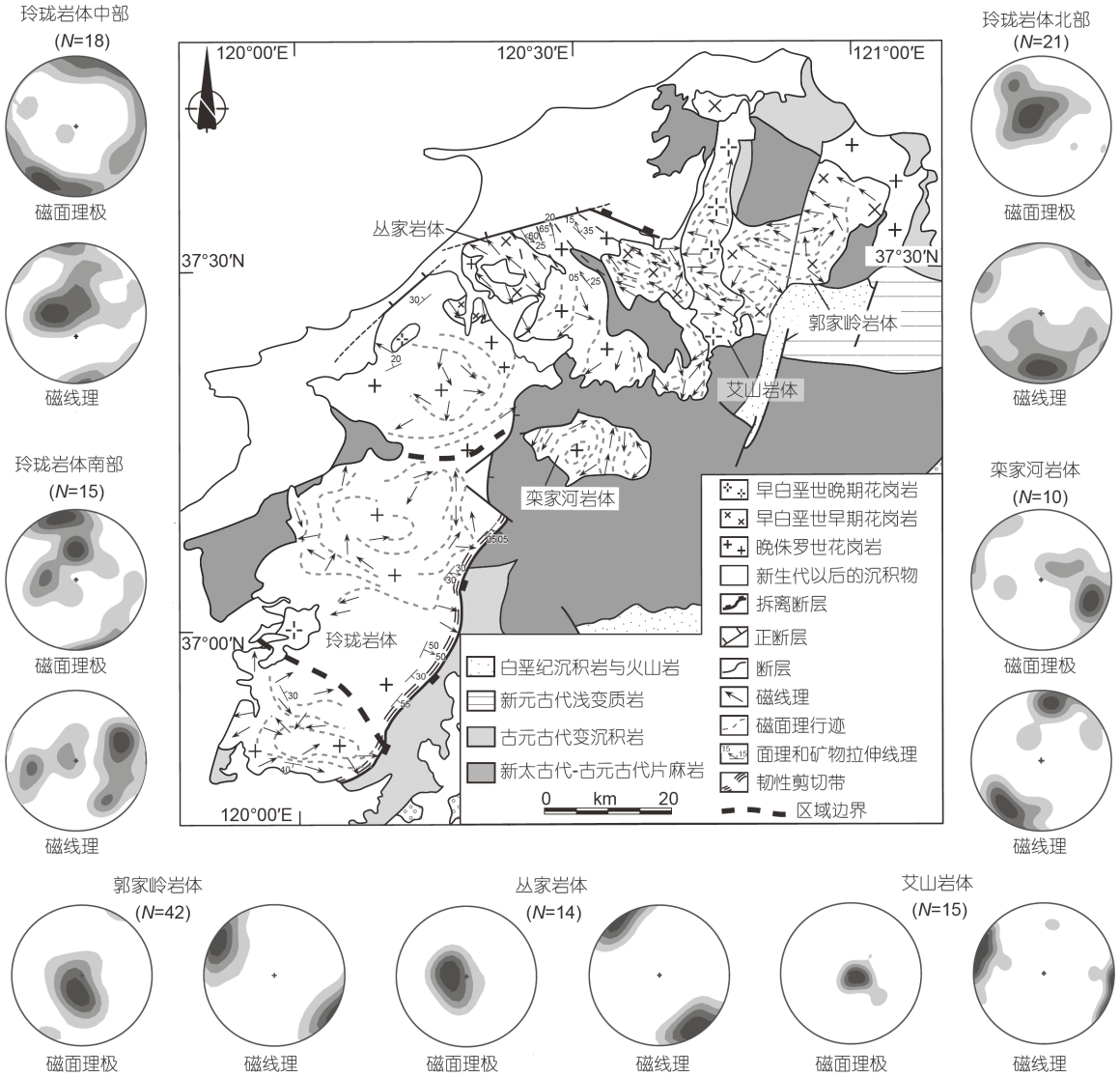

图 8　晚侏罗世玲珑岩体、早白垩世早期郭家岭岩体和早白垩世晚期艾山岩体构造地质简图及其磁组构分布图

图中赤平投影为下半球等面积投影

体形成时代相近.

栾家河岩体以及玲珑岩体内部表现为均质的花岗岩, 无明显的变形. 而在玲珑岩体的东南缘, 花岗岩表现出较强的应变状态, 体现了糜棱岩化的特点. 糜棱岩面理以中等角度(40°~60°)向SE倾斜, 面理上发育稳定的向SE(120°~150°)倾伏、倾伏角为30°~50°的矿物拉伸线理(图8). 平行于矿物拉伸线理, 糜棱岩中长石旋转碎斑、书斜构造和云母鱼指示了上部向SE的剪切变形. 镜下观察和石英*c*轴组构的研究表明这条韧性剪切带具有低温变形的特征(Wu等, 2020). 糜棱岩黑云母、白云母的$^{40}Ar/^{39}Ar$年代学给出了134~128Ma的冷却年龄, 进而解释其为早白垩世伸展构造背景下形成的拆离断层(Charles等, 2011a, 2013; Yang等, 2014; Wu等, 2020).

前人对玲珑花岗岩体的研究主要集中在岩体边缘与早白垩世伸展构造相关的变形, 但是对于岩体内部未变形岩石的组构却知之甚少. 为了明确玲珑花岗岩体晚侏罗世时期的构造几何学, 我们对其开展了磁组构研究(图8). 在玲珑岩体北部, 磁面理主体以中等-低角度(20°~50°)倾向SE、NE和SW, 磁线理较分散, 倾伏角变化较大; 玲珑岩体中部, 磁面理主要表现为高角度(60°~85°)倾向NE或SW, 磁线理则以高角度向NE、SW倾伏为特征; 玲珑岩体南部, 磁面理主要倾向NNW、SSE、NE, 倾角变化较大(20°~85°), 磁线理则主要呈现ENE-WSW向(图8). 整体而言, 玲珑岩体内部磁组构构成三个次级穹隆构造, 磁面理呈现出同心环状分布, 磁线理呈现出(E)NE-(W)SW的优势方位, 明显区别于玲珑岩体东侧NW-SE向的矿物拉伸线理. 同样, 栾家河岩体磁面理表现为向SE或NW陡倾, 并具有一致的、NE-SW向的、近水平的磁线理(图8).

3.5　文登岩体

文登岩体位于胶东半岛东部的北苏鲁超高压地体之中(图1). 岩体总体呈NE-SW向不规则的长轴状, 出露面积为310km^2, 主要由中粗粒的黑云母二长花岗岩组成, 侵位于晚三叠世超高压变质岩石中(图1和图9). 在野外, 文登岩体表现为均质的花岗岩, 面状和线性构造不发育. 主要的造岩矿物(长石、石英)为自形或者半自形, 缺乏明显的优选定向. 前人开展的年代学工作表明文登岩体结晶年龄为160~151Ma(郭敬辉等, 2005; Zhao等, 2016).

为了了解文登岩体的构造几何学特征, 我们对其采集了29组样品(167个岩芯柱)开展了AMS的研究工作. 在平面上, 文登岩体磁面理走向基本平行于岩体的边界, 并呈中-高角度(40°~80°)向岩体外侧倾, 整体呈现出同心环状分布的特征(图9). 大部分样品点磁线理的倾伏向与磁面理的走向近平行, 总体上平行于磁面理的行迹, 且倾伏角变化较大(图9). 在赤平投影图上, 磁面理极主要围绕大圆环边缘分布, 而磁线理构成了明显的NE-SW向的环带, 揭示了磁线理的优选方位为NE-SW向(图9).

4　晚中生代晚期(早白垩世早期)变质核杂岩及岩体磁组构特征

4.1　华北克拉通变质核杂岩的伸展构造特征

作为伸展构造的典型样式, 变质核杂岩广泛发育于华北克拉通及其周缘地区(图10; Lin和Wei, 2020及其相关的参考文献). 由于其将中下地壳的岩石拆离折返至地表, 为直接研究地壳中不同层次的岩石变形特征和构造演化过程提供了窗口, 是揭示克拉通破坏、岩石圈减薄过程中地壳响应最为有效的方法.

华北克拉通特别是其北部的阴山-燕山褶冲带发育有众多与区域伸展作用相关的变质核杂岩(图10; Zheng等, 1991; Davis等, 1996, 2001, 2002; Yin和Nie, 1996; Webb等, 1999; Han等, 2001; Darby等, 2004; 刘翠等, 2004; Liu等, 2005, 2013; Wang T等, 2004, 2011, 2012; 王新社和郑亚东, 2005; Lin和Wang, 2006; Lin等, 2007, 2008, 2011, 2013a, 2013b, 2015; Yang等, 2007; Davis和Darby, 2010; Charles等, 2011a; 林伟等, 2011, 2013; Guo等, 2011, 2012; Zhou等, 2012; Zhang B等, 2012; 林少泽等, 2014; Zhu等, 2015; 夏增明等, 2016; Yin等, 2017; Wu等, 2020). 除了喀喇沁岩浆穹隆外, 几乎所有的伸展穹隆均具有稳定而清晰的NW-SE向矿物拉伸线理及上部向SE或NW的运动学特征(Wang T等, 2011; Lin等, 2013a及相关的参考文献). 总体而言, 华北西部的变质核杂岩多在南东侧发育上部向SE的剪切指向的拆离断层, 而华北东部的变质核杂岩多在北西侧发育上部向NW的剪切指向的拆离断层. 两个构造单元的拆离断层几何学及运动学, 构成一定程度上的镜像对称. 这个构造特点可能反映了克拉通破坏过程中中地壳流变学特点的不均一性, 抑或是华北克

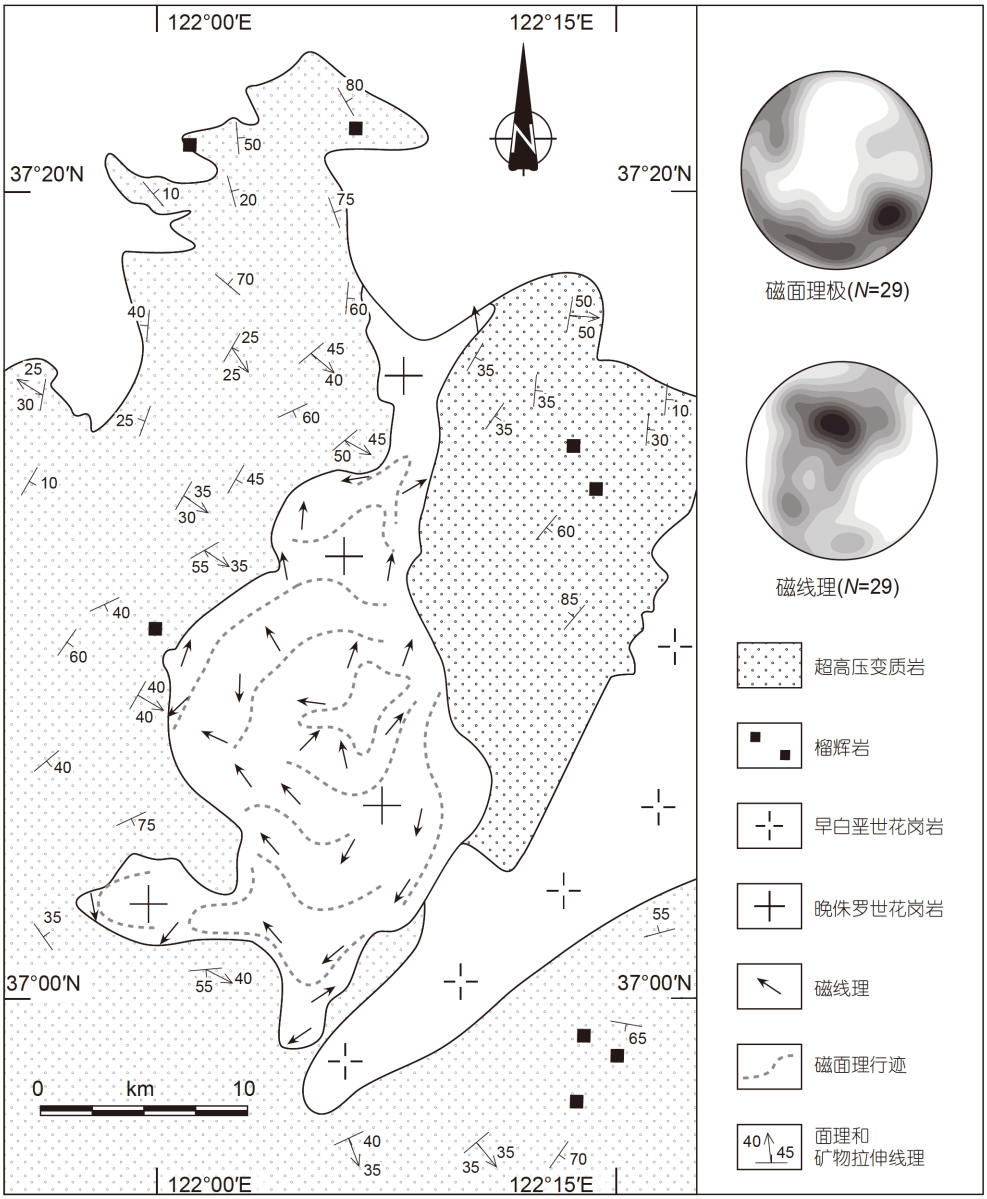

图 9　晚侏罗世文登岩体构造地质简图及其磁组构分布图

图中赤平投影为下半球等面积投影

拉通中地壳不同构造部位对破坏过程响应的不一致. 另外, 华北西部和东部的变质核杂岩除了具有构造几何学的对称性外, 还具有构造年代学的同时性(Lin和Wei, 2020). 纵观整个华北, $^{40}Ar/^{39}Ar$年龄所揭示出的变质核杂岩所代表的强烈伸展作用发生的时间都集中在早白垩世(Lin和Wei, 2020). 同时, 这一时间段内, 华北克拉通还广泛发育了大量花岗岩体, 它们的侵位也与区域伸展构造密切相关.

4.2　饮马湾山岩体

饮马湾山岩体位于华北克拉通东部的辽东半岛, 以近东西向椭圆形展布, 出露面积约为760km^2(图1). 饮马湾山岩体也是一个复式岩体, 内部为细粒似斑状花岗岩, 外部为中细粒黑云母二长花岗岩, 岩体的边缘存在明显的片麻岩化(图11). 饮马湾山不同岩相岩石的锆石U-Pb年龄为129~120Ma(郭春丽等, 2004;

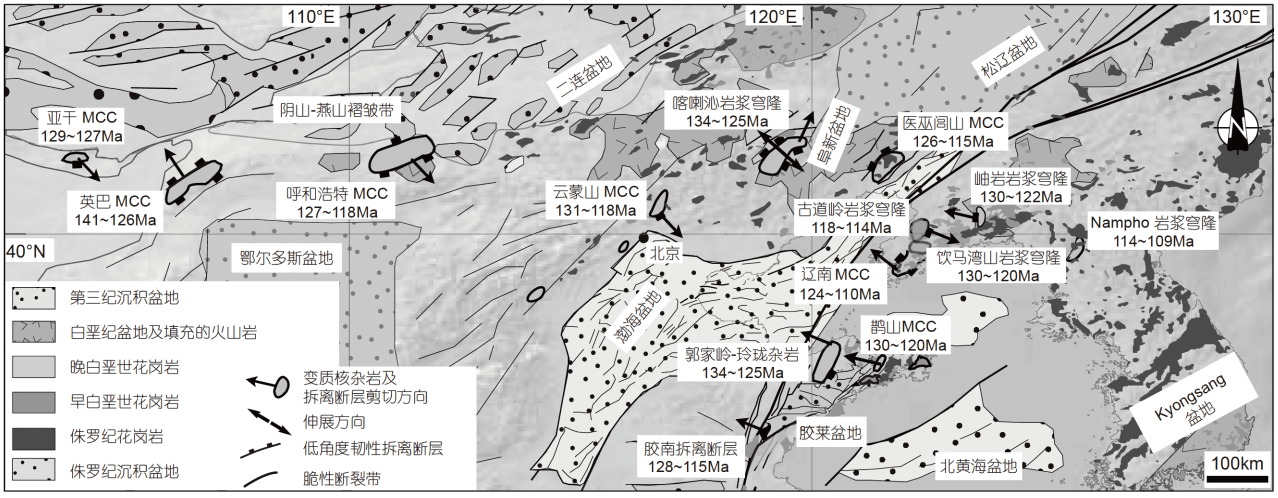

图 10　华北克拉通早白垩世伸展构造分布图

修改自Lin和Wei(2020)

吴福元等, 2005). 在岩体的东北部, 片麻状花岗岩指示了较强应变带的存在(图11). 沿着向东或北东缓倾的糜棱面理, 具NW-SE矿物拉伸线理展布(集中于110°左右; 图11). 无论在野外尺度, 还是在薄片尺度, 剪切标志均指示了糜棱岩具有上部向SE的运动学特征(林伟等, 2011). 同时, 饮马湾山岩体东缘的糜棱岩具有中-高温韧性变形特征(林伟等, 2011). AMS的研究工作揭示了饮马湾山岩体的磁面理具有同心环状分布、平行于岩体边界的特征, 岩体东部磁面理主体以中等-低角度倾向NNW、NE或SW, 向西磁面理主要以向NW、W倾为特征, 倾角变化较大(图11; Charles等, 2012). 同时, 在岩体东部靠近拆离断层的位置, 岩体表现出一致的近水平的W-E向的磁线理, 与野外观察到的矿物拉伸线理方向一致, 而在岩体西部, 磁线理较分散, 且倾伏角变化较大(图11; Charles等, 2012). 结合以上特征, 饮马湾山岩体被认为是同构造花岗岩, 进而认为其边缘韧性变形发育的时间与岩体侵位年龄相一致, 即早白垩世(Charles等, 2012).

4.3　郭家岭-丛家岩体

郭家岭-丛家岩体位于胶东半岛西北部玲珑岩体的北部, 前者呈E-W向的长轴状, 出露面积约为414km^2, 后者呈近椭圆状, 出露面积113km^2. 二者均由似斑状花岗闪长岩组成, 侵位于晚侏罗世玲珑花岗岩和新太古代-古元古代片麻岩之中(图8). 二者的锆石U-Pb年龄为130~128Ma, 代表其结晶年龄(Li等, 2019). 在郭家岭岩体西北部, 岩石面理化强烈, 局部可见糜棱岩. 面理主要倾向NE, 倾角变化较大, 并具有NW-SE向的矿物拉伸线理(图8). 无论是在野外露头尺度还是薄片尺度上, 该韧性变形具有上部向NW的剪切变形, 且具有较高的变形温度. 艾山岩体的侵入将郭家岭岩体分为了东部和西部. 在郭家岭岩体西部, 磁面理主体以中等-低角度向NE倾, 仅在其东南侧出现向SE或NW倾的磁面理; 在岩体东部, 磁面理主要以低角度向NNW或NE倾, 在其西南侧出现向SE倾的磁面理(图8). 同时, 岩体具有稳定的、中等-缓倾伏角(5°~50°)的、NW-SE向(280°~310°)的磁线理(图8), 与野外观察到的矿物拉伸线理相一致. 同样的, 丛家岩体的北部也经历了韧性变形, 发育向NE倾的面理、NW-SE向的矿物拉伸线理以及顶部向NW的剪切变形. 同时, 丛家岩体的磁面理以中等-低角度向NE或SE倾, 并发育近水平的NW-SE向的磁线理(图8). 结合以上特征, 我们解释郭家岭和丛家岩体为同构造岩体, 其边缘的韧性变形形成时代与岩体结晶年龄大致相近, 即早白垩世(Charles, 2010; Charles等, 2011a; Li等, 2019; Wu等, 2020). 此外, 丛家岩体具有130Ma(榍石U-Pb)到120Ma(黑云母^{40}Ar/^{39}Ar)的中等冷却速度, 也揭示了其边缘的韧性变形发生在早白垩世(Charles等, 2013; Jiang等, 2016).

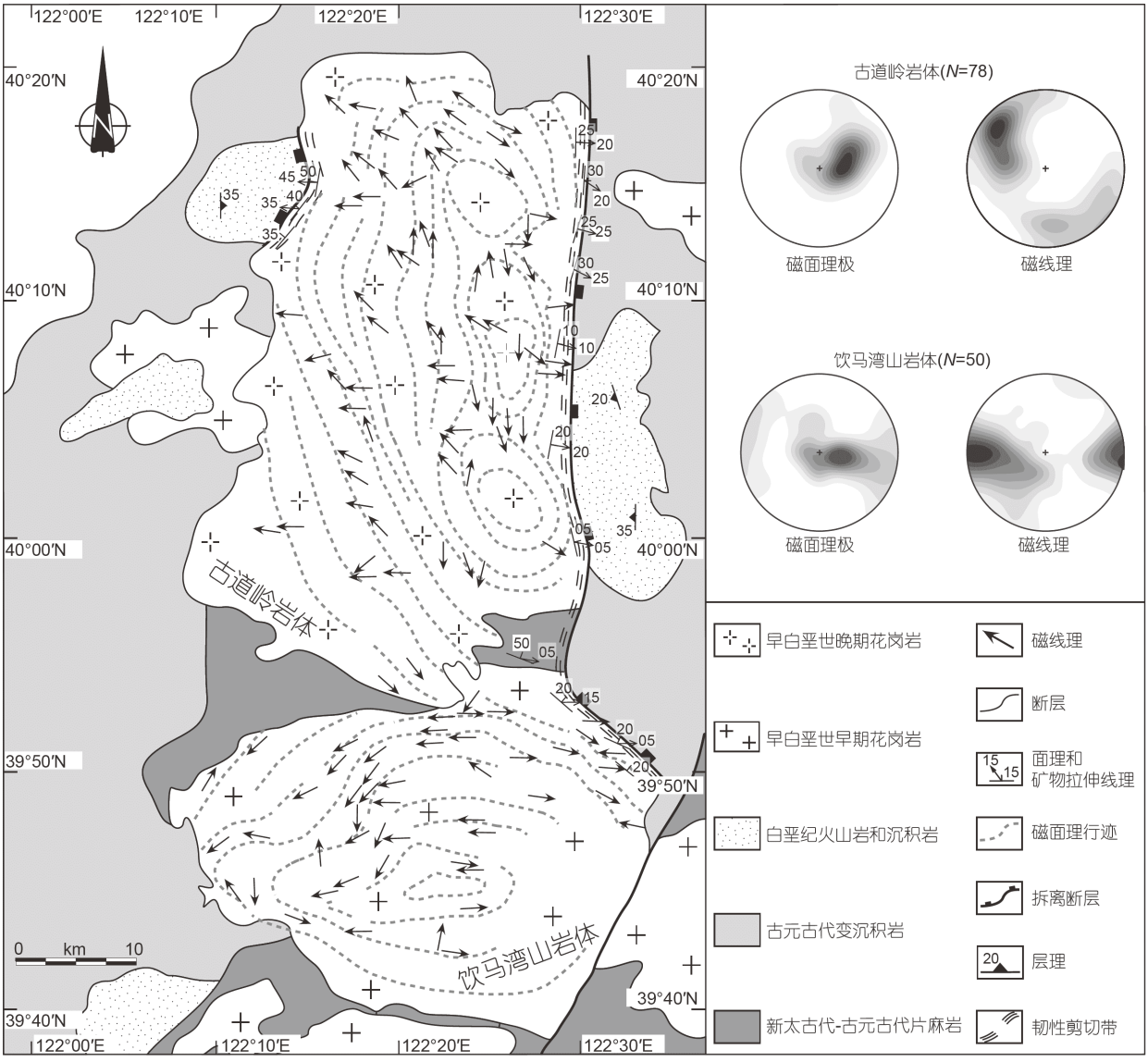

图 11　早白垩世早期饮马湾山、早白垩世晚期古道岭岩体构造地质简图及其磁组构分布图

修改自Charles等(2012). 图中赤平投影为下半球等面积投影

4.4　王安镇岩体

王安镇岩体位于北京西南150km处，是太行山山脉中面积最大、最具有代表性的一个中生代岩体，其面积约为609km^2(图1). 岩体的围岩主要形成于太古宙和元古宙. 太古宙片麻岩在岩体南部大面积出露, 北部相对较少，元古宙白云岩则几乎沿着岩体北、西、东侧出露(图12). 王安镇岩体是一个多期岩浆侵位形成的复式岩体，由边缘的花岗闪长岩和内部的二长花岗岩组成(张海东等，2016). 其中，内部的二长花岗岩的锆石U-Pb年龄为(128.3±1.9)Ma，边缘的花岗闪长岩锆石U-Pb年龄为(129.8±2.7)Ma(张海东等, 2016). 我们对王安镇岩体的72个采样点获得的353个岩芯进行了AMS测试工作. 结果表明，岩体的磁面理走向以NE-SW向为主, 倾向SE或NW, 倾角变化较大. 磁面理总体呈同心环状分布，构成长轴为NE-SW向的岩浆穹隆构造(图12). 同时, 边缘的花岗闪长岩和内部二长花岗岩的磁线理具有较大差异, 其中, 花岗闪长岩的磁线理以NW-SE向或近E-W向为主, 倾伏角比较陡(45°~70°); 而

低角度(5°~20°)的NE-SW向的磁线理在内部的二长花岗岩中普遍发育(图12).

4.5　冯家峪和西白莲峪岩体

冯家峪岩体和西白莲峪岩体位于北京密云县城以北20公里，云蒙山的东北缘，出露面积约为126km^2(图1). 岩体主要由石英二长闪长岩及少量的闪长岩组成，其中西白莲峪岩体的锆石U-Pb年龄为130Ma；冯家峪岩体的锆石U-Pb年龄为131~127Ma(Zhu等，2015)，两者在侵位时间上近于同时. 冯家峪岩体和西白莲峪岩体总体呈块状，未变形. 我们对冯家峪岩体和西白莲峪岩体的41个样品点共采集了243个岩芯，并进行了

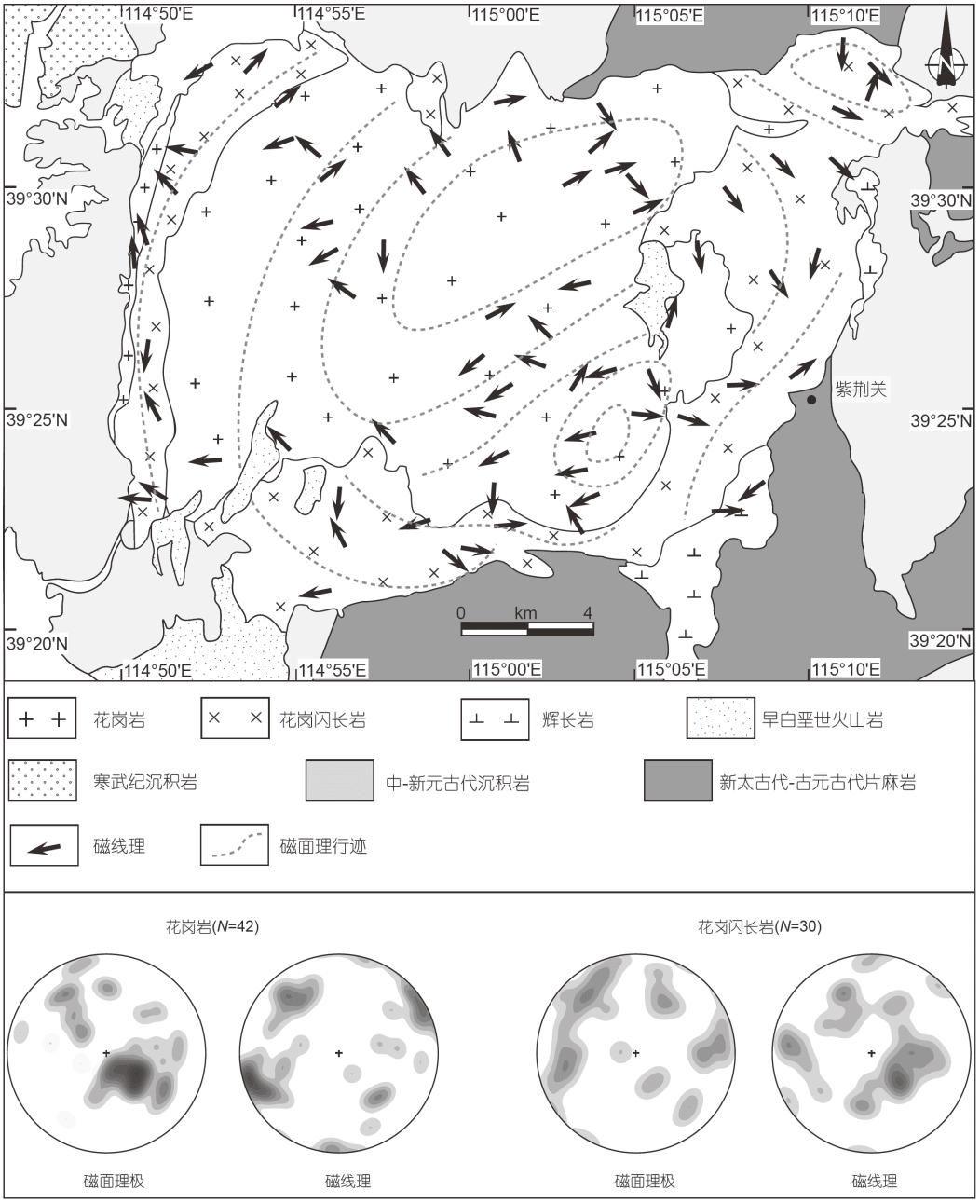

图 12　早白垩世早期王安镇岩体构造地质简图及其磁组构分布图

图中赤平投影为下半球等面积投影

AMS测试. 结果显示冯家峪岩体磁面理主体呈NE-SW走向, 仅在西南侧呈NW-SE走向, 磁面理倾角较陡, 多数在60°以上. 冯家峪岩体磁线理大部分呈ENE-WSW向, 倾伏角以中等-低角度为主, 局部位置出现NNW-SSE向的磁线理(图13). 总体上, 磁面理呈环状分布, 构成长轴为NE-SW向的岩浆穹隆构造, 同时具有与磁面理行迹近平行的磁线理(图13). 西白莲峪岩体磁面理与岩体边界大致平行, 呈向南开口的半环状. 磁面

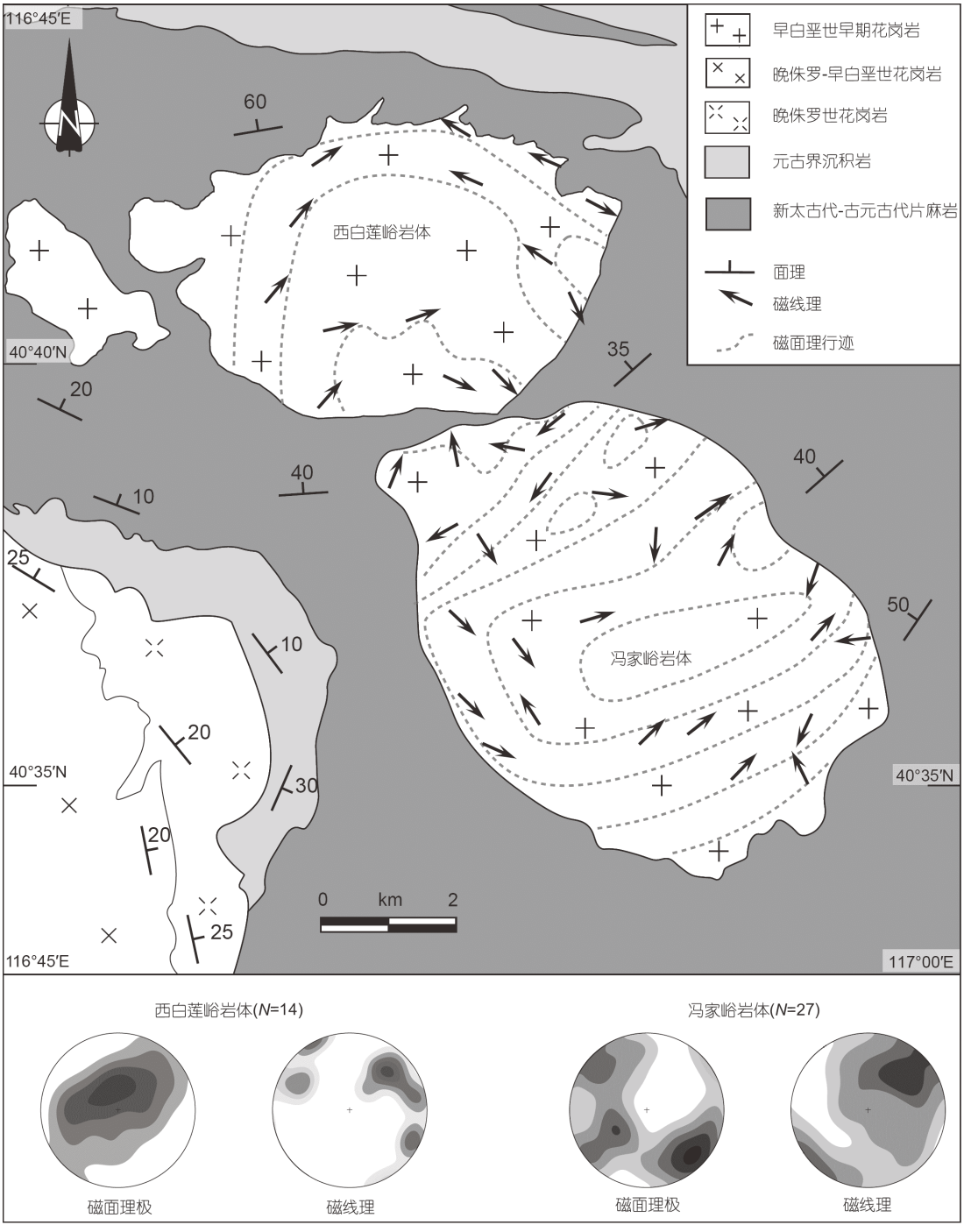

图 13　早白垩世早期冯家峪-西白莲峪岩体构造地质简图及其磁组构分布图

图中赤平投影为下半球等面积投影

理主要以中等-低角度(24°~60°)倾向SE(图13). 磁线理近水平, 其倾伏方向较分散, 但总体与磁面理走向近平行(图13).

4.6　古北口岩体

古北口岩体位于河北省滦平县境内, 燕山褶皱冲断带中段承德逆冲的西南部(图1). 岩体呈NE-SW向长轴展布, 面积约350km^2(图14). 岩体主要由粗粒斑状花岗岩组成, 岩体的锆石U-Pb年龄为129~128Ma(Davis等, 2001; Yang等, 2008b). 古北口岩体总体呈块状, 未发生明显变形. 对古北口岩体的42个样品点共252个岩芯进行了AMS测试(图14). 结果显示, 古北口岩体磁面理分布总体比较分散, 倾角呈中-低角度(9°~55°), 靠近岩体边缘变陡(62°~84°), 磁面理大致具有平行于岩体边界趋势(图14). 磁线理也比较分散, 具有中-低倾伏角(图14).

5　晚中生代晚期(早白垩世晚期)岩体磁组构特征

5.1　古道岭岩体

位于辽东半岛呈南北向展布的古道岭岩体, 出露面积约为1290km^2, 主要由南部(庙岭)石英闪长岩和古道岭二长花岗岩组成, 其中细粒黑云母二长花岗岩为古道岭岩体的主体(图11). 同位素年代学测量结果表明, 古道岭岩体的侵位时代为127~118Ma(吴福元等,

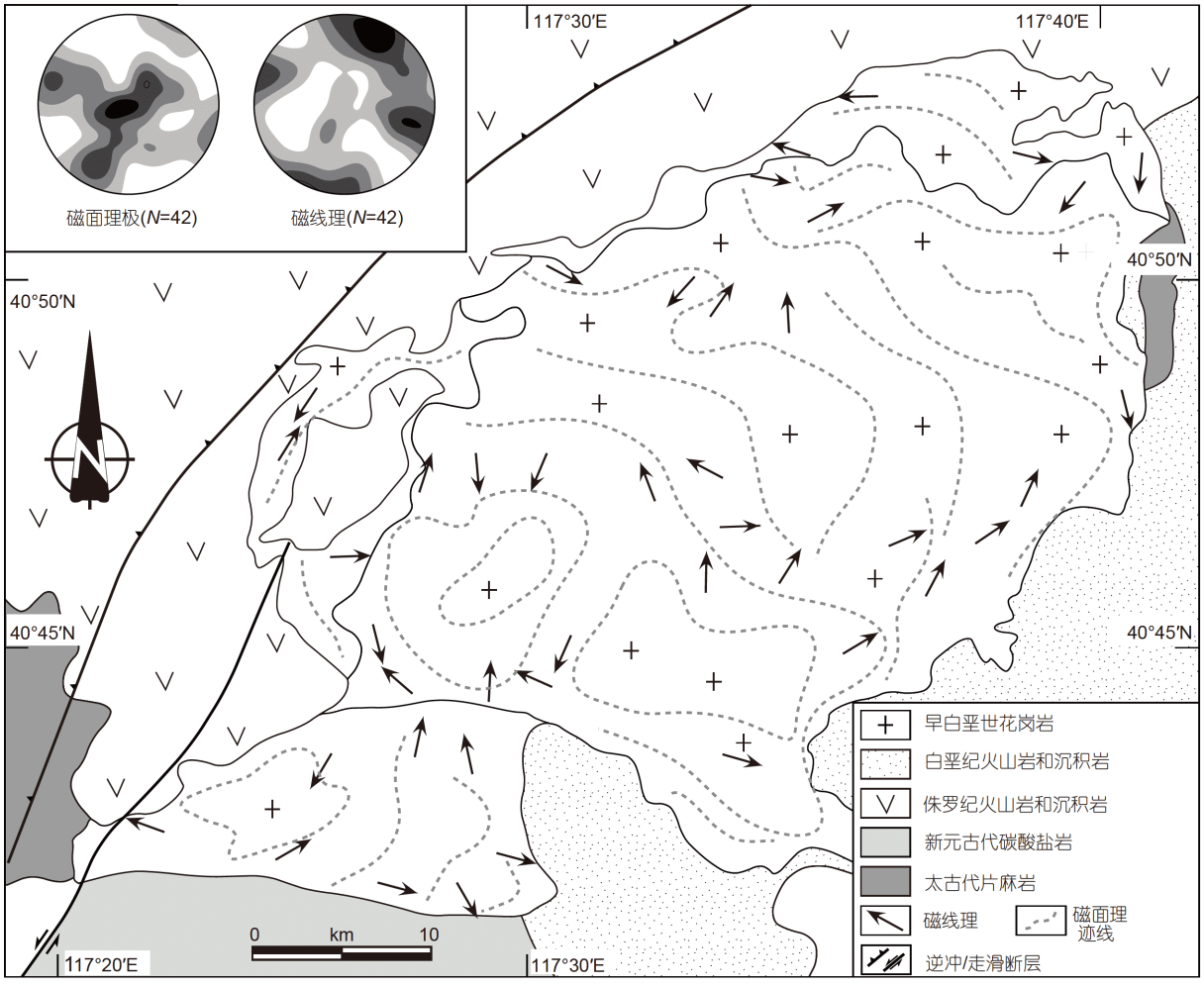

图 14　早白垩世早期古北口岩体构造地质简图及其磁组构分布图

图中赤平投影为下半球等面积投影

2005; 杨进辉等, 2008). 野外观察表明, 在岩体的东部, 沿着其与万福盆地的边缘, 强烈剪切变形的花岗岩指示了糜棱岩带的存在(图11). 沿着向东缓倾的糜棱面理(10°~30°), 具WNW-ESE展布的矿物拉伸线理(集中于100°左右; 图11). 岩石变形分析表明, 无论是野外露头尺度还是薄片尺度上, 其运动学均是上部向SE的剪切变形(林伟等, 2011). 详细的年代学研究表明, 构造变形的时间大致为118~112Ma(杨进辉等, 2008). 同时, 古道岭岩体的磁面理走向为N-S向或NNW-SSE向, 以中等-缓角度(10°~50°)倾向W或WSW; 大部分样品具有一致的、近水平的、E-W向或NW-SE向的磁线理(图11; Charles等, 2012). 事实上, 岩体高温变形的特征指示了古道岭岩体为伸展构造背景下的同构造花岗岩.

5.2 大海坨岩体

大海坨岩体位于河北省怀来县与北京市延庆县交界处, 构造位置上位于燕山褶皱冲断带的西段, 出露面积约254km^2(图1). 该岩体为大型复式岩体, 由石英二长岩、似斑状及中粗粒的二长花岗岩及中细粒花岗岩组成. 岩体的TIMS锆石U-Pb年龄为119Ma(Davis等, 2001). 岩体总体呈块状, 未变形. 我们对大海坨岩体的40个采样点共采集了248个岩芯进行了AMS分析(图15). 结果显示, 大海坨岩体的磁面理以NE-SW走向、倾向NW为主, 仅在岩体西南缘呈NW-SE走向, 总体与岩体边界近平行. 磁面理倾角在岩体边缘多为高角度(>60°), 而在岩体内部以中-低角度(8°~37°)为主. 磁线理较为分散、无一致的方向, 倾伏角在岩体边部呈中等角度(40°~60°), 而在岩体内部主要为低角度(1°~33°). 整体而言, 大海坨岩体内部磁组构构成了长轴为NE-SW走向的岩浆穹隆构造(图15).

5.3 艾山岩体

位于胶东半岛西部, 出露面积约为216km^2, 侵入于郭家岭岩体之中的艾山岩体由似斑状正长花岗岩组成(图8), 同位素年代学结果表明其结晶年龄为118~115Ma(Goss等, 2010; Li等, 2019). 岩石表现为均一的块状构造, 没有发育明显面状和线性构造. 长石和石英等矿物表现为自形或者半自形结构, 呈现出典型的岩浆组构, 而缺乏明显的优选定向. 在岩体北部, 磁面理主要以中等-低角度(15°~45°)向NW倾, 向南逐渐变为以缓角度(10°~30°)向NE或SW倾(图8). 在地质图上, 磁面理呈现出近S-N向的弧形分布, 大致与岩体的边界相平行, 明显区别于郭家岭岩体近W-E向的磁面理(图8). 同时, 艾山岩体具有一致的、近水平的、NW-SE向的磁线理(图8).

5.4 海阳岩体

海阳岩体位于胶东半岛西南部. 岩体总体呈E-W向不规则的长轴状, 出露面积约450km^2, 岩体主要由似斑状花岗闪长岩组成(图1和图16a). 在其东北侧, 岩体与新太古代-古元古代片麻岩呈侵入接触关系, 而在其北部、西部和南部, 岩体与早白垩世火山-沉积岩呈侵入接触关系(图16a). 锆石U-Pb结果表明其结晶年龄为118~114Ma(张田和张岳桥, 2007; Charles等, 2011b). 在野外, 海阳岩体表现为均质的花岗岩, 没有发育明显面状和线性构造. 长石和石英等矿物表现为自形或者半自形结构, 呈现出典型的岩浆组构, 而缺乏明显的优选定向. AMS的研究工作表明海阳岩体以近水平的磁面理为特征, 仅在边缘有个别陡的磁面理出现(图16a; Charles, 2010). 在岩体南部, 磁面理主要表现为倾向SW, 而在岩体的北部, 磁面理以倾向NW或NE为主, 在岩体中部, 磁面理分布较分散; 在地质图上磁面理行迹呈同心环状分布且平行于岩体边界(图16a; Charles, 2010). 同时, 海阳岩体具有近水平的磁线理, 且磁线理倾伏向较为分散, 在赤平投影图上主要沿着大圆环的边缘分布(图16a; Charles, 2010).

5.5 伟德山岩体

伟德山岩体位于胶东半岛最东端, 呈近椭圆状出露于北苏鲁地体之中, 出露面积为510km^2, 主要由似斑状花岗闪长岩组成, 侵位于晚三叠世超高压变质岩石中(图1和图16b). 锆石U-Pb结果表明其结晶年龄为(108±2)Ma(郭敬辉等, 2005; 李杰等, 2018). 在野外, 伟德山岩体表现为均质的花岗岩, 没有发生明显的韧性变形, 面状和线性构造不发育, 同围岩呈侵入接触关系. 主要的造岩矿物(长石、石英)为自形或者半自形, 缺乏明显的优选定向. AMS的研究工作表明伟德山岩体的磁面理主体表现为以中等-低角度(10°~40°)倾向NE或SW, 在地质图上磁面理行迹呈同心环状分布且平行于岩体边界, 而且其磁线理倾伏向比较分散并具有较小的倾伏角(图16b; Charles, 2010).

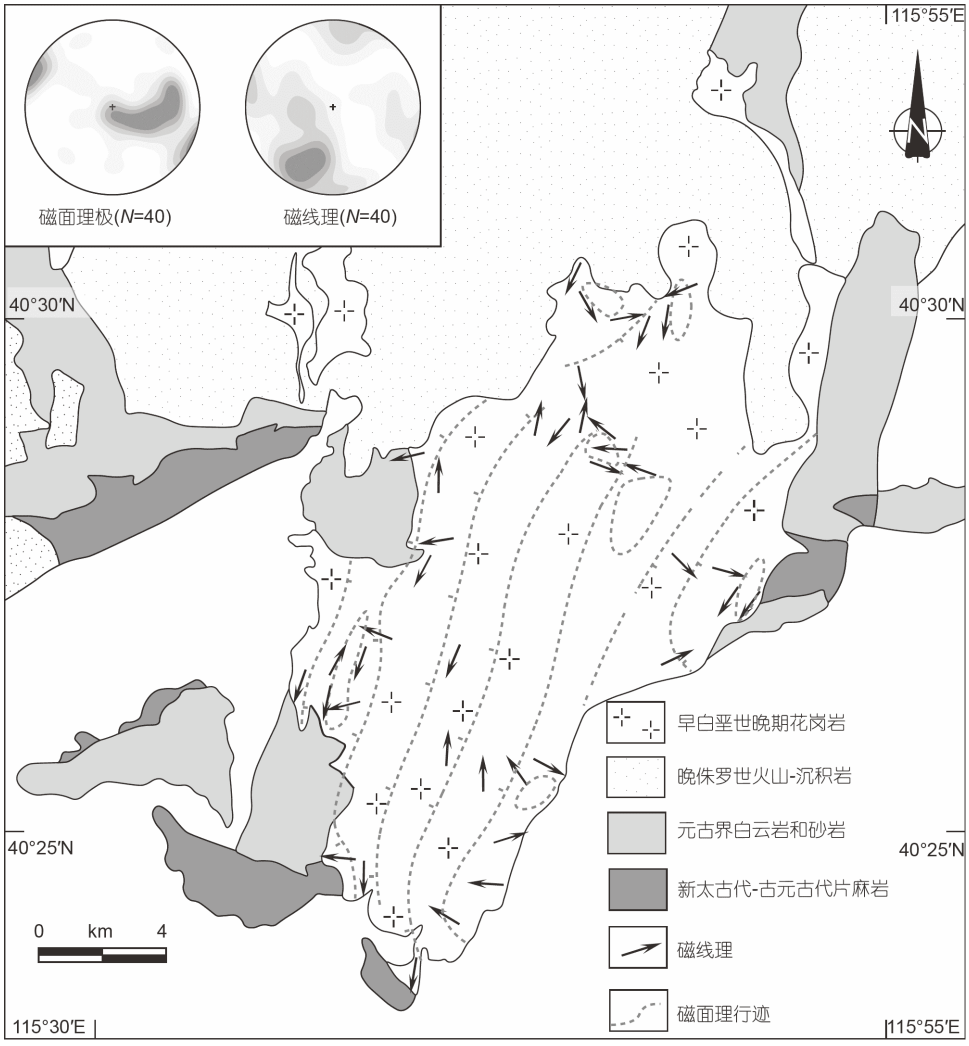

图 15　早白垩世晚期大海坨岩体构造地质简图及其磁组构分布图

图中赤平投影为下半球等面积投影

6　讨论

AMS对岩体侵位的记录，能够反映区域构造演化的信息. 通过对华北克拉通中生代不同岩浆阶段选取的岩体磁组构研究，我们讨论了岩体侵位特征与区域构造之间的关系(图17、图18和图19)，并进一步讨论了动力学机制(图20).

6.1　晚三叠世岩体磁组构特征及其侵位所代表的NE-SW向伸展构造及其机制

对于燕山褶皱冲断带中晚三叠世大石柱、都山和王土房岩体而言，除了在都山岩体东南缘发育面理化外，三个岩体总体呈现出均一的块状构造，表现出典型的岩浆组构，因而我们认为岩体的磁组构形成于岩浆结晶过程中，为原生组构(Paterson等，2018). 大石柱、都山和王土房岩体的磁面理构成岩浆穹隆构造(图3~图5). 这种磁面理特征通常被解释为深部岩浆沿通道上涌，可以自由地发生岩浆对流而呈现出同心环状展布(例如，Weinberg等，2001). 大石柱岩体岩浆沿根部充注后发生膨胀形成同心状磁面理. 都山岩体岩浆沿东北部根部充注后发生膨胀，受大石柱岩体影响，主要向西南运移的岩浆在其西南边缘先冷却发生变形和重结晶，形成了一个弧形由片麻状岩石甚至糜棱岩组成的构造岩带. 其中都山岩体由西南缘的低温糜棱

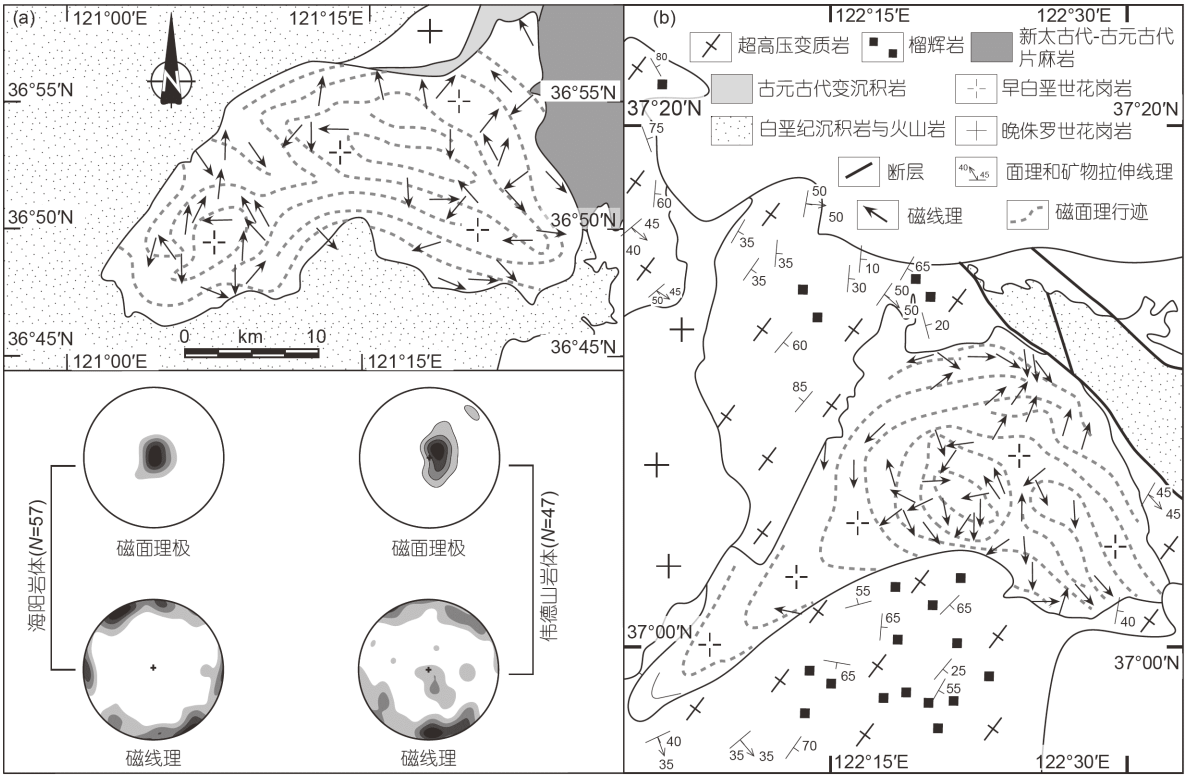

图 16　早白垩世晚期海阳岩体(a)和伟德山岩体(b)构造地质简图及其磁组构分布图

修改自Charles(2010). 图中赤平投影为下半球等面积投影

岩组构向北东逐渐过渡为高温糜棱岩组构及内部的岩浆组构，而且磁线理与矿物拉伸线理均为NE-SW向，表明与岩浆组构对应的原生磁组构和与岩体边缘糜棱岩组构相对应的次生磁组构分别形成于都山岩体侵位及冷却过程中(邱华标, 2020). 王土房岩体北侧闪长岩为位于南侧正长花岗岩之上被改造后薄的残余，正长花岗岩岩浆从其中心充注后发生膨胀以底部下沉的方式侵位(Qiu等, 2020). 这些岩体均具有一致的、近水平的NE-SW向磁线理，这样从225~207Ma稳定分布的NE-SW向磁线理表明岩体的侵位受控于晚三叠世NE-SW向的区域伸展构造(例如, Turrillot等, 2011). 从规模及范围的角度，最大可能除去了前期收缩构造的影响，因而将其解释为由于区域伸展构造的作用，都山岩体的南缘在岩浆结晶晚期经历了上部向SW的剪切变形，具有同构造晚期侵入的特点(图3).

燕山构造带内的上三叠统杏石口组粗碎屑沉积被认为是南北向挤压的同构造沉积(赵越, 1990; 李忠等, 2003; Liu等, 2004, 2012). 但无论在京西盆地还是燕山中部的下板城盆地，杏石口组与下伏的中生代地层之间均为整合接触关系，表明晚三叠世挤压变形似乎并不鲜明(赵越等, 2002; Meng等, 2014). 华北克拉通西北缘贺兰山和桌子山地区发育一系列晚三叠世伸展断裂控制的半地堑盆地却表明华北克拉通在晚三叠世构造体系更类似于伸展构造背景(图17; Darby和Ritts, 2002; Ritts等, 2004). 在华北克拉通北缘，下板城盆地晚三叠世地层的沉积特征分析和碎屑锆石定年研究表明，向上变细、变深的沉积体系和丰富的火山碎屑岩指示了晚三叠世的伸展环境(Meng等, 2014). 另外，辽西牛营子-邓杖子盆地的晚三叠世水泉沟组和邓杖子组地层为盆缘的正断层控制的半地堑沉积(Davis等, 2009; Zhang等, 2020); 重力滑塌沉积也说明沉积过程的伸展背景(胡健民等, 2005; Davis等, 2009; Hu等, 2010). 在索伦缝合带附近的苏尼特左旗变质核杂岩也记录了华北北缘的NE-SW向区域伸展，拆离断层中白云母的$^{40}Ar/^{39}Ar$定年给出了224~208Ma的年龄(Davis等, 2004).

从岩浆岩的角度，碱性岩被认为是富集地幔岩石在高温下低程度部分熔融所形成，通常就位于碰撞后

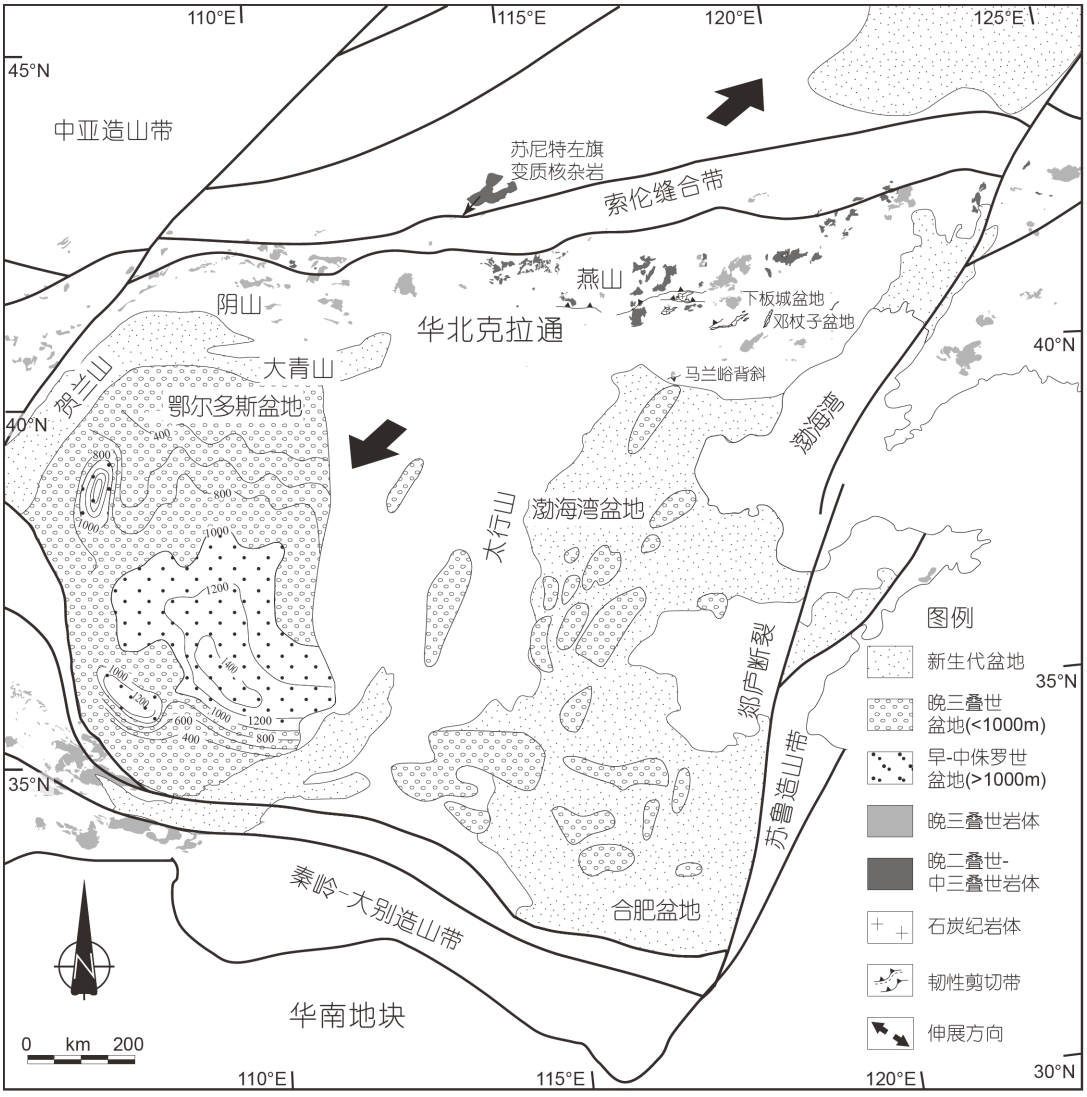

图 17　华北克拉通晚三叠世构造纲要图

沉积盆地等厚线源自朱日祥等(2020)

或板内伸展背景(Eby, 1992; Yang等, 2005; Yang J H等, 2012). 华北克拉通与其南侧的华南陆块在早-中三叠世发生大陆深俯冲作用(Okay等, 1989; Ames等, 1993; Faure等, 1999, 2003), 其北缘的古亚洲洋也在早-中三叠世发生闭合(Xiao等, 2003; Zhang等, 2014). 在大陆碰撞的早期, 阶段板缘处于挤压构造背景; 而在晚期, 伴随着造山后的垮塌转变为伸展构造背景(Zheng等, 2019). 华北东缘出露的晚三叠世碱性岩(如石岛岩体和尹家村杂岩)被认为是大别-苏鲁造山后伸展构造的产物(Yang等, 2005). 同时, 这一过程也伴随着超高压岩石折返过程中的降压脱水和部分熔融(Zheng, 2009; Zheng等, 2011), 抑或再循环大陆地壳物质(例如, Zheng, 2012). 同样的, 华北北缘也出露近E-W向展布的晚三叠世碱性岩(如响水沟、河坎子霞石正长岩和辉长正长岩, 王土房正长岩, 矾山、孙各庄正长岩, 赛马岩体等)和基性岩(Yang等, 2008b; Yang J H等, 2012; Zhang S H等, 2012; Qiu等, 2020). 特别是其中硅质不饱和正长岩的报道, 表明晚三叠世华北克拉通北缘处于陆内伸展构造背景(Yang J H等, 2012).

因此, 将以都山岩体、大石柱岩体和王土房岩体为代表的晚三叠世岩浆穹隆解释为区域性伸展背景下侵位似乎更为合理. 岩体NE-SW向的磁线理指示了区

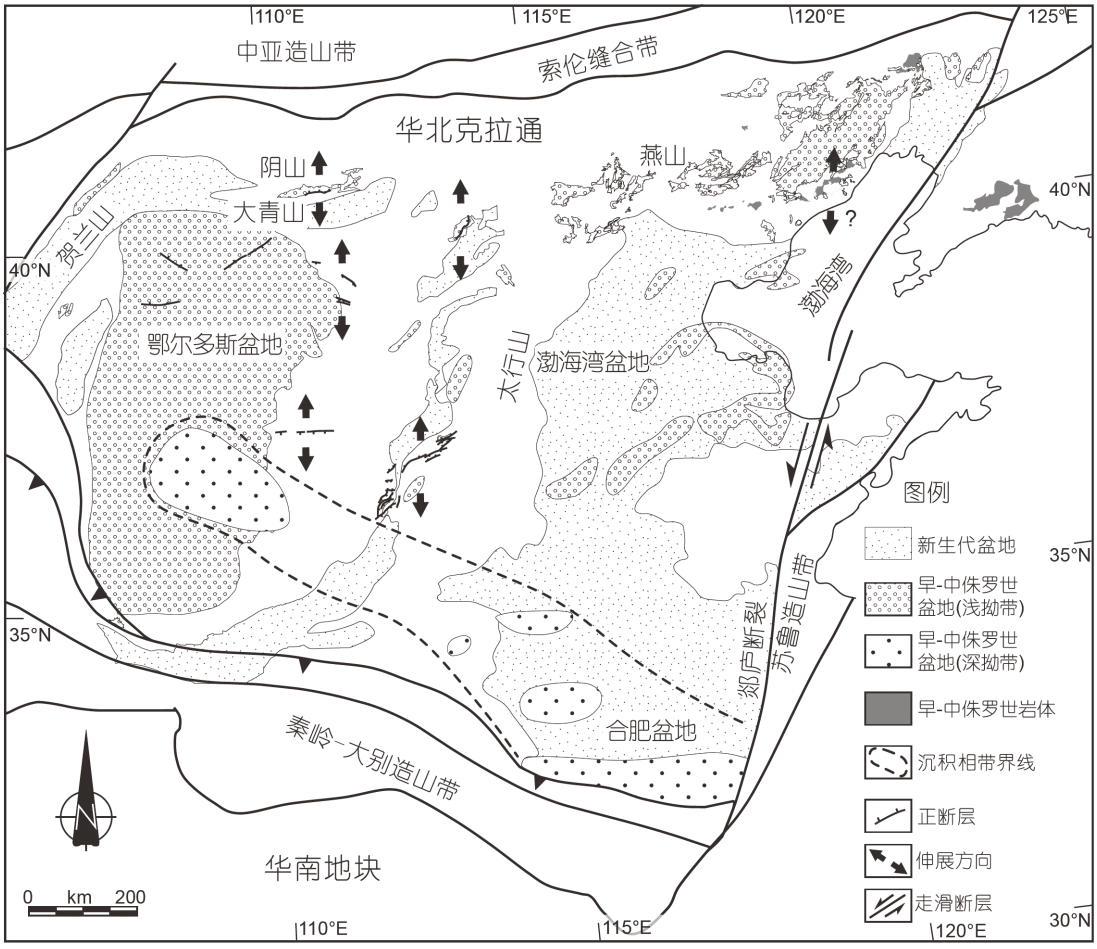

图 18　华北克拉通早侏罗世构造纲要图

沉积盆地展布引自朱日祥等(2020)

域伸展方向为NE-SW向(图3和图17). 华北克拉通北缘晚三叠世处于古亚洲洋闭合或者其后的陆内挤压作用之后的NE-SW向陆内伸展环境, 其强烈的壳幔作用很可能与深部构造作用密切相关. 这期大规模伸展构造影响到华北克拉通三分之一区域, 在华北克拉通东部和北部出现岩石圈尺度的不稳定的现象, 可能预示着克拉通破坏的开始, 并意味着“破坏”开始对“内陆”产生影响(图20).

6.2　早侏罗世岩体磁组构特征及其侵位所代表的近N-S向伸展构造及其机制

对于早侏罗世华北克拉通的构造背景, 前人从沉积学的角度认为以鄂尔多斯的中心湖相和边缘河流相沉积代表了周缘构造带在挤压背景下的抬升(Liu和Yang, 2000; Liu等, 2013). 然而, 近期的研究表明, 一系列正断层的发育似乎指示了华北克拉通此时处于伸展构造背景(图18). 在华北克拉通西部, 近E-W走向的正断层广泛分布于鄂尔多斯盆地(Zhang等, 2011). 在太行山云岗盆地和广陵盆地, 正断层切割了早侏罗世早期的砾岩, 并被早侏罗世晚期沉积岩所覆盖(Li等, 2015). 在大青山西南部, E-W向正断层切割了下侏罗统和太古宇之间的不整合, 并控制了小型地堑中生长地层发育(Darby等, 2001; Ritts等, 2001). 位于华北克拉通东部的北京西山地区, 则发育早侏罗世-中侏罗世早期NE或NNE走向的地堑或半地堑所控制的沉积(徐志斌和吴语诤, 1989). 分布在燕山地区和辽东地区的早侏罗世的花岗岩及同期南大岭组和兴隆沟组的玄武岩和安山质玄武岩等火山岩也指示了区域伸展背景(Meng等, 2019; Hao等, 2021). 我们对这一阶段的岩体进行的工作不多, 辽西地区旧门岩体作为这一阶段的典型代表.

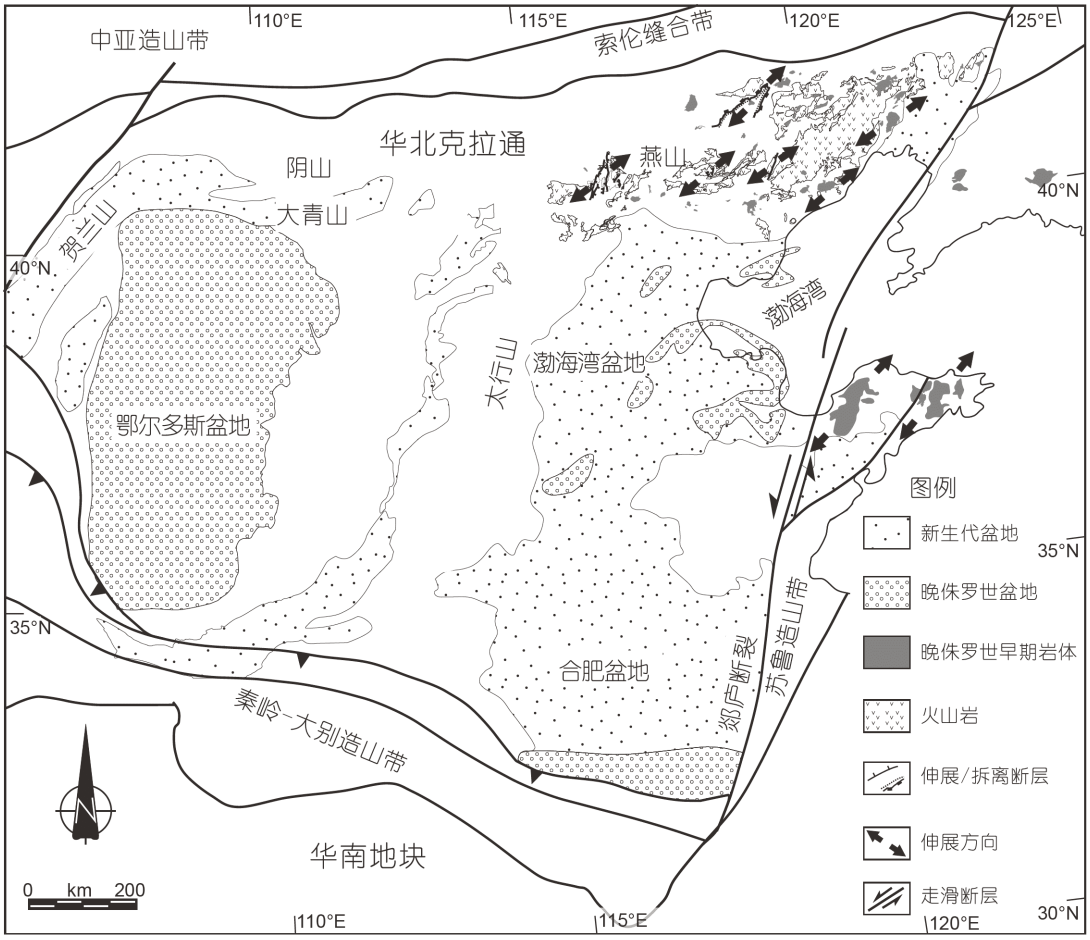

图 19　华北克拉通晚侏罗世构造纲要图

旧门岩体东北侧的杨家杖子向斜形成于旧门岩体之前, 靠近岩体接触带大理岩化的围岩层理均倾向于岩体外侧, 表明旧门岩体的岩浆侵位于先存的背斜构造后发生膨胀, 形成了总体上平行于边界向外倾的磁面理. 其磁面理构成典型的岩浆穹隆构造且具有较为分散的磁线理, 代表了早侏罗世区域南北向伸展较为微弱或是构造较为平静的一个阶段(图5). 考虑到在整个东亚大陆范围内侏罗纪的岩浆岩也主要沿着其东南缘分布, 我们倾向于认为早侏罗世弱伸展的构造背景同古太平洋的相关性较大(图20b; Wu等, 2019).

6.3　晚侏罗世岩体磁组构及其侵位所代表的NE-SW向伸展构造及其机制

胶东地区出露有较大规模的晚侏罗世岩体(昆嵛山岩体、玲珑岩体和文登岩体), 这些岩体的侵位特征为限定华北克拉通晚侏罗世构造背景提供了依据. 在昆嵛山岩体北部, 围岩和面理化花岗岩的面理近平行展布, 倾向NE, 并发育NE-SW向的矿物拉伸线理及上部向NE的剪切变形(图7). 这一韧性变形在片麻岩中表现为低温韧性变形, 而在花岗岩中表现为高温变形, 所以我们认为晚侏罗世昆嵛山岩体为同构造岩体. 此外, 无论是昆嵛山岩体还是玲珑岩体, 它们的磁组构特征表明岩体内部自南向北由三个NW-SE走向的岩浆穹隆构造所组成(图7和图8), 被认为是岩浆沿深部的NW-SE走向的岩浆通道上涌的结果(例如, Liang等, 2015; Ji等, 2018). 同时, 岩体的磁线理具有(E)NE-(W)SW的优选方位(图7和图8). 同样的, 文登岩体也具有同心环状分布的磁面理特征, 并发育一致的NE-SW向的磁线理(图9). 综合以上特征, 我们认为胶东地区晚侏罗岩体的侵位受控于NE-SW向的区域伸展. 在此背

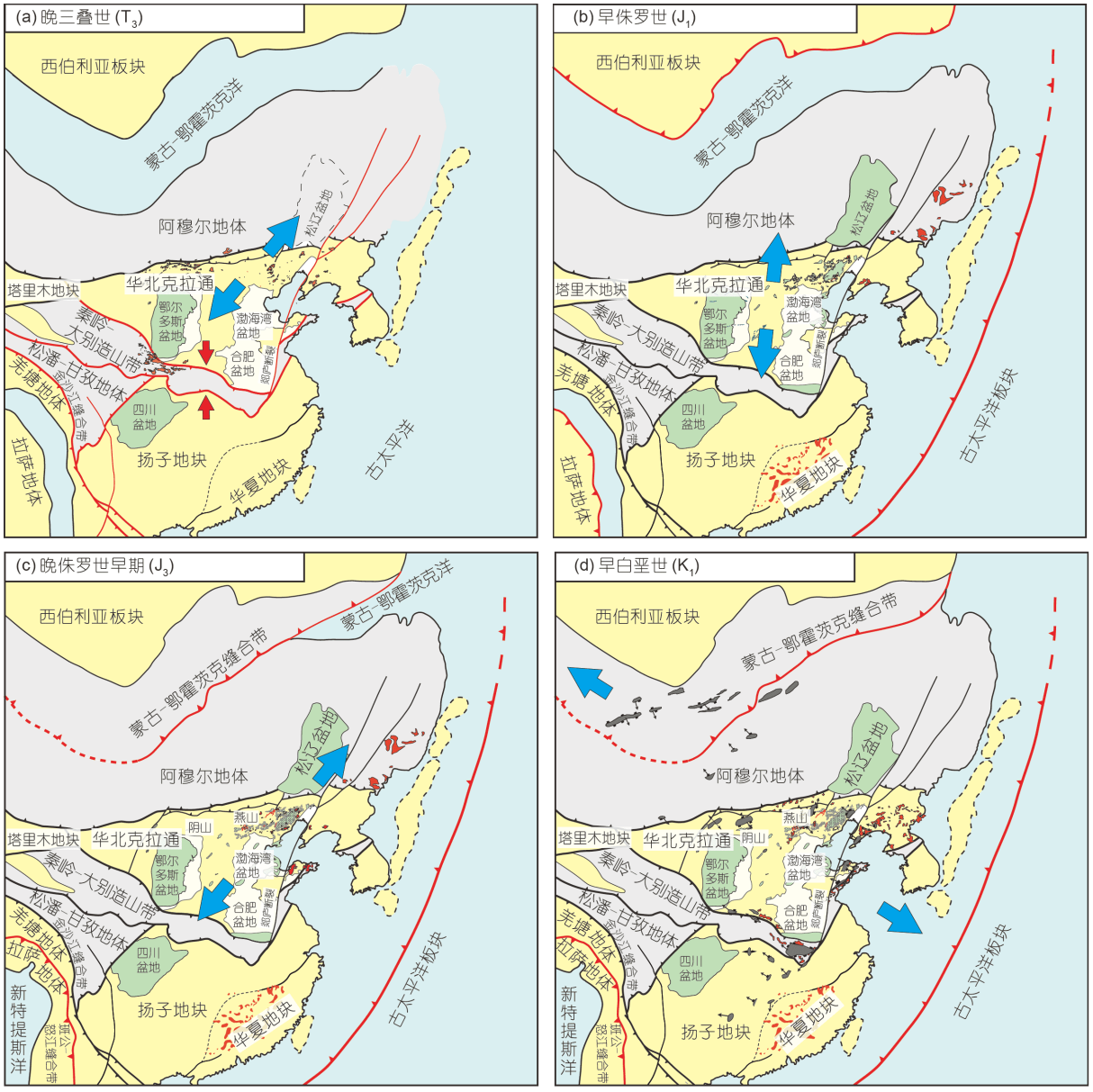

图 20　华北克拉通及邻区中生代地球动力学背景

(a) 晚三叠世, (b) 早侏罗世, (c) 晚侏罗世, (d) 早白垩世

景下，胶东地区形成一系列NW-SE走向的薄弱带，为岩浆的上升提供了通道，这与法国中央高原晚古生代花岗岩体的侵位所类似(例如，Talbot等，2004，2005; Joly等，2008; Turrillot等，2011). 当岩浆侵位至中地壳尺度时, 开始冷却、结晶, 最终形成具有同心环状分布的磁面理的岩体, 而NE-SW向的应变被磁线理所记录. 统一的NE-SW向的区域伸展一直持续到岩浆结晶晚期，表现为昆嵛山岩体北部形成具有正断性质的、顶部向NE的高温剪切变形, 而在围岩中所记录相同方向的剪切变形则是低温的.

位于燕山构造带的碱厂岩体和四干顶岩体总体呈块状构造，未经历韧性变形(图5和图6). 因此，它们的磁组构代表了原生组构，为岩浆结晶时磁性矿物定向排列的结果(Wei等，2014). 四干顶岩体和碱厂岩体的磁面理总体平行于岩体边界, 并呈同心环状分带, 构成了岩浆穹隆构造. 考虑到围岩中并不发育和侵位相关

的韧性变形，这样的组构样式为岩浆对流的结果(例如, Weinberg等, 2001). 一般而言, 在没有任何区域应力作用控制下，岩体的磁线理通常具有分散的倾伏向和缓陡不一的倾伏角(例如, Paterson等, 1989). 相反, 四干顶岩体和碱厂岩体也同胶东地区的晚侏罗世花岗岩一样，发育了一致的、NE-SW向的磁线理(图5和图6)，所以我们认为二者的侵位也受NE-SW向的伸展构造所控制.

华北克拉通晚侏罗世粗碎屑沉积(土城子组或后城组)传统上被认为是近南北向挤压下的同构造沉积(李忠等, 2003; Liu等, 2004; 刘少峰等, 2018). 然而一些学者认为这些粗碎屑沉积并不仅仅分布在逆冲断层的下盘, 在逆冲断层的上盘同样广泛发育, 它们的形成可能与晚侏罗世强烈的火山活动引起的地形起伏有关(Davis, 2005)，或者与区域性的伸展有关(邵济安等, 2003; Qi等, 2015). 一些被认为形成于晚侏罗世的挤压构造(Davis等, 2001; Wang Y等, 2011), 在更精确的同位素年代学的限定下可能属于晚侏罗世晚期到早白垩世早期(燕山运动B幕)，或者中侏罗世(Faure等, 2012; Li等, 2016). 在华北克拉通, 除昆嵛山岩体为同构造岩体外, 晚侏罗世(161~153Ma)的花岗岩大部分为未变形的岩浆穹隆，如四干顶岩体、碱厂岩体、玲珑岩体及文登岩体. 尽管华北克拉通北缘在晚侏罗世的构造背景仍存在争议，但我们认为这些岩体的磁组构特征支持区域性的NE-SW向伸展的观点. 与以变质核杂岩和同构造岩浆穹隆为代表的早白垩世强烈的陆内伸展相比(6.4节), 晚侏罗世的伸展相对较弱. 同时, 这一期区域伸展在浅表脆性域也有广泛表现(图19). 燕山构造带晚侏罗世原型盆地主要呈近E-W向，由于受到后期燕山B幕和早白垩世强烈伸展的改造而表现为NW-SE向的残余盆地(和政军等, 1998; Liu等, 2007). 这些原型盆地被解释为受NE-SW向伸展控制的地堑或半地堑盆地(图19)，从东向西依次为辽西大红旗断陷盆地(魏翔宇, 2017)、北票-建昌盆地(约164~153Ma; 马寅生, 2001; Yang和Li, 2008)、下板城盆地(160~153Ma; Davis等, 2001; Cope等, 2007)、京西盆地(157~152Ma; 邵济安等, 2003; Hao等, 2019)、后城盆地(160~152Ma; 邵济安等, 2003; Qi等, 2015). 最近, 钻孔资料揭示出宣化-下花园盆地之下隐伏的镁铁质岩席(159Ma)，侧向延伸达11km，平均厚度200m左右，岩席的根部具有NW-SE走向(刘君兰, 2020)，应该受控于区域NE-SW方向的伸展背景. 根据地球物理勘探资料及钻孔资料, 辽西肖家营钼矿(160Ma)在深部呈NW-SE分布，可能受控于NW-SE走向的正断层控制(于泽新等, 2009). 此外，华北克拉通东部晚侏罗世的岩浆峰期(163~157Ma)也指示了晚侏罗世为伸展构造背景(Dong等, 2015, 2018).

6.4　早白垩世早期变质核杂岩及同构造岩体的磁组构特征及其所代表的NW-SE向伸展及其机制

早白垩世早期华北克拉通记录了区域上的NW-SE方向的伸展构造，构成了全球最大的陆壳伸展地区之一. 我们对华北克拉通及其周缘地区发育的大量以变质核杂岩(伸展穹隆)和岩浆岩为代表的伸展构造进行了详细的研究，这些伸展构造使地壳深部的岩石折返至地表，从而使中下地壳的结构发生了强烈的改造(Lin和Wang, 2006; 林伟等, 2013). 一方面, 大规模的区域伸展使得原本处于中下地壳的花岗岩及其围岩被揭露到近地表，形成伸展穹隆构造(Lin和Wei, 2020)，并使得晚侏罗世岩体的磁组构在折返过程中被改造，例如在云蒙山岩体、医巫闾山岩体和鹊山岩体边缘都产生了同早白垩世伸展构造相关的磁组构特征(王军, 2013; Lin等, 2013a, 2013b; Meng和Lin, 2021). 另一方面, 伴随着区域伸展构造, 早白垩世岩体表现为同构造侵位的特征. 其中, 最为典型的为辽东地区的饮马湾山岩体和胶东地区的郭家岭岩体(图8和图11). 它们具有以下特征: (1) 岩体边缘变形强烈, 发育高温糜棱岩带，并具有稳定的NW-SE的磁线理和顶部向SE或NW的剪切变形; (2) 岩体边缘的磁面理往往平行于拆离断层相关的糜棱岩面理，在岩体内部则呈环状分布; (3) 岩体普遍发育广泛NW-SE向磁线理; (4) 岩体的锆石U-Pb年龄和角闪石、黑云母$^{40}Ar/^{39}Ar$年龄相近，反映岩体存在一个明显的快速折返所表现的冷却过程，表明其侵位受控于区域强烈的伸展构造. 除此之外，分布在燕山地区和太行山地区的早白垩世早期的王安镇、冯家峪、西白莲峪和古北口岩体主体呈均质的块状构造，未经历韧性变形(图12~图14). 从磁组构角度而言，这些岩体的磁面理均构成一个NE-SW走向的岩浆穹隆. 这些岩浆穹隆与围岩中先存的构造薄弱带(如片麻理及层理走向)大致平行，且与区域伸展方向近垂直. 因此，我们认为，在早白垩世早期NW-SE方向的伸展应力体系下, 这些NE-SW走向的构造薄弱带重新活跃,

并为岩浆提供了就位通道. 同时, 王安镇岩体边部的花岗闪长岩(130Ma)具有较为一致的NW-SE向的磁线理, 同样记录了早白垩世广泛存在的NW-SE向的伸展.

6.5 早白垩世晚期岩体的磁组构特征及其所代表的NW-SE向伸展及机制

在早白垩世伸展构造峰期(130~125Ma)之后, 华北地区仍发育大量的早白垩世晚期(120~110Ma)的花岗岩体. 在辽东地区出露的古道岭岩体被解释为同构造花岗岩(林伟等, 2011; Charles等, 2012), 指示了NW-SE向的强烈伸展在局部地区持续到118Ma. 除此以外, 大部分岩体表现为均质的块状构造, 其中以艾山、海阳、伟德山、大海坨等岩体为代表(图8、图15和图16), 其具有以下特征: (1) 岩体未经历韧性变形, 表现为内部及边缘无明显面理化, 造岩矿物无明显定向; (2) 岩体磁面理呈环状分布, 呈现出岩浆穹隆的几何学形态; (3) 除了艾山岩体的磁线理呈现出较为一致的NW-SE向以外, 其他3个岩体均具有分散的磁线理; 总体来看, 这个时期的岩体没有体现出优选的磁线理方向. 结合以上证据, 我们认为伸展构造峰期之后, 华北地区处于一个较弱的伸展构造体系下. 这个伸展体系继承了早期的NW-SE向的伸展方向, 使岩体具有近NE-SW的长轴展布方向. 在这一区域背景下, 上地壳发育的断裂体系为早白垩世晚期岩浆的上涌提供了通道, 岩浆结晶时载磁矿物没有优选的定向方位而形成方向各异的磁线理(Charles等, 2011b).

关于这些大规模区域伸展的动力学机制历来是研究和讨论的热点问题. 绝大多数构造地质学家将其归结为古太平洋向西俯冲导致板内或弧后扩张(Watson等, 1987; Traynor和Sladen, 1995; Ratschbacher等, 2000; Ren等, 2002; Zhu等, 2011, 2012); 或古太平洋向西的俯冲板块发生回退(roll-back)使先期存在的加厚地壳发生垮塌(Davis等, 2001). 作用于欧亚大陆的洋壳俯冲的方向近N-S向, 124Ma之前洋壳的产出量并不是非常显著. 似乎欧亚大陆东缘在124Ma之前的这一个时段具有伸展构造背景的大陆边缘. 在124Ma之后, 新生的洋壳才显著增长, 而100Ma之后洋壳俯冲的方向才转换为NW方向(Engebretson等, 1985; Northrup等, 1995; Maruyama等, 1997). 这似乎更好地解释了华北东部伸展构造发育的时间较其他地区更为宽泛、持续的时间更长(130~110Ma; Lin和Wei, 2020)的原因. 早白垩世早期华北克拉通发育的伸展构造呈"面状分布于欧亚大陆的东部"; 绝大多数发育在岩石圈薄弱带之上, 如中亚造山带、阴山-燕山褶皱冲断带、苏鲁超高压造山带及郯庐断裂带附近, 但少数发育在"破坏了"的克拉通之上, 如辽南的金州、岫岩、古道岭、饮马湾山等(Lin和Wei, 2020). 这些伸展构造记录了大区域上的NW-SE的伸展方向, 构成了全球最大的陆壳伸展地区(图20d), 指示了位于太平洋西岸的欧亚大陆东缘在早白垩世具伸展性质. 这或许是对华北克拉通破坏峰期发生在早白垩世和以沉坠(foundering)为主导机制的认识提供了支持. 华北克拉通及其周缘地区的伸展构造成因的动力学机制很大程度上受岩石圈尺度的构造控制, 揭示了在华北克拉通岩石圈性质和厚度发生变化的过程中, 变质核杂岩和岩浆岩所记录的浅部岩石圈(地壳)不同层次所遭受的强烈改造, 为华北克拉通破坏提供了独立的构造地质学证据.

6.6 古太平洋俯冲与华北克拉通破坏

晚侏罗世(165~153Ma), 华北克拉通东部分布有广泛的安山岩-英安岩-流纹岩的火山岩组合和I型花岗岩, 它们均具有高钾钙碱性的地球化学特征, 通常被认为与古太平洋板块斜向俯冲相关(Maruyama等, 1997; Wu等, 2005; Zhang等, 2014). 辽西及冀东的富闪深成岩脉被认为是从富水的岩石圈地幔部分熔融产生的熔体中结晶. 富水的岩石圈地幔可能与古太平洋板块俯冲脱水产生的流体交代作用有关(Zhang X H等, 2010; Fan等, 2017). 因此, 华北克拉通东部晚侏罗世NE-SW伸展构造可以认为同古太平洋板块向北的斜向俯冲相关联(图20c). 值得指出的是, 在辽东半岛发现的晚侏罗世钾镁煌斑岩(158~155Ma)具有明显的岛弧型的微量元素地球化学特征, 其成因被认为交代的岩石圈地幔在60~80km的部分熔融, 可能代表了华北克拉通东部岩石圈局部减薄至这个厚度(Jiang等, 2010; Fang等, 2020). 晚侏罗岩体具有一致的NE-SW向磁线理, 但区域上并未出现类似于变质核杂岩等代表强烈伸展的构造变形, 表明华北克拉通在晚侏罗世处于NE-SE向相对较弱的弱伸展构造背景. 可以推断, 华北克拉通在晚侏罗世可能仍以局部的减薄为主, 而未发生大规模破坏(郑永飞等, 2018). 晚侏罗世-早白垩世, 板块的俯冲方向发生转变, 即与欧亚大陆作用的方式从斜向俯冲转变为正向俯冲(Maruyama等, 1997). 在这一时间

段, 华北克拉通处于挤压构造背景, 发育一系列逆冲-推覆构造, 岩浆活动稀少, 即“燕山运动B幕”(Zhu等, 2015; Dong等, 2015, 2018). 同时, 许多学者指出分布在华北克拉通之上的岩浆活动在200~144Ma期间具有由东向西逐渐变年轻的趋势, 而在144Ma之后逐渐回返向东迁移, 进而推断古太平洋板块俯冲角度的变化是控制华北克拉通晚中生代构造、岩浆活动的动力学机制(郑建平和戴宏坤, 2018; Wu等, 2019). 从镁铁质岩浆的角度来看, 俯冲的古太平洋板片从144Ma发生回卷, 导致克拉通岩石圈底部受到侧向充填的软流圈地幔加热, 引起克拉通岩石圈地幔的弱化, 在130~120Ma期间, 岩石圈地幔底部受到软流圈地幔的加热, 发生大规模部分熔融, 造成大量镁铁质岩石的产出(郑永飞和吴福元, 2009; 郑永飞等, 2018). 同样的, 150~144Ma古太平洋板片在东亚地区的俯冲及俯冲板块的回撤也伴随着欧亚大陆东部应力场、构造形变和岩浆活动性质的变化(Chu等, 2019; Xu等, 2013). 早白垩世(130~120Ma), 华北克拉通破坏达到峰期, 表现为大规模的岩浆-火山活动、大型断陷盆地的发育、广泛发育的变质核杂岩及相关变质作用、大规模走滑构造和板块尺度的陆内旋转(朱日祥等, 2011; 郑永飞等, 2018; Wu等, 2019). 早白垩世早期(130~120Ma)的花岗岩体和伸展穹隆(变质核杂岩)具有一致的NW-SE的伸展方向, 也同样指示了地壳尺度上强烈的区域伸展. 而早白垩世晚期(120~110Ma)的岩体磁线理总体上无优选方向, 指示了地壳尺度上的伸展构造减弱, 并在108Ma左右“破坏”作用结束(郑永飞等, 2018). 这一过程可能与古太平洋板块在早白垩世西向俯冲及其板片后撤密切相关(图20d).

7　结论

华北北部的古亚洲洋和南部的古特提斯洋闭合后, 早中生代华北克拉通东部及北部发育大量岩浆作用, 这些岩浆作用反映了较为一致的区域构造演化过程. 以华北北缘为代表的区域展现出N(E)-S(W)向弱伸展, 这期伸展构造逐渐变强, 并在晚三叠世都山岩体侵位时展现出最强的伸展幅度. 随后, 伸展幅度减弱, 以王土房岩体侵位为代表, 华北北缘在早侏罗世早期(207~190Ma)处于一个相对稳定的弱伸展构造体制. 以旧门岩体为代表的早侏罗世中期伸展具有逐渐加强的特点, 并在晚侏罗世达到较高的程度, 而这一时期的伸展依然维持在N(E)-S(W)向. 在经历了燕山运动A幕和B幕之后, 伴随着集中而强烈的岩浆作用和地壳尺度的伸展幅度最大的变质核杂岩, 华北克拉通破坏或岩石圈减薄达到了峰期, 伸展方向也转换为NW-SE向. 早白垩世晚期, 伸展作用减弱, 岩浆就位于浅表弱伸展已经产生的空间. 总而言之, 以华北克拉通破坏为背景的伸展构造从应力场的角度经历了从N(E)-S(W)向逐渐过渡到NW-SE的过程, 从内陆到东部, 伸展幅度增加, 可能代表着古太平洋板块与欧亚大陆东缘的相互作用的方向从近平行转换成近直交的动力学过程.

参考文献

蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊, 任康绪, 李凤棠, 杨斌. 2011. 天津蓟县孙各庄碱性杂岩体年代学和岩石地球化学特征. 吉林大学学报(地球科学版), 41: 1901–1913

陈斌, 翟明国, 邵济安. 2002. 太行山北段中生代岩基的成因和意义: 主要和微量元素地球化学证据. 中国科学D辑: 地球科学, 32: 896–907

崔芳华. 2015. 辽西兴城地区中生代花岗质岩石的成因与地壳演化. 博士学位论文. 长春: 吉林大学. 1–175

代军治, 毛景文, 赵财胜, 李福让, 王瑞廷, 谢桂青, 杨富全. 2008. 辽西兰家沟钼矿床花岗岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及岩石化学特征. 地质学报, 82: 1555–1564

邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 吴宗絮, 罗照华. 1996. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社. 110

邓晋福, 苏尚国, 赵海玲, 莫宣学, 肖庆辉, 周肃, 刘翠, 赵国春. 2003. 华北地区燕山期岩石圈减薄的深部过程. 地学前缘, 10: 41–50

董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 王涛, 胡建民, 陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. 地质学报, 81: 1449–1461

付乐兵. 2012. 华北克拉通北缘赤峰-朝阳地区中生代构造岩浆演化与金成矿. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1–159

郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, Siebel W, 翟明国. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程: 锆石U-Pb年代学. 岩石学报, 21: 1281–1301

郭春丽, 吴福元, 杨进辉, 林景仟, 孙德有. 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: 1193–1204

韩宝福, 加加美宽雄, 李惠民. 2004. 河北平泉光头山碱性花岗岩的时代、Nd-Sr同位素特征及其对华北早中生代壳幔相互作用的意义. 岩石学报, 20: 1375–1388

何丽娟, 胡圣标, 汪集旸. 2001. 中国东部大陆地区岩石圈热结构特

征. 自然科学进展, 11: 966–969
河北省地质矿产局. 1989. 河北省、北京市、天津市区域地质志. 北京: 地质出版社. 182–191
和政军, 李锦轶, 牛宝贵, 任纪舜. 1998. 燕山-阴山地区晚侏罗世强烈推覆-隆升事件及沉积响应. 地质论评, 44: 407–418
侯万荣, 聂凤军, 胡建民, 刘翼飞, 肖伟, 刘勇, 张可. 2011. 内蒙古乌拉山地区沙德盖岩体年代学、地球化学特征及成因探讨. 吉林大学学报(地球科学版), 41: 1914–1927
胡健民, 刘晓文, 徐刚, 刘健, 张拴宏. 2005. 辽西晚三叠世末-中侏罗世崩塌-滑坡-泥石流沉积及其构造意义. 地质学报, 79: 453–464
黄华, 高山, 胡兆初, 柳小明, 袁洪林. 2007. 辽西彰武地区中生代高镁安山岩地球化学及其对新生下地壳拆沉作用的指示. 中国科学D辑: 地球科学, 37: 1287–1300
焦守涛, 颜丹平, 张旗, 李承东, 万博, 田忠华. 2013. 八达岭花岗岩的年龄、地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 29: 769–780
李杰, 李世勇, 宋英昕, 姜梦瑶, 毕明光, 王珊珊, 蒋雷, 孙亮亮. 2018. 胶东崮庄闪长岩锆石U-Pb年代学和岩石地球化学研究. 山东国土资源, 34: 35–42
李忠, 刘少峰, 张金芳, 王清晨. 2003. 燕山典型盆地充填序列及迁移特征: 对中生代构造转折的响应. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 931–940
林伟, 王清晨, 王军, 王非, 褚杨, 陈科. 2011. 辽东半岛晚中生代伸展构造——华北克拉通破坏的地壳响应. 中国科学: 地球科学, 54: 638–653
林伟, 王军, 刘飞, 冀文斌, 王清晨. 2013. 华北克拉通及邻区晚中生代伸展构造及其动力学背景的讨论. 岩石学报, 29: 1791–1810
林伟, 许德如, 侯泉林, 李双建, 孟令通, 任志恒, 邱华标, 褚杨. 2019. 中国大陆中东部早白垩世伸展穹隆构造与多金属成矿. 大地构造与成矿学, 43: 409–430
林少泽, 朱光, 赵田, 宋利宏, 刘备. 2014. 燕山地区喀喇沁变质核杂岩的构造特征与发育机制. 科学通报, 59: 3174–3189
刘翠, 邓晋福, 苏尚国, 肖庆辉, 罗照华, 王启航, 许立权. 2004. 北京云蒙山片麻状花岗岩锆石SHRIMP定年及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 23: 141–146
刘少峰, 林成发, 刘晓波, 庄其天. 2018. 冀北张家口地区同构造沉积过程及其与褶皱-逆冲作用耦合. 中国科学: 地球科学, 48: 705–731
刘胤. 2010. 冀北赤城花岗岩的岩石学、地球化学与锆石SHRIMP年代学. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学. 1–62
刘君兰. 2020. 辉绿岩床侵入对页岩生烃的热效应——以宣化盆地东部为例. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1–120
路凤香, 郑建平, 李伍平, 陈美华, 成中梅. 2000. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式: “蘑菇云”模型. 地学前缘, 7: 97–107
罗镇宽, 苗来成, 关康, 裘有守, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2001a. 河北张家口水泉沟岩体SHRIMP年代学研究及其意义. 地球化学, 30: 116–122
罗镇宽, 苗来成, 关康, 裘有守, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2001b. 辽宁阜新排山楼金矿区岩浆岩锆石SHRIMP定年及其意义. 地球化学, 30: 483–490
罗镇宽, 裘有守, 关康, 苗来成, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2001c. 冀东峪耳崖和牛心山花岗岩体SHRIMP锆石U-Pb定年及其意义. 矿物岩石地球化学通报, 20: 278–285
罗镇宽, 苗来成, 关康, 裘有守, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2003. 冀东都山花岗岩基及相关花岗斑岩脉SHRIMP锆石U-Pb法定年及其意义. 地球化学, 32: 173–180
罗镇宽, 李俊建, 关康, 裘有守, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2004. 辽宁凌源柏杖子金矿区花岗岩SHRIMP锆石U-Pb年龄. 地质调查与研究, 27: 82–85
马寅生. 2001. 燕山东段——下辽河地区中新生代盆山构造演化. 地质力学学报, 7: 79–91
马寅生, 曾庆利, 宋彪, 杜建军, 杨富全, 赵越. 2007. 燕山中段盘山花岗岩体锆石SHRIMP U-Pb年龄测定及其构造意义. 岩石学报, 23: 547–556
孟庆任. 2017. 中国东部燕山期沉积盆地演化与资源效应. 矿物岩石地球化学通报, 36: 567–569
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
苗来成, 罗镇宽, 关康, 黄佳展. 1998. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱U-Pb年龄及其岩石学意义. 岩石学报, 14: 198–206
牟保磊, 邵济安, 储著银, 阎国翰, 乔广生. 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. 岩石学报, 17: 358–365
邱华标. 2020. 华北克拉通北部三叠纪-侏罗纪伸展构造及其动力学机制. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所. 1–151
邵济安, 孟庆任, 魏海泉, 张履桥, 王佩瑛. 2003. 冀西北晚侏罗世火山-沉积盆地的性质及构造环境. 地质通报, 22: 751–761
邵济安, 杨进辉. 2011. 记载了早中生代壳幔演化的赤峰-凌源地质走廊. 岩石学报, 27: 3525–3534
田伟, 陈斌, 刘超群, 张华锋. 2007. 冀北小张家口超基性岩体的锆石U-Pb年龄和Hf同位素组成. 岩石学报, 23: 583–590
王军. 2013. 华北克拉通北部晚中生代伸展构造及其动力学机制探讨. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所. 1–181
王涛, 郑亚东, 张进江, 王新社, 曾令森, 童英. 2007. 华北克拉通中生代伸展构造研究的几个问题及其在岩石圈减薄研究中的意义. 地质通报, 26: 1154–1166
王新社, 郑亚东. 2005. 楼子店变质核杂岩韧性变形作用的$^{40}Ar/^{39}Ar$年代学约束. 地质论评, 51: 574–582
王彦斌, 韩娟, 李建波, 欧阳志侠, 童英, 侯可军. 2010. 内蒙赤峰楼子店拆离断层带下盘变形花岗质岩石的时代、成因及其地质意义——锆石U-Pb年龄和Hf同位素证据. 岩石矿物学杂志, 29: 763–778

王瑜, 孙立新, 周丽云, 谢玥婷. 2018. 燕山运动与华北克拉通破坏关系的讨论. 中国科学: 地球科学, 48: 521–535
魏翔宇. 2017. 辽西大红旗断陷及邻区侏罗系石油地质条件研究. 博士学位论文. 吉林: 吉林大学. 1–55
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: 313–318
吴福元, 孙德有, 张广良, 任向文. 2000. 论燕山运动的深部地球动力学本质. 高校地质学报, 6: 379–388
吴福元, 葛文春, 孙德有, 郭春丽. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘, 10: 51–60
吴福元, 杨进辉, 柳小明. 2005. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架. 高校地质学报. 11: 305–317
吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 24: 1145–1174
吴林. 2014. 苏鲁造山带中新生代热演化——中低温热年代学约束. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所. 1–136
吴珍汉. 2000. 略论华北地块北缘显生宙三类不同的造山作用. 地质力学学报, 6: 44–51
夏增明, 刘俊来, 倪金龙, 张婷婷, 施性明, 吴云. 2016. 胶东东部鹊山变质核杂岩结构、演化及区域构造意义. 中国科学: 地球科学, 46: 356–373
徐义刚. 1999. 岩石圈的热-机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄. 矿物岩石地球化学通报, 18: 1–5
徐志斌, 吴语诤. 1989. 京西中生代裂谷的基本特征. 中国煤田地质, 1: 1–8
杨进辉, 吴福元, 钟孙霖, 罗清华. 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}Ar/^{39}Ar年代学证据. 岩石学报, 24: 1175–1184
于泽新, 龙军, 吕景增, 宋晓军, 袁国平. 2009. 综合物探方法在辽西康杖子区找寻隐伏矿体中的应用. 地质调查与研究, 32: 154–160
翟明国, 朱日祥, 刘建明, 孟庆任, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 913–920
翟明国. 2011. 克拉通化与华北陆块的形成. 中国科学D辑: 地球科学, 41: 1037–1046
张海东, 刘建朝, 王金雅, 张苏楠, 胡波, 王得权, 韩松. 2016. 太行山北段王安镇杂岩体岩石学、年代学、地球化学特征及地质意义. 岩石学报, 32: 727–745
张拴宏, 赵越, 刘健, 胡健民, 陈正乐, 李淼, 裴军令, 陈振宇, 周剑雄. 2007. 华北地块北缘晚古生代-中生代花岗岩体侵位深度及其构造意义. 岩石学报, 23: 625–638
张田, 张岳桥. 2007. 胶东半岛中生代侵入岩浆活动序列及其构造制约. 高校地质学报, 13: 323–336
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, 41: 593–617
赵越. 1990. 燕山地区中生代造山运动及构造演化. 地质论评, 36: 1–13
赵越, 崔盛芹, 郭涛, 徐刚. 2002. 北京西山侏罗纪盆地演化及其构造意义. 地质通报, 21: 211–217
赵越, 张拴宏, 徐刚, 杨振宇, 胡健民. 2004. 燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件. 地质通报, 23: 854–863
郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中新生代岩石圈减薄. 武汉: 中国地质大学出版社. 126
郑建平, 戴宏坤. 2018. 西太平洋板片俯冲与后撤引起华北东部地幔置换并导致陆内盆-山耦合. 中国科学: 地球科学, 48: 436–456
郑永飞, 徐峥, 赵子福, 戴立群. 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏. 中国科学: 地球科学, 48: 379–414
郑永飞, 吴福元. 2009. 克拉通岩石圈的生长和再造. 科学通报, 54: 1945–1949
朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. 中国科学: 地球科学, 41: 583–592
朱日祥, 朱光, 李建威, 等. 2020. 华北克拉通破坏. 北京: 科学出版社. 417
Ames L, Tilton G R, Zhou G. 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtse cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites. Geology, 21: 339–342
Aurejac J B, Gleizes G R, Diot H , Bouchez J L. 2004. The Querigut Complex (Pyrenees, France) revisited by the AMS technique: A syntectonic pluton of the Variscan dextral transpression. Bull Soc Géol Fr, 175: 157–174
Bouchez J L, Gleizes G. 1995. Two-stage deformation of the Mont-Louis-Andorra granite pluton (Variscan Pyrenees) inferred from magnetic susceptibility anisotropy. J Geol Soc, 152: 669–679
Charles N. 2010. Mechanisms of Mesozoic continental extension in East Asia. Dissertation for Doctoral Degree. Orleans: Orleans University. 1–475
Charles N, Gumiaux C, Augier R, Chen Y, Zhu R X, Lin W. 2011a. Metamorphic core complexes vs. synkinematic plutons in continental extension setting: Insights from key structures (Shandong Province, eastern China). J Asian Earth Sci, 40: 261–278
Charles N, Chen Y, Augier R, Gumiaux C, Lin W, Faure M, Monié P, Choulet F, Wu F Y, Zhu R X, Wang Q C. 2011b. Palaeomagnetic constraints from granodioritic plutons (Jiaodong Peninsula): New insights on Late Mesozoic continental extension in eastern Asia. Phys Earth Planet Inter, 187: 276–291
Charles N, Gumiaux C, Augier R, Chen Y, Faure M, Lin W, Zhu R X. 2012. Metamorphic core complex dynamics and structural development: Field evidences from the Liaodong Peninsula (China, East Asia). Tectonophysics, 560-561: 22–50
Charles N, Augier R, Gumiaux C, Monié P, Chen Y, Faure M, Zhu R X. 2013. Timing, duration and role of magmatism in wide rift systems:

Insights from the Jiaodong Peninsula (China, East Asia). Gondwana Res, 24: 412–428

Chen L T, Zheng T Y, Xu W. 2006. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China: Constructed from wave equation based receiver function migration. J Geophys Res, 111: B09312

Chu Y, Lin W, Faure M, Xue Z, Ji W, Feng Z. 2019. Cretaceous episodic extension in the South China Block, East Asia: Evidence from the Yuechengling Massif of Central South China. Tectonics, 38: 3675–3702

Cope T D, Shultz M R, Graham S A. 2007. Detrital record of Mesozoic shortening in the Yanshan belt, NE China: Testing structural interpretations with basin analysis. Basin Res, 19: 253–272

Darby B, Davis G, Zheng Y. 2001. Structural evolution of the southwestern Daqing Shan, Yinshan belt, Inner Mongolia, China. In: Hendrix M S, Davis G A, eds. Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation. Boulder, Colorado. Geol Soc Am Mem, 194: 199–214

Darby B J, Ritts B D. 2002. Mesozoic contractional deformation in the middle of the Asian tectonic collage: The intraplate Western Ordos fold-thrust belt, China. Earth Planet Sci Lett, 205: 13–24

Darby B J, Davis G A, Zhang X H, Wu F Y, Wilde S, Yang J H. 2004. The newly discovered Waziyu metamorphic core complex, Yiwulüshan, western Liaoning Province, Northwest China. Earth Sci Front, 11: 145–155

Davis G A, Qian X L, Zheng Y D, Yu H, Wang C, Mao T H, Gehrels G E, Muhammad S, Fryxell J E. 1996. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: A Chinese metamorphic core complex north of Beijing, China. In: Yin A, Harrison T A, eds. The Tectonic Evolution of Asia. New York: Cambridge University Press. 253–280

Davis G A, Zheng Y D, Wang C. 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. Boulder, Colorado. Geol Soc Am Mem, 194: 171–197

Davis G A, Darby B J, Zheng Y D, Spell T L. 2002. Geometric and temporal evolution of an extensional detachment fault, Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. Geology, 30: 1003–1006

Davis G A, Xu B, Zheng Y D, Zhang W. 2004. Indosinian extension in the Solonker suture zone: The Sonid Zuoqi metamorphiccore complex, Inner Mongolia, China. Earth Sci Front, 11: 135–144

Davis G A. 2005. The Late Jurassic “Tuchengzi/Houcheng” formation of the Yanshan fold-thrust belt: An analysis. Earth Sci Front, 12: 331–345

Davis G A, Meng J, Cao W, Du X. 2009. Triassic and Jurassic tectonics in the eastern Yanshan belt, North China: Insights from the controversial Dengzhangzi Formation and its neighboring units. Earth Sci Front, 16: 69–86

Davis G A, Darby B J. 2010. Early Cretaceous overprinting of the Mesozoic Daqing Shan fold-and-thrust belt by the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. Geosci Front, 1: 1–20

de Oliveira D C, Neves S P, Trindade R I F, Dall’Agnol R, Mariano G, Correia P B. 2010. Magnetic anisotropy of the Redenção granite, eastern Amazonian Craton (Brazil): Implications for the emplacement of A-type plutons. Tectonophysics, 493: 27–41

de Saint Blanquat M, Horsman E, Habert G, Morgan S, Vanderhaeghe O, Law R, Tikoff B. 2011. Multiscale magmatic cyclicity, duration of pluton construction, and the paradoxical relationship between tectonism and plutonism in continental arcs. Tectonophysics, 500: 20–33

Deng J F, Su S G, Mo X X, Zhao G C, Xiao Q H, Ji G Y, Qiu R Z, Zhao H L, Luo Z H, Wang Y, Liu C. 2004. The sequence of magmatic-tectonic events and orogenic processes of the Yanshan Belt, North China. Acta Geol Sin, 78: 260–266

Dong S W, Zhang Y Q, Zhang F Q, Cui J J, Chen X H, Zhang S H, Miao L C, Li J H, Shi W, Li Z H, Huang S Q, Li H L. 2015. Late Jurassic-Early Cretaceous continental convergence and intracontinental orogenesis in East Asia: A synthesis of the Yanshan Revolution. J Asian Earth Sci, 114: 750–770

Dong S W, Zhang Y Q, Li H L, Shi W, Xue H M, Li J H, Huang S Q, Wang Y C. 2018. The Yanshan orogeny and late Mesozoic multiplate convergence in East Asia—Commemorating 90th years of the “Yanshan Orogeny”. Sci China Earth Sci, 61: 1888–1909

Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. Geology, 20: 641–644

Engebretson D C, Cox A, Gordon R G. 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin. Geol Soc Am Spec Pap, 206: 1–60

Fan W M, Jiang N, Xu X, Hu J, Zong K. 2017. Petrogenesis of the middle Jurassic appinite and coeval granitoids in the Eastern Hebei area of North China Craton. Lithos, 278-281: 331–346

Faure M, Lin W, Monié P, Le Breton N, Poussineau S, Panis D, Deloule E. 2003. Exhumation tectonics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Qinling orogen in east China: New petrological-structural-radiometric insights from the Shandong Peninsula. Tectonics, 22: 1018

Faure M, Lin W, Shu L, Sun Y, Schärer U. 1999. Tectonics of the Dabieshan (eastern China) and possible exhumation mechanism of

ultra high-pressure rocks. Terra Nova, 11: 251–258

Faure M, Trap P, Lin W, Monié P, Bruguier O. 2007. Polyorogenic evolution of the Paleoproterozoic Trans-North China Belt, new insights from the in Lüliangshan-Hengshan-Wutaishan and Fuping massifs. Episodes J Int Geosci, 30: 95–106

Faure M, Lin W, Chen Y. 2012. Is the Jurassic (Yanshanian) intraplate tectonics of North China due to westward indentation of the North China block? Terra Nova, 24: 456–466

Fang W, Dai L Q, Zheng Y F, Zhao Z F, Ma L T, Zhao K. 2020. Identification of Jurassic mafic arc magmatism in the eastern North China Craton: Geochemical evidence for westward subduction of the Paleo-Pacific slab. Geol Soc Am Bull, 100: 127–151

Gao S, Zhang B R, Jin Z M, Kern H, Luo T C, Zhao Z D. 1998. How mafic is the lower continental crust? Earth Planet Sci Lett, 161: 101–117

Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, McDonough W F, Liu Y S. 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 198: 307–322

Goss S C, Wilde S A, Wu F, Yang J. 2010. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong terrane, Shandong Province, North China Craton. Lithos, 120: 309–326

Griffin W L, Zhang A D, O'reilly S Y. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In: Flower M, Chung S L, Lo C H, eds. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Am Geophy Union-Geodyn Ser, 100: 107–126

Guo L, Wang T, Zhang J J, Liu J, Qi G W, Li J B. 2011. Evolution and time of formation of the Hohhot metamorphic core complex, North China: New structural and geochronologic evidence. Int Geol Rev, 54: 1309–1331

Guo L, Wang T, Castro A, Zhang J J, Liu J, Li J B. 2012. Petrogenesis and evolution of late Mesozoic granitic magmatism in the Hohhot metamorphic core complex, Daqing Shan, North China. Int Geol Rev, 54: 1885–1905

Hacker B R, Wallis S R, Ratschbacher L, Grove M, Gehrels G. 2006. High-temperature geochronology constraints on the tectonic history and architecture of the ultrahigh-pressure Dabie-Sulu orogen. Tectonics, 25: TC5006

Han B F, Zheng Y D, Gan J W, Chang Z S. 2001. The Louzidian normal fault near Chifeng, Inner Mongolia: Master fault of a quasi-metamorphic core complex. Int Geol Rev, 43: 254–264

Hao W, Zhu G, Zhu R. 2019. Timing of the Yanshan Movement: Evidence from the Jingxi Basin in the Yanshan fold-and-thrust belt, eastern China. Int J Earth Sci-Geol Rundsch, 108: 1961–1978

Hao W X, Zhu R X, Zhu G. 2021. Jurassic tectonics of the eastern North China Craton: Response to initial subduction of the Paleo-Pacific Plate. Geol Soc Am Bull, 133: 19–36

Hu F F, Fan H R, Yang J H, Wan Y S, Liu D Y, Zhai M G, Jin C W. 2004. Mineralizing age of the Rushan lode gold deposit in the Jiaodong Peninsula: SHRIMP U-Pb dating on hydrothermal zircon. Chin Sci Bull, 49: 1629–1636

Hu J M, Zhao Y, Liu X W, Xu G. 2010. Early Mesozoic deformations of the eastern Yanshan thrust belt, northern China. Int J Earth Sci-Geol Rundsch, 99: 785–800

Ji W B, Faure M, Lin W, Chen Y, Chu Y, Xue Z H. 2018. Multiple emplacement and exhumation history of the late Mesozoic day-unshan-mufushan batholith in southeast China and its Tectonic significance: 1. Structural analysis and geochronological con-straints. J Geophys Res Solid Earth, 123: 689–710

Jiang P, Yang K F, Fan H R, Liu X, Cai Y C, Yang Y H. 2016. Titanite-scale insights into multi-stage magma mixing in Early Cretaceous of NW Jiaodong terrane, North China Craton. Lithos, 258: 197–214

Jiang S H, Bagas L, Liu Y F, Zhang L L. 2018. Geochronology and petrogenesis of the granites in Malanyu Anticline in eastern North China Block. Lithos, 312-313: 21–37

Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, Ni P. 2010. Petrogenesis and tectonic implications of Late Jurassic shoshonitic lamprophyre dikes from the Liaodong Peninsula, NE China. Miner Petrol, 100: 127–151

Joly A, Martelet G, Chen Y, Faure M. 2008. A multidisciplinary study of a syntectonic pluton close to a major lithospheric-scale fault Relationships between the Montmarault granitic massif and the Sillon Houiller Fault in the Variscan French Massif Central: 2 Gravity, aeromagnetic investigations, and 3-D geologic modeling. J Geophys Res, 112: B10104

Kusky T M. 2011. Geophysical and geological tests of tectonic models of the North China Craton. Gondwana Res, 20: 26–35

Li C M, Zhang C H, Cope T D, Lin Y. 2016. Out-of-sequence thrusting in polycyclic thrust belts: An example from the Mesozoic Yanshan belt, North China Craton. Tectonics, 35: 2082–2116

Li J W, Paulo V, Zhou M F, Zhao X F, Ma C Q. 2006. Geochronology of the Pengjiakuang and Rushan gold deposits, Eastern Jiaodong Gold province, Northeastern China: Implications for regional mineralization and geodynamic setting. Econ Geol, 101: 1023–1038

Li S Z, Zhao G C, Dai L M, Liu X, Zhou L H, Santosh M, Suo Y H. 2012. Mesozoic basins in eastern China and their bearing on the deconstruction of the North China Craton. J Asian Earth Sci, 47: 64–79

Li X H, Fan H R, Hu F F, Hollings P, Yang K F, Liu X. 2019. Linking lithospheric thinning and magmatic evolution of late Jurassic to early cretaceous granitoids in the Jiaobei Terrane, southeastern North China Craton. Lithos, 324-325: 280–296

Li Z H, Qu H J, Gong W B. 2015. Late Mesozoic basin development

and tectonic setting of the northern North China Craton. J Asian Earth Sci, 114: 115–139

Liang W T, Zhang G W, Bai Y, Jin C S, Nantasin P. 2015. New insights into the emplacement mechanism of the Late Triassic granite plutons in the Qinling orogen: A structural study of the Mishuling pluton. Geol Soc Am Bull, 127: 1583–1603

Lin G, Zhang Y, Guo F, Wang Y J, Fan W M. 2005. Numerical modelling of lithosphere evolution in the North China Block: Thermal versus tectonic thinning. J Geodyn, 40: 92–103

Lin W, Wang Q C. 2006. Late Mesozoic extensional tectonics in North China Block-Response to the Lithosphere removal of North China Craton? Bull Soc Geol Fr, 177: 287–294

Lin W, Faure M, Monié P, Wang Q C. 2007. Polyphase Mesozoic tectonics in the eastern part of the North China Block: Insights from the Eastern Liaoning Peninsula massif (NE China). Geol Soc Lond Spec Publ, 280: 153–169

Lin W, Faure M, Monié P, Schärer U, Panis D. 2008. Mesozoic extensional tectonics in Eastern Asia: The south Liaodong Peninsula metamorphic core complex (NE China). J Geol, 116: 134–154

Lin W, Monié P, Faure M, Schärer U, Shi Y H, Le Breton N, Wang Q C. 2011. Cooling paths of the NE China crust during the Mesozoic extensional tectonics: Example from the south-Liaodong peninsula metamorphic core complex. J Asian Earth Sci, 42: 1048–1065

Lin W, Faure M, Chen Y, Ji W B, Wang F, Wu L, Charles N, Wang J, Wang Q C. 2013a. Late Mesozoic compressional to extensional tectonics in the Yiwulüshan massif, NE China and its bearing on the evolution of the Yinshan-Yanshan orogenic belt. Gondwana Res, 23: 54–77

Lin W, Charles N, Chen K, Chen Y, Faure M, Wu L, Wang F, Li Q L, Wang J, Wang Q. 2013b. Late Mesozoic compressional to extensional tectonics in the Yiwulüshan massif, NE China and their bearing on the Yinshan-Yanshan orogenic belt. Gondwana Res, 23: 78–94

Lin W, Ji W B, Faure M, Wu L, Li Q L, Shi Y H, Schärer U, Wang F, Wang Q C. 2015. Early Cretaceous extensional reworking of the Triassic HP-UHP metamorphic orogen in Eastern China. Tectonophysics, 662: 256–270

Lin W, Wei W. 2020. Late Mesozoic extensional tectonics in the North China Craton and its adjacent regions: A review and synthesis. Int Geol Rev, 62: 811–839

Liu J, Zhao Y, Liu X M, Wang Y, Liu X W. 2012. Rapid exhumation of basement rocks along the northern margin of the North China Craton in the early Jurassic: Evidence from the Xiabancheng Basin, Yanshan tectonic belt. Basin Res, 24: 544–558

Liu J L, Davis G, Lin Z Y, Wu F Y. 2005. The Liaonan metamorphic core complex, southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of eastern Liaoning, Korea and contiguous areas. Tectonophysics, 407: 65–80

Liu S F, Su S, Zhang G W. 2013. Early Mesozoic basin development in North China: Indications of cratonic deformation. J Asian Earth Sci, 62: 221–236

Liu S F, Li Z, Zhang J F. 2004. Mesozoic basin evolution and tectonic mechanism in Yanshan, China. Sci China Ser D-Earth Sci, 47: 24–38

Liu S F, Zhang J F, Hong S Y, Ritts B D. 2007. Early Mesozoic basin development and its response to thrusting in the Yanshan Fold-and-Thrust Belt, China. Int Geol Rev, 49: 1025–1049

Liu S F, Yang S. 2000. Upper Triassic-Jurassic sequence stratigraphy and its structural controls in the western Ordos Basin, China. Basin Res, 12: 1–18

Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, Terabayashi M. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. Isl Arc, 6: 121–142

Meng Q R, Wei H H, Wu G L, Duan L. 2014. Early Mesozoic tectonic settings of the northern North China Craton. Tectonophysics, 611: 155–166

Meng Q R, Wu G L, Fan L G, Wei H. 2019. Tectonic evolution of early Mesozoic sedimentary basins in the North China block. Earth-Sci Rev, 190: 416–438

Meng L, Lin W. 2021. Episodic crustal extension and contraction characterizing the Late Mesozoic tectonics of East China: Evidence from the Jiaodong Peninsula, East China. Tectonics, 40: e2020TC006318

Menzies M A, Fan W M, Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean Craton, China. Geol Soc Lond Spec Publ, 76: 71–81

Miao L C, Qiu Y M, McNaughton N, Luo Z K, Groves D, Zhai Y S, Fan W M, Zhai M G, Guan K. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of granitoids from Dongping area, Hebei Province, China: Constraints on tectonic evolution and geodynamic setting for gold metallogeny. Ore Geol Rev, 19: 187–204

Niu X, Chen B, Liu A, Suzuki K, Ma X. 2012. Petrological and Sr-Nd-Os isotopic constraints on the origin of the Fanshan ultrapotassic complex from the North China Craton. Lithos, 149: 146–158

Northrup C J, Royden L H, Burchfiel B C. 1995. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia. Geology, 23: 719–722

Okay A I, Xu S, Sengör A M C. 1989. Coesite from the Dabie Shan eclogites, central China. Eur J Minral, 1: 595–598

Paterson S R, Vernon R H, Tobisch O T. 1989. A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids. J

Struct Geol, 11: 349–363
Paterson S R, Ardill K, Vernon R, Žák J. 2018. A review of mesoscopic magmatic structures and their potential for evaluating the hypersolidus evolution of intrusive complexes. J Struct Geol, 125: 134–147
Priestley K, Debayle E, McKenzie D, Pilidou S. 2006. Upper mantle structure of eastern Asia from multimode surface waveform tomography. J Geophys Res, 111: B10304
Qi G W, Zhang J J, Wang M. 2015. Mesozoic tectonic setting of rift basins in eastern North China and implications for destruction of the North China Craton. J Asian Earth Sci, 111: 414–427
Qiu H, Lin W, Faure M, Chen Y, Meng L, Zeng J, Ren Z, Wang Y, Li Q. 2020. Late Triassic extensional tectonics in the northern North China Craton, insights from a multidisciplinary study of the Wangtufang pluton. J Asian Earth Sci, 200: 104462
Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, McWilliams M, Ireland T, Dong S, Calvert A, Chateigner D, Wenk H R. 2000. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault. J Geophys Res, 105: 13303–13338
Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, Webb L, Grimmer J C, McWilliams M O, Ireland T, Dong S, Hu J. 2003. Tectonics of the Qinling (Central China): Tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history. Tectonophysics, 366: 1–53
Ren J Y, Tamaki K, Li S T, Zhang J X. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas. Tectonophysics, 344: 175–205
Ritts B, Darby B, Cope T. 2001. Early Jurassic extensional basin formation in the Daqing Shan segment of the Yinshan belt, northern North China Block, Inner Mongolia. Tectonophysics, 339: 239–258
Ritts B, Hanson A, Darby B, Nanson L, Berry A. 2004. Sedimentary record of Triassic intraplate extension in North China: Evidence from the nonmarine NW Ordos Basin, Helan Shan and Zhuozi Shan. Tectonophysics, 386: 177–202
Sant'Ovaia H, Bouchez J L, Noronha F, Leblanc D, Vigneresse J L. 2000. Composite-laccolith emplacement of the post-tectonic Vila Pouca de Aguiar granite pluton (northern Portugal): A combined AMS and gravity study. Earth Environ Sci Trans R Soc Edinburgh, 91: 123–137
Talbot J Y, Martelet G, Courrioux G, Chen Y, Faure M. 2004. Emplacement in an extensional setting of the Mont Lozère–Borne granitic complex (SE France) inferred from comprehensive AMS, structural and gravity studies. J Struct Geol, 26: 11–28
Talbot J Y, Faure M, Chen Y, Martelet G. 2005. Pull-apart emplacement of the Margeride granitic complex (French Massif Central). Implications for the late evolution of the Variscan orogen. J Struct Geol, 27: 1610–1629
Traynor J J, Sladen C. 1995. Tectonic and stratigraphic evolution of the Mongolian People's Republic and its influence on hydrocarbon geology and potential. Mar Pet Geol, 12: 35–52
Turrillot P, Faure M, Martelet G, Chen Y, Augier R. 2011. Pluton-dyke relationships in a Variscan granitic complex from AMS and gravity modelling. Inception of the extensional tectonics in the South Armorican Domain (France). J Struct Geol, 33: 1681–1698
Wang T, Zheng Y D, Li T B, Gao Y J. 2004. Mesozoic granitic magmatism in extensional tectonics near the Mongolian border in China and its implications for crustal growth. J Asian Earth Sci, 23: 715–729
Wang T, Zheng Y D, Zhang J J, Zeng L S, Donskaya T, Guo L, Li J B. 2011. Pattern and kinematic polarity of Late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes. Tectonics, 30: TC6007
Wang T, Guo L, Zheng Y D, Donskaya T V, Gladkochub D, Zeng L, Li J, Wang Y, Mazukabzov A. 2012. Timing and processes of late Mesozoic mid-lower-crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U-Pb ages from metamorphic core complexes. Lithos, 154: 315–345
Wang Y, Zhou L, Li J. 2011. Intracontinental superimposed tectonics—A case study in the Western Hills of Beijing, eastern China. Geol Soc Am Bull, 123: 1033–1055
Watson M P, Hayward A B, Parkinson D N, Zhang Z M. 1987. Plate tectonic history, basin development and petroleum source rock deposition onshore China. Mar Pet Geol, 4: 205–225
Webb L E, Graham S A, Johnson C L, Badarch G, Hendrix M S. 1999. Occurrence, age, and implications of the Yagan-Onch Hayrhan metamorphic core complex, southern Mongolia. Geology, 27: 143–146
Wei W, Chen Y, Faure M, Shi Y H, Martelet G, Hou Q L, Lin W, Le Breton N, Wang Q C. 2014. A multidisciplinary study on the emplacement mechanism of the Qingyang-Jiuhua Massif in Southeast China and its tectonic bearings. Part I: Structural geology, AMS and paleomagnetism. J Asian Earth Sci, 86: 76–93
Weinberg R F, Sial A N, Pessoa R R. 2001. Magma flow within the Tavares pluton, northeastern Brazil: Compositional and thermal convection. Geol Soc Am Bull, 113: 508–520
Wong W H. 1927. Crustal movements and igneous activities in Eastern China since Mesozoic Time. Bull Geol Soc China, 6: 9–37
Wong W H. 1929. The Mesozoic orogenic movement in eastern China. Bull Geol Soc China, 8: 33-44
Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O, Yang J H. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. Earth Planet Sci Lett, 233: 103–119

Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, Yuan H L, Yang J H. 2006. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton. Geochim Cosmochim Acta, 70: 5013–5034

Wu F Y, Yang J H, Xu Y G, Wilde S A, Walker R J. 2019. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic. Annu Rev Earth Planet Sci, 47: 173–195

Wu X D, Zhu G, Yin H, Su N, Lu Y C, Zhang S, Xie C L. 2020. Origin of low-angle ductile/brittle detachments: Examples from the Cretaceous Linglong metamorphic core complex in Eastern China. Tectonics, 39: e06132

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

Xiong L E, Wei J, Shi W, Fu L, Li H, Zhou H, Chen J, Chen M. 2018. Geochronology, petrology and geochemistry of the Mesozoic Dashizhuzi granites and lamprophyre dykes in eastern Hebei-western Liaoning: Implications for lithospheric evolution beneath the North China Craton. Geol Mag, 155: 1542–1565

Xu W, Pei F, Wang F, Meng E, Ji W, Yang D, 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

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 Part A-Solid Earth Geodesy, 26: 747–757

Yan G, Mu B, Xu B, He G, Tan L, Zhao H, He Z, Zhang R, Qiao G. 1999. Triassic alkaline intrusives in the Yanliao-Yinshan area: Their chronology, Sr, Nd and Pb isotopic characteristics and their implication. Sci China Ser D-Earth Sci, 42: 582–587

Yang J H, Chung S L, Wilde S A, Wu F Y, Chu M F, Lo C H, Fan H R. 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. 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, Belousova E, Griffin W L. 2008a. Mesozoic decratonization of the North China block. Geology, 36: 467–470

Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Chen F K, Liu X, Xie L W. 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 Petrol, 49: 315–351

Yang J H, Sun J F, Zhang M, Wu F Y, Wilde S A. 2012. Petrogenesis of silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern North China Craton related to post-collisional and intraplate extension. Chem Geol, 328: 149–167

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 L Q, Deng J, Goldfarb R J, Zhang J, Gao B F, Wang Z L. 2014. $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronological constraints on the formation of the Dayingezhuang gold deposit: New implications for timing and duration of hydrothermal activity in the Jiaodong Gold Province, China. Gondwana Res, 25: 1469–1483

Yang W, Li S G. 2008. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton. Lithos, 102: 88–117

Yin A, Nie S Y. 1996. A Phanerozoic palinspastic reconstruction of China and its neighboring regions. In: Yin A, Harrison T A, eds. The Tectonic Evolution of Asia. New York: Cambridge University Press. 442–485

Yin C, Zhang B, Han B F, Zhang J J, Wang Y, Ai S. 2017. Structural analysis and deformation characteristics of the Yingba metamorphic core complex, northwestern margin of the North China Craton, NE Asia. J Struct Geol, 94: 195–212

Ying J F, Zhang H F, Tang Y J. 2011. Crust-mantle interaction in the central North China Craton during the Mesozoic: Evidence from zircon U-Pb chronology, Hf isotope and geochemistry of syenitic-monzonitic intrusions from Shanxi province. Lithos, 125: 449–462

Zeng J, Wei W, Lin W, Meng L, Qiu H, Chu Y, Ren Z, Wang Y, Feng Z, Li Q, Ling X. 2021. The Late Jurassic extensional event in the Yanshan fold and thrust belt (North China): New insights from an integrated study of structural geology, geophysics, and geochemistry of the Siganding granitic pluton. J Asian Earth Sci, 211: 104708

Zhai M G, Fan Q C, Zhang H F, Sui J L, Shao J A. 2007. Lower crustal processes leading to Mesozoic lithospheric thinning beneath eastern North China: Underplating, replacement and delamination. Lithos, 96: 36–54

Zhang A D, Liu S F, Lin C F, Zhang B. 2020. Timing of deposition in the Dengzhangzi and Guojiadian Basins of the Yanshan fold-thrust belt, North China. Int Geol Rev, 62: 2344–2365

Zhang B, Zhu G, Jiang D, Li C, Chen Y. 2012. Evolution of the Yiwulushan metamorphic core complex from distributed to

localized deformation and its tectonic implications. Tectonics, 31: TC4018

Zhang H F, Menzies M A, Zhou X H, Lu F X. 2000. Textural and chemical zoning in garnets related to mantle metasomatism and deformation processes. Chin Sci Bull, 45: 174–180

Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Ying J F. 2005. Geochemical constraints on the origin of Mesozoic alkaline intrusive complexes from the North China Craton and tectonic implications. Lithos, 81: 297–317

Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Zhou M F, Fan W M, Zheng J P. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. Geochim Cosmochim Acta, 67: 4373–4387

Zhang H Y, Hou Q L, Cao D Y. 2007. Study of thrust and nappe tectonics in the eastern Jiaodong Peninsula, China. Sci China Ser D-Earth Sci, 50: 161–171

Zhang J, Zhao Z F, Zheng Y F, Dai M. 2010. Postcollisional magmatism: Geochemical constraints on the petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Sulu orogen, China. Lithos, 119: 512–536

Zhang S H, Zhao Y, Kröner A, Liu X M, Xie L W, Chen F K. 2009. Early Permian plutons from the northern North China Block: Constraints on continental arc evolution and convergent margin magmatism related to the Central Asian Orogenic Belt. Int J Earth Sci-Geol Rundsch, 98: 1441–1467

Zhang S H, Zhao Y, Ye H, Hou K J, Li C F. 2012. Early Mesozoic alkaline complexes in the northern North China Craton: Iimplications for cratonic lithospheric destruction. Lithos, 155: 1–18

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 H, Yuan L L, Xue F, Zhang Y. 2012. Contrasting Triassic ferroan granitoids from northwestern Liaoning, North China: Magmatic monitor of Mesozoic decratonization and a craton-orogen boundary. Lithos, 144-145: 12–23

Zhang X H, Zhang H E, Jiang N, Wilde S A. 2010. Contrasting Middle Jurassic and Early Cretaceous mafic intrusive rocks from western Liaoning, North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications. Geol Mag, 147: 844–859

Zhang Y Q, Shi W, Dong S W. 2011. Changes of Late Mesozoic tectonic regimes around the Ordos Basin (North China) and their geodynamic implications. Acta Geol Sin-Engl Ed, 85: 1254–1276

Zhao G C, Sun M, Wilde S A, Li S Z. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. Precambrian Res, 136: 177–202

Zhao G, Wilde S A, Cawood P A, Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. Precambrian Res, 107: 45–73

Zhao R, Wang Q F, Liu X F, Wang W, Pan R G. 2016. Architecture of the Sulu crustal suture between the North China Craton and Yangtze Craton: Constraints from Mesozoic granitoids. Lithos, 266-267: 348–361

Zheng J P, Griffin W L, Ma Q, O'Reilly S Y, Xiong Q, Tang H Y, Zhao J H, Yu C M, Su Y P. 2012. Accretion and reworking beneath the North China Craton. Lithos, 149: 61–78

Zheng Y D, Wang S Z, Wang Y F. 1991. An enormous thrust nappe and extensional metamorphic core complex newly discovered in Sino-Mongolian boundary area. Sci China Ser B-Chem, 34:1145–1154

Zheng Y F. 2009. Fluid regime in continental subduction zones: Petrological insights from ultrahigh-pressure metamorphic rocks. J Geol Soc, 166: 763–782

Zheng Y F, Xia Q X, Chen R X, Gao X Y. 2011. Partial melting, fluid supercriticality and element mobility in ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. Earth-Sci Rev, 107: 342–374

Zheng Y F. 2012. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. Chem Geol, 328: 5–48

Zheng Y F, Zhao Z F, Chen R X. 2019. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: Compositional inheritance and metamorphic modification. Geol Soc Lond Spec Publ, 474: 89–132

Zhou Y Z, Han B F, Zhang B, Xu Z, Ren R, Li X W, Su L. 2012. The Yingba shear zone on the Sino-Mongolian border: Southwestern extension of the Zuunbayan fault from Mongolia to China and implications for Late Mesozoic intracontinental extension in Eastern Asia. Tectonophysics, 574-575: 118–132

Zhu G, Jiang D Z, Zhang B L, Chen Y. 2011. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: Evidence from crustal deformation kinematics. Gondwana Res, 22: 86–103

Zhu G, Chen Y, Jiang D, Lin S. 2015. Rapid change from compression to extension in the North China Craton during the Early Cretaceous: Evidence from the Yunmengshan metamorphic core complex. Tectonophysics, 656: 91–110

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

Zhu R X, Zhang H F, Zhu G, Meng Q R, Fan H R, Yang J H, Wu F Y, Zhang Z Y, Zheng T Y. 2017. Craton destruction and related resources. Int J Earth Sci-Geol Rundsch, 106: 2233–2257

(责任编委: 刘少峰)