

华北地区岩石圈类型：地质与地球物理证据^{*}

邱瑞照^{**} 邓晋福 周 肃 李金发 肖庆辉 吴宗絮 刘 翠

(① 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; ② 中国地质大学岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083; ③ 中国地质大学, 武汉 430074; ④ 国土资源部信息中心, 北京 100812; ⑤ 国家地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要 根据华北地区的地质和地球物理特征, 区分出华北地区的克拉通型、造山带型和裂谷型 3 种岩石圈类型, 依据岩石学方法以及地震波速与成分的关系, 建立了华北地区克拉通型、造山带型和裂谷型岩石圈的壳幔岩石学结构和化学结构。研究表明, 华北地台具有与全球典型克拉通一致的特征, 鄂尔多斯为经历了中生代地台“活化”和“改造”后残存的克拉通岩石圈, 陆壳主体成分由 TTG 构成, 岩石圈地幔主要由强亏损的方辉橄榄岩构成, 它于晚太古宙-早元古宙最终形成以后, 一直保持至今, 其壳幔岩石学结构可以作为华北乃至中朝地台克拉通型岩石圈的一个参照。中生代时期, 华北地台中东部地区在燕山造山过程中被“活化”, 大量对流地幔物质与热输入使该区原来的 TTG 陆壳组分被改造成为花岗质陆壳, 岩石圈地幔被燕山期形成的方辉橄榄岩-二辉橄榄岩所代替。燕山-太行山是华北东部地区新生代发育裂谷作用后残留的造山型岩石圈, 因为经历了新生代的伸展减薄, 现今的厚度不能代表燕山期造山时的地壳和岩石圈地幔厚度, 但岩石圈地幔和陆壳的物质及其结构仍然是燕山运动期间造山时形成的。新生代时期, 华北东部的大陆裂谷作用形成以华北东部平原为代表的裂谷型岩石圈; 随着裂谷发育, 大量玄武岩喷发, 使燕山期的“酸性化”陆壳又被“基性化”, 燕山期形成的岩石圈地幔被破坏形成以二辉橄榄岩为主体的喜山期岩石圈地幔; 裂谷型地壳和岩石圈地幔经历了岩石圈尺度上伸展减薄和热侵蚀, 现今地球物理探测的岩石圈地幔和陆壳的物质和结构是新生代形成的。华北地区岩石圈形成和演化表明, 大量对流地幔物质与热输入是不同类型岩石圈形成的关键, 壳幔岩石学结构是岩石圈演化的综合记录, 它们是中新生代中国大陆动力学系统与华北地台东侧的太平洋板块共同作用的结果。

关键词 岩石圈类型 地质与地球物理证据 壳-幔岩石学结构 深部过程

2004-01-08 收稿, 2004-04-28 收修改稿

^{*} 国土资源部科技计划专项(编号: 20001010202, 200010103)、“中国三维岩石圈深部物质模型研究”课题、中国地质大学岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室开放课题(编号: 2003009, 2003010)、中国地质调查局重大基础研究项目(编号: 200113900018)和国家自然科学基金重点项目(批准号: NSFC 402344048)共同资助

^{**} E-mail: qiuruizhao@21cn.com

岩石圈深部物质是地球动力学研究的基本参数，也是大陆动力学研究的基础。区分不同的岩石圈类型及深部物质结构，可以为解析大陆形成、演化过程中形成的复杂景象、评估资源潜力、灾害环境预测以及大陆动力学研究等提供重要依据。

中国东部中生代岩石圈的巨大减薄和中生代“成矿大爆发”是中国地质历史上最有意义的事件之一，华北地台是中国最古老的大陆克拉通和重要的成矿区^[1~3]，对其深部物质结构及其深部过程的探讨无疑具有重要的意义。本文根据华北地区的地质特征和现今地球物理特征，区分出华北地区的克拉通型、造山带型和裂谷型岩石圈类型。依据岩石学方法^[2,4]和地震波速与成分的关系¹⁾，建立了相应类型的壳幔岩石学结构和化学结构，并简要讨论了它们成分结构演化的深部过程。

1 华北地区的岩石圈类型

区分岩石圈类型是探讨岩石圈演化的基础，邓晋福等人^[2]指出中国大陆乃至全球的大陆构造可以用根柱构造进行描述，地壳浅部主要表现为挤压造山带、大陆裂谷带和克拉通 3 种构造形态，它们分别对应的岩石圈类型是造山带型、大陆裂谷型和克拉通型。华北东、西部地区的地貌、地质构造、地球物理特征等都有明显差异，暗示华北地区可能存在不同类型岩石圈。

1.1 现今地球物理与地热特征

地球物理探测结果显示，华北地区现今的岩石圈结构横向上极不均一(表 1)，总体上陆壳和岩石圈厚度东薄西厚，地表热流西冷东热。不同块体的地震速度 V_p 结构各具特色(图 1)。

位于华北西部的鄂尔多斯块体，陆壳内速度结构为正梯度，无壳内低速层(图 1(a))，有效弹性岩石圈(EET)厚(>200 km)^[5,10]，有大陆根，热流低(44 mW/m^2)^[7,8]，近代无强地震，无活动断层，无岩浆活动，具有典型的大陆克拉通岩石圈结构特征。

位于华北中部的燕山和太行山地区属于华北似环状裂谷盆地的周边山岭带，两者的地壳速度结构相似(图 1(b), 1(c))。以在上地壳下部(16~20 km)和下地壳壳幔过渡带(32~40 km)分别存在 2 个低速体及地表平均热流值较高(60 mW/m^2)^[7,8]区别于西部鄂尔多斯块体。由岩石学估算^[2]，燕山造山时岩石圈和陆壳的厚度分别为 60~80 km 和 50~60 km。总体特点符合造山带结构模型。

华北东部平原属于华北似环状裂谷盆地，为裂谷盆地和盆地中央隆起相间的地形格局，地壳速度结构较复杂(图 1(d)~(g))，总体上陆壳厚度较薄(30~34 km)。在裂陷盆地拗陷区，可能因为盆地内广泛含水、微裂隙和微孔隙发育，以及地温高等原因，致使陆壳岩石的密度减小、结晶基底界面不清以及出

表 1 华北地区现今岩石圈结构单元及其总体特征^{a)}

序号	单元	鄂尔多斯克拉通块体	燕山-太行造山带	华北裂谷盆地
1	地貌	高原，边界为狭长盆地	华北裂谷盆地的周边山岭	凹陷盆地与盆地内隆起
2	地壳平均厚度/km	42	37	31
3	岩石圈平均厚度/km	>200，大陆根	90	70
4	地表平均热流/ $mW \cdot m^{-2}$	44	60	69
5	燕山期岩浆活动	无	花岗岩	花岗岩
6	喜马拉雅期岩浆活动	无	无	玄武岩喷发
7	活动构造	稳定，整体隆升	推覆断层和正断层	正断层和走滑断层
8	地震	弱	多和强	多和强
9	地壳结构	双层结构，无低速带，横向均一	发育双低速带	低速带发育，横向高度不均一，某些界面，甚至 Moho 的反射波在某些地点不清或缺失
10	陆壳平均波速 $V_p/km \cdot s^{-1}$	6.3	6.2~6.3	6.3

a) 序号 1, 2, 8~10 引自脚注 2); 序号 3 引自文献[5, 6]; 序号 4 引自文献[7, 8]; 序号 5 引自文献[1, 9]; 序号 6 和 7 引自文献[1]

1) 邱瑞照, 邓晋福, 周 肃, 等. 陆壳岩石化学结构建立方法探讨. 地球学报(出版中), 2004
2) 邓晋福, 魏文博, 于炳松, 等. 中国三维岩石圈——“华北地区三维岩石圈结构”专题报告, 2003

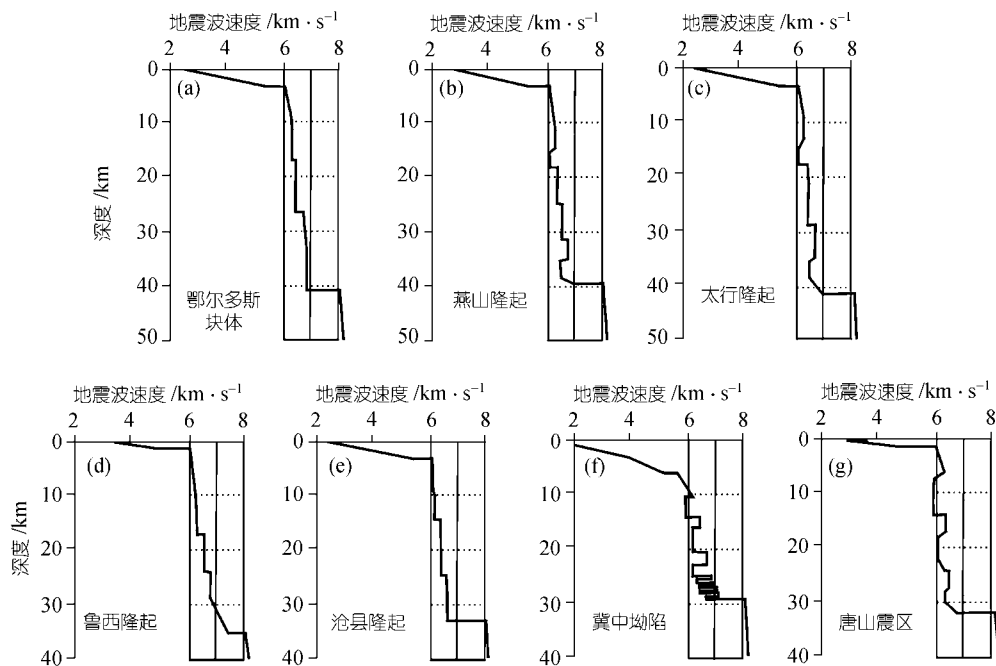


图1 华北地区不同块体地震速度结构

现高、低速互薄层等结构^[11], 而鲁西隆起的 V_p 波速结构大体可代表去除这些影响之后的速度结构(图 1(d)). 华北东部平原新生代时期属于典型的大陆裂谷^[6], 由岩石学推导的岩石圈厚度为 60~80 km^[2], 与地球物理资料的结果基本一致, 而火成岩探针新技术结果^[2,6,12,13]指示该区侏罗纪前的岩石圈和陆壳的厚度分别为 200~250 km 和 40 km, 说明中生代华北岩石圈被强烈减薄和发生岩石圈去根作用^[2,6]. 热流资料显示中生代末、古近纪初裂谷发育阶段古热流达 80 mW/m²^[7,8], 新近纪以来岩石圈热状态逐步衰减, 降到目前所观察的 63 mW/m², 这与随大陆裂谷发育, 逐渐成为热岩石圈的特点相符.

1.2 地质演化历史

华北地区最老的结晶基底年龄为 3.7 Ga, 是世界上最古老的陆核之一. 地台基岩变质作用时代主要发生于前寒武纪^[1]. 前寒武纪花岗岩研究^[14]表明, 华北陆壳的形成可大致分为: 1) 古太古代 TT 型幼年期陆壳(不成熟陆壳阶段); 2) 中太古代或新太古代 TTGG 型青年期陆壳(半成熟陆壳阶段); 3) 新太古代或古元古代 GG 型成年期陆壳(成熟陆壳阶段); 这与

198 个早前寒武纪变质岩石 Sm-Nd 模式年龄 TDM 统计峰值集中在 2700 Ma 和 2900 Ma 相符^[15], 同时也与此期间形成特征的含铁建造-新太古代的铁英岩矿床最发育^[16]吻合. 同位素测定^[17]华北桑干地区孔兹岩系、片麻岩地体和高压基性麻粒岩的麻粒岩相变质作用都发生在早元古代末, 中元古代长城系下部常州沟组碎屑锆石 SHRIMP 年龄表明碎屑沉积物都来自以约 2.5 Ga 陆壳物质为主的华北克拉通物源区^[18]. 由此说明华北陆壳形成于古太古代-早元古代^[14,17,18], 具有与全球克拉通形成过程一致的历史.

盖层发育主要在中元古之后, 包含 5 个阶段: (1) 中元古(Pt_2)-中奥陶早期(O_2^1), 为连续的海相沉积; (2) 中奥陶纪晚期(C_2^2)-上石炭纪早期(C_2^1), 缺乏沉积地层记录, 是华北地台上升、剥蚀和风化夷平时期; (3) 上石炭纪晚期(C_2^2)-三迭纪(T), 华北地台由海陆交互相沉积逐渐转变为陆相盆地沉积; (4) J-K, 为燕山造山阶段; (5) E-Q, 在地台东部发育裂谷盆地. 因此, 从华北地台的形成和演化历史看, 可以认为岩石圈在侏罗纪之前一直保持稳定; 侏罗纪以后地台被燕山造山运动和裂谷作用“破坏”和“改造”.

1.3 火成岩活动

火成岩浆活动是壳幔相互作用的标志和探讨壳幔组成与演化的重要窗口。在华北地区前侏罗纪虽然也有岩浆活动, 但加里东期岩浆活动仅表现为在鲁西蒙阴、辽宁复县等地有含金刚石的金伯利岩浆侵入, 反映的只是克拉通环境下的小规模的地幔热扰动^[2]。华力西期是华北地台与蒙古微大陆拼合形成北方大陆时期, 印支期是北方大陆与南方大陆拼合形成中国大陆时期, 这两个时期岩浆活动范围主要限于华北地台北缘、北东缘和南缘^[1], 地台内部几乎没有岩浆活动, 说明华力西期、印支期岩浆活动对华北地台内部的影响很小。所以, 华北地台自晚太古代-早元古代形成以来至侏罗纪之前无大规模的幔源岩浆活动, 也说明侏罗纪之前华北岩石圈壳幔结构长期稳定。

自侏罗纪以来地台被“活化”, 伴随燕山运动的岩浆活动强烈而广泛(200 ~110 Ma)^[9,19~21]。燕山期花岗岩具有壳幔混合源区特征, 并与同时代的镁铁质-超镁铁质岩、煌斑岩、辉长岩、闪长岩、以及火山岩的Sr, Nd同位素组成十分类似^[21~23]。最新厘定的构造-岩浆事件序列表明华北地区经历了由J₁ 初始和J₂ 早期造山→J₃ 峰期造山→K₁¹ 晚期造山→K₁² 后造山

的完整造山旋回¹⁾, 其中J₁-J₂形成加厚陆壳, J₃以后岩石圈大面积拆沉。J₃-K₁¹是岩浆活动最强烈时期, 与130 ~110 Ma大规模成矿作用^[21,24], 以及壳幔相互作用峰值时段(120±10) Ma(最大范围 80~160 Ma)^[18,25]相对应。广泛分布的中生代火成岩在空间上形成了NEE向的吉辽鲁东岩带、燕辽岩带、太行山岩带、鲁淮岩带和NWW向的豫陕岩带、华北陆块北缘西段岩带等^[1]。根据各省区地质图上出露面积统计(表 2), 燕山期侵入岩以胶东台隆的花岗岩出露面积最大(33%), 其次在燕山、鲁西地区约占 16%, 豫西占 12.4%, 山西台隆只占 1.1%, 鄂尔多斯没有侵入岩出露。按岩性统计, 华北地台燕山期花岗岩占整个华北地台侵入岩的 93.6%, 中性岩占 5.2%, 基性、超基性岩约 1%, 说明伴随燕山造山运动对华北地台的“改造”以花岗质岩浆为主、区域遍及华北地台的中东部地区。

喜马拉雅期岩浆活动以大量玄武岩浆喷溢为特征, 侵入岩很少, 主要分布于华北地台东部的平原区。按火山活动时代可分为古近纪和新近纪-第四纪两个旋回, 前者以拉斑玄武岩为主, 后者以碱性玄武岩为主。实验证实^[26], 拉斑玄武岩起源于地幔较浅位置(1.5~2.5 GPa), 一般是经大程度部分熔融而形成

表 2 华北地台部分构造单元地层和岩浆岩侵入体出露面积统计^{a)}

基岩出露面积 统计/%	区域	基岩(Ar—Pt)	地层(Pt ₂ —Q)	花岗岩	中性岩	基性岩	超基性岩
	胶东台隆	36.0	29.1	33.4	1.2	0.2	0.1
	鲁西台隆	26.7	55.4	15.7	1.7	0.1	0.2
	燕山台褶带	13.0	65.2	15.9	5.2	0.5	0.1
	豫西台隆	15.0	71.6	12.4	0.7	0.3	0.0
	山西台隆	67.3	31.1	1.1	0.4	0.2	0.0
	华北地台	25.6	47.9	24.8	1.4	0.3	0.0
燕山期侵入体出 露面积统计/%	区域	花岗岩	中性侵入岩	基性侵入岩	超基性岩		
	燕山台褶带	73.32	23.74	2.44	0.49		
	山西台隆	67.50	22.20	9.95	0.36		
	鲁西台隆	88.24	9.80	0.78	1.18		
	胶东台隆	95.77	3.36	0.62	0.25		
	豫西台隆	92.23	5.34	2.43	0.00		
	华北地台	93.60	5.23	1.02	0.16		

a) 据各省区地质图出露面积统计

1) Deng Jinfu, Su Shangguo, Mo Xuanxue, et al. The sequence of magmatic-tectonic events and orogenic processes of the Yanshan Belt, North China. Acta Geologica Sinica (in press), 2004

的,而碱性玄武岩是由深部地幔(>3.0 GPa)经小程度部分熔融而成。拉斑玄武岩在古近纪旋回占主导地位,而碱性-强碱性玄武岩在新近纪-第四纪旋回为主,说明华北玄武岩浆起源深度由老至新逐渐加深,符合典型大陆裂谷火山作用特征^[27]。

由火成岩活动的分布区域表明,自侏罗纪以来华北地台被“活化”破坏或改造是不均一的;燕山期大量壳幔混合源区花岗岩岩浆活动和喜马拉雅期玄武岩喷发,说明这两个时期都有大量的对流地幔物质输入大陆,但这两个时期的动力学机制各不相同,前者为挤压造山机制,而后者为伸展拉张裂谷机制。

综合上述地质、地球物理证据,说明华北地区有 3 种岩石圈类型:西部以鄂尔多斯块体周边断陷盆地为界的鄂尔多斯块体以低温、稳定、具有大陆根为特点,属于克拉通岩石圈类型;中部华北似环状裂谷盆地周边山岭(燕山、太行)是中生代造山时期挤压机制下形成的,在新生代无玄武岩浆活动,说明仍然保留了造山带的特点,属于造山带岩石圈类型;华北东部平原的似环状裂谷盆地属于裂谷岩石圈类型,大量新生代玄武岩喷发是其形成于伸展拉张裂谷机制的标志。

2 华北地区的陆壳岩石学结构

2.1 鄂尔多斯克拉通陆壳

根据壳幔演化模型^[28-31],地壳由对流地幔(或软流圈)通过局部熔融作用分离出,地幔向大陆的添加物主要是玄武质的,玄武岩质的熔融或分异产生花岗质的陆壳^[32],可见,大陆生长是壳幔物质分异演化的结果。由岩石相平衡实验和原理可知,伴随低熔的玄武质岩浆不断从地幔中分离出来,留下难熔的强亏损地幔物质将构成低密度、稳定的大陆岩石圈根^[2,31]。而构成大陆地壳主体的花岗质,因其低熔点、低密度及在化学与物理学上稳定的特点,使它能长期地(自太古宙)漂浮在地球表层^[2]。华北地台西部的鄂尔多斯块体,无活动断层,无岩浆活动,热流低,壳内速度结构的正梯度,无壳内低速层,无强地震,

至今保留了巨厚的岩石圈根,表明它在早元古代形成之后至今一直保持稳定克拉通的特点。值得注意的是华北地台东部地区(复县、蒙阴等地)古生代时也与现今西部鄂尔多斯克拉通块体一样具有巨厚的岩石圈(≥ 200 km)^[5,10]和岩石圈根,因此,现今华北东部地区出露的中下地壳断面岩石,可作为西部地区中下地壳岩石组成的参照。

在华北的怀安—丰镇—尚义^[33]、定州—五台地壳断面¹⁾、阜平—龙泉关—五台山—繁峙和冀东^[4]等地出露的地壳断面中,相当于下地壳麻粒岩相岩石的有集宁群、迁西群及阜平下亚岩群下部的岩石,其中集宁岩群经沈其韩^[16]研究,其下亚岩群是由麻粒岩-片麻岩-花岗岩(包括英云闪长岩)杂岩组成,表壳岩的岩性大致可以和迁西岩群对比;阜平岩群下亚岩群下部岩石,岩性以黑云(角闪)斜长片麻岩、二辉麻粒岩为主。实验测定¹⁾阜平群基性麻粒岩波速 6.5 km/s,集宁群基性麻粒岩波速为 6.93~6.94 km/s,高于地球物理探测的下地壳速度(6.5~6.8 km/s)^[34],考虑到在华北地台的地热条件下(40~70 mW/m²)^[34],铁镁质岩石的波速一般随深度增加无变化或仅略有增加,而长英质岩石波速增加明显,结合在内蒙南部广泛发育长英质片麻岩、浅粒岩(形成于 0.8~1.0 GPa)和大青山一带广泛出露紫苏花岗岩与 TTG 杂岩(约占 80%)的事实,因此推测鄂尔多斯地块陆壳下地壳组成可能以 TTG 片麻岩系为主体,夹部分基性麻粒岩,或酸性榴辉岩夹部分基性麻粒岩。

可代表中上地壳岩石的是山西省的恒山杂岩(群)、阜平群、冀东的单塔子群和内蒙古的乌拉山群。角闪岩相岩石主要是黑云斜长(或二长)片麻岩、变粒岩、角闪岩、大理岩与云母石英片岩等(乌拉山群与二道洼群);绿片岩相-低角闪岩相的岩石(五台群、滹沱群,双山子群和朱杖子群等)主要是云母石英片岩、板岩、变质砂-砾岩等(二道洼群与冯家店群),以及未变质的盖层。

根据地震波速 V_p 与 SiO_2 回归方程($V_p = -0.0374 \cdot \text{SiO}_2 + 8.8149$, $R = 0.915$)²⁾计算,地球物理探

1) 骆庭川,高山,韩吟文,等. 华北地台中段岩石圈元素丰度及地质应用研究. 1995

2) 见 699 页脚注 1)

测^[34]的上、中地壳V_p值(6.0~6.3 km/s)对应的SiO₂含量应该在 67.2%~75.3%之间, 下地壳V_p值(6.5~ 6.8 km/s)对应的SiO₂含量应该在 54%~62%之间, 由SiO₂反映的陆壳化学结构与上述岩石学结构一致. 新计算¹⁾的鄂尔多斯克拉通块体陆壳平均波速为 6.3 km/s, 对应的SiO₂=67.2%, 与由岩石学推导的地壳岩石组成为TTG相符^[14], 同时也与通过地球化学方法求出的华北地台平均地壳成分相当于花岗闪长岩结论基本一致^[35].²⁾ 因此, 华北地区西部鄂尔多斯克拉通陆壳的总体成分为TTG.

2.2 燕山-太行造山带陆壳

众所周知, 造山带属挤压体制. 由于在深部陆壳岩石(20~25 km)通常具有韧性^[4], 因此, 在造山带过程中地壳的加厚主要发生在地壳^[2]. 对流地幔物质和热的大量输入岩石圈, 可对陆壳加热直至熔融分异形成新的花岗质陆壳^[32], 收缩变形的加厚陆壳在壳底榴辉岩相的压力条件下也可发生局部熔融. 因此, 在造山体制下, 陆壳成分通常会随着壳内分异的进行使岩石组成趋酸性(花岗质), 华北地台以TTG为主体的陆壳组成在中生代造山带过程中将被改造转变为以花岗岩质为主体的组成.

华北地区中生代产出大量壳幔混合花岗岩^[9,21-23]表明中生代造山时期确实有大量对流地幔物质和热输入陆壳. 华北云紫山花岗岩片麻岩(锆石U-Pb年龄((142~143)±2) Ma), 沙土和玉道河花岗质眼球状片麻岩(锆石U-Pb年龄分别为(151±2) Ma, (141±2) Ma), 石城辉长-闪长质片麻岩(锆石U-Pb年龄(159±2) Ma), 闪长质片麻岩(锆石U-Pb年龄(159±2) Ma)为J₁-J₂的同构造侵入体^[36,37], 变质程度已达角闪岩相, 为中地壳深度形成的, 其中闪长质片麻岩侵入体的锆石不含继承组分^[36,37], 表明它们是从地幔中分出的新生物质; 而花岗质片麻岩和眼球状片麻岩的锆石则含有继承组分(其上交点范围从1700~2400 Ma), 可代表壳内重熔分异的组分. 八达岭岩基中辉长岩和闪长岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-8.1~-11.3, 石英二长岩和花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-13~-20.2^[38], 樊城火山岩以玄武

岩为主(从碱性玄武岩到橄榄拉斑玄武岩变化, K-Ar年龄 116.2~124.9 Ma), 其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-13.1~-14.2^[39], 表明新生岩浆在上升定位过程中受到壳源组分混染. 从区域上看, 华北地区燕山期火山岩岩石组合随时代由老到新的变化趋势为: J₁以玄武岩和玄武安山岩为主→J₂以安山岩占优势→J₃以粗面岩和流纹岩为主→K₁以玄武岩安山岩-安山岩为主^[2], 同样表明由地幔中分出玄武质岩浆输入大陆开始, 诱发古老陆壳的再熔融, 随时间演化陆壳熔融带逐渐增厚, 并由下地壳向中上地壳发展, 直至形成以花岗质陆壳端元为主的过程. 樊祺诚等人^[40]发现的汉诺坝玄武岩中麻粒岩相斜长辉石岩(120~140 Ma)和榴辉岩相石榴辉石岩, 说明J-K时期有新形成的下地壳麻粒岩相岩石, 榴辉岩相岩石表明曾有山根存在, 这与燕山期加厚陆壳的模型^[2]吻合. 系统的SHRIMP定年^[19,25]表明中朝克拉通新生代玄武岩中麻粒岩形成时间主要集中在 160~180 Ma和 80~120 Ma, 分别与中生代陆壳加厚和岩石圈减薄的时间对应. 因此, 中生代造山时期对流地幔物质和热的输入表现为既改造古陆壳, 又有新陆壳生长.

地震波速结构显示太行、燕山地区在上地壳下部(16~20 km)和下地壳壳幔过渡带(32~40 km)分别存在2个低速体. 燕山地区的燕山期长园花岗闪长质片麻岩、八达岭基岩岩石化学分析的SiO₂=64.72%~66.13%, 根据V_p与SiO₂方程计算得到的V_p值为6.3~6.4 km/s. 太行地区晚侏罗世洪山超单元平均SiO₂=58%^[41], 对应的V_p值为 6.48 km/s, 分别与下地壳低速体V_p为 6.4 km/s相一致. 燕山地区云蒙山花岗岩体为具有高SiO₂(达 71.87%), K₂O>Na₂O的酸性岩体, 计算的V_p值为 6.13 km/s, 与上地壳下部低速体(V_p为 6.1 km/s)大致相当. 因此可以推测, 太行、燕山地区在上地壳下部(16~20 km)和下地壳壳幔过渡带(32~40 km)的低速体分别相当于花岗岩与花岗闪长岩源区. 石城辉长闪长岩体的平均SiO₂=53.52%, 计算得到V_p值为 6.81 km/s, 与壳底底侵的玄武岩高速层相当, 可能代表了从地幔中分出的新生陆壳. 与鄂尔多斯克拉通块体相比(陆壳平均波速为 6.3 km/s,

1) 见 699 页脚注 2)

2) 见 702 页脚注 1)

对应的 $\text{SiO}_2=67.2\%$), 燕山-太行造山带型陆壳平均波速¹⁾降低($V_p=6.2\sim 6.3$ km/s, 对应的 $\text{SiO}_2=67\%\sim 70\%$), 反映原来 TTG 地壳岩石组成在燕山造山过程中变为花岗岩质, 陆壳被“酸性化”。

2.3 华北平原裂谷陆壳

华北东部平原在喜马拉雅期发育大陆裂谷, 以古近纪和新近纪-第四纪两个旋回的幔源玄武岩喷溢为标志。由于伴随燕山运动的中生代花岗岩分布遍及华北中东部地区甚至包括朝鲜半岛地区(表 2), 在现今华北平原的隆起区, 如鲁西台隆、胶东台隆均有大量中生代花岗岩出露。如东部胶东超大型金矿区的中生代花岗岩的 Sr, Nd 组成($\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 $= -15.5 \sim -20.6$)^[21]与燕辽、辽西、太行山、燕山等地花岗岩代的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -20 \sim -6$ (峰值 $= -18 \sim -10$)^[22]非常类似。由此说明燕山造山运动对包括华北平原在内的华北中东部的地壳成分有强烈的改造作用, 换言之, 华北东部平原喜马拉雅期的裂谷作用是在燕山造山带型陆壳基础上进行的。山东幔源岩浆的碳-氧和锶-钕同位素资料对比显示早古生代、早白垩世、第三纪时期的特征互不相同^[23], 也暗示华北东部岩石圈地幔至少经历了两次改造。因此, 燕山-太行造山带型陆壳是认识华北平原裂谷型陆壳的重要参照。

新生代大量玄武质岩浆喷溢, 表明这一时期又有对流地幔物质输入大陆, 而缺乏喜马拉雅期侵入体表明无陆壳岩石的熔融作用, 因此, 华北平原裂谷型陆壳成分可以看作是在燕山-太行造山带型陆壳基础上对流地幔物质(玄武岩)的直接添加。从平均波速来看²⁾, 相对于燕山-太行造山带来说(燕山-太行造山带型陆壳平均 $V_p=6.2\sim 6.3$ km/s), 华北平原的平均波速增加(陆壳平均 $V_p=6.3$ km/s), 即陆壳平均组成相当于花岗闪长质。因此, 以燕山-太行造山带作为燕山期参照, 华北平原从燕山期的平均组成为花岗质, 在喜马拉雅期时变平均组成为花岗闪长质, 亦即陆壳又被“基性化”($\text{SiO}_2=67\%$)。

3 华北地区岩石圈地幔的岩石学结构

不同时期的构造-岩浆事件带到地表的幔源包体

是了解不同时期或不同类型地幔物质结构的最直接的标本^[24]。

3.1 鄂尔多斯克拉通岩石圈地幔

华北地区自晚太古-早元古代形成以来至前侏罗纪一直保持稳定。根据辽宁复县和山东蒙阴的金刚石中包裹体的成分估算, 古生代时东部岩石圈厚度(208~222.7 km)^[5,10]与现今鄂尔多斯的岩石圈厚度类似。根据热流估算^[7,8]的古地温(42 mW/m²)和根据金伯利岩中金刚石固相包裹体和重砂矿物(尖晶石、石榴子石)地质温压计计算^[42]的古地温(35~40 mW/m²)与鄂尔多斯地块现今的低温(44 mW/m²)类似, 同时也与著名的南非 Kappvaal 克拉通的古地温类似。复县金伯利岩中的地幔岩包体 Re-Os 测定获得 2.6 和 2.8 Ga 的 TRD 模式年龄^[43], 证明该区古生代时还是太古宙岩石圈地幔。因此, 华北地台东部的古生代金伯利岩及金刚石包裹体中的地幔橄榄岩, 可代表华北地区克拉通型岩石圈地幔的组成, 即鄂尔多斯克拉通型岩石圈地幔的组成可以用山东阴蒙和辽宁复县等地的含金刚石金伯利岩及金刚石捕虏体中的橄榄岩包体来描述。

由于鄂尔多斯克拉通型陆壳岩石组成是以 TTG 为主, 根据壳幔演化及大陆根形成过程可以知道, 由地幔分离出的陆壳组分与其下地幔在组分上是互补的, 由此可以推断鄂尔多斯克拉通型岩石圈地幔是强亏损的以方辉橄榄岩为主构成的大陆岩石圈根。池际尚等人^[5,10]从金伯利岩的地幔捕虏体、金伯利岩中地幔来源的矿物(从人工重砂大样中和岩石薄片经过成因研究加以辨认)以及金刚石中的包裹体矿物组合等方面资料提供的信息, 认为山东蒙阴和辽宁复县地幔捕虏体的岩性均以橄榄岩为主, 恢复的原岩有纯橄榄岩、方辉橄榄岩及二辉橄榄岩^[5,10], 在数量上是纯橄榄岩、方辉橄榄岩多于二辉橄榄岩的 P 型包体^[21], 属于强亏损的地幔岩矿物组合, 支持了鄂尔多斯克拉通型岩石圈地幔组成以方辉橄榄岩为主的推断。

1) 见 699 页脚注 1)

2) 见 699 页脚注 2)

3.2 燕山-太行造山带岩石圈地幔

近年相继报道在华北邯邢地区^[44]、鲁西金岭^[45]、山东莱芜铁铜沟^[46]等地的闪长质岩石中发现幔源包体，这些幔源包体有个共同特征是都产于壳幔过渡带、交代作用比较发育。以华北邯邢地区发现的幔源包体为例，在壳底的超镁铁质堆晶岩形成深度约 65 km，其中辉长岩类近视原生岩浆^[2]，闪长质岩石中见有变形的地幔橄榄岩最大形成深度 90 km (2.74 GPa)^[44]。根据造山带模型，造山带过程中大量对流地幔的物质和热输入将使岩石圈弱化并加热陆壳，被加厚的陆壳将在壳底榴辉岩相条件下熔出花岗岩岩浆，随着残余的榴辉岩堆积因其密度很大，将带动残留的岩石圈地幔一起拆沉发生大陆去根作用；而输入大陆的对流地幔物质在分出玄武质岩浆后冷却将形成新的岩石圈地幔。已有的资料^[47,48]显示中生代华北地区具富集性质的岩石圈地幔普遍存在，被认为是曾经发生大范围拆沉作用的证据。因此，上述中生代岩体中产在壳幔过渡带附近的地幔橄榄岩捕虏体很可能是拆沉作用后形成的新生的岩石圈地幔。

3.3 华北平原裂谷岩石圈地幔

新生代时期，华北东部地区进入了一个新的构造演化阶段——大陆裂谷作用^[27]，它不同于燕山晚期的造山后伸展阶段，而是在燕山期造山带形成的壳幔结构基础上又重新“活化”，其标志是大量玄武岩喷溢。在古近纪和新近纪-第四纪 2 个火山活动旋回中，后者碱性玄武岩为主，含大量橄榄岩包体，包体的岩性绝大多数为二辉橄榄岩，少量方辉橄榄岩，说明新生代岩石圈地幔亏损程度弱。

3.4 华北岩石圈地幔化学结构

在壳幔物质演化和大陆根形成过程中，由二辉橄榄岩组成的原始地幔^[30]在提取出玄武质组分后就成为亏损地幔，反映在岩石化学特点上是残留组分中耐火组分MgO含量增高，Mg/(Mg+ΣFe)比值增大，形成岩石中的镁橄榄石Fo增高，因此，岩石圈地幔组成可以用地幔橄榄岩的亏损程度来描述。

表 3 为不同时代岩石中橄榄岩包体的岩石化学主成分平均值及变化范围(碳酸岩化较强的样品数据未参加计算)。

代表鄂尔多斯型上地幔岩石圈组成的古生代金伯利岩和金刚石中的橄榄岩包体成分，MgO平均值 43.01%远高于模拟地幔岩(37.67%)^[30]，SiO₂ 偏低和 Al₂O₃、CaO、Na₂O显着偏低，表明属于地幔熔融残余，

表 3 不同时代橄榄岩包体的岩石化学平均成分及变化范围^{a)}

时代	古生代			新生代			地幔岩
岩区	蒙阴、复县、铁岭			汉诺坝、蓬莱-栖霞等			
统计数	29			55			
主元素/%	平均	最小	最大	平均	最小	最大	
SiO ₂	45.09	39.29	47.51	46.23	44.38	54.12	45.48
TiO ₂	0.22	0.04	0.55	0.16	0.05	0.35	0.72
Al ₂ O ₃	1.77	0.57	6.25	3.11	1.89	4.86	3.57
Fe ₂ O ₃	4.40	1.22	9.23	1.92	1.00	2.91	0.46
FeO	2.96	0.75	6.15	6.66	5.73	8.24	8.10
MnO	0.08	0.02	0.16	0.14	0.09	0.18	0.14
MgO	43.01	36.72	47.26	38.60	30.71	43.27	37.67
CaO	2.15	0.07	10.42	2.78	1.27	5.19	3.10
Na ₂ O	0.08	0.01	0.24	0.30	0.11	0.62	0.57
K ₂ O	0.10	0.00	0.33	0.08	0.00	0.26	0.13
P ₂ O ₅	0.14	0.02	0.86	0.01	0.00	0.05	0.06
Mg [#]	0.92	0.86	0.95	0.89	0.88	0.92	0.89
资料	1			2			3

a) 表中数据为根据原数据去除挥发份后的干组分的统计结果；资料 1 据文献[5,10,12,49]；资料 2 据文献[5,10,49]；资料 3 据文献[30]；Mg[#]=Mg²⁺/(Mg²⁺+Fe²⁺+Fe³⁺)

为强亏损地幔特征,与金伯利岩和金刚石中橄榄岩包体以纯橄榄岩、方辉橄榄岩为主少量二辉橄榄岩的岩石组合^[5,10]和属于P型包体^[21]吻合.古生代时华北克拉通具有深度 ≥ 200 km的岩石圈根^[5,10],金伯利岩中地幔橄榄岩捕虏体的橄榄石的Fo范围 91.5~94.5(峰值 92.5)与南非Kappvaal典型克拉通^[50]的Fo范围 91.5~93.5 类似,说明鄂尔多斯克拉通型岩石圈地幔应该与南非Kappvaal一样,主要由强亏损的方辉橄榄岩构成.

代表华北平原新生代裂谷上地幔组成的新生代碱性玄武岩中的橄榄岩包体的主成分平均值(表 3)、 $Mg^\#$ 平均值(0.89)与模拟地幔岩^[30]基本一致, MgO 含量平均值(38.60)略高于模拟地幔成分(37.67),Fo平均值 89.5(80.2~92.7),低于南非Kappvaal克拉通型^[50]的Fo=91.5~93.5;所以,华北平原新生代大陆裂谷型岩石圈上地幔总体为未亏损特征,岩石组成主要为二辉橄榄岩.

橄榄岩包体的 $Mg^\#$ 值也反映出古生代的 $Mg^\#$ 值(0.92)大于新生代(0.89)(表 3),说明前者亏损程度高于后者.对比不同时代橄榄岩包体中镁橄榄石的Fo平均值(表 4)和分布频率图(图 2),由古生代 $\rightarrow$ 中生代 $\rightarrow$ 新生代,Fo含量降低,其中古生代捕虏体的Fo峰值最高,新生代的最低,而以邯邢地区中生代捕虏体为代表的Fo处于两者之间,并在图 2 出现双峰值.对比其他资料,鲁西金岭^[45]和山东莱芜铁铜沟^[46]岩体中的深源超镁铁质岩捕虏体也来源于壳幔过渡带,其中鲁西金岭岩体的捕虏体中具板状结构的橄榄石的 $Mg^\#$ 值(93~94)高、而具变质变形结构的橄榄石的 $Mg^\#$ 值(86~87)低^[45],这一特点与邯邢地区Fo的特点一致.因此图 2 中Fo约为 88.5 的峰值,可能代表的是底侵在壳底已受地壳组分混染的超镁铁质堆晶岩,而Fo约为 92 的峰值才是代表中生代地幔组成的组分.因此,中生代岩石圈地幔具有古生代与新生代地幔之间的

过渡性质,推测其平均组成为方辉橄榄岩-二辉橄榄岩.

以时代为序,古生代、中生代到新生代橄榄岩包体以及它们所代表的岩石圈地幔组成,从克拉通型向造山带型至裂谷型岩石圈发展,岩石圈地幔亏损程度、部分熔融程度依次降低,这与上述地幔橄榄岩从以方辉橄榄岩为主逐渐变为以二辉橄榄岩为主,以及岩石中 MgO 含量降低、 $Mg^\#$ 比值减小所反映的趋势一致.

4 华北岩石圈演化及其深部过程

综合上述结果,华北地区现今岩石圈三维岩石圈的克拉通、造山带岩石圈和裂谷型的 3 种类型的壳幔岩石学结构如图 3 所示.结合华北地区的地质历史可以勾划出岩石圈演化的深部过程.

4.1 华北岩石圈成分与结构演化

华北克拉通具有与全球典型的大克拉通一样的历史和特征,通过壳幔分异作用于晚太古-早元古代形成主体成分为 TTG 的陆壳(陆壳平均波速 $V_p=6.3$ km/s, $SiO_2=67\%$)和由强亏损的方辉橄榄岩构成的巨厚大陆根,两者在形成时间上一致、在成分上互补.自晚太古代-早元古代形成以来至侏罗纪之前无大规模的幔源岩浆活动,显示其岩石圈壳幔结构长期稳定.自侏罗纪以来,华北地台经历了燕山期的挤压造山“活化”和喜马拉雅期的拉张裂谷“改造”,而地质、地球物理证据表明位于西部的鄂尔多斯至今还保留了典型的克拉通特征,类似于现在的塔里木克拉通.中新生代发生在华北地台的构造-岩浆事件,只是喜马拉雅期在鄂尔多斯周缘地带形成断陷盆地,但盆地内无玄武岩岩浆活动,所以可以认为鄂尔多斯是华北地台经历了燕山期的“活化”和喜马拉雅期的“改造”后残存的克拉通块体,属于中生代以来中国

表 4 不同时代捕虏体橄榄石中的镁橄榄石 Fo 含量/%^{a)}

时代	代表的岩石圈类型	捕虏体	平均	最小	最大	资料来源
古生代	鄂尔多斯克拉通型	金刚石中的包裹体(32)	93.0	90.3	97.8	[12]
		金伯利岩中捕虏体(23)	91.9	89.4	94.4	[5,10]
中生代	燕山-太行造山带型	闪长岩中的橄榄岩(15)	91.1	88.5	93.1	[44]
新生代	华北平原裂谷型	碱性玄武岩中捕虏体(49)	89.5	80.2	92.7	[49]

a) 括号内数字为统计数

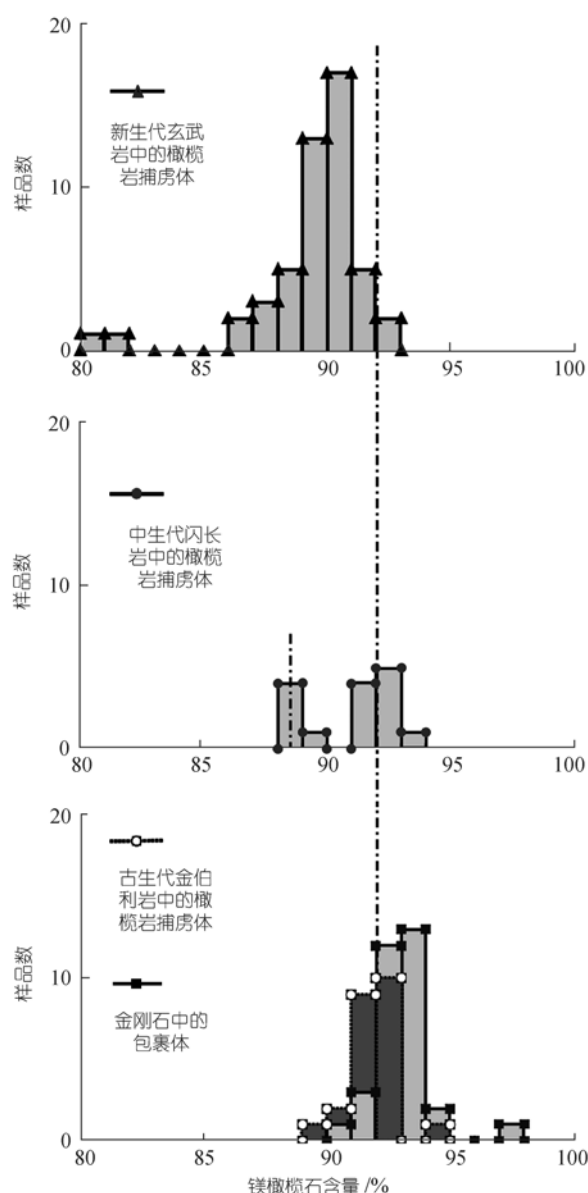


图2 不同时代地幔捕虏体橄榄石中镁橄榄石 Fo 含量分布频率

大陆中部稳定克拉通群的组成部分^[2]。因此, 总体上鄂尔多斯克拉通的壳幔岩石学结构, 可以作为整个华北乃至中朝地台克拉通岩石圈的一个参照。

中生代时期, 华北地台的中东部地区经历了燕山期造山运动而使地台“活化”, 以强烈的壳幔混合花岗岩岩浆侵入活动为特征。大量对流地幔物质与热

输入, 使原来的 TTG 陆壳组分熔融上侵形成新的陆壳, 相对于鄂尔多斯克拉通型 TTG 陆壳(平均波速 $V_p=6.3$ km/s, $SiO_2=67\%$), 燕山带陆壳被“酸性化”(陆壳平均波速 $V_p=6.2\sim6.3$ km/s, $SiO_2=67\%\sim70\%$)。J-K 形成的新陆壳中既有从地幔中分出的新生陆壳的贡献, 也有原有古老陆壳再熔融的贡献。岩石圈地幔由方辉橄榄岩和二辉橄榄岩构成, 其亏损程度弱于鄂尔多斯克拉通岩石圈。

由于东部地区新生代卷入了大陆裂谷作用, 而燕山-太行山地区由于总体上喜马拉雅期时没有玄武岩浆活动, 即没有新的地幔物质的输入, 所以, 该区可以认为是新生代“改造”后残留的造山带型岩石圈, 其岩石圈地幔和陆壳的物质及其结构仍然是燕山运动期间造山时形成的, 但就地壳厚度和岩石圈地幔的厚度来说, 因为经历了新生代的伸展减薄, 所以不能代表燕山期造山时的地壳厚度和岩石圈地幔的厚度。

新生代时期, 地幔热柱上升导致大型裂谷盆地形成和大量玄武岩喷发^[2], 形成了华北东部平原裂谷型岩石圈。经过燕山期的“酸性化”改造的陆壳, 在喜马拉雅期又再次被改造。喜马拉雅期大量玄武岩喷发, 显示新的对流地幔输入大陆, 缺乏同时期侵入岩说明没有陆壳熔融作用发生, 新生(玄武岩质)陆壳直接添加又使陆壳被“基性化”。岩石圈地幔由总体为未亏损的二辉橄榄岩构成。该区地壳和岩石圈地幔是整个华北地区最薄的, 这是受新生代岩石圈厚度尺度上伸展减薄和热侵蚀的结果。所以, 现今地球物理探测的岩石圈的地幔和陆壳的物质和结构是喜马拉雅期形成的。

从平均波速来看¹⁾, 鄂尔多斯克拉通型岩石圈的陆壳在地球物理上表现出较高的陆壳平均 V_p 值(陆壳平均 $V_p=6.3$ km/s), 陆壳平均组成相当于花岗闪长质(与 TTG 组成大致对应), 燕山期时的“酸性化”改造使华北中东部地区陆壳平均波速降低(陆壳平均 $V_p=6.2\sim6.3$ km/s), 平均组成为花岗质($SiO_2=67\%\sim70\%$)。华北平原从燕山期的花岗质(相当于燕山-太行造山带), 在喜马拉雅期时平均组成变为花岗闪长质

1) 见 699 页脚注 2)

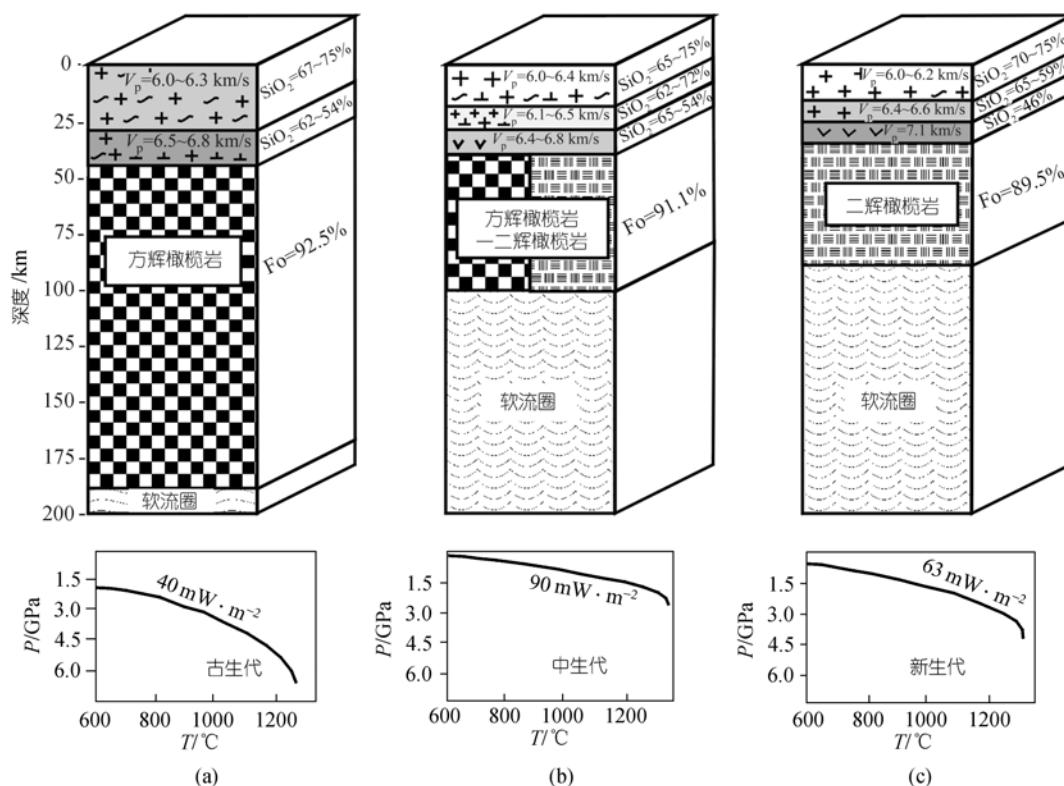


图 3 现今华北 3 种类型岩石圈的壳幔岩石学结构和化学结构

(a) 鄂尔多斯克拉通型, TTG 陆壳 (陆壳平均 $V_p=6.3$ km/s, 平均 $SiO_2=67\%$); (b) 燕山-太行造山带型, 花岗质陆壳 (陆壳平均 $V_p=6.2\sim 6.3$ km/s, 平均 $SiO_2=67\%\sim 70\%$); (c) 华北平原裂谷型, 花岗闪长质陆壳 (壳平均 $V_p=6.3$ km/s, 平均 $SiO_2=67\%$)

(陆壳平均 $V_p=6.3$ km/s); 不同类型岩石圈的地幔组成变化为: 克拉通型的方辉橄榄岩→造山带型的方辉橄榄岩-二辉橄榄岩→裂谷型的二辉橄榄岩。

4.2 华北中生代与新生代动力学背景

对于包括华北在内的中国东部岩石圈减薄、中生代成矿大爆发是近十年来最受关注的科学问题之一, 对其形成的动力学背景, 中外学者已提出了多种不同认识并成为备受关注的热点^[2,19-22,51]。

从华北地区岩石圈成分、结构演化来看, 华北地台的“活化”与“改造”实际上是中生代挤压造山机制和新生代拉张裂谷机制共同作用的结果; 而中生代花岗岩带、新生代火山岩带事实上贯穿中国东部不同构造单元, 说明这两种机制实际上也是整个中国东

部中生代、新生代所经历的共同机制, 因此探讨其动力学背景具有普遍意义。

同一陆块受统一的大陆动力学系统控制。从中国大陆形成历史来看, 三迭纪以后包括华北地台在内的整个中国大陆已拼合成为一个整体^[2], 应该受统一的中国大陆动力学系统控制。从地质事件序列来看, 中生代时期中国大陆最重要的地质事件是西部发育特提斯洋和东部发育造山带。西部青藏高原地区以班公湖-怒江、雅鲁藏布江蛇绿岩带为代表的特提斯洋, 在晚古生代地台背景上 J_1 时在超级地幔柱作用下几乎同时张开¹⁾, 而后经历了大洋发育、洋壳俯冲 ($J_2\sim K_1$ 班公湖-怒江洋壳向南, $J_2(?)\sim K_2$ 雅鲁藏布江洋壳向北) 和碰撞阶段 (班公湖-怒江于 K_1 末发生弧-陆碰撞、雅鲁藏布在 K_2/E (≈ 65 Ma)²⁾ 发生印度/欧亚大

1) 邱瑞照. 青藏高原西部火成岩与新特提斯构造演化. 中国地质大学(北京)博士论文. 2002

2) 周 肃, 莫宣学, 董国承, 等. 西藏林周林子宗火山岩 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代格架. 科学通报(出版中), 2004

陆陆-陆碰撞)¹⁾, 而在中国东部经历的是燕山挤压造山运动^[2]。华北地区J-K时期的造山运动事件序列²⁾与西部特提斯洋演化阶段¹⁾在时间上相互对应。在深部过程上, J-K时期西部的特提斯洋发育演化, 表征一个向上的热地幔流作用, 岩石圈总体处于伸展减薄过程; 而在中国东部发育的挤压造山带, 表征的是一个向下的冷地幔流, 总体处于岩石圈会聚增厚过程。新生代时期, 青藏高原 65~40 Ma和 25~10 Ma的火山活动与华北地区古近纪和新近纪-第四纪 2 个火山活动旋回在时间上相对应³⁾, 而在深部过程上, 西部青藏高原在 65 Ma左右印度-欧亚大陆碰撞后¹⁾, 进入碰撞后造山和高原隆升阶段, 岩石圈处于会聚加厚过程, 再循环岩石导致冷地幔下降流; 在东部则发育大陆裂谷作用形成大陆裂谷盆地, 岩石圈处于伸展减薄阶段, 表征地幔热柱上升。所以, 东、西部地区的深部与浅部地质事件对比, 两者在时间上大体同时, 在性质上互补, 正如邓晋福等人^[2]所指出的那样, 中国大陆印支期以来受控于一个统一大陆动力学系统-即岩石圈/软流圈系统。地球物理成层析成像^[52]揭示在中国大陆下 400~250 km普遍存在软流层, 它们可能就是连接中国大陆下地幔对流及东、西部地质事件的纽带。而包括华北在内的中国东部花岗岩带、火山岩带主体均呈NNE向展布, 无疑暗示太平洋板块也起了重要作用。因此, 我们认为华北地台中新生代的“活化”与“改造”是中国大陆岩石圈/软流圈系统变迁与东侧太平洋板块俯冲共同作用的结果。

4.3 华北岩石圈演化深部过程

侏罗纪之前, 华北地台是一个冷和强的大陆岩石圈根, 在中生代挤压造山机制下强烈的岩浆活动和构造变形使大陆根和大陆壳破坏改造。玄武岩的底侵使刚性的地壳加热而弱化, 弱化诱发的流变学条件有利于陆壳收缩变形和加厚, 收缩构造环境有利于底侵岩浆封存使地壳加热熔融形成花岗岩上侵, 从而使原来的克拉通TTG陆壳变为造山带花岗质陆壳。随着壳内分异残留的榴辉岩堆积, 其高密度诱发

造山带岩石圈根失稳, 导致岩石圈大规模去根减薄和构造、热失去平衡, 从而促使大量对流地幔物质和热输入大陆, 使华北克拉通岩石圈地幔部分熔融、软流圈物质上涌、拉张盆地形成。大规模的壳幔相互作用致使岩浆活动在J₃和K₁¹时期达到峰期、形成面状分布的火成岩和 120 Ma左右大规模成矿作用发生^[21,24]。造山带岩石圈大规模去根带动下伏残留的克拉通岩石圈地幔一起拆沉后, 输入大陆的对流地幔物质, 在分出玄武质岩浆后的冷却物形成新的由方辉橄榄岩和二辉橄榄岩构成的燕山期岩石圈地幔的主体, 其中可能会包裹着属于原有大陆根地幔的残留块体。燕山期对流地幔物质输入使华北中东部地区原有的陆壳和岩石圈地幔均受到强烈改造。

新生代时期, 在65 Ma左右(K₂/E)印度板块/欧亚板块碰撞后, 随着印度板块的继续俯冲, 青藏-喜马拉雅造山岩石圈根形成时的向下会聚和水平缩短, 促使软流圈物质沿 250~400 km震源界面和岩石圈块体向东挤出^[2,53,54], 而东侧与太平洋板块相关的拖曳也诱发软流圈物质向东流动, 两者共同作用拖动岩石圈运动^[2,53,54], 导致东部岩石圈裂开、伸展减薄。同时, 向东流动的软流圈物质在东侧受到太平洋俯冲板块阻挡, 使软流圈物质在华北东部形成地幔热柱强烈上涌和玄武质岩浆大量喷发, 从而导致华北平原裂谷型岩石圈的形成。在喜山期裂谷作用中, 软流圈物质(玄武质岩浆)对燕山期形成的造山带花岗质陆壳的改造较弱(很少侵入体), 大量地直接喷出地表的玄武质岩浆直接添加使陆壳“基性化”, 但对燕山期新形成的岩石圈地幔则有强烈的再改造, 形成以二辉橄榄岩为主体的新生代岩石圈地幔。

西部鄂尔多斯中生代作为华北东部造山带的前陆盆地, 新生代在青藏高原碰撞带挤压、在软流圈物质的向东挤出和受到太平洋一侧俯冲带阻挡的背景下隆升及沿块体边界滑移, 块体下面软流圈物质小规模的上涌, 导致环鄂尔多斯断陷盆地带的形成。总体上看, 鄂尔多斯主体在中新生代保持构造上的稳定, 无岩浆活动, 大陆根没有被破坏, 大陆地壳亦没

1) 见 708 页脚注 1)

2) 见 701 页脚注 1)

3) 见 699 页脚注 1)

有被改造,保留了克拉通特征。

由上说明,华北地区稳定克拉通岩石圈的“活化”和“改造”,是中国大陆中生代以来岩石圈/软流圈系统的变迁以及东侧太平洋板块共同作用的结果,对流地幔的物质和热输入大陆是形成不同类型岩石圈的关键,面状分布的中生代火成岩、大规模集中成矿等是其具体标志。华北地区不同类型岩石圈的壳幔岩石学结构及其演化是中新代深部过程和浅部响应的综合记录,同时也是中国东部中新代岩石圈演化的缩影。

参 考 文 献

- 程裕淇. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社, 1994. 90~164
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造-大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 1996. 1~96
- 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国岩石圈-软流圈系统大灾害与成矿环境. 矿床地质, 1999, 18(4): 309~315
- 吴宗絮, 邓晋福, 赵海玲, 等. 华北大陆地壳上地幔岩石学结构与演化. 岩石矿物学杂志, 1994, 13(2): 106~115
- 池际尚, 路风香, 刘永顺, 等. 中国原生金刚石成矿地质条件研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996. 1~58
- 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆活化. 现代地质, 1994, 8(3): 349~356
- 汪集旸, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编. 地质科学, 1988, 2: 196~204
- 胡圣标, 何丽娟, 汪集旸. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版). 地球物理学报, 2001, 44(5): 611~626
- 王季亮, 李丙泽, 周德星, 等. 河北省中酸性岩体地质特征及其与成矿关系. 北京: 地质出版社, 1994. 1~213
- 池际尚, 路风香. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈特征. 北京: 科学出版社, 1996. 1~292
- 嘉世旭, 张先康, 方盛明. 华北裂陷盆地不同块体地壳结构及演化研究. 地学前缘, 2001, 8(2): 259~266
- 郑建平. 中国东部地幔置换作用与中新代岩石圈减薄. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999. 13~68
- 朱大岗, 吴珍汉, 崔盛芹, 等. 燕山地区中生代岩浆活动特征及其与陆内造山作用关系. 地质论评, 1999, 45(2): 163~172
- 邓晋福, 吴宗絮, 赵国春, 等. 华北地台前寒武纪花岗岩类、陆壳演化与克拉通形成. 岩石学报, 1999, 15(2): 190~198
- 张宗清. 从华北古陆早前寒武纪变质岩的 Sm-Nd 同位素特征论其地壳的主要生长时期. 见: 沈其韩, 程裕淇主编. 华北地区早前寒武纪地质研究论文集. 北京: 地质出版社, 1998. 133~136
- 沈其韩. 华北地台早前寒武纪条带状铁英岩地质特征和形成的地质背景. 见: 沈其韩, 程裕淇主编. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集. 北京: 地质出版社, 1998. 1~31
- 郭敬辉, 翟明国, 许荣华. 华北桑干地区大规模麻粒岩相变质作用的时代: 锆石 U-Pb 年代学. 中国科学, D 辑, 2002, 32(1): 10~18[摘要] [PDF]
- 18 万渝生, 张巧大, 宋天锐. 北京十三陵长城系常州沟组碎屑锆石 SHRIMP 年龄: 华北克拉通盖层物源区及最大沉积年龄的限定. 科学通报, 2003, 48(18): 1970~1975[摘要] [PDF]
- 19 Wilde S A, Zhou X H, Nemchin A A, et al. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China craton: A consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia. *Geology*, 2003, 31(9): 817~820[DOI]
- 20 吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质. 高校地质学报, 2000, 6(3): 379~388
- 21 周新华, 杨进辉, 张连昌. 胶东超大型金矿的形成与中生代华北大陆岩石圈深部过程. 中国科学, D 辑, 2002, 32(增刊): 11~20[摘要] [PDF]
- 22 洪大卫, 王 涛, 童 英, 等. 华北地台和秦岭-大别-苏鲁造山带的中生代花岗岩与深部地球动力学过程. 地学前缘, 2003, 10(3): 231~256
- 23 刘建明, 张宏福, 孙景贵, 等. 山东幔源岩浆岩的碳-氧和锶-钕同位素地球化学研究. 中国科学, D 辑, 2003, 33(10): 981~987
- 24 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 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, 2003, 33(4): 289~299[摘要] [PDF]
- 25 Zhou X H, Sun M. Major transformation of subcontinental lithosphere mantle beneath the Sino-Korean Craton in Late Mesozoic: A possible global link. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(18): 584
- 26 Falloon T J, Danyushebsky L V. Melting of refractory mantle at 1.5, 2 and 2.5 GPa under a hydrous and H₂O-undersaturated conditions: Implications for the petrogenesis of high-Ca boninites and the influence of subduction components on mantle melting. *Journal of Petrology*, 2000, 41(2): 257~283[DOI]
- 27 邓晋福. 大陆裂谷岩浆作用与深部过程. 见: 池际尚, 路风香主编. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989. 201~218
- 28 Anderson D L. Hotspots basalts and the evolution of the mantle. *Science*, 1981, 213: 82~89
- 29 DePaolo D J. Nd isotopic studies: Some new perspectives on Earth structure and evolution. *EOS*, 1981, 162: 137~140
- 30 Ringwood A E. *Composition and Petrology of the Earth's Mantle*. McGraw-Hill, 1975. 1~618
- 31 Condie K C. *Plate Tectonics and Crustal Evolution*. New York: Pergamon, 1982. 1~310
- 32 U S Geological Survey, U S Department of Energy. A national program for research in continental dynamics. In: Dillman A C, Teo L T, eds. *From the Workshop on Future Research Directions in Continental Dynamics*. Arlington: Dosecc Incorporated, 1993. 15~55
- 33 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 等. 太古宙克拉通型下地壳剖面: 华北怀安-丰镇-尚义的麻粒岩-角闪岩系. 岩石学报, 1996, 12(2): 222~238

- 34 马杏垣, 刘昌铨, 刘国栋. 江苏响水至内蒙古满都拉地质断面. 地质学报, 1991, 56(3): 427~447
- 35 鄯明才, 迟清华. 中国东部地壳与岩石的化学组成. 北京: 科学出版社, 1997. 45~55
- 36 Davis G A, Qian X L, Zheng Y D, et al. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: A metamorphic core complex north of Beijing, China. In: Yin A, Harrison T M, eds. The Tectonic Evolution of Asia. Camb Univ Press, 1996. 253~280
- 37 Davis G A, Zheng Y D, Wang C, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt with emphasis at Hebei and Liaoning provinces, Northern China. GSA Memoir, 2001, 194: 171~197
- 38 王 焰, 张 旗. 八达岭花岗岩杂岩的组成, 地球化学特征及其意义. 岩石学报, 2001, 17(4): 533~540
- 39 Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. Contrib Mineral Petrol, 2002, 144: 241~253
- 40 樊祺诚, 刘若新, 李惠民, 等. 汉诺坝榴辉岩相石榴辉石岩-岩浆底侵作用新证据. 岩石学报, 2001, 17(1): 1~6
- 41 罗照华, 邓晋福, 韩秀卿. 太行山造山带岩浆活动及其造山过程反演. 北京: 地质出版社, 1999. 22~81
- 42 Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, et al. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In: Flower M F J, ed. Mantle Plane and Plate Interaction in East Asia, Geodynamics Series 27. Washington: American Geophysical Union, 1998. 107~126
- 43 高 山, Rudnick R L, Carlson R W, et al. 华北克拉通岩石圈地幔置换作用和壳幔生长耦合的 Re-Os 同位素证据. 地学前缘, 2003, 10(3): 61~67
- 44 许文良, 迟效国, 袁 朝, 等. 华北地台中部中生代闪长质岩石及深源包体. 北京: 地质出版社, 1993. 1~164
- 45 许文良, 王冬艳, 高 山, 等. 鲁西中生代金岭闪长岩中纯橄岩和辉石岩包体的发现及其意义. 科学通报, 2003, 48(8): 863~868[摘要] [PDF]
- 46 陈立辉, 周新华. 鲁西中生代闪长岩中的深源超镁铁质岩捕虏体及其富硅交代特征. 中国科学, D 辑, 2003, 33(8): 734~744[摘要] [PDF]
- 47 迟效国, 许文良, 林景任, 等. 华北地台中生代闪长质岩石成因的 Sr-Nd 同位素证据. 见: 谭东娟, 林景任主编. 华北地台中生代钾质岩浆区. 北京: 地震出版社, 1994. 66~74
- 48 Guo F, Fan W M, Wang Y J, et al. Later Mesozoic intrusive complexes in North China Block: Constraints on the nature of subcontinental lithospheric mantle. Phys Chem Earth, 2001, 26(9~10): 759~771
- 49 鄂莫岚, 赵大升. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体. 北京: 地震出版社, 1987. 133~267
- 50 Boyd F R. Compositional distinction between oceanic and cratonic lithosphere. Earth and Planetary Science Letters, 1989, 96: 15~26[DOI]
- 51 Menzies M A, Fan W M, Zhang M. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. Geological Society of London, 1993, 76: 71~81
- 52 Huang Z X, Su W, Peng Y J, et al. Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(2073): 1~10
- 53 Flower M F J, Tamaki K, Hoang N. Mantle extrusion: A model for dispersed volcanism and Dupal-like asthenosphere in East Asia and the Western Pacific. In: Flower M F J, ed. Mantle Plane and Plate Interactions in East Asia, Geodynamics Series 27. Washington: American Geophysical Union, 1998. 67~88
- 54 马宗晋, 陈鑫连, 叶叔华, 等. 中国大陆区现今的地壳运动的 GPS 研究. 科学通报, 2001, 46(13): 1118~1120[摘要] [PDF]