

DOI:10.13203/j.whugis20150574



文章编号:1671-8860(2017)12-1749-07

渭河盆地构造应力场有限元数值模拟

瞿伟^{1,2} 王运生² 徐超¹ 张勤¹ 王庆良³

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

2 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都,610059

3 中国地震局第二监测中心,陕西 西安,710054

摘要:依据渭河盆地活动构造特征及深部地层结构,以高精度 GPS 成果为边界条件,构建了区域三维有限元模型,并将模拟断裂运动性质及区域构造应力场,与地质地球物理的结果对比检验了模型模拟结果合理性。数值模拟结果更加精细地揭示出,陇县-马昭与韩城-华县断裂是渭河盆地中部与东、西部构造应力场差异的明显分界带,两条断裂夹挟的盆地中部区域是拉张应力(NW-SE 向)集中带,陇县-马昭断裂以西则呈显著挤压应力(近 E-W 向),韩城-华县断裂以东以 NE-SW 向挤压应力为主;而礼泉-蒲城-合阳断裂又为盆地中部区域南、北两侧构造应力场差异分界带,断裂南侧较北侧呈现出更显著的 NW-SE 向拉张应力,该特征与断裂南侧构造地裂缝较北侧更为发育相对应。

关键词:GPS;渭河盆地;三维有限元;构造应力场;数值模拟;地裂缝

中图法分类号:P231.5

文献标志码:A

渭河盆地是亚洲大陆新生代典型裂陷构造盆地之一^[1],盆地内发育有多条活动断裂,地壳活动强烈,地质灾害频发,引起了许多学者的关注,在渭河盆地地壳运动与变形^[2,3]、断裂几何结构及其活动特征^[4,5]、区域地震及地裂缝灾害^[6-8]以及盆地深部构造活动特征等方面^[9],已取得宝贵的前期研究成果。

研究表明,渭河盆地地壳运动变形与地质灾害活动性主要受区域构造应力场的影响。但前期研究中,主要还是基于二维平面问题的分析^[6,7],缺乏三维空间尺度的客观模型。此外,在对渭河盆地地裂缝灾害的前期研究中,盆地东、西部地裂缝分布不均衡的构造成因已较清晰^[7],但在地裂缝灾害最为严重的盆地中部区域内,其南侧构造地裂缝较北侧更为发育的原因如何,还需进一步分析研究。

为此,本文以高精度 GPS 监测成果作为边界条件,结合区域活动构造特征与深部地层结构,构建了渭河盆地三维有限元动力学模型,并利用模型模拟断裂运动性质及区域构造应力场,与地质

地球物理结果进行对比。

1 GPS 监测资料概况及渭河盆地构造背景特征

1.1 GPS 监测资料概况

本文采用渭河盆地及其邻域 2001~2010 年的 GPS 监测资料(来源于中国地壳运动网络工程与陕西省地震局 GPS 观测网络),采用 GAMIT/GLOBK 软件进行数据处理,解算出相对于较稳定欧亚板块的 GPS 水平运动速度场^[7],其中各 GPS 站点东西、南北向速度分量中误差均不大于 0.6 mm/a,如图 1 所示。

由图 1 可知,相对于较稳定的欧亚板块,GPS 监测揭示出渭河盆地 2001~2010 年地壳运动整体呈现朝南东向运动的趋势性特征,且对比盆地 2001~2007^[6]、2001~2008^[7]年 GPS 运动特征可发现,渭河盆地地壳运动表现出较好的继承性发展特征:盆地地壳运动整体均朝南东向运动,且盆地中部区域地壳运动速率量值较东、西两侧略大。

收稿日期:2016-01-18

项目资助:国家自然科学基金(41674001,41504005,41202189,41274005,41274004);陕西省自然科学基金基础研究计划(2016JM4005);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金(SKLG2014K009);中国博士后基金(2013M530412);中央高校基本科研业务费专项资金(2014G1261050,2014G3263014)。

第一作者:瞿伟,博士,副教授,主要从事大地测量地壳形变研究。maikerqq@163.com

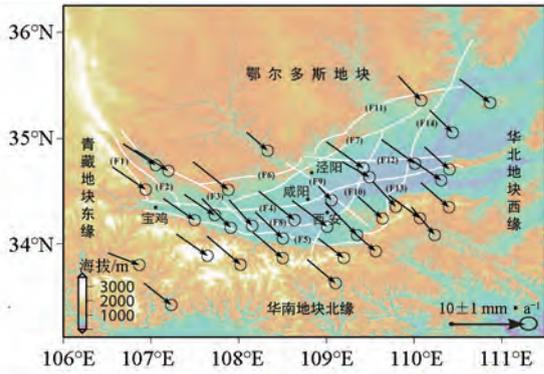


图1 渭河盆地地壳运动 GPS 速度场及其在中国大陆构造体系位置示意图

Fig.1 The GPS Velocities of Crustal Movement in Weihe Basin and its Tectonic Location in China Mainland

1.2 渭河盆地活动构造分布特征

渭河盆地地处中国重要的大地构造分界位置上,北接鄂尔多斯台地,南邻华南地块北缘,东缘为华北地块西缘,西端与青藏地块东缘相接。可知,渭河盆地地处上述 4 个不同构造单元的交接过渡部位,又受整个汾渭裂陷带整体活动的影响,其构造属性与构造格局较复杂。盆地边缘表现出一定的挤压环境,盆地内部则主要表现为拉伸构造环境。盆地内伸展断裂也较发育,断块分割明显,隆起与凹陷相间发育。渭河盆地总体表现为拉张应力作用下的断裂伸展活动以及断块掀斜下陷成盆的伸展构造特征。

盆地构造尤其是断裂构造是控制区域稳定的重要因素,也是引发地质灾害的主要因素。活动断裂构造运动受区域构造应力场控制,其活动性一方面可体现出局部构造应力场特征,另一方面也可体现出区域构造应变场的差异性。从图 1 中可看出,渭河盆地内发育有多条活动断裂^[1],主要发育有近东西向(渭河断裂 F4、秦岭北缘断裂 F5、口镇-关山断裂 F12、余下-铁炉子断裂 F8)、北东东-南西西向(岐山-乾县断裂 F6、礼泉-蒲城-合阳断裂 F7、白水-合阳断裂 F11)、北西-南东向(固关-龟川寺断裂 F1、固关东-虢镇断裂 F2、陇县-马召断裂 F3、泾阳-蓝田断裂 F9)及北东-南西向(长安-临潼-白水断裂 F10、华山西山前断裂 F13、韩城-华县断裂 F14)4 组活动断裂体系。

1.3 渭河盆地深部地层结构

地球物理技术可探测到地壳深部较精细的地层结构,为建立三维有限元模型提供深部地壳结构依据。由渭河盆地深地震宽角反射获得的地壳速度结构剖面图(图 2)可看出,渭河盆地深部地层结构大致可分为上、中、下地壳,底界为莫霍面

的 4 层结构体。图 2 中,纵轴代表地层的深度,横轴代表横跨渭河盆地的距离跨度,黑色细实线代表折断面。其中,上地壳底界面深度范围约为 11.5~17.0 km(C1),中地壳底界面深度范围约为 18.0~22.5 km(C2),下地壳底界面深度范围约为 28.0~33.5 km(C3),上莫霍面顶界面深度范围则约为 35.0~40.5 km(M)。

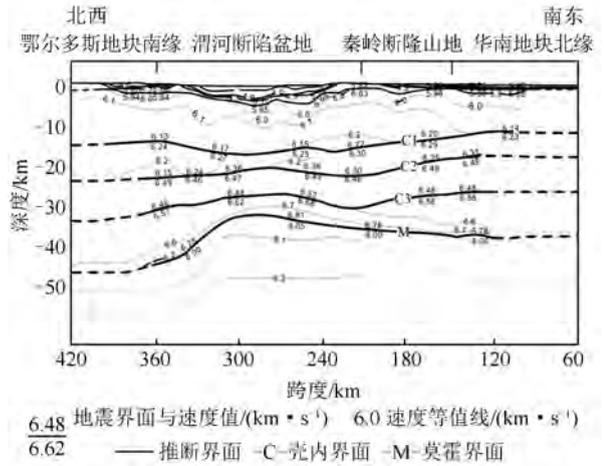


图2 深地震宽角反射获得的渭河盆地深部地壳速度结构图

Fig.2 Deep Crustal Velocity Structure of Wide-Angle Reflection of Weihe Basin

2 渭河盆地三维有限元动力学模型

依据渭河盆地所处的特殊大地构造位置,首先构建由渭河盆地、鄂尔多斯地块、青藏地块东缘、华南地块北缘及华北地块西缘组成的三维地质实体模型(图 3),并根据深地震宽角反射获得的盆地深部地层结构,将整个三维地质实体模型在纵向上简化分成水平的 4 层,即上地壳、中地壳、下地壳及上地幔顶部,三维地质实体模型总厚度约为 55 km。

同时,根据渭河盆地主要活动断裂的空间分布特征,并在建模中充分顾及野外地质地球物理调查的断裂走向、倾向及其深部延伸几何形态等信息^[1],将断裂简化处理成镶嵌在周边硬地壳中宽约 3 km 的软弱带(图 3),以模拟活动断裂的构造运动变形。

2.1 介质物性参数

本文利用渭河盆地及其邻域 2001~2010 年约 10 a 尺度的高精度 GPS 速度场作为有限元模型的边界约束。在此时间尺度内地壳变形发生的主要是弹性变形^[10],因此,本文在建立有限元模型时,将盆地各结构层简化视为均匀各向同性弹

性体,并依据渭河盆地及其邻域的前期研究成果^[1,11],对不同结构体赋予不同的介质物性参数(表 1),模拟各结构体的物理属性特征。断裂介质体强度约为其周边地块强度的 10%^[12]。

2.2 格网剖分

在充分顾及测区内 GPS 站点分布、数值计算精度与收敛性,突出重点研究区域渭河盆地及有

效模拟盆地内断裂构造变形的前提下,对三维实体模型进行格网剖分,共将三维实体模型剖分成由 426 848 个三维实体单元,250 383 个节点组成的三维有限元模型,如图 4 所示。

2.3 边界条件

为使模型模拟能较客观地反映出渭河盆地现代构造运动变形特征,需要设置合理的边界条件。

表 1 渭河盆地及其周边区域各介质层物性参数表

Tab.1 The Mechanical Parameters of Each Medium Body of Weihe Basin and Its Surrounding Areas

介质体名称	上地壳		中地壳		下地壳		上地幔	
	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
鄂尔多斯地块	29.72	0.25	40.75	0.26	48.05	0.28	82.77	0.31
华北地块西缘	26.01	0.26	34.89	0.27	44.71	0.29	77.42	0.31
青藏地块东缘	31.87	0.25	35.41	0.26	47.51	0.28	79.12	0.31
华南地块北缘	27.01	0.25	35.34	0.26	44.51	0.28	78.03	0.31
渭河盆地	25.00	0.26	32.00	0.27	42.00	0.30	76.00	0.32

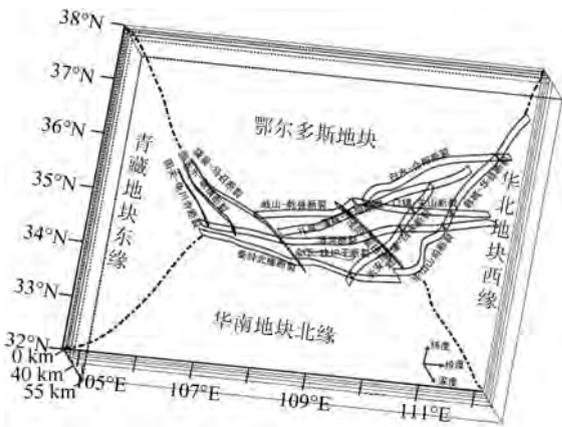


图 3 研究域三维实体模型示意图

Fig.3 The Sketch Map of 3D Solid Model

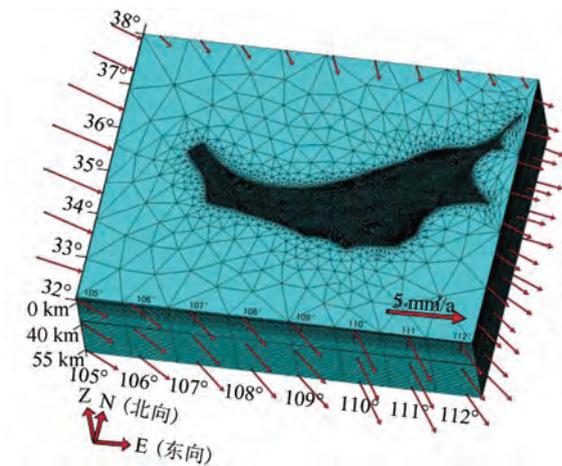


图 4 研究域三维有限元模型示意图

Fig.4 The 3D Finite Element Model of Weihe Basin and its Surroundings

渭河盆地所处的特殊大地构造位置及区域动力学背景^[1,7]为:渭河盆地北部是较稳定的鄂尔

多斯地块,但也存在着长期缓慢的逆时针旋转运动;盆地东部的华北及南部的华南地块每年以一定速率向南东向运动^[13];盆地西部青藏地块东缘对渭河盆地的东向挤压是盆地构造运动变形的有力源^[7]。据此,本文将模型上部设置为自由边界条件,并利用研究域内 GPS 速度插值结果作为模型初始边界位移约束。由于渭河盆地及其周边地块构造运动是由 GPS 观测结果确定的,无法给出其随深度的变化,因而作为一级近似^[14],假定对模型所施加的侧面边界位移约束不随深度变化。对于模型底部边界约束,由于本文主要分析渭河盆地周边地块构造运动对盆地构造运动变形的影响,没有涉及区域软流圈地幔-岩石圈的相互作用,因此将模型底部垂向设置为固定约束而水平向自由。

在上述边界条件约束下,可模拟获得渭河盆地内对应于 GPS 测站处的节点速度值,并将节点处模型模拟与实测 GPS 速度值进行对比分析及调整,最终确定渭河盆地三维有限元模型边界位移约束(图 4)。图 4 中对有限元模型 4 个边界施加的位移约束矢量的大小及方向并不是均匀的:模型西边界位移矢量整体方向呈近 SEE 向,由北至南位移量方向有小角度的向 E 偏转,且中、南段位移量值整体较北段位移量值略大;模型南边界位移矢量整体方向呈近 SE 向,由西至东位移量方向有小角度的向 S 偏转,且东段位移量值较西段略大;模型东边界北段位移矢量方向呈近 SEE 向,南段整体呈近 SE 向,由北至南位移量方向呈小角度向 S 偏转且位移量值也略有增大;模型北边界位移约束量值相比其他边界较小,

位移矢量方向整体呈 SE 向且中段位移量值较东、西段略大。

有限元模拟与实测 GPS 速度的对比及速度差统计直方图如图 5 所示。东方向速度分量差统计均方根(root mean square, RMS)为 0.08 mm, 北方向速度分量差统计 RMS 为 1.01 mm, RMS 计算公式为:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{\text{模拟}} - V_{\text{实测}})^2}{n}} \quad (1)$$

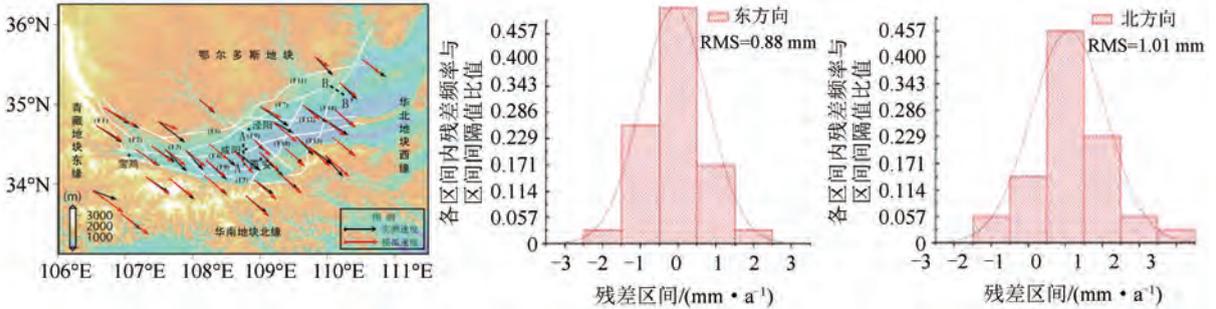


图 5 有限元模拟与实测 GPS 速度对比图

Fig.5 Comparison of the Observed GPS Velocities and the Predicted Velocities Based on 3D Finite Model

3 数值模拟及分析

3.1 断裂运动性质

渭河盆地三维有限元模型在建模中充分考虑了区域内发育的主要活动断裂,根据数值模拟计算结果可得出每条断层两侧沿断层走向的速度分

式中, $V_{\text{模拟}}$ 表示有限元模型数值模拟点位东方向速度分量或北方向速度分量; $V_{\text{实测}}$ 相应地表示实测点位东方向速度分量或北方向速度分量; n 为 GPS 监测点数。

图 5 显示模型模拟速度与实测 GPS 速度具有较好的吻合性,且模型模拟与实测速度差也呈近似良好的正态分布,上述特征在一定程度上表明了模型的有效性,说明有限元数值模拟结果具有较合理的物理意义。

量及其差异(图 6 为跨 F4 渭河断裂剖面 A-A' 与跨 F14 韩城华县断裂剖面 B-B' 的图示结果,剖面 A-A' 与 B-B' 标注见图 5),进而可获得断裂上盘相对于下盘的水平扭动情况^[12],并将模型模拟断裂运动性质与地质调查结果^[1]相比较,对比结果见表 2。

表 2 模型模拟断裂运动性质与地质调查结果对比表

Tab.2 Comparison of the Faults Activities Nature Between the Modeling and the Geological Survey

断裂名称	地质调查断裂运动性质	模型模拟断裂运动性质	断裂名称	地质调查断裂运动性质	模型模拟断裂运动性质
渭河断裂	左旋正断型	左旋	白水-合阳断裂	右旋正断型	右旋
秦岭北缘断裂	左旋正断型	左旋	固关-龟川寺断裂	左旋正断型	左旋
口镇-关山断裂	左旋正断型	左旋	固关东-魏镇断裂	左旋正断型	左旋
余下-铁炉子断裂	左旋正断型	左旋	陇县-马召断裂	左旋正断型	左旋
岐山-乾县断裂	右旋正断型	右旋	泾阳-蓝田断裂	左旋正断型	左旋
礼泉-蒲城-合阳断裂	右旋正断型	右旋	长安-临潼-白水断裂	右旋正断型	右旋
华山山前断裂	左旋正断型	左旋	韩城-华县断裂	右旋正断型	右旋

从表 2 中可看出,模型模拟获得的渭河盆地内断裂运动性质与地质调查结果相一致。从图 6 中可更直观看出断裂的左旋与右旋活动特征。图 6(a) 显示出渭河断裂(F4)北侧各点的速度分量小于南侧各点的速度分量(E 向为正值向),表明断裂作左旋运动,且剖面 A-A' 显示出的断裂两盘速度分量之差约为 1.6 mm/a。图 6(b) 显示出韩城-华县断裂(F14)西侧各点的速度分量大于东侧各点的速度分量(NE 向为正值向),表明断裂作

右旋运动,且剖面 B-B' 显示出该断裂两盘速度分量之差约为 1.79 mm/a。

综上,数值模拟结果能较好地揭示出盆地内活动断裂的实际运动特性,即渭河盆地内具有正断型活动性质的断裂运动主要以左旋为主,兼少数断裂具有右旋扭动的特性。

3.2 渭河盆地构造应力场分布特征

利用渭河盆地三维有限元模型可模拟获得区域构造应力场分布特征,如图 7 所示。

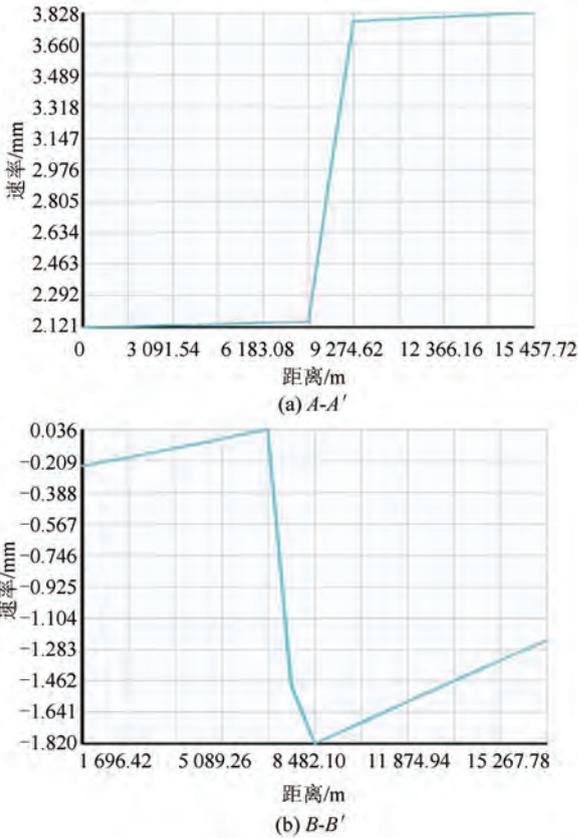


图 6 跨渭河断裂 A-A' 与韩城华县断裂 B-B' 速度测线显示的断裂两盘速度差异图
 Fig.6 Difference Speeds Between the Upper Wall and Down Wall of the Weihe and Hancheng-Huaxian Faults

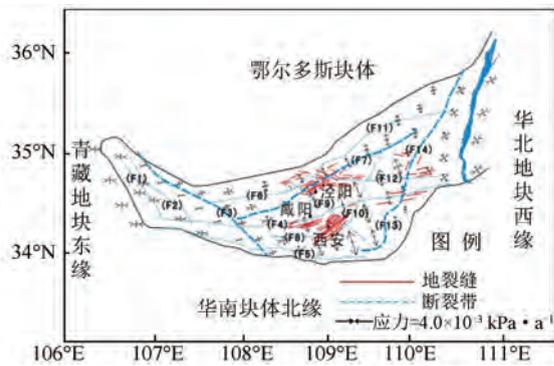


图 7 渭河盆地构造应力场分布特征
 Fig.7 Tectonic Stress Vector Distribution of the Weihe Basin

图 7 显示,渭河盆地构造应力场空间分布具有显著的分带差异性特点。陇县-马昭断裂(F3)与韩城-华县断裂(F14)是渭河盆地中部与东、西部构造应力场差异的明显分界带(图 7 中渭河盆地内粗虚线所示),两条断裂夹挟的盆地中部区域是拉张应力的集中带,拉张应力方向为 NW-SE 向,而陇县-马昭断裂以西则呈显著的挤压应力,挤压应力方向约为 NWW-SEE 向,韩城-华县断

裂以东以 NE-SW 向挤压应力为主,同时伴有少量值的 NW-SE 向拉张应力特征。此特征与区域小震震源机制解^[15]与断层滑动资料反演结果^[16]所得结论,即渭河盆地西部压应力主轴的优势方位为近 NWW-SEE 向,而盆地中东部区域张应力主轴优势方位则为 NW-SE 向,两者相一致。这在一定程度上表明本文数值模拟构造应力场结果的合理性。

相比文献^[6-7]揭示出的渭河盆地构造应力场分布特征,图 7 结果进一步刻画了这两条分割盆地中部与东、西部构造应力场差异的明显分界带。从图 7 中还可发现,盆地中部区域虽然是整个渭河盆地内 NW-SE 向拉张应力的集中带,但以该区域内礼泉-蒲城-合阳断裂(F7)为界,断裂南、北两侧 NW-SE 向拉张应力场也存在一定的差异性,断裂南侧 NW-SE 向拉张应力值达约 3.9×10^{-3} kPa/a,而北侧 NW-SE 向拉张应力值则约为 1.8×10^{-3} kPa/a,断裂南侧较北侧呈现出更为明显的 NW-SE 向拉张应力特征。

渭河盆地中部区域也是整个盆地内构造地裂缝最为发育的区域^[7],但从图 7 可看出,该区域内礼泉-蒲城-合阳断裂的南侧地裂缝灾害较其北侧更为严重。根据前人研究所得的渭河盆地显著的 NW-SE 向拉张应力是盆地内地裂缝灾害群发的力源机制这一成果可推测^[7],盆地中部区域礼泉-蒲城-合阳断裂南侧地裂缝灾害较其北侧更为发育,与断裂南侧受到 NW-SE 向拉张应力场作用更为显著相对应。

4 结 语

本文利用高精度 GPS 监测成果作为边界条件,结合区域活动构造特征与深部地层结构,构建了渭河盆地三维有限元动力学模型,基于模型数值模拟结果获得了对渭河盆地构造应力场特征及盆地地裂缝灾害成因的进一步认识。

陇县-马昭断裂与韩城-华县断裂是渭河盆地中部与东、西部构造应力场差异的明显分界带,两条断裂夹挟的盆地中部区域是 NW-SE 向拉张应力集中带,陇县-马昭断裂以西则呈显著 SEE-NWW 向挤压应力,韩城-华县断裂以东以 NE-SW 向挤压应变为主。

在渭河盆地中部区域内以礼泉-蒲城-合阳断裂为界,断裂南、北构造应力场也存在着一定的差异性,断裂南侧较北侧呈现出更为显著的 NW-SE 向拉张应力特征。

在前期已获得的对渭河盆地东、西部地裂缝分布不均衡的构造成因基础上^[7],进一步揭示出在渭河盆地地裂缝灾害最为严重的中部区域内,礼泉-蒲城-合阳断裂以南地裂缝灾害较其北侧更为发育的现象,与该断裂南侧受到 NW-SE 向拉张应力场作用更为显著相对应。

此外,本文在构建有限元时对已知断裂进行了简化处理,但实际中已知断裂对地壳构造应力的影响是较大的,断裂及其邻域不仅是构造应力场分布的调节带,断裂处本身的构造应力也较复杂。且盆地地裂缝成因机理也较复杂,区域性长期开采地下水,导致一些地区特别是快速建设的大城市(如西安)出现严重地面沉降现象,地表长期干旱导致地表出现裂缝加剧,地层中先存裂缝的现今活动对构造应力场等因素也有影响。此外,地表降雨渗透、地表湿陷等因素也会导致地表出现裂缝,这些综合因素构成了渭河盆地地裂缝形成与发展的内外耦合成因机理模式^[1,7]。

需要说明的是, GPS 观测结果实际上反映了区域构造变形的现今活动水平,虽有近 10 a 的观测资料积累,但较地质学时间还是十分有限,对研究区域动力学演化过程的深入认识,还需更长时间尺度的观测资料及联合多类型数据资料的支持。此外,本文将区域各结构层视为均匀水平的各向同性弹性体,是对各结构层实际介质和变形的近似,当研究较为复杂问题时,需进一步考虑介质的各向异性、非完全弹性变形以及各结构层构造起伏等性质。

参 考 文 献

- [1] Peng Jianbing, Zhang Jun, Su Shengrui, et al. The Activity Faults and Ground Fissures Disaster of Weihe Basin [M]. Xi'an: Northwestern University Press, 1992(彭建兵, 张俊, 苏生瑞, 等. 渭河盆地活动断裂与地质灾害[M]. 西安: 西北大学出版社, 1992)
- [2] Dai Wangqiang, Ren Jun, Zhao Xiaomao, et al. Characteristics of Horizontal Crustal Movement in Weihe Basin and Adjacent Zones by GPS Observation [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(3): 256-260(戴王强, 任隽, 赵小茂, 等. GPS 初步揭示出的渭河盆地及边邻地区地壳水平运动特征[J]. 地震学报, 2004, 26(3): 256-260)
- [3] Zhang Yongzhi, Duan Hurong, Wang Weidong, et al. Tectonic Stress Variation of Fenwei Basin Derived from GPS Data [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(2): 44-47(张永志, 段虎荣, 王卫东, 等. 用 GPS 数据研究汾渭盆地构造应力场变化[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(2): 44-47)
- [4] Feng Xijie, Dai Wangqiang. Lateral Migration of Fault Activity in Weihe Basin [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(2): 174-182(冯希杰, 戴王强. 渭河盆地断层活动的横向迁移[J]. 地震学报, 2004, 26(2): 174-182)
- [5] Shi Yaquin, Feng Xijie, Dai Wangqiang, et al. Distribution and Structural Characteristics of the Xi'an Section of the Weihe Fault [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2008, 30(6): 634-647(师亚芹, 冯希杰, 戴王强, 等. 渭河断裂西安段的展布及其结构特征[J]. 地震学报, 2008, 30(6): 634-647)
- [6] Qu Wei, Zhang Qin, Wang Qingliang, et al. Research on Present Crustal Horizontal Deformation Feature of Weihe Basin and its Tectonic Activity [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(7): 830-834(瞿伟, 张勤, 王庆良, 等. 渭河盆地现今地壳水平形变特征及区域构造活动性[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(7): 830-834)
- [7] Zhang Qin, Qu Wei, Peng Jianbing, et al. Research on Tectonic Causes of Numerous Ground Fissures Development Mechanism and its Unbalance Distribution Between Eastern and Western of Weihe Basin [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2012, 55(8): 2 589-2 597(张勤, 瞿伟, 彭建兵, 等. 渭河盆地地裂缝群发机理及东、西部地裂缝分布不均衡构造成因研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(8): 2 589-2 597)
- [8] Zhao Chaoying, Zhang Qin, Zhu Wu, et al. Monitoring on Xi'an Ground Fissures Deformation with TerraSAR-X Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(1): 81-85(赵超英, 张勤, 朱武, 等. 采用 TerraSAR-X 数据监测西安地裂缝形变[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(1): 81-85)
- [9] Ren Jun, Peng Jianbing, Wang Fuyun, et al. The Research of Deep Structural Features of Weihe Basin and Adjacent Areas [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2012, 55(9): 2 939-2 947(任隽, 彭建兵, 王夫运, 等. 渭河盆地及邻区地壳深部结构特征研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2 939-2 947)
- [10] Teng Jiwen. Introduction to Solid Earth Geophysics [M]. Beijing: Seismological Press, 2003(滕吉文. 固体地球物理学概论[M]. 北京: 地震出版社, 2003)
- [11] Huang Zhongxian, Su Wei, Peng Yanju, et al. Rayleigh Wave Tomography of China and Adjacent Regions [J]. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 2003, 108(B2): 345-366
- [12] Liu Xia. Dynamic Numerical Simulation of the Contemporary Crustal Movement and Deformation in

- North China [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007(刘峡, 华北地区现今地壳运动及形变动力学数值模拟[D], 合肥:中国科技大学, 2007)
- [13] Zhang Peizhen, Gan Weijun, Shen Zhengkang, et al. A Coupling Model of Rigid-Block Movement and Continuous Deformation: Patterns of the Present-day Deformation of China's Continent and its Vicinity[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 748-756(张培震, 甘卫军, 沈正康, 等. 中国大陆现今构造作用的地块运动和连续变形耦合模型[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 748-756)
- [14] Liu Chang, Shi Yaolin, Zheng Liang, et al. Relation Between Earthquake Spatial Distribution and Tectonic Stress Accumulation in the North China Basin Based on 3D Visco-Elastic Modelling [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2012, 55(12): 3 942-3 957(柳畅, 石耀霖, 郑亮, 等. 三维黏弹性数值模拟华北盆地地震空间分布于构造应力积累关系[J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 3 942-3 957)
- [15] Wang Weidong. Study on the Regional Stability Dynamical Background in the Forming of Xi'an Ground Fissures [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010(王卫东, 西安地裂缝形成的区域稳定动力学背景研究[D]. 西安:长安大学, 2010)
- [16] Xie Zhenqian, Fang Ji'an, Tian Xitang, et al. The Evolution of the Structural Stress Field and Analysis of the Formation Mechanism in the Weihe Basin [J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 1991, 12(1): 45-52(谢振乾, 方继安, 田西堂, 等. 渭河盆地构造应力场演变及盆地形成机制分析[J]. 西安地质学院学报, 1991, 12(1): 45-52)

Tectonic Stress Field of the Weihe Basin Using the Finite Element Method

QU Wei^{1,2} WANG Yunsheng² XU Chao¹ ZHANG Qin¹ WANG Qingliang³

¹ College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

² State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

³ Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, China

Abstract: Based on the tectonic and the deep geological strata structure of the Weihe Basin, the three-dimensional (3D) finite element dynamic model was established by using the high-precision GPS monitoring data as boundary conditions. We further compared the movement property of faults and focal tectonic stress field simulated by the 3D model with the geological survey results and focal mechanism. The results of numerical simulation detailed reveal that the Longxian-Mazhao and Hancheng-Huaxian faults are the obvious difference boundaries of the tectonic stress field. The middle part where between the two faults is the concentration zone of tensile stress in the NW-SE direction, on the west side of the Longxian-Mazhao fault presents significant compression stress in the E-W direction, while on the east side of the Hancheng-Huaxian fault mainly presents compression stress in the NE-SW direction. The Pucheng-Liquan-Heyang fault is also the obvious difference boundaries divided the tectonic stress field of the middle part of Weihe Basin into two parts. The south side shows more significant tensile stress in the NW-SE direction compared with the north side of this fault. That may be the tectonic dynamic mechanism for the ground fissure more developed in the south side than the north side.

Key words: GPS; Weihe Basin; three-dimensional finite element model; tectonic stress field; numerical simulation; ground fissures

First author: QU Wei, PhD, associate professor, specializes in geodesy and crustal deformation. E-mail: maikerqq@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41674001, 41504005, 41202189, 41274005, 41274004; Natural Science Basic Research Plan in Shannxi Province of China, No. 2016JM4005; the Opening Fund of State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), No. SKLGP2014K009; China Postdoctoral Science Foundation, No. 2013M530412; the Special Fund for Basic Scientific Research of Central Colleges, Nos. 2014G1261050, 2014G3263014.