

华北地区新生代岩石圈伸展减薄机制的数值模拟

刘 翠^{1,2} 邓晋福^{1,2} 张贵宾^{1,2}
肖庆辉^{1,2} 李廷栋³ 赵国春^{1,2} 邱瑞照⁴ 周 肃^{1,2}

(1.中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083;
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.中国地质科学院地质研究所,北京 100037;4.中国地质调查局发展研究中心,北京 100037)

摘要:新生代时期华北东部裂谷的伸展减薄机制及其周边的构造应力场,西部鄂尔多斯克拉通的抬升和周边断陷盆地的形成机制是目前研究的热点问题,但是较少有人从数值模拟的角度进行探讨。笔者采用有限元程序 FEVPLIB 对该地区 5 个剖面进行了模拟,初步取得如下认识:①在太平洋俯冲带的附近岩石圈伸展减薄较强,这与剖面经过的冲绳海槽正在拉开是吻合的,而太平洋的俯冲对较远的华北盆地的伸展减薄的影响较弱;②火山喷发时期,华北盆地有大的软流圈物质上涌造成华北裂谷的伸展减薄,符合纯剪切的机制,现今华北地区已趋于均衡,动力正趋于稳态;③六盘山逆冲在鄂尔多斯块体之上,代表着青藏高原东北缘的挤压,对华北是一个大的推挤力,可诱发鄂尔多斯块体的隆升,而鄂尔多斯向东北方向移动时提供了周边盆地的拉张的背景;④华北地区岩石圈的伸展减薄是六盘山处的挤压和东部太平洋板块俯冲两者联合的影响。模拟的结果与研究区 GPS、重力异常以及岩石圈三维结构是吻合的。

关键词:华北地区;伸展减薄;岩石圈;动力学;数值模拟

中图分类号:P542 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3765(2006)04-0885-11

1 前 言

华北研究区位于北纬 32°~42°,东经 106°~125°,包括东部的华北平原及其周边的山岭,和西部的鄂尔多斯克拉通及其周边的断陷盆地(图 1)。华北岩石圈区段研究程度较高,积累了丰富的探测资料^[1-7]。

关于华北东部岩石圈新生代以来发生的大规模的减薄作用的动力学背景,以及华北地区周边的构造应力场一直是中外学者关注的前沿问题。鄂尔多斯及其周边地区(银川盆地、渭河盆地等)的形成机制,与青藏高原的动力学关系,与深部物质作用的关系也是目前关注的问题。

华北外部的边界条件为西部的青藏高原、东部的太平洋板块(或菲律宾板块)、北部的西伯利亚板块,南面以秦岭—大别与华南和扬子相隔,同时还要考虑深部条件。从中国大陆的

角度看,印度洋板块、太平洋板块的运动构成了作用于该区域的外部边界条件,成为中国大陆区域的构造运动的成因,华北块体边界上的构造运动就是其结果之一^[8-10]。这些边界产生了直接或间接的影响,这引起了地质研究者的热烈讨论。一种观点认为太平洋板块的俯冲是造成现今华北应力场的主因^[11]; Northrup^[12]认为沿欧亚板块东缘拉张的某些时空特征表明,印度—欧亚板块碰撞并不是造成扩张的唯一原因。沿欧亚板块东缘的扩张与太平洋板块和欧亚板块之间的会聚减弱具有很好的时间相关性。该时间相关性表明太平洋—欧亚板块运动的变化与沿欧亚东缘的扩张有关。会聚减慢与扩张之间的动力联系表明会聚是远离板块边缘的外力影响至某种程度的结果。可能的远源影响力包括地幔对流与上覆板块之间的耦合变化,或全球板块漂移中某板块边界发生的明显重新组合,但对太平洋—欧亚板块会聚是远源影响力的具体原因和机制尚

收稿日期:2006-07-15;改回日期:2006-07-26

基金项目:国土资源部重点科技专项计划项目(20001010202)、国家自然科学基金重点基金项目(40234048);国家自然科学基金项目(40572048)和科技部 IGCP 国际合作项目(2001cb711002)联合资助。

作者简介:刘翠,女,1973 生,博士,讲师,岩石学专业,目前主要从事岩石学和大陆动力学的数值模拟研究工作;E-mail: liucui@cugb.edu.cn。

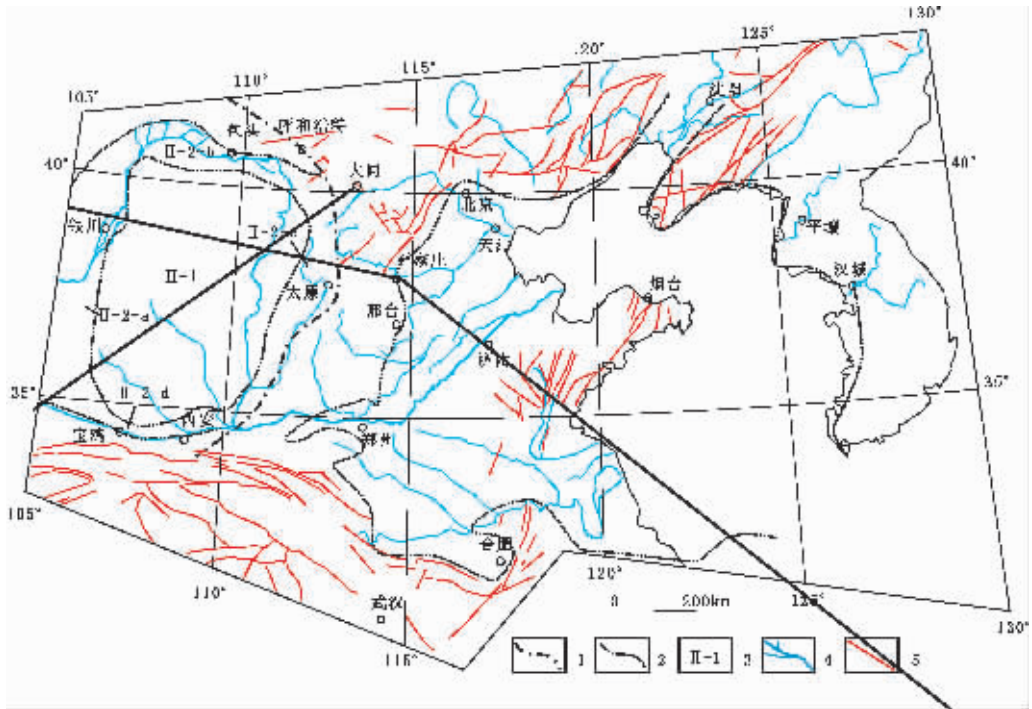


图1 华北地区主要构造单元及模拟的剖面位置示意图

1—一级构造分区边界;2—二级构造分区边界;3—构造分区编码;4—河流;5—断裂

I—华北环形裂谷盆地及其周边的山岭(Range)带;II—鄂尔多斯克拉通块体及周边狭长形断陷盆地带;II-1—鄂尔多斯克拉通块体;II-2—周边狭长形断陷盆地带;II-2-a—银川断陷盆地;II-2-b—河套断陷盆地;II-2-c—山西断陷盆地;II-2-d—渭河断陷盆地

Fig.1 Schematic map showing the main tectonic units and location of the modeling section in the North China region (dark lines)

1—First-order tectonic area; 2—Second-order tectonic area; 3—Number of tectonic area; 4—River; 5—Fault. I—North China circular rift basin and its surrounding range zone; II—Ordos cratonic block and its surrounding elongated down-faulted basin zone; II-1—Ordos cratonic block; II-2—Surrounding elongated down-faulted basin zone; II-2-a—Yinchuan down-faulted basin; II-2-b—Hetao down-faulted basin; II-2-c—Shanxi down-faulted basin; II-2-d—Weihe River down-faulted basin

不易做出判断。古近纪—新近纪太平洋—欧亚板块运动的变化在时间上确实与欧亚东部板块边界活动密切相关。更多的学者认为是印度板块对欧亚板块的作用是造成华北应力格局的主因^[13-15];最新的观点认为印度板块的推挤导致软流圈物质的流动,并在华北地区引起上涌^[16-18]。例如邓晋福等^①认为由于印度板块的俯冲、青藏高原的挤压隆升,从而在中国大陆下面存在软流圈物质的向东流动。由于太平洋板块的俯冲阻挡,在华北处形成软流圈物质的上涌,从而造成了鄂尔多斯及其周边盆地和华北盆地的构造地貌。刘勉^[19]认为印度—亚洲大陆碰撞对中南亚大陆的地壳变形有重要影响。并利用数值模拟结合地球物理资料提出中国东部下部存在一个低粘滞度的软流圈物质的通道,与西部的印度—亚洲板块碰撞有关,并且诱发了软流圈物质的上涌和底侵。还有认为地幔柱是主因^[9]。

该区的研究很丰富,但是在动力学数值模拟等方面,大部分都是基于对地震的关注,着眼于地壳等浅部的应力分

布、变化以及地壳水平运动、形变等问题^[8,20-21]。较少从地质的角度研究构造形成的机制、演化、作用过程,深层对浅部形态、应力分布等的控制。

有限元软件包 FEVPLIB 是一个可以用于模拟各种地质构造的多功能程序库,能够实现粘弹塑性数值模拟,模拟的应力为非静岩应力^[2]。笔者采用 FEVPLIB 程序,基于上地壳、下地壳、岩石圈上地幔和软流圈具有不同的流变性的粘弹模型,模拟研究华北地区新生代伸展—减薄的动力学背景,以探讨新生代以来的地质、地貌、岩石圈三维结构图像的形成机制和演化问题。

2 模型的建立

笔者共对 5 个剖面进行了模拟,分别为石家庄—济南—黄海—琉球群岛模型、鹤壁—蒙阴—青岛—黄海模型(北纬 36°)、火山喷发时期鹤壁—蒙阴—青岛—黄海模型(即现今北

① 邓晋福,魏文博,等.华北地区岩石圈三维结构(研究报告),2003.

纬 36°)、六盘山—大同的模型、青铜峡—石家庄的剖面模型(图 1)。其中模型二和模型三为同一剖面的两个不同时期。

2.1 石家庄—济南—黄海—琉球群岛模型(模型一)

2.1.1 模型参数

长度为西起太行山山前——琉球群岛前,模型如图 2,位置及分区见表 1。

由于地球结构在纵向和横向上均存在着显著的非均匀性,不但在不同深度上波速不同,而且在同一深度上的不同区域内波速也有差异,纵向分层的地质模型为纵向上根据实际的地球物理和地质资料分为若干层,分别对应上地壳、中地壳、下地壳;不同层内的物性参数互不相同,同时,根据地震(包括人工地震和天然地震)波速的特点,高速区对应地球内部冷的、更具刚性的物质区,低速区对应炽热的或部分熔融的软物质区^[9]。结合剖面上的三维图像的特点,在横向上分区,主要体现在物性参数的差异上,尤其是密度,根据 Airy 重力均衡补偿理论,依据经验公式: $\rho=0.77+0.32V_p$ (吴庆举提供),因此,对于同一水平层位的高速区,用相对于低速区具有较高密度来表示(下文同)。模型一的物性见表 2。

2.1.2 模型建立依据

(1)位置及边界

张东宁等^[24]认为:模型东部主要的边界为西太平洋板块及菲律宾海板块俯冲带。从中国大陆构造应力场辐射状的整体格局看,中国大陆构造应力场的主压应力方向在东部明显地向东偏转,在东北部近乎垂直于太平洋板块向欧亚大陆的俯冲带。因此,太平洋板块对欧亚板块东部的作用是不能忽略的。

根据现今的 GPS 的观测结果^[9-10],华北的位移是近东向的,而在日本岛则反过来是近西向的,所以选择琉球群岛的位置作为其边界之一。对于华北盆地来说,其周围的主要构造单元有太行山、燕山、太平洋俯冲等,这在地质、地球物理上均已得到明确反映的。因此选择与太平洋板块俯冲带近垂直的剖面,西起石家庄即太行山前至琉球群岛,即可以在同一模型中囊括两大构造单元对华北地区的作用。

(2)模型分层

模型中地壳的精细结构主要是参考华北岩石圈三维结构报告里提供的数据来选取的。

地幔部分主要依据邓晋福等^[9]提供的数据,海上部分参考了其他人的数据,如朱介寿提出东亚及西太平洋边缘海岩石圈厚度变化范围为 50~200 km,西太平洋边缘海及华北、华南、东海陆架地区其厚度为 50~80 km,东亚大陆中部过渡带厚度为 80~100 km。

(3)模型物性参数的选取

表 2 中地壳部分的泊松比是根据需要将刘昌铨计算的参数^[29]相应部分按层取平均值得到的。其他部分及其他参数取经验值(下文同)。

2.2 鹤壁—蒙阴—青岛—黄海模型(模型二)

2.2.1 模型参数

长度为 1 000 km,深度 400 km;模型分层见图 3。

该剖面主要是为考察深部条件对华北裂谷伸展减薄的影响,并且该剖面有 P 波速度结构图,便于建立深部结构模型。位置及分区见图 1 和表 3,分层物性见表 4。

2.2.2 依据

物性参数的选取依据与模型一的相同。地壳及上地幔深部结构依据华北岩石圈三维结构研究报告^[9]。

2.3 古近纪:鹤壁—蒙阴—青岛—黄海模型(根据北纬 36°,模型三)

2.3.1 模型参数

长度假设为 800 km,深度 400 km;模型见图 4;位置及分区见图 1 和表 5;分层物性见表 6。

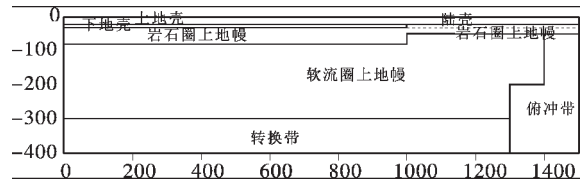


图 2 模型一分层示意图

Fig.2 Diagram of model layering

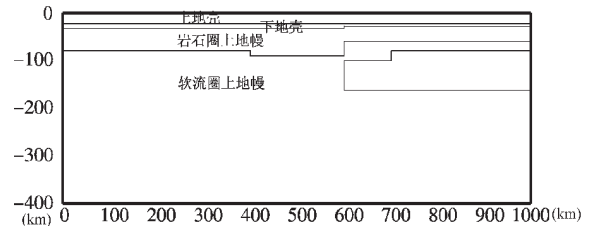


图 3 模型二分层示意图

Fig.3 Diagram of model layering

表 1 模型一分区参数

Table 1 Parameters of layering of model No.1

深度区间/km	陆上部分岩石圈结构	海上部分岩石圈结构
位置	0~1000	1000~1500
上地壳	0~22	0~22
下地壳	22~32	
上地幔	32~80	22~50
软流圈	80~300	50~300
转换带	300~400	300~400

① 邓晋福,魏文博,等.华北地区岩石圈三维结构(研究报告),2003.

表 2 模型一分层物性参数

Table 2 Physical parameter of model layering

杨氏模量(Pa)	泊松比	粘滞度(Pa·s)	密度差(kg/m ³)	粘弹性	粘塑体的拉伸量	幂指数
0.9×10 ¹¹	0.255	0	0.000	0	0	1.000
0.9×10 ¹¹	0.260	0	0.000	0	0	1.000
0.9×10 ¹¹	0.267	0	0.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²⁴	530.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²⁴	0.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²⁴	-500.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	500.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	0.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	500.000	0	0	1.000
0.28×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	0.000	0	0	1.000
0.28×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	0.000	0	0	1.000

表 3 模型二分区参数

Table 3 Physical parameter of model layering

深度区间/km	陆上岩石圈结构		黄海岩石圈结构
位置	0~400	400~600	600~1000
上地壳	0~22	0~22	0~22
下地壳	22~32	22~32	22~28
上地幔	32~80	32~90	28~60
软流圈	80~300	90~300	60~300
转换带	300~400	300~400	300~400

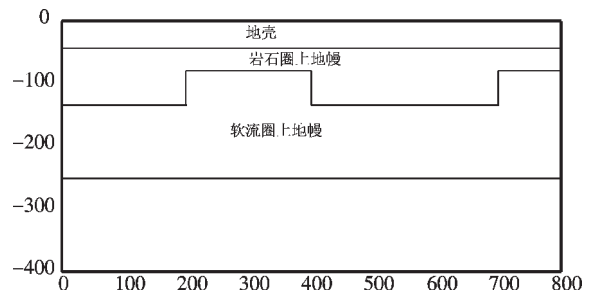


图 4 模型三分层示意图

Fig.4 Diagram of model layering

表 4 模型二分层物性参数

Table 4 Physical parameter of model layering

杨氏模量(Pa)	泊松比	粘滞度(Pa·s)	密度差(kg/m ³)	粘弹性	粘塑体的拉伸量	幂指数
0.9×10 ¹¹	0.260	0	0.000	0	0	1.000
0.9×10 ¹¹	0.270	0.1×10 ²⁴	0.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²⁴	500.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²⁴	0.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	-500.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	0.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	500.000	0	0	1.000
0.28×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	0.000	0	0	1.000

表 5 模型三分区

Table 5 Model zoning

深度区间/km	岩石圈结构			
位置	0~200	200~400	400~700	700~800
地壳	0~44			
上地幔	44~134	44~80	44~134	44~80
软流圈	134~250	80~250	134~250	80~250
转换带	250~400			

2.3.2 依据

(1)物性参数的选取依据与模型一相同。

(2)地壳和地幔结构引用邓晋福^[17-18]依据华北盆地新生代的玄武岩反演的地壳厚度和地幔厚度。由于无法知道新生代初期的精细的层圈结构以及横向上的分区,所以在模型中假设了一个统一的陆壳和地幔。根据现今的华北裂谷的地表和深部特征^①,即鹤壁与蒙阴之间其深部对应相对的低速区,假设了在蒙阴以西约 200 km 的地方其下部有一个热的软流圈物质上涌到 80 km。而黄海目前仍在下沉,所以假设在黄海区域有 100 km 范围的热物质上涌到 80 km。因笔者只是定性的讨论,所以该假设是否合理对结论影响不大。

2.4 六盘山一大同的模型(模型四)

该模型的目的是主要是考察西部的六盘山(或者青藏高原)对华北地区的影响。

2.4.1 模型参数

长度 800 km,深度 400 km;模型见图 5;位置见图 1 和表 7;分层物性见表 8。

2.4.2 依据

物性参数的选取依据与模型一同。地壳结构依据华北岩石圈三维结构报告中西安—包头 DSS 剖面以及北纬 35°地震速度来选取^①。

表 6 模型三分层物性参数

Table 4 Physical parameter of model layering

杨氏模量(Pa)	泊松比	粘滞度(Pa·s)	密度差(kg/m ³)	粘弹性	粘塑体的拉伸量	幂指数
0.9×10 ¹¹	0.260	0	0.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²⁴	0.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	-500.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	0.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	-500.000	0	0	1.000
0.280×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	0.000	0	0	1.000

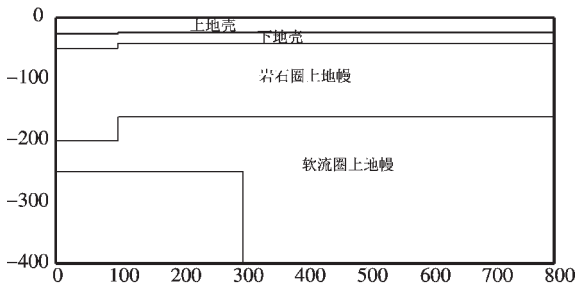


图 5 模型四分层示意图

Fig.5 Diagram of model layering

表 7 模型四分区

Table 7 Model zoning

深度区间/km	岩石圈结构		
位置	0~100	100~300	300~800
上地壳	0~26		0~24
下地壳	26~50		24~42
上地幔	50~200		42~160
软流圈	200~250	160~250	160~400
转换带	250~400	250~400	无

表 8 模型四分层物性参数

Table 8 Physical parameter of model layering

杨氏模量(Pa)	泊松比	粘滞度(Pa·s)	密度差(kg/m ³)	粘弹性	粘塑体的拉伸量	幂指数
0.9×10 ¹¹	0.255	0	0.000	0	0	1.000
0.9×10 ¹¹	0.255	0	100.000	0	0	1.000
0.9×10 ¹¹	0.267	0	0.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²⁴	230.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	0.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²⁴	-300.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	0.000	0	0	1.000
0.280×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	0.000	0	0	1.000
0.175×10 ¹²	0.270	0.1×10 ²²	-300.000	0	0	1.000

①邓晋福,魏文博等.华北地区岩石圈三维结构(研究报告),2003.

地幔等深部结构主要是依据北纬 34°和 36°剖面 P 波速度结构以及华北地区 160 km、240 km 深度的 S 波的速度结构来选取的^①。

2.5 青铜峡—石家庄的剖面模型(模型五)

该模型主要是考察西部的青藏高原对华北地区的影响,尤其是鄂尔多斯周边盆地如银川盆地、山西地堑形成机制。

2.5.1 模型参数

长度 800 km,深度 400 km;模型见图 6;位置及分区见图 1 和表 9;分层物性见表 10。

2.5.2 依据

(1)物性参数依据与模型一同。

(2)地壳结构主要是依据郑州—靖边、西安—包头两条 DSS 剖面来约束的。地幔等深部结构主要是依据北纬 38°的 P 波剖面来设计的^①。

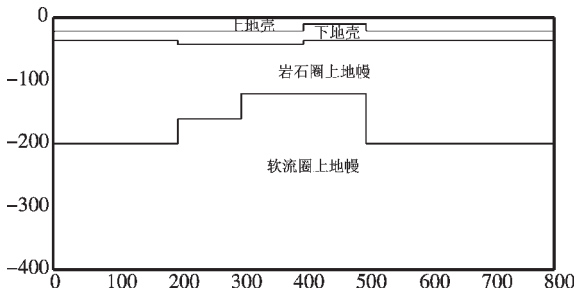


图 6 模型五分层示意图

Fig.6 Diagram of model layering

3 模拟结果

模拟的时间步长均为 1 000 a,共计算了 30 Ma 时间段的位移及应力的变化。

3.1 石家庄—济南—黄海—琉球群岛模型

该模型的选择主要是研究东部的太平洋俯冲、西部的太行山对华北东部的裂谷区有何影响(图 7)

太平洋板块的俯冲对华北地区产生了一定的影响,在其附近产生较强拉张力,拖着俯冲带附近的岩石圈下冲,引

起弧后的局部拉张。但是其明显影响的范围为 200~300 km (图 7),因此,单纯的太平洋俯冲可能不会引起距其较远的华北裂谷盆地的大伸展。而在太平洋的俯冲带附近,拉张最为强烈(图 7),1 200~1 500 km 处所对应的地区,恰好为冲绳海槽的位置,表明冲绳海槽为年轻的边缘海,正在拉开^②。由此可以推测古近纪时日本海^③和南海的拉开与太平洋的俯冲有密切的联系。模拟表明华北地区存在向东的位移,符合现今的 GPS 的观测图像^④。华北地区现今基本无大的垂直方向的运动,这与现今华北地区重力异常接近均衡这一事实是相符的。

3.2 鹤壁—蒙阴—青岛—黄海模型(根据北纬 36°)

该模型是研究华北西边界太行山以及东部的辽宁—朝鲜半岛,结合深部的岩石圈三维结构图像对华北现今的构造边界和应力格局的影响。模拟表明华北地区现今的应力格局如图 8 所示。

400~1 000 km 所对应的地区地表有明显的伸展和下沉,600~800 km 所对应的地区伸展最强烈,700~1 000 km 所对应的地区下沉最强烈(图 8)。恰为黄海所对应的位置,因此,黄海地区还在伸展和下沉,这与地质事实相吻合^⑤。从图 8 还可以看出现今的华北地区除了黄海以外,基本上无大的垂直方向的运动,符合重力异常接近于 0 的事实。但是现今的华北地区的岩石圈三维结构已经不再具有软流圈热物质的上涌了(图 7~8)。

3.3 古近纪鹤壁—蒙阴—青岛—黄海模型(根据北纬 36°)

假设该模型的目的是检验软流圈物质上涌对华北东部的影响,结果表明软流圈物质的上涌可以引起华北裂谷区的拉伸、减薄(图 9)。华北下面热物质的上涌可能是引起华北大规模拉伸减薄的主要驱动力,并且模拟的图像与现今的 GPS 观测结果、深部的速度结构是一致的,结合模型一和二的图像(图 7~8)说明,这样一个图像(图 9)是软流圈上涌的结果。

3.4 六盘山—大同的模型

该模型的目的是为了看青藏高原对鄂尔多斯地台的影响。在靠近青藏高原的六盘山地区引起一种环形应力场(图 10),并在鄂尔多斯下面诱发一个上升流,使之隆升,使六盘山逆冲在鄂尔多斯之上;同时会在地台周边局部产生断陷盆地。在大同地区是拉开的。这与许才军^⑥提出的大同—太原是

表 9 模型五分区

Table 9 Model zoning

深度区间/km	岩石圈结构				
位置	0~200	200~300	300~400	400~500	500~800
上地壳	0~20	0~20	0~20	0~18	0~20
下地壳	20~36	24~42	24~42	18~36	20~36
上地幔	36~200	42~160	42~120	36~120	36~200
软流圈	200~400	160~400	120~400	120~400	200~400

① 邓晋福,魏文博等.华北地区岩石圈三维结构(研究报告),2003.

表 10 模型五分层物性参数

Table 10 Physical parameter of model layering

杨氏模量(Pa)	泊松比	粘滞度(Pa · s)	密度差(kg/m ³)	粘弹性	粘塑体的拉伸量	幂指数
0.9×10^{11}	0.260	0	0.000	0	0	1.000
0.9×10^{11}	0.270	0.1×10^{24}	-100.000	0	0	1.000
0.9×10^{11}	0.270	0.1×10^{24}	0.000	0	0	1.000
0.175×10^{12}	0.270	0.1×10^{24}	0.000	0	0	1.000
0.9×10^{11}	0.270	0.1×10^{24}	-200.000	0	0	1.000
0.175×10^{12}	0.270	0.1×10^{22}	-200.000	0	0	1.000
0.175×10^{12}	0.270	0.1×10^{22}	0.000	0	0	1.000

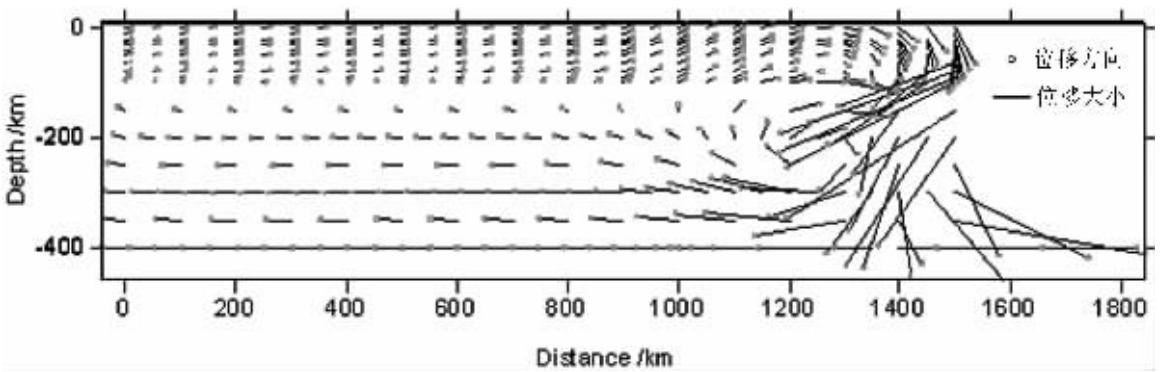


图 7 石家庄—琉球群岛剖面的模拟结果(水平及垂直方向均为自由边界)

Fig.7 Results of simulation of the Shijiazhuang-Ryukyu Islands section

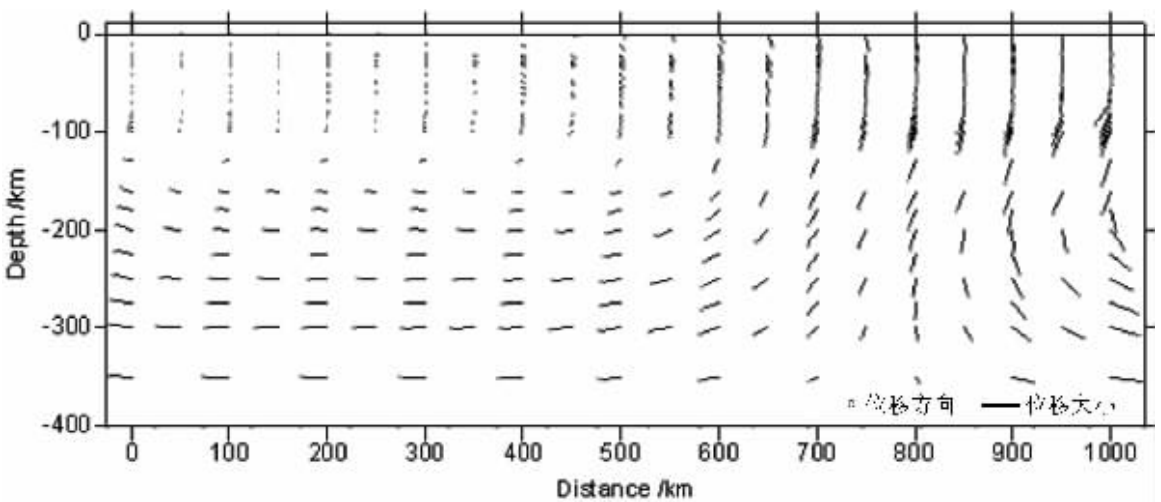


图 8 鹤壁—蒙阴—青岛—黄海模型模拟结果

(水平方向固定,垂直方向自由)

Fig.8 Results of simulation of the Hebi-Mengyin-Qingdao-Yellow Sea model

Horizontal (length, km): fixed; vertical (depth, km): free

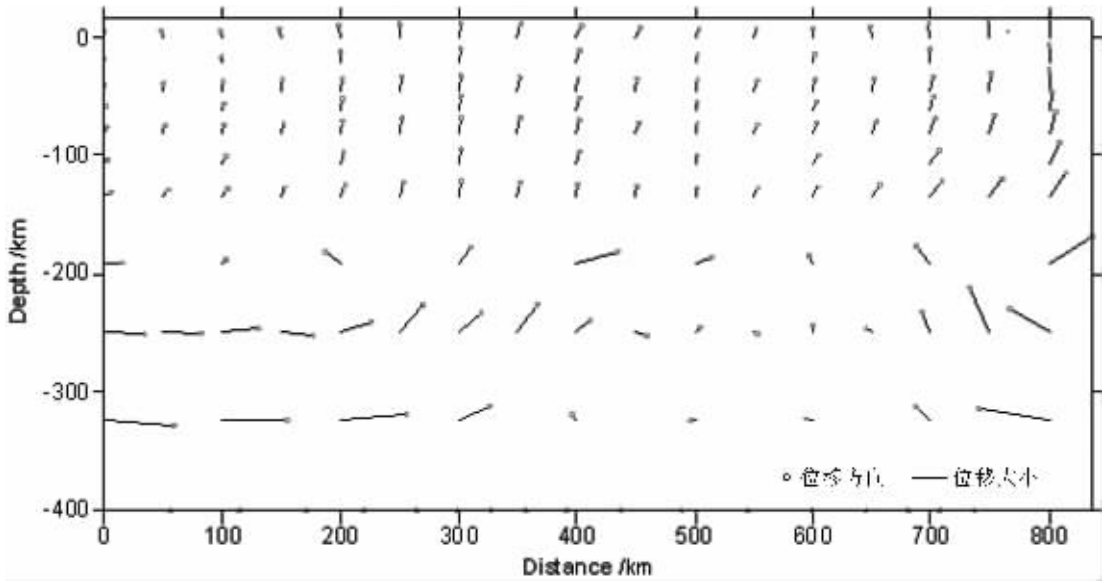


图 9 古近纪鹤壁—蒙阴—青岛—黄海模型的模拟结果(水平方向固定,垂直方向自由)
 Fig.9 Results of simulation of the Paleogene Hebi-Mengyin-Qingdao-Yellow Sea model

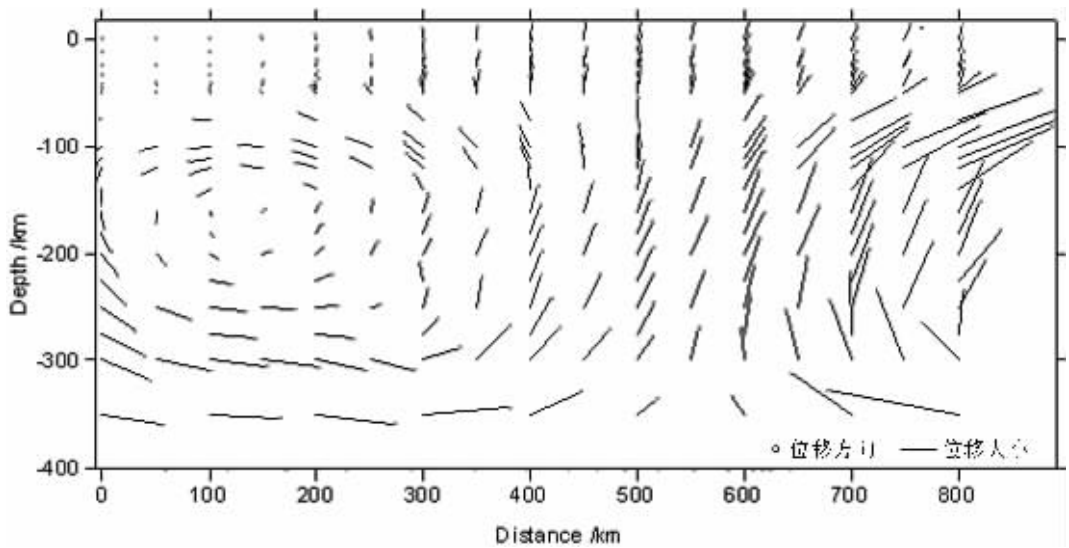


图 10 六盘山—大同的模型的模拟结果(水平方向固定,垂直方向自由)
 Fig.10 Results of simulation of the Liupan Mountain-Datong model

一拉张活动边界,呈略带右旋的拉张运动的结论相一致。并且从图上可以看出,大同地区下部为 50~150 km 深度的拉张最为强烈。

3.5 青铜峡—石家庄的剖面模型

该模型的目的是为了研究鄂尔多斯块体与周边断陷盆地的形成。青藏高原的挤压引起一个物质向东的流动,对鄂尔多斯向东的流动提供了动力源。同时软流圈物质的上涌引起鄂尔

多斯地台的隆升,隆升的同时拉开周边的断陷盆地(图 11)。

4 结论及讨论

如前文所述,华北地区的区域构造运动及其动力机制受到了广泛的关注,其中又以对印度板块的挤压,东面太平洋板块的俯冲,和深部软流圈物质的上涌关注最多,争议最大。

对比西部(图 10~11)与东部(图 7~8),可以明显看出,西

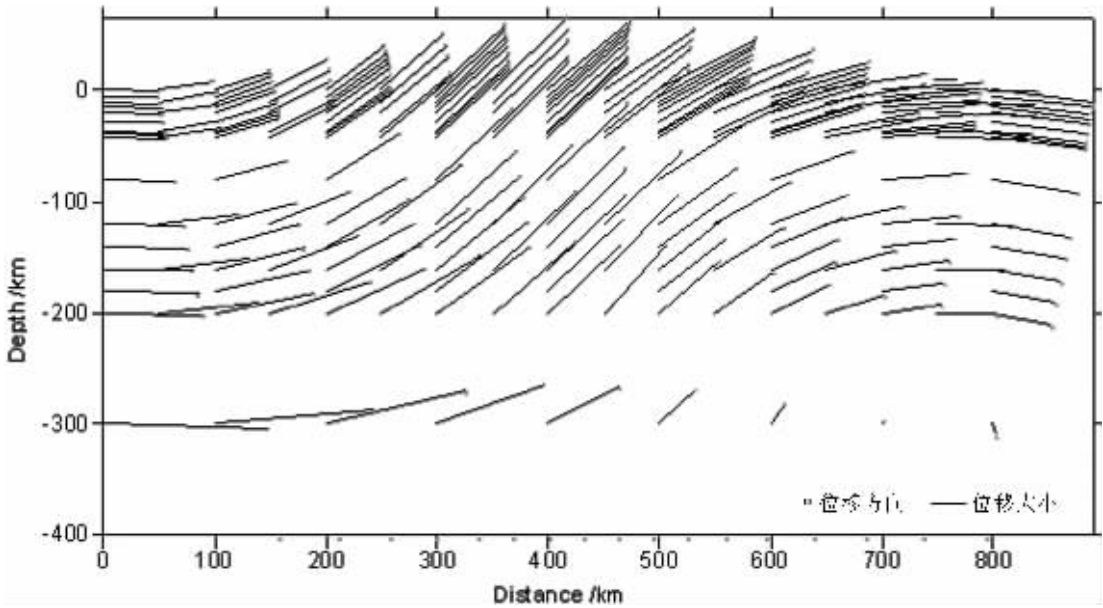


图 11 青铜峡—石家庄的剖面模型的模拟结果(水平和垂直方向均自由)

Fig.11 Results of simulation of the Qingtongxia-Shijiazhuang model

部的位移和应力大的多,如果西部和东部叠加在一起,可以看出青藏高原的推挤影响要远大于东部的俯冲阻挡影响(除俯冲带附近),因此,青藏高原的挤压是华北现今构造应力场的主因,或者说印度板块对欧亚板块的俯冲挤压对华北地区的应力场产生至关重要的影响,是现今华北应力格局的主要动力源,这也得到了其他研究者的认同^[9,10,27]。太平洋板块(菲律宾板块)的俯冲对新生代华北地区的演化起到比较重要的作用,但仅在俯冲带附近产生较大的影响。深部软流圈物质的上涌也被越来越多的人认同和事实证明^[8,16-18]。本文通过数值模拟表明,软流圈物质的上涌可以引起华北地区的大规模伸展、减薄(图 9)。

基于现今的岩石圈三维结构的数值模拟,认为太平洋板块的俯冲在其附近产生较强拉张力,拖着俯冲带附近的岩石圈下冲,引起弧后的局部伸展。但是其明显影响的范围只有 200~300 km(图 7),因此,单纯的太平洋俯冲可能不会引起距其较远的华北裂谷盆地的大的伸展。而太平洋的俯冲带附近拉张最为强烈的地区,恰好为冲绳海槽的位置,这与冲绳海槽为一正在拉开年轻的边缘海的事实相吻合。由此可以推测古近纪时日本海^[23]和南海的拉开亦与太平洋的俯冲有密切的联系,这一点也可从 GPS 的观测研究中得到证实^[27]。模拟表明华北地区存在向东的位移,符合现今的 GPS 的观测图像^[9]。

青藏高原在六盘山附近对鄂尔多斯块体施加了一个北

东向的挤压,这在地质地貌上、GPS 图像、构造应力场以及岩石圈三维结构上都有很好的反映^[8,9,17]。青藏高原的挤压是鄂尔多斯现今应力场表现的直接诱因,在六盘山地区的挤压构造带地表隆起,深部存在冷的高速体^①。不仅仅是表层的地壳部分,最深的影响应该在岩石圈下部或者软流圈,深部的物质运移比表层的位移大的多。而其周边的断陷盆地可能跟青藏高原的挤压引起的物质的东向流动和鄂尔多斯的抬升有关。

本文的数值模拟说明在华北岩石圈三维结构及其演化课题中提出的华北地区岩石圈—软流圈系统的动力学模型是合理的^[18]。软流圈通道及其物质沿通道的水平流动为青藏高原岩石圈巨大加厚作用,和中国东部岩石圈巨大减薄作用,提供了它们之间成生联系的最关键的动力学背景。

参考文献(References):

- [1] 国家地震局. 地学断面. 湖北随州至内蒙古喀喇沁旗地学断面说明书[M]. 北京:地震出版社,1992b.57.
GGTMC, CSB. Explanation of GGT from Suizhou of Hubei Province to Kalaxinqi of Inner Mongolia[M]. Beijing:Seismological Press. 1992b. 57(in Chinese).
- [2] 国家地震局. 地学断面. 江苏响水至内蒙古满都拉地学断面说明书[M]. 北京:地震出版社. 1991.68.

①邓晋福,魏文博等.华北地区岩石圈三维结构(研究报告),2003.

- GGTMC, CSB (GGT Mapping Committee, China Seismological Bureau). Explanation of GGT from Xiangshui of Jiangsu Province to Mandala of Inner Mongolia [M]. Beijing: Seismological Press, 1991.68 (in Chinese).
- [3] 国家地震局. 地质断面. 内蒙古东乌珠穆沁旗至辽宁东沟地质断面说明书[M]. 北京:地震出版社, 1992c.59.
- GGTMC, CSB. Explanation of GGT from Dongwuzhumoxinqi of Inner Mongolia to Donggou of Liaoning Province [M]. Beijing: Seismological Press. 1992c. 59 (in Chinese).
- [4] 国家地震局. 地质断面. 上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗地质断面说明书[M]. 北京:地震出版社, 1992a.66.
- GGTMC, CSB, Explanation of GGT from Fengxian of Shanghai to Alashanzuoqi of Inner Mongolia [M]. Beijing: Seismological Press. 1992a.66(in Chinese).
- [5] 刘福田, 曲克信, 吴华, 等. 中国大陆及其邻近地区的地震层析成像[J].地球物理学报,1989, 32(3):281~291.
- Liu Futian, Qu Kexin, Wu Hua, et al.Seismic tomography of the Chinese continent and adjacent region [J].Acta Geophysica Sinica, 1989, 32(3):281~291(in Chinese with English abstract).
- [6] 宋仲和, 陈国英, 安昌强, 等. 中国东部及其相邻海域 S 波三维速度结构[J].地球物理学报, 1992,35(3):316~330.
- Song Zhonghe, Chen Guoying, An Changqiang, et al. The 3-D shear wave velocity structure beneath eastern China and its adjacent Seas[J]. Acta Geophysica Sinica, 1992, 35 (3):316~330(in Chinese with English abstract).
- [7] 朱介寿, 曹家敏, 李显贵, 等. 中国及其邻区地球三维结构初始模型的建立[J].地球物理学报, 1997,40(5):627~648.
- Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Li Xiangui, et al. The Reconstruction of preliminary three-dimensional Earth's model and its implications in China and adjacent regions [J]. Acta Geophysica Sinica, 1997,40(5): 627~648(in Chinese with English abstract).
- [8] 陈连旺, 陆远忠, 张杰, 等. 华北地区三维构造应力场 [J]. 地震学报, 1999,21(2):140~149.
- Chen Lianwang, Lu Yuanzhong, Zhang jie, et al. Three-dimensional tectonic stress field in North China [J]. Acta Seismologica Sinica,1999, 21(2):140~149(in Chinese).
- [9] 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[J]. 科学通报, 2001. 46(13):1118~1120.
- Ma Zongjin, Chen Xinlian, Ye Shuhua, et al., Study on the GPS of the recent crustal movement in the Chinese continent [J]. Chinese Sci. Bull., 2001,46(13),1118~1120(in Chinese).
- [10] 马宗晋, 杜品仁, 洪汉净编. 地球构造与动力学[M]. 广东科技出版社, 2003.564.
- Ma Zongjin, Du Pinren, Hong Hanjing, Structure and Dynamics of the Earth [M]. Guangdong Science and Technology Press, 2003.564 (in Chinese with English abstract).
- [11] 马寅生, 崔盛芹, 赵越, 等. 华北北部中生代构造体制的转换过程[J]. 地质力学学报, 2002,8(1):15~25.
- Ma Yinsheng, Cui Shengqin, Zhao Yue, et al. Transformation Process of Mesozoic Cenozoic tectonic regime in the north of North China [J]. Journal of Geomechanics, 2002,8 (1):15~25 (in Chinese with English abstract).
- [12] Northrup C J, Royden L H, Burchfiel B C. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its Potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia [J]. Geology, 1995,23 (8):719~722.
- [13] 吴云, 帅平, 周硕愚, 等. 用 GPS 观测结果对中国大陆及邻区现今地壳运动和形变的初步探讨[J].地震学报, 1999,21(5):545~553.
- Wu yun, Shuai Ping, Zhou Shuoyu, et al. Tentative approach on crust movement and deformation in China continent and adjacent region using observed GPS result [J]. Acta Seismologica Sinica , 1999,21(5):545~553(in Chinese).
- [14] 杨国华, 王敏, 韩月萍, 等. 山西断裂带活动趋势与动态特征[J]. 中国地震, 2002,18(2):148~156.
- Yang Guohua, Wang Min, Han Yueping, et al. the Movement of trend and dynamic character in Shanxi fault zone [J]. Earthquake Research in China, 2002, 18(2):148~156(in Chinese with English abstract).
- [15] 周硕愚, 张跃刚, 丁国瑜, 等. 依据 GPS 数据建立中国大陆板内块体运动模型的初步研究[J].地震学报, 1998,20(4):347~355.
- Zhou Shuoyu, Zhang Yuegang, Ding Guoyu, et al. Tentative study on building present blocks motion inner China continent plate model according to GPS data [J]. Acta Seismologica Sinica,1998,20 (4):347~355 (in Chinese).
- [16] Liu M, Cui X, Liu F-T, Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: a mantle dynamic link to the Indo-Asian collision? [J]. Tectonophysics, 2004,393:29~42.
- [17] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造 [M]. 北京:地质出版社, 1996.1~110.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, et al. Continental roots - plume tectonics of China - Key to the continental dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 1~110 (in Chinese with English abstract).
- [18] 邓晋福, 肖庆辉, 邱瑞照, 等. 华北地区新生代岩石圈伸展减薄的机制与过程[J]. 中国地质, 2006,33(4):751~761.
- Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, et al. Lithospheric extension of North China in Cenozoic: mechanism and processes[J]. Geology in China, 2006,33 (4):751~761 (in Chinese with English abstract).
- [19] 刘光夏, 赵文俊, 李志雄, 等. 渤海第三纪裂谷扩张的地球物理分析[J].西北地震学报, 1996,18(3):18~24.
- Liu Guangxia, Zhao Wenjun, Li Zhixiong, et al. Geophysical analysis on the Tertiary rift valley expanding of Bohai Sea [J]. Northwestern Seismological Journal, 1996, 18(3):18~24(in Chinese with English abstract).
- [20] 傅容珊, 黄建华, 常筱华, 等. 东亚大陆形变应力场格局演化的数值模拟[J].地壳形变与地震, 2000,20(3):1~10.
- Fu Rongshan, Huang Jianhua, Chang Xiaohua, et al. Numerical simulation of the evolution of the deformation and stress patterns in the East Asia continent [J]. Crustal Deformation and Earthquake,

- 2000,20(3):1~10(in Chinese with English abstract).
- [21] 张东宁, 许忠淮. 中国大陆岩石层动力学数值模型的边界条件[J].地震学报, 1999,21(2):133~139.
Zhang Dongning, Xu Zhonghui. The bounds factors of China continent rock stratum dynamics numerical model [J]. Acta Seismologica Sinica, 1999,21(2):133~139(in Chinese).
- [22] Zhang G-B, Bott M H P, Modelling the evolution of asymmetrical basins bounded by high-angle reverse fault with application to foreland basins[J]. Tectonophysics, 2000,322(3-4):203~218.
- [23] 刘昌铨, 刘明军, 嘉世旭. 利用华北北部深部地球物理资料数值模拟地壳应力场[J]. 地震学报, 1998,20(3):240~249.
Liu Changquan, Liu Mingjun, Jia Shixu. The Numerical Simulation of crust stress field according to the geophysical data of deep section in the north of North China [J]. Acta Seismologica Sinica, 1998,20(3):240~249 (in Chinese).
- [24] Shinjo R. Geochemistry of high Mg andesites and the tectonic evolution of the Okinawa Trough-Ryukyu arc system [J]. Che. Geol.,1999, 157:69~88
- [25] Tatsumi Y. Mechanism of backarc opening in the Japan Sea : role of asthenosphere injection [J]. Tectonophysics,1991,187(1-3):299~306.
- [26] 许才军, 董立祥, 施闯, 等. 华北地区 GPS 地壳应变能密度变化率场及其构造运动分析[J].地球物理学报, 2002,45(4):497~506.
Xu Caijun, Dong Lixiang, Shi Chuang, et al. A study on annual accumulation of strain energy density significance by using GPS measurements in North China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002,45(4):497~506(in Chinese with English abstract).
- [27] 王小亚, 朱文耀, 符养, 等. GPS 监测的中国及其周边现时地壳形变[J].地球物理学报, 2002,45(2):198~209.
Wang Xiaoya, Zhu Wenyao, Fu Yang, et al. Present-time crustal deformation in China and its surrounding regions by GPS [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002,45 (2):198~209 (in Chinese with English abstract).

Numerical simulation of the mechanism of Cenozoic lithospheric extension-thinning in North China

LIU Cui^{1,2}, DENG Jin-fu^{1,2}, ZHANG Gui-bin^{1,2},

XIAO Qing-hui^{1,2}, LI Ting-dong³, ZHAO Guo-chun^{1,2}, QIU Rui-zhao⁴, ZHOU Su^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Lithoprobng Technology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

4. Center of Development & Research, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: The extension-thinning mechanism of the eastern North China rift and the tectonic stress field at its peripheries during the Cenozoic and the mechanism of the uplift of the Ordos craton and formation of its peripheral down-faulted basins in the west are the hot topics of the current research, but they are seldom approached from the angle of numerical simulation. The authors used the finite element program FEVPLIB to perform numerical simulations of five sections in this region and present the following views according to the results. (1) The extension-thinning of the lithosphere near the Pacific subduction zone are strong, which coincides with pulling-apart of the Okinawa trough that the section passes through, while the effect of the Pacific subduction on the extension-thinning of the North China basin that is relatively far away from the subduction zone is weak. (2) Upwelling of asthenospheric material beneath the North China basin during volcanic eruptions resulted in the extension-thinning of the North China rift, which conforms to the mechanism of pure shear. At present the lithosphere beneath the North China region has tended to be in isostatic balance and the dynamic system tends to be in a steady state. (3) The Liupan Mountains were thrust over the Ordos block, indicating the compression on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, which was a great force of pushing North China and might induce the uplift of the Ordos block, while the movement of the Ordos block to the northeast provided the background of extension of the peripheral basins. (4) The extension-thinning of the lithosphere beneath the North China region is the combined effect of the compression from the Liupan Mountains and the subduction of the Pacific plate in the east. The simulation results are in agreement with the GPS data, gravity anomalies and 3D lithospheric structure in the study region.

Key words: North China; extension-thinning; lithospher ; dynamics; numerical simulation

About the first author: LIU Cui, female, born in 1973, lecturer and doctor of petrology, mainly engages in the study of petrology and numerical modeling of continental dynamics; Email: Liucui@cugb.edu.cn.