

# 从深部背景看燕山陆内造山作用的主因

邵济安

北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室,地球与空间科学学院,北京,100871

**内容提要:**中生代华北燕山造山带是陆内造山作用的典型,但长期来对造山作用的动力学机制存在多种分歧观点。本文尝试将岩石圈不同深度的构造整合在一起,探索陆内造山作用的主因。本文拟从燕山带中生代构造运动的基本特征入手,选择集宁-承德基底岩石圈断裂带作为先存构造薄弱带,结合不同深度层次的地质作用:①地表的断陷盆地及其火山-沉积岩建造;②断块构造的差异隆升;③固态流变和地热活动;④幔源或者壳幔混溶的火山岩,论证先存构造薄弱带的活化现象。在此基础上,通过幔源熔-流体的交代作用讨论了岩石圈强度的弱化,结合岩石圈结构的层析成像研究,得到初步结论:地幔底辟体上涌是华北克拉通中生代构造活化的重要背景。不排除不同板块间相互作用的影响。最后,从与国外典型的陆内造山带的对比中,进一步认识到:深部地幔物质上涌和上部岩石圈物质的均衡调整,是陆内造山与陆缘造山的本质区别。

**关键词:**燕山;陆内造山带;先存构造薄弱带活化;岩石圈弱化;地幔底辟体的上涌

回顾半个世纪以来地球科学研究的进展,它经历了一个从板块构造向全球系统飞跃的过程。构建在海底扩张和洋壳俯冲消减基础上的板块构造学,建立了全球岩石圈构造和运动学的模式,在30年来学科发展和应用的同时,也暴露了由于深部研究的缺乏,有关动力学机制解释方面存在的薄弱环节,而且板块构造的研究主要集中在大洋板块扩张到消亡的2亿年间,它不涉及板块碰撞之后的陆壳变形与造山过程。然而有着40多亿年历史的大陆壳演化正是与人类社会生存最为密切的。因此,种种问题促使地球科学必需向大陆内部和向地球深部进军。

1997年在美国召开的“大陆板块内部构造”会议指出:大陆板块内部各种因素导致的先存构造薄弱带活化及岩石圈强度弱化是探讨板内变形和造山机制的重要思路(Marshak, 1999),也是大陆地质的核心问题。结合我国情况,近一个世纪来,对燕山带的造山运动已经积累了大量研究资料,20世纪90年代初我国构造界已经开始了板内造山的研究,陆内(或板内)造山带可以看作:发生在陆内或克拉通之上,远离当时活动板块边界的构造变形带(Zhang Changhou, 2008)。中生代华北克拉通内部的燕山

带可以看作陆内造山的典型,但遗憾的是30年来对其造山的动力学机制始终众说纷纭,没有触及大陆地质的核心问题。

正如汪品先院士所述,我国地球科学在理论探索上未见明显的重大突破,与我国地球科学在理论探索上缺乏整合观念,缺乏全球眼光不无关系(Wang Pinxian, 2002)。本文面对上述批评,选择中生代燕山带为典型,以地热为线索,将地壳-地幔不同深度的变形、变质、岩浆活动、源区的地球化学特征,乃至地球深部的圈层结构整合在一起,尝试说明先存构造薄弱带活化和岩石圈强度弱化是陆内造山带特征,而地幔底辟体的上涌,则是华北克拉通中生代垂向构造活化和大陆板内造山的重要背景,研究目的是抛砖引玉。

## 1 先存构造薄弱带的活化

华北克拉通形成之前,从活动到稳定经历了一个较长的( $>1500\text{Ma}$ )固结过程,包括碰撞造山后、中-新元古代的调整阶段和古生代稳定的构造发育阶段。中生代初( $T_3$ )在新的全球动力学体系下,华北克拉通进入了构造活化的新阶段。在外力作用背

注:本文为中国地质调查项目(编号121201102000150009)资助成果。

收稿日期:2020-05-25;改回日期:2020-06-20;网络发表日期:2020-06-29;责任编辑:周健。

作者简介:邵济安,女,1965年毕业于北京大学地质地理系,教授,博士生导师,主要从事构造地质学研究。Email: wangcc1938@163.com。

**引用本文:**邵济安. 2020. 从深部背景看燕山陆内造山作用的主因. 地质学报, 94(8): 2190~2199, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020242.

Shao Ji'an. 2020. The dominant factors of the Yanshan intracontinental orogeny seen from its deep background. Acta Geologica Sinica, 94(8): 2190~2199.

景下,克拉通先存构造薄弱带必然是活化作用首选部位,因此构造薄弱带必然保留了判别构造环境变化的重要依据。“内蒙地轴”(Ren Jishun et al., 1980)及其南北两侧的岩石圈断裂是华北克拉通北缘重要的构造骨架,它们对从太古宙一直到中生代的地层分布、构造演化均有不同程度的控制作用。本文选择了“内蒙地轴”南缘的集宁-承德断裂作为对象,研究先存构造薄弱带的中生代构造活化。另一方面选择了“内蒙地轴”北缘的赤峰-围场断裂带作为对象,探讨岩石圈弱化的证据及原因。

“内蒙地轴”南缘的集宁-承德岩石圈断裂,位于“内蒙地轴”与“燕山台褶带”的接壤地带(Ren Jishun et al., 1980;图 1)。“燕山台褶带”的前身是中-新元古代(1800~1000Ma)形成的三叉裂谷带(Cui Shengqin et al., 2000),或称燕辽沉降带。若

将燕山带中生代地层与控制燕辽沉降带的三叉裂谷带对比(图 1),可以见到从晚三叠世杏石口组到晚侏罗世髫髻山组主要分布于燕山台褶带北侧及内蒙地轴南侧(Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province, 1989)。在晚侏罗世的后城组时期,被小型断陷盆地控制的髫髻山组地层快速隆升,占据了百花山、髫髻山、妙峰山、以及古北口以东-雾灵山以西的高地,在地势上构成了一道天然屏障,导致这次强烈差异升降的正是控制燕辽沉降带的基底岩石圈断裂。除了地壳差异升降和伴生的推覆构造外,由于受到东亚陆缘构造活动的影响,晚侏罗世末一早白垩世初的构造格局也发生了变化,具新生性的断陷盆地分布在该隆起带的南、北两侧,形成了 NNE 走向的新生性断陷盆地,如北侧的张家口盆地、滦平盆地、义县-阜新盆地,南侧华北

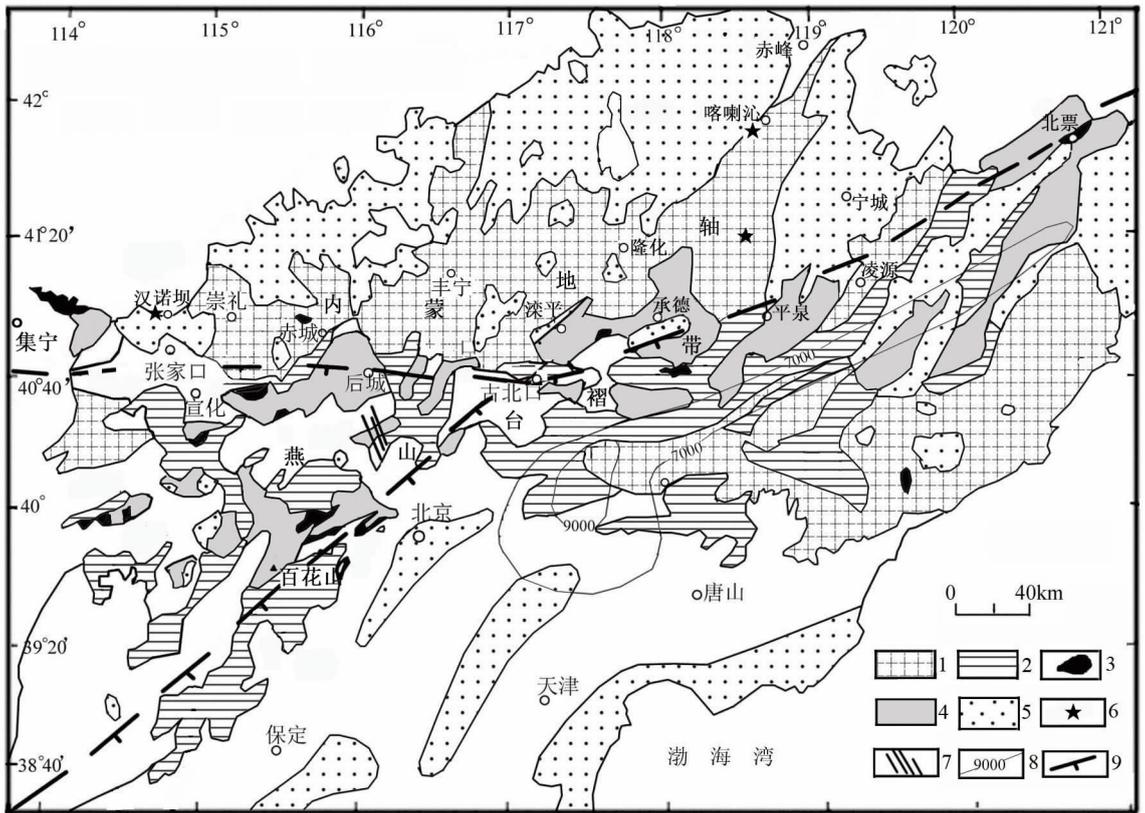


图 1 华北北缘中-新元古代燕辽沉降带和燕山带中生代火山-沉积岩分布

Fig. 1 The Meso-Neoproterozoic Yan-Liao zone of subsidence on north margin of North

China and distribution of the Mesozoic volcanic rocks and sedimentary rocks in the Yanshan belt

- 1—太古宙; 2—中-新元古代; 3—下侏罗统(包括部分上三叠统); 4—中-上侏罗统; 5—白垩系; 6—中生代堆晶岩和麻粒岩发现地点;
- 7—中生代岩墙群; 8—中-新元古代地层等厚线(m); 9—中-新元古代同沉积断裂。燕辽沉降带资料据崔盛芹等(2000)

1—Archeozoic; 2—Meso-Neoproterozoic; 3—Lower Jurassic; 4—Middle-Upper Jurassic; 5—Cretaceous; 6—discovery location for Mesozoic cumulates and granulites; 7—Mesozoic dyke swarms; 8—Meso-Neoproterozoic stratoisohypse (m); 9—Meso-Neoproterozoic synsedimentary faults; the data of Yan-Liao zone of subsidence by Cui Shengqin et al. (2000)

盆地中的一系列箕状断陷盆地。总之,对于中生代华北克拉通的活化,燕辽沉降带作为先存构造薄弱带,成为华北克拉通中生代构造格架形成的重要背景。

先存的构造薄弱带在中生代不同深度层次,特别是幔源岩浆的参与可以证明主导中生代造山作用的因素来自深部。同时这一论断也可以解释燕山陆内造山带(简称燕山带)存在的许多非典型的造山运动现象。下文主要沿着集宁-张家口-承德-平泉岩石圈断裂,通过不同学科的综合研究,对同一时期自上而下、不同形式的活化现象展开讨论,包括以下4方面内容:控制火山-沉积建造的盆地构造;断块差异隆升;固态流变和地热活动;幔源或者壳幔混溶的火山活动。以便从多维的时空角度理解华北克拉通中生代构造运动的动力学机制。

### 1.1 控制火山-沉积岩建造的盆地构造

燕山带从晚三叠世杏石口组—晚侏罗世的后城组的80 Ma间(230~150 Ma),火山-沉积建造的厚度7000 m。而中元古代至新元古代早期燕辽沉降带中心(蓟县)在长达850 Ma间补偿沉积近10000m(Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province,1989)。中生代如此强烈的火山活动,反映了岩浆上涌的能量和地壳的渗透度的加大,同时也暗示了这一时期同沉积断陷盆地活动的程度。例如京西髫髻山断陷盆地(图1),其宽度不足10km,长度大于40km,从盆地边部到中心,髫髻山组的厚度变化率达400 m/km,它们的快速堆积明显受制于断块的差异运动,断陷盆地的强烈活动是伸展背景下构造活化的表现。

此外,从研究区中生代所划分的5个火山-沉积建造来看(表1),除张家口旋回外,每一个旋回都是从火山活动起始,之后转为湖沼相沉积,最后出现粒度变粗的河流相砂砾岩。经历了从控制火山活动的断陷盆地向沉积拗陷盆地的转化,最后盆地萎缩,出现了沉积间断和构造变形。前人通过对贝加尔裂谷的通金盆地研究,将由下部含煤建造和上部砂质建造构成的二元结构看作为弱火山活动的大陆裂谷产物(Грачев,1977)。而本区在二元结构的沉积拗陷盆地形成之前,就形成了与火山活动有关的断陷盆地。从这点上看,本区中生代的盆地演化显然受到深部构造-岩浆活动的控制,与伸展背景下岩浆上涌有关,磨拉石盆地不发育的事实也显示了本区中生代伸展盆地与挤压造山带的盆地特征不相符合。

### 1.2 断块构造差异隆升

燕山带的构造变形以断块构造为主,褶皱变形

相对较弱。断裂构造以幅度大、数量多、延伸远、切割深为特征(Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province,1989)。以“燕山运动”讨论涉及的晚侏罗世髫髻山向斜为例,这是一个转折端呈方形的箱状向斜,环绕向斜边缘有多条闪长玢岩岩床(墙)(图2),其锆石 SHRIMP 的 U-Pb 年龄为149Ma(Yu Haifei et al.,2016)。结合向斜两翼地层倾角自下而上逐层变缓及火山岩喷发不整合的现象,表明髫髻山箱状向斜是在断块差异隆升背景下形成的同沉积断陷盆地。详细的1:50000大台幅区域地质调查表明:髫髻山组火山岩厚度大于840m,可分辨出42次火山喷发。岩浆重复性的喷发反映了下地壳开放岩浆房有大量岩浆物质的补给和上涌,显示了晚侏罗世时期地壳活动的强烈程度,也表明垂向差异运动是中生代构造运动中不可忽视的。

此外,侏罗纪末期在后城组(相当于承德地区的土城组)的形成过程中,燕山地区发生过的一次重要的逆冲-推覆事件,在京西、宣化、怀柔、兴隆、承德等地,普遍可以见到元古宙地层向北或北西推覆到侏罗纪地层之上,髫髻山组地层被卷入,强烈的逆冲-推覆作用形成了后城组粗碎屑岩的快速堆积(Shao Ji'an et al.,2017),然而断层的推覆距离却有限,如承德地区断层的推覆距离在数千米以内(Zhao Yue et al.,2004),它们不具有阿尔卑斯低角度、远程推覆的特征,其散在性的分布不足以影响和改变燕山带的格局。同时,推覆构造具有基底地层卷入的“厚皮构造”特征,断层后缘产状明显变陡,形成“基底卷入型冲断层”(Zhang Changhou et al.,1996),推覆构造前缘没有形成统一的前陆磨拉石盆地。变形集中在块断边部的主逆冲断层附近,断块主体变形微弱,突显了块断式变形特征。这次构造事件经历的时间并不长,它们与前述的髫髻山向斜一起显示了垂向差异运动是燕山带中生代构造变动的特色,也是板内造山作用的重要因素。

### 1.3 固态流变和地热活动

在岩石圈结构和物质的调整过程中,深部的构造热演化是第一重要因素,基底断裂的继承性活动占主导地位,在它的影响下,局部地壳的刚性弱化。因此,由固态流变和地热活动导致的韧性变形不均一性,必然是大陆造山带的另一个重要特征。燕山带存在晚三叠世和早白垩世两次不同的热演化,与此相应,发生了两次明显的断块隆升和剥蚀,它们共同记录了华北克拉通中生代的构造热演化历史。

表 1 燕山带中生代火山-沉积建造特征

Table 1 The character of Mesozoic volcanic-sedimentary formation on Yanshan belt

地质时代及火山活动峰期		地层组名	火山-沉积建造	火山岩岩性及组分特征	火山岩年龄(Ma)	火山岩岩浆来源及背景 (Sr-Nd 同位素初始值)	
白垩纪	下统上部 120Ma	大北沟旋回	青石砬组 南店组	河湖相含煤或油页岩建造, 少量火山碎屑岩			
			化吉营组 西瓜园组 大北沟组	安山岩为主,底部玄武岩 含油页岩湖相沉积 砂页-泥岩,上部安山岩	富 Fe、Mg 粗面质碱性 玄武岩,粗安岩, 流纹岩,碱度较高	114.9±2.5 <sup>①</sup> 115.5±1.5 116.0 <sup>①</sup> 122±4 125±1 132±1.6	来源与下地壳碱性岩石部分 熔融有关。年龄均 取自辽西义县组火山岩
白垩纪	下统下部 140Ma	张家口旋回	张家口组 (东岭台组)	强烈中心式流纹质、粗面质 酸-偏碱性火山岩喷发	高钾系列以流纹岩为主, 少量粗面英安岩及 中性的玄武质粗面 安山岩和粗面安山岩	136.1±1.4 136.4±1.9 138.9±2.7	酸性岩浆起源于下地壳, 张家口组 $I_{Sr}=0.7067\sim 0.7073$ <sup>⑥</sup> ; 东岭台组 $\epsilon_{Nd}(t)=-14.5\sim -17$ <sup>⑦</sup> 年龄
			白旗组	小规模裂隙式中 性火山碎屑岩喷发			
侏罗纪	上统 160Ma	髻髻山旋回	后城组	夹煤线的河湖相沉积, 下部少量玄武岩+英安岩	高钾亚碱性石英 拉斑玄武岩为主	144.6 <sup>②</sup>	具双峰特征火山岩, 属初始裂谷玄武岩系列
			髻髻山组	裂隙式-中心式中基性 火山喷溢,间夹少量沉积	主要为粗安岩、 高钾钙碱性岩,高钾, 低铁,K/Rb 比值较低	153±1 154±4 157±3 <sup>③</sup> 160±1 161±1	起源于下地壳部分熔融及地幔交代, $I_{Sr}=0.7053\sim 0.7054$ , $\epsilon_{Nd}(t)=-14.3\sim -14.8$ <sup>⑧</sup>
	中统	南大岭旋回	九龙山组	河流相、滨湖相沉积			
下统 180Ma	下花园组		河湖相含煤陆屑建造				
侏罗纪	下统 180Ma	南大岭旋回	南大岭组	间歇式大陆溢流玄武岩 以裂隙式喷发为主, 具多个沉积夹层	粗面玄武岩,上部 玄武安山岩,富集 Ba, K, LREE, 亏损 Nb, Ta	179±0.8 180±2 <sup>④</sup> ( <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar)	初始裂谷玄武岩,富集地幔部分 熔融有下地壳物质参与 $I_{Sr}=0.7058\sim 0.767$ , $\epsilon_{Nd}(t)=-7.4\sim -13.5$ <sup>⑨</sup>
			三叠纪	杏石口旋回	杏石口组	快速堆积的山麓冲击扇相, 局部河湖相夹煤线, 辽西地区下部有火山岩	辉石安山岩,安山岩

注:本文依据 2014 年国际地层委员会公布的地层时代。同位素年龄出处:① Shao Ji'an et al., 2017; ② Xiao Zhongzheng et al., 1994; ③ Zhao Yue, 2004; ④ Davis et al., 2001; ⑤ Hu Jianmin et al., 2005; 表中除一个 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄外,均为锆石 U-Pb 年龄,其他未注明出处的年龄均引自 Wu et al., 2019。同位素资料出处:⑥ Shao Ji'an et al., 2017; ⑦ Wang Rui et al., 2007; ⑧、⑨ Li Xiaoyong et al., 2006, 2004; ⑩ Shao Ji'an et al., 2011。

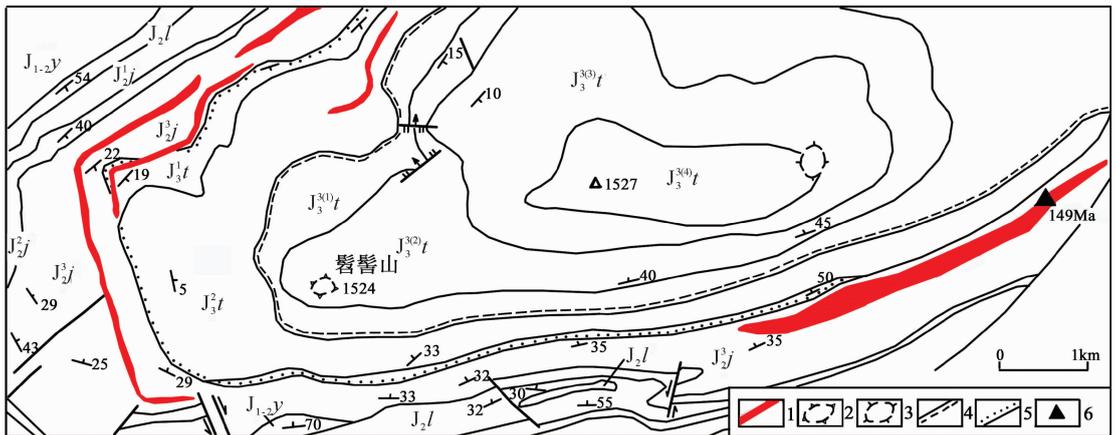


图 2 髻髻山箱状向斜构造图(引自大台幅地质图,1990,内部资料)

Fig. 2 The Generalized structural map of the box syncline in Tiaojishan (by geological map of Datai area, 1990)

1—闪长玢岩岩床; 2—推测火山口; 3—实测火山口; 4—火山喷发不整合; 5—角度不整合或平行不整合; 6—年龄采样点;

$J_3t$ —髻髻山组;  $J_2j$ —九龙山组;  $J_2l$ —龙门组;  $J_{1-2y}$ —窑坡组

1—Diorite sill; 2—presumed volcanic vent; 3—measured volcanic vent; 4—volcanic eruption discordance; 5—angular unconformity or parallel unconformity; 6—sampling point;  $J_3t$ —the Tiaojishan Formation;  $J_2j$ —the Jiulongshan Formation;  $J_2l$ —the Longmenshan Formation;  $J_{1-2y}$ —the Yaopo Formation

### 1.3.1 晚三叠世的构造热演化

20世纪80年代以来的一些研究揭示了研究区早中生代构造演化特征和地热异常背景,宋鸿林等指出近东西走向的箱形褶皱是北京西山印支期主要的构造形式,它们表现出强烈的固态流变特征,包括褶皱层、剥离断层、顺层流劈理等,同时形成了绿片岩相的变质作用,其变形-变质相当于中-上地壳10~15km的温-压条件,并且指出韧性流变层在横向和纵向上都是不均一的(Song Honglin et al., 1992)。笔者对京西灰峪向斜下二叠统变形砾石进行三维有限应变测量的结果,显示印支期褶皱从核部到两翼都发生了压扁型应变,最小主应变轴的缩短量达40%~50%,在SN挤压的同时,还存在EW方向上的伸展和流变(Shao Ji'an et al., 1985),结合奥陶纪灰岩中所见的变余糜棱岩(250~210Ma),查明韧性流变的不均一与基底断裂构造及其相应的地热差异有关。

早中生代以断块构造的差异隆升为主,近年来有人通过华北东部盆地钻井中不同构造层地热学的研究(Fu Mingxi et al., 2004),揭示早中生代( $T_{2-3}$ )的古热流值平均 $52\text{mW/m}^2$ ,较世界前寒武纪地盾及稳定克拉通的平均热流值 $40\text{mW/m}^2$ 高。华北盆地记录到早中生代( $T_{2-3}$ )由于地壳快速抬升导致的剥蚀量平均高达3122m,比晚中生代( $J_3-K_1$ )要高。在燕山地区经常可以看到南大岭组地层直接覆盖在中-新元古代或太古宙地层之上,也可以在一些沉积盆地中采集到晚三叠世一早侏罗世的火山岩砾石,反映早中生代由于深部构造热活动的差异在地表引起的均衡调整。除了火山活动(表1)外,还出现了一套三叠纪碱性拉张型的侵入岩(平均年龄220Ma),岩浆来源于富集地幔的, $I_{Sr} = 0.7050 \sim 0.7093$ ,  $\epsilon_{Nd}(t) = -17.19 \sim -3.21$ ,很可能代表了一个新的岩浆-构造阶段的开始(Yan Guohan et al., 2000)。

房山地区印支期近EW走向的糜棱岩,由角闪石组成的拉伸线理。笔者沿着内蒙地轴南缘的丰宁-隆化断裂,在黑里河附近(即图1下图右上角小黑方块附近)追踪到印支期花岗质的糜棱岩带由EW向NEE走向的转变,糜棱岩中重结晶的眼球状钾长石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄227Ma,由西向东逐渐显现了NEE走向的新构造格局(Shao Ji'an et al., 2017)。

### 1.3.2 早白垩世热界面的抬升

纵观早白垩世与构造热演变密切相关的构造变

形,大多为变质核杂岩或热隆构造,如房山变质核杂岩(127Ma)、云蒙山变质核杂岩(126Ma)、喀喇沁变质核杂岩(130~120Ma)、张宣热隆(120Ma)。同期还发育了大量岩墙群,如山西广灵-阳高的辉绿岩墙(140~116Ma)、南口-居庸关的双峰式岩墙群(124~120Ma)(Shao Ji'an et al., 2017)。表明早白垩世由于热界面的相对抬升,中酸性岩浆活动更为活跃,剪切-韧性变形也更为普遍。

华北东部盆地地热研究显示,晚中生代( $J_3-K_1$ )古热流值 $90\text{mW/m}^2$ ,热流值较早中生代增高,但是平均的剥蚀量(2066m)不及早中生代,暗示晚中生代的岩浆活动较地表的差异隆升更为突出,Fu Mingxi et al. (2004)根据热传导的理论,推断地表热流变更应发生在160Ma,这正是晚侏罗世髫髻山组陆壳加厚和火山活动最强烈的时期(表1)。此后随着岩石圈的拆沉,地壳厚度减薄,向上释放的热能增多,热界面迅速抬高,逐渐转为伸展构造环境。

早、晚中生代的两次热事件表现型式或程度有所不同,但它们共同说明在陆内造山带中,热体制的均衡调整是构造活化的关键。也正是由于大量地幔对流物质与热的输入,使燕山地区中生代陆壳逐渐改造为花岗质陆壳(Qiu Ruizhao et al., 2004),岩石圈地幔的组成也发生相应变化(见下文)。

### 1.4 幔源或者壳幔混溶的火山岩

火山岩源区的研究,是为了了解参与火山活动的岩浆来源深度,揭示岩石圈弱化带形成的构造背景。准确的火山活动年表将为认识岩浆活动规律提供重要的基础,表1中所标注的锆石U-Pb法和 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法的年龄值大多是近期经过筛选的(Wu et al., 2019),具有较高的可信度,它们显示了研究区中生代4期火山活动高峰期(220Ma、190Ma、160Ma、125Ma),与表1显示的峰值(230Ma、180Ma、150Ma、120Ma)接近,这几次火山活动高峰期相隔30Ma,从能量的积累到释放,岩浆活动所表现出的脉动性反映了它们受控于同一动力学体制。

表1通过中生代火山岩的岩石组合及同位素-地球化学特征,显示了岩浆源区特征:

(1)晚三叠世杏石口旋回的辉石安山岩的Sr-Nd同位素反映了除了有古老下地壳的重熔外,也有少量幔源物质的参与。

(2)早侏罗世南大岭旋回的中基性火山岩富集Ba、K和LREE,亏损Nb、Ta以及Sr-Nb同位素组成反映岩浆来源于富集岩石圈地幔的部分熔融,而玄武安山岩的出现及高Sr、Ba,低Y、Yb及亏损

Th、U 的地球化学特征均暗示岩浆中有下地壳物质的参与,近年来南大岭组玄武岩中前寒武纪—古生代不同时期继承性锆石的发现,再次佐证了这一推断。根据元素地球化学特征可进一步判别南大岭组偏碱性的玄武岩属于大陆板内初始裂谷玄武岩。

(3)晚侏罗世的髻髻山旋回火山岩活动增强,以裂隙式—中心式的粗安岩喷发为主,包括部分高钾钙碱性岩石,火山岩源于下地壳钙碱性玄武岩的部分熔融,不排除与底侵作用背景下幔源流体的交代作用有关,壳—幔相互作用增强,后期出现了后城组双峰式火山岩。

(4)早白垩世初的张家口旋回以高钾系列的酸性火山岩喷发为主,火山活动达到高潮。大北沟旋回的化吉营组以富 Fe、Mg 的粗面质碱性火山岩为主。之后火山活动的中心向东迁移,辽西早白垩世的义县组以玄武安山岩为主,义县组末期喷发了携带了难熔残余橄榄岩捕虏体的高镁玻基方辉安山岩(115Ma),显示了强烈的壳—幔相互作用(Shao Ji'an et al., 2008),不整合覆盖其上的阜新组玄武岩(106Ma),以其亏损的幔源特征反映了岩石圈地幔的转型。

上述研究清楚地揭示了华北北缘在中生代(230~115Ma)火山活动从弱到强,壳—幔相互作用逐渐增强,最终在 106Ma 完成了岩石圈地幔转型,作为华北克拉通先存的构造薄弱带也经历了从深部到地表的活化过程。然而要回答构造活化的根本原因还必需进一步揭示:沿着先存的构造薄弱带是否存在中生代深部幔源熔—流体的交代作用以及地幔物质上涌的证据?

## 2 幔源物质的脉动式上涌及幔源熔—流体的交代

如前所述,华北克拉通先存的构造薄弱带之所以能在中生代经历了一个完整的构造活化过程,与岩石圈深部幔源物质的持续上涌和及其导致的岩石圈强度弱化直接有关。

### 2.1 中生代的底侵作用

底侵作用是大陆垂向生长的一种重要方式。源于上地幔的部分熔融作用或地幔物质上涌,减压熔融作用所产生的玄武质岩浆从下面添加到陆壳底部的过程,堆晶岩和麻粒岩是其形成的重要标志。玄武质岩浆的底侵作用导致区域热流值升高,进而使地壳岩石部分熔融,侵入上覆中、上地壳。因此,底侵作用是地幔底辟体上涌的直接证据,而地幔底辟

作用是构造活动的原因。

笔者在内蒙古宁城—喀喇沁等多地发现了晚三叠世(230Ma)被闪长岩带上来的堆晶岩、麻粒岩捕虏体(Shao Ji'an et al., 1999, 图 1)。前人在张北新生代的汉诺坝玄武岩中,发现了被捕获的早侏罗世(198~175Ma)(Wilde et al., 2003)和早白垩世(120Ma)的堆晶岩及麻粒岩捕虏体(Fan Qicheng et al., 1993)。近年还有人陆续发现了四子王旗 138~116Ma 的麻粒岩捕虏体和汉诺坝 134Ma 富含石榴子石的麻粒岩捕虏体,通过对比,可见本区中生代三次底侵作用在岩浆来源深度、对地壳垂向增生的贡献等方面存在某些差异,然而幔源物质脉动式的上涌,则表明它们是一个分阶段的连续热演化过程(Shao Ji'an et al., 2020)。

### 2.2 中生代幔源熔—流体的上涌与交代作用

如前所述,先存的岩石圈断裂在幔源物质上涌的背景下,可以成为中生代构造活化的薄弱带,幔源物质的上涌及导致的岩石圈强度的弱化则是论证构造活化的关键证据,因此地幔熔—流体包体或捕虏晶幔源熔—流体上涌及交代作用则成为直接证据。因此,首先要找到作为载体的幔源玄武岩及其上涌的具体通道。

笔者沿着“内蒙地轴”北缘的赤峰—围场岩石圈断裂,在喀喇沁旗锦山镇以西 25km 的黑龙潭,发现了贯穿在义县组玄武岩(139.2Ma)中的金云母橄辉云煌岩(123.6~124Ma)岩筒(Shao Ji'an et al., 2017),在橄辉云煌岩中橄榄石中发现了一系列以包裹体形式存在的幔源熔—流体,利用激光拉曼和红外光谱等仪器,测定了橄榄石斑晶中的分子水、橄榄石斑晶中的原生流体( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{SO}_2$  芳香族碳氢化合物及少量络阴离子团);测定了磷酸盐质熔浆液滴的组分。含水矿物的存在暗示局部岩石圈地幔是“湿”的,而水的存在可以大大降低地幔固相线的温度(降低 400~500°C 之多),因此在特定条件下大陆岩石圈地幔可以作为板内玄武岩的源区物质(Xu Yigang, 2006)。据夏林圻等(1996)研究,地幔橄榄石和辉石中出现  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}$  时,表明存在自由流体相,作为载体的包裹体是在小于 70 km 的地幔中被捕获的。当上地幔受到热或应力的扰动,水被激活逃逸进入地幔围岩,熔—流体的交代导致岩石圈的弱化,最后沿着先存的构造薄弱带上升至地表。

笔者沿着“内蒙地轴”北缘断裂继续东延,在北票—义县—阜新等多处早白垩世的火山岩中发现了

地幔流体交代的現象,例如,在北票“高 Mg<sup>#</sup>”安山岩和义县高镁玄武岩中均发现了多种被交代的地幔捕虏晶(Shao Ji'an et al., 2017);在阜新玻基方辉安山岩中发现了被高镁-低硅玻璃质包裹、并具正环带结构的古铜辉石(Shao Ji'an et al., 2008),这些壳-幔熔体混合的現象均反映了克拉通基底的岩石圈断裂是地幔熔-流体上涌的重要通道,而地幔物质的上涌和交代则是导致华北中生代岩石圈弱化的重要原因。同时富集的岩石圈地幔也逐渐被改造,改造为方辉橄榄岩-二辉橄榄岩地幔。

### 3 地幔底辟体的上涌

20世纪80年代以来,人们利用地震层析成像手段揭示了华北地区深部的三维速度结构。在此基础上,路凤香等采用“蘑菇云”、“平流层”模型(而非地幔柱模型),描述了华北地幔物质上涌的底辟体(Lu Fengxiang et al., 2000)。幔源物质和热流的上升是华北板内造山的主要原因(Song Honglin, 1999)。图3是通过燕山带的层析成像图(彭聪等, 2000),该图展示的是 N40°~45°, E115°~120°的剪切波速度结构,北京位于该区南界,在研究区正通过的燕山带,4.3~4.6 km/s 被定为该区软流圈顶界面的波速值,从图中可见,75 km 以下正对着地幔上涌的底辟体。据 Ma Zhongjin (1999) 研究,燕山带下方 8~20 km 是伸展构造发育的“多震层”,而燕山带以北的内蒙地轴则“很少地震活动,深部结构单一,不含低速、高导层”。足以可见正是这一巨大的构造不连续面为幔源物质和热的上涌提供了天然的通道。

从华北晚中生代盆山系的形成来看,现今华北地区高分辨率面波层析成像所显示的地幔底辟体上涌的特征,实际在晚中生代(晚侏罗世末期—早白垩世)就已经形成了(Shao Ji'an et al., 2003)。路凤香等通过髫髻山组和义县组火山岩的对比研究,认为前者是在加厚地壳条件下,由壳-幔过渡带的部分熔融形成;后者则是下地壳与被幔源熔流体交代弱化的岩石圈地幔相互作用下形成的,由此推测弱化的岩石圈地幔出现于 135 Ma 以后,发育于小型拉伸盆地之下,对应于小型的软流圈底辟体之上(Lu Fengxiang et al., 2006)。

从 Zhu Jieshou et al. (2002) 的研究成果看,华北地幔底辟体上涌的格局与东亚巨型裂谷系以及西太平洋低速带都相连,而西太平洋低速带与地幔柱关系已经成为目前研究的新热点,期望能对包括本

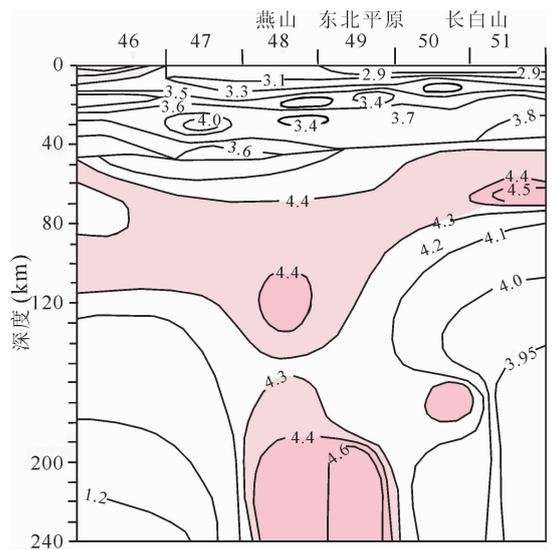


图3 燕山下方岩石圈/软流圈剪切波速度结构  
(据彭聪等, 2000)

Fig. 3 The shear wave velocity structure of lithosphere and asthenosphere beneath the Yanshan (after Peng Cong et al., 2000)

区在内的东亚大陆边缘的研究提供更多的信息。

### 4 燕山陆内造山带研究的意义

东亚是地球结构和演化过程最为复杂的大陆,本文讨论的燕山陆内造山带是在华北克拉通基底上发育的。2.5~2.6 Ga 的阜平运动将一些古老的小陆核焊接、镶嵌,形成了华北克拉通,华北 1.7~1.8 Ga 基性岩墙群的形成标志了克拉通最后的固结(Lu Fengxiang et al., 2010)。燕山带记录了华北克拉通中生代(230~110 Ma)的活化、造山过程。全球有多个建立在前寒武纪基底上的板内造山带(Cui Shengqin, 1999),其中南非 Kappvaal 克拉通之上的达拉造山带(Martin, 1983)与中国华北克拉通之上的燕山带,都是建立在具有太古宙地幔的古老克拉通基底上的陆内造山带,通过它们的对比可以更清楚看到燕山陆内造山带的特征及其研究意义,二者有两点共同之处:① 它们的陆内造山过程都是从地幔隆起以及下地壳底部的底侵作用开始的,底侵作用导致了地壳垂向增生,地表相应出现了裂谷和地堑,以及与此相伴的具厚皮构造特征的逆冲-推覆构造。之后出现了壳-幔混熔的岩浆活动以及反映伸展体制的双峰式或碱性的岩浆侵位。② 断块差异隆升-剥蚀和山间盆地沉积、岩浆强力底辟以及热隆-变质核杂岩的形成,都体现了垂向上物质的均衡调整,其中热动力作用占有重要位置。上述两点,即

深部地幔物质上涌和岩石圈上部的均衡调整是陆内造山作用与陆缘造山的本质区别。

二者不同之处有三点:① 燕山带后期在持续的地幔底辟热隆背景下出现了大量伸展构造,最终出现了岩石圈地幔的转型,而达马拉造山带最后终止在地壳加厚和均衡隆升阶段;② 达马拉造山带经历了 340Ma 的造山过程(840~500Ma),而燕山带造山过程只经历了 120Ma(230~110Ma),足以显示燕山带造山作用的强烈;③ 燕山带所在的中国华北克拉通是全球最小的克拉通,其面积只有  $170 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,比南非 Kappvaal 克拉通小得多。而且中国华北克拉通固结年龄晚于南非 Kappvaal,稳定性相对较低(Lu Fengxiang, 2010),易受周边复杂构造环境的影响,特别是西太平洋中生代大火成岩省或地幔柱的影响。

## 5 结论

华北克拉通中生代活化及燕山造山运动都是长期来被人们关注的热点,而今年正是《大陆动力学》这一科学命题提出 30 周年,本文借此机会,从陆内造山的角度重新认识燕山带的形成机制。本文通过不同深度层次地质作用的研究,揭示了燕山陆内造山带的两个重要事实:① 中生代二元结构的断陷盆地多阶段活动、断块构造的差异升降、地热能量不断聚集和释放及其相应的固态流变,都与幔源或者壳幔混溶的岩浆活动有关。② 本区中生代壳-幔过渡带的三次底侵作用,以及幔源熔-流体对岩石圈的交代作用都与地幔底辟体上涌有关。从而进一步证实了,引起先存构造薄弱带活化和岩石圈强度弱化是地幔底辟体的上涌,这是板内变形和陆内造山作用的重要机制,与华北克拉通下方的岩石圈地幔演化有关。本文侧重讨论陆内造山带垂向的增生和改造,不排除中生代华北岩石圈板块与相邻的大洋或大陆岩石圈板块之间相互作用所产生的水平效应。

**致谢:** 借此感谢路凤香老师多年来对笔者的帮助。

## References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province. 1989. Regional Geology of Hebei Province, Beijing Municipality and Tianjing Municipality. Beijing: Geological Publishing House, 1~640 (in Chinese).
- Cui Shengqin. 1999. On global Meso-Cenozoic intracontinental orogenesis and orogenic belts. *Earth Science Frontiers*, 6 (4): 283~293 (in Chinese with English abstract).
- Cui Shengqin, Li Jinrong, Sun Jiashu, Wang Jianping, Wu Zhenhan, Zhu Dagang. 2000. Sequences of Tectonic Movement and Regional Tectonic Framework of North Margin of the North China Plate. Beijing: Geological Publishing House, 114 (in Chinese with English abstract).
- Fan Qicheng, Liu Ruoxin, Li Huamin, Li Ni, Sui Jianli, Lin Zhuoran. 1998. Zircon geochronology and rare earth element geochemistry of granulite xenoliths from Hannuoba. *Chinese Science Bulletin*, 43: 1510~1515.
- Hu Jianmin, Zhao Yue, Liu Xiaowen, Shi Yuruo, Zhao Guochun. 2005. SHRIMP U-Pb dating for zircons from pyroxene and esite of Shuiquangou Formation in western Liaoning Province and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 24(2): 104~109 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoyong, Li Chaowen, Fan Liyong. 2006. Geochemistry of Mesozoic mafic-intermediate volcanic rocks and its constraints on lithospheric characteristics. *Geological Journal of China Universities*, 12 (3): 319~327 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang. 2010. Multiple-geological events of ancient lithospheric mantle beneath peridotite xenoliths in kimberlite. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 3177~3188 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Li Wuping, Chen Meihua, Chen Zhongmei. 2000. The main evolution pattern of Phanerozoic mantle in the eastern China: the "mushroom cloud" model. *Earth Science Frontiers*, 7 (1): 97~107 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Zhang Ruisheng, Shao Ji'an, Yu Chunmei. 2006. Interaction between crust and weakening lithospheric mantle: taking the Yanshan orogenic belt as example. *Earth Science-Frontiers of China University of Geosciences*, 31(1): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zongjin, Zhao Junmeng. 1999. Contrast research on Tianshan orogenic belt and Yinshan-Yanshan orogenic belt. *Earth Science-Frontiers*, 6 (3): 95~102 (in Chinese with English abstract).
- Marshall S, Pluijm B, Hamburger M, et al. 1999. Preface: The tectonics of continental interiors. *Tectonophysics*, 305(1-3): VII-X.
- Martin H. 1983. Alternative geodynamic models for the Damara Orogeny: critical discussion. In: Martin E, ed. *Intracontinental Fold Belts*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 913~945.
- Ren Jishun, Jiang Chunfa, Zhang Zhenkun, Qin Deyu. 1980. The Geotectonic Evolution of China. Beijing: Science Press, 32 (in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an. 1985. A preliminary analysis of the strain pattern in Huiyu syncline, west suburb of Beijing. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, (4): 92~96 (in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an, Han Qingjun, Zhang Lūqiao, Mu Baolei. 1999. Cumulate complex xenoliths in the Early Mesozoic in eastern Inner-Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 44 (14): 1272~1279.
- Shao Ji'an, Zhang Changhou, Zhang Lūqiao, Zhang Yongbei. 2003. Suggestion of a dynamic model of North China basin-range system. *Progress in Natural Science*, 13 (4): 311~320.
- Shao Ji'an, He Guoqi, Zhang Lūqiao. 2005. Deep-seated factors controlling the intracontinental orogeny of Yanshan Mountains. *Earth Science Frontiers*, 12 (3): 137~148 (in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an, Zhang Hongfu, Lu Fengxiang. 2008. Exploring processes and setting of crust- and mantle-melts interactions in west Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2205~2211 (in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an, Zhang Lūqiao, Tang Kedong. 2017. Phanerozoic Continental Geology of Northern Central North China. Beijing: Geological Publishing House, 1~317 (in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an, Zhou Xinhua, Zhang Lūqiao. 2020. Phanerozoic

- multiple underplating beneath northern margin of North China Craton and its implication for tectono-magmatism and deep dynamics. *Earth Science Frontiers*, DOI: 10.13745/j.esf.sf.2020.6.41.
- Song Honglin, Shan Wenlang, Fu Zhaoren. 1992. Ductile flow layer with in the Crust and its structural appearance. *Geoscience*, 6(4):494~502 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pingxian. 2002. Crossing the Earth's spheres-on the "Earth System Process" meeting in Edinburg. *Advance in Earth Sciences*, 17(3):311~313 (in Chinese with English abstract).
- Wang Rui, Chen Bin, Liu Xiaoming. 2007. Geochemical characteristics and origin of the Tiaojishan and Donglingtai Formations from Western Hill, Beijing. *Geological Journal of China Universities*, 13(3):603~612 (in Chinese with English abstract).
- Wilde S A, Zhou X H, Nemchin A A, Sun M. 2003. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China Craton. A Consequence of the Dispersal of Gondwanaland and Accretion of Asia. *Geology*, 31(9): 817~8203.
- 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. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47:173~195.
- Xiao Zongzheng, Yang Honglian, Shan Qingsheng. 1994. The Mesozoic Stratigraphy and Biota of Beijing Area. Beijing: Geological Publishing House, 33~48 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang. 2006. Using basalt geochemistry to constrain Mesozoic-Cenozoic evolution of the lithosphere beneath North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 13(2):93~104 (in Chinese with English abstract).
- Yan Guohan, Mu Baolei, Xu Baoliang, He Guoqi, Tan Linkun, Zhao Hui, He Zhongfu. 2000. Chronology and Sr, Nd, Pb isotopic characteristics and its implication for Triassic alkaline plutons in Yan-Liao areas. *Science in China, Series D*, 30(4): 383~387 (in Chinese with English abstract).
- Yu Haifei, Zhang Zhicheng, Shuai Gewei, Chen Yan, Tang Wenhao. 2016. SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb ages and geological significance of the volcanic rocks in Tiaojishan Formation in Ming tombs-western hills, Beijing. *Geological Review*, 62(4):807~826 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Changhou. 2008. A review on the continental intraplate deformation and dynamics. *Earth Science Frontiers*, 15(3):140~149 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yue, Zhang Suanhong, Xu Gang, Yang Zhengyu, Hu Jianmin. 2004. The Jurassic major tectonic events of the Yanshanian intraplate deformation belt. *Geological Bulletin of China*, 23(9-10):854~864 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Cai Xuelin, Yan Zhongqiong, Cao Xiaolin. 2002. High resolution surface wave tomography in East Asia and West Pacific Marginal Seas. *Chinese J. Geophys.*, 45(5): 646~664 (in Chinese with English abstract).
- Грачев А Ф. 1977. Рифтовые зоны земли, Ленинград: Недра, 246.
- ### 参 考 文 献
- 崔盛芹. 1999. 论全球性中-新生代内陆造山作用与造山带. *地质学前沿*, 6(4):283~293.
- 崔盛芹, 李锦蓉, 孙家树, 王建平, 吴珍汉, 朱大岗. 2000. 华北陆块北缘构造运动序列及区域构造格局. 北京:地质出版社, 114.
- 樊祺诚, 刘若新, 李惠民, 李霓, 隋建立, 林卓然. 1998. 汉诺坝捕虏体麻粒岩锆石年代学与稀土元素地球化学. *科学通报*, 43(2): 133~137.
- 付明希, 胡圣标, 汪集喈. 2004. 华北东部中生代热体制转化及其构造意义. *中国科学(D辑)*, 36(4): 514~520.
- 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, 1~640.
- 胡健民, 赵越, 刘晓文, 石玉若, 赵国春. 2005. 辽西凌源地区水泉沟组鞍山岩锆石定年及其意义. *地质通报*, 24(2):104~109.
- 李晓勇, 李超文, 樊立勇. 2006. 燕山地区中生代中基性火山岩地球化学对岩石圈性质的约束. *高校地质学报*, 12(3):319~327.
- 路凤香. 2010. 华北克拉通古老岩石圈地幔的多次地质事件:来自金伯利岩中橄榄岩捕虏体的启示. *岩石学报*, 21(6):3177~3188.
- 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. *地质学前沿*, 7(1):97~107.
- 路凤香, 郑建平, 张瑞生, 邵济安, 李伍平, 余淳梅. 2006. 地壳与弱化石圈地幔的相互作用:以燕山造山带为例. *地球科学*, 31(1): 1~7.
- 马宗晋, 赵俊猛. 1999. 天山与阴山-燕山造山带的深部结构和地震. *地质学前沿*, 6(3):95~102.
- 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 秦德余. 1980. 中国大地构造及其演化. 北京:科学出版社, 32.
- 邵济安. 1985. 京西灰峪向斜应变变型的初步分析. *北京大学学报(自然科学版)*, (4):92~96.
- 邵济安, 韩庆军, 张履桥, 牟保磊. 1999. 内蒙古东部早中生代堆积杂岩捕虏体的发现. *科学通报*, 44(5):478~485.
- 邵济安, 张长厚, 张履桥, 张永北. 2003. 关于华北盆地体系动力学模型思考. *自然科学进展*, 13(2):218~224.
- 邵济安, 何国琦, 张履桥. 2005. 燕山陆内造山作用的深部制约因素. *地质学前沿*, 12(3):137~148.
- 邵济安, 张宏福, 路凤香. 2008. 辽西壳幔熔体相互作用过程和背景的探讨. *岩石学报*, 24(10):2205~2211.
- 邵济安, 张履桥, 唐克东. 2017. 华北北部中段显生宙大陆地质. 北京:地质出版社, 1~317.
- 邵济安, 周新华, 张履桥. 2020. 华北克拉通北缘显生宙四次底侵作用及其构造-岩浆活动与深部背景. *地质学前沿*, DOI:10.13745/j.esf.sf.2020.6.41.
- 宋鸿林, 单文琅, 傅昭仁. 1992. 论壳内韧性层及构造意义. *现代地质*, 6(4):494~502.
- 彭聪, 高瑞. 2000. 中国大陆及邻近海域岩石圈/软流圈结构横向变化研究. 北京:地震出版社, 22~26.
- 邱瑞照, 邓晋福, 周肃, 等. 2004. 华北地区岩石圈类型:地质与地球物理证据. *中国科学(D辑地球科学)*, 34(8):698~711.
- 汪品先. 2002. 穿越圈层, 横跨时空一记“地球系统过程”国际大会. *地球科学进展*, 17(3):311~313.
- 王蕊, 陈斌, 柳小明. 2007. 北京西山地区髻髻山组合东岭台组火山岩地球化学特征和岩浆起源. *高校地质学报*, 13(3):603~612.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996. 地幔橄榄岩捕虏体中的流体包裹体. 岩浆包裹体和玻璃. 见:杜乐天等主编. *上地幔流体与软流层(体)地球化学*. 北京:地质出版社, 230~271.
- 萧宗正, 杨鸿连, 单青生. 1994. 北京中生代地层及生物群. 北京:地质出版社, 33~48.
- 徐义刚. 2006. 用玄武岩组成反演中-新生代华北岩石圈的演化. *地质学前沿*, 13(2):93~104.
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 何国琦, 谭林坤, 赵晖, 何中甫. 2000. 燕辽-阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr, Nd, Pb 同位素特征及意义. *中国科学*, 30(4):383~387.
- 于海飞, 张之诚, 帅歌伟, 陈燕, 汤文豪. 2016. 北京十三陵-西山髻髻山组火山岩年龄及其地质意义. *地质评论*, 62(4):807~826.
- 张长厚. 2008. 大陆板内构造变形及其动力学机制. *地质学前沿*, 15(3):140~149.
- 张长厚, 宋鸿林. 1996. 燕山板内造山带中生代逆冲构造样式及形成过程. *地质力学学报*, 2(3):21~22.
- 赵越, 张栓宏, 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(9-10):854~864.
- 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 严忠琼, 曹小林. 2002. 东亚及西太平洋边缘高分辨率面波层析成像. *地球物理学报*, 45(5):646~664.

## The dominant factors of the Yanshan intracontinental orogeny seen from its deep background

SHAO Ji'an\*

*The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education;  
School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871*

*\* Corresponding author: wangcc@tsinghua.edu.cn*

### Abstract

The Mesozoic Yanshan orogenic belt in the North China is typical of intracontinental orogeny, but there are divergent views on the dynamic mechanism of its orogeny. In this article an attempt is made to explore the key factors in the intracontinental orogeny by comprehensively investigating the structures at different depths of the lithosphere to discover the main characteristics of the Mesozoic tectonic movement in the Yanshan belt. At first, with the Jining-Chengde basement lithospheric fault belt as an example, activation of the preexisting weak structure belts is studied in terms of geological actions at different depth levels: (1) the surface faulted basins and their volcanic-sedimentary formations, (2) the different swells of block structures, (3) the rheological deformation and thermal activity, (4) the mantle-derived or crust-mantle miscible volcanism. Secondly, weakening of the lithosphere is investigated through the mantle-derived fusion-fluid metasomatism. Finally, by taking into account the tomographic imaging of the lithospheric structures, it can be concluded that (1) the upwelling of mantle diapir is the most important background of Mesozoic intracontinental orogeny in the North China Craton, and (2) that the effects of interaction between adjacent plates should not be excluded. Finally, from comparison with other typical intracontinental orogenic belts abroad, it is further recognized that deep mantle material upwelling and isostatic adjustment of upper lithosphere materials are essential differences of the intracontinental orogeny from the continental margin orogeny.

**Key words:** Yanshan; intracontinental orogeny; activation of preexisting weak structure belts; weakening of the lithosphere; mantle diapir upwelling