

地幔柱构造对松辽盆地及渤海湾盆地形成的制约

肖 龙¹, 王方正¹, 王 华², F. Pirajno³

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

3. 澳大利亚西澳地调局, 佩斯 6004

摘要: 中国东部松辽盆地和渤海湾盆地形成与演化的深部动力学机制尚未得到很好的解释. 通过对区域地震资料盆地沉积记录、火山岩岩石探针和大地构造演化历史的综合分析, 认为地幔柱(柱头直径约 500 km)在晚侏罗世—晚白垩世时形成于松辽地区, 经历了软流圈地幔上涌、地壳抬升与伸展、火山活动, 导致松辽盆地的形成; 由于华北板块向北移动, 始新世时地幔柱(柱头直径 600~800 km)移动到京津—渤海湾地区, 类似的地质过程形成了渤海湾盆地. 渤海湾地幔柱的活动还可能是京津唐地区地震多发的根本原因.

关键词: 地幔柱; 地幔柱构造; 松辽盆地; 渤海湾盆地; 火山作用; 地震.

中图分类号: P588.1

文章编号: 1000-2383(2004)03-0283-10

收稿日期: 2003-10-23

Mantle Plume Tectonics Constraints on the Formation of Songliao and Bohaiwan Basins

XIAO Long¹, WANG Fang-zheng¹, WANG Hua², F. Pirajno³

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Geological Survey of Western Australia, 100 Plain Street, East Perth WA 6004, Australia

Abstract: The dynamic mechanisms of the formation of the Songliao and the Bohaiwan basins, eastern China, are controversial. Based on the analyses of earthquake data, sedimentary record, volcanic probe and tectonic evolution, it is argued that the activity of mantle plume firstly undertook at the region around the Songhuajiang and the Liaohe rivers during Late Jurassic and Early Cretaceous time. The plume head was of 500 km in diameter at this stage. The Songliao basin formed due to the asthenospheric upwelling, crustal uplift and subsequent extension, and volcanic activity. However, the mantle plume, with 600—800 km head in diameter, would be beneath the Bohaiwan area in the Paleocene due to northwestward movement of the North China plate. The similar geological processes to the last stage undertook, and resulted in the formation of the Bohaiwan basin. Meanwhile, the plume is interpreted as the major factor of frequent earthquake at the Beijing-Tianjin and Bohaiwan area.

Key words: mantle plume; mantle plume tectonics; Songliao basin; Bohaiwan basin; volcanism; earthquake.

松辽盆地和渤海湾盆地是中国最大的含油气盆地之一, 它们的油气产量占中国油气产量的 80% 以上. 属于渤海湾盆地地区的京津唐地区还是我国地震多发和频发地区, 因此对这 2 个盆地演化的地球动力学背景研究不仅具有重大的地球科学意义, 还

对我国的能源开发意义重大, 更对人民生命财产安全和国家的可持续发展影响深远. 多年来能源勘探和开发积累了极为丰富的有关盆地与能源的实际资料. 20 世纪 90 年代以来反映中国岩石圈深部结构的地质地球物理研究成果的大量出版(袁学诚,

1996),为研究盆地演化的地球动力学背景提供了重要的前提条件.随后进行了包括对地球物理、盆地分析及岩浆岩的综合分析研究(李思田等,1997;朱介寿等,1997;李思田等,1990;杨宝俊等,2002),并重点探讨了太平洋和特提斯两大体系对中国东部盆地演化的联合、复合影响,极大地深化了对盆地演化动力学过程的认识.尤其重要的是,研究表明松辽和渤海湾盆地均为主动伸展型盆地,始新世—渐新世渤海湾盆地火山岩反映岩浆起源的上地幔有异常的高地幔潜温和地球物理反映的软流圈地幔强烈上涌等(朱介寿等,1997).然而,如何将松辽盆地(主要形成于白垩纪)与渤海湾盆地(形成于渐新世)形成的时空演化与已经获得的盆地沉积记录、岩浆岩、地球物理、地震、地热和地貌资料等相结合,综合解释板块构造与地球深部过程对盆地形成的影响,仍然是一个有待解决的科学难题.尽管越来越多的人注意到从地球深部背景来进行研究,并且已经有研究者提出了东亚太平洋大型裂谷体系或地幔柱(Deng *et al.*, 1998;陶奎元等,1999)的初步解释,但这一问题还远未解决,尤其是地幔柱的具体工作模型和影响范围的研究还远未涉及.本文试图应用地幔柱构造理论,结合研究区的已经获得的大量地球物理、盆地沉积学和火山岩资料等初步提出控制松辽和渤海湾盆地形成和演化的新模式,以供同行们讨论.

1 松辽和渤海湾盆地的基本地质特征

1.1 空间展布和地貌特征

松辽盆地是我国东北的一个大型中生代盆地(图 1),由 40 个断陷组成.在形态上呈现以大庆—肇州为中心的南北向椭圆形,宽约 350 km,长 600 km,面积约 26 000 km².渤海湾盆地位于华北地台东部京津唐—渤海湾地区,它包括临清、冀中、济阳、黄骅、下辽河和渤中等拗陷,空间形态表现为以渤海湾为中心,北东方向延长的菱形,面积约 200 000 km².渤海湾盆地的形状是 NNE 先存基底大型走滑断裂在成盆期发生右旋扭动所致.尽管如此,伸展作用是其最主要的特征.

2 个盆地在地貌上均表现为平原或凹陷(如渤海湾).一个值得注意的现象是,虽然在地貌上中国东部表现为西高东低的总体特征,但是在 2 个盆地中水系发育情况均反映出以盆地中央为中心的放射状展布特征(图 1).这一特点说明盆地中可能存在

类似的放射状断裂系统.

1.2 沉积记录反映的隆升与沉降范围

松辽盆地内发育有上侏罗统、白垩系和第三系,其中白垩系沉积厚度最大、分布最广、发育最完整(图 2a).盆地基底由古生代和前古生代变质岩及古生代以来的各类火成岩组成.上侏罗统零星分布于许多小断陷中,沿断裂有火山喷发.沉积相以河流沼泽相碎屑岩系为主,总厚 3 000~4 500 m,晚白垩世和第三纪为滨湖—浅湖沉积.早白垩世中晚期是盆地发展的定型期.从嫩江组第四段开始(图 2a),由深湖相沉积逐渐变为浅湖相和滨湖相沉积,说明盆地的快速沉降期结束,开始平稳地接受沉积.

渤海湾盆地以第三系为主,另发育有少量中生代地层(图 2b),基底与松辽盆地相同.盆地中三叠统见于临清和冀中两拗陷中,为陆相砂页岩为主的红色碎屑岩系,与下伏上二叠统连续过渡.下、中侏罗统分布于冀中拗陷,为一套杂色砂泥岩夹两套煤系地层.上侏罗统在黄骅、下辽河和临清、济阳等拗陷中均有分布,为一套砂泥岩组合,与下伏地层呈假整合或不整合接触.白垩系为一套红色为主的杂色砂泥岩系,上部以砖红色块状细砂岩、中砂岩为主.盆地内新生界分布广泛,除缺失古新统外,始新统和渐新统发育齐全、厚度大,总厚可达 8 000 m 以上,是重要的生油岩系.其中始新统的孔店组为陆相碎屑岩沉积,厚 1 000~3 000 m,主要分布于冀中、临清、济阳拗陷以及黄骅拗陷的南部.沙河街组分为 3 段,下段以深灰及褐灰色泥岩为主,夹数层薄层砂岩;中段为一套粗碎屑砂岩夹油页岩为主.渐新统的东营组是一套浅灰至绿灰色砂泥岩互层.上第三系在盆地中分布更广,厚度稳定,为一套河流相沉积和湖泊三角洲沉积物.根据对中、下辽河拗陷盆地的研究,可见其沉积中心由北向南发生了迁移(许坤等,2002);而南堡凹陷和南面的济阳拗陷中几个呈近南北向展布的次级凹陷的沉积学研究表明,沉积中心是由南而北转移的(王华等,2002),其原因见后面的讨论(3.2.2).从渤海湾盆地的沉积岩相(图 2b)来看,在盆地形成和大规模接受沉积之前,出现了古新统的地层缺失,说明早期存在地壳隆升的过程.

1.3 岩浆岩记录

针对含煤和含油气盆地中广泛出现火山岩这一事实,近 20 年来对火山作用与盆地的形成演化关系研究已日益受到重视(McKenzie and Bickle, 1988; White and Mckenzie, 1989; McKenzie and O'Nions,

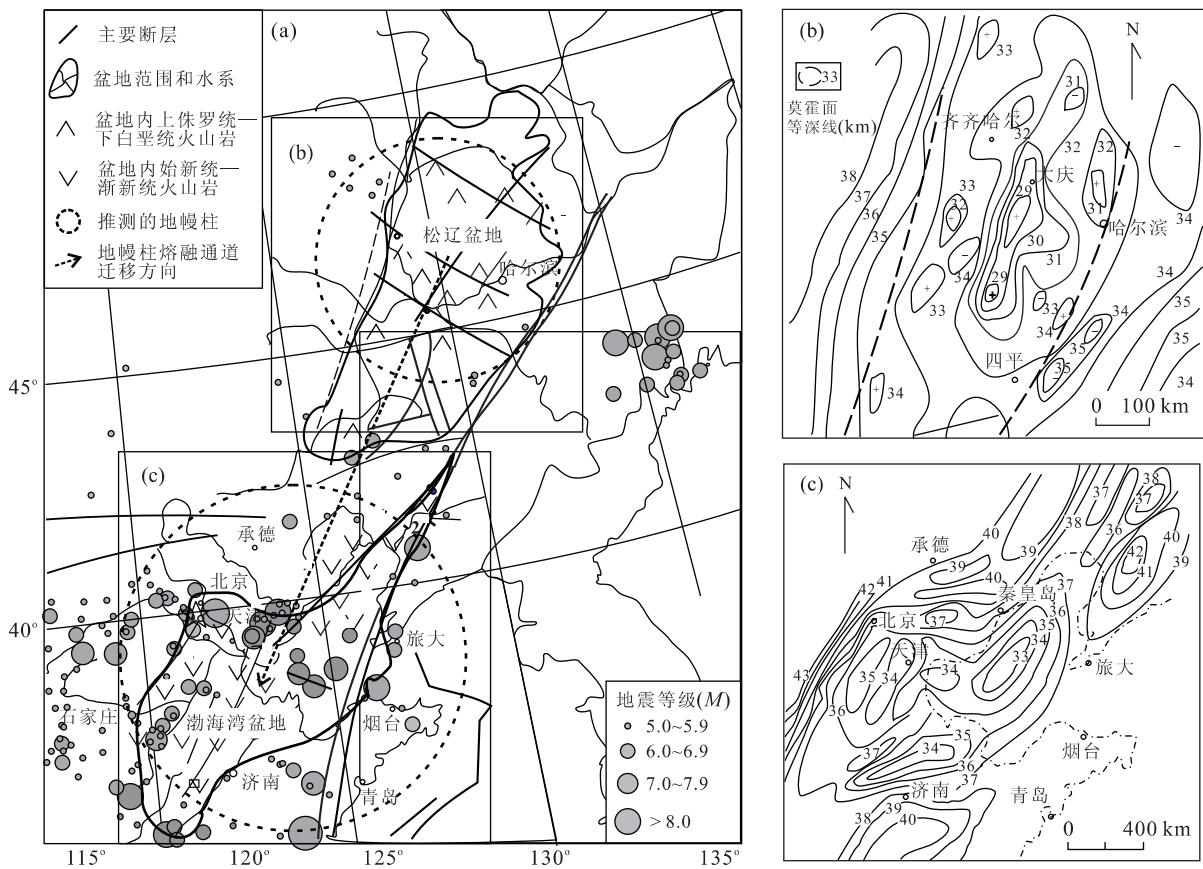


图 1 松辽和渤海湾盆地地质与地球物理简图[据袁学诚(1996)和李思田等(1997)综合]

Fig.1 Geological and geophysical sketch map of Songliao basin and Bohaiwan basin areas (modified after Yuan (1996) and Li *et al.* (1997)). Figure 1a shows earthquake, drainage system and inferred mantle plumes of area; Figure 1b and 1c show depth of Moho of Songliao and Bohaiwan basin respectively

图 1a 为松辽和渤海湾地区地震和水系分布、推测的地幔柱位置;图 1b、1c 分别为松辽盆地和渤海湾盆地的莫霍面等深线

1991;曾广策等,1997;林强等,1998;王华等,2002)。前人对松辽盆地及其周边,以及渤海湾盆地中新世火山岩的时代、喷发顺序、岩浆序列、岩石类型及地球化学特征进行了不少的工作(方文昌和徐公愉,1982;徐公愉,1983;吴利仁,1984;王东方,1985;马家骏和方大赫,1991;赵海玲,1994;Deng *et al.*, 1998;林强等,1998;王华等,2002),积累了丰富的资料。越来越多的研究成果显示研究区火山岩形成的构造背景为陆内裂谷(王东方,1985;王华等,2002),而与大洋板块向东亚大陆俯冲无直接联系。

1.3.1 松辽盆地火山岩 松辽盆地周边广泛出露中生代火山岩,与中生代中国东部广大地区一样,其高峰期为晚侏罗世—早白垩世。经物探及钻探工程揭露,在现今松辽盆地内的 40 个小型断陷盆地中都充填有晚侏罗世—早白垩世的火山岩。岩性以中基性成分为主,它们与煤系地层共生。勘探成果还表明,95%以上的晚侏罗世—早白垩世断陷盆地其前

期火山活动强烈,后期的盆地规模大,并具有较好的含煤和含油气性。用同位素测定的盆地周边火山活动的时间始于晚侏罗世((153.25±3.67)Ma,全岩 Rb—Sr 等时年龄,李思田等,1997)、止于早白垩世(117.5 Ma,马家骏和方大赫,1991)。晚侏罗世—早白垩世与晚白垩世玄武岩的岩石系列及地球化学特征差异明显,早期岩浆岩在 K₂O—SiO₂ 图解中多为高钾钙碱性系列,在 TAS 图解中则多为亚碱性系列,辽西地区出现碱性系列岩石(王东方,1985);晚期盆地内晚白垩世玄武岩为碱性系列。在地球化学特征方面,晚侏罗世—早白垩世中基性岩石 TiO₂、P₂O₅ 含量低,K₂O 及 K₂O+Na₂O 高于岛弧火山岩,与大陆边缘火山岩相似。稀土元素配分型式均为轻稀土中等富集型,重稀土近似平坦,Eu 异常不显著,总体高于世界岛弧及陆缘弧玄武岩,而接近大陆裂谷型玄武岩。在不相容元素蛛网图解中表现出 Th、Ce、Sm 的正异常,Nb 及 Ti 的负异常(图 3a)。

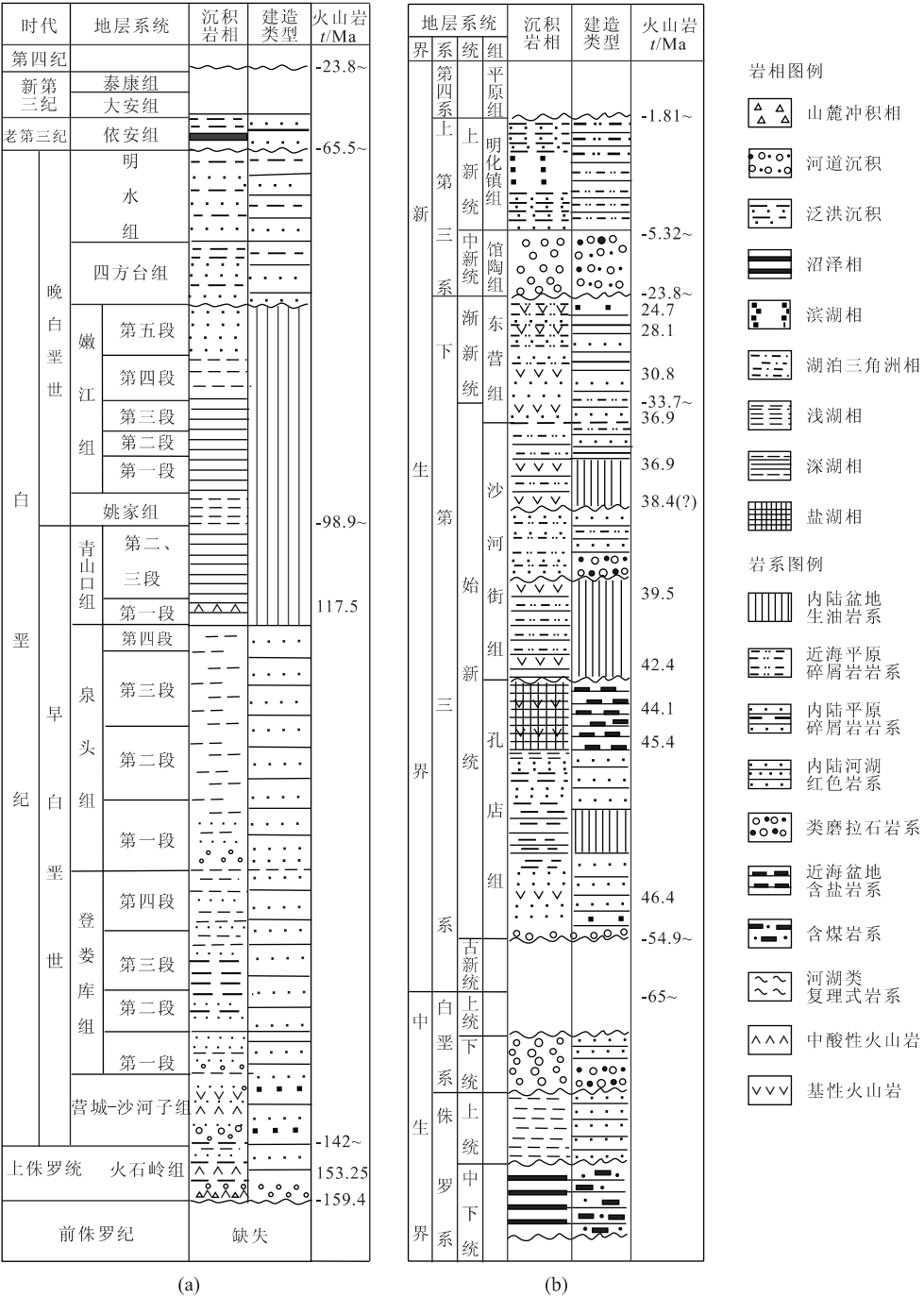


图 2 松辽盆地(a)和渤海湾盆地(b)沉积充填序列[据谭忠福等(1989)]

Fig. 2 Sedimentary facies and formation of Songliao basin (a) and Bohaiwan basin (b) (modified after Tan *et al.* (1989)). Ages of volcanic rocks are after Liu (1992). Ages for geological boundaries are after ICS (2002) 地质界限年龄根据国际地科联国际地层图(2002)。火山岩及其年龄据刘若新(1992),其中原来部分划归始新统和渐新统的沙河街组根据最新的地层方案已改为始新统

具有俯冲板片组分(SZC)的特征,但 Sr—Nd 同位素示踪未显示有洋壳的加入. 路凤香等将 SZC 组分的来源解释为地幔中具 SZC 组分的透镜体或夹层参与了熔融(李思田等,1997). 晚白垩世阶段在松辽坳

陷中央喷出的玄武岩为低钾的碱性玄武岩, Nb、Ta 无负异常, Cr、Ni 含量高(李思田等,1997),显示洋岛玄武岩的特征(图 3b). 松辽盆地及周边中基性玄武岩的时间和空间分

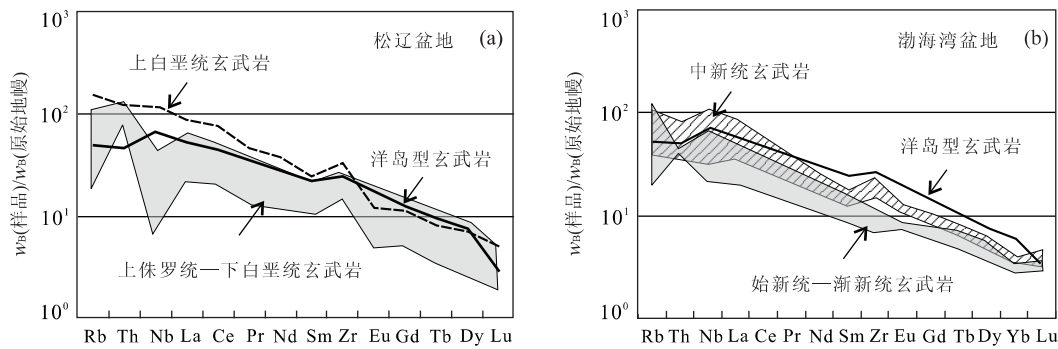


图 3 松辽盆地(a)和渤海湾盆地(b)火山岩微量元素蛛网图

Fig. 3 Primitive-normalized trace element diagrams showing volcanic rocks from Songliao basin (a) and Bohaiwan basin (b). Data are after Liu (1992), Li *et al.* (1997), He and Liao (1997), Zeng *et al.* (1997)

原始数据来自刘若新(1992)、李思田等(1997)、赫英和廖永胜(1997)、曾广策等(1997)

布特点与典型大陆裂谷不一致。典型大陆裂谷在其演化的早期,因为地壳和岩石圈厚度大,源区部分熔融程度低,因而所形成的玄武岩往往碱度较高。随着伸展加剧,晚期的火山岩碱度会降低。因此在空间上表现为碱性玄武岩覆盖全区;亚碱性玄武岩出露于中心裂隙带。时间上碱性玄武岩形成早,亚碱性玄武岩形成晚。而松辽盆地火山岩类型的形成时间及其空间分布与之相反,暗示早期就有很高的熔融程度,即异常高的地幔潜温;晚期更是明显显示地幔柱岩浆作用的特征(产生洋岛型玄武岩)。

1.3.2 渤海湾盆地火山岩 渤海湾盆地的主要坳陷中均有大量隐伏的始新世和渐新世玄武岩(吴利仁,1984;McKenzie and O’Nions, 1991;史卜庆等,2001);该区玄武岩以熔岩为主,火山碎屑岩极少,产状为裂隙式喷发的岩流和岩被。玄武岩喷发强度受断裂控制明显。断裂活动强烈的地段,火山喷发强度也大。如下辽河盆地西部凹陷的中段断裂活动强烈,其玄武岩厚达 1 000 m 以上。玄武岩与沉积地层互层产出,层数多,单层厚度大小不等,但累积厚度往往很大。盆地内玄武岩以碱性系列为主,少量亚碱性系列。另外值得注意的是在黄骅坳陷中还有苦橄拉斑玄武岩和碱性苦橄玄武岩(李思田等,1997)。火山岩岩石地球化学特征表明总体与板内玄武岩相似,有明显的 Nb、Ta 和 Ti 正异常(图 3b)。

老第三纪渤海湾大型裂谷盆地及其周边的新第三纪至第四纪小型断陷盆地的形成是软流圈物质的对流和底辟上升导致上覆岩石圈的伸展减薄、产生岩石圈深断裂和裂谷的扩张诱发玄武岩浆大量喷发,最后形成大陆裂谷盆地,玄武岩喷发的高潮期与岩石圈强烈拉伸期相对应,岩石类型亦与拉伸速度

有关。路风香等根据玄武岩 K_2O 、 Na_2O 含量和 SiO_2 指数估算了渤海湾盆地老第三纪岩石圈的拉伸速度(李思田等,1997),结果表明,北京坳陷拉伸速度最大,达 0.55 cm/a,玄武岩碱性程度最低;下辽河和黄骅拉伸速度较小,平均为 0.32 cm/a 和 0.34 cm/a,玄武岩碱性程度最高。用同样的方法估算的新第三纪至第四纪时期渤海湾盆地西侧的大兴安岭—太行山带平均拉伸速度为 0.18 cm/a,东侧的长白山—郯庐断裂带的平均拉伸速度为 0.17 cm/a,这表明岩石圈的拉伸在老第三纪时期较快,而在第三纪至第四纪则慢得多,反映老第三纪末期盆地演化进入热衰减阶段,这与前文讨论的盆地沉积记录所揭示的演化历史相一致。

2 盆地地球物理特征及地震震中分布

区域地球物理场可以清楚地反映大地构造分区和地壳—上地幔的构造等,因此是研究中国中生代盆地区域构造分区、深部构造及其构造演化的重要依据。地震震中的分布更是深部过程与活动构造强度和空间分布的重要表现形式。

2.1 区域地球物理场

松辽盆地的布格重力异常表现为异常大面积展布,变化平缓开阔,走向大致呈南北向,盆地中部为正异常,边缘表现为明显的负梯度带。莫霍界面深度图上,松辽盆地和渤海湾盆地地区显著地表现为 2 个最浅的区域(图 1,参见袁学诚,1996)。莫霍面形态呈 NEE 向,最浅处在大庆、乾安一带,深部仅为 29 km、33 km 等深线所圈闭的上地幔隆起区,基本上与松辽盆地的位置相对应(图 1)。

渤海湾盆地的莫霍界面深部变化范围大约在 30~50 km 之间,总的特征是东部浅、西部深,渤海地区地壳厚 31 km,是地壳最薄的上地幔隆起区,渤海湾和辽东湾是 2 个次一级的上地幔隆起区,厚度 34 km,鲁西地区为上地幔拗陷区,地壳厚度 37~40 km(图 1). 在北京—冲绳间的壳幔结构剖面图上(冯福阁和宋立珩,1996)清晰地显示出以渤中为中心的软流圈地幔上涌,并同时显示有规模很大的壳内低速层存在.

2.2 地壳分层结构

在世界范围内,与深部作用有关的中、新生代盆地,其深部构造的重要发现之一是存在壳内和幔顶的电性高导层. 松辽盆地与渤海湾盆地也具有这些特征. 松辽盆地地壳低速带的深度大致在 20~40 km,而地幔内的低速带深度为 60~100 km 之间,最浅为齐齐哈尔至哈尔滨. 渤海湾地区壳内结构较复杂,在地壳中有低速带或低速与高速夹层组成的低速带,下地壳的速度值随深度增加,壳幔之间有一明显过渡带. 但在济阳拗陷及邻区深反射/折射地震剖面图上清晰地显示出在地壳 20~30 km 有明显的壳内高速体,它们被解释为因岩石圈伸展、地幔上涌,碱性岩浆在上升过程中释放的幔源气体富集区(史卜庆等,2001).

2.3 大地热流

松辽盆地中部为高热流区,其中古 507 井为 2.27 HFV,杏 4 井为 2.01 HFV,盆地东北部、北部和西部热流值较低,热流平均值为 1.64 HFV(吴乾蕃,1990). 此外,居里等温面显示出大庆、乾安、哈尔滨—长春 2 个 NNE 向隆起区与莫霍面有较好的对应关系,这些地方都显示了岩石圈厚度减薄的特征. 渤海湾盆地具有较高的热流值,在冀中拗陷,平均为 1.83 HFV,对应于地幔隆起区,另外由大地电磁测深和深部地震探测结果得出的软流圈高度大约为 60~80 km. 解习农(1998)也认为该盆地自第三纪以来是一个热盆.

2.4 地震震中分布

松辽盆地地区地震记录较少,这与导致该盆地形成的时间较早有关(史前). 但在渤海湾盆地地区地震震中呈面型分布(图 1). 尽管其中某些地震可归因于等邻庐断裂带的活动,但是如果以渤中(软流圈最浅处)为中心,则在 400 km 半径范围之内包括了绝大多数除明显受活动断裂控制的地震,而它们的空间分布又明显与深部地幔上隆和存在壳内高导层

的地区相对应.

3 讨论

盆地的上述地质和地球物理特征均表明,松辽盆地和渤海湾盆地均为伸展型大陆裂谷盆地,盆地形成与岩浆活动和地球深部构造关系密切. 这样的相关性可以用地幔柱构造理论作出统一的解释,并可能为重新认识研究区的地质演化提供新的思路.

3.1 地幔柱构造的一般工作模型

自 Wilson(1963)提出热点(地幔柱)的初步概念到 1992 年日本学者通过地震层析识别出现今地球上存在的主要地幔柱(Fukao *et al.*, 1992, 1994; Maruyama, 1994),再到 Courtillot *et al.* (2003)定义了起源于不同深度(上地幔、下地幔和核地幔边界)的地幔热柱,全世界的地质学家、地球物理学家和地球化学家等通过各自的工作,证实了地幔柱的存在并认识到它在地球演化中有着非常重要的作用(Wilson, 1989; Griffiths and Campbell, 1990; Hill, 1991, 1993; Storey, 1995; Pirajno, 2000; Condie, 2001). 地幔柱构造很可能是导致大陆裂解、板块运动全球环境变化和大规模成矿等的深部控制因素. 根据前人对世界上主要典型地幔柱的研究(Cox, 1991; Richards *et al.*, 1989; Richards *et al.*, 1991; Storey, 1995)以及实验模拟的研究成果(Gurnis, 1988),地幔热柱活动的浅表地质响应和表现形式包括:软流圈地幔上涌导致地壳抬升、地幔柱头部地壳的拉伸、裂解(陷)、大规模的火山活动,高地热异常和地震频发等,其他伴随的是形成裂陷(裂谷)盆地、放射状岩墙(或放射状断裂、水系发育)、具有洋岛型玄武岩特征的火山岩和幔源火成岩、大规模成矿作用(包括岩浆岩矿床、热液矿床和煤与油气等)等. 用地震等方法可以探测到抬升的软流圈地幔(或莫霍面),并可以呈柱状连续向地球深部延伸到上下地幔边界(670 km)或核幔边界附近(2 900 km).

松辽和渤海湾裂谷盆地的地质和地球物理资料显示,控制其形成和演化的深部控制因素与地幔柱构造十分相似.

3.2 地幔柱构造对盆地演化的制约

松辽盆地和渤海湾盆地的地质和地球物理资料都显示出其与地幔柱活动有关,而且它们还可能是同一地幔柱在不同时间、空间下与岩石圈作用的产物.

3.2.1 地幔柱活动的主要证据 尽管目前无法获得地震层析所揭示的地幔柱尾和起源深度的直接证据,但根据前面的描述所总结出的松辽盆地和渤海湾盆地的以下地质—地球物理事实都指向与地幔柱活动有关:(1)2个盆地总体皆表现为面状伸展型大陆裂谷盆地,而且盆地沉积记录表明在裂陷之前曾发生过地壳隆升,这与地幔柱撞击岩石圈后先导致其隆升后沉陷—裂解的过程相一致;相反,一般的弧后伸展盆地则没有裂陷前隆起过程。(2)地球物理资料清楚地显示两地均为软流圈地幔的上涌和莫霍面的抬升,且形态均为近圆形,这与地幔柱构造一致,而与板块俯冲引起的带状裂隙—地幔带状隆起相矛盾。(3)水系(地貌)特征说明存在以核部为中心的放射状断裂,与地幔柱撞击效应相同,而与侧向拉伸的断裂构造形式不同;盆地内断裂构造主要表现为北北东向和北西西向和部分北西向。渤海湾盆地及周边呈优势的北北东向断裂系统可能与郯庐断裂的多次活动有关。(4)岩浆活动和火山岩的性质说明与板块俯冲关系不大,它们表现出洋岛型火山岩的特征,尤其是渤海湾盆地老第三纪火山岩和松辽盆地内的晚白垩世玄武岩,火山岩性质随时间变化亦是受地幔柱与岩石圈相互作用过程的控制。另外,岩浆活动与盆地的沉降历史是耦合的(王华等,2002),表现为基性岩浆活动对应于地幔物质的对流上涌。(5)渤海湾盆地及周边的地震震中不是受区域NNE向构造控制,而更像是受地幔柱头面状影响范围控制,地幔柱岩浆活动形成的壳内高导层活动可能是诱发地震的根本原因;根据王华等(2002)对南堡凹陷沉降曲线的研究,9 Ma以来盆地进入加速沉降期。辽宁省地震局对1951—1982年间下辽河地区的形变测量表明该地区在继续整体下沉;同时该地区现代地震活跃,在1509—1975年间5级以上的地震就达15次(钟以璋等,1991)。这些现象可能说明渤海湾地幔柱至今仍在活动。(6)2个盆地均为高热盆地,地热异常区与地幔隆起区对应,其随着圆形的空间形态与地幔柱头的可能形态吻合。

3.2.2 地幔柱活动导致盆地形成演化的动力学过程 综合前文的分析,以及地幔柱构造工作的可能模型,本文初步建立如下地幔柱作用的工作模型。

(1)松辽盆地形成阶段:晚中生代古太平洋库拉板块向NW方向俯冲,俯冲板片下插到670 km深度的上下地幔边界,同时扰动了地幔对流从而诱发辽河地区地幔热柱的形成;晚侏罗纪开始地幔热柱

活动引起软流圈地幔上涌(叠加在相当于弧后位置的辽河地区),导致地壳抬升和随后的强烈拉伸和减薄,地壳裂陷形成断陷盆地;随着地壳拉伸减薄的不断加剧和软流圈的上涌,地幔减压熔融形成了大量基性火山岩。伴随大量的沉积充填,松辽盆地形成,上地幔上涌和岩浆活动形成的地壳岩浆房为油气的形成提供了热源。

(2)热点迁移:随着华北板块向北漂移(任收麦和黄宝春,2002),老第三纪时热点相对向南移动到现在的渤海湾地区。根据许坤等(2002)的研究,辽河坳陷盆地中的沉降中心是由北西一直向南东方向迁移的。这支持了本文的分析。另外用这一模型计算的热点上方板块向北运移的速度约为1 cm/a,也是较为合理的。

(3)渤海湾盆地形成阶段:老第三纪开始地幔热柱的继续活动,导致了软流圈地幔上涌、地壳拉伸减薄、裂陷成盆;异常高温的地幔上涌—减压熔融—火山活动强烈、裂陷加剧、沉积充填、盆地形成。上地幔上涌和岩浆活动形成的地壳岩浆房为油气的形成提供热源,为大规模的油气生成提供了条件,并最终形成了中国最大的含油气盆地。

(4)区域构造的影响:受新生代印度板块与欧亚板块碰撞挤压造成扬子—华北板块右旋转动,位于济阳坳陷下的地幔热柱向北迁移,造成沉降中心的反向移动。

4 讨论与主要认识

毋庸置疑,我们在强调地幔柱活动对松辽和渤海湾盆地的形成起着决定性作用的同时,不可否认区域构造格局和演化对盆地形成的影响。李思田(1997)讨论了Pangea超级大陆演化与白垩纪超大型含油气盆地形成的关系,并认为辽阔的Pangea之下有地幔上涌或地幔柱活动。除前面的论述,这里我们简要讨论郯庐断裂以及印度板块与欧亚板块碰撞对盆地形成的影响。

郯庐断裂的作用:该深大断裂在二期地幔上涌过程导致断陷成盆时主要作为边界断裂存在,大致控制了松辽盆地和渤海湾盆地的东界。但是地幔上涌导致的岩石圈减薄范围已经超出其范围,说明来自地球深部的作用力远超过像郯庐断裂这样的深大断裂。

印度板块与欧亚板块碰撞对盆地形成的影响:

库拉板块向西北俯冲导致的是左旋剪切滑动;印度板块与欧亚板块碰撞使得扬子板块右行旋转,使得在早期左旋剪切滑动的构造格局上迭加了右旋剪切作用。渤海湾盆地形成时主要受右旋滑动控制。故沉积和火山活动中心转为由南向北迁移,如济阳坳陷(陆现彩等,1998)、黄骅坳陷(王华等,2002)。

关于热点移动的问题还有另外 2 种可能性,即热点本身移动而上覆板块未动,即原来在松辽盆地活动的地幔柱向南移动到渤海湾盆地之下。最近 O'Neill *et al.* (2003) 对印度洋中热点玄武岩的研究证明这一可能性是存在的;或者它们可能属于不同时间不同地幔柱作用的产物。对这一问题的解释还需要大量的研究工作去证实。

从更大的范围来看,白垩世的松辽地幔柱活动与 Larson(1991)提出的太平洋超级地幔柱事件一致,也与陶奎元等(1999)所称的燕山期岩浆大喷发时间一致。故在全球构造中的研究意义有待进一步研究讨论。尽管本文提出的地幔柱构造模式较好地解释了松辽和渤海湾盆地演化的深部动力学过程,但是就许多基础科学问题,如火山岩浆活动所记录的地幔柱热点迁移和沉积中心的迁移等都需要进行更加详细和深入的研究。要解决这一问题,精细的年代学和盆地沉积学研究是必不可少的。

References

Condie, K. C., 2001. Mantle plumes and their record in Earth history. Cambridge University Press, London, 306.

Courtillot, V., Davaille, A., Besse, J., et al., 2003. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 205: 295—308.

Cox, K. G., 1991. A superplume in the mantle. *Nature*, 352: 564—565.

Deng, J. F., Zhao, H. L., Luo, Z. H., et al., 1998. Mantle plumes and lithosphere motion in East Asia. *Geodynamics*, 27: 59—66.

Fang, W. C., Xu, G. Y., 1982. Jurassic volcanic rocks of south-eastern Daxing'anling area. *Bulletin of Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Geological Academy*, 2: 81—89 (in Chinese with English abstract).

Feng, F. K., Song, L. H., 1996. Mantle diapir tectonics: Thermo-dynamic analysis of circum-western pacific basins. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21(4): 383—394 (in Chinese with English abstract).

Fukao, Y., Maruyama, S., Obayashi, M., et al., 1992. Seismic tomography of the Earth's mantle: Geodynamic implications. *Science*, 258: 625—630.

Fukao, Y., Maruyama, S., Obayashi, M., et al., 1994. Geological implication of the whole mantle P-wave tomography. *J. Geol. Soc. Japan*, 100: 4—23.

Griffiths, R. W., Campbell, I. H., 1990. Stirring and structure in mantle plume. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 99: 66—78.

Gurnis, M., 1988. Large-scale mantle convection and the aggregation and dispersal of supercontinents. *Nature*, 332: 695—699.

He, Y., Liao, Y. S., 1997. Auriferous CO₂ rich fluids in Shengli oilfield, Shandong Province and their origin. *Oil and Gas Geology*, 1: 17—21 (in Chinese with English abstract).

Hill, R. I., 1991. Starting mantle plume and continental break-up. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104: 398—416.

Hill, R. I., 1993. Mantle plume and continental tectonics. *Lithos.*, 30: 193—206.

Larson, R. L., 1991. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume. *Geology*, 19: 547—550.

Li, S. T., 1997. Formation of the giant coal-bearing and hydrocarbon-bearing basins during the Pangea evolution cycle. *Earth Science Frontiers*, 4(3—4): 299—304 (in Chinese with English abstract).

Li, S. T., Lu, F. X., Lin, C. S., et al., 1997. Evolution of Mesozoic and Cenozoic basins in eastern China and their geodynamic background. China University of Geosciences Press, Wuhan, 225 (in Chinese).

Li, S. T., Yang, S. G., Wu, C. L., et al., 1990. Tectonic setting for Mesozoic-Cenozoic of eastern China and its adjacent area. In: Wang, H. Z., Yang, S. N., Liu, B. P., eds., *Structural and biological paleo-geography of China and its adjacent area*. China University of Geosciences Press, Wuhan, 109—124 (in Chinese).

Lin, Q., Ge, W. C., Sun, D. Y., et al., 1998. Tectonic significance of Mesozoic volcanic rocks in northeastern China. *Scientia Geologica Sinica*, 33(2): 129—139 (in Chinese with English abstract).

Liu, R. X., 1992. The age and geochemistry of Cenozoic volcanic rock in China. Seismic Press, Beijing, 427 (in Chinese).

Lu, X. C., Hu, W. X., Gu, L. X., 1998. Mantle convection and its impact on the extending basins. *Earth Science Frontiers*, (Suppl.): 184—190 (in Chinese with English abstract).

- Ma, J. J., Fang, D. H., 1991. A preliminary study on Mesozoic volcanic rocks of Heilongjiang Province. *Heilongjiang Geology*, 2(2): 7—16 (in Chinese with English abstract).
- Maruyama, S., 1994. Plume tectonic. *J. Geol. Soc. Japan*, 100: 24—49.
- McKenzie, D. P., Bickle, M. J., 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere. *J. Petrol.*, 29: 625—679.
- McKenzie, D. P., O'Nions, R. K., 1991. Partial melt distribution from inversion of rare earth element concentrations. *J. Petrol.*, 32: 1021—1091.
- O'Neill, C., Dietmar, M., Steinberger, B., 2003. Geodynamic implications of moving Indian Ocean hotspots. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 212: 151—168.
- Pirajno, F., 2000. Ore deposits and mineral deposits. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 466.
- Ren, S. M., Huang, B. C., 2002. Preliminary study on post-Late Paleozoic kinematics of the main blocks of the paleo-Asian Ocean. *Progress in Geophysics*, 17(1): 113—120 (in Chinese with English abstract).
- Richards, M. A., Duncan, R. A., Courtillot, V. E., 1989. Flood basalts and hot-spot tracks: Plume heads and tails. *Science*, 246: 103—107.
- Richards, M. A., Jones, D. L., Duncan, R. A., et al., 1991. A mantle plume initiation model for the Wrangellia flood basalt and other ocean plateaus. *Science*, 254: 263—267.
- Shi, B. Q., Tian, Z. Y., Zheng, F. Y., et al., 2001. Quantitative relation between magmatism and extension in continental sedimentary basins: An example from Jiyang depression, Bohai Bay basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 25(3): 239—245 (in Chinese with English abstract).
- Storey, B. C., 1995. The role of mantle plumes in continental breakup: Case histories from Gondwana. *Nature*, 377: 301—308.
- Tan, Z. F., Zhang, Q. F., Yuan, Z. X., 1989. Neocathaysian structural system in East China. China University of Geosciences Press, Wuhan, 209 (in Chinese).
- Tao, K. Y., Mao, J. R., Xing, G. F., et al., 1999. Strong Yanshanian volcanic-magmatic explosion in East China. *Mineral Deposits*, 18(4): 316—322 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. F., 1985. Mesozoic-Cenozoic rifting volcanic belt of eastern China. *Journal of Changchun College of Geology*, 15(3): 49—56 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Wang, F. Z., Zhou, H. M., et al., 2002. Evolutionary dynamics and formation-deposition dynamics of Nanpu sag, Bohaiwan basin. China University of Geosciences Press, Wuhan, 182 (in Chinese).
- White, R. S., McKenzie, D. P., 1989. Magmatism at rift zones: The generation of volcanic continental margins and flood basalts. *Jour. Geophys. Res.*, 94(B6): 7685—7729.
- Wilson, J. T., 1963. Hypothesis of Earth's behavior. *Nature*, 198: 925—929.
- Wilson, M., 1989. Igneous petrogenesis—A global tectonic approach. Unwin Hyman, London, 334.
- Wu, L. R., 1984. Mesozoic and Neozoic volcanic rocks in eastern China and adjacent regions. Science Press, Beijing, 287 (in Chinese).
- Wu, Q. F., 1990. Geothermal field and oil-gas formation of the Songliao basin. *Acta Petrolei Sinica*, 11(1): 9—15 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., 1998. Coupling relationship between the formation of Meso-Cenozoic basins and deep process in east China. *Earth Science Frontiers*, (Suppl.): 162—165 (in Chinese with English abstract).
- Xu, G. Y., 1983. Subaerial volcanic rocks and their mineralization of Daxing'anling area. *China Regional Geology*, 5: 39—50 (in Chinese with English abstract).
- Xu, K., Li, H. W., Qiu, K. M., 2002. Neotectonic movements in the lower Liaohe River plain and Liaodong gulf. *Acta Oceanologica Sinica*, 24(3): 68—74 (in Chinese with English abstract).
- Yang, B. J., Zhang, M. S., Wang, P. J., et al., 2002. Composite scale analysis of geology-geophysics in the major basins and surrounding areas in the eastern China. *Progress in Geophysics*, 17(2): 317—324 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, X. C., 1996. Atlas of China geophysics. Geological Publishing House, Beijing, 195 (in Chinese).
- Zeng, G. C., Wang, F. Z., Zheng, H. R., et al., 1997. Cenozoic volcanic rocks and relations to basin evolution and oil accumulation in Dongying sag. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(2): 157—164 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, H. L., 1994. Characteristics and forming background of Mesozoic volcanic rocks of southeastern Songliao basin. Abstracts of Continental Tectonics Conference, 101 (in Chinese).
- Zhong, Y. Z., Jiang, X. Q., Chen, A. P., 1991. Liaoning geological disaster. Geological Publishing House, Beijing, 121 (in Chinese).

- Zhu, J. S., Cao, J. M., Li, X. G., et al., 1997. The reconstruction of preliminary three-dimensional Earth's model and its implication in China and adjacent regions. *Acta Geophysica Sinica*, 40(5): 627—648 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 方文昌, 徐公愉, 1982. 大兴安岭东南地区侏罗纪火山岩. 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊, 2: 81—89.
- 冯福闯, 宋立珩, 1996. 幔流底辟构造—环西太平洋盆地热动力学分析. 地球科学——中国地质大学学报, 21(4): 383—394.
- 赫英, 廖永胜, 1997. 胜利油田富 CO₂ 含金流体及有关成因问题. 石油与天然气地质, 1: 17—21.
- 李思田, 1997. 联合古陆演化周期中超大形含煤及含油气盆地的形成. 地学前缘, 4(3—4): 299—304.
- 李思田, 路凤香, 林畅松, 等, 1997. 中国东部及邻区中、新生代盆地演化及地球动力学背景. 武汉: 中国地质大学出版社, 225.
- 李思田, 杨士恭, 吴冲龙, 等, 1990. 中国东部及邻区中生代裂陷作用的大地构造背景. 见: 王鸿祯, 杨森楠, 刘本培. 中国及邻区构造古地理和生物古地理. 武汉: 中国地质大学出版社, 109—124.
- 林强, 葛文春, 孙德有, 等, 1998. 中国东北地区中生代火山岩的大地构造意义. 地质科学, 33(2): 129—139.
- 刘若新, 1992. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社, 427.
- 陆现彩, 胡文榘, 顾连兴, 1998. 地幔对流及其对地壳表层拉张盆地的影响. 地学前缘, (增刊): 184—190.
- 马家骏, 方大赫, 1991. 黑龙江省中生代火山岩初步研究. 黑龙江地质, 2(2): 7—16.
- 任收麦, 黄宝春, 2002. 晚古生代以来古亚洲洋构造域主要块体运动学特征初探. 地球物理学进展, 17(1): 113—120.
- 史卜庆, 田在艺, 郑凤云, 等, 2001. 大陆伸展盆地岩浆与伸展作用的定量关系分析及其初步应用. 大地构造与成矿学, 25(3): 239—245.
- 谭忠福, 张启富, 袁正新, 1989. 中国东部新华夏系. 武汉: 中国地质大学出版社, 209.
- 陶奎元, 毛建仁, 邢光福, 等, 1999. 中国东部燕山期火山—岩浆大喷发. 矿床地质, 18(4): 316—322.
- 王东方, 1985. 中国东部中生代裂谷火山岩带. 长春地质学院院报, 15(3): 49—56.
- 王华, 王方正, 周海明, 等, 2002. 渤海湾盆地南堡凹陷演化的动力学和成藏动力学. 武汉: 中国地质大学出版社, 182.
- 吴利仁, 1984. 华东及邻区中生代火山岩. 北京: 科学出版社, 287.
- 吴乾蕃, 1990. 松辽盆地地温场与油气生成、运移富集的关系. 石油学报, 11(1): 9—15.
- 解习农, 1998. 中国东部新生代盆地形成演化与深部过程的耦合关系. 地学前缘, (增刊): 162—165.
- 徐公愉, 1983. 大兴安岭的大陆火山岩及其矿化作用. 中国区域地质, 5: 39—50.
- 许坤, 李宏伟, 邱开敏, 2002. 下辽河平原—辽东湾的新构造运动. 海洋学报, 24(3): 68—74.
- 杨宝俊, 张梅生, 王璞君, 等, 2002. 论中国东部大型盆地区及邻区地质—地球物理复合尺度解析. 地球物理学进展, 17(2): 317—324.
- 袁学诚, 1996. 中国地球物理图集. 北京: 地质出版社, 195.
- 曾广策, 王方正, 郑和荣, 等, 1997. 东营凹陷新生代火山岩及其盆地演化、油藏的关系. 地球科学——中国地质大学学报, 22(2): 157—164.
- 赵海玲, 1994. 松辽盆地东南缘中生代火山岩特征及其形成的构造背景. 大陆构造学术讨论会论文摘要, 101.
- 钟以璋, 蒋秀芹, 陈爱萍, 1991. 辽宁地质灾害. 北京: 地质出版社, 121.
- 朱介寿, 曹家敏, 李显贵, 等, 1997. 中国及其邻区地球三维结构模型的建立. 地球物理学报, 40(5): 627—648.