

华北新构造:印欧碰撞远场效应与太平洋俯冲地幔上涌之间的相互作用

张岳桥¹⁾, 施炜²⁾, 董树文^{1,3)}

1) 南京大学地球科学与工程学院, 南京, 210023; 2) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081;
3) 中国地质科学院地球深部探测中心, 北京, 100037

内容提要:作为大陆内部典型的伸展断陷区和强震活动区,华北地区处于东部太平洋板块俯冲构造和西部印欧大陆碰撞构造的双重大地构造背景之下,其新构造运动相当复杂:西部沿鄂尔多斯地块周缘两个地堑盆地系引张伸展断陷作用、中部太行山块体的局部断陷和整体隆升、东部华北平原区和渤海湾海域区的区域沉降,南缘沿秦岭构造带的左旋走滑拉张活动,东缘沿郯庐断裂带的右旋挤压走滑活动。这些不同类型的断裂构造在晚新生代的阶段性活动,产生了复杂的构造地貌组合特征。综合研究发现,华北晚新生代经历了3期伸展断陷-挤压隆升演化阶段:新近纪晚期(10~2.5 Ma)、早中更新世和晚更新世以来。地壳引张应力方向或NW-SE、或NE-SW向;地块隆升导致湖盆的消亡,挤压应力方向为NE-SW至W-E向。研究认为,华北地区新构造受两个岩石圈构造过程的相互影响:印欧碰撞产生的远程效应和东部岩石圈地幔的上涌。一方面,青藏高原东北缘地块的持续推挤及其构造应力向东的传递导致鄂尔多斯地块反时针旋转和秦岭山地的向东挤出逃逸,这个挤出构造动力学统治了华北地区晚新生代的引张伸展、斜张走滑和挤压变形。尤其是,新近纪晚期强烈的NW-SE向地壳伸展变形与青藏东缘挤出造山作用同步(10~9 Ma至4.2 Ma);上新世末期(约2.5 Ma)、晚更新世早期(约200~70 ka)和晚更新世晚期—全新世(约20 ka以来)3次构造挤压事件与青藏高原东缘构造事件基本对应。另一方面,岩石圈地幔上涌主导了华北东部平原区的区域地壳沉降,同时伴随着早、中更新世的5期幔源火山活动。这两个岩石圈构造作用力此消彼长,深刻统治着华北地区新构造与现今活动构造以及地震构造。

关键词:新构造与活动构造;地壳伸展;挤压走滑与伸展走滑;印欧碰撞远程效应;岩石圈地幔上涌;华北地区

华北地块是中朝克拉通的组成部分,具有太古代结晶基底,于古元古代吕梁运动(1.8Ga之前)固结(Zhao Guochun et al., 2004),其上沉积了一套中元古代—早古生代的稳定的海相碳酸盐岩和碎屑岩地层序列。在三叠纪印支运动时期,华北地块与扬子地块汇聚拼贴,形成秦岭-大别-苏鲁碰撞造山带,东部则通过郯庐断裂带直接与扬子地块接壤,北侧与蒙古-松嫩地块缝合拼贴,形成阴山-燕山陆缘构造带。晚中生代燕山运动时期,受到古太平洋板块向东亚大陆俯冲和鄂霍次克俯冲-碰撞造山作用的联合影响,华北地块发生了强烈的陆内造山和岩浆作用,岩石圈显著减薄,克拉通遭受破坏(Wu

Fuyuan et al., 2008; Zhu Rixiang et al., 2011; Dong Shuwen et al., 2018),太行山东缘的南北向重力梯度带由此形成(Xu et al., 2009)。新生代时期,华北地块构造演化进一步发生东西分异(图1)。一方面,太行山以东地区的岩石圈发生强烈的伸展裂陷,伴随着地幔上涌和幔源岩浆喷发,形成了盆岭式的华北-渤海湾裂谷盆地(Ma et al., 1987),随后的持续热沉降-沉积作用,塑造了现今的华北东部平原和近海平原地貌。另一方面,太行山以西地区的环鄂尔多斯地带,发生了地壳引张伸展,形成了2个独立的断陷盆地系统:西缘的银川-河套裂谷系、东缘的汾-渭裂谷系(SSB, 1998; Zhang Yueqiao et

注:本文为国家自然科学基金项目(编号41472178)资助成果。

收稿日期:2019-03-25;改回日期:2019-04-16;网络发表日期:2019-04-22;责任编辑:周健。

作者简介:张岳桥,男,1963年生。教授,博士生导师。主要从事构造地质、盆地分析和区域地质的教学和研究工作。Email:zhangyq@nju.edu.cn。

引用本文:张岳桥, 施炜, 董树文. 2019. 华北新构造:印欧碰撞远场效应与太平洋俯冲地幔上涌之间的相互作用. 地质学报, 93(5): 971~1001, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019072.
Zhang Yueqiao, Shi Wei, Dong Shuwen. 2019. Neotectonics of North China: interplay between far-field effect of India-Eurasia collision and Pacific subduction related deep-seated mantle upwelling. Acta Geologica Sinica, 93(5):971~1001.

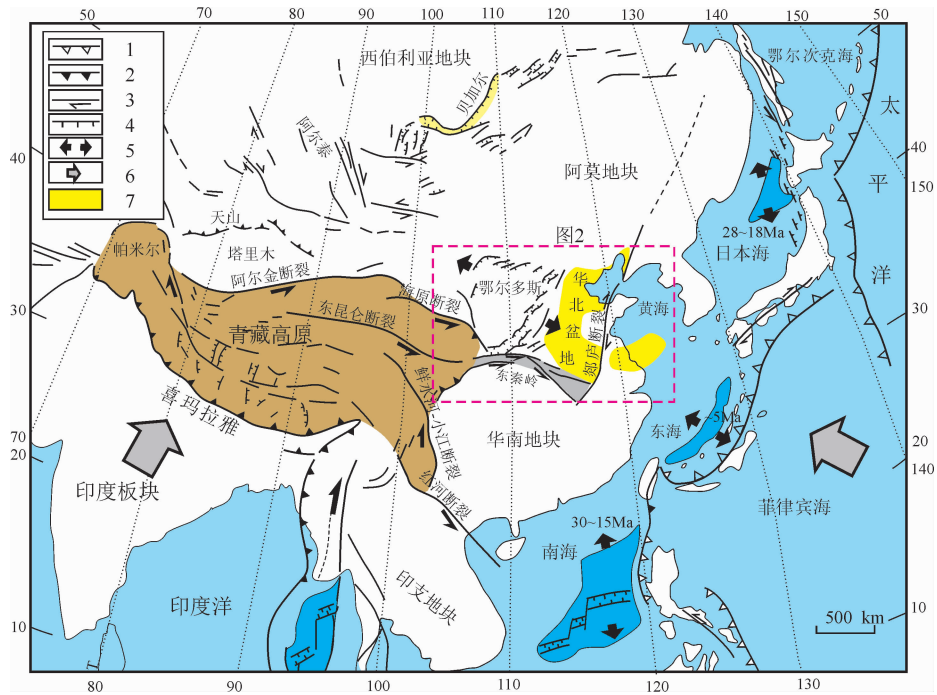


图 1 东亚新构造与活动构造纲要图及华北地区(红方框,图 2,3)新构造位置图(据 Zhang et al. , 2003a 改编)

Fig.1 Outline of Neotectonics and active tectonics of East Asia and location of North China

(red box for Fig. 2, 3) (modified from Zhang et al. , 2003a)

- 1—俯冲带;2—逆冲断层;3—走滑断层;4—正断层;5—伸展方向;6—块体运动方向;7—新生代伸展区
1—Subduction zone; 2—reverse fault; 3—strike-slip fault; 4—normal fault; 5—extensional direction;
6—block motion direction; 7—Cenozoic extensional zone

al. ,1998,2003a)。鄂尔多斯地块西南缘通过六盘山与青藏高原接触,鄂尔多斯地块本身保持稳定和刚性特征,没有遭受明显破坏(Zhang Yueqiao et al. ,2008,2011)。

活动构造和历史地震研究表明,华北地区是一个现代强震活动区,历史上记录了至少 17 次 7 级以上强震(Ma Zongjin et al. , 1982; Liu et al. , 2011),1966~1976 年,华北更是进入到一个强震频发时期,邢台、唐山等地震造成了重大的人员伤亡和财产损失。总体上,以太行山隆起东缘南北重力梯度带为界,可以将华北划分为东、西两个活动区:西部环鄂尔多斯地震活动区和华北东部地震活动区。每个区可进一步划分为若干个地震构造带,如华北北缘的张家口-蓬莱地震构造带、郯庐地震构造带、太行山东缘地震构造带、汾渭地震构造带、银川地震构造带等(Han Zhujun et al. ,2003)。这些带的地震活动性引起了国内外学者的高度关注(Liu Mian, 2011,2016;Yin An, 2016)。

由于其特定的大地构造位置、复杂的构造地貌特征、强烈的板内地震活动以及久远的人类文明历史,使得华北地区成为板内新构造和活动构造研究

的理想场所之一(Shen et al. , 2000; Deng Qidong et al. ,2003;Liu Mian et al. , 2011; Zhang Peizhen et al. ,2013)(图 1)。尽管前人对华北地震区及其地震构造带做了大量的调查研究,积累了丰富的新构造和活动构造观察资料,但针对华北地区新构造和活动构造的演化阶段及其板内变形动力学问题,一直存在争论,或与印欧大陆碰撞产生的远场挤出效应有关(Tapponnier et al. , 1982; Zhang et al. , 1995),或与太平洋板块俯冲板片引起的深部岩石圈地幔上涌作用有关(如 Northrup et al. , 1995),或者两者共同作用的结果(Yin, 2010)。这两种构造力如何共同作用于华北克拉通、在时空上如何此消彼长、如何控制华北地区的新构造演化历史等,成为华北新构造和活动构造研究的关键科学问题。

新构造概念不同于活动构造,通常将新生代晚期的一切构造变动称为新构造运动。但不同地域新构造运动的起始时间是不一致的,存在 2 种端元主张:长运动期限主张将新构造运动推至整个喜马拉雅运动或从渐新世初开始;而短期限将新构造运动限于第四纪、甚至从中更新世开始(Liu Guangxun, 1995)。Zhang Yueqiao et al. (2006)根据环鄂尔多

斯构造地貌演化历史,将华北地区新构造定义为中新世晚期(~10 Ma)以来的一切构造-地貌事件总合。Wu et al. (2014) 基于青藏高原的研究成果,对新构造、活动构造和地震构造的概念、分类及其研究内容等做了详细的论述。本文基于区域新构造和活动构造编图,综合梳理了前人在晚新生代盆地地层、构造地貌、活动断层活动和构造应力场、第四纪火山岩等方面的研究成果,试图建立华北地区晚新生代以来的新构造演化阶段,包括地壳引张伸展阶段、主要构造隆升事件、构造应力体制转变等,并将这些构造-地貌事件与青藏高原东缘晚新生代挤出造山作用历史进行对比,结合华北平原第四纪火山活动历史,探讨华北地区新构造运动与构造地貌过程的内动力作用方式,重点讨论印欧大陆碰撞产生的远场效应和深部岩石圈地幔上涌作用之间的相互影响。

1 华北构造地貌特征

华北地区由不同的构造地貌单元组成(图 2):西部为鄂尔多斯地区的黄土高原和毛乌素沙地,中部为吕梁山和太行山高地,东部为华北平原区;周邻的山脉包括北部的阴山-燕山,南部秦岭-桐柏-大别山、西部贺兰山、狼山,东部为苏、鲁丘陵山区。黄河自西向东呈 Z 字形横贯整个地区,是中华文明的发源地。

鄂尔多斯高原中生代期间为著名的鄂尔多斯盆

地,或称陕甘宁盆地,是一个重要的富含多种能源资源盆地,包括油、气、煤、砂岩型铀矿等,由南部的黄土高原和北部的毛乌苏沙地 2 个地貌单元组成,平均海拔 1500~1100m。黄土高原堆积了一套厚 200~300m 红黏土-黄土-古土壤沉积地层序列,完整地记录了新近纪晚期至第四纪时期的气候环境演化变迁历史。由于受到黄河水系的深切和渭河流域的溯源侵蚀,黄土高原发生严重的水土流失现象,沟豁纵横,黄土塬地貌多分布在北部河流不发育地区。

作为华北克拉通的组成部分,鄂尔多斯在地质上是一个稳定的地块,地壳厚度约 40km,但其周缘为不同的活动构造地貌单元所围绕(SSB, 1998)。西北缘为呈弧形展布的银川-河套地堑盆地,受控于西侧或西北、北侧的大型正断层作用,包括:贺兰山东缘断层、狼山断层、大青山断层等,这些断层正倾滑活动不仅控制了银川盆地、吉兰泰盆地和河套盆地的沉积-沉降,也导致了贺兰山、狼山、大青山等山脉的快速隆升。贺兰山平均海拔 2000~3000m,主峰达 3556m。与西北缘相对照的是,鄂尔多斯南缘和东南缘也是活动的断陷盆地,即著名的渭河地堑,或关中平原,平均海拔在 300~800m。这些盆地的南侧为一系列高山屏障,包括秦岭山脉、华山、中条山等,这些山脉的平均海拔在 2000~3000m。而鄂尔多斯西南缘是一个特殊的地貌边界,称为六盘山,

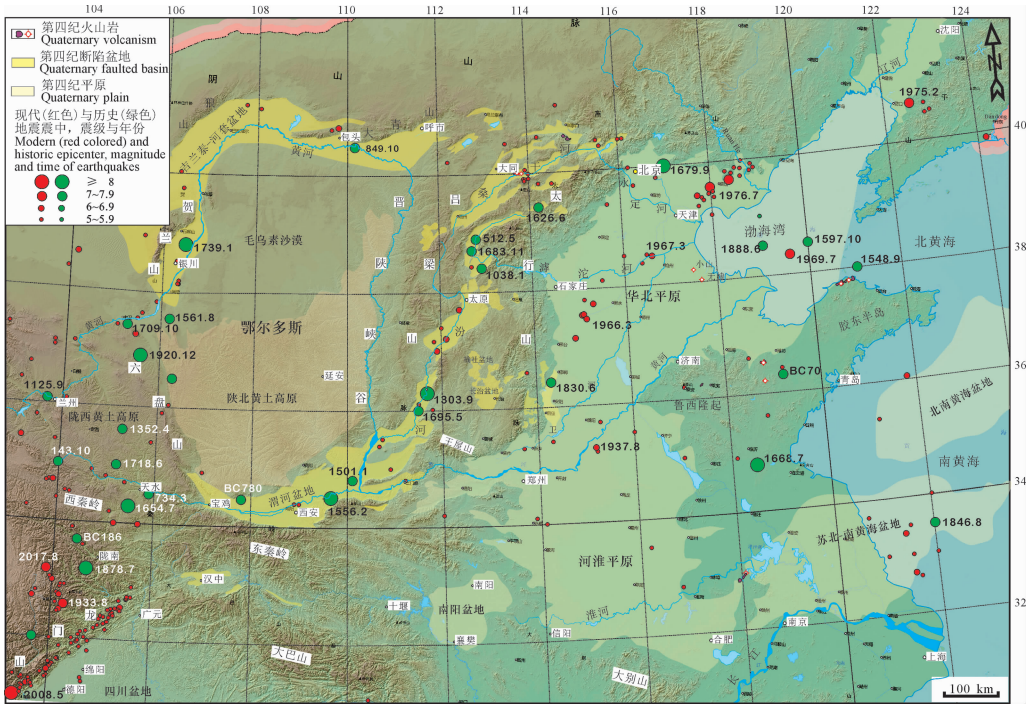


图 2 华北地区新构造地貌、晚新生代盆地与历史中强地震震中分布图(位置见图 1)

Fig. 2 Topography, late Cenozoic basin distribution and historic strong earthquakes in North China (for location see Fig. 1)

该山脉分隔了东部的黄土高原和西部的陇西黄土高原(Xiang Hongfa et al., 1998),后者构成了青藏高原的东北隅(Zhang Yueqiao et al., 2016)。

中部太行山-吕梁山隆起或高地,也称山西隆起,由 3 个主要地貌单元组成,以中部山西地堑地带为界,以西山地称为吕梁山隆起,其西界通过南北向离石断裂与鄂尔多斯地块相接;以东地区为太行山隆起,平均海拔高程在 1000~1200m,隆起北部有著名的五台山、恒山等文化名胜,南缘为王屋山和中条山,东缘边界形态不规则,通过一系列拆离断层与华北平原相邻。隆起的中轴带由一系列呈雁列状排列的地堑盆地组成,构成山西地堑系,是汾-渭裂谷系的重要组成部分。

太行山隆起残留两级主夷平面(Wu Chen et al., 2000)。高一级位于地形高程 1800m 以上,以太行山南缘王屋山和林州盆地西部大峡谷以西的山体为代表,在山西北部五台山地区称为北台面,形成于古近纪晚期。低一级夷平面称为唐县面,形成于中新世末至上新世初,因上新世以来地块伸展和差异性隆升,使该夷平面所处高程不一,在山地区一般为 800~1200m,而在山麓东缘地带降低至 150~200 m。

太行山以东的华北东部地区为第四纪沉积平原,包括渤海湾海域、河北平原、河淮平原、苏北平原等,平均海拔 40~50m。东部丘陵山区有:胶东半岛、鲁西山区(或鲁西隆起)、苏-鲁山区等,这些地区出露华北前寒武纪基底变质岩。

黄河从青藏高原东北隅陇西黄土高原深切宁夏东南部逆冲褶皱带,经青铜峡流入到银川盆地和流经河套盆地地区,在盆地东端发生向南大拐弯,深切鄂尔多斯高原东缘,形成“晋-陕大峡谷”,著名的壶口瀑布即发育于该峡谷的南段。根据宝德地区黄河高阶地残留的新近纪湖相地层和红黏土层的沉积环境和古地磁测年研究结果认为,该段黄河在 1.2 Ma 发生了河流袭夺事件,晋-陕大峡谷开始贯通(Pan Baotian et al., 2012)。黄河流入渭河盆地,在潼关一带与渭河合流,受到南部华山的阻挡,又一次向东大拐弯,经三门峡以下至孟津 150km 峡谷段,穿行于中条山与崤山之间,流入华北东部平原区,向东抵达边缘海区,从而勾画了黄河主河道 Z 字展布形态。

2 环鄂尔多斯伸展断陷盆地构造

作为华北克拉通的组成部分,鄂尔多斯是一个

稳定的地块,周缘被造山带或山系所包围,北部为大青山,西部为贺兰山、桌子山、狼山,东部为吕梁山,南部为秦岭,这些山系主体形成于晚中生代(晚侏罗世—早白垩世早期)燕山运动时期,是华北克拉通陆内造山作用的主要构造形迹(Dong Shuwen et al., 2018)。中晚白垩世,鄂尔多斯地块西缘和北缘发生裂陷,形成六盘山、吉兰泰-河套地堑盆地,其中堆积了一套河湖相地层(Zhang Yueqiao et al., 2011)。始新世—渐新世时期,鄂尔多斯地块西北缘和南缘发生强烈的伸展断陷作用,形成银川、河套、渭河等地堑盆地,其中沉积了一套几千米至上万米的含膏盐的河湖相地层,这期伸展断陷作用一直持续到中新世(Zhang Yueqiao et al., 2006)。上新世—第四纪时期,伸展断陷作用进一步扩展到鄂尔多斯地块的东缘,沿山西高地的轴向地带山西地堑系扩展,从而形成了 2 个独立的新生代裂谷系:银川-河套裂谷系和汾渭裂谷系(Zhang Yueqiao et al., 1998)(图 3)。

2.1 银川-河套裂谷系

由银川盆地、吉兰泰盆地和河套盆地组成,平面上呈弧形展布,黄河贯穿其中(图 4)。这些盆地缺失古新世沉积,始新统一渐新统直接超覆在早白垩世地层之上,以河湖相泥岩、粉细砂岩和砂岩互层为主(Fu Zhiyan et al., 1994),其中临河坳陷厚度超过 10000m,中部的白彦花坳陷在 3000m,东部的呼和坳陷超过 6000m,银川盆地 7000~7200 m。这些盆地主体受山前正断层控制,包括贺兰山东麓、狼山、色尔腾山、乌拉尔山、大青山等山前断层(SSB, 1998)。

最新的深反射地震剖面结果显示(Feng Shaoying et al., 2011; Huang Xingfu et al., 2015; Li Yan et al., 2017; Liu Baojin et al., 2017),银川盆地主要由 2 个相互独立的断陷组成,受一系列高角度伸展正断层控制,包括盆地西缘的贺兰山东麓断裂、盆地内部隐伏的芦花台断裂(Wang Yin et al., 2015)、银川断裂和盆地东侧向西陡倾的黄河断裂等。盆地浅部为上新世—第四纪凹陷盆地,最大沉积厚度在 1300~1000m。1739 年平罗 8.0 级地震的发震断层可能位于银川断层或芦花台断层与贺兰山东麓断层的深部交汇处(Lei Qinyun et al., 2015; Wang Yin et al., 2015)(图 4)。

横穿呼包坳陷东段的深反射地震剖面揭示了不对称发育的河套断陷盆地(Feng Shaoying et al., 2015)(图 4),浅部沉积-沉降作用主要受控于大青山

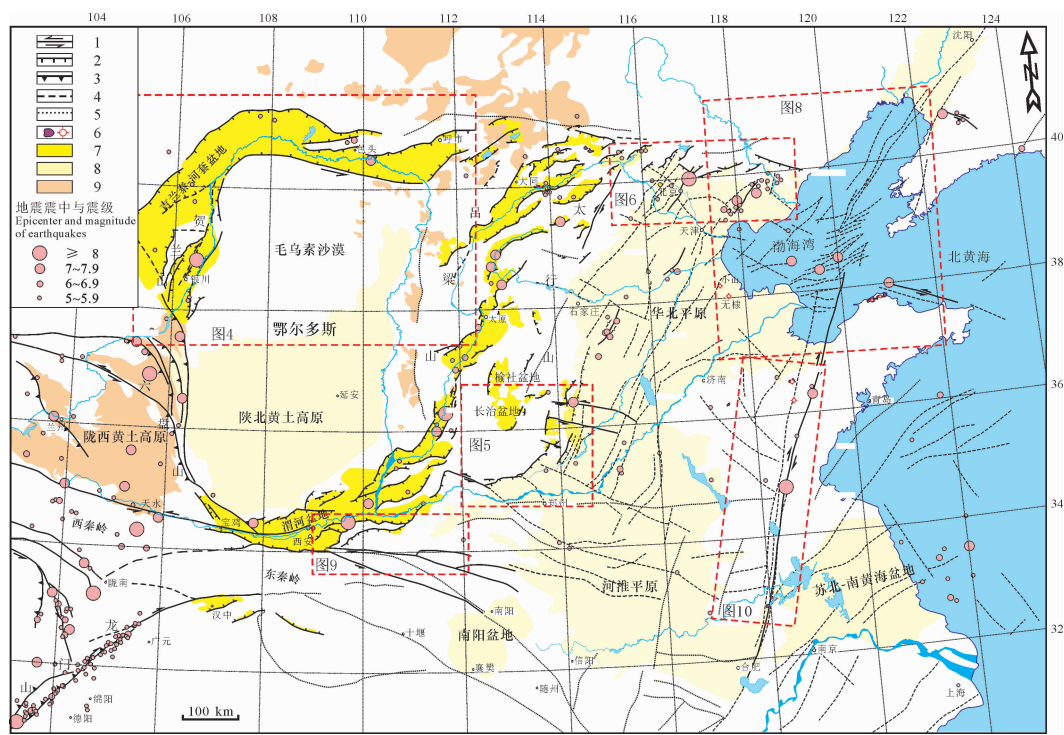


图 3 华北地区新构造和活动断层分布图(主要断裂根据卫星遥感图、地形图解释;盆地第四纪隐伏断层根据石油公司勘探资料编辑;地表晚新生代地层分布根据中国 1 : 250 万地质图编辑。红色虚线框为其他插图位置)

Fig. 3 Neotectonics and active faults in North China (Main active faults drawn from satellite imagery interpretation and DEM topography; buried Quaternary faults in the basins compiled from data of petroleum companies; surface late Cenozoic deposits according to 1 : 2500000 geological map; red dashed boxes refer to the location of other figures)

1—走滑断层; 2—正断层; 3—逆断层; 4—隐伏断层; 5—基底线性构造; 6—第四纪火山岩; 7—上新统-第四系; 8—平原沉积; 9—新近纪红层

1—Strike-slip fault; 2—normal fault; 3—reverse fault; 4—buried fault; 5—basement lineament; 6—Quaternary volcanism; 7—Pliocene-Quaternary; 8—Plain deposit; 9—Neogene red clay

山前断层的伸展倾滑,深部构造主要受控于盆地南缘断层,即鄂尔多斯北缘断层,这是一条向北陡倾的深大断裂,明显错断了莫霍面,并显示由北向南的逆冲运动特征,与晚中生代大青山逆冲推覆构造有关。

上述 2 条深反射地震剖面所揭示的深部结构特征指示,近 W-E 走向的鄂尔多斯北缘断裂和 NNE 走向的黄河断裂同属于一条重要的深大断裂,共同构成了稳定的鄂尔多斯地块与活动的西北缘地壳裂谷带的边界(图 4)。这种弧形展布特征很可能继承了燕山期陆内造山带的构造格局。

石油钻井资料分析结果显示,河套盆地上新世乌兰图克组为一套黄灰、棕黄色泥岩、砂质泥岩与泥质砂岩、含砾粉砂岩及砾状细砂岩,底部厚层、块状含砾砂岩,厚约 1290m,与下伏中新世五河组假整合接触,与上覆第四系不整合接触。盆地第四系主要为一套连续沉积的河湖相棕黄色、灰绿—黄褐色砂黏土与粉砂层互层、间夹舌状或透镜状砂砾层,下、中更新统、中、上更新统之间存在沉积间断,记录了盆地古湖泊发育及其消亡萎缩的历史。研究发现

(Chen Fahu et al. , 2008),第四纪河套古湖泊发生 3 期消亡或大规模萎缩阶段:中更新世中期(524~451 ka)、中更新世早晚期(430~385 ka)、晚更新世晚期(约 24 ka),发育了棕黄色砂砾石、砾石和含砾岩屑杂砂等冲洪积相沉积。中、晚更新世河套古大湖约始于距今 100~120 ka 之前(Jiang Fuchu et al. , 2012; Li Jianbiao et al. , 2005, 2007),于 50~60 ka 形成一个统一的“吉兰泰-河套”古大湖(Chen Fahu, 2008; Chen Fahu et al. , 2008),并一直持续到距今 30 ka。河套古大湖的消亡萎缩历史与黄河晋-陕峡谷段的侵蚀贯通过程密切相连(Chen Shaoping et al. , 1998; Pan Baotian et al. , 2012)。

银川盆地钻遇的第四系最大厚度约 704m,为一套连续沉积的河湖相地层(Tong Guobang et al. , 1998)。下更新统银川组(2.48~0.80 Ma BP)为一套河湖相沉积,由土黄色及浅灰色中细砂夹砂砾石与黏土、砂质黏土、黏质砂土组成,最大厚度约 500m,平均沉积速率约 0.3mm/a,与下伏上新统为假整合接触。中更新统贺兰山组(0.8~0.12Ma

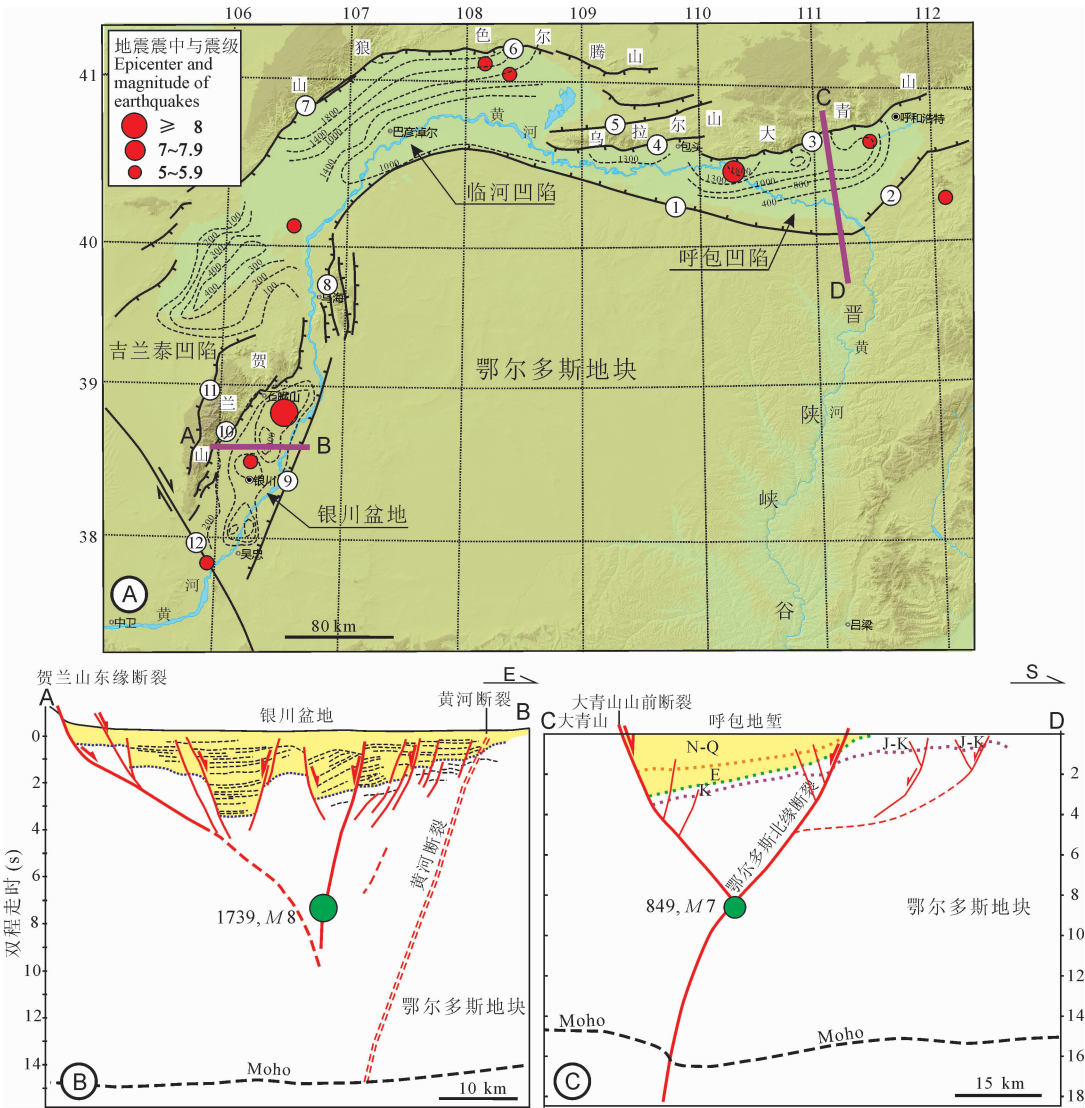


图 4 银川-河套裂谷系新构造图(A)与地壳反射结构剖面图

(B,C,绿色圆点为推测的 2 次历史强震震中位置、发生的年份和震级)(位置见图 3)

Fig. 4 Neotectonic map of the Yinchuan-Hetao graben system (A) and structural sections (B, C, green circles represent inferred epicenter location of the two big historic earthquakes with the year and magnitude indicated aside) (see Fig. 3 for location)

横穿银川盆地的深地震反射剖面(B)根据 Huang Xingfu et al. (2015)、Liu Baojin et al. (2017)编制,展示了近乎对称的银川断陷盆地结构和东侧西倾的黄河断裂,显著的反射特征揭示黄河断裂为一条大型地壳、甚至岩石圈剪切带,可能错断 Moho 面。横穿呼包盆地的地壳反射结构(C)根据 Feng Shaoying et al. (2015)资料改编,849 M7 历史地震根据 Nie Zongsheng et al. (2010)资料。主要断层:①—鄂尔多斯北缘断层;②—和林格尔断层;③—大青山山前断层;④—乌拉尔南缘断层;⑤—乌拉尔北缘断层;⑥—色尔腾山南麓断层;⑦—狼山东麓断层;⑧—乌海断层;⑨—黄河断层;⑩—贺兰山东麓断层;⑪—贺兰山西麓断层;⑫—青铜峡断层

Structural section across the Yinchuan graben (B) is interpreted from a seismic profile of Huang Xingfu et al. (2015), Liu Baojin et al. (2017), it shows nearly symmetric architecture of the basin and the W-dipping Huanghe fault possibly cutting into the Moho. The structural section across the Hubao basin is interpreted from a seismic profile of Feng Shaoying et al. (2015), and the epicenter of the 849, M7 earthquake according to the data of Nie Zongsheng et al. (2010). Main faults: ①—Ordos northern boundary fault; ②—Helinger fault; ③—Daqingshan frontal fault; ④—Wulaer southern frontal fault; ⑤—Wulaer northern frontal fault; ⑥—Seertengshan southern frontal fault; ⑦—Langshan eastern frontal fault; ⑧—Wuhai fault; ⑨—Yellow River fault; ⑩—Helanshan eastern frontal fault; ⑪—Helanshan western frontal fault; ⑫—Qingtongxia fault

BP) 厚约 80m,岩性下段较粗、上段较细,沉积速率约 0.12 mm/a。上新统惠安组(0.01~0.12Ma BP)厚 100m,一套灰色河湖相沉积,由粉细砂与粉砂质

黏土及黏质粉砂组成,平均沉积速率约 0.9 mm/a。全新统大滩组厚约 30 m,为一套河流、湖沼相沉积。

活动断层与古地震研究结果显示,控制吉兰泰-河套盆地的狼山、色而腾山、乌拉尔山、大青山等山前断层均是晚更新世—全新世活动正断层,沿山前带发育多级中晚更新世台阶地貌(He Zexin et al., 2014)。前人对这些山前活动地貌进行了大量的地震地质调查和古地震研究(Chen Lichun et al., 2003; Jiang Wali et al., 2000a; Li Yanbao et al., 2015; Ma Baoqi et al., 1998; Nie Zongsheng et al., 2010; Yang Xiaoping et al., 2002, 2003),探槽揭示这些正断层活动至少记录了晚更新世以来62次、全新世33次古地震事件(Rang Yongkang et al., 2003)。银川盆地隐伏活动断层探测,揭示了银川断层、芦花台断层的晚更新世—全新世活动特征(Wang Yin et al., 2015)。

2.2 汾-渭裂谷系

由渭河地堑盆地和山西地堑盆地系组成,整体上呈S型展布,两端宽,中间窄,全长>2000 km。

渭河盆地也称关中平原,由多个子凹陷组成,包括:西安凹陷、固思凹陷、运城盆地、三门峡盆地等,其沉积-沉降主体受南缘和东南缘边界伸展断裂控制,形成盆-山地貌。反射地震剖面、钻孔资料和地表地层序列研究认为,该断陷盆地起始于中晚始新世(~50 Ma)(Liu Hujun and Xue Xiangxi, 2004),其中加积了一套巨厚(>10km)的陆相沉积地层(Ren Sun et al., 2013; Wang Bin et al., 2015),最重要的沉降作用发生在古新世和中新世晚期。晚中新世—上新世—早中更新世为一套连续的河湖相沉积地层,最大厚度可达1000m。在临潼灞河地区,晚中新世—上新世蓝田组或游河组为三趾马红黏土的风成沉积,可与黄土高原宝德组对比,超覆不整合在中新世灞河组之上(Bellier et al., 1998; Li Zhichao et al., 2016)。在三门峡盆地,上新世至早中更新世的“三门群”记录了古三门湖的发育历史,其磁性地层时代5~0.15 Ma(Wang Shubin et al., 1999),超覆不整合在中新世平陆群之上。第四纪河流地貌调查研究显示,渭河盆地西段发生了3次强烈的河流下切(约0.77Ma,约0.55~0.13Ma),东段发生了相应的3次湖退(Hu Xiaomeng et al., 2012)。河流地貌的发育与湖退事件与黄河沿三门峡-孟津峡谷段的侵蚀贯通过程密切相关。“古三门湖”于中更新世晚期消亡,晚更新世乾县组超覆不整合在三门组地层之上,预示了黄河在这个时间的最后东西贯通。活动断层研究表明,渭河盆地内晚第四纪活动断层以正倾滑活动为主,断层活动的迁移性很明显

(Feng Xijie et al., 2004; Tian Qinjian et al., 2003)。

山西地堑系分为北段和中段两部分。北段处在桑干河、滹沱河流域,以盆岭构造地貌为特征,由一系列盆地与山岭组成,断陷盆地主要受到北西倾的正断层控制,主要盆地包括:大同盆地、阳原盆地、蔚县盆地、忻州盆地、延庆盆地等。大部分断陷盆地于中新世晚期(约8Ma)开始发育,有些盆地如东部的蔚县、灵丘等,于早、中更新世才开始形成。在盆地中加积了一套河湖相地层,即泥河湾层,因其富含哺乳动物化石群和古人类遗存而著名,前人对其做过详细的调查和生物地层、磁性地层和释光年龄测量(Min Longrui et al., 2006; Wang Hongqiang et al., 2004; Yuan Baoyin et al., 1996; Zhang Zhaoqun et al., 2003; Zhang Zongfu et al., 2003; Zhu Rixiang et al., 2007)。研究过的地层剖面主要出露在阳原盆地和蔚县盆地的东部地区,其中以红崖南沟剖面地层出露最全最好。从现有地层剖面资料和磁性地层学研究结果分析,山西北部断陷盆地连续沉积了一套河湖相地层,由3套地层组成。下部为上新统蔚县组(古地磁年龄>3.40~2.48Ma),也称为三趾马红土,一套红色碎屑岩沉积,由棕黄色粉细砂、紫色砾岩、棕红色泥岩、褐红色泥岩等组成,含有丰富的小哺乳动物和腹足类、瓣鳃类化石,可与黄土高原静乐组红黏土层对比。中段早更新世泥河湾组(古地磁年龄2.5~1.0Ma)不整合超覆在三趾马红土层之上,以黄色砂、粉砂、黏土质粉砂为主,夹有灰绿色黏土,含有脊椎动物化石和小哺乳动物化石。该组底部具大型板状交错层理的砂砾层,反映河流相沉积环境,之上相变为滨浅湖相黏土质粉砂层、夹细砂层和钙板层,具水平层理,可与黄土高原午城黄土对比。上段中更新世郝家台组(古地磁年龄0.97~0.13Ma),由黄绿、灰绿色粉砂质黏土夹红棕色黏土质粉砂组成,发育石膏透镜体或石膏小晶体,以微咸化湖泊性质为特征,大致与离石黄土对比。该湖盆曾发生过2次大幅湖退事件(0.77 Ma BP和0.55 Ma BP)(Hu Xiaomeng et al., 2010a, 2011),并于晚更新世早期(约130 ka)彻底消亡,130~70 ka是一个沉积间断期,代表了湖盆的隆升与侵蚀阶段,其上被晚更新世马兰黄土层、古土壤层(时代在47~19ka)所覆盖(Min Longrui et al., 2006)。值得一提的是,在山西北部的阳原盆地和大同盆地,发育中更新世幔源基性火山岩,以橄榄玄武岩、玄武岩为主,火山锥地貌十分清楚。K-

Ar 同位素测年结果指示这期火山喷发时代约 0.68Ma,即中更新早期(Cen Min et al., 2015)。

山西地堑中段处于汾河流域,由 NE 走向的晋中盆地和 2 个近南北向的连接构造带组成。南部霍山构造带连接了晋中与临汾盆地,北部带连接了晋中与忻定盆地(Zhang et al., 1998)。构造地貌、新构造和活动构造的野外调查研究发现,这两个连接构造带的边界断裂具有伸展右旋走滑运动特征(Hu Xiaomeng et al., 2010b; Jiang Wali et al., 2004; Ren et al., 2014; Xu et al., 1993),但新的研究发现右旋走滑并不明显,而以伸展正断作用为主(Xu Yueren et al., 2013)。临汾盆地沉积了一套上新世—第四纪河湖相地层(Chen Xingqiang et al., 2016),上新世(5.0~2.6 Ma)下部为一套块状砂砾岩层、上部为土状特征的粉砂、红黏土层,可与三门峡盆地“三门群”对比。下、中更新统由砂岩、粉砂岩和泥岩组成的多旋回湖泊—三角洲相沉积组合,水体由深变浅,于晚更新世最终消亡,指示汾河的南北贯通,其上被马兰黄土所覆盖。Xu Xiwei et al. (1990)注意到,在临汾盆地北段东侧山前地带的上新世砾岩层和中下更新统砾岩层均发生了大角度倾斜,砾石层倾角达 $45^{\circ}\sim 57^{\circ}$ 和 $22^{\circ}\sim 25^{\circ}$,而中更新世晚期和红色土和上更新统黄土则呈水平状,指示第四纪时期,山西地堑盆地遭受过强烈挤压变形。

3 太行山隆起中南部和东南缘断陷盆地

太行山隆起是华北中部地区重要的构造地貌单元,新生代以来,该单元快速隆升而形成高地,遭受强烈侵蚀,发育深切河谷地貌。太行山北部因第四纪强烈伸展而发育断陷盆地,成为山西地堑系北段的组成部分。太行山中南部沁水盆地(平均海拔 1000~1200m)是一个残留的中生代含煤沉积盆地(Qin Yong et al., 2008),晚新生代发生引张伸展,叠加了近南北延伸的断陷盆地,包括榆社盆地和长治盆地,其中加积了一套晚新近纪—第四纪河湖相沉积地层,记录了这个高地新构造演化历史(Zhu Dagang et al., 2009)。

前人对榆社盆地做了大量的地层剖面测量、沉积特征分析,基本建立了该盆地生物地层时代、磁性地层年代等(Cao Zhaoyuan et al., 1985; Dong Yongsheng et al., 1995; He Peiyuan, 1984; Liu Lansuo, 1983; Qiu Zhanxiang et al., 1990; The Editor Committee of the China's Strata, 1999; Zhu

Dagang et al., 2009)。榆社盆地晚新生代地层厚度约 450m,由 4 套地层序列组成。顶部为桔黄色亚黏土层,时代早更新世,与下部地层为不整合接触。上部麻则沟组,厚约 70m,为一套黄色粗砂岩,其中含有大量的上新世哺乳动物化石(MN16),对应的地质时代 3.4~2.6 Ma;中部高庄组,厚约 310 m,岩性以砂岩、含砾砂岩、细砂岩和黏土层为主,含高庄动物群,产 70 余种哺乳类动物化石,可与欧洲上新世 Ruscinian 期(MN14+15)对比,对应地质时代为 5.3~3.4 Ma,也可与稻地动物群、渭河的游河动物群和静乐的贺丰动物群对比。底部马会组是一套厚约 70 m 砾岩夹粗砂岩层,其中的哺乳动物化石指示其时代为中更新世晚期。总体上,这套新近系地层序列记录了榆社盆地从初期的冲洪积河流相、到中期的湖相、到晚期的河流相演化历史,于上新世晚期遭受区域构造挤压,湖盆消失,沉积地层发生了轻微的变形。

太行山南部的长治盆地普遍缺失新近纪沉积,但加积了一套约 200 m 厚的第四纪沉积物,下更新统为湖积黏土夹数层淡水水泥灰岩,中更新统为冲洪积黄土、砂质黏土,上更新统为马兰黄土,全新统为冲洪积层及粉砂层,产状近水平(Zhang Xinjing, 2015)。

在太行山隆起东南缘发育一系列规模较小的山间断陷盆地(图 5),如林县盆地、武安—伯延盆地、临淇镇盆地、涉县盆地等,盆地地形平坦,海拔高程在 500m 左右,中间山地海拔高程为 550~700 m 之间,主体由早古生代碳酸盐岩组成(Zhang Yueqiao et al., 2003)。最大沉积厚度位于林县盆地的西侧,厚度约 300m 左右。在地表露头,上新统下部是一套白色河流相砂岩、上部为红黏土层,不整合超覆在中新世砂砾岩层之上。下更新统为一套厚 10~25 m 红色泥砾岩,由砾石和红色泥质胶结物组成。钻孔资料揭示,东缘汤阴地堑盆地充填一套上新世河流相为主的红色砂、砾岩和早、中更新世河湖相沉积,被晚更新世冲、洪积次生黄土所覆盖(Liu Baojin et al., 2012)。

太行山隆起南缘属于地貌陡变带,从高地到山前平原平均高差达 900 m。王屋山位于南部西南侧,其南侧 NWW-SEE 向王屋山断裂控制了垣曲盆地的发育,并被黄河深切,形成峡谷地貌。沿济源、焦作一带,山前边界断裂走向由 W-E 转至 NEE-SWW,断层南倾,倾角约 50° 。这些断层正倾滑运动控制了山前济源断陷盆地的沉积—沉降作用,在焦作一带第四系厚度达 200~175m(Zhang Yueqiao et

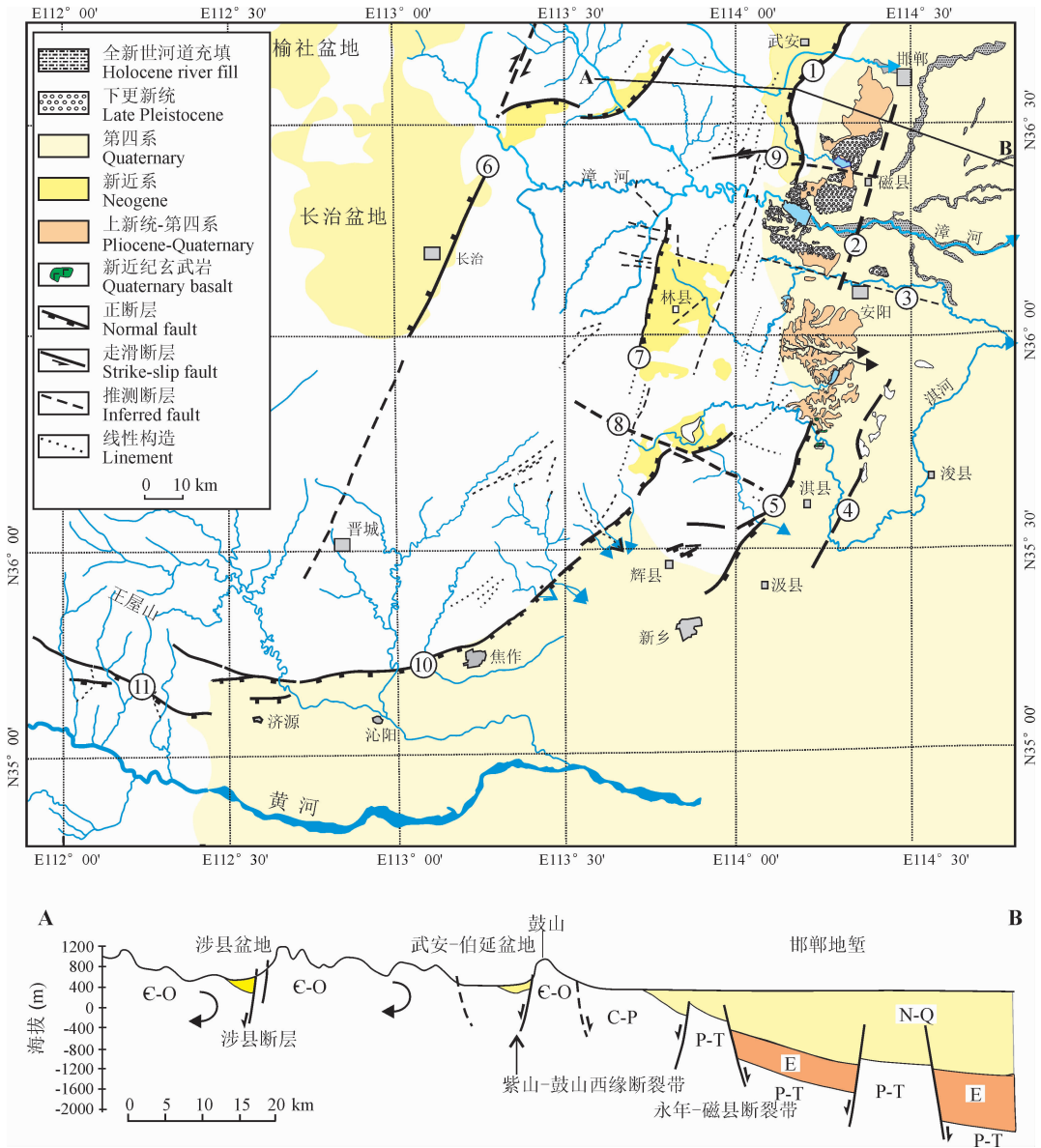


图 5 太行山隆起南部及其东南缘山间断陷盆地与新构造地貌分布图(据 Zhang Yueqiao et al. , 2003 编制, 位置见图 3)和横穿太行山东缘的构造剖面图(A—B)

Fig. 5 Distribution map of intermountain basins and neotectonic morphology of the southern Taihang Mountain highland and its SE margin (compiled from Zhang Yueqiao et al. , 2003), and structural section across

the SE margin of the Taihang Mountain highland (A—B)主要断层:①—紫山-鼓山西缘断裂

带;②—永年-磁县断裂;③—安阳断裂;④—汤东断裂;⑤—汤西断裂;⑥—长治-晋城断裂;⑦—林州西断裂;⑧—临淇镇南断裂;⑨—南山村-岔口断裂;⑩—焦作断裂;⑪—王屋山南缘断裂;N-Q—新近系-第四系;E—古近系;P-T—二叠系-三叠系;C-P—石炭系-二叠系;Є-O—寒武-奥陶系

Main faults:①—Zishan-Gushan frontal fault; ②—Yongnian-Cixian fault; ③—Anyang fault; ④—Tangdong fault; ⑤—Tangxi fault; ⑥—Changzhi-Jincheng fault; ⑦—Linzhou west fault; ⑧—Qilinzen south fault; ⑨—Nanshancun-Chakou fault; ⑩—Jiaozuo fault; ⑪—Wangwushan fault; N-Q—Neogene-Quaternary; E—Paleogene; P-T—Permo-Triassic; C-P—Permo-Carboniferous; Є-O—Campbro-Ordovician

al. ,2003)。

4 东部平原区新构造

位于太行山隆起以东的华北东部平原区,大致

以东西向黄河及其东延为界,陆域部分分为北部平原区和南部河淮平原区(图 2,3)。

北部平原区:包括北京、河北、山东、河南等平原地区,该区基底在古近纪时期遭受了强烈的地壳伸

展断陷作用,形成一系列受 NE-NNE 向铲式正断层控制的地堑盆地(Wang et al. , 1997),其中加积了一套河湖相砂泥岩(孔店组、沙河街组、东营组),发育一套优质烃源岩,是华北油气资源勘探开发的主力目标层位。中新世—上新世时期,整个断陷伸展区发生裂后热沉降,伴随强烈的幔源岩浆活动,接受了上千米厚的馆陶组和明化镇组河湖相沉积。第四纪盆地演化总体继承了区域沉降构造格局,断裂活动不明显,其中加积了一套连续的河湖相沉积,平均厚度在 400~600m。盆地北缘与燕山隆起交接,作为张家口-蓬莱构造带的组成部分,由一系列 NE 向断陷盆地和控盆断裂组成,武清凹陷第四系沉积厚度大于 1000 m (Jiang Wali et al. , 2000b; Xiang Jiacui et al. , 1987; Zhao Yong et al. , 2013) (图 6)。第四纪平原组有 6 个岩性单元(Shao Shixiong et al. , 1983)(图 7),从老到新为:下更新统红色层和棕色层、中更新统棕色层和黄色层、晚更新统黄色层、全新世灰色层,并发育 5 个火山喷发期:早更新世早期(马村期),由凝灰岩、沉凝灰岩、安山玄武岩等组成,位于早更新世“红色层”底部,分布在盐山、黄骅、海兴一带。早更新世(沧州期),位于早更新世“棕色层”下段,由橄榄玄武岩、岩屑凝灰岩、沉凝灰岩等组成,分布在沧州、孟村、黄骅、盐山、海兴一带。

中更新世早期(杨庄期),位于早更新世“棕色层”上段,以岩屑凝灰岩为主,仅见于黄骅县杨庄以东地区。中更新世晚期(苏基期),位于“黄色层”下段底部,埋深 140~180 m,以岩屑凝灰岩、玄武岩为主,最大厚度>20 m。晚更新世晚期的小山期火山岩出露于河北沧州小山村,也有钻孔钻遇,火山堆地貌特征明显,由岩屑凝灰岩、玄武岩(厚约 17 m)、沉凝灰岩等组成,位于“黄色层”顶端,顶部为全新世古土壤。Hu Yunzhuang et al. (2014)、Pei Junling et al. (2015)基于河北平原海兴地区钻孔 CK3 地层岩芯的磁性地层学研究和⁴⁰Ar-³⁹Ar 测年结果,确定了沧州期火山岩喷发时代为 2.36Ma,其他 2 期喷发时代分别为 ~1.34 Ma、35~70 ka (图 7)。Yin Gongming et al. (2013)对出露于小山的基性火山岩进行了电子自旋共振(ESR)测年,给出的喷发时代在 41.4±8.6ka。

第四纪火山岩也零星出露于华北不同地区,包括山东无棣大山玄武岩、安徽女山玄武岩、山西大同玄武岩等,前人利用 K-Ar 测年、热释光测年、裂变径迹(FT)测年等方法,确定了第四纪火山活动时间及其地球化学特征(Ding Mengling et al. , 1984; Chen Daogong and Peng Zhicheng, 1985, 1988; Wang Huifeng et al. , 1988; Zheng Honghan et

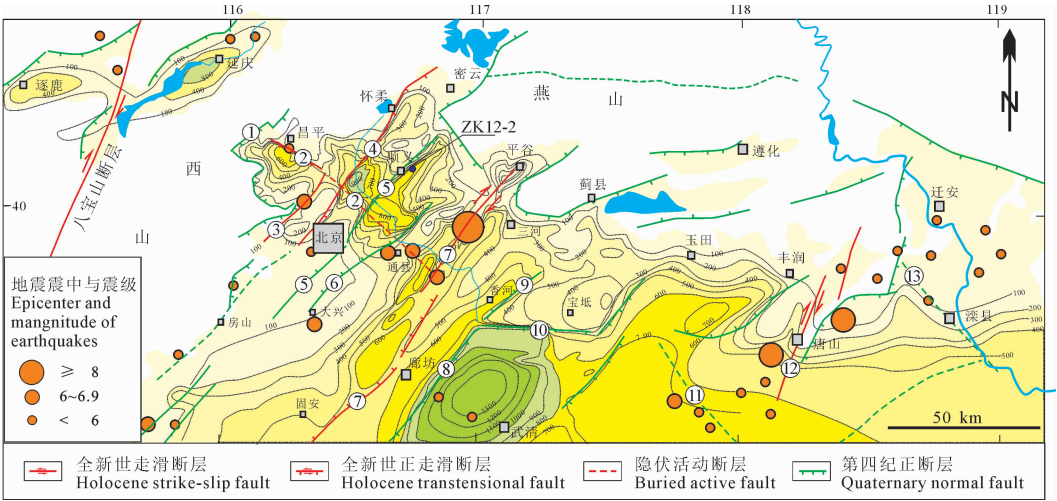


图 6 华北盆地北缘北京—唐山地区第四纪构造图(第四系厚度据 Jiang Wali et al. , 2000b; Xiang Jiacui et al. , 1987 编制; 地表第四纪断层据卫星遥感图解译,位置见图 3)

Fig. 6 Quaternary structural map of northern margin of North China Plain in the area of Beijing to Tangshan (Quaternary isopach data compiled from Jiang Wali et al. , 2000b and Xiang Jiacui et al. , 1987; surface faults interpreted from satellite imagery interpretation; see Fig. 3 for location)

主要断层:①—南口山前断层;②—南口-孙河断层;③—东北旺-小汤山断层;④—黄庄-高丽营断层;⑤—顺义-良乡断层;⑥—大兴-通县断层;⑦—夏垫断层;⑧—河西务断层;⑨—香河断层;⑩—宝坻断层;⑪—蓟运河断层;⑫—唐山断层;⑬—滦县断层
Main faults: ①—Nankou fault; ②—Nankou-Sunhe fault; ③—Dongbeiwang-Xiaotangshan fault; ④—Huangzhuang-Gaoliying fault; ⑤—Shunyi-Liangxiang fault; ⑥—Daxing-Tongxian fault; ⑦—Xiadian fault; ⑧—Hewuxi fault; ⑨—Xianghe fault; ⑩—Baodi fault; ⑪—Jiyunhe fault; ⑫—Tangshan fault; ⑬—Luanxian fault

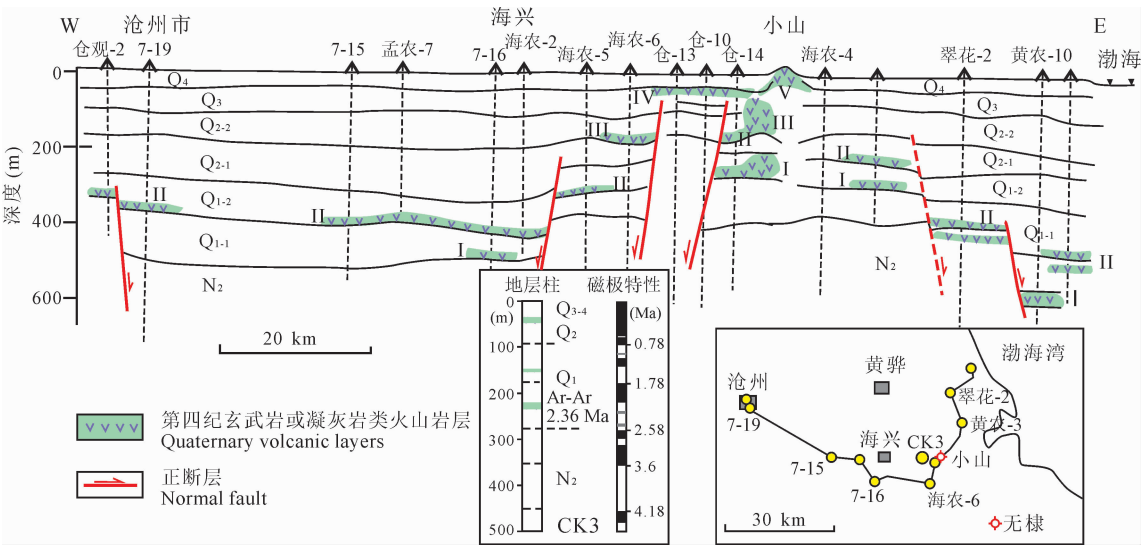


图 7 华北平原北部河北平原沧州—黄骅地区第四纪火山岩层剖面分布图(据邵时雄等,1983)和 CK3 钻孔磁极特性及年龄(据胡云壮等,2014,裴军令等,2015)

Fig. 7 Quaternary stratigraphic section with intercalated volcanic layers (Labeled in an ascending order by I, II, III, IV, V) (after Shao Shixiong et al. , 1987), and magnetostratigraphic ages of drilled well CK3 (after Hu Yunzhuang et al. , 2014; Pei Junling et al. , 2015)

右下角为钻孔地层剖面的位置图。N₂—上新统; Q₁₋₁—下更新统红色层; Q₁₋₂—下更新统棕色层; Q₂₋₁—中更新统棕色层; Q₂₋₂—中更新统黄色层; Q₃—晚更新统黄色层; Q₄—全新统

The low-right corner is the inset map for location of the Quaternary stratigraphic section. N₂—Pliocene; Q₁₋₁—Lower Pleistocene reddish beds; Q₁₋₂—Lower Pleistocene brown beds; Q₂₋₁—Middle Pleistocene brown beds; Q₂₋₂—Middle Pleistocene reddish beds; Q₃—Late Pleistocene yellow beds; Q₄—Holocene

al. , 1991; Yan Jun et al. , 2007; Luo Dan et al. , 2009; Liu Zhichao et al. , 2010; Hu Yunzhuang et al. , 2014; Cen Ming et al. , 2015; Pei Junling et al. , 2015; Yu Hongmei et al. , 2015)。综合这些测年结果,将华北地区第四纪火山活动分为 5 期:早更新世早期(~2.36Ma)、早更新世晚期(~1.34 Ma)、中更新世早期(0.60~0.80 Ma),以山西大同火山群(~0.68 Ma)、山东无棣大山玄武岩(~0.73 Ma)、山东蓬莱玄武岩(~0.84 Ma)、安徽女山玄武岩(~0.60 Ma)等为典型代表、中更新世晚期(0.20~0.13 Ma)、晚更新世晚期(0.07~0.035 Ma)。

平原地区新构造组合较复杂,在北缘地带上新世—第四纪断陷盆地主要受到 NE-NNE 向断层控制,NWW-SEE 至 W-E 向断裂也参与其中。研究认为,控盆断层的活动主要发生在早、中更新世,伸展方向为 NNW-SSE 向。晚更新世—全新世时期,断层活动以张扭为主,NNE 向断层右旋走滑,NW 向断层左旋走滑(Jiang Wali et al. , 1996, 1997)。

河淮平原区:包括古黄河、淮河流域,新构造格架与河北平原存在明显的差异。该地区构造线以近

东西向为主,主要形成于晚白垩世—古新世的近南北向伸展作用,而古近纪断陷作用不强烈。尽管中新世时期发生区域热沉降,但相对于河北平原,其沉降幅度较小。新构造变形较弱,具有明显的弥散性特征(图 3)。

5 渤海湾海域区

作为华北盆地的组成部分,该海域经历了与华北平原相同的新生代裂谷作用历史:古近纪强烈伸展断陷,形成箕状地堑盆地和基底隆起,包括:潍北凸起、莱北凸起、垦东凸起、渤南低凸起、庙西凸起、渤东低凸起、埕子口凸起、埕北低凸起、沙垒田凸起、石臼坨凸起、秦南凸起、辽西低凸起、辽东凸起等(Wan Guimei et al. , 2010; Xu Jie et al. , 2011)。渐新世沿郯庐断裂带发生的右旋走滑变形,使渤海湾海域形成走滑拉分盆地(如莱州湾盆地(Cai Dongsheng et al. , 2001; Wu Shiguo et al. , 2006; Deng Yu et al. , 2016)),和走滑花状构造(Qi Jiafu et al. , 1995; Zou Huayao et al. , 2011),新近纪时期区域热沉降形成蝶形拗陷盆地。第四纪以来,渤海湾海域构造演化发生重大分异,出现了与陆域截然

不同的构造样式。该海域不仅成为新构造运动中心,同时伴随丰富的褶曲和断裂构造。石油勘探地震反射剖面资料显示,在新近纪—第四纪地层中发育一组密集、陡倾的正断层,剖面上呈花状构造,平面呈近 W-E 走向,或北倾,或南倾,地层发生上拱变形,形成褶曲构造(Li Dawei,2004)。高精度浅层地震反射剖面资料更清晰地揭示了晚更新世地层软变形构造和这组密集正断层的发育特征(Li Xishuang et al.,2009a,2009b,2010a,2010b;Wang Hongju et al.,2011)(图 8)。这些研究发现,这组近直立的正断层伴随地层褶曲构造,断层的上断点大多终止在反射面 R_1 (~22ka)(见图 8 剖面插图),之上地层没有明显扰动,仅沿郯庐断裂带见断层错断反射面 R_0 (~8ka)。在渤海湾海域 R_1 反射面代表一个区域性不整合面,表明该区在晚第四纪发生了显著的软变形,而晚更新世晚期—全新世时期则变得相对稳定。根据褶曲构造和垂向正断层的关系,我们推断这些断层可能与横弯褶曲作用有关,密集正断层

是地层在横弯褶曲过程中因垂向剪切而形成。考虑到渤海湾周缘发育中更新晚期(600~800 ka)和晚更新世晚期(~40 ka)幔源火山活动,我们推断这个地区在中晚更新世时期发生了强烈的地壳上拱,形成了以横弯褶曲和伴生的垂向剪切正断层为特征的地层软变形构造。钻孔岩芯资料揭示(Li Xishuang et al.,2010a,2010b),晚更新世—全新世渤海地区至少发生过 5~6 次规模较大的海侵事件,海陆相地层交互沉积,记录了地壳上拱运动。渤海湾海域全新世断层不很发育,从浅层地震反射剖面 and 海底地形资料看(Li Xishuang et al.,2009a,2009b),2 组断层可能发生复活:一组平行于郯庐断裂的 NNE 向右旋走滑活动,另一组平行于张家口—蓬莱地震构造带的 WNW 向左旋走滑活动(Chen Guoguang et al.,2004)。

6 华北南缘东秦岭断裂带

尽管华北地区第四纪伸展正断作用的主导性,

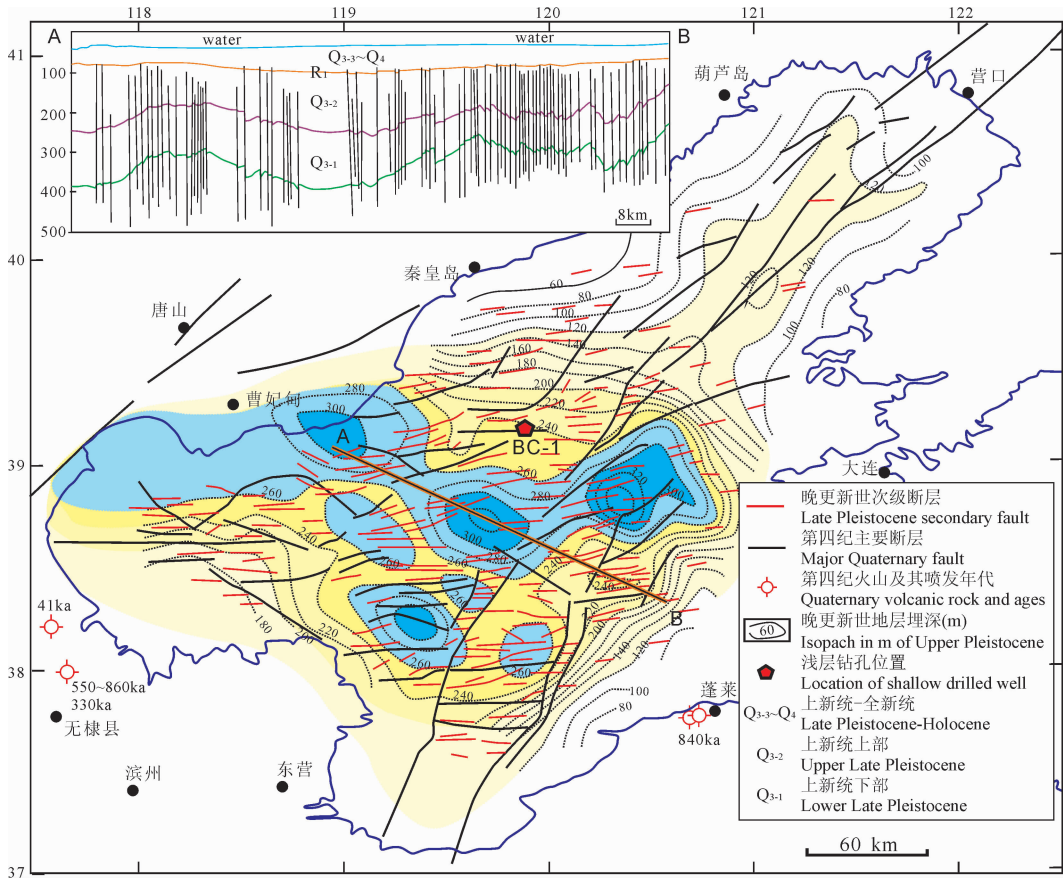


图 8 渤海湾海域晚更新世地层埋深与断层分布图(据李西双等,2010a,2010b 编制,位置见图 3)

Fig. 8 Depth distribution map of Late Pleistocene deposits and faults in the Bohai Bay basin (compiled from Li Xishuang et al., 2010a, 2010b, see Fig. 3 for location)

左上角剖面 A—B 根据浅层地震剖面资料绘制的渤海湾盆地晚更新世—全新世地层构造剖面

Section A—B at up left corner shows late Pleistocene-Holocene structural section interpreted from shallow depth seismic profile

但断裂走滑活动也非常发育,尤其沿华北地块南缘的秦岭断裂带,其新构造活动主要表现为走滑运动特征。

渭河盆地南界的秦岭北缘断裂对应一个陡地貌边界带,控制盆地的下沉和山地的隆升。断层面滑动矢量测量结果显示,这是一条斜向倾滑正断层,沿东西新走向的断层面上存在左旋走滑分量,指示其伸展方向为 NW-SE 向(Zhanget al., 1995)。

在渭河盆地以东的秦岭山地,洛南断裂和商丹断裂展示的线性构造地貌特征和河流水系错断清晰指示了第四纪左旋走滑运动(Zhang et al., 1995; Yang Xiaoping et al., 2005)(图 9)。水系的错断距离与水系的分级存在相关性,级别越大(上游年轻水系),错断距离越小。如洛南断裂错移灞河一级水系约 2400m,错移二级水系约 750m,商丹断裂错移灞河一级水系 520~600m,二级水系约 100 m。目前没有确切的沉积记录来确定这些山区水系错移发生的时代。但从卫星遥感影像图分析,洛南断层西延进入渭河盆地的灞河地区,没有明显错断晚第四纪河流阶地,指示左旋走滑活动主要发生在早第四纪时期。

7 郯庐断裂带

狭义的郯庐断裂带是华北与华南地块的走滑边界断裂,发育一系列韧性剪切变形构造(Zhu et al.,

2005)。广义的郯庐断裂带由两堑夹一垒的裂谷构造组成,或称郯庐裂谷系,受 4 条控盆边界正断层控制(自东向西分别命名为 $F_1 \sim F_4$),主体形成于晚白垩世,并遭受晚白垩世末期的挤压改造(Zhang et al., 2003a)。沿郯庐断裂苏皖段,因古黄河和淮河流域的侵蚀和沉积作用,沉积了一套上新世—第四纪河湖相砂岩夹细砂岩。钻孔资料显示,上新统宿迁组直接覆盖在白垩系王氏组之上,有的地段与上白垩统为断层接触,或被第四纪活动断裂所切割。潍河口东侧反射地震剖面资料显示(图 10),郯庐断裂带在新近纪晚期发生过挤压走滑活动,形成正花状构造,这与渤海海域晚更新世活动断层图像完全不同,表明郯庐断裂陆域与海域段的活动方式存在很大差异。

详细的活动断层填图结果显示(Fang Zhongjing et al., 1976; Li Jialing et al., 1994a, 1994b),郯庐断裂的新构造活动集中在东侧地堑盆地内的一条断裂,即 F_5 断裂,切穿东地堑盆地的白垩纪地层,在卫星遥感影像上表现为可以连续追踪的、线性展布的活动地貌特征(图 11)。该断裂活动具有明显的分段特征(Li Jialing et al., 1994a; Shi Wei et al, 2003)。北部苏-鲁段,活动强度大,发育一系列与走滑活动有关的新构造现象,如拉分盆地、挤压隆起带、冲沟错断等,是典型的地震断层(Fang Zhongjing et al., 1976)。历史上 2 次强震(公元前

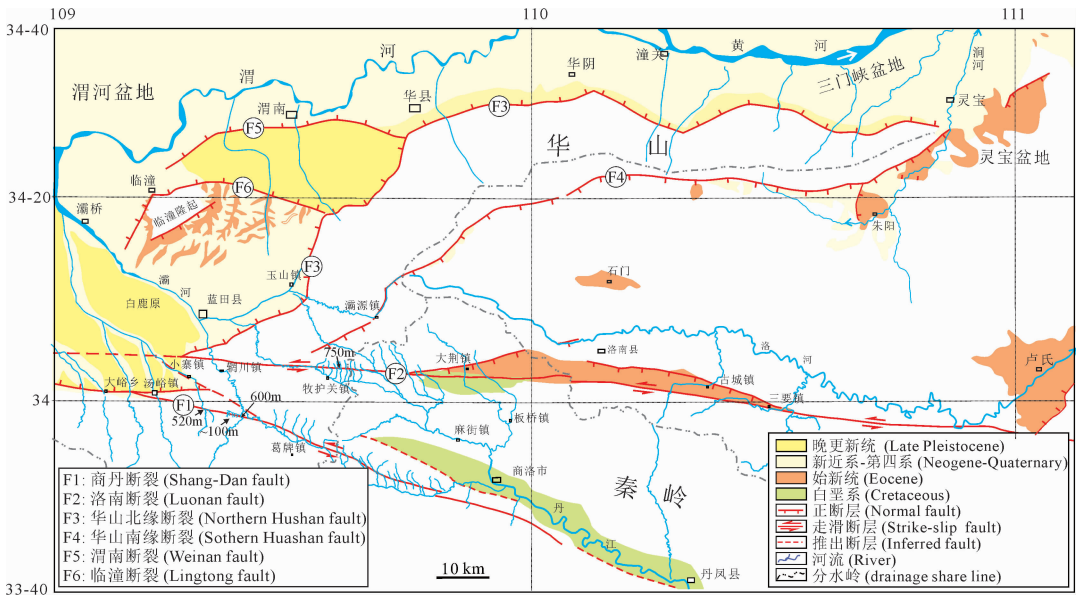


图 9 渭河盆地东部正断层与秦岭山区走滑断裂和水系错断(据 SPOT 影像、1 : 20 万地质图编制,位置见图 3)
Fig. 9 Map showing active normal faults in the Lingtong region of east Weihe graben, normal and left-lateral strike-slip faults in Huashan and east Qinling, as well as drainage offsets by faults
(Interpreted from SPOT images, 1 : 200000 geological maps, see Fig. 3 for location)

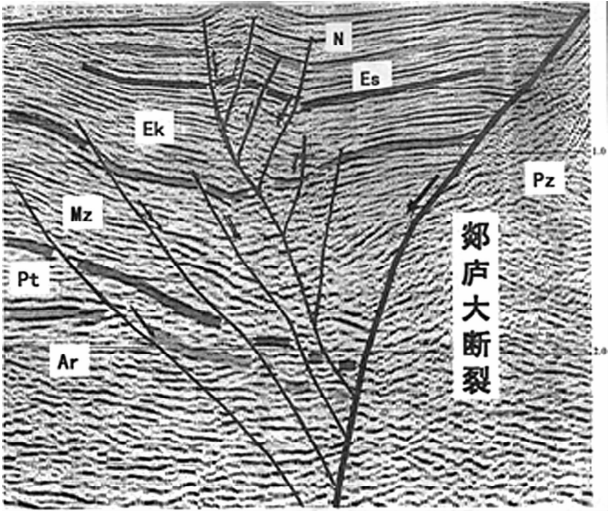


图 10 郯庐断裂带潍河口地震反射剖面花状构造
和新进系—第四系之间的角度不整合接触

Fig. 10 Seismic profile across the Weihekou area of
the Tan-Lu fault zone, showing flower structure and
an unconformity between Neogene and Quaternary

70 年 7 级地震、1668 年郯城 8.5 级地震)使苏鲁段发生了地表破裂,留下众多的地震现象(Li Jialing et al., 1994b)。在山东莒县青峰岭,陡立的断层面上发育约 5 cm 厚的超脆裂岩,其上近水平的擦痕指示了最新的右旋走滑运动(Zhang et al., 2003b)。探槽揭示发现这是一条晚更新世晚期—全新世活动走滑断层(Song Fangmin et al., 2005; Yang Xiaoping et al., 2006)。在马陵山一带,右旋走滑运动与挤压逆冲断层构造相伴生,形成了马陵山压性构造地貌(Fang Zhongjing et al., 1976)(图 10)。根据地形地貌形态特征推断,该段累积右旋走滑量达~12km(Zhang et al., 2003b)。中部苏皖段和南部安徽段,活动强度减弱(Shen Xiaoqi et al., 2015)。

8 其他走滑断裂构造

在环鄂尔多斯地块的 2 个裂谷系中,既发育伸展左旋走滑断裂,又发育伸展右旋走滑断裂。前者以鄂尔多斯北缘断裂为代表,东西走向,向北陡倾,其伸展左旋走滑活动控制了河套盆地的第四纪伸展变形;后者以银川盆地的黄河断裂、山西地堑系中段 NNE 走向的霍山断裂为代表,霍山断裂南段错移水系显示了右旋走滑运动(Xu et al., 1993; Zhang et al., 1998; Jiang Wali et al., 2004)。

太行山隆起南部王屋山山前断裂是一条 NW-NE 向断层,水系错断特征和山前冲积扇体的错移

现象指示这条断裂具有左旋走滑运动分量,断层面上擦痕构造指示其斜张作用,伸展方面为 NW-SE 向(Zhang et al., 2003a)。沿太行山东缘,发育一组 NWW-SEE 断层,如磁县地区的南山村-岔口断层、永年-磁县断裂、北京地区的南口-孙河断层等,这组断裂以左旋走滑活动为主(Jiang Wali et al., 1996),如南山村-岔口断层切错了 NNE 向、上新世晚期至早中更新世的武安-伯延盆地,左旋走滑活动晚于盆地的发育,推断其发生的时代应该在晚更新世—全新世。

在华北东部平原的北部平原区,许多 NNE 向的地震断裂展示了右旋走滑活动特征,并有正倾滑或逆倾滑分量,如:河北邢台断裂(Hou Zhihua et al., 2008)、北京平原区的夏垫断裂(Gao Jinghua et al., 2008; He Hongling et al., 2008; Xu Xiwei et al., 2000; Zhao Chengbin et al., 2010)、河北唐山地区的唐山断裂等(Guo Hui et al., 2011; Jiang Wali et al., 1997)、聊城-兰考隐伏断裂(Xiang Hongfa et al., 2000)。这些走滑断裂大多不是第四纪控盆正断层,它们是挤压应力场下产生的走滑断裂系统。

9 华北新构造应力场

9.1 新构造应力方向

地质时期构造应力场作用方向可以通过控盆断层或影响不同时代地层的断层滑动矢量资料(断层面走向、倾角、倾向、运动方向等),反演盆地形成和演化过程的古构造应力机制,反演的结果包括三轴主应力方向及其应力椭球系数($R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)$)。这个反演方法基于 Bott (1959)原理,假设地壳岩石中脆性断层面滑动与断层面上分解剪应力(Resolved shear stress)的方向一致,同时假定所测量的断层滑动矢量数据反映了一个均一的应力场,即断层之间的滑动是相互独立的。在这些假设前提下,从理论上可以利用断层面的擦痕构造(擦痕的方向和运动指向)来反演构造应力张量的参数(也称为缩减的应力张量, reduced stress tensor)。对此,不同学者运用不同的反演算法(algorithm),用最小平方根统计方法,将实际测量的断层面滑动矢量(即断层擦痕方向和动向)与模型计算的分解剪应力方向之间的误差(misfits)最小化,从而找到应力张量的 4 个参数:3 个主应力($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)方向和 1 个应力大小系数 $R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)$, $0 < R < 1$ ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) (Angelier, 1979, 1984; Armijo et al.,

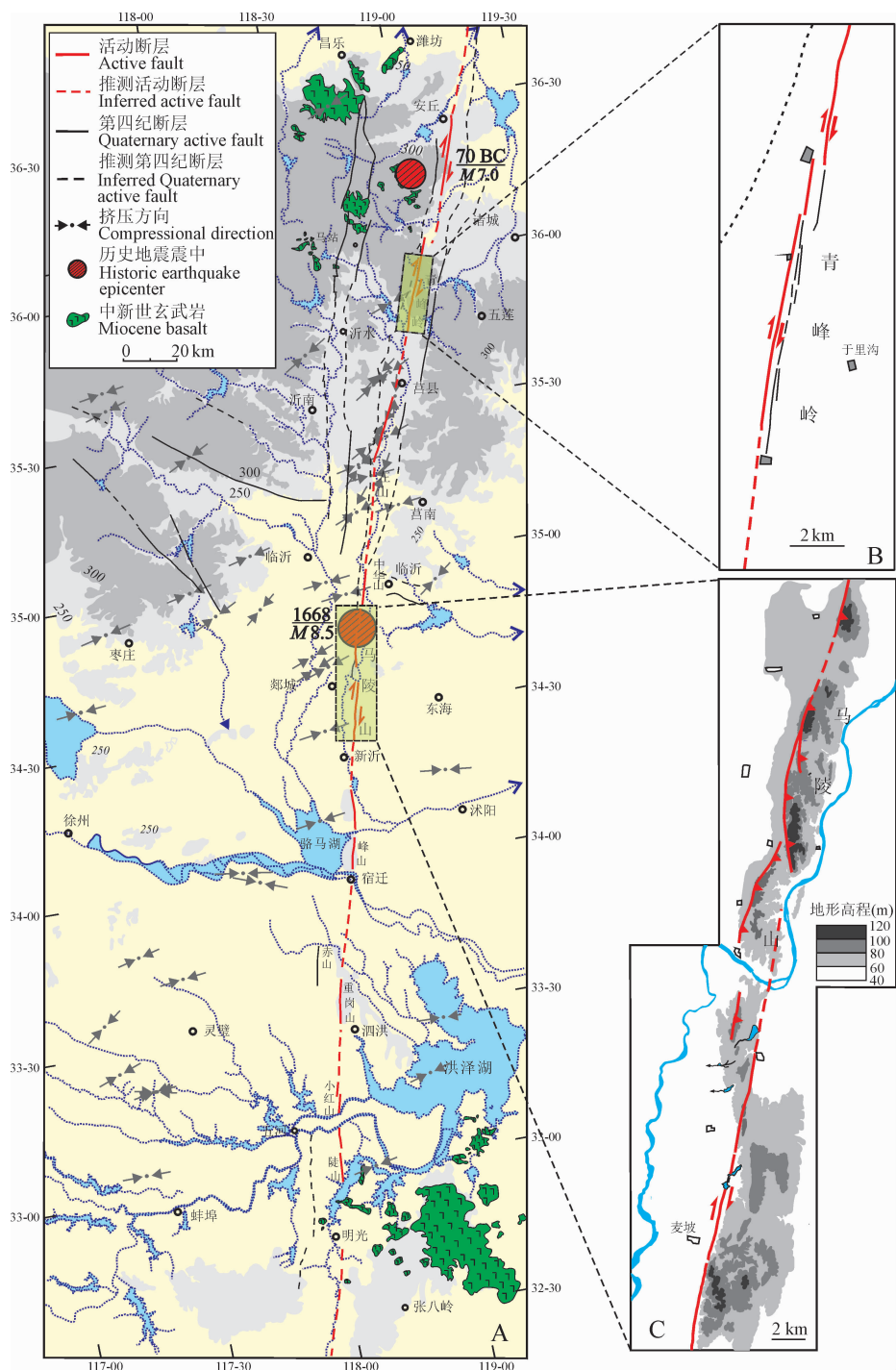


图 11 郯庐断裂带苏鲁段和苏皖段活动断层形迹展布图

Fig. 11 Distribution map of active faults along the Anhui-Jiangsu-Shandong segments of the Tan-Lu fault zone

A—构造地貌与地震构造图;B—山东莒县青峰岭活动断层形迹展布图;C—山东郯城马陵山地区活动断层形迹分布图

A—Morphological and seismotectonic map; B—active fault trace cutting the Qingfengling in Jucheng County of Shandong Province;

C—active traces of reverse and strike-slip faults along Malingshan in Tancheng County of Shandong Province

1982)。这类构造反演技术成功应用于希腊爱琴海、南美洲安第斯高原、青藏高原、美国盆岭地区等新构造和活动构造、地震构造应力场研究之中。

利用这种古构造应力反演方法,对鄂尔多斯周

缘部分断陷盆地和太行山南缘、东南缘控盆的断裂开展了野外断层运动学分析和滑动矢量的测量 (Bellier et al. , 1988; Cen Min et al. , 2015; Huang Xingfu et al. , 2013; Mercier et al. , 2013; Shi et

al., 2015; Zhang et al., 2003a; Zhang Yueqiao et al., 2003)。总体来说,由盆缘正断层运动学矢量确定的构造应力场以引张应力机制占主导,即最大主应力轴(σ_1)方向垂直,最小主应力(σ_3)和中间主应力轴(σ_2)近水平。同时反演的结果揭示了盆地 2 个不同的引张应力方向: NW-SE 向、NE-SW 向(图 12a, b)。

NW-SE 向引张伸展作用非常强烈,成为环鄂尔多斯盆地裂谷系、太行山东南缘等地区地壳拉伸的主要方向,控盆边界断层以正倾滑运动为主。尽管河套盆地北缘的狼山、色尔腾山、乌拉山、大青山等山前断裂缺乏这方面的古构造应力分析,但根据弧形展布的山前活动断层地貌,可以清楚地判断其引张伸展方向为 NW-SE 向。在大别山北缘,有限的第四纪断层运动学资料也指示了 NW-SE 向的引张伸展应力方向。这期引张伸展作用是环鄂尔多斯高原裂谷系形成的主要构造应力场,其伸展方向控制了盆地的沉积-沉降作用。

NE-SW 至 NNE-SSW 向伸展作用沿整个汾-渭裂谷系和太行山东南缘均有记录。但对这个伸展应力作用发生的时代存在不同看法。在渭河盆地, NE-SW 向引张应力场影响的最新地层为中新世霸河组(上限时代 9 Ma),而 NW-SE 向引张应力场起始时间肯定早于 2.5Ma(相当于三门组),但肯定不会早于 9Ma (Bellier et al., 1988; Mercier et al., 2013)。因此,最新一期引张应力场的起始时代应在 9~2.5Ma。而在山西地堑盆地中,这期 NE-SW 向伸展作用影响了第四纪河湖相沉积地层,且断层面上叠加擦痕的切割关系指示这期伸展作用晚于 NW-SE 向引张,推测发生在中、晚更新世时期(Shi et al., 2015)。另外,在晋北断陷区 NNE 向控盆断层面上观察到 2 组擦痕构造,早期指示 NW-SE 向引张、晚期近 N-S 向斜张和右旋走滑分量;在泥河湾地层中发育的正断层也指示了 2 个引张应力方向: NW-SE 向和近 N-S 向(Cen Min et al., 2015)。

有意思的是,在山西地堑系第四纪地层中发现的 NE-SW 至 NNE-SSW 向伸展引张应力方向与渤海湾海域盆地中一组密集的近 W-E 向断层所指示的地壳伸展方向基本一致,表明两者之间必然存在相同的深部动力学过程。

9.2 现今活动构造应力机制

现今构造应力场通过地震震源机制解和不同地应力测量方法(水压致裂法、钻孔崩落、钻孔套芯等)确定。根据国际应力图计划提供的资料(图 13),华

北地区现今构造应力场以走滑机制占主导,少量逆冲机制和伸展机制。但不同地带的构造应力机制存在差异。

鄂尔多斯西缘的银川盆地和吉兰泰盆地,现有的资料显示以平移和逆冲机制占主导,挤压应力轴方向以 NE-SW 向至 NNE-SSW 向为主,少量 NNW-SSE, NNE 走向断层以右旋走滑活动为主(Lei Qinyun et al., 2015)。河套盆地应力数据较少,缺乏优势应力方位。但从古地震研究结果显示,河套盆地北缘的狼山、色尔腾山、乌拉山和大青山山前断裂,在晚更新世—全新世时期,以伸展正断作用为主,伴随左旋分量(Jiangwali et al., 2000a)。

渭河盆地的现今应力资料也非常少,极少量的应力测量结果显示 NE-SW 向挤压应力方向。历史强震发震构造调查和活动断层调查结果指示,渭河地区晚更新世以来以引张正倾滑断层应力机制占主导,最小主应力方向 NW-SE,最大主压应力方向近直立(Tian Qinhu et al., 2015)。

山西地堑系具有较多的现今应力资料,小地震震源机制解揭示了复杂的应力机制,以走滑机制占主导,同时具有挤压逆冲型和引张正断型。中强地震震源机制解结果显示了走滑型地震,挤压应力轴方向 NE-SW 至 NEE-SWW 向(An Meijian and Li Fangquan, 1998),与晚第四纪活动断裂特征指示的引张伸展应力机制存在很大的不同。最典型的例子是大同阳高地区 1989 年 M_s 6.1、1989~1995 年地震群和 1999 年 M_s 5.8 级地震(Deng Zhihui et al., 1998; Xu Xiwei et al., 1991),地震震中集中分布在大同盆地东缘的六棱山山前断裂中段,近 N-S 走向的地震烈度分布与主余震震中分布基本一致,明显不受控盆边界断层的控制。区域台网记录的地震初动分布得到这些地震的震源机制解显示为平移型地震,主要节面为北北东和北西西向,但近场台网记录的地震初动分布得出这些地区余震为正断层型,主要节面走向 NE(201°)、倾向 NW、倾角 $75^\circ\sim 50^\circ$ (Wang Ming and Wang Peide, 1992, 1994; Wei Baozhu et al., 1992)。1989~1995 年震源群的震源机制也一致表明了以走滑为主、兼倾滑型错动类型, P 轴方位 NEE-SWW,以水平挤压为主(仰角小于 30°), 2 个节面走向分别为 NNE-SSW 和 SEE-NWW,其倾角 $\sim 70^\circ$ 。1999 年 M_s 5.8 级地震是 1989 年地震断层的一次新的破裂,具有相同的震源机制(Wang Ming et al., 1994)。该震群记录的震源应力机制显然不同于六棱山山前断裂中晚更新世

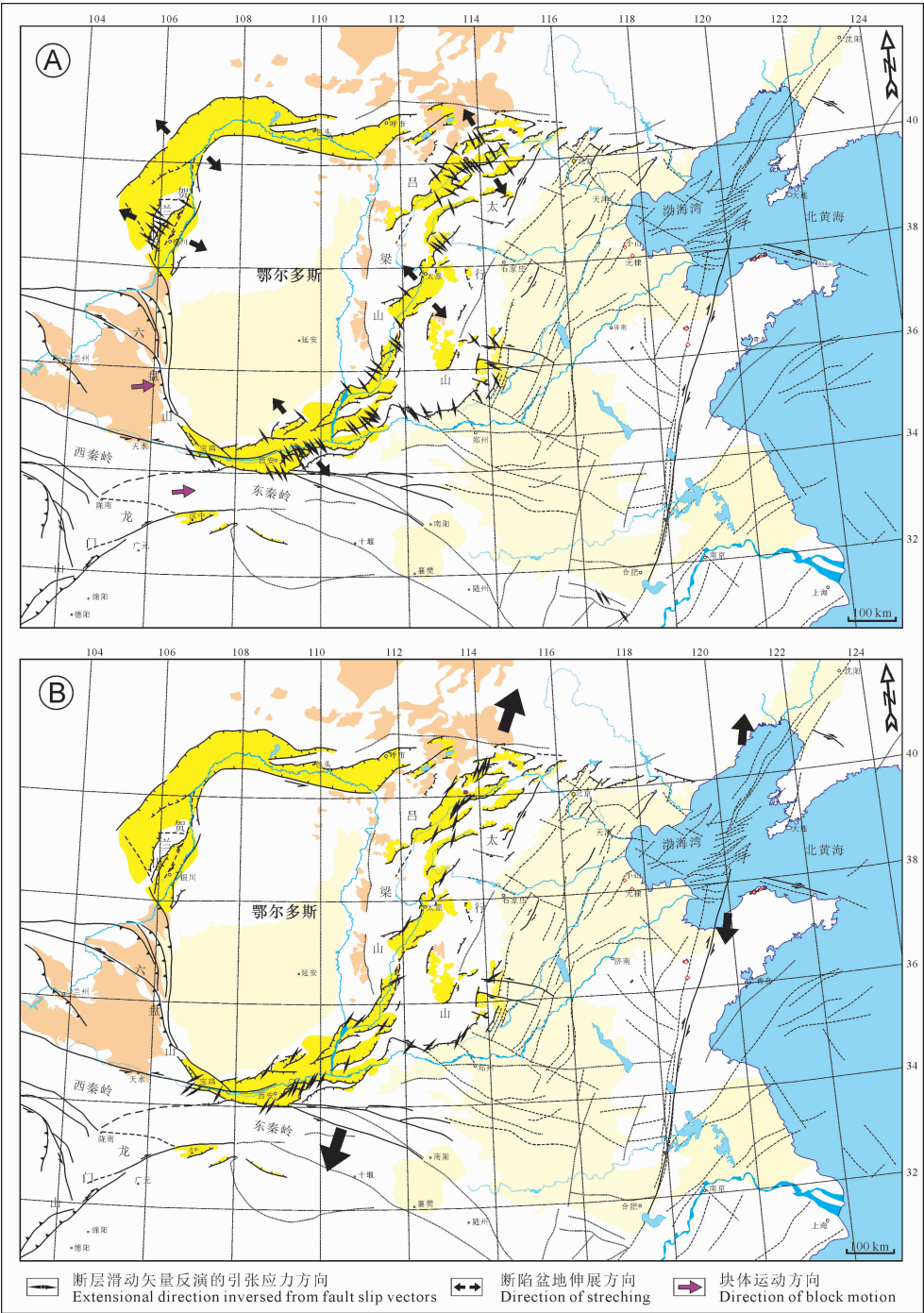


图 12 华北地区晚新近纪—第四纪控盆断层与引张构造应力场

Fig. 12 Late Neogene-Quaternary basin-bounded faults and extensional stress field in North China

A—NW-SE 向引张构造应力场(应力场资料来源,渭河盆地: Bellier et al., 1988; Mercier et al., 2013; Zhang et al., 1995; 银川盆地: Huang Xingfu et al., 2013; 山西地堑系: Zhang et al., 2003; Shi et al., 2015; Cen Min et al., 2015; 太行山东南缘地区: Zhang Yueqiao et al., 2003; Zhang et al., 2003)。B—NE-SW 向引张构造应力场(应力场资料来源,渭河盆地: Mercier et al., 2013; 山西地堑系: Zhang et al., 2003; Shi et al., 2015; 太行山东南缘地区: 张岳桥等, 2003; Zhang et al., 2003。渤海湾海域盆地中发育的一组密集、近 W-E 向正断层也指示了近 N-S 向的地壳引张伸展作用)

A—NW-SE oriented extensional stress field (stress data from Bellier et al., 1988; Mercier et al., 2013; Zhang et al., 1995 for Weihe graben; from Huang Xingfu et al., 2013 for Yinchuan graben; from Zhang et al., 2003; Shi et al., 2015; Cen Min et al., 2015 for Shanxi graben and from Zhang Yueqiao et al., 2003; Zhang et al., 2003 for the SE margin of Taihangshan highland. B—NE-SW directed extensional stress field (stress data from Mercier et al., 2013 for Weihe graben; from Zhang et al., 2003; Shi et al., 2015 for the Shanxi graben and from Zhang Yueqiao et al., 2003; Zhang et al., 2003 for the SE margin of Taihangshan Highland)

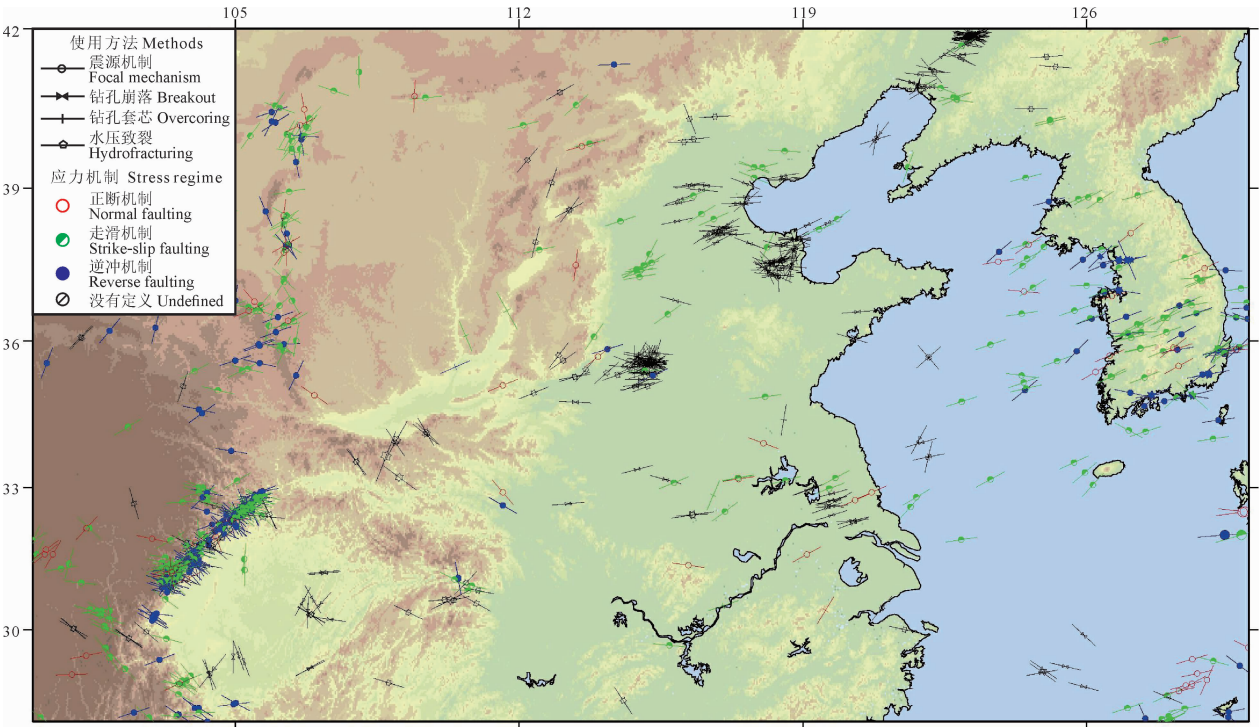


图 13 华北及邻区现今构造应力机制(资料来自 the world stress map project)
Fig. 13 Present-day tectonic stress field in North China (data from the world stress map project)

的正倾滑断层作用方式(Duan Ruijing and Fang Zhongjing, 1995),但可与大同盆地西缘口泉断裂全新世以右旋走滑为主、兼具正倾滑活动分量的活动行为对比(Xie Xinsheng et al., 2003)。

对灵丘盆地活动断层调查发现(Ma Xingquan et al., 2013),南缘控盆断裂是一条晚更新世活动断层,不是 1626 年 7 级地震的发震构造。在盆地北侧的松散沉积物中发现了 NW-SE 向至近 W-E 向陡倾走滑断裂,可能是全新世活动的地震断层。

位于太行山以东的华北平原区、渤海湾海域、沿邻庐断裂带,地震震源机制解和其他浅层应力资料(水压致裂法、钻孔崩落、钻孔套取芯等),显示了较均一的现今挤压构造应力场,最大水平挤压方向 NEE-SWW,震源机制以走滑型为主。在这个挤压应力作用下,NNE 向断层发生右旋走滑、NWW 向断层左旋走滑,形成了一个共轭的破裂网络,如华北平原北部区的 NNE 向邢台断裂、夏垫断裂、唐山断裂等,NWW 向的南山村-岔口断裂等,与新构造与活动断层调查结果一致。

10 讨论:华北新构造演化阶段及其区域动力学

10.1 华北新构造演化阶段及构造应力机制转换
从环鄂尔多斯断陷盆地的演化历史及构造应力

场的转换,我们发现华北地区新构造运动主要以引张伸展作用占主导,引张方向或 NW-SE 向,或 NE-SW 向,同时经历了从引张伸展体制到挤压平移应力机制的交替,但挤压构造作用持续时间相对短暂。基于鄂尔多斯周缘晚新生代以来的沉积地层接触关系和盆地的演化历史,我们将华北地区新构造演化划分为 3 个阶段,每个阶段以伸展断陷开始,以构造挤压隆升结束(图 14)。

(1)新近纪晚期(9~10Ma 至 2.5Ma)伸展断陷作用阶段:在 NW-SE 向引张应力机制作用下,鄂尔多斯周缘地壳发生从南向北、从西向东的扩展,环鄂尔多斯地堑盆地系主体在这个阶段形成。这期断陷作用的起始时间记录在南缘山体的快速隆升过程中。沿太白山、华山地形剖面的磷灰石裂变径迹测年结果指示,最新的一期快速隆升发生在~9.6 Ma (Liu et al., 2012),指示渭河盆地 NW-SE 向伸展作用起始于中新世晚期,与鄂尔多斯盆地红黏土堆积基本同步(Zhang Yueqiao et al., 2006)。这期伸展断陷作用向北东向扩展,形成了山西伸展断陷盆地(Cen Min et al., 2015),向东扩展影响到太行山中南部和东南缘地带,形成一系列山间断陷盆地和陡峻的太行山南缘构造地貌边界(Zhang Yueqiao et al., 2003),从而奠定了现今构造地貌的基本轮廓。

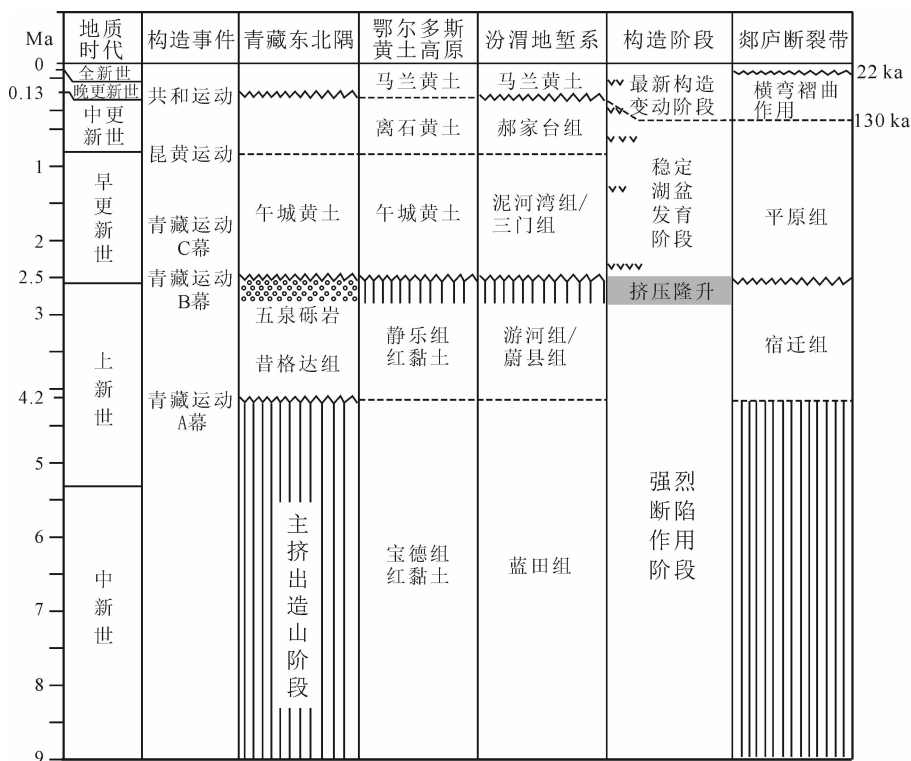


图 14 华北地区晚新生代构造事件、演化阶段及其与青藏高原东北隅构造事件对比(青藏高原构造事件据李吉均等,1996)

Fig. 14 Comparison of major late Cenozoic tectonic events between North China and NE Tibetan Plateau
(tectonic events from Li Jijun et al. , 1996)

这个时期华北东部平原区伸展作用相对较弱,总体以区域沉降为主,沿局部地带如北部山前带,发育伸展断陷盆地。

上新世晚期的构造挤压事件影响到整个华北地区,不仅使环鄂尔多斯湖盆短暂消亡和隆升剥蚀,同时导致郯庐断裂带的挤压走滑变形。这期挤压事件记录在太行山中部榆社湖盆的消亡和上新世地层的轻微挤压变形(Zhu Dagang et al., 2009)、山西地堑盆地短暂的隆升和上新世红土层与上覆泥河湾湖相地层之间的沉积间断(Min Longrui et al., 2006; Yuan Baoyin et al., 1996; Zhang Zhaoqun et al., 2003; Zhu Rixiang et al., 2007)、鄂尔多斯黄土高原上新世红黏土层普遍遭受侵蚀及与上覆午城黄土之间明显的沉积间断等(Zhang Yueqiao et al., 2006)。该事件同时波及到华北地块东缘的郯庐断裂带,表现为江苏新沂地区的上新统宿迁组砂层与早更新统豆冲组砾石层之间的角度不整合(Xie Ruizheng et al., 1991),山东潍坊河口地震反射剖面第四系底部的角度不整合(图 10),均指示了上新世晚期郯庐断裂带挤压走滑运动特征。

(2)早、中更新世稳定湖盆发育阶段:该阶段主要表现为环鄂尔多斯地堑盆地的一系列古湖盆,包

据古三门湖、古泥湾湖、古吉兰泰-河套湖、古长治湖等,其中加积了一套连续的河湖相沉积层,年龄在 2.5Ma 至 0.15~0.13Ma。尽管这些古湖盆经历了不同程度的湖进—湖退过程(Chen Fahu, 2008; Chen Fahu et al., 2008; Hu Xiaomeng et al., 2010a, 2011, 2012),但总体来说这个时期构造变动相对平静,沉积物颗粒较细。与此相应的是,东部平原区发生了 4 期幔源火山活动(~ 2.36 Ma、 ~ 1.34 Ma、 $0.60\sim 0.80$ Ma、 $0.20\sim 0.13$ Ma),表明这个湖盆发育时期的岩石圈地幔上涌作用非常活跃。

早、中更新世断陷湖盆的彻底消亡可能记录了一次重要的区域性挤压隆升事件。除了鄂尔多斯西北缘吉兰泰-河套古湖消亡时间较晚(30~40 ka)以外,其他所有古湖盆陆续在晚更新世早期(150~130 ka)消亡。古湖盆的消亡不仅与黄河、汾河、滹沱河、桑干河等河流的下切引起的南北和东西贯通有关,更可能与区域构造变动有关。黄河晋陕峡谷段普遍发育的 T5 河流阶地(时代 200~150 ka)是这次隆升事件的地貌相应(Fu Jianli et al., 2013)。这期事件使郯庐断裂带发生逆冲走滑变形,探槽揭示了晚更新世早期的古地震事件(Xie Ruizheng et al., 1991)。

(3)晚更新世中晚期以来的最新构造变动阶段:这个阶段的早期(约120~22 ka)以引张伸展作用为主,主要记录在盆地山前断裂带错断地貌特征中,尤其沿河套地堑盆地的山前断裂带、汾渭地堑盆地系等,野外地表观察和探槽揭示了NW-SE向引张伸展正断层活动特征。但在渤海湾海域地区,浅地层反射剖面清楚揭示了晚更新世的横弯褶曲构造和密集的陡倾正断层(Li Xishuang et al., 2010b),并伴随小山期(~40 ka)幔源火山活动,指示了该地区NNE-SSW向的地壳引张伸展。沿郯庐断裂带苏皖段,探槽揭示晚更新世正断层构造(Shen Xiaoqi et al., 2015),表明该段也处于引张伸展状态。

晚更新世晚期(~20 ka)以来,构造应力机制出现明显的分化,河套盆地和渭河盆地仍以引张伸展作用占主导,山西地堑系、华北平原区、渤海湾海域和郯庐断裂带则以挤压平移断层机制占主导、伸展断层机制变得次要。这次构造应力体制转换清楚地记录在渤海湾海域区,晚更新世密集的陡倾正断层突然终止于R1反射层(~22 ka),全新世活动断层少见(Li Xishuang et al., 2010b),表明构造作用方式发生了重大的变化。现今构造应力场应该是该构造作用的延续。

10.2 与青藏高原东部晚新生代挤出造山构造事件的对比

为了探讨华北地区新构造与青藏高原隆升和扩张之间的动力学联系,首先梳理一下青藏高原东北缘晚新生代发生的主要构造事件(图14)。研究表明,晚新生代青藏高原东部发生地壳向东挤出,在其东缘发生强烈的挤出造山作用,形成了近N-S或NE-SW向的年轻山脉,如六盘山、岷山、龙门山、锦屏山等(Zhang Yueqiao et al., 2016)。这些年轻山脉岩石的磷灰石裂变径迹测年结果(Wang et al., 2012; Zheng et al., 2006)、鲜水河走滑韧性剪切带的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素测年结果(Zhang et al., 2008)、以及深切河谷的快速侵蚀时间(Clark et al., 2010),一致地揭示了青藏高原东缘中新世晚期(10~8 Ma)的快速造山隆升事件,有意义的是,该事件与秦岭北缘山体和华山山体最新一期快速伸展隆升事件基本同步(Liu et al., 2012),表明高原东缘的挤出造山作用和华北南缘的伸展隆升之间存在动力学的相关性(Zhang Peizhen et al., 2006)。

青藏高原东缘挤出造山作用呈多幕式、阶段性发展特点(Li Jijun et al., 1996)。主造山阶段发生在中新世晚期(10~8 Ma至5~4.2 Ma)(Zhang

Yueqiao et al., 2016, 2017),或称横断事件、青藏运动A幕,高原东部主要地块(南部川滇地块、中部川青地块、北部陇西地块)在3条左旋走滑断裂(鲜水河、东昆仑、海原断裂)的调节下有序地向东挤出,其东缘发生地壳逆冲增厚,形成年轻的近南北向山系,从而奠定了现今高原东缘的地貌边界带格局。这个挤出造山事件在时间尺度上对应于鄂尔多斯周缘新近纪晚期(宝德期)强烈的伸展断陷作用时期。上新世(4.2~2.5 Ma)高原东缘构造相对松弛,在一系列近南北向的深切河谷中(岷江上游、大渡河、安宁河、金沙江、雅砻江等)和滇西北地区发育的断陷湖盆(元谋盆地、大理盆地、盐源盆地等)中,加积了数百米厚的河湖相沉积地层,包括著名的昔格达组、元谋组等地层单元。磁性地层研究结果显示该组湖相沉积起始于~4.2 Ma,并于上新世末期消亡(Jiang Fuchu et al., 1999; Yao Haitao et al., 2007)。这个湖盆发育时期大致对应于汾渭地堑的古三门湖和泥河湾湖盆的早期阶段(游河期或榆社期),暗示高原东缘构造松弛和华北地区稳定湖盆发育之间的关联性。进一步的地层记录和构造变形研究结果显示,上新世晚期发生了一次重要的挤压构造事件(相当于青藏运动B幕),表现为昔格达湖盆的消亡、早期湖相地层的挤压变形和早更新世底部的不整合接触。这期挤压事件在整个青藏高原东北隅都有记录,如在兰州盆地南部翘倾的上新世五泉砾岩层被早更新世午城黄土所覆盖(Zhang Yan, 2010);在岷江上游漳腊盆地西缘钻孔岩芯揭示中生代灰岩向东逆冲在昔格达组地层之上(Zhang Yueqiao et al., 2012);在龙门山中南段山前地带,变形的上新世大邑砾岩层不整合在褶皱的中生代地层之上(Mo Xiong and Zhao Bin, 2010);沿安宁河河谷地带,变形的昔格达组河湖相地层被中晚更新世冲洪积相砾岩层超覆不整合。这期挤压隆升事件也强烈影响了华北地区,使环鄂尔多斯断陷湖盆发生短暂的隆升和剥蚀,表现为早更新世泥河湾组和下伏上新世蔚县组三趾马红土层之间的明显不整合接触。早中更新世又是一个相对稳定的构造阶段,在青藏高原东北隅的玛曲盆地、漳腊盆地等发育伸展断陷湖盆(Zhang Yueqiao et al., 2010a, 2010b),而在华北地区则表现为稳定的湖泊盆地发育阶段和幔源火山活动。期间,青藏高原东北隅发生了昆黄运动(1.0~0.6 Ma)。晚更新世以来,高原东北隅构造应力作用方式以挤压走滑机制占主导,地块的向东挤出伴随反时针旋转(Shen et al., 2005),与环鄂尔多斯盆地

的 NW-SE 向伸展、渤海湾海域区晚更新世近 N-S 向伸展、现今挤压平移应力机制等形成对照。

10.3 青藏高原东缘向东构造挤出的传播方式与华北新构造运动

前人对青藏高原是否及如何向东构造挤出和应变传播的问题,存在多种不同的理解和认识:或认为高原地壳物质存在大幅度的向东挤出(Tapponnier et al., 1982)、或认为有限的挤出(Xu Xiwei et al., 2003)、或认为没有向东挤出等(Clark et al., 2000)。从上述构造事件的对比研究发现,青藏高原东缘的挤出造山作用与华北地区新构造演化阶段之间存在一定的对应关系。当青藏高原东缘处于强烈挤出造山作用时(10~4.2Ma),在华北、尤其是鄂尔多斯地块周缘地区则发生强烈的 NW-SE 向伸展断陷作用,形成线性展布的断陷盆地;而当青藏高原东缘处于相对构造松弛阶段时,华北地区则表现为相对稳定的湖盆发育阶段,东部地幔上涌引起的幔源火山活动变得活跃。

研究认为,青藏高原东缘构造挤出作用通过2个途径向东传递,并影响华北地区新构造演化(图15)(Zhang et al., 1998, 1999)。在青藏高原东北隅,受到海原断裂左旋走滑运动的调节,陇西地块向东挤出,在其东北缘形成宁南弧形逆冲褶皱带或六盘山逆冲构造带,海原-六盘山挤出造山系统中香山-天景山断层成为青藏高原向东北方向扩张的前锋地带。陇西地块的向东构造推挤可能同时使鄂尔多斯地块发生反时针旋转,进一步导致其西北缘的地壳引张伸展,银川-河套弧形地堑系进一步加强。如此,青藏东北缘的断层左旋走滑运动和地块的推挤以及鄂尔多斯地块的旋转及其西北缘的引张伸展作用构成了一个有机的动力学整体,共同主导了该地区不同类型的新构造地貌过程。

另一方面,东昆仑断裂的左旋走滑运动调节了其南部川青地块的向东挤出,在其东缘形成了岷山、龙门山逆冲褶皱造山带,这个挤出造山系统成为青藏高原东缘中段向东扩张的前锋带,并超越了现今高原边界,通过扬子地块盖层的滑脱层,进一步向东传播到龙泉山褶皱构造带(Jia et al., 2009; Li et al., 2010; Zhang et al., 2016)。在扬子地块北缘的秦岭地区,受到秦岭北缘断裂左旋走滑运动和南缘青川断裂的右旋走滑运动的共同调节,秦岭山地向东挤出,构成了一个狭窄的地壳通道(Enkelmann et al., 2006),控制了北侧一系列走滑拉分盆地。

上述两个挤出构造系统之间是相互作用的。陇西地块的向东推挤不仅使鄂尔多斯地块反时针旋转,构造作用力同时向东传递,使山西地堑系和太行山隆起区遭受挤压隆升,向东的进一步传递影响到太行山以东的华北平原区。太行山隆起区榆社盆地在上新世末期的消亡很可能与这个构造应力传播作用有关。现今 GPS 测量结果展示了在欧亚框架下华北块体相对于欧亚大陆的向东运动(Shen et al., 2000),表明了印欧碰撞产生的远场挤出效应;而秦岭山地向东挤出产生的走滑应力场控制了关中地区的引张伸展变形,其向东扩展影响了华北南部平原区的新构造变形。

10.4 印欧碰撞远场效应与地幔上涌之间的相互作用

除了鄂尔多斯地块以外,华北地区新构造运动总体显示了弥散性变形特征,新构造演化既表现为时间上的阶段性、空间展布上的差异性,又表现为构造应力场的多变性,既有 NW-SE 向引张,又有 NE-SW 向引张,现今应力机制以 NE-NEE 向的挤压平移为主。这些不同构造应力场在时空上的演替反映了华北地区新构造动力学的复杂性。以南北重力梯度带为界,以西的环鄂尔多斯地区,地壳引张伸展作用占主导,地壳应变集中在地块周缘的裂谷系;而以东的华北东部平原区,主体以区域沉降为主,并伴随着频繁的幔源火山活动,沉降中心位于渤海湾海域区,这里岩石圈厚度最薄、大地热流值最高、新构造运动最强、沉降幅度最大(Feng et al., 2010),尤其发育复杂的晚第四纪地层横弯褶曲构造和垂向剪切断层(Li Xishuang et al., 2010 a)。

华北地区东、西部新构造变形的差异性反映了深部岩石圈结构的非均一性和构造动力学的复杂性,不仅受到西部印欧碰撞产生的远程效应的影响,同时受到东部太平洋俯冲引发的深部地幔上涌动力学的制约。这2个板块深部动力学过程在华北地区的相互作用,统治了华北地区新构造运动和构造地貌过程。

一方面,印欧碰撞引起的青藏高原东部地壳块体的向东挤出作用是华北西部环鄂尔多斯地区地壳引张伸展作用的主要动力来源,这个动力作用在特定新构造阶段、尤其是上新世末期,也波及到华北东部平原地区,使这个地区产生伸展或挤压变形,如郯庐断裂最新的右旋走滑活动。另一方面,当青藏高原东部挤出造山作用处于相对松弛阶段时,华北西部地区新构造运动相对平静,而东部平原区岩石圈

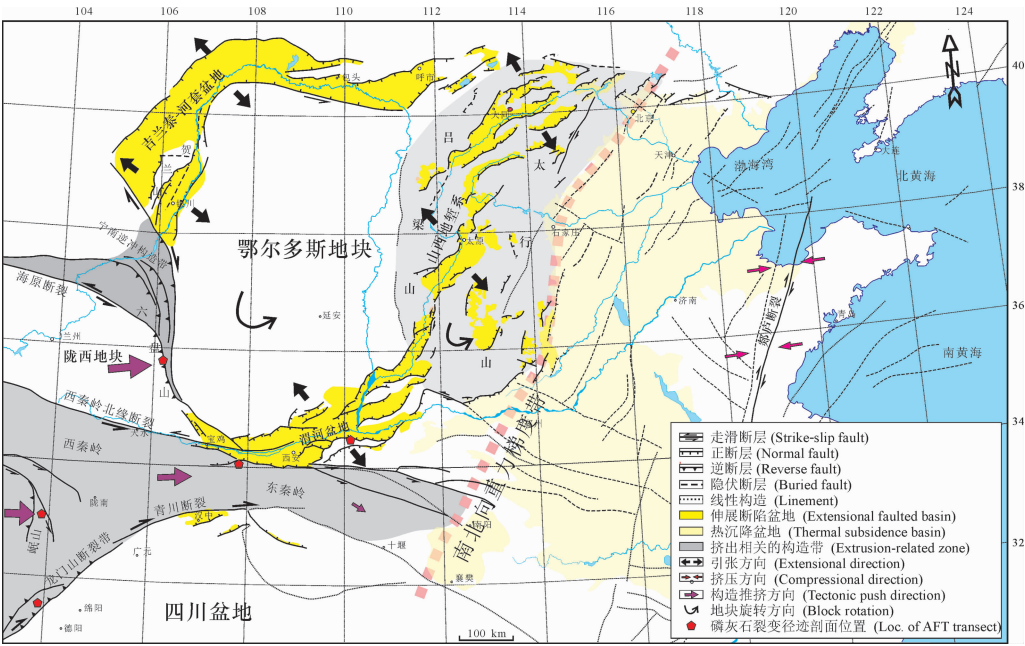


图 15 青藏高原东北缘晚新生代向东挤出构造与华北新构造之间的运动学联系

Fig. 15 A kinematic link between late Cenozoic eastward extrusion of NE Tibetan Plateau and Neotectonics in North China 一方面, 陇西地块的向东推挤形成南宁褶皱构造带, 同时使鄂尔多斯地块反时针旋转及地块西北缘地壳引张伸展, 形成银川-河套地堑盆地系, 组成一个独立的挤压-伸展转换系统; 另一方面, 松潘-甘孜和秦岭构造带作为一个地壳通道, 向东挤出导致汾渭地堑盆地系的走滑拉张和 NE 向扩展, 组成走滑-伸展转换系统。华北地块东缘的郯庐断裂带在这个挤出构造过程中表现为挤压走滑边界带

In one hand, the Longxi block in NE Tibet pushed eastward, not only resulting in the formation of the South Ningxia and Liupanshan thrust fault zone, but also rotating the rigid Ordos block counterclockwise. As a consequence of this block rotation is the occurrence of NW-SE extension along the Yinchuan-Hetao graben system. On the other hand, the Songpan-Ganze and Qinling orogenic belt was extruded eastward as a crustal flow channel, accommodated on north by the northern Qinling frontal, left-lateral strike-slip fault, and on south by the Longmenshan-Qingchuan dextral strike-slip fault zone. This extrusion caused significant crustal stretching along the Weihe graben and rift propagation along the Shanxi graben. The Tan-Lu fault zone acted as a transpressional zone

地幔上涌产生的火山活动得到加强, 并波及到南北梯度带以西的大同地区。这 2 个动力作用在时空上彼此消长、交替演化, 共同作用于华北地区, 导致该地区不同方向的地壳引张伸展交替和东西部差异性构造应力机制转化。

11 主要结论

本文通过综合梳理华北地区晚新生代断陷盆地的构造地貌特征、深部构造样式、沉积地层序列、火山活动期次、断层运动学特征及其构造应力场反演、现今构造应力场分析等, 重新审视了华北地区新构造演化阶段, 确定了新构造运动的起始时间与构造应力场的转换历史, 并与青藏高原东缘晚新生代挤出造山作用历史进行比较, 以此探讨华北新构造发生发展的区域动力学, 取得了下列基本认识。

(1) 华北地区新构造运动(起始于中新世晚期, 约 9~10 Ma), 经历了 3 个伸展断陷作用阶段: 新近纪晚期(约 9~2.5 Ma)强烈伸展断陷作用阶段、早

中更新世(2.5~0.13 Ma)稳定湖盆发育阶段、晚更新世(0.13 Ma 以来)最新构造变动阶段, 地壳引张应力方向或 NW-SE 向、或 NE-SW 向。每个伸展断陷阶段晚期以构造挤压隆升事件结束, 分别发生在上新世晚期(约 2.5 Ma)、中一晚更新世之交(0.15~0.13 Ma)和晚更新世晚期一全新世(22 ka 以来)。

(2) 华北地区新构造演化与青藏高原东缘晚新生代挤出造山演化历史之间存在较好的时间对应关系。环鄂尔多斯新近纪晚期强烈伸展断陷作用对应于青藏高原东缘主要挤出造山事件(青藏运动 A 幕或横断运动, 约 10~4.2 Ma), 发生在上新世晚期的青藏运动 B 幕(约 2.5 Ma)影响到整个华北地区, 使其发生构造隆升和郯庐断裂带的压扭变形; 晚更新世早期的共和运动使华北地区主要古湖盆地消亡, 河流发生南北或东西贯通; 现今构造应力机制是最新构造变动阶段的延续, 以 NE-SW 至 W-E 向平移断裂机制占主导、引张机制次之。

(3) 华北地区新构造运动受控于两个岩石圈构

造的相互作用:印欧碰撞产生的远场效应和岩石圈地幔的上涌。前者通过 2 个途径向东传播:青藏高原东北隅陇西地块沿六盘山构造带的向东推挤导致鄂尔多斯地块的顺时针旋转及其西北缘银川-河套地堑盆地的引张伸展,秦岭山地的向东挤出主导了汾渭裂谷系走滑拉分及其沿山西地堑系的北东向扩展。青藏东北隅向东构造挤出也影响到华北东部地区,沿郯庐断裂带发生挤压走滑变形。另一方面,岩石圈地幔上涌主导了华北东部地区的区域热沉降和第四纪 5 期幔源火山活动、渤海湾海域区中、晚更新世的横弯褶曲变形和密集的垂向剪切断层的发育。这两个岩石圈构造作用力在时空上交替和彼此消长,控制了华北地区新构造地貌的差异性演化历史。

致谢:该文试图从新构造演化角度,来综述该地区近 20 年以来、尤其是最近 10 年以来的研究成果,但涉及的参考文献非常多,文中仅参考引用了与新构造有关的文献,其中还有很多文献可能漏引,敬请谅解。我们非常感谢一位匿名审稿人对本文进行了仔细的审阅和修改,并提出了很好的文献补充和修改意见,也感谢地质学报编辑部同仁的辛勤付出。

References

- An Meijian, Li Fangquan. 1998. Modern tectonic stress field in the Shanxi graben system. *Acta Seismologica Sinica*, (05):14~18 (in Chinese with English abstract).
- Angelier J. 1979. Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, 56: 17~26.
- Angelier J. 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research*, 89: 5835~5848.
- Armijo R, Carey E, Cisternas A. 1982. The inverse problem in microtectonics and the separation of tectonic phases. *Tectonophysics*, 82: 145~160.
- Bellier O, Mercier J L, Vergely P, Long C X, Ning C Z. 1988. Evolution sedimentaire et tectonique du graben cenozoique de la Weihe (Province du Shaanxi, Chine du Nord). *Bull. Soc. Geol. France IV* (6), 979~994.
- Bott M H P. 1959. The mechanics of oblique slip faulting. *Geological Magazine*, 96: 109~117.
- Cai Dongsheng, Luo Yuhui, Yao Changhua. 2001. Strike-slip and pull-apart structure study and its significance to petroleum exploration on Laizhouwan sag, Bohai area. *Acta Petroli Sinica*, (02):19~25 (in Chinese with English abstract).
- Cao Zhaoyuan, Xing Lisheng, Yu Qinhe. 1985. The age and boundary of magnetic strata of the Yushe formation. *Bulletin of the Institute of Geomechanics CAGS*, 6: 143~154 (in Chinese with English abstract).
- Cen Min, Dong Shuwen, Shi Wei, Zhou Taofa, Chen Long, Chen Xingqiang. 2015. Structural analysis on the formation mechanism of Datong basin. *Geological Review*, 61(06):1235~1247 (in Chinese with English abstract).
- Chen Daogong, Peng Zicheng. 1985. K-Ar ages and Pb, Sr isotopic characteristics of Cenozoic volcanic rocks in Shandong, China. *Geochimica*, 4: 293~303 (in Chinese with English abstract).
- Chen Daogong, Peng Zicheng. 1988. K-Ar ages and Pb, Sr isotopic characteristics of some Cenozoic volcanics rocks from Anhui and Jiangsu Provinces, China. *Acta Petrologica Sinica*, 4(2): 3~12.
- Chen Fahu. 2008. Preliminary research on megalake Jilantai-Fletao in the arid areas of China during the Late Quaternary. *Chinese Science Bulletin*, 53 (10): 1207~1219 (in Chinese with English abstract).
- Chen Fahu, Fan Yuxin, Madse D B, Chun Xi, Zhao Hui, Yang Liping. 2008. Preliminary study on the formation mechanism of the "Jilantai-Hetao" megalake and the lake evolutionary history in Hetao region. *Quaternary Sciences*, (05):866~873 (in Chinese with English abstract).
- Chen Guoguang, Xu Jie, Ma Zongjin, Deng Qidong, Zhang Jin, Zhao Junmeng. 2004. Recent tectonic stress field and major earthquakes of the Bohai Sea basin. *Acta Seismologica Sinica*, (04):396~403 (in Chinese with English abstract).
- Chen Lichun, Ran Yongkang, Yang Xiaoping. 2003. Late Quaternary activity and segmentation model of the Sertengshan piedmont fault. *Earthquake Research in China*, (03):255~265 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xingqiang, Shi Wei, Hu Jianmin, Dong Shuwen. 2016. Sedimentation of the Pliocene-Pleistocene Chaizhuang section in the central Linfen Basin, north China and its tectonic significance. *Journal of Geomechanics*, 22(04): 984~993 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Shaoping, Deng Qidong, Min Wei, Yang Guizhi. 1998. Yellow River and Quaternary tectonic movements of the Ordos Plateau. *Quaternary Sciences*, (3): 238~248 (in Chinese with English abstract).
- Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology*, 28 (8):703~706.
- Clark M K, Farley K A, Zheng Dewen, Wang Zhicai, Duvall A R. 2010. Early Cenozoic faulting of the northern Tibetan Plateau margin from apatite (U-Th)/He ages. *Earth and Planetary Science Letters*, 296(1-2): 78~88.
- Deng Qidong, Zhang Peizhen, Ran Yongkang, Yang Xiaoping, Min Wei, Chen Lichun. 2003. Active tectonics and earthquake activities in China. *Earth Science Frontiers*, (S1):66~73 (in Chinese with English abstract).
- Deng Yu, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Zhang Dongdong. 2016. The activity and post-reformation of Cenozoic Tan-Lu fault in Laizhou Bay area. *Acta Petrologica Sinica*, 32(4): 1197~1205 (in Chinese with English abstract).
- Deng Zhihui, Chu Quanzhi, Li Jianhua, Liu Peixun, Liang Xiaohua. 1998. A Comparative study on the seismicities of the Zhangbei-Shangyi earthquake and the Datong-Yanggao earthquake. *Seismology and Geology*, (02): 172~178 (in Chinese with English abstract).
- Ding Menglin, Pei Jingxian. 1984. Age dating by thermoluminescence for Quaternary basalts in Penglai and other place, Shandong. *Scientia Geologica Sinica*, (01): 103~107 (in Chinese with English abstract).
- Dong S, Zhang Y, Li H, Shi W, Xue H, Li J, Huang S, Wang Y. 2018. The Yanshan orogeny and late Mesozoic multi-plate convergence in East Asia—Commemorating 90th years of the "Yanshan Orogeny". *Science China Earth Sciences*, 61: 1888~1909.
- Dong Yongsheng, Zheng Shaohua, Qiu Zhuding. 1995. Chinese Cenozoic era mammal age. *Vertebrata Palasiatica*, 33 (4): 290~314 (in Chinese with English abstract).
- Duan Ruitao, Fang Zhongjing. 1995. Neotectonic characteristics of the northern piedmont fault of the Liuleng Mountain. *Seismology and Geology*, 03: 207~213 (in Chinese with English abstract).
- Enkelmann Eva, Ratschbacher Lothar, Jonckheere Raymond, Nestler Ralf, Fleischer Manja, Gloaguen Richard, Hacker Bradley R, Zhang Yue-Qiao, Ma Yin-Sheng. 2006. Cenozoic exhumation and deformation of northeastern Tibet and the Qinling: Is Tibetan lower crustal flow diverging around the Sichuan basin? *Geological Society of America Bulletin*, 118(5-

6): 651~671.

- Feng Mei, Suzan van der Lee, An Meijian, Zhao Yue. 2010. Lithospheric thickness, thinning, subduction, and interaction with the asthenosphere beneath China from the joint inversion of seismic S-wave train fits and Rayleigh-wave dispersion curves. *Lithos*, 120: 116~130.
- Feng Shaoying, Gao Rui, Long Changxing, Fang Shengming, Zhao Chengbin, Kou Kunpeng, Tan Yali, He Heying. 2011. The compressive stress field of Yinchuan graben: deep seismic reflection profile. *Chinese Journal of Geophysics*, 3: 692~697 (in Chinese with English abstract).
- Feng Shaoying, Liu Baojin, Ji Jifa, He Yinjuan, Tan Yali, Li Yiqin. 2015. The survey on fine lithospheric structure beneath Hohhot-Baotou basin by deep seismic reflection profile. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(4): 1158~1168 (in Chinese with English abstract).
- Feng Xijie, Dai Wangqiang. 2004. Lateral migration of fault activity in Weihe basin. *Acta Seismologica Sinica*, 2: 174~182 (in Chinese with English abstract).
- Fang Zhongjing, Ji Fengju, Xiang Hongfa, Ding Menglin. 1976. The characteristics of Quaternary movements along the middle segment of the old Tancheng-Lujiang fracture zone and their seismogeologic conditions. *Scientia Geologica Sinica*, (04): 354~366, 387~388 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jianli, Zhang Ke, Ma Zhanwu, Wang Shubing, W Yanli. 2013. The terrace (T5 and T4) formation since the late Middle Pleistocene and its implication in the through cutting of the middle reach of Yellow River. *Earth Science Frontiers*, 20(4): 166~181 (in Chinese with English abstract).
- Gao Jinghua, Xu Mingcai, Rong Lixin, Chai Mingtao, Wang Guangke, Wang Xiaojiang, Liu Guanjun. 2008. Activity of the southwest segment of Xiadian fault investigated by seismic reflection profiling. *Seismology and Geology*, (02): 497~504 (in Chinese with English abstract).
- Guo Hui, Jiang Wali, Xie Xinsheng. 2011. Late-Quaternary strong earthquakes on the seismogenic fault of the 1976 MS7.8 Tangshan earthquake, Hebei, as revealed by drilling and trenching. *Science China Earth Science*, 41(07): 1009~1028.
- Han Zhujuan, Xu Jie, Ran Yongkang, Chen Lichun, Yang Xiaoping. 2003. Active blocks in North China and seismicity. *Science in China (Series D)*, (S1): 108~118 (in Chinese).
- He Honglin, Min Wei, Yuan Kouqiang. 2008. Testing geo-slice on the rupture of the M_s 8 Sanhe-Pinggu earthquake of 1679. *Seismology and Geology*, (01): 289~297 (in Chinese with English abstract).
- He Peiyuan. 1984. On the geological age of the "Yushe formation" and its environment variation. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 4(2): 77~89 (in Chinese with English abstract).
- He Zexin, Zhang Xujiao, Jia Liyun, Wu Fadong, Zhou Yiqun, Bao Shuyan, Bao Zhiqiang, Yin Zhigang, Guo Bin. 2014. Genesis of piedmont terraces and its neotectonic movement significance in Langshan mountain area, Inner Mongolia. *Geoscience*, 28(01): 98~108 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zhihua, Zhang Shimin, Ren Junjie, Zhao Jianrong. 2008. Activity features of the Handan-Xingtai fault since late Quaternary. *Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics*, (00): 51~61 (in Chinese with English abstract).
- Hu Yunzhuang, Xu Qinnian, Yuan Guibang. 2014. Magnetostratigraphy of borehole CK3 and record of the Quaternary volcanic activities in Xiaoshan of Haixing, Hebei Province. *Journal of Palaeogeography*, 16(3): 411~426 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xiaomeng, Guo Jiaxiu, Hu Xiangyang. 2010a. The development of morpho-sediment of Quaternary in Fenhe River graben basins and the neotectonic movement. *Acta Geographica Sinica*, 65(01): 73~81 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xiaomeng, Wang Lili, Zhe Jiao, Lu Hailong. 2010b. Morpho-sedimentary evidence of the Huoshan fault's late Cenozoic right-lateral movement in the Linfen graben, Shanxi graben system, North China. *Frontiers of Earth Science in China*, 4(3): 311~319.
- Hu Xiaomeng, Lu Hailong, Wu Bing, Wu Jili. 2011. Morpho-sedimentary responses to the regression-transgression of the paleolakes associated with the tectonics in the Shanxi graben basins. *Quaternary Sciences*, 31(06): 1067~1076 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xiaomeng, Chen Meijun, Wang Dutao, Wu Jili, Hu Haichen. 2012. The sequence evolution difference in the times in the geomorphic-sedimentary in the Fenwei graben basins during the middle-late Quaternary and its tectonic significance. *Quaternary Sciences*, 32(05): 849~858 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xingfu, Shi Wei, Li Hengqiang, Chen Long, Cen Min. 2013. Cenozoic tectonic evolution of the Yinchuanbasin: Constraints from the deformation of its boundary faults. *Earth Science Frontiers*, 20(4): 199~210 (in Chinese with English abstract).
- Jia Dong, Li Yiquan, Lin Aiming, Wang Maomao, Chen Wei, Wu Xiaojun, Ren Zhikun, Zhao Yao, Luo Liang. 2009. Structural model of 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake in the rejuvenated Longmen Shan thrust belt, China. *Tectonophysics*, 491: 174~184.
- Jiang Fuchu, Wu Xihao, Xiao Huaguo, Zhao Zhizhong. 1999. On the age of the Xigeda Formation in Luding, Sichuan, and its neotectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 73(1): 1~6 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Fuchu, Wang Shubing, Li Chaozhu, Fu Jianli, Yan Hao. 2012. On study of lacustrine formation and its meaning in the Togtoh platform, Inner Mongolia. *Quaternary Sciences*, 32(05): 931~937 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Wali, Zhang Yingli. 1996. Characteristics of the WNW trending Nanshancun-Chakou active fault in Cixian, Hebei Province and relationship with 1830 Cixian earthquake. *Seismology and Geology*, (04): 349~357 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Wali, Zhang Yingli. 1997. Characteristics of NW trending surface fractures of strong earthquakes, and activity of the Holocene faults of the boundary of North China Plain. *Earthquake Research in China*, (03): 263~270 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Wali, Xiao Zhenming, Wang Huanzhen. 2000a. Sinistral strike-slip along western end of the piedmont active fault of Daqingshan Mountain, Inner Mongolia, China. *Earthquake Research in China*, (03): 203~212 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Wali, Hou Zhihua, Su Yizhi, Zhang Yingli, Xie Xinsheng, Xiao Zhenmin. 2000b. Quantitative study of Holocene activity of main active faults in the Beijing plain and prediction of future seismic danger. *Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics*, (00): 1~15 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Wali, Deng Qidong, Xu Xiwei, Xie Xinsheng. 2004. Surface rupture zone of the 1303 Hongtong M=8 earthquake, Shanxi Province. *Acta Seismologica Sinica*, (04): 355~362 (in Chinese with English abstract).
- Lei Qiyun, Chai Chizhang, Du Peng, Yu Jingxing, Wang Yin, Xie Xiaofeng. 2015. The seismogenic structure of the M 8.0 Pingluo earthquake in 1739. *Seismology and Geology*, 2: 413~429 (in Chinese with English abstract).
- Li Dawei. 2004. Neotectonism and Neogene oil and gas pools in the Bohai Bay basin. *Oil & Gas Geology*, 25(2): 170~174, 184 (in Chinese with English abstract).
- Li Jialing, Chao Hongtai, Cui Zhaowen, Zhao Qingyu. 1994a. Segmentation of active fault along the Tancheng-Lujiang fault zone and evaluation of strong earthquake risk. *Seismology and Geology*, 2: 121~126 (in Chinese with English abstract).
- Li Jialing, Chao Hongtai, Cui Zhaowen, Zhao Qingyu. 1994b. Seismic fault of the 1668 Tancheng earthquake (M=8.5) and

- its fracture mechanism. *Seismology and Geology*, (03): 229~237 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianbiao, Ran Yongkang, Guo Wensheng. 2007. Division of Quaternary beds and environment evolution in Hubao basin in China. *Quaternary Sciences*, (04): 632~644 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianbiao, Ran Yongkang, Guo Wensheng. 2005. Research on the lacustrine strata of the Tuoketuo terrace, Hetao basin, China. *Quaternary Sciences*, (05): 630~639 (in Chinese with English abstract).
- Li Jijun, Fang Xiaomin, Ma Haizhou. 1996. Geomorphic evolution of the Upper Reaches of the Yellow River and uplift of the Qinghai-Xizang Plateau in Late Cenozoic. *Science China (Series D)*, 26 (4): 316~322 (in Chinese with English abstract).
- Li Xishuang, Pei Yanliang, Liu Baohua, Zhao Yuexia, Liu Chenguang, Xie Qihong, Hua Qingfeng, Deng Shenggui. 2009a. Acoustic detection of the causative fault of 1969 M_s 7.4 earthquake in Bohai Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 52 (9): 2291~2301 (in Chinese with English abstract).
- Li Xishuang, Liu Baohua, Hua Qingfeng, Zhao Yuexia, Liu Chenguang. 2009b. Characters of the Zhangjiakou-Penglai fault zone activity in the Bohai Sea since late Quaternary. *Advances in Marine Science*, 27 (03): 332~341 (in Chinese with English abstract).
- Li Xishuang, Liu Baohua, Zhao Yuexia, Liu Chenguang, Wu Jinlong. 2010a. Late Pleistocene-Holocene submarine active structures in the Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 32 (05): 52~59 (in Chinese with English abstract).
- Li Xishuang, Zhao Yuexia, Liu Baohua, Liu Chenguang, Pei Yanliang, Han Guozhong, Hua Qingfeng. 2010b. Structural deformation and fault activity of the Tan-Lu fault zone in the Bohai Sea since the Late Pleistocene. *Chinese Sci. Bull.*, 55 (08): 684~692 (in Chinese with English abstract).
- Li Yanbao, Ran Yongkang, Chen Lichun, Wu Fuyao, Lei Shengxue. 2015. The latest surface rupture events on the major active faults and great historical earthquakes in Hetao fault-depression zone. *Seismology and Geology*, 37 (01): 110~125 (in Chinese with English abstract).
- Li Yan, Liu Baojin, Feng Shaoying, Ji Jifa, Qin Jingjing, Guo Xinjing. 2017. Exploration of shallow structure and buried faults in the Yinchuan basin using seismic refraction and reflection data. *Chinese Journal of Geophysics*, 8: 3096~3109.
- Li Yiquan, Dong Jia, Shaw J H, Hubbard J, Lin Aiming, Wang Maomao, Luo Liang, Li Haibing, Wu Long. 2010. Structural interpretation of the co-seismic faults of the Wenchuan earthquake: 3D modeling of the Longmen Shan fold-and-thrust belt. *Journal of Geophysical Research*, 115 (B04317): 1~26.
- Li Zhichao, Li Wenhui, Li Yongxiang, Li Yuhong, Han Wei. 2016. Cenozoic stratigraphy and paleoenvironments in the Weihe area, Shaanxi Province. *Journal of Stratigraphy*, 40 (2): 168~176 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guangxun. 1995. The trend in research of Neotectonics. *Earth Science Frontiers*, 2 (2): 203~211.
- Liu Baojin, He Honglin, Shi Jinhu, Ran Yongkang, Yuan Hongke, Tan Yali, Zou Ying, He Yinjuan. 2012. Crustal structure and active faults of the Tangyin graben in the eastern margin of Taihang Mountain. *Chinese Journal of Geophysics*, 55 (10): 3266~3276 (in Chinese with English abstract).
- Liu Baojin, Feng Shaoying, Ji Jifa, Wang Shuaijun, Zhang Jianshi, Yuan Hongke, Yang Guojun. 2017. Lithospheric structure and faulting characteristics of the Helan Mountains and Yinchuan Basin: Results of deep seismic reflection profiling. *Science in China (Earth Sciences)*, 60 (3): 589~601.
- Liu Hujun, Xue Xiangxi. 2004. Discussion on the Cenozoic and its chronology in the Weihe River basin. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 26 (4): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianhui, Zhang Peizhen, Lease Richard O, Zheng Dewen, Wan Jinglin, Wang Weitao, Zhang Huiping. 2012. Eocene onset and late Miocene acceleration of Cenozoic intracontinental extension in the North Qinling range - Weihe graben: Insights from apatite fission track thermochronology. *Tectonophysics*, 584: 281~296.
- Liu Lansuo. 1983. Spore-pollen analysis of the Yushe Formation and its geological age. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 3 (4): 105~110 (in Chinese with English abstract).
- Liu Mian, Seth Stein, Hui Wang. 2011. 2000 years of migrating earthquakes in North China: How earthquakes in midcontinents differ from those at plate boundaries. *Lithosphere*, 3 (2): 128~132.
- Liu Zhichao, Wu Fuyuan, Chu Zhuoyin, Xu Xisheng. 2010. Isotopic compositions of the peridotitic xenoliths from the Nushan area, Anhui Province: Constraints on the age of subcontinental lithospheric mantle beneath the East China. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (4): 1217~1240 (in Chinese with English abstract).
- Luo Dan, Chen Lihui, Zeng Gang. 2009. Genesis of intracontinental strongly alkaline volcanic rocks: A case study of Dasban nephelinites in Wudi, Shandong Province, North China. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (2): 311~319 (in Chinese with English abstract).
- Ma Baoqi, Sheng Xiaoqing, Zhang Shouren, Li Yuping. 1998. Late Quaternary activities of the Wulashan piedmont fault. *Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics*, (00): 22~27 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xingquan, Li Yanbao, Ran Yongkang, Chen Lichun. 2013. Major active faults in Lingqiu basin and the seismogenic structure of the earthquake in 1626. *Seismology and Geology*, 35 (02): 208~221 (in Chinese with English abstract).
- Ma X Y, Wu D N. 1987. Cenozoic extensional tectonics in China. *Tectonophysics*, 133: 243~255.
- Ma Zongjin, Fu Zhengxiang, Wang Chengmin. 1982. Nine Earthquakes in China in 1966~1976. Beijing: Seismological Press, 189~204.
- Mercier Jacques Louis, Vergely Pierre, Zhang Yue Qiao, Hou Ming Jin, Bellier Olivier, Wang Yong Ming. 2013. Structural records of the Late Cretaceous - Cenozoic extension in eastern China and the kinematics of the southern Tan-Lu and Qinling fault zone (Anhui and Shaanxi provinces, PR China). *Tectonophysics*, 582: 50~75.
- Min Longrui, Zhang Zonghu, Wang Xisheng, Zheng Shaohua, Zhu Guanyang. 2006. The basal boundary of the Nihewan Formation at the Tai' Ergou section of Yangyuan, Hebei Province. *Journal of Stratigraphy*, (02): 103~108 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xiong, Zhao Bing. 2010. Sedimentary characteristics and stratigraphic ages of the Dayi conglomerates in Mingshan, Sichuan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 30 (4): 72~78 (in Chinese with English abstract).
- Nie Zongsheng, Wu Weimin, Ma Baoqi. 2010. Surface rupture of the A. D. 849 earthquake occurred to the east of Baotou city, China, and discussion on its parameters. *Acta Seismologica Sinica*, 32 (1): 94~107 (in Chinese with English abstract).
- Northrup C J, Royden H, Burchfiel B C. 1995. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia. *Geology*, 23: 719~722.
- Pan Baotian, Hu Zhenbo, Hu Xiaofei, Zhang Zhen, Li Fuqiang. 2012. Time-slice of the fluvial evolution in the northern Jinshan Gorge during late Cenozoic. *Quaternary Science*, 32 (01): 111~121 (in Chinese with English abstract).
- Pei Junling, Liu Feng, Hu Yunzhuang, Zhou Zaizheng, Li Jianfeng, Zhao Yue. 2015. Timing of Quaternary volcanic rocks in Hebei plain. *Geology in China*, 42 (6): 1765~1773 (in Chinese with English abstract).
- Qi Jiafu, Zhuang Yiwei, Lu Kezheng, Yang Qiao. 1995. Cenozoic

- tectonic evolution in Bohai Bay basin Province. *Journal of the University of Petroleum*, (S1):1~6 (in Chinese with English abstract).
- Qin Yong, Jiang Bo, Wang Jiyao, Wu Caifang, Fu Xuehai, Wei Chongtao, Hou Quanlin, Ju Yiwen. 2008. Coupling control of tectonic dynamical conditions to coalbed methane reservoir formation in the Qinsui basin, Shanxi, China. *Acta Geologica Sinica*, 82(10):1355~1362.
- Qiu Zhanxiang, Qiu Zhuding. 1990. Neogene local mammalian faunas; succession and ages. *Journal of Stratigraphy*, 14 (4): 241~260 (in Chinese with English abstract).
- Ran Yongkang, Chen Lichun, Yang Xiaoping, Han Zhujun. 2003. Recurrence characteristics of late-Quaternary strong earthquakes on the major active faults along the northern border of Ordos block. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46 (Suppl. 2): 189~200.
- Ren Jun, Feng Xijie, Wang Fuyun, Peng Jianbing, Liu Chen, Dai Wangqiang, Li Gaoyang, Zhang Yi, Ma Jia. 2013. Fine crust structures of Xi'an sag in the Weihe basin revealed by a deep seismic reflection profile. *Chinese Journal of Geophysics*, 56 (2): 513~521 (in Chinese with English abstract).
- Ren Junjie, Zhang Shimin, Andrew J Meigs, Robert S Yeats, Rui Ding, Shen Xiaoming. 2014. Tectonic controls for transverse drainage and timing of the Xin-Ding paleolake breach in the upper reach of the Hutuo River, North China. *Geomorphology*, 206: 452~467.
- Shao Shixiong, Zhang Yufang, Han Shuhua. 1983. Quaternary volcanism in the Hebei Plain and their characteristics of activity stages. *Marine Geology & Quaternary Geology*, (02): 87~94+99~101 (in Chinese with English abstract).
- Shen Xiaoli, Yao Daquan, Zheng Haigang, Yang Yuanyuan, Zhai Hongtao, Zheng Yinping, Wang Jun, Zhao Peng, Xiao Weipeng. 2015. The Research on activity behavior of Chonggangshan-Wangqian segment of Tan-Lu fault zone since Late Pleistocene. *Seismology and Geology*, 37(01): 139~148 (in Chinese with English abstract).
- Shen Zhengkang, Zhao Chengkun, An Yin, Li Yanxing, David D Jackson, Fang Peng, Dong Danan. 2000. Contemporary crustal deformation in east Asia constrained by Global Positioning System measurements. *Journal of Geophysical Research*, 105(B3): 5721~5734.
- Shen Zhengkang, Lü Jiangning, Wang Min, et al. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 110 (B11409): 1~17.
- Shi Wei, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen. 2003. Quaternary activity and segmentation behavior of the middle portion of the Tan-Lu fault zone. *Acta Geoscientia Sinica*, 24 (1): 11~18 (in Chinese with English abstract).
- Shi Wei, Cen Mina, Chen Long, Wang Yongchao, Chen Xingqiang, Li Jiangyu, Chen Peng. 2015. Evolution of the late Cenozoic tectonic stress regime in the Shanxi Rift, central North China Plate inferred from new fault kinematic analysis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114 (1): 54~72.
- Song Fangmin, Yang Xiaoping, He Honglin, Li Chuanyou, Zhang Lanfeng. 2005. Quantitative analysis of recent activity of the Xiaodanzi-Maobu segment of the Anqiu-Juxian fault, Shandong Province. *Seismology and Geology*, (02):200~211 (in Chinese with English abstract).
- SSB. 1998. *The Research Group on Active Fault System around Ordos Massif*. Beijing: Seismological Press.
- Tapponnie P, Peltzer G, Le Dain A Y, Armijo R, Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia; new insights from simple experiment with plastene. *Geology*, 10: 611~616.
- Tian Qinhui, Duan Rui, Li Xiaoni, Bian Jumei, Wei Qingke. 2015. Research on activities of Xianyang segment of Weihe fault. *Journal of Seismological Research*, 38(02): 250~256+333 (in Chinese with English abstract).
- Tian Qinjian, Shen Xuhui, Feng Xijie, Wei Kaibo. 2003. Primary study on Quaternary tectonic events based on variation of fault activity in Weihe basin. *Seismology & Geology*, 01: 146~154 (in Chinese with English abstract).
- Tong Guohang, Shi Ying, Zheng Hongrui, Zhang Jing, Lin Fang, He Qinglin, Song Xianghua, Liu Zhenxi, Qiao Guangdong, Zhang Jiqiang, Yang Xiangdong, Zhang Wenqing. 1998. Quaternary stratigraphy in Yinchuan basin. *Journal of Stratigraphy*, (01): 44~53 (in Chinese with English abstract).
- Wan Guimei, Tang Liangjie, Zhou Xinhui, Jin Wenzheng, Chen Shuyun. 2010. Neogene Quaternary fault characteristics and its formation mechanism in Bohai Sea. *Acta Petroli Sinica*, 31 (04): 591~595 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bin, Zheng Hongbo, Wang Ping. 2013. The Cenozoic strata and depositional evolution of Weihe basin: progresses and problems. *Advance in Earth Sciences*, 10: 1126~1135 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chun Yong, Zhang Xian Kang, Lin Zhong-Yang, Wu Qing Ju, Zhang Yu-Shen. 1997. Crustal structure beneath the Xingtai earthquake area in North China and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 274 (4): 307~319.
- Wang E, Kirby E, Furlong K P, van Soest M, Xu G, Shi X, Kamp P J J, Hodges K V. 2012. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic. *Nature-Geoscience*, 5: 640~645.
- Wang Hongju, Liu Baohua, Li Xishuang. 2011. Activity of the faults in the southern part of Bohai Sea since the Late Pleistocene. *Advances in Earth Science*, 26(05): 556~564 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongqiang, Deng Chenglong. 2004. A review of magnetostratigraphic studies on the Nihewan Formation. *Progress in Geophysics*, (01): 26~35 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huifen, Yang Xuechang, Zhu Bingquan, Fan Sikun, Dai Tongmo. 1988. K-Ar geochronology and evolution of Cenozoic volcanic rocks in eastern China. *Geochimica*, (01): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Wang Min, Wang Peide. 1992. Focal mechanism and seismogenic structure of the 1989, Datong-Yanggao earthquakes. *Acta Seismologica Sinica*, (04):407~415 (in Chinese).
- Wang Min, Zhang Lianqiang. 1994. Fault plan of the M_s 5.8, Yanggao earthquake, Datong, Shanxi. *Acta Seismologica Sinica*, (01): 124~128 (in Chinese).
- Wang Shubing, Jiang Fuchu, Wu Xihao, Wang Sumin, Tian Guoqiang, Xue Bin, Zheng Hongbo. 1999. A study on the age of Sanmen Group in Sanmenxia area. *Journal of Geomechanics*, 5 (4): 57~65 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yin, Meng Guangkui, Chai Chizhan, Lei Qiyun, Du Peng, Xie Xiaofen. 2015. The accurate location methods for buried active fault exploration: an example of Luhutai faults in Yinchuan graben. *Seismology & Geology*, 37(1): 256~268 (in Chinese with English abstract).
- Wei Baozhu, Wang Kai, Yao Zhenxing. 1992. The 1989 Datong-Yanggao earthquake: focal mechanisms and seismotectonic implications. *Earthquake Research in China*, (01): 51~59 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chen, Zhang Xiuqing, Zhao Yingkui. 2000. Stratiform geomorphology and Himalayan tectonic movement on the North China mountains. *Geography and Territorial Research*, 16 (03): 82~86 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Xu Yigang, Gao Shan, Zheng Jianping. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (6): 1145~1174.
- Wu Shiguo, Yu Chaoyang, Zou Dongbo, Zhang Haiying. 2006. Structural features and Cenozoic evolution of the Tan-Lu fault zone in the Laizhou Bay, Bohai Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 6: 101~110 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Wu Zhonghai, Zhang Yueqiao, Hu Daogong. 2014. Neotectonics, active tectonics and earthquake geology. Geological Bulletin of China, 33 (4): 391~402 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Hongfa, Wang Xuechao, Hao Shujian, Zhang Hui, Guo Shunmin, Li Jinchao, Li Hongwu, Lin Yuanwu, Zhang Wanxia. 2000. Activity of Liaocheng-Lankao buried fault in Quaternary. Earthquake Research in China, (04): 16~24 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Hongfa, Guo Shunmin, Zhang Bingliang, Zhang Wanxia, Chitian Anlong, He Honglin. 1998. Active features of the eastern Liupanshan piedmont reverse fault zone since late Quaternary. Seismology and Geology, (04): 34~40 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Jiacui, Zhang Cunde, Wang Sufan, Zhang Chongli, Li Tieming, Quan Xinhua. 1987. The recent characteristics of active main faults in the Beijing-Tianjin-Tanshan region. Seismology and Geology, (03): 21~28 (in Chinese with English abstract).
- Xie Ruizheng, Ding Zheng, Zhu Shujun, Zhao Yongfu. 1991. Active characteristics in the Jiangsu segment of the Tanlu fault zone and its vicinity. Journal of Seismology, (04): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Xie Xinsheng, Jiang Wali, Wang Rui, Wang Huanzhen, Feng Xiyang. 2003. Holocene paleo-seismic activities on the Kouquan fault zone, Datong basin, Shanxi Province. Seismology and Geology, (03): 359~374 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jie, Zhou Bengang, Ji Fengju, Gao Xianglin, Lv Yuejun, Wang Mingming, Chen Guoguang. 2011. A primary study on the neotectonic pattern of the Bohai area in China. Acta Petrologica Sinica, 32(03): 442~449 (in Chinese with English abstract).
- Xu X W, Ma X Y, Deng Q. 1993. Neotectonic activity along the Shanxi rift system, China. Tectonophysics, 219: 305~325.
- Xu Xiwei, Deng Qidong. 1990. The features of late Quaternary activity of the piedmont fault of Mt. Huoshan, Shanxi Province and 1303 Hongdong earthquake $M_s=8$. Seismology and Geology, (01): 21~30+97~98 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiwei, Che Yongtai, Yang Zhen, You Huichuan, Wang Yanglong, Zhu Yuxin. 1991. Discussion on the model of the seismogenic structure for Datong-Yanggao earthquake swarm. Earthquake Research in China, (02): 79~87 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiwei, Ji Fengju, Yu Guihua, Chen Wenbin, Wang Feng, Jiang Wali. 2000. Reconstruction of paleoearthquake sequence using stratigraphic records from drill logs: A study at the Xiadian fault, Beijing. Seismology and Geology, (01): 9~19 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiwei, Wen Xueze, Zheng Rongzhang. 2003. The new tectonic movement pattern and its dynamic source of active block in Sichuan Yunnan region. Science China (Series D), 33(z1): 151~162 (in Chinese abstract).
- Xu Yigang, Li Hongyan, Pang Chongjin, He Bin. 2009 On the timing and duration of the destruction of the North China Craton. Chinese Science Bulletin, 14: 1974~1989.
- Xu Yueren, He Honglin, Deng Qidong, Wei Zhanyu, Bi Lisi, Sun Haoyue. 2013. Quantitative river geomorphic parameters surrounding Mts. Huoshan, Shanxi Province and their tectonic implications. Quaternary Science, 33 (4): 746~759.
- Yan Jun, Zhao Jianxin, Liu Haiquan. 2007. Quaternary basalts from Longgang in the North China Craton: petrogenesis and characteristics of the mantle source. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1413~1422 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoping, Ran Yongkang, Hu Bo, Guo Wensheng. 2002. Active fault and paleoearthquakes of the piedmont fault (Wujumengkou-Dongfeng Village) for Seertang Mountains, Inner Mongolia. Earthquake Research in China, (02): 9~22.
- Yang Xiaoping, Ran Yongkang, Hu Bo, Guo Wensheng. 2003. Paleoseismic activity on Wujiahe segment of Serteng piedmont fault, Inner Mongolia. Acta Seismologica Sinica, (01): 62~71 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoping, Deng Qidong, Feng Xijie. 2005. The Tieluzi fault interior eastern Qinling Mountains—an active strike-slip fault. Earthquake Research in China, 5(02): 172~183 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoping, Song Fangmin, Zhang Lanfeng, He Honglin, Li Chuanyou, Wang Zhicai. 2006. A Recent paleoearthquake on Qingfengling seismic fault of Tanlu fault zone. Acta Seismologica Sinica, (02): 213~218 (in Chinese with English abstract).
- Yao Haitao, Zhao Zhizhong, Qiao Yansong, Li Chaozhu, Wang Shubing, Wang Yan, Chen Yongsheng, Jiang Fuchu. 2007. Magneto stratigraphic dating of the Xigeda Formation in Mianning, Sichuan and its significance. Quaternary Sciences, 27(1): 74~84 (in Chinese with English abstract).
- Yin A. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: a preliminary synthesis. Tectonophysics, 488 (1): 293~325.
- Yin An, Yu Xiangjiang, Shen Z-K, Jing Liu-Zeng. 2016. A possible seismic gap and high earthquake hazard in the North China Basin. Geology, 43(1): 19~22.
- Yin Gongming, Zhao Bo, Xu Jiandong, Li Jianping, Song Weijuan, Liu Chunru. 2013. Electron spin resonance data of the Xiaoshan volcano in Cangzhou, Hebei Province. Acta Petrologica Sinica, 29(12): 4415~4420 (in Chinese with English abstract).
- Yu Hongmei, Zhao Bo, Wei Feixiang, Xu Jiandong, Wang Qingmin. 2015. Petrological and geochemical characteristics of Quaternary volcanicrocks in Haixing area, eastern North China. Seismology and Geology, 37(04): 1070~1083 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Baoyin, Cui Jiuxu, Zhu Rixiang, Tian Wenlai, Li Rongquan, Wang Qiang, Yan Fuhua. 1996. The problem on the correlation and division of the Nihewan Formation. Science China (Series D), (01): 67~73 (in Chinese).
- Zhang Peizhen, Deng Dewen, Yin Gongming, Yuan Daoyang, Zhang Guangliang, Li Chuanyou, Wang Zhicai. 2006. Discussion on late Cenozoic growth and rise of northeastern margin of the Tibetan plateau. Quaternary Sciences, 26(1): 5~13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peizhen, Deng Qidong, Zhang Zhuqi, Li Haibing. 2013. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China. Science in China Series D: Earth Sciences, 43: 1607~1620 (in Chinese).
- Zhang Xinjing. 2015. Property characteristics and engineering significance of Quaternary light cement limestone in Shanxi Changzhi basin. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 36 (6): 51~54 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yan. 2010. Depositional Facies and paleoenvironmental record of the Late Tertiary stratum of Lanzhou area, Gansu. Acta Sedimentologica Sinica, 28(3): 611~619 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, P Vergely, Mercier J L. 1995. Active faulting in and along the Qinling Range (China) inferred from SPOT imagery analysis and extrusion tectonics of South China. Tectonophysics, 243: 69~95.
- Zhang Yueqiao, Mercier J L, Vergely P. 1998. Extension in the graben systems around the Ordos (China), and its contribution to the extrusion tectonics of South China with respect to Gobi-Mongolia. Tectonophysics, 285: 41~75.
- Zhang, Yueqiao, Vergely P, Mercier J L. 1999. Pliocene-Quaternary faulting pattern and left-slip propagation tectonics in North China. Episodes, 22 (2): 84~88.
- Zhang Yueqiao, Ma Yinsheng, Yang Nong, Shi Wei, Dong Shuwen. 2003a. Cenozoic extensional stress evolution in North China. Journal of Geodynamics, 36: 591~613.
- Zhang Yueqiao, Shi Wei, Dong Shuwen. 2003b. Cenozoic

- deformation history of the Tancheng-Lujiang fault zone, North China, and dynamic implications. *The Island Arc*, 12(3): 281~293.
- Zhang Yueqiao, Yang Nong, Ma Yinsheng. 2003c. Neotectonics in the southern part of the Taihang uplift, North China. *Journal of Geomechanics*, (04): 313~329 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Chen Wen, Yang Nong. 2004.⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of shear deformation of the Xianshuihe fault zone in west Sichuan. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 47(9): 794~803.
- Zhang Yueqiao, Liao Changzhen, Shi Wei, Hu Bo. 2006. Neotectonic evolution of the peripheral zones of the Ordosbasin and geodynamic setting. *Geological Journal of China Universities*, (03): 285~297 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Zhao Yue, Zhang Tian. 2008. Jurassic tectonics of North China: a synthetic view. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 82(2): 310~326.
- Zhang Yueqiao, Li Hailong, Li Jianhua. 2010a. Middle Pleistocene extension along the eastern margin of Xizang (Tibetan) Plateau and its neotectonic significance. *Geological Review*, 56(6): 781~791 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Li Hailong, Wu Manlu, Liao Chunting. 2010b. Late Cenozoic thrust and nappe structure along the Minjiang upstream: evidence from a drill hole. *Geological Review*, (2): 215~223 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Li Hailong. 2016. Late Cenozoic tectonic events in east Tibetan Plateau and extrusion-related orogenic system. *Geology in China*, 43(6): 1829~1852 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Shi Wei, Dong Shuwen. 2011. Changes in Late Mesozoic tectonic regimes around the Ordos basin (North China) and their geodynamic implications. *Acta Geologica Sinica*, 85(6): 801~840.
- Zhang Yueqiao, Li Hailong, Li Jian. 2016. Neotectonics of the eastern margin of Tibetan Plateau: new geological evidence for the change from early Pleistocene transpression to late Pleistocene-Holocene strike-slip faulting. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 467~485.
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde Simon A, Li Sanzhong. 2004. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup. *Earth-Science Reviews*, 67(1-2): 91~123.
- Zheng Dewen, Zhang Peizhen, Wan Jinlin, Yuan Daoyang, Li Chuanyou, Yin Gongming, Zhang Guangliang Wang Zhicai, Min Wei, Chen Jie. 2006. Rapid exhumation at ~8 Ma on the Liupan Shan thrust fault from apatite fission-track thermochronology: Implications for growth of the northeastern Tibetan Plateau margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 248: 198~208.
- Zhang Zonghu, Min Longrui, Zhu Guanxiang. 2003. Lithostratigraphic division of the Nihewan fluvial-lacustrine strata at the Tai'ergou section in Yangyuan, Hebei Province. *Geological Bulletin of China*, (06): 379~383 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaoqun, Zheng Shaohua, Liu Jianbo. 2003. Pliocene micromammalian biostratigraphy of Nihewan basin, with comments on the stratigraphic division. *Vertebrata Palasiatica*, 41(4): 306~313 (in Chinese with English abstract).
- The Editor Committee of the China's Strata. 1999. *The Tertiary System*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhao Yong, Cai Xiangmin, Wang Jiming, Wu Huaichun, Bai Lingyan, Zhang Lei, He Jing, He Fubing. 2013. Quaternary magnetostratigraphy of the Shunyi area in Beijing plain using ZK12-2 borehole profile. *Acta Geologica Sinica*, 87(02): 288~294 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Chengbin, Feng Shaoying, Qin Xueye, Liu Baojin, Kou Kunpeng, Guo Xinjing, Li Jichang, Sun Zhenguo. 2010. Research on the shallow structure characteristics of Xiadian fault using high-resolution artificial seismic exploration method. *Journal of Seismological Research*, 33(01): 81~85+119 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Honghan, Gao Weiming, Zhu Zhaoyu, Huang Baolin, Lu Liangcai. 1991. Quaternary volcanic activities in Shandong Peninsula and northern parts of Jiangsu and Anhui Provinces. *Geochimica*, (03): 205~211 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dagang, Meng Xiangang, Shao Zhaogang, Lei Weizhi, Wang Jin, Han Jianen, Yu Jia, Lv Rngping, Wang Yan. 2009. A discussion on the age of the Neogene strata in Yushe area, Shanxi Province. *Geology in China*, 36(02): 300~313 (in Chinese with English abstract).
- Zhu G, Wang Y S, Liu G S, et al. 2005.⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of strike-slip motion on the Tan-Lu fault zone, East China. *Journal of Structural Geology*, 27: 1379~1398.
- Zhu Rixiang, Deng Chenglong, Pan Yongxin. 2007. Magnetochronology of the fluvio-lacustrine sequences in the Nihewan basin and its implications for early human colonization of northeast Asia. *Quaternary Sciences*, (06): 922~944 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Rixiang, Chen Ling, WuFuyuan, Liu Junlai. 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton. *Science China (Earth Sciences)*, 54(6): 789~797.
- Zou Huiyao, Gong aisheng, Teng Changyu, Zhaung Xinbing. 2011. Late-stage rapid accumulation of the PL19-3 giant oilfield in an active fault zone during neotectonism in the Bozhong depression, Bohai Bay. *Science in China Earth Sciences*, 54: 388~398.

参 考 文 献

- 安美建, 李方全. 1998. 山西地堑系现今构造应力场. *地震学报*, (05): 14~18.
- 蔡东升, 罗毓晖, 姚长华. 2001. 渤海莱州湾走滑拉分凹陷的构造研究及其石油勘探意义. *石油学报*, (02): 19~25.
- 曹照垣, 邢历生, 于清河. 1985. 榆社组磁性地层的年代与界线. *中国地质科学院地质力学研究所所刊*, (6): 143~154.
- 陈国光, 徐杰, 马宗晋, 邓起东, 张进, 赵俊猛. 2004. 渤海盆地现代构造应力场与强震活动. *地震学报*, (04): 396~403.
- 陈道公, 彭子成. 1985. 山东新生代火山岩 K-Ar 年龄和 Pb-Sr 同位素特征. *地球化学*, 4: 293~303.
- 陈道公, 彭子成. 1988. 皖苏若干新生代火山岩的钾氩年龄和铅铋同位素特征. *岩石学报*, 4(2): 3~12.
- 岑敏, 董树文, 施炜, 周涛发, 陈龙, 陈兴强. 2015. 大同盆地形成机制的构造研究. *地质论评*, 61(06): 1235~1247.
- 陈立春, 冉勇康, 杨晓平. 2003. 色尔腾山山前断裂晚第四纪活动与破裂分段模型. *中国地震*, (03): 255~265.
- 陈发虎. 2008. 晚第四纪“吉兰泰-河套”古大湖的初步研究. *科学通报*, 53(10): 1207~1219.
- 陈发虎, 范育新, Madsen D B, 春喜, 赵晖, 杨丽萍. 2008. 河套地区新生代湖泊演化与“吉兰泰-河套”古大湖形成机制的初步研究. 第四纪研究, (05): 866~873.
- 陈兴强, 施炜, 胡健民, 董树文. 2016. 华北临汾盆地中部柴庄上新世一更新世剖面沉积学特征及其构造意义. *地质力学学报*, 22(04): 984~993.
- 程绍平, 邓起东, 闵伟, 等. 1998. 黄河晋陕峡谷河流阶地和鄂尔多斯高原第四纪构造运动. 第四纪研究, (3): 238~248.
- 邓煜, 刘池洋, 王建强, 张东东. 2016. 郯庐断裂带莱州湾段新生代活动演变及其沉积-改造效应. *岩石学报*, 32(4): 1197~1205.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 陈立春. 2003. 中国活动构造与地震活动. *地质前缘*, (S1): 66~73.
- 邓志辉, 楚全芝, 李建华, 刘培询, 梁小华. 1998. 张北-尚义地震与大同-阳高地震地震活动对比研究. *地震地质*, (02): 172~178.
- 段瑞涛, 方仲景. 1995. 六棱山北麓断裂新活动特征. *地震地质*, 03: 207~213.

董永生,郑少华,邱铸鼎. 1995. 中国新生代哺乳动物分期. 古脊椎动物学报, 33(4): 290~314.

丁梦麟,裴静娴. 1984. 山东蓬莱等地第四纪玄武岩的热发光年龄. 地质科学, (01): 103~107.

方仲景,计凤桔,向宏发,丁梦麟. 1976. 郟庐带中段第四纪断裂活动特征与地震地质条件述评. 地质科学, (04): 354~366.

冯希杰,戴王强. 2004. 渭河盆地断层活动的横向迁移. 地震学报, 2: 174~182.

鄧少英,高锐,龙长兴,方盛明,赵成彬,寇昆朋,谭雅丽,何和英. 2011. 银川地堑地壳挤压应力场:深地震反射剖面. 球物理学报, 3: 692~697.

鄧少英,刘保金,姬计法,何银娟,谭雅丽,李怡青. 2015. 呼和浩特-包头盆地岩石圈细结构的深地震反射探测. 地球物理学报, 58(4): 1158~1168.

傅建利,张珂,马占武,王书兵,吴艳梅. 2013. 中更新世晚期以来高阶地发育与中游黄河贯通. 地质前缘, 20(04): 166~181.

傅智雁,袁效奇. 1994. 河套盆地第三系及其生物群. 地层学杂志, (01): 24~29.

高景华,徐德才,荣立新,柴铭涛,王广科,王小江,刘冠军. 2008. 利用地震剖面研究夏垫断裂西南段的活动性. 地震地质, (02): 497~504.

郭慧,江娃利,谢新生. 2011. 钻孔与探槽揭示 1976 年河北唐山 M_s 7.8 地震发震构造晚第四纪强震活动. 中国科学:地球科学, 41(07): 1009~1028.

韩竹军,徐杰,冉勇康,陈立春,杨晓平. 2003. 华北地区活动地块与强震活动. 中国科学(D辑:地球科学), (S1): 108~118.

何培元. 1984. 论“榆社组”地层的时代归属及其环境变迁. 海洋地质与第四纪地质, 4(2): 77~89.

何宏林,闵伟,原口强. 2008. 1679 年三河-平谷 8 级地震破裂带的大地切片实验研究. 地震地质, (01): 289~297.

何泽新,张绪教,贾丽云,武法东,周铁群,鲍淑燕,包智强,殷志刚,郭斌. 2014. 内蒙古狼山山前台地成因及其新构造运动意义. 现代地质, 28(01): 98~108.

侯治华,张世民,任俊杰,赵建荣. 2008. 河北省邯郸-邢台断裂晚更新世以来的活动特征. 地壳构造与地壳应力文集, (00): 51~61.

胡云壮,胥勤勉,袁桂邦. 2014. 河北海兴小山 CK3 孔磁性地层与第四纪火山活动记录. 古地理学报, 16(3): 411~426.

胡小猛,郭家秀,胡向阳. 2010. 汾河地堑湖盆第四纪地貌-沉积特征的构造控制. 地理学报, 65(01): 73~81.

胡小猛,卢海龙,吴冰,吴洁利. 2011. 山西地堑湖盆湖退-湖侵的地貌沉积响应及其构造指示意义. 第四纪研究, 31(06): 1067~1076.

胡小猛,陈美君,王杜涛,吴洁利,胡海晨. 2012. 汾渭地堑系列湖盆第四纪中晚期地貌与沉积阶段性演化的时间序次差异及其构造指示意义. 第四纪研究, 32(05): 849~858.

黄兴富,施炜,李恒强,陈龙,岑敏. 2013. 银川盆地新生代构造演化:来自银川盆地主边界断裂运动学的约束. 地质前缘, 20(04): 199~210.

蒋复初,吴锡肖,肖华国,赵志中. 1999. 四川泸定普格达组成时代及其新构造意义. 地质学报, 73(1): 1~6.

蒋复初,王书兵,李朝柱,傅建利,阎浩. 2012. 内蒙古托克托台地湖相地层及其初步意义. 第四纪研究, 32(05): 931~937.

江娃利,张英礼. 1996. 河北磁县北西向南山村一岔口活动断裂带活动特征与 1830 年磁县地震. 地震地质, (04): 349~357.

江娃利,张英礼. 1997. 华北平原周边北西向强震地壳地震断层及全新世断裂活动特征. 中国地震, (03): 263~270.

江娃利,肖振敏,王焕贞. 2000a. 内蒙大青山山前活动断裂带西端左旋走滑现象. 中国地震, (03): 203~212.

江娃利,侯治华,苏怡之,张英礼,谢新生,肖振敏. 2000b. 北京平原主要活动断裂全新世活动定量研究及未来地震危险性预测. 地壳构造与地壳应力文集, (00): 1~15.

江娃利,邓起东,徐锡伟,谢新生. 2004. 1303 年山西洪洞 8 级地震地表破裂带. 地震学报, (04): 355~362.

雷启云,柴炽章,杜鹏,俞晶星,王银,谢晓峰. 2015. 1739 年平罗 8 级地震发震构造. 地震地质, 2: 413~429.

李吉均,方小敏,马海洲. 1996. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆升. 中国科学(D辑), 26(4): 316~322.

李大伟. 2004. 新构造运动与渤海湾盆地上第三系油气成藏. 石油与天然气地质, 25(2): 170~174.

李家灵,晁洪太,崔昭文,赵清玉. 1994a. 郟庐活断层的分段及其大震危险性分析. 地震地质, (02): 121~126.

李家灵,晁洪太,崔昭文,赵清玉. 1994b. 1668 年郟城 8(1/2)级地震断层及其破裂机制. 地震地质, (03): 229~237.

李智超,李文厚,李永项,李玉宏,韩伟. 2016. 陕西渭河地区新生代地层及沉积环境演化. 地层学杂志, 40(2): 168~176.

李建彪,冉勇康,郭文生. 2005. 河套盆地托克托台地湖相层研究. 第四纪研究, (05): 630~639.

李建彪,冉勇康,郭文生. 2007. 呼包盆地第四纪地层与环境演化. 第四纪研究, (04): 632~644.

李西双,裴彦良,刘保华,赵月霞,刘晨光,解秋红,华清峰,邓声贵. 2009a. 1969 年渤海 M_s 7.4 地震发震断层的声学探测. 地球物理学报, 52(09): 2291~2301.

李西双,刘保华,华清峰,赵月霞,刘晨光. 2009b. 张家口-蓬莱断裂带渤海段晚第四纪活动特征. 海洋科学进展, 27(03): 332~341.

李西双,刘保华,赵月霞,刘晨光,吴金龙. 2010a. 渤海海域晚更新世一全新世的活动构造. 海洋学报(中文版), 32(05): 52~59.

李西双,赵月霞,刘保华,刘晨光,裴彦良,韩国忠,华清峰. 2010b. 郟庐断裂带渤海段晚更新世以来的浅层构造变形和活动性. 科学通报, 55(08): 684~692.

李燕,刘保金,鄧少英,姬计法,秦晶晶,郭新景. 2017. 利用地震折射和反射波资料研究银川盆地浅部结构和隐伏断裂. 地球物理学报, 8: 3096~3109.

李彦宝,冉勇康,陈立春,吴富晓,雷生学. 2015. 河套断陷带主要活动断裂最新地表破裂事件与历史大地震. 地震地质, 37(01): 110~125.

刘光勋. 1995. 新构造学研究趋势的展望. 地质前缘, 2(2): 203~211.

刘保金,何宏林,石金虎,冉永康,袁洪克,谭雅丽,左莹,何银娟. 2012. 太行山东缘汤阴地堑地壳结构和活动断裂探测. 地球物理学报, 55(10): 3266~3276.

刘保金,鄧少英,姬计法,王帅军,张建狮,袁洪克,杨国俊. 2017. 贺兰山和银川盆地的岩石圈结构和断裂特征——深地震反射剖面结果. 中国科学:地球科学, 47(02): 179~190.

刘护军,薛祥煦. 2004. 对渭河盆地新生界及其年代的讨论. 地球科学与环境学报, 26(4): 1~5.

刘兰锁. 1983. 山西榆社组地质时代的商榷. 海洋地质与第四纪地质, 3(4): 105~110.

刘志超,吴福元,储著银,徐夕生. 2010. 安徽女山地幔橄榄岩捕虏体的同位素组成:中国东部新生代岩石圈地幔时代制约. 岩石学报, 26(04): 1217~1240.

罗丹,陈立辉,曾罡. 2009. 陆内强碱性火山岩的成因:以山东无棣大山霞石岩为例. 岩石学报, 25(02): 311~319.

马保起,盛小青,张守仁,李玉萍. 1998. 乌拉山山前断裂晚第四纪活动研究. 地壳构造与地壳应力文集, (00): 22~27.

马兴全,李彦宝,冉勇康,陈立春. 2013. 灵丘盆地主要活动断裂和 1626 灵丘地震发震构造. 地震地质, 35(02): 208~221.

马宗晋,傅征祥,汪成民. 1982. 1966-1976 年中国九大地震. 北京:地震出版社, 189~204.

闵隆瑞,张宗祜,王喜生,郑绍华,朱关祥. 2006. 河北阳原台儿沟剖面泥河湾组底界的确定. 地层学杂志, (02): 103~108.

英雄,赵兵. 2010. 四川名山建山大邑砾岩沉积特征及地层时代. 沉积与特提斯地质, 30(4): 72~78.

聂宗笙,吴卫民,马保起. 2010. 公元 849 年内蒙古包头东地震地表破裂带及地震参数讨论. 地震学报, 32(01): 94~107.

潘保田,胡振波,胡小飞,张忱,李富强. 2012. 晋陕峡谷北段晚新生代河流演化初步研究. 第四纪研究, 32(01): 111~121.

裴军令,刘锋,胡云壮,周在征,李建锋,赵越. 2015. 河北平原第四纪火山岩时代. 中国地质, 42(06): 1765~1773.

漆家福,张一伟,陆克政,杨桥. 1995. 渤海湾盆地新生代构造演化.

- 石油大学学报(自然科学版), (S1): 1~6.
- 秦勇, 姜波, 王继尧, 吴财芳, 傅雪海, 韦重韬, 侯泉林, 琚宜文. 2008. 沁水盆地煤层气构造动力条件耦合控藏效应. 地质学报, 82(10): 1355~1362.
- 邱占祥, 邱铸鼎. 1990. 中国晚第三纪地方哺乳动物化石的排序及其分期. 地层学杂志, 14(4): 241~260.
- 冉勇康, 陈立春, 杨晓平, 韩竹军. 2003. 鄂尔多斯地块北缘主要活动断裂晚第四纪强震复发特征. 中国科学(D辑: 地球科学), (S1): 135~143.
- 任隽, 冯希杰, 王夫运, 彭建兵, 刘晨, 戴王强, 李高阳, 张艺, 马冀. 2013. 深地震反射剖面揭示的渭河盆地西安拗陷的地壳精细结构. 地球物理学报, 56(2): 513~521.
- 邵时雄, 张玉芳, 韩书华. 1983. 河北平原第四纪火山堆积及火山活动分期的特征. 海洋地质与第四纪地质, (02): 87~94.
- 施炜, 张岳桥, 董树文. 2003. 郯庐断裂带中段第四纪活动及其分段特征. 地球学报, 24(1): 11~18.
- 宋方敏, 杨晓平, 何宏林, 李传友, 张兰凤. 2005. 山东安丘-莒县断裂小店子—茅埠段新活动及其定量研究. 地震地质, (02): 200~211.
- 沈小七, 姚大全, 郑海刚, 杨源源, 翟洪涛, 郑颖平, 王俊, 赵鹏, 肖伟鹏. 2015. 郯庐断裂带重岗山—王迁段晚更新世以来的活动性. 地震地质, 37(01): 139~148.
- SSB. 国家地震局鄂尔多斯周缘活动断裂系课题组. 1998. 鄂尔多斯周缘活动断裂系. 北京: 地震出版社.
- 田勤虎, 段蕊, 李晓妮, 卞菊梅, 魏青珂. 2015. 渭河断裂咸阳段活动性研究. 地震研究, 38(02): 250~256.
- 田勤俭, 申旭辉, 冯希杰, 韦开波. 2003. 渭河盆地断层活动反映的第四纪构造事件初步研究. 地震地质, (01): 146~154.
- 童国榜, 石英, 郑宏瑞, 张静, 林防, 何庆林, 宋祥华, 刘振西, 乔光东, 张纪祥, 羊向东, 张文卿. 1998. 银川盆地第四纪地层学研究. 地层学杂志, (01): 44~53.
- 万桂梅, 汤良杰, 周心怀, 金文正, 陈绪云. 2010. 渤海海域新近纪—第四纪断裂特征及形成机制. 石油学报, 31(04): 591~595.
- 王斌, 郑洪波, 王平, 何忠. 2013. 渭河盆地新生代地层与沉积演化研究: 现状和问题. 地球科学进展, 10: 1126~1135.
- 王洪聚, 刘保华, 李西双. 2011. 晚更新世以来渤海南部海域断裂活动性. 地球科学进展, 26(05): 556~564.
- 王慧芬, 杨学昌, 朱炳泉, 范嗣昆, 戴植谟. 1988. 中国东部新生代火山岩 K-Ar 年代学及其演化. 地球化学, (01): 1~12.
- 王红强, 邓成龙. 2004. 泥河湾磁性地层学研究回顾. 地球物理学进展, (01): 26~35.
- 王鸣, 王培德. 1992. 1989年10月18日大同-阳高地震的震源机制和发震构造. 地震学报, (04): 407~415.
- 王鸣, 张康强. 1994. 1991年山西省大同—阳高 M_s 5.8 地震的断层面. 地震学报, (01): 124~128.
- 王银, 孟广魁, 柴炽章, 雷启云, 杜鹏, 谢晓峰. 2015. 隐伏活断层探测中的精定位技术——以银川盆地芦花台断裂为例. 地震地质, 37(1): 256~268.
- 王书兵, 蒋复初, 吴锡浩, 王苏民, 田国强, 薛滨, 郑洪波. 1999. 三门峡地区三门群地层时代研究. 地质力学学报, 5(4): 57~65.
- 韦宝珠, 王凯, 姚振兴. 1992. 1989年大同-阳高地震震源机制及发震模式研究. 中国地震, (01): 51~59.
- 吴忱, 张秀清, 赵英魁. 2000. 中国华北山地的层状地貌与喜马拉雅构造运动. 地理学与国土研究, 16(03): 82~86.
- 吴时国, 余朝华, 邹东波, 张海英. 2006. 莱州湾地区郯庐断裂带的构造特征及其新生代演化. 海洋地质与第四纪地质, (6): 101~110.
- 吴中海, 张岳桥, 胡道功. 2014. 新构造、活动构造与地震地质. 地质通报, 33(4): 391~402.
- 向宏发, 王学潮, 郝书俭, 张辉, 魏顺民, 李今朝, 李洪武, 林元武, 张晚霞. 2000. 聊城-兰考隐伏断裂的第四纪活动性——中国东部平原区一条重要的隐伏活动断裂. 中国地震, (04): 16~24.
- 向宏发, 魏顺民, 张秉良, 张晚霞, 池田安隆, 何宏林. 1998. 六盘山东麓活动逆断裂构造带晚第四纪以来的活动特征. 地震地质, (04): 34~40.
- 向家翠, 张存德, 万素凡, 张崇立, 李铁明, 全新华. 1987. 京、津、唐地区活动断裂带的形变特征. 地震地质, (03): 21~28.
- 谢瑞征, 丁政, 朱书俊, 赵永福. 1991. 郯庐断裂带江苏及邻区第四纪活动特征. 地震学刊, (04): 1~7.
- 谢新生, 江娃利, 王瑞, 王焕贞, 冯西英. 2003. 山西大同盆地口泉断裂全新世古地震活动. 地震地质, (03): 359~374.
- 徐锡伟, 邓起东. 1990. 山西霍山山前断裂晚第四纪活动特征和 1303 年洪洞 8 级地震. 地震地质, (01): 21~30.
- 徐锡伟, 车用太, 杨主恩, 尤惠川, 王洋龙, 朱玉新. 1991. 大同-阳高地震群发震构造模式的讨论. 中国地震, (02): 79~87.
- 徐锡伟, 计凤桔, 于贵华, 陈文彬, 王峰, 江娃利. 2000. 用钻孔地层剖面记录恢复古地震序列: 河北夏垫断裂古地震研究. 地震地质, (01): 9~19.
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. 中国科学(D辑), 33: 151~162.
- 徐杰, 周本刚, 计凤桔, 高祥林, 吕悦军, 王明明, 陈国光. 2011. 渤海地区新构造格局. 石油学报, 32(03): 442~449.
- 徐义刚, 李洪颜, 庞崇进, 何斌. 2009. 论华北克拉通破坏的时限. 科学通报, 14: 1974~1989.
- 闫峻, 赵建新, 刘海泉. 2007. 华北龙岗第四纪玄武岩: 岩石成因和源区性质. 岩石学报, (06): 1413~1422.
- 杨晓平, 冉勇康, 胡博, 郭文生. 2002. 内蒙古色尔腾山山前断裂(乌句蒙口-东风村段)的断层活动与古地震事件. 中国地震, (02): 9~22.
- 杨晓平, 冉勇康, 胡博, 郭文生. 2003. 内蒙古色尔腾山山前断裂带乌加河段古地震活动. 地震学报, (01): 62~71.
- 杨晓平, 邓起东, 冯希杰. 2005. 东秦岭内部铁炉子断裂带的最新走滑活动. 中国地震, (02): 172~183.
- 杨晓平, 宋方敏, 张兰凤, 何宏林, 李传友, 王志才. 2006. 郯庐断裂带青峰岭断层面上最新一次古地震事件. 地震学报, (02): 213~218.
- 姚海涛, 赵志中, 乔彦松, 李朝柱, 王书兵, 王燕, 陈永生, 蒋复初. 2007. 四川冕宁昔格达组磁性地层学初步研究及意义. 第四纪研究, 27(1): 74~84.
- 尹功明, 赵波, 许建东, 李建平, 宋为娟, 刘春茹. 2013. 河北沧州小山火山的 ESR 年代学研究. 岩石学报, 29(12): 4415~4420.
- 袁宝印, 崔久旭, 朱日祥, 田文来, 李容全, 王强, 严富华. 1996. 泥河湾组的时代、地层划分和对比问题. 中国科学(D辑: 地球科学), (01): 67~73.
- 于红梅, 赵波, 费费翔, 许建东, 王庆民. 2015. 华北东部海兴一带第四纪火山岩岩石学及地球化学特征. 地震地质, 37(04): 1070~1083.
- 张岳桥, 杨农, 马寅生. 2003. 太行山隆起南段新构造变形过程研究. 地质力学学报, (04): 313~329.
- 张岳桥, 廖昌珍, 施炜, 胡博. 2006. 鄂尔多斯盆地周边地带新构造演化及其区域动力学背景. 高校地质学报, (03): 285~297.
- 张岳桥, 李海龙, 李建华. 2010. 青藏高原东缘中更新世伸展作用及其新构造意义. 地质论评, 56(6): 781~791.
- 张岳桥, 李海龙, 吴满路, 廖椿庭. 2012. 岷江断裂带晚新生代逆冲推覆构造: 来自钻孔的证据. 地质论评, (2): 215~223.
- 张岳桥, 李海龙. 2016. 青藏高原东部晚新生代重大构造事件与挤出造山构造体系. 中国地质, 43(6): 1829~1852.
- 张培震, 郑德文, 尹功明, 袁道阳, 张广良, 李传友, 王志才. 2006. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论. 第四纪研究, 26(1): 5~13.
- 张培震, 邓起东, 张竹琪, 李海兵. 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1607~1620.
- 张鑫景. 2015. 山西长治盆地第四系淡水灰岩的性状特征及工业意义. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 36(6): 51~54.
- 张焱. 2010. 兰州地区新近纪地层的沉积相与古环境记录. 沉积学报, 28(3): 611~619.
- 张宗祜, 闵瑞隆, 朱关祥. 2003. 河北省阳原台儿沟剖面泥河湾河湖相层岩石地层的划分. 地质通报, (06): 379~383.
- 张兆群, 郑绍华, 刘建波. 2003. 泥河湾盆地上新世小哺乳动物生物地层学及相关问题讨论. 古脊椎动物学报, 41(4): 306~313.

《中国地层典》编委会. 1999. 第三系. 北京:地质出版社.

赵勇,蔡向民,王继明,吴怀春,白凌燕,张磊,何静,何付兵. 2013. 北京平原顺义 ZK12-2 钻孔剖面第四纪磁性地层学研究. 地质学报, 87(02): 288~294.

赵成彬,鄧少英,秦学业,刘保金,寇昆朋,郭新景,李吉昌,孙振国. 2010. 夏垫断裂浅部特征高分辨反射地震探测研究. 地震研究, 33(01): 81~85.

郑洪汉,高维明,朱照宇,黄宝林,卢良才. 1991. 山东半岛和苏皖北部的第四纪火山活动. 地球化学, (03): 205~211.

朱日祥,邓成龙,潘永信. 2007. 泥河湾盆地磁性地层定年与早期人类演化. 第四纪研究, (06):922~944.

朱大岗,孟宪刚,邵兆刚,雷伟志,王津,韩建恩,余佳,吕荣平,王艳. 2009. 山西榆社地区新近纪地层时代讨论. 中国地质, 36(02): 300~313.

邹华耀,龚再升,滕长宇,庄新兵. 2011. 渤中坳陷新构造运动断裂活动带 PL19-3 大型油田晚期快速成藏. 中国科学:地球科学, 41(04): 482~492.

Neotectonics of North China: interplay between far-field effect of India-Eurasia collision and Pacific subduction related deep-seated mantle upwelling

ZHANG Yueqiao^{*1)}, SHI Wei²⁾, DONG Shuwen^{1,3)}

1) School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023;

2) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081;

3) Sino-Probe center, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081

* Corresponding author: Zhangyq@nju.edu.cn

Abstract

North China is a seismically active region, where large-to-moderate historic earthquakes shocked frequently, and become a locus of natural laboratory for study of intraplateneotectonics. Neotectonics of North China is characterized by a rather complex pattern: normal faulting along the two graben systems surrounding the Ordos block in the west, regional uplift of the Taihang Shan Highland in the center and subsidence of the North China-Bohai Bay Plain in the east, sinistral transtensional faulting along its southern Qinling range and dextral transpressional faulting along the NNE-striking Tan-Lu Fault zone. These types of faulting occurred episodically during late Cenozoic, giving rise to a complex morpho-tectonic features. Neotectonics in North China was operated through three episodes of crustal extension-compression, respectively occurring in late Neogene (9 ~ 2.5 Ma), Early-Late Pleistocene and late Pleistocene. Crustal extension derived from fault kinematics inversion oriented either in NW-SE or in NE-SW, and crustal compression determined from focal solutions of earthquakes oriented in NE-SW to W-E. It is thought that episodic development of Neotectonics in North China has been orchestrated by the interplay of two tectonic processes: far-field effect of India-Eurasia collision and subduction-related deep-seated upwelling of lithospheric mantle. In one hand, the eastward push of the crustal fragments in NE Tibet resulted in counterclockwise rotation of the Ordos block and eastward extrusion of Qinling Range, the process of which has profoundly governed late Cenozoic extensional, transtensional and compressional deformation in North China. Specifically the late Neogene NW-SE crustal extension around the Ordos block ((10~9 Ma)~(4.2 Ma)) was concomitant with the extrusion-related orogeny along the eastern Tibetan margin, and three compressional tectonic events occurring at latest Pliocene(before 2.5 Ma), early Late Pleistocene(~200~70 ka)and since latest Pleistocene (~20 ka) are fairly coeval with those occurred along the eastern Tibetan margin. On the other hand, lithospheric mantle upwelling responsible for regional subsidence of the Bohai Bay basin in the plain region east of Mt. Taihangshan, was manifested by five episodes of mantle-derived volcanism particularly active in Early-Late Pleistocene. These two tectonic processes have been spatio-temporally interacted with each other, which has profoundly dominated Neotectonics and seismo-tectonics of North China.

Key words: Neotectonics and active tectonics; crustal extension; transpressional and trenstensional strike-slip faulting; deep-seated mantle upwelling; far-field effect of India-Eurasia collision; North China