

华北大陆地壳—上地幔岩石学 结构与演化*

吴宗絮¹ 邓晋福² 赵海玲² 杨主恩¹ 罗淑兰²

(1, 国家地震局地质研究所, 北京 100029)

(2, 中国地质大学, 北京 100083)

主题词 陆壳与上地幔 岩石学结构 大陆演化

提要 本文基于出露的前寒武纪变质岩系、中、新生代岩浆活动以及新生代玄武岩中上地幔包体的岩石学与地质压力计研究, 结合地球物理测深资料与高温高压下岩石中地震波传播速度的实验成果, 提出了华北大陆三个地区(河北平原、太行—五台、鄂尔多斯)的地壳—上地幔岩石学结构, 讨论了界面性质及其演化。在强调 V_p 、 V_s 、 σ 结构与岩石学结构共同约束的基础上, 有效地识别了不同地区硅铝质陆壳在物质组成上的差异和上地幔低速层或矿物相转变等特征。本文提出壳—幔岩石学结构及其演化, 密切地与陆壳主要形成时期的太古—早元古构造岩浆事件相关, 又与显生宙构造岩浆事件对它的改造程度有关, 壳—幔岩石学结构是我们追索大陆的构造性质及其演化的一个重要记录和科学依据。

地壳—上地幔的结构、物质组成、界面性质等是讨论大陆岩石圈动力学及其演化的基本参数。研究地壳—上地幔结构的最主要手段是各种地球物理学方法。80年代以来, 深部物质的研究发展很快, 地球物理学与岩石学的共同约束可对壳—幔结构有更好的了解。本文提出岩石学结构 (petrological structure) 这一名词, 强调主要依据岩石学途径研究地壳—上地幔结构。研究地壳—上地幔的岩石学方法主要来自三个方面: 出露于地表的深部陆壳岩石 (主要是前寒武纪变质岩系); 由岩浆或构造作用带到地表的深部岩石包体或块体; 火成岩 (火山岩与侵入岩) 中包含的岩浆源区的信息。本文基于出露的前寒武纪变质岩系、中、新生代岩浆活动及新生代中上地幔岩石包体的岩石学与地质压力计研究, 结合地球物理测深资料与高温高压下岩石中地震波传播速度的实验成果, 讨论华北大陆三个地区 (河北平原, 太行—五台, 鄂尔多斯) 的地壳—上地幔岩石学结构、界面性质及其演化。本文提出的华北大陆三个地区的地壳—上地幔岩石学结构示于表 1。

1 陆壳岩石学结构

现今大陆地壳的70%—90%是在太古宙时期形成的, 华北大陆亦不例外。80年代以来, 陆壳三分的结构模型^[1]已被广泛接受。古老变质岩系形成之后, 大陆常受到后期构造—岩浆

* 国家自然科学基金委员会资助项目。
本文于1993年6月收到, 1994年2月改回。

表 1 华北大陆三个地区的地壳—上地幔岩石学结构模型
Table 1 Crust-mantle petrological structure model of three regions of the North China Continent

深度 (km)	鄂尔多斯地区			太行—五台山地区			河北平原							
	分层	岩石学	地球物理		分层	岩石学	地球物理		分层	岩石学	地球物理			
			V_p (km/s)	V_s (km/s)			V_p (km/s)	V_s (km/s)			V_p (km/s)	V_s (km/s)	σ	
0—10	上地壳	沉积盖层 绿片岩相片岩、花岗岩 岗质变粒岩与花岗岩	5.8	3.55	0.20	沉积盖层 绿片岩相片岩、花岗岩 闪长质变粒岩，花岗岩 —花岗岩闪长岩岩体	5.95 ↓ 6.1	3.42	0.25	上地壳	沉积盖层 绿片岩相片岩、花岗岩 长质变粒岩，花岗岩 岩体	6.1	3.45	0.26
10—20	中地壳	角闪岩相片岩、花岗岩 岗质片麻岩，花岗岩 岩体	6.1	3.68	0.29	花岗岩低速体	6.0	3.70	0.16	中地壳	角闪岩相片岩、花岗岩 长质片麻岩，花岗岩 岩体	6.4	3.75	0.24
20—30	下地壳	麻粒岩相花岗岩闪长 质麻粒岩，TTG	6.4	3.80	0.23	角闪岩相片岩片麻岩 TTG 低速体	6.5 ↓ 6.4	3.61	0.27	下地壳	麻粒岩相中性麻粒岩、 TTG	6.5	3.80	0.24
30—40	下地壳	酸性榴辉岩	6.8	4.40	0.12	中酸性麻粒岩 基性麻粒岩，石榴石 —透闪石—辉石堆晶岩	6.6	4.40	0.10	下地壳	基性麻粒岩、石榴石— 透闪石—辉石堆晶岩	7.0	4.45	0.16
40—50	上地幔岩石圈	尖晶石相方辉橄橄 岩与纯橄橄岩	8.0 ↓ 8.08 8.25	4.40	0.29	尖晶石相二辉橄橄岩， 少量方辉橄橄岩，纯橄 橄岩	8.0 ↓ 8.14	4.40	0.17	上地幔岩石圈	尖晶石相二辉橄橄岩， 少量方辉橄橄岩，纯橄橄 岩	7.9 ↓ 8.1	4.45	0.28
50—60	上地幔岩石圈	石榴石相方辉橄橄 岩与纯橄橄岩	8.35	4.20	0.33	含 5% 玄武质熔浆的 二辉橄橄岩	7.7	4.15	0.30	上地幔岩石圈	含 7% 玄武质熔浆的二 辉橄橄岩	7.6	4.20	0.28
60—80	上地幔岩石圈					石榴石—二辉和方辉 橄橄岩	8.4	4.15	0.34	上地幔岩石圈	石榴石—二辉和方辉橄 橄岩	8.25	4.12	0.33

事件的叠加与改造,使陆壳岩石学及其结构受到各种变异作用(modification)。

冀东地区的古老变质岩系是一个出露的河北平原的大陆地壳断面^[2]。该区陆壳纵波速度结构模型分为三层^[3],与岩石学结构、岩石 V_p 测定值^[2]相符合(表1)。上地壳层深达15km左右,除顶部为沉积盖层外,主要由相当于花岗闪长质成分的变粒岩、板岩、千枚岩和片岩等构成,并有前寒武纪与中生代花岗岩类侵入体,在相应的温压条件下,实验室测定的 V_p 值为5.87—6.14 km/s^[4,5],与上地壳的人工地震 V_p (6.1 km/s)大致相当。据最新成果^[6],在10—15km处可能存在一个新生代时期的玄武岩岩浆房,其 V_p 为6.3 km/s。中地壳层深达25km左右,主要由中酸性成分的角闪岩相片麻岩、片岩及少量斜长角闪岩构成,广泛发育混合岩化作用,并有石英闪长岩和花岗闪长岩侵入体。在相应温压条件下,实验室测定片麻岩的 V_p 值为6.3—6.5 km/s^[4,7],石英闪长岩为6.41—6.49 km/s^[5],它们与中层地壳人工地震 V_p (6.4 km/s)相对应。在不少地段的20—25km处出现 V_p 为6.1 km/s的低速体,可能是由含隙间高温流体引起^[8]。下地壳层深达35 km左右,主要由中性—基性成分的麻粒岩相岩石——麻粒岩、片麻岩及紫苏花岗岩、英云闪长岩等构成,其上部为角闪石麻粒岩相,下部为辉石麻粒岩相^[9]。实验室测定的中性麻粒岩 V_p 为6.5—6.6 km/s^[1],它与人工地震(V_p =6.5 km/s)相符合。地球物理探测^[10]表明,壳底有一个7.3—7.6 km/s的高速度梯度层。岩石学研究表明,除了基性组成的辉石麻粒岩之外,新生代玄武岩中发育单斜辉石+歪长石+石榴石巨晶组合,它们形成于Moho附近,并在壳底可能形成石榴石—歪长石—辉石堆晶岩,它们可形成高速的异常壳底层^[11]。基性麻粒岩的 V_p 实验值为7.2—7.4 km/s^[4]与6.9—7.3 km/s,辉石岩的平均 V_p 实验值为7.8 km/s^[1]。

1.1 太行—五台地区

从阜平—龙泉关—五台山—繁峙可能是一个出露较好的陆壳断面^①,下部主要由角闪岩相的灰色片麻岩组成,相当于阜平群,形成于0.5—0.7 GPa,相当于表1中20—30 km中—下地壳交界处。在阜平县大柳树一带出露的基性麻粒岩形成于约0.8—0.9 GPa,它与 V_p 为7.0—7.3 km/s的壳底层相当,与河北平原类似,该区新生代玄武岩火山活动亦暗示壳底可能也有辉石堆晶岩的加入。上部主要由五台群与滹沱群构成,前者主要为角闪岩相的长英质片麻岩、变粒岩、角闪岩以及绿片岩相的绿片岩、绢云石英片岩等组成,后者主要为一套轻微变质的千枚岩、板岩、碳酸盐岩与变质砾岩、石英岩等组成,它们是构成中地壳顶部与上地壳的主要岩石,与 V_p 为5.95—6.10 km/s相对应。地学大断面^[12]揭示了该区中、下地壳存在二个低速体,这是该区陆壳结构中最最重要的一个特征。岩石学研究^②表明,北台英云闪长岩—奥长花岗岩—花岗闪长岩(TTG)杂岩与兰芝山奥长花岗岩—花岗岩杂岩形成于0.8—1.1 GPa,相当于30—40 km的下地壳,花岗质片麻岩 V_p 的实验测定值为6.3—6.4 km/s^[1],它与该区下地壳低速体(V_p 为6.4 km/s)相一致。峨口花岗岩和王家会花岗岩与北台TTG杂岩不同,为具有高的SiO₂(最高达76—78%)、K₂O>Na₂O的酸性岩体,形成于0.4—0.6 GPa^③,相当于15—20 km的中地壳。花岗岩实验室测定的 V_p 为5.98 km/s^[13],它与

① 吴宗繁、杨主恩、邓晋福、罗淑兰, 1991, 太行—五台山区陆壳的岩石学结构模型, 北京市矿物岩石地球化学学术讨论会论文摘要集。

② 罗淑兰, 1992, 太行—五台山区花岗岩类岩石与陆壳演化(硕士论文), 中国地质大学(北京)。

该区中地壳低速体 (V_p 为5.8—6.0km/s) 大致相当。可以推测, 下、中地壳的低速体分别相当于TTG杂岩与花岗岩岩基。

1.2 鄂尔多斯地区

内蒙南部包头—呼和浩特一带分布的古老变质岩系可能代表鄂尔多斯地块出露于地表的陆壳断面^①, 相当于下地壳层位的麻粒岩相岩石, 主要是砂线石榴黑云钾长(或二长)片麻岩、浅粒岩等(集宁群上组), 中地壳的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), 上地壳绿片岩相—低角闪岩相岩石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)。地球物理探测表明^[3], 地壳 V_p 值较低, 各层的 V_p 速度比较均一, 这与岩石学结构模型(表1)符合。上、中地壳的 V_p 相应为5.8和6.1 km/s, 与相应温压条件下花岗岩和富石英的变粒岩的实验 V_p 为5.98km/s^[13]和 $V_p=5.94-6.01$ km/s^[4]相适应。下地壳的 V_p 为6.4km/s, 它与酸性或中酸性组成的花岗岩类岩石的实验 $V_p=6.3-6.4$ km/s^[1]相当, 内蒙南部广泛发育的长英质片麻岩、浅粒岩(形成于0.8—1.0GPa)与北侧大青山一带广泛出露的紫苏花岗岩与TTG杂岩(约占80%)^[14]可能是制约该区下地壳低 V_p 及其均一性的主要原因。地球物理探测表明^②, 鄂尔多斯地块陆壳底部有一个 V_p 为6.8km/s的高速度层, 它可能与酸性榴辉岩相适应(详后)。

2 上地幔岩石学结构

2.1 河北平原与太行—五台地区

不论从地球物理探测或者岩石学研究均表明, 这两个地区的上地幔岩石学结构有极大的类似性, Moho以下直达60—70 km深度为上地幔岩石圈, 主要由尖晶石相的二辉橄榄岩构成, 有少量方辉橄榄岩、纯橄榄岩与辉石岩(表1)。人工地震资料表明^[15], 常为正常地幔岩石圈($V_p=8.0-8.1$ km/s)与异常地幔岩石圈($V_p=7.6-7.8$ km/s)的互层。玄武质岩浆房结晶产物的加入可能是导致 V_p 异常值的主要原因。60—70km以下为上地幔低速层, 岩石学研究表明它是由达固相线的上地幔橄榄岩构成, 含有7%—15%的隙间玄武岩岩浆, 它与该低速层的 V_p 值相当。低速层底界为100km或120km, 它与新生代玄武岩岩浆起源的最大深度达110km^[11]相符合。100—120km以下的上地幔是亏损的方辉橄榄岩, 由于它的难熔性质, 在新生代熔融事件中它是一个“热屏障”, 导致低速层至此而终止。

2.2 鄂尔多斯地区

该区没有新生代玄武岩岩浆活动。70—80km以上是 V_p 为8.0—8.25 km/s的梯度层, 其波速比河北平原略高, 反映它的温度较低。另外根据斜方辉石实验测定的 V_p 大于单斜辉石^[17]可推测, 该区上地幔顶部可能主要由方辉橄榄岩组成。从 V_p 结构看, 在约80km以下为4.2km/s的低速层^[8], 但 V_p 结构则为正速度梯度层, 这一矛盾现象笔者认为可用上地幔橄榄岩的相转变来解释(见下面论证)。

① 吴宗絮、马宝林, 1989, 内蒙深部陆壳岩石学及其与冀东陆壳的比较, 地球物理综合学术讨论会论文摘要集。

② 孙武城、徐杰、杨主恩等, 1988, 上海奉贤至宁夏阿拉善左旗地质断面。

3 地壳—上地幔内界面的性质

壳—幔岩石学结构模型(表1)中有4个重要界面,即上、中地壳与中、下地壳界面, Moho与岩石圈、软流圈界面,它们的性质可由岩石学研究做出某些判断。

3.1 上、中地壳界面

上、中地壳的物质组成比较相近,相当于花岗质—花岗闪长质,其界面符合于绿片岩相向角闪岩相变质级的转变,笔者称为矿物相转变的界面(简称矿物相界面)。华北大陆的地震源常集中在该界面附近(10—15km),许多地壳浅部的铲式断层亦常在这个深度上消失,说明上地壳为脆性,中地壳主要表现为韧性,我们称它为流变学性质转变的界面(简称流变学界面);有的地区中地壳为含少量隙间流体的低速—高导层,可将该界面称为相转变(固相与固—液共存系统的转变)界面(简称相界面)。我们将上述三种界面统称为物理界面。在古老变质岩出露地区,常可见到许多韧性剪切糜棱岩带,特征的矿物是绢(白)云母与绿泥石,形成深度10—15km,可能相当于上、中地壳之间的一种滑脱面构造,笔者称它为构造界面。这样可以认为,上、中地壳之间是物理界面与构造界面的复合。

3.2 中、下地壳界面

它相当于角闪岩相向麻粒岩相变质级转变的矿物相界面。下地壳物质组成常相当于安山质的,与中地壳有较小的差异,所以此界面亦代表一个化学界面。在古老变质岩出露区,有时可见到呈带状分布的眼球状片麻岩,如著名的太行—五台山区的龙泉关眼球状片麻岩,它们具有角闪岩相矿物组合,相当于20—25km深处形成的韧性剪切变形岩石,可能代表了抬升达地表的中、下地壳构造界面。这样,中、下地壳之间主要是矿物相界面与构造界面的复合。

3.3 Moho面

是公认的化学界面。另外,在地表出露很少的斜长岩—苏长岩杂岩,如河北大庙,可见到很好的眼球状糜棱岩,特别是长石遭受强烈的韧性变形。与石英相比,长石的韧性变形需要更大的深度,推测,它们可能是抬升达地表的Moho附近的壳底的韧性剪切带岩石,这样, Moho主要是化学界面,但亦可能是构造界面。

3.4 岩石圈、软流圈界面

它主要是物理界面。另外,在新生代玄武岩的橄橄榄岩捕虏体中,可见到一种很特别的颗粒很细的橄橄榄岩质“糜棱岩”,如东北伊通小孤山^①、汪清等地,它们形成于60—80 km深度。橄橄榄岩包体的流变学性质研究^[12]表明,在60—80 km深度范围内差异应力($\sigma_1 - \sigma_3$)的变化范围很大,它们均反映了在该深度上存在韧性剪切变形带。这样该界面主要为物理界面,但常有构造界面的重叠。

4 壳内低速体

壳内低速体是大陆裂谷盆地内的一个重要特征,80年代以来引起广泛的重视与深入研究,

① 武殿英, 1982, 吉林伊通新生代玄武岩与上地幔研究(硕士论文), 中国地质大学(北京)。

壳内低速体常常亦是高导体，常称为低速—高导体，但低速体不一定伴随高导体的发育。笔者发现有时 V_p 为低速时， V_s 呈现高速特征；或者 V_p 为正速度梯度结构时， V_s 呈现低速特征等。是什么因素制约这种复杂的图案？这是一个值得讨论的问题，它可能是揭示陆壳细结构及其与地质构造、地震发育成生联系的关键之一。

陆壳岩石主要由长石与石英构成，由于它们 V_p 、 V_s 的差异，要解释陆壳岩石的矿物组成必须同时知道 V_p 、 V_s 与 σ （泊松比）。陆壳岩石在高温高压下的波速实验室测定清楚表明，单独依据 V_p 数值是不能精确地确定陆壳的矿物组成的^[7,17]。长石、石英的实验室测定 V_p 、 V_s 值^[17]和据公式 σ （泊松比）= $\frac{1}{2}\left[1-\frac{1}{(V_p/V_s)^2-1}\right]$ 计算的 σ 值列于表 2，从表 2 可以看出，富斜长石与富石英的陆壳岩石相比，前者 V_p 高， V_s 相对低， σ 高；后者 V_p 低， V_s 相对高， σ 低。河北平原的中地壳下部 20—25km 范围内 V_p 、 V_s 均为低速，壳内高导层亦大致在这一深度范围内^[12]。因此，它具有低速—高导体的复合性质，主要是由于含有隙间水流体相引起^[8]。太行—五台地区则出现较复杂的图案，中地壳与下地壳主要由二个大型低速体构成， V_p 分别为 5.8 与 6.4 (km/s)，但相伴的 V_s 则为高速，分别为 3.70 与 3.80 (km/s)。它们的 σ 分别为 0.16 与 0.23，与正常陆壳的 0.25 与 0.27 相比则低很多。这二个 V_p 低速、 V_s 高速体并不伴随高导性质，其电阻率分别为 3×10^3 与 1×10^4 ($\Omega \cdot m$)，它们不是低速—高导体，因此不能用含隙间水流体相的模型来解释，由表 2 可知，它应是由相对富石英的陆壳岩石引起。进一步比较可以看出，中地壳低速体的 V_p 值比下地壳低很多，但 V_s 值相差不太大。由表 1 判断，下地壳可能更富含斜长石，因此，一个合理的岩石学模型是，中地壳低速体主要是花岗岩岩

表 2 长石和石英的 V_p 、 V_s 、 σ 值Table 2 The V_p 、 V_s 、 σ values of both feldspar and quartz

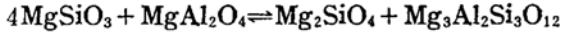
	石 英	碱 性 长 石	斜长石 ($An=24$)	斜长石 ($An=53$)
V_p	6.05	6.01	6.22	6.57
V_s	4.09	3.34	3.40	3.53
σ	0.08	0.28	0.29	0.30

基，下地壳低速体可能为 TTG 杂岩。太行—五台地区还有一个重要现象（表 1），即在中—下地壳界面附近，出现 V_s 低速（3.61 km/s），但 V_p 不是低速，而是 6.0—6.5 km/s 的强正梯度层，亦不伴随高导性质，它可能是由于斜长石急剧增加所引起，这与中地壳为花岗岩向下地壳转变为 TTG 的岩石学模型较一致。此外，在太行—五台地区的两侧（东侧的阜城—宁津一带，西侧的应县）没有壳内 V_p 低速层，但中—下地壳界面的 V_s 低速伴随有高导，电阻率为 6—10 $\Omega \cdot m$ ， V_p 为正梯度层^[12]，这是否可能与含极少量水流体相的韧性剪切带有关，因为极少量的水可能引起 V_s 可见量的降低，而不使 V_p 降低。由于水的加入使 V_s 值降低量高于 V_p 值的降低量，例如，在几千巴围压条件下具有 0.7% 孔隙水的花岗岩 V_p 减低 10%， V_s 则减低 35%^[19]，笔者称它为 V_s 低速—高导体。这样，在华北大陆内存在有 4 类低速体：1) 低速 (V_p 、 V_s)—高导体；2) V_p 低速体；3) V_s 低速体；4) V_s 低速—高导体。从可能的组合关系看，还可能有 V_p 低速 (V_s 不是低速)—高导体，它们在华北大陆内的缺失，可能是由于

在自然界这种组合不具有现实性, 因为, 如果由水流体相引起高导与 V_p 的低速, 则一定会与 V_s 低速相伴, 这时必定会出现低速(V_p 与 V_s)—高导体。

5 上地幔 V_s 低速— V_p 正梯度的可能原因

前面已经指出, 与河北平原、太行—五台地区上地幔低速层(V_p 、 V_s 均为低速性质)不同, 鄂尔多斯地区 V_s 为低速, V_p 则为正速度梯度层特性, 它不能用上地幔橄榄岩含有7%—15% 隙间玄武岩熔浆的模型来解释, 因为, 后者必然会引起 V_p 的低速。岩石学相平衡实验告诉我们, 大陆地区在约70—80 km尖晶石相橄榄岩要转变为石榴石相橄榄岩, 其反应式为:



顽火辉石 尖晶石 镁橄榄石 镁铝榴石

根据 Christensen 等^[17]与 Birch^[20]实验测定矿物的 V_p 、 V_s 资料, 可以算出该反应式两侧的 V_p 与 V_s 值, 左端(顽火辉石+尖晶石) V_p 为8.226 km/s, V_s 为4.892 km/s, 右端(镁橄榄石+镁铝榴石) V_p 为8.425 km/s, V_s 为4.665 km/s。当反应向右进行, 即由尖晶石相橄榄岩转变为石榴石相橄榄岩时, 是伴随 V_p 的增加($\Delta V_p = +0.199$ km/s)与 V_s 的减少($\Delta V_s = -0.227$ km/s)。计算结果表明, 上地幔浅部 V_s 低速和 V_p 正梯度的特征, 可用上地幔橄榄岩由尖晶石相向石榴石相的转变得到满意解释。这一模型不仅适用于鄂尔多斯地区, 亦适用于扬子大陆(V_p 为正速度、 V_s 为低速性质), 具有普遍意义, 它可能是大陆克拉通地区上地幔浅部 V_p 、 V_s 结构的共同性质。

6 三个地区的比较与壳—幔演化

上地壳: 根据 V_p 、 V_s , 特别是 σ 来看(表1), 河北平原与太行—五台地区类似, 与鄂尔多斯地区相比, 前者平均成分可能相当于花岗闪长质, 后者可能相当于花岗质且更富石英。

中地壳: 从表1来看, 河北平原中地壳上部平均组成相当于花岗闪长质, 下部由于含有隙间水流体相, 导致 V_p 与 V_s 的低速, 如果去掉低速的影响, 则可能与上部具有类似的岩石学特征。太行—五台地区则与鄂尔多斯地区类似, 与河北平原相比, 它们的 V_s 相近, 但 V_p 差异大, σ 值低, 这反映了它们的平均组成可能为花岗质的。

下地壳: 三个地区下地壳组成上的差异类似于中地壳。河北平原下地壳岩石中的斜长石比较基性, 而太行—五台与鄂尔多斯地区下地壳岩石中的斜长石相对酸性些。

壳底: 一个重要特征是 V_s 均较大(4.40—4.45 km/s), V_p 为强正速度梯度。河北平原与太行—五台地区的平均 V_p 为7.3—7.4 km/s, 这与陆壳主要组成为长英质的 V_p 不同, 岩石学研究表明, 它们可能由基性麻粒岩与石榴石—碱性长石—单斜辉石堆晶岩构成(见前)。根据矿物的 V_p 和 V_s 资料^[17, 20]计算的结果是, 基性麻粒岩的 V_p 、 V_s 分别为7.25 km/s与4.01 km/s。据新生代玄武岩中巨晶的分布推定的堆晶岩(单斜辉石60%, 碱性长石30%, 石榴石10%)的 V_p 、 V_s 分别为7.49 km/s与4.24 km/s, 它表明, 只有基性麻粒岩与堆晶岩联合的岩石学模型, 而不是单独的基性麻粒岩才可以满足壳底的波速要求。鄂尔多斯地区的壳底平均 V_p 为6.8 km/s, V_s 为4.4 km/s, 根据矿物的 V_p 、 V_s 资料, 对酸性麻粒岩(斜方辉石2%, 单斜

辉石3%, 石榴石5%, 石英30%, 酸性斜长石60%) 计算的 V_p 、 V_s 值分别为6.36km/s与3.73km/s, 它显然与实际(表1)不符合。如果选取酸性(相当于花岗质)榴辉岩的模型(单斜辉石25%, 石榴石25%, 石英50%), 计算出的 V_p 、 V_s 分别为7.08km/s与4.33km/s, 它与该区的波速大体相当。采用酸性榴辉岩的合理性还在于, 从岩石学相平衡实验与理论知识来说, 对于稳定的大陆区, 地温较低, 在深40—50km处麻粒岩相将转变为榴辉岩相。

上地幔: 从前述可知, 河北平原与太行—五台地区上地幔岩石圈主要为二辉橄榄岩, 并可能含有玄武岩岩浆房结晶的产物, 软流圈埋深在60—80km范围内, 而鄂尔多斯地区上地幔岩石圈主要为方辉橄榄岩, 软流圈的埋深可能要大于100—120km, 或者不存在软流圈。具有大陆克拉通的特征。从表1来看, 河北平原与太行—五台地区在深约100km处 V_p 增加, V_s 不变(类似于上复的上地幔低速层), 它可能暗示了在这一深度存在尖晶石橄榄岩向石榴石橄榄岩的相转变。前面已谈到汉诺坝玄武岩中尖晶石石榴石二辉橄榄岩包体形成于约80km处, 结合地球物理资料(表1)来看, 这个相转变可能在100km处结束。

壳—幔演化: 根据华北大陆三个地区壳—幔岩石学结构及其差异, 结合该大陆的构造—岩浆事件可以追索壳—幔岩石学结构的演化历史, 下古生代华北大陆的陆台型沉积表明具有稳定克拉通性质, 在中生代的强烈挤压造山事件中, 鄂尔多斯表现为造山带中相对稳定的陆块, 中、新生代时期均没有岩浆活动, 这表明, 其壳—幔岩石学结构可能主要仍反映太古—早元古时期形成的稳定的克拉通性质。由表1可看出, 鄂尔多斯的壳—幔岩石学结构与现今世界上典型的克拉通很类似, 陆壳具花岗质与花岗闪长质组成, 没有壳内低速体, 上地幔浅部无低速层, 软流圈埋深很大或者无软流圈, 亦即有一个岩石圈的“根”。河北平原区与太行—五台地区中—新生代岩浆活动频繁, 中生代以安山—英安—流纹质火山活动与石英闪长岩—花岗闪长岩侵入活动为特征, 新生代则是玄武岩岩浆的强烈喷发。推测, 古生代及以前的壳—幔岩石学结构可能与鄂尔多斯类似, 中—新生代的岩浆活动加入上部陆壳许多酸性物质的同时, 亦加入了不少中性与基性物质, 从而导致了其上地壳比鄂尔多斯的上地壳更偏向于中性组成。新生代的玄武岩岩浆在Moho附近的岩浆房的结晶作用导致堆晶岩的形成, 使壳底基性化, 软流圈或热柱的上升导致上地幔浅部出现低速层, 玄武岩岩浆房的活动使上地幔岩石圈出现低 V_p 的区段。

冀东地区与大同一带太古宙麻粒岩形成的最大压力可达1.2—1.4GPa, 表明华北大陆太古宙陆壳厚约45—50km, 类似现今的鄂尔多斯地块的陆壳厚度。但是, 现今河北平原陆壳的平均厚度只有35km, 表明陆壳强烈减薄, 从表1来看, 主要是下地壳的减薄。中生代时期是挤压造山陆壳不可能减薄, 新生代是大陆裂谷作用发育时期, 陆壳被强烈拉伸而减薄。因此, 河北平原壳—幔岩石学结构受到中、新生代构造—岩浆事件的强烈改造, 并主要反映了新生代以来大陆裂谷盆地区的壳—幔岩石学结构特征。太行—五台地区具有鄂尔多斯地块与河北平原过渡性质的壳—幔岩石学结构, 与河北平原类似, 具有大陆裂谷作用地区的壳—幔岩石学结构特征, 但是陆壳厚度大, 壳内无低速—高导层又与鄂尔多斯有某些类似之处。太行—五台地区上地壳与河北平原类似, 中、下地壳又类似于鄂尔多斯地块, 中、下地壳、两个巨大 V_p 低速体的发育与叠置, 可能具有某种挤压造山带双重陆壳的结构特征; 由于新生代时期陆壳拉伸很小, 所以, 新生代以前(或太古—早元古时期形成的, 或中生代时期形成的)的陆壳结构大部分保留下来了, 但壳底基性化, 软流圈埋深浅等特征, 又类似于河北平原,

它表明其壳-幔岩石学结构受到新生代时期构造—岩浆事件的改造。对太行—五台地区来说,由于新生代主要是幔源岩浆活动,所以上地幔岩石学结构受到更大的改造,它主要反映了大陆裂谷区的特征,但它是大陆裂谷作用区的隆起地带,不是大陆裂谷盆地,所以陆壳拉伸较弱,加之新生代主要不是陆壳岩浆活动,因此,陆壳岩石学结构的改造较弱。

由上可以看出,壳-幔岩石学结构及其演化密切地与陆壳主要形成时期的太古—早元古的构造—岩浆事件相关,又与显生宙的构造—岩浆事件对它的改造程度有关。壳-幔岩石学结构是我们追索大陆构造性质及其演化的一个重要记录与科学依据。

参 考 文 献

- 1 Fountain D M. The Ivrea-Verbanò and Strona-Ceneri Zones, northern Italy; A Cross-section of the continental Crust—new evidence from seismic velocities of rock samples. *Tectonophysics*, 1976, 33: 145—165.
- 2 吴宗絮, 郭才华. 冀东陆壳结构的岩石学模型. *地震地质*, 1991, 13(4): 369—376.
- 3 陈立华, 宋仲和. 华北地区地壳上地幔P波速度结构. *地球物理学报*, 1990, 33(5): 540—546.
- 4 吴宗絮, 郭才华. 冀东陆壳岩石在高温高压下波速的实验研究. *地球物理学进展*, 1993, 8(4): 206—213.
- 5 高龙生, 葛焕称. 中国大陆岩石标本在高压下的弹性波速的初步研究. *地球物理学报*, 1975, 18(1): 26—38.
- 6 首都圈岩石圈的物质组成与温压环境. 首都圈地震地质环境与地震灾害. 北京: 地震出版社, 1994 (出版中).
- 7 Kern H. P- and S-wave velocities in crustal and mantle rocks under the simultaneous action of high confining pressure and high temperature and the effect of the rock microstructure. In (W. Schreyer ed., *Highpressure Research in Geoscience*), 1982, 15—45.
- 8 吴宗絮, Wyllic P J. 黑云母片麻岩—H₂O系统在0.1—0.2GPa压力下的熔融实验. *岩石矿物学杂志*, 1991, 10(2): 105—113.
- 9 吴宗絮. 冀东太古宙麻粒岩及下地壳分层的讨论. *地震地质*, 1988, 10(3): 88—92.
- 10 孙武城, 李松林, 杨玉春. 华北东部地区地壳结构的初步研究. *地震地质*, 1985, 7(3): 1—11.
- 11 邓晋福, 鄂莫岚, 路凤香. 中国东北地区上地幔组成、结构及热状态. *岩石矿物学杂志*, 1987, 6(1): 1—9.
- 12 马杏垣, 刘昌铨, 刘国栋. 江苏响水至内蒙古满都拉地学断面. *地质学报*, 1991, 65(3): 199—215.
- 13 Kern H, Schenk V. A model of velocity structure beneath Calabria, Southern Italy, based on laboratory data. *EPSL*, 1988, 87: 325—337.
- 14 曹林, 金巍. 内蒙古大青山一带太古宙花岗岩质岩石特征及地壳演化. *长春地质学院学报* (早前寒武纪花岗岩专辑), 1992, 52—69.
- 15 滕吉文等. 华北平原邢台地震活动地区的上地幔结构和地幔低速层. *地球物理学报*, 1982, 25(1): 58—64.
- 16 宋仲和等. 北京—萨哈林剖面的地幔纵向速度结构. *地球物理学报*, 1981, 24(3): 310—317.
- 17 Christensen N I, Fountain D M. Constitution of the lower continental crust based on experimental studies of seismic velocity in granulite. *GSA Bull.* 1975, 86: 227—236.
- 18 陈国英, 宋仲和, 安昌强等. 华北地区三维地壳上地幔结构. *地球物理学报*, 1991, 34(2): 172—181.
- 19 顾群, 孙洁, 史书林等. 华北、西北一些地区地壳和上地幔内高导层. *地震地质*, 1980, 2(2): 21—30.
- 20 Birch F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars. part 2 *JGR*, 1961, 66(7): 2199—2224.

Crust-Mantle Petrological Structure and Evolution of the North China Continent

Wu Zongxu

(Institute of Geology, State Seismological Bureau, Beijing 100029)

Deng Jinfu, Zhao Hailing, Yang Zhuen*, Luo Shulan

(China University of Geosciences, Beijing 100083)

Key words: continental crust and upper mantle; petrological structure; continent evolution

Abstract

This paper presents the concept of petrological structure in the study of crust-mantle structure. The crust-mantle petrological structure of three regions (Hebei plain, Taihang-Wutai and Eerdnosi) of the North China continent is suggested based on the petrological and geobarometric data of the Precambrian metamorphic rock series, the Mesozoic and Cenozoic magmatic activity, and the upper mantle xenoliths in the Cenozoic basalts, in combination with the geophysical data and the experimental measurements of V_p values for the rock samples at high temperature and pressure. It is emphasized that, with the combinative constraints of V_p , V_s , σ and petrological structure, one can effectively recognize the difference in composition of the sialic crust among the different regions, and distinguish the upper mantle low-velocity layer from mineral phase transition (spinel or garnet phase). This paper has reached the conclusion that the crust-mantle petrological structure and its evolution are closely related not only to the Archeozoic-Early Proterozoic tectonic-magmatic events, but also to Phanerozoic tectonic-magmatic events and the extent of the reformation, and that the crust-mantle petrological structure is the important record and evidence for tracing the nature and evolution of the continent tectonics.

* Institute of Geology, State Seismological Bureau