

华北北部地区地壳上地幔构造及其与 新生代构造活动的关系

刘 国 栋

刘 昌 铨

(国家地震局地质研究所,北京) (国家地震局地球物理勘探大队,郑州)

摘 要

本文根据近些年来在华北北部地区进行的大量深部探测工作,研究了地壳上地幔的速度结构、电性结构、热结构,以及地壳、莫霍界面和上地幔高导层构造,表明本区新生代以来的构造活动与地壳上地幔的动力学过程密切相关。认为,由于软流圈的强烈不均匀活动引起了莫霍界面的巨大变化,导致基性岩浆大量溢出、地壳增温、下地壳出现蠕变、上地壳侧向扩张、浅部张性断裂大量发育,其倾角随深度变缓,地表下沉接受沉积。

在河北平原、渤海、下辽河平原及其周围山区,曾做过详细的地面地质、石油钻探和石油地震勘探等工作,自 1976 年以来又进行了大量的人工地震测深、大地电磁测深、大地热流测量、地震转换波测深,以及重、磁资料分析,对地壳上地幔构造进行研究。本文试图在上述资料基础上探讨本区的新生代构造活动及其与地壳上地幔构造的关系。

一、新生代构造活动的基本特征

华北平原在晚白垩纪至古新世时期是一个广泛的隆起地带,自始新世开始发生了强烈的构造运动,形成了一系列北北东向拗陷和隆起。如下辽河、渤中、黄骅、济阳和冀中等拗陷,老第三纪沉积厚达 4,000—6,000 米,而沧县和埕宁等隆起则完全出露地表。周围山区整体抬升,太行山区的老第三纪北台期夷平面目前的海拔高度达 3,000 米。在新第三纪时期本区整体下沉,在上述的隆起上堆积了数十至数百米的沉积,但在拗陷区仍保持着相对快速下沉的趋势,堆积了 2,000—4,000 米的沉积。此时,山区继续抬升,新第三纪的唐县夷平面目前海拔高达 100 米,并在西北山区出现了怀来—延庆断陷,它与山西高原的汾渭断陷统一组成了北北东向的汾渭地堑系。进入第四纪以来平原区继续下沉,但在早期的拗陷内第四纪堆积仍较厚,一般为 500—800 米,而在隆起上堆积则较薄,一般为 300—500 米,仍保持着早期的北北东构造格局。河北平原第四纪时期的一个重要特点是沉积有从南向北加厚的趋势,同时在燕山山前的第三纪隆起区出现了一个近北西西向的第四纪拗陷区,最大沉积厚度达 600—800 米,表明河北平原有向北推进的趋势(图 1)。

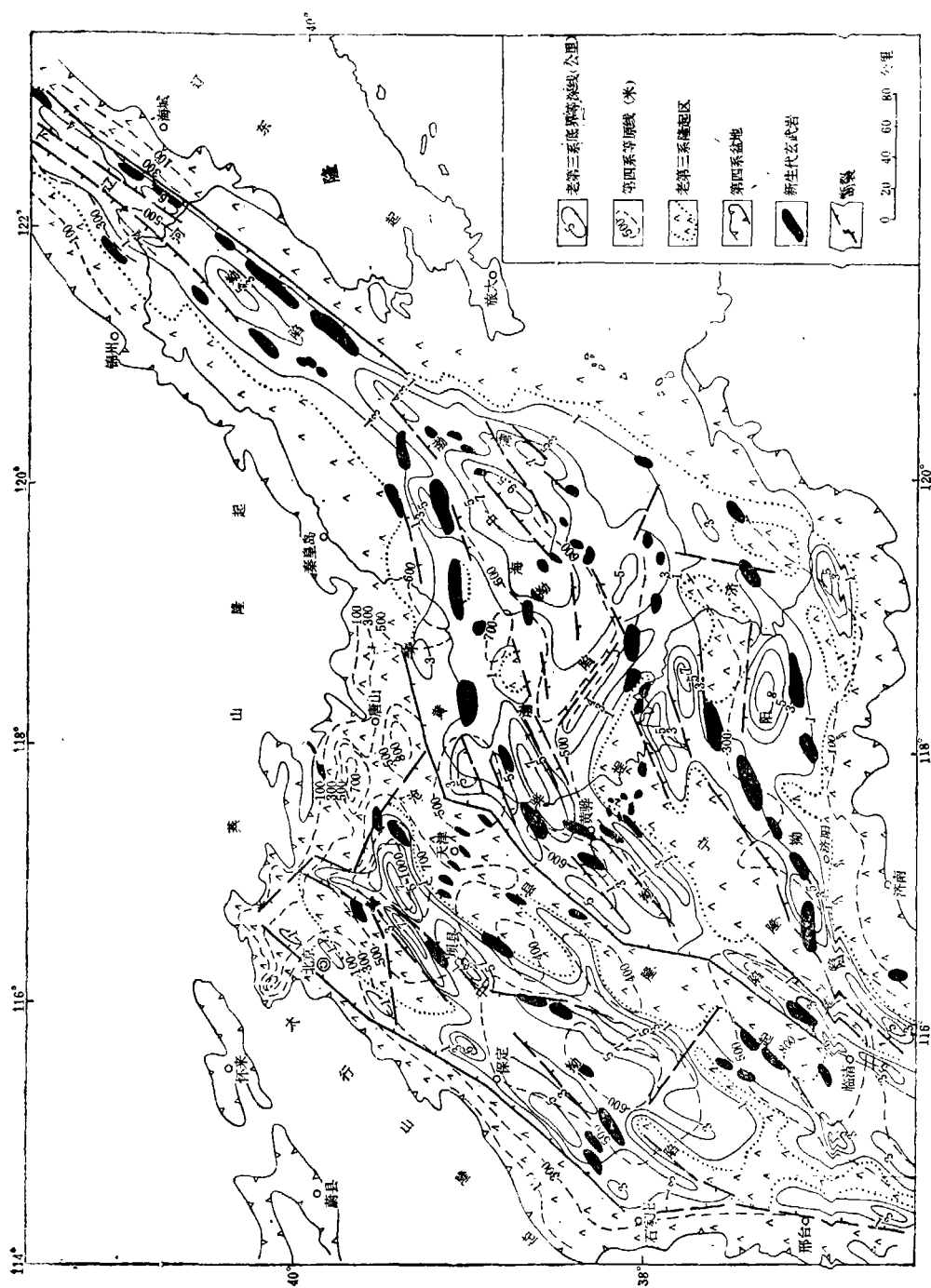


图 1 华北北部地区新生代构造和玄武岩分布图

始新世以来平原区(包括渤海)在强烈下沉中一直保持着明显的差异运动:例如在渤海内部新生代的最大沉积厚度大于 10,000 米,冀中拗陷大于 8,000 米,下辽河拗陷大于 7,000 米,而在沧县隆起上新世沉积厚度一般不超过 1,000 米,在埕宁隆起上有的钻孔到几百米深处就钻到了古老变质岩系。如果从老第三纪北台期夷平面算起,平原与山区之间的新生代基底的最大落差可达 13,000 米以上。老第三纪的沉降速率约 0.16 毫米/年,新第三纪的沉降速率为 0.2 毫米/年,第四纪的沉降速率为 0.3 毫米/年。根据现代的水准测量及对强烈而频繁的地震活动分析,本区的构造活动仍在进行,如下辽河拗陷埋深 34 米的海浸层 C^{14} 年龄为 9,650 年。1937—1980 年的水准复测表明拗陷下沉了 160 毫米,沉降速率为 3.4—4.0 毫米/年¹⁾。

本区新生代拗陷内部发育有大量的北北东—北东向和某些北西西—北西向正断层,把拗陷切成了一系列小的块体(图 1)。新生代沉积与断层的关系表现为边断边沉的特点,拗陷内部的断层多呈阶梯状向拗陷中部断落,且断层倾角随深度加大而变缓。根据详细的石油地震勘探剖面图经过计算表明,伴随正断层所产生的新生代时期的侧向扩张量,在平原区达 140—170 米/公里¹⁾。

图 1 中的平原内新生代玄武岩分布,是根据钻孔和磁测资料解释结果编制的。大量的基性火山活动主要发生在老第三纪,多分布在拗陷内部,据钻孔资料,有的地区火山岩多达 40 多层,累计厚度可达 800—1,000 米以上,下辽河有一钻孔钻入玄武岩 1,100 多米尚未打穿²⁾。根据对新生代玄武岩的地球化学研究,老第三纪玄武岩属拉斑玄武岩,形成温度 1,050—1,200°C,形成压力 15 千巴,相当于 50 多公里深度;新第三纪玄武岩多分布在平原内隆起和拗陷的交接部位及平原周边山区,碱性和非碱性共存,非碱性部分属大陆拉斑玄武岩,形成温度同上,形成压力 ≥ 15 —20 千巴,相当于 70—80 公里;第四纪玄武岩主要零星分布在周围山区,为碱性和强碱性,形成温度同上,形成压力 ≥ 20 —30 千巴,相当于 100 公里左右深度。这些玄武岩浆源于上地幔软流圈³⁾。

二、地壳上地幔的速度、电性和热结构

根据人工地震测深资料,考虑速度随深度变化 $V = V(z)$ 的水平分层介质的地壳结构模式,应用理论地震图和射线追踪方法^[2,3],对柏各庄—丰南—丰宁地震测深剖面进行了详细解释,获得了从炮点桩号 0 到 112.05 公里段的地壳上地幔速度结构(图 2),由于改进了解释方法,它不同于早期给出的速度结构剖面图^[1]。

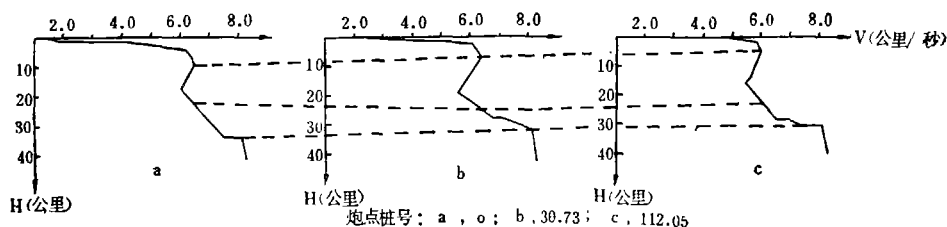


图 2 柏各庄—丰南—丰宁剖面的地壳上地幔速度结构

- 1) 赵文峰, 东北大陆全新世应力场与地震断层, 1981 年。
- 2) 顾志明, 辽河裂谷的断块运动和油气聚集, 1981 年。
- 3) 从柏林、张儒媛, 华北断块区新生代玄武岩及其形成的大地构造环境, 1981 年。

从图 2 可见: (1)地壳表层, 层速度 1.6—4.0 公里/秒, 厚 1—2 公里, 在平原内应大于 6 公里, 为中、新生代地层; (2)上层地壳, 层速度一般为 4.7—6.2 公里/秒, 厚 5—10 公里, 平原区速度值大, 山区速度值小, 本层下部为一明显的高速层; (3)中层地壳是一组低速层, 厚 13—17 公里, 速度最低值为 5.4 公里/秒, 埋深 16—20 公里; (4)下层地壳是一组速度随深度明显增加的速度梯度层, 层速度 6.0—7.6 公里/秒, 厚 6—10 公里。下层地壳的厚度在上地幔隆起区薄于拗陷区; (5)莫霍面下为一速度梯度过渡层, 速度 8.1—8.3 公里/秒。

根据大地电磁测深资料, 采用张量阻抗分析方法和对纵向视电阻率曲线做自动拟合反演, 获得本区地壳上地幔电性分层 (图 3)。图 3 与图 2 的剖面位置大致相同, 在其它大地电磁测深剖面上也获得了同样的电性分层^[1], 现综述如下:

(1) 地壳表层, 电阻率几至十几欧姆·米, 为新生代地层, 山区缺失; (2)上层高阻层, 电阻率 10^2 — 10^3 欧姆·米, 厚 10—20 公里左右, 平原区薄、电阻率低, 山区厚、电阻率高; (3)壳内高导层, 电阻率几—十几欧姆·米, 厚度数公里, 其埋深大致处于壳内低速层的最小速度值出现的深度; (4)下层地壳—上地幔最上部高阻层, 电阻率 10^4 — 10^5 欧姆·米, 厚度变化很大, 平原薄、山区厚; (5)上地幔高导层, 电阻率 1—几欧姆·米, 其埋深由平原向山区加大。

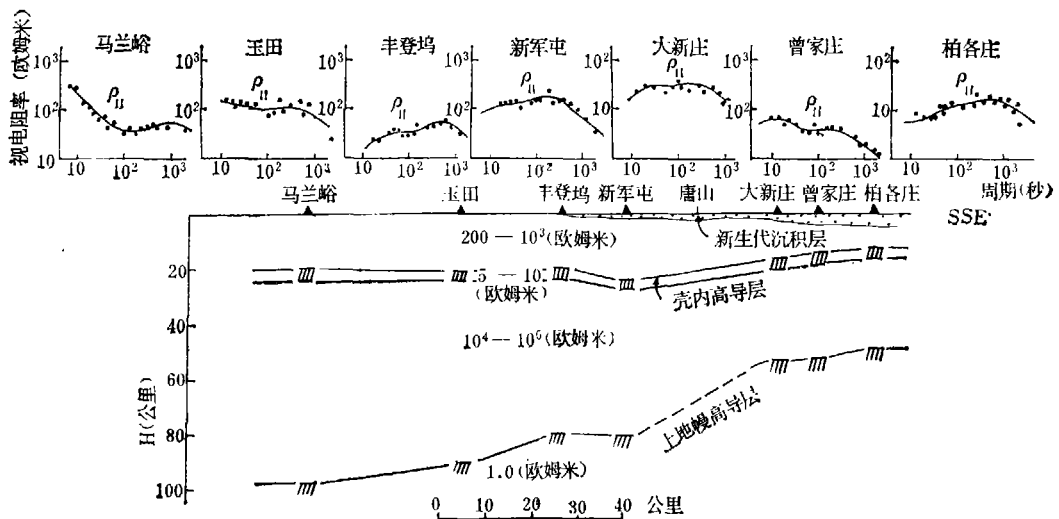


图 3 马兰峪—柏各庄大地电磁测深的地壳上地幔电性分层

(ρ_{H} ——纵向视电阻率曲线)

地壳上地幔的速度结构和电性分层有很好的对应关系: (1) 地壳表层为低速—高导层; (2)上层地壳的速度、电阻率以及厚度值均变化较大, 说明它们遭受了强烈的构造变动; 平原区速度值偏大可能与新生代大量玄武岩活动有关, 而其电阻率值偏低可能与裂隙发育有自由水渗入有关; (3) 低速的中层地壳虽然整体厚度大于壳内高导层, 但最小速度值的深度与壳内高导层埋深相当, 表明它们之间有共同的成因机制。有趣的是本区的地震震源几乎都位于这个深度之上; (4) 速度梯度层的下地壳以及上地幔最上部在电性上表现为高阻层。

根据目前在本区获得的近 40 个大地热流值^{[4,5]1)}, 表明平原区 (包括渤海, 下同) 大地热流

1) 张汝惠等, 唐山及邻区的地热条件与地震的关系, 1981 年。

值在 $1.22-2.53$ 微卡/厘米²·秒(下同)范围内变动, 平均值为 1.95 ; 周围山区从 $0.65-1.40$, 平均值 0.95 , 但怀来—延庆新生代断陷较高些, 平均值 1.45 ; 平原与山区的过渡地带从 $1.10-1.90$, 平均值 1.50 . 可见: 稳定抬升的山区平均大地热流值接近世界上一些古老地台区的平均值, 但其中的新生代断陷较高些; 平原区的平均大地热流值则于近代活动区的平均大地热流值相当; 但在平原区内部沿北北东向的下辽河—渤中—黄骅拗陷又是大地热流的相对高值地带, 平均值为 2.10 ; 目前在平原内的隆起地区尚未获得较多的大地热流值, 但沧县隆起(天津局部热异常区除外)的地温梯度为 $2.0^{\circ}\text{C}/\text{百米}$, 明显地低于平原内拗陷区 $3.10^{\circ}\text{C}/\text{百米}-3.80^{\circ}\text{C}/\text{百米}$ 的地温梯度值。

根据人工地震测深和部分重力资料反演所获得的地壳构造剖面图, 以及上述的平均大地热流值数据, 用二维有限元法沿四条剖面计算了本区地壳上地幔的温度-深度分布。这里仅列出一条从西部山区穿过河北平原和渤海湾到庙岛列岛的地壳上地幔温度-深度剖面图(图4)。

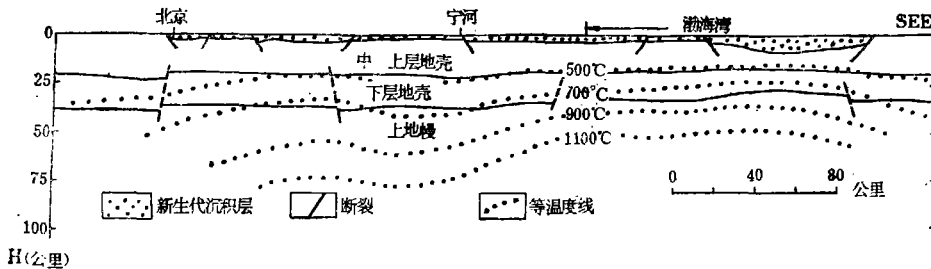


图4 西部山区—庙岛温度—深度剖面

从图4可见 500°C 等温面在渤海内部埋深约 16 公里, 在沧县隆起约 22 公里, 在冀中拗陷约 $18-20$ 公里, 但在西部山区约为 35 公里。这与根据航空磁测资料所计算的居里等温面(大约 500°C)深度基本一致(表1)。但在山区偏离较大, 这可能与居里点温度随深度加大而降低有关^[6]。可见本区的温度分布与新生代以来的构造活动性有密切关系: 强烈拗陷区和火山活动区为高温区, 稳定隆起区为低温区, 表明了近代构造活动与热活动的一致性。

表1 华北北部地区居里等温面深度

地 区	渤海	沧县隆起	冀中拗陷	山区
居里面深度(公里)	14—16	20—24	16—20	24—26

三、地壳上地幔构造及其与新生代构造活动的关系

根据9条人工地震测深剖面的解释结果, 编制了本区莫霍面构造图(图5)。

本区莫霍面的主导构造方向为北北东向, 与新生代以来的构造方向一致。在平原区有两个莫霍面隆起和一个拗陷。平原西部的莫霍面隆起与新生代的冀中拗陷对应, 地壳平均厚度约 33 公里, 最薄处在香河—文安一线约 30 公里。这个莫霍面隆起似乎经过北京平原继续沿北北东方向往北部山区延展, 平原东部的莫霍面隆起与新生代的黄骅拗陷对应, 在这里地壳厚度为 $30-33$ 公里, 但这个隆起的范围由于缺乏渤海地区人工地震测深资料尚未圈定出来。根

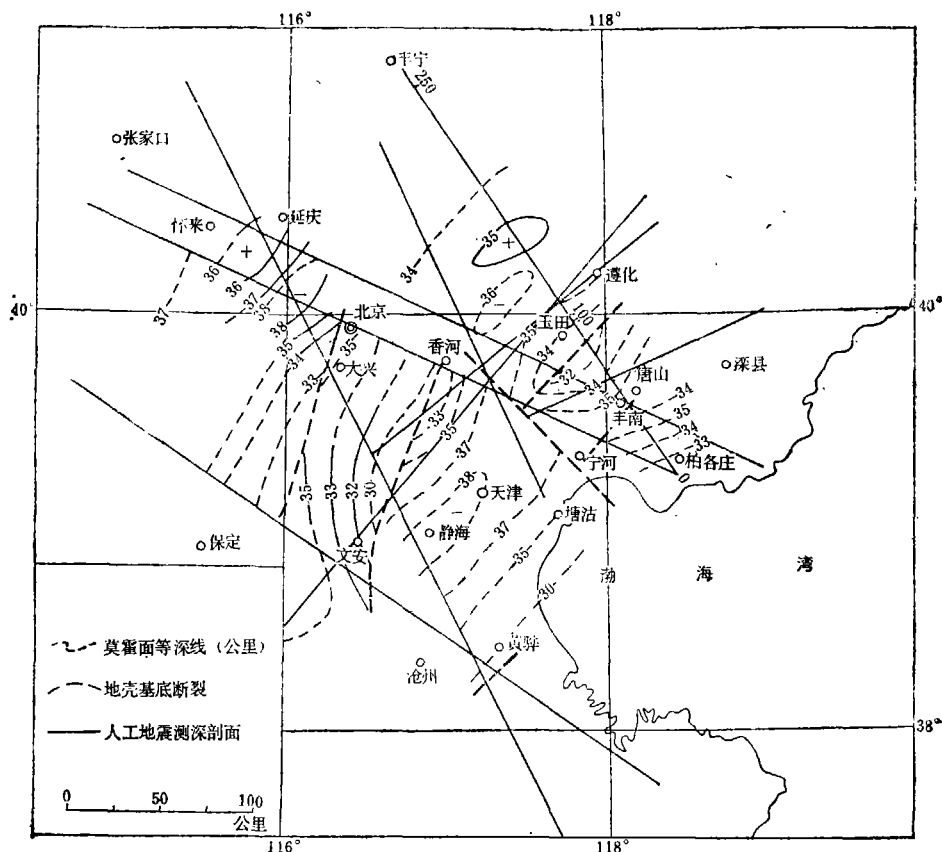


图 5 华北北部地区莫霍面构造图

据渤海北岸北戴河地区的天然地震转换波工作结果,地壳厚 28 公里^[7];根据下辽河平原人工地震测深的初步结果,地壳厚 30.8 公里^[9];根据重力资料反演,渤海地区的地壳厚度为 29—30 公里^[8]。因而沿下辽河—渤中—黄骅的北北东向新生代拗陷区是一个统一的莫霍面隆起带,估计其地壳平均厚度约 30—31 公里,地壳最薄处不大于 28 公里。平原中部的莫霍面拗陷与新生代的沧县隆起对应,其地壳最大厚度为 38 公里,地壳平均厚度约 36—37 公里。平原区莫霍面的最大幅差可达 10 公里。平原区“两隆一拗”的莫霍面构造格局恰与新生代“两拗一隆”的构造格局对应,它们之间呈反向关系。

从平原向西部山区莫霍面逐渐加深到 38 公里,但在怀来—延庆新生代断陷下莫霍面又抬升到 36 公里。在平原与北部山区之间,从唐山到三河北西西一带莫霍面构造比较复杂:玉田以东有一个似椭圆形的局部的莫霍面隆起,顶点埋深仅 32 公里;三河以东有一个莫霍面局部拗陷,深 36 公里。这里的地壳厚度相对较薄,莫霍面构造格局与平原区的“两隆一拗”和西部山区逐渐加深的格局有明显的不同,此外,在保持着北北东—北东向的延伸趋势中隐伏着近北西西向的构造影响。前已述之,这一北西西带是第三纪隆起区,第四纪开始下沉,发育有几个

1) 辽宁省地震队,东北地区地壳深部探测工作成果简介,1981 年。

小型的第四纪沉积拗陷,认为是左旋剪切活动的结果^[9]。

图 5 中划出了切过莫霍界面的地壳基底断裂。除香河-宁河断裂为北西向外,其余均为北北东-北东向,初步判断为正断层。香河-宁河断裂向两端的延伸情况尚不清楚,但显然它构成了河北平原第三系沉积范围的北界。平原内部规模较大的三条北北东向地壳基底断裂,基本上都位于新生代拗陷的内部,而不像通常设想的那样位于拗陷和隆起的边缘,所以它们与浅层的大断裂如太行山前断裂和沧东断裂不是上下沟通的。根据详细的石油地震勘探结果,太行山前和沧东断裂其倾角均小于 45° ,并随深度而变缓,最后可能以很低的角度消失在壳内低速层之内。从图 5 可见,沿地壳基底断裂的一侧是地壳厚度明显减薄的地带,它们又具有正断层性质,因而我们认为本区的地壳基底断裂是在上地幔上隆过程中形成的,是从深部发展起来的。浅层断裂是在上地幔上隆、上层地壳侧向引张过程中形成的,是由浅部发展起来的。它们是一个起因、两套系统。

根据人工地震测深结果对壳内各速度层厚度变化的研究表明,本区地壳厚度的变化还明显的与下层地壳厚度变化有关,即地壳减薄区下层地壳变薄,地壳加厚区下层地壳变厚,同时

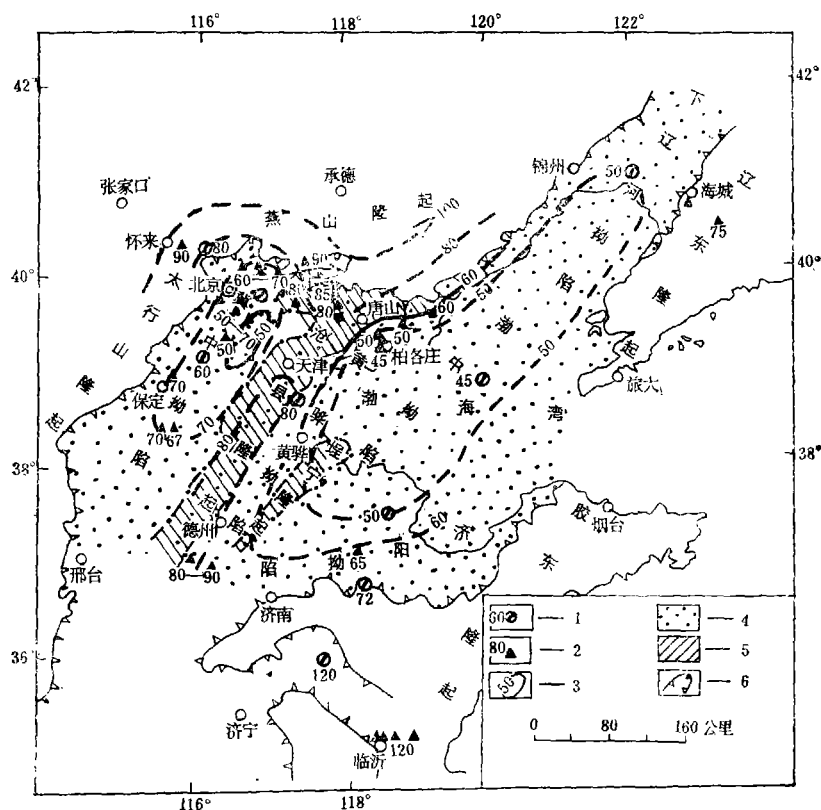


图 6 华北北部地区上地幔高层(软流圈)埋深图

1——根据平均大地热流值计算的上地幔高层埋深(公里); 2——根据大地电磁测深资料计算的上地幔高层埋深(公里); 3——上地幔高层等深线(公里); 4——第四系分布范围; 5——老第三纪隆起; 6——平原山区边界。

随着下层地壳厚度的加大, 其层速度成线性增加¹⁾。这可能与本区下层地壳温度较高, 在上地幔上隆过程中下层地壳向两侧蠕变有关。下层地壳蠕变也导致了在上地幔隆起区下层地壳变薄、层速度减低, 在上地幔拗陷区下层地壳加厚、受挤、层速度增加。

根据在本区完成的 30 多个测点的大地电磁测深资料并结合大地热流观测结果, 编制了本区上地幔高导层深度图 (图 6)。

平原区下的软流圈普遍偏浅, 约 50—80 公里, 并有两个隆起带, 即以渤海为中心的沿下辽河—渤中—黄骅 (包括济阳) 新生代拗陷区展布的北北东向隆起带, 埋深 50 公里; 另一是沿冀中新生代拗陷展布的规模较小的北北东向隆起带, 埋深 50—70 公里。软流圈隆起与新生代拗陷对应。向山区内部软流圈迅速加深, 估计可能大于 100—120 公里。平原区的软流圈隆起有明显的向北部山区外侵的趋势, 例如在北京和唐山附近的上地幔高导层隆起等深线明显的向山区方向伸展。这可能是导致这一地带的地壳厚度相对减薄和第四纪显著下沉的原因之一。平原与北部山区之间的北西西向构造带 (图 1) 恰好位于软流圈隆起宽度发生显著变化的地带, 北窄、南宽 (图 6)。由于软流圈上隆可以引起上覆地壳的侧向运动, 故推测沿北西西带, 其两侧的上覆地壳会发生左旋相对滑动。这可能使该带自新生代以来出现了左旋剪切以及现代地震活动较频繁而强烈。

上述表明, 软流圈的不均匀活动是本区新生代以来构造活动的主要起因。由于晚白垩纪

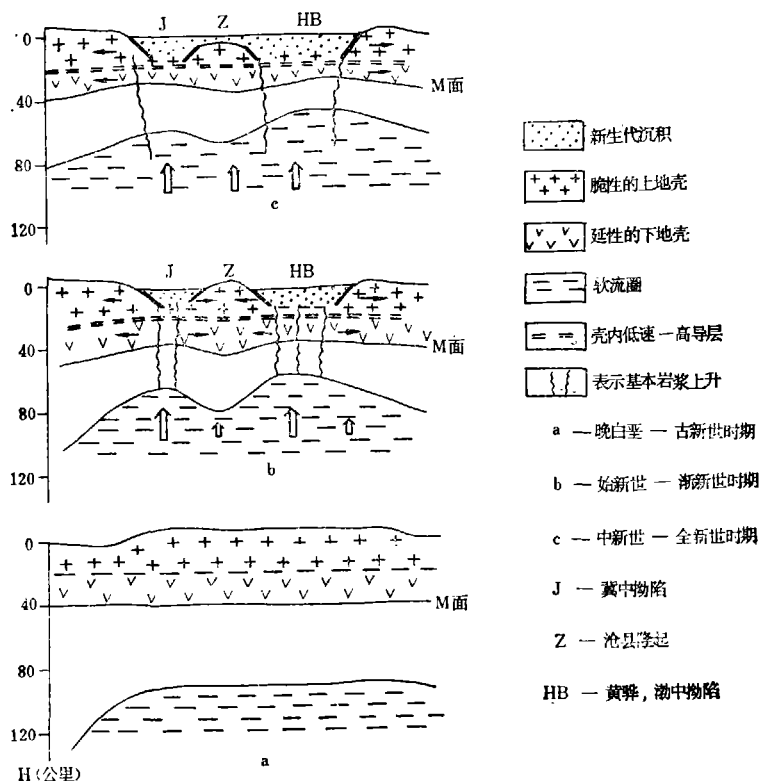


图 7 华北裂谷产生和演化示意图

1) 曾融生等, 北京地区地壳构造的初步研究, 1979 年。

时期,库拉-太平洋洋脊向北北西迁移并逐渐倾没于亚洲大陆的东部边缘之下^[10],华北平原下的上地幔变热,密度降低.为了补偿这种过程,地表上隆,形成高地.在地形荷载以及高温低密度软流圈上拱的作用下,自始新世开始沿北北东向的地表隆起地带,在其上部脆性地壳处发生裂谷.沿着目前的下辽河—渤中—黄骅(包括济阳)和冀中拗陷地区出现了两个北北东的软流圈强烈上拱地带,上覆地幔裂开,基性岩浆大量溢出,岩石圈继续加热,下地壳侧向蠕变,地壳厚度减薄,上部脆性地壳侧向滑动地表下沉接受沉积,产生一系列倾角随深度变缓的张性断层,将上部脆性地壳分割成很多块体,华北平原形成了盆-岭系构造.进入晚第三纪以来,由于印度板块与亚洲板块的碰撞,喜马拉雅山崛起,沿阿尔金—祁连山一带发生大规模的左旋滑动^[11],华北地区的岩石圈处于引张作用之下,在早期的构造背景下整个平原下的软流圈大面积上隆,平原整体下沉,晚第三系和第四系沉积覆盖了整个平原(图7).由于平原下的软流圈上隆宽度沿平原和北部山区之间的北西西地带有显著变化,以及软流圈隆起有向北部山区外侵的趋势,因此沿这条北西西带出现左旋剪切,以及进入第四纪以来平原区的构造活动有向北加强的情况.

在软流圈上隆早期,由于其部分熔融和分异程度较高,因而早第三纪以拉斑玄武岩喷发为主,随着大量易熔组分的溢出岩浆源逐渐转入更深的层位,因而晚第三纪和第四纪以碱性和强碱性的玄武岩喷发为主,且活动程度逐渐减弱,活动范围由平原向外围扩展.

本区壳内存在的低速高导层,顶界埋深15—20公里左右,厚数公里,最低速度值5.4公里/秒,电阻率值几—十几欧姆·米,该层的温度大致在500℃多些.我们知道在这种温压条件下,含有极少量自由水的花岗岩类物质就可以出现部分熔融而变软.它为上部脆性地壳的侧向滑动提供了低摩擦界面.

本文所列的大量深部探测结果是国家地震局地球物理勘探大队和地质研究所三室全体同志的多年劳动成果.王明魁、杨健、李杆东、张汝惠、孙洁、郝书俭、洪汉净等很多人参加了本文的计算工作,所以本文是一篇集体成果.在成文过程中张文佑教授和马杏元教授给予了指导,从柏林给予了帮助,一并表示谢意.

参 考 文 献

- [1] 刘国栋、魏顺民、刘昌铨,地震地质背景(1976年唐山地震),1982,地震出版社.
- [2] Červeny, V., *J. Geophys.*, **46**(1979), 135.
- [3] Fuchs, K. & Müller, G., *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **23** (1971), 417.
- [4] 中国科学院地质研究所地热组,地热研究论文集,科学出版社,1978.
- [5] 解政文、吴乾蕃、张汝惠、谢奕真,地震地质, **2**(1980), 3: 57—63.
- [6] Багин, В. И., Бродская, С. Ю., Петров, Т. Н., Печерский, Д. М., *Физика Земли*, **5**(1971), 57.
- [7] 邵学钟、张家茹、章思亚、李振江,地震地质, **4**(1982), 1: 1—10.
- [8] 刘元龙、王谦身、赵建华,地球物理学报, **21**(1978), 1: 9—17.
- [9] 郑炳华、魏顺民、徐好民,地震地质, **3**(1981), 2: 31—40.
- [10] Uyeda, S. & Miyashiro, A., *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **85** (1974), 1159.
- [11] Molnar, P. & Tapponnier, P., *Science*, **189**(1975), 419.