



University  
of Glasgow

Zhang, Q., Qu, W., Peng, J., Wang, Q., and Li, Z. (2012) Research on tectonic causes of numerous ground fissures development mechanism and its unbalance distribution between eastern and western of Weihe basin. Chinese Journal of Geophysics (Chinese Edition), 55 (8). pp. 2589-2597. ISSN 0001-5733

Copyright © 2012 American Geophysical Union

A copy can be downloaded for personal non-commercial research or study, without prior permission or charge

The content must not be changed in any way or reproduced in any format or medium without the formal permission of the copyright holder(s)

When referring to this work, full bibliographic details must be given

<http://eprints.gla.ac.uk/75717/>

Deposited on: 21<sup>th</sup> February 2013

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.地球物理学报,2012,55(8):2589-2597,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.08.010.

Zhang Q, Qu W, Peng J B, et al. Research on tectonic causes of numerous ground fissures development mechanism and its unbalance distribution between eastern and western of Weihe basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(8):2589-2597,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.08.010.

## 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

张 勤<sup>1,2</sup>, 瞿 伟<sup>1,2</sup>, 彭建兵<sup>1,2</sup>, 王庆良<sup>3</sup>, 李振洪<sup>4</sup>

1 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054

2 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 西安 710054

3 中国地震局第二监测中心, 西安 710054

4 英国格拉斯哥大学地理与地球科学学院, 英国 8QQ

**摘 要** 利用渭河盆地 2001—2008 年高精度 GPS 监测资料, 结合区域构造特点建立了渭河盆地有限元动力学模型, 基于此研究了区域现今地壳应力场特征, 深入分析了构造应力场与盆地内地裂缝群发之间的内在关系, 首次基于空间大地测量定量的揭示出了区域构造应力场与盆地内地裂缝群发的内在动力学联系, 及盆地东、西部地裂缝分布不均衡的根本成因. 研究表明: 渭河盆地现今地壳应力场差异性显著, 主要呈现出中、东部以 NW-SE 向拉张为主, 西部则以 NW-SE 向压缩应力为主, 整体具有相对左旋运动趋势, 与区域以往长期构造变形具有较好的继承性; 分析揭示出区域 NW-SE 向拉张构造应力正是盆地内中、东部地裂缝群发的力源机制, 而盆地内差异性构造应力场也正是导致盆地东、西部地裂缝发育不均衡的根本原因所在, 由此进一步证实了渭河盆地地裂缝的强构造属性, 其是由活断层在上述力源机制作用下, 以蠕滑形式错断地层使土层破裂而形成的. 本文研究结果为盆地地裂缝灾害防治、城市安全建设提供了重要信息.

**关键词** 渭河盆地, 地裂缝, GPS, 构造应力场, 有限元

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.08.010

中图分类号 P541

收稿日期 2011-12-08, 2012-06-28 收修定稿

### Research on tectonic causes of numerous ground fissures development mechanism and its unbalance distribution between eastern and western of Weihe basin

ZHANG Qin<sup>1,2</sup>, QU Wei<sup>1,2</sup>, PENG Jian-Bing<sup>1,2</sup>,

WANG Qing-Liang<sup>3</sup>, LI Zhen-Hong<sup>4</sup>

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

2 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering Ministry of Education, Xi'an 710054, China

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

4 College of Geographical and Earth Sciences, University of Glasgow G128QQ, United Kingdom

**Abstract** Based on the high precision GPS monitoring data from 2001 to 2008, the finite element

**基金项目** 国家自然科学基金重点项目(41130753), 国家自然科学基金项目(41072266, 41104019, 40902081), 国土资源部中国地调局项目(1212010914015)资助.

**作者简介** 张勤, 女, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事动态大地测量与灾害、环境监测的理论与方法、GPS 与 InSAR 融合、现代数据处理理论与方法等方面的教学与科研工作. E-mail: zhangqinle@263.net.cn

dynamic model of Weihe basin is established combined with its tectonic characteristics. Using above model the regional crustal stress field characteristics is studied, and the intrinsic relationship between the tectonic stress field and numerous ground fissures of Weihe basin is also analyzed thoroughly. For the first time the inherent dynamic relationship between the tectonic stress field and numerous ground fissures of Weihe basin is revealed quantitatively by the spatial geodetic. And the root causes of its unbalanced distribution between eastern and western of Weihe Basin is also revealed. The results show that the present crustal stress fields of Weihe basin have significant difference, the eastern part mainly shows extension stress field with NW-SE direction while the western part mainly shows compression stress field with NE-SW direction, and overall showed relatively sinistral movement trend, which has good inheritance with the regional previous long-term tectonic deformation. The analysis discloses that the regional tensional stress field with NW-SN direction is the power source mechanism of numerous ground fissures development in the central and eastern of Weihe basin, while the differences of tectonic stress fields is also the fundamental reason for cracks unbalanced development in the eastern and western of Weihe Basin. Further analysis shows that the ground fissures in the Weihe Basin have strong tectonic characteristic, they are shaped by active faults with creep slipping ruptured soil under above power source mechanism. It is believed that the results in this paper could provide important information for the prevention of basin ground fissures disasters and city safety constructions.

**Keywords** Weihe basin, Ground fissures, GPS, Tectonic stress field, Finite element

## 1 引言

汾渭盆地位于鄂尔多斯、青藏东缘甘青、华北及华南块体之间,在我国现代构造变形的大陆动力学格局中具有特殊的地位,它既是我国东西部大地构造的分界带和解耦带,又是鄂尔多斯、华北、华南等构造块体差异运动的调节带,是分隔我国华北、华南地块的一条重要大地构造分界线。对于汾渭盆地周边四大块体的构造运动特征,地质地震学者们通过大量研究已经证实了其北部的鄂尔多斯块体是一个较稳定的整体刚性块体,不存在着明显的运动;而其西部的青藏东缘甘青块体受印度板块与欧亚板块碰撞产生的动力学效应影响显著,近年来年均以约 4mm/y 的速度向东、东南方向运动<sup>[1]</sup>,会对汾渭盆地西部区域形成挤压,由此形成了汾渭盆地构造变形的动力源;而其东部和南部的华北、华南块体由于受到太平洋板块及菲律宾海板块与欧亚板块碰撞产生的动力学效应影响,每年也会以较小的速度向南东运动<sup>[2-5]</sup>。渭河盆地则地处汾渭盆地西部,盆地内活断层极为发育,这些活断层纵横成网、相互切割,其活动对盆地的构造体制和地质灾害的分布规律有重要的影响<sup>[6-7]</sup>。

近年来地裂缝灾害已成为渭河盆地影响面最广、破坏最严重的地质灾害。据调查发现盆地内地裂缝有近 200 条之多,几乎遍及全区 20 余个县市,主要集中在盆地的中、东部地区,以西安、咸阳、泾阳、三原、渭南等地活动最为显著,而盆地西部则发育很少呈零星分散分布。且渭河盆地内地裂缝大都密集分布在活断层近侧,并与断层走向具有较好的一致性,与断层的活动性质也较为一致,具有正断层活动特性<sup>[8]</sup>(如图 1 所示)。

针对渭河盆地较强烈的构造断裂活动特征现象,一些学者已开展了多方面研究。戴王强等利用该区域 2001—2004 年 GPS 资料,研究得出了盆地中部彬县—西安—蓝田一线是盆地内地壳水平运动的显著区域<sup>[6]</sup>;祝意青等利用渭河盆地 1971—1996 年水准、1993—2005 年重力及 1999—2004 年 GPS 资料,分析了该区域地壳形变场变化与活动断裂构造间的密切相关性,且盆地东、西部地壳运动存在着一定的差异<sup>[9]</sup>;胡斌等利用渭河盆地 1992—2004 年的流动重力测量资料,获得了该区域重力场变化与活动断裂构造密切相关,重力场有规律的变化与区域应力—应变场微动态活动有关<sup>[10]</sup>;范俊喜等利用鄂尔多斯地块周边 20 世纪 90 年代的小震震源机制解,获得了地块周边主要以水平构造作用力为主,且

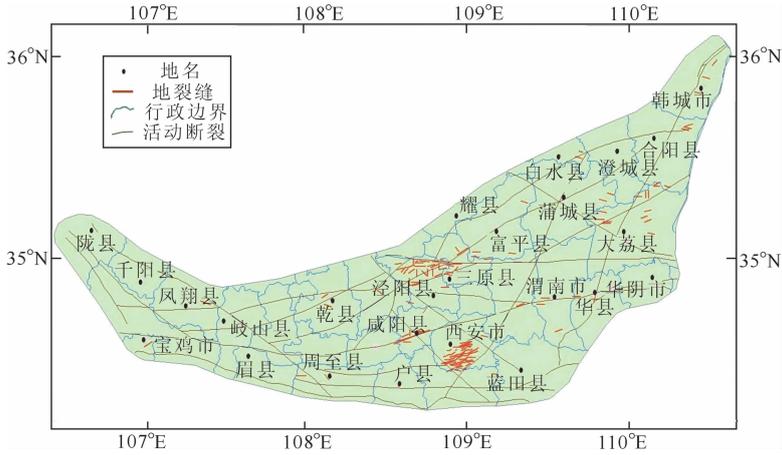


图 1 渭河盆地构造断裂及地裂缝分布示意图(据彭建兵,2009)

Fig.1 The tectonic faults and Ground Fissures of Weihe basin (According to PENG Jian-Bin,2009)

其主压应力轴走向以地块西南侧为中心,从北至东呈扇形展布的特征<sup>[2]</sup>.

针对该盆地内严重的地裂缝灾害,彭建兵、张天明、陈志新等多位学者,利用地质调查及地球物理实验等手段,对汾渭盆地地裂缝灾害进行了较为深入的调查研究,从地质研究角度得出了渭河盆地地裂缝具有强烈的构造属性<sup>[11-16]</sup>.

然而,渭河盆地现今如此强烈的地壳形变及构造活动存在怎样的应力场特征,是否与区域以往构造形变特征具有一定的继承性,是否与盆地内现今多发的地裂灾害之间存在内在联系?特别是在渭河盆地构造带上,区域内地裂缝灾害分布具有如此明显的不均衡性,是何原因造成的?而且关于盆地地裂缝成因机理上一直存在究竟是抽水还是构造活动或还是两者兼有的因素是诱发地裂缝群发的主要诱因的争论.迄今为止,各种研究主要集中在利用地质手段从定性角度上对地裂缝进行研究,还缺乏从大地测量手段、特别是利用 GPS 地壳形变监测数据基于反演理论从定量角度,分析研究构造因素与地裂缝灾害之间的内在关系.

为此,本文借助于 GPS 监测手段在地壳构造变形及动力学研究方面的优势,利用渭河盆地多期高精度 GPS 监测成果,并结合区域构造特点建立了区域有限元动力学模型,从定量角度深入研究了构造因素与渭河盆地地裂缝群发之间的内在关系.通过分析区域现今构造应力场特征及其与地裂灾害之间关系,以及对构造运动变形的动力学背景的深层剖析,揭示出了渭河盆地地裂灾害群发的根本力源机制所在,以及盆地东、西部地裂缝分布不平衡的根本成因.首次基于空间大地测量技术定量的揭示证明

了构造因素是影响地裂缝发育及活动的主导因素,从而也从大地测量研究角度进一步证实了渭河盆地的强构造属性.研究成果对于区域地裂成害机理的研究与防治,及城市地下结构防裂和地表建筑物的防灾等均具有重要的理论与指导意义.

## 2 GPS 数据处理

在中国地震局牵头联合建成“中国地壳运动观测网络工程”的 GPS 站点基础上,陕西省地震局、长安大学分别布设完成了渭河盆地及其周边地区 GPS 网的加密工作,使该区域形成了测点密度相对

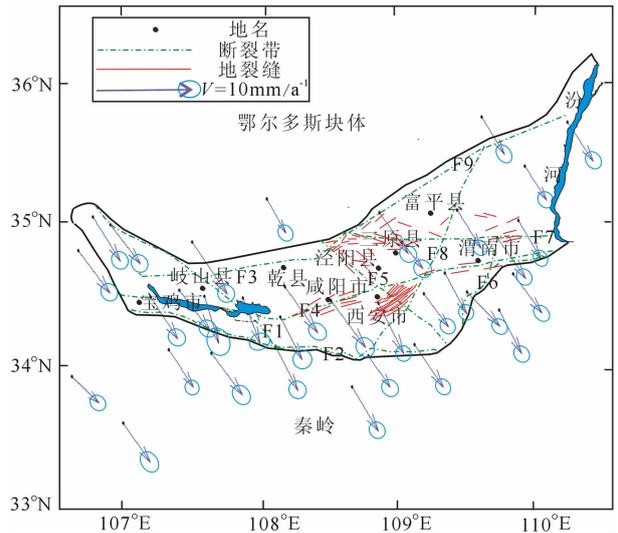


图 2 渭河盆地相对于欧亚板块的 GPS 速度场(2001—2008 年)

Fig.2 GPS velocity field of Weihe basin related to Eurasia plate from 2001 to 2008

较大,基线相对较短的 GPS 观测网. 经过对这些 GPS 点的多年监测,获取了大量宝贵的形变数据,为基于形变监测数据开展研究盆地及其典型区域活动构造变形特征、探究其地质灾害成因机理提供了可能性.

本文利用渭河盆地 2001—2008 年 GPS 数据,采用 GAMIT 单日松弛解处理方法处理了基线;其中采用了 IGS 精密星历,卫星轨道约束为  $10^{-8}$ ,IGS 站选用中国大陆及周边地区的 13 个 IGS 跟踪站的资料(如, GUAO、ULAB、SUWN、WUHN 等),并对 IGS 站 X、Y、Z 坐标统一给定 5 cm 的约束. 在获得了单日解 H 结果文件之后,再利用 GLOBK 软件统一整体平差计算出各站点水平运动速率,同时为保障区域 GPS 网相对变形精度,对 IGS 站均施加了  $0.25 \sim 0.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  的站点速率分量约束. 由此,获得了 ITRF2000 框架基准下渭河盆地区域的 GPS 站点速率,并选取稳定的鄂尔多斯块体内的站点(榆林区域站 D058)为基准点,由此求出了区域 GPS 站点相对于稳定欧亚板块下的运动速率,其中各站点南、北向速度分量均值约为  $-4.4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,中误差均不大于  $0.6 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,东、西向速度分量均值约为  $4.0 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,中误差均不大于  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,见图 2 速度矢量图所示,(图 2 中 F1:陇县—马召断裂, F2:秦岭山前断裂, F3:岐山—乾县断裂, F4:渭河断裂, F5:泾阳—蓝田断裂, F6:华山前延断裂, F7:口镇—关山断裂, F8:长安—临潼—白水断裂, F9:礼泉—蒲城—合阳断裂,下同).

由图 2 可以看出渭河盆地相对于稳定欧亚板块整体上朝 SE 向运动,并图 2 在一定程度上反映出渭河盆地内部区域之间差异运动的轮廓:盆地中部 GPS 站点速率明显较两侧要大,预示此区域地壳水平拉张运动明显.

### 3 渭河盆地有限单元模型

渭河盆地整体构造运动与其周边板块运动息息相关,且其内部构造断裂带的活动对盆地内地壳形变的影响也是十分显著的. 因此,在研究渭河盆地这种大尺度地壳形变时,需要充分顾及到其周边动力学环境及其内部断裂带活动的影响,而有限单元法就是解决上述问题的一种有效方法.

地壳及断层介质在长期变形中具有粘弹性性质,但是考虑到 GPS 观测到的是介质在某一个时间段内由于应力变化产生的变形增量,因此,可将在一

个短时间周期内获取的 GPS 年形变速率所反映出的地壳及断层的形变,看成是均匀各向同性弹性体的形变. 据此构建渭河盆地有限元模型.

#### 3.1 构造模型建立

依照有限单元基本原理<sup>[17]</sup>,结合渭河盆地及其周边区域构造特点,首先构建由渭河盆地、鄂尔多斯、华北及华南地块组成的活动关系模型,并将渭河盆地内的断裂带考虑成以一定宽度镶嵌在周围硬地壳中的软弱带,同时为了防止模型整体平动,将研究区域向外延伸 30 km 均以较柔的富有弹性的物质填充(图 3 中 I、II 块体部分),以消除边界载荷不连续所造成的应力集中、局部变形过大等边界效应<sup>[18]</sup>. 由此,该构造模型即考虑到了周边地块运动对渭河盆地整体构造运动的影响,又顾及到了断裂带活动对盆地内部地壳形变的影响.

#### 3.2 介质材料属性

参考前人的研究成果,设定构造模型中各个地块的泊松比和密度值的大小<sup>[19]</sup>,同时结合文献<sup>[20]</sup>中提供的渭河盆地及其周边区域的 P 波速度值,由式(1)可以计算获得介质的弹性模量值<sup>[19]</sup>.

$$E = V_P \rho (1 + \nu) (1 - 2\nu) (1 - \nu), \quad (1)$$

式(1)中  $V_P$  为 P 波速度,  $\rho$  代表密度,  $\nu$  代表泊松比,  $E$  代表弹性模量,相应的将延伸物质和断裂带处理为介质强度较低的特殊单元,对各构造块体赋予不同的力学参数,如表 1 中所示.

表 1 各块体力学参数

Table 1 The mechanical parameters of each block

地块名称	弹性模量 (GPa)	泊松比	密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
模型南、北侧边缘(I 块体)	10	0.27	1000
模型东、西侧边缘(II 块体)	30	0.27	2500
鄂尔多斯块体(III 块体)	90	0.26	3000
渭河盆地(IV 块体)	80	0.26	2700
秦岭造山带(V 块体)	85	0.22	2800
断裂带	20	0.28	2700

#### 3.3 单元剖分

对整个构造模型采用六结点三角形单元进行合理的网格剖分,网格剖分的依据是即使网格划分能满足 GPS 约束的需要,又能保证模拟的收敛和结果的精度(见图 3 所示).

#### 3.4 边界条件

有限元模型边界条件的施加主要是依据本文引言部分所述的渭河盆地构造力学背景及盆地内

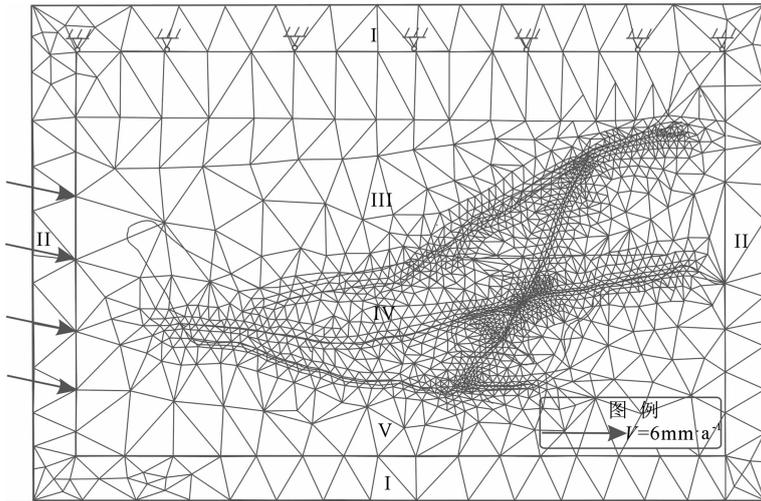


图3 渭河盆地有限元模型

Fig. 3 The finite element model of Weihe basin

GPS 监测成果而定. 顾及鄂尔多斯块体的稳定性, 对模型北部边界施加二维位移运动速率为零强制约束; 顾及华南、华北块体的东南向运动特征, 将模型东、南边界设置为自由面, 因此模型可向东、南部方向做二维移动; 考虑到青藏东缘甘青地块对渭河盆地的挤压力源, 对模型西边界施加近 SEE 向约  $4 \text{ mm/a}$  的边界位移约束(加载方式如图 3 所示, 将位移载荷直接加载到西边界的结点位置上).

基于上述施加的模型位移边界条件, 可以模拟计算得到渭河盆地内部节点的速度值, 并与节点处的实测 GPS 速度作对比, 这样做是因为模型内部未含任何先验的大地测量信息, 具有相对的独立性, 这样的比对和吻合程度能够说明模型边界条件加载的合理性, 由此确定出有限元模型的边界约束载荷, 最终建立起渭河盆地有限元模型示意图, 如图 3 所示.

需要说明的是, 模型四周的延伸部分(图 3 中 I、II), 其中南部的 I 块体和东部的 II 块体部分, 起到消除边界载荷不连续所引起的应力集中、局部变形过大等边界效应的作用. 而北部的 I 块体和西部的 II 块体部分, 则起到使整个有限元模型成为一个对称模型的作用.

#### 4 渭河盆地现今构造应力场特征及其与地裂缝群发内在动力学关系

通过对渭河盆地有限元模型进行解算, 可获得渭河盆地最大剪应变率、主应力等空间等值线及矢量分布图(见图 4、5).

剪切应变率值的大小反映了地壳水平形变的程

度, 该值越大说明局部水平区域构造活动性越强. 图 4 最大剪应变等值线图显示, 盆地内最大剪应变呈局域性高值集中分布的特点, 主要集中在盆地中、东部区域, 量值均达到了  $0.2 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$  以上, 由此表明盆地中、东部地壳构造活动较强烈, 而该地壳构造活动强烈地区也正是盆地内地裂缝发育的主要区域.

图 5 显示出渭河盆地西部局部地区现今构造应力场以压应力为主, 而盆地中、东部绝大部分地区现今区域构造应力场则主要以 NW—SE 向拉张应力为主, 整体呈相对左旋运动趋势. 由渭河盆地及邻区的小震震源机制解和小震综合震源机制解均表明, 该区域压应力主轴的优势方位为 NEE—NNE 向, 张应力主轴为 NW—NNW 向, 从区域 3 级以上地震震源机制解节面图中(图 6)也能看出上述特征<sup>[21-24]</sup>; 渭河盆地钻孔应力测量结果也表明, 该区平面应力场最大主压应力方位为 NNE—NEE 向<sup>[25]</sup>; 而利用断层滑动资料反演所得结果也显示出, 该区域构造主张应力方向为北东向、主压应力方向为北东向<sup>[13]</sup>. 因此表明, 本文基于大地测量反演成果与地球物理、地应力测量结果相一致, 均反映出渭河盆地在 NNW—SSE 向拉张应力场作用下的统一伸展拉伸的地球动力学背景.

进一步分析图 5 可以看出, 拉张应力以盆地内地裂缝最为发育的西安—咸阳—泾阳—三原地区最为显著, 其量值达到了  $2.99 \times 10^{-3} \text{ kPa} \cdot \text{a}^{-1}$  之多, 且进一步观察盆地中部各拉张应力的方向, 发现其与区域内多发的地裂缝走向均呈近似垂直的关系, 由此显示区域 NW—SE 向拉张应力可能是渭河盆

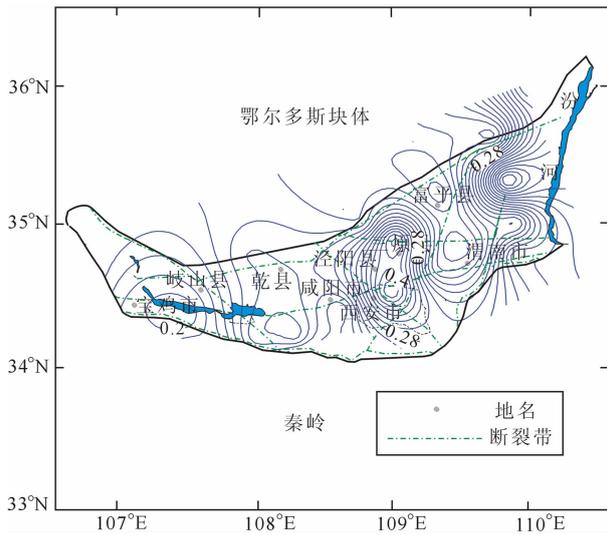


图 4 渭河盆地最大剪应变率等值线图( $1 \times 10^{-7} a^{-1}$ )  
 Fig. 4 The maximum shear strain rate contours of Weihe basin (unit:  $1 \times 10^{-7} a^{-1}$ )

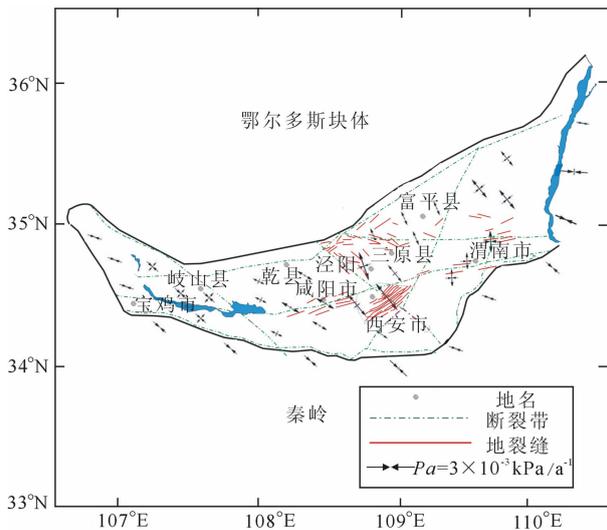


图 5 渭河盆地主应力矢量图  
 Fig. 5 The principal stress vector of Weihe basin

地地裂缝群发的动力源。

由断裂活动特性可知,构造应力场的差异性形成的构造环境会导致断裂活动的差异性<sup>[26]</sup>。而观测图 5 可以发现,渭河盆地东部以拉张应力为主,西部以压应力为主,这种区域构造应力场的显著差异性,正好对应着盆地内东部地裂缝群发,西部地裂缝甚少,盆地内地裂缝分布不均衡的特点。并且由精密水准测量结果显示,盆地地壳垂直运动显著区也主要集中在盆地的中、东部区域,且地壳垂直形变显著梯度带走向与构造活动断裂带走向基本一致,表明盆地中、东部构造断裂活动较剧烈<sup>[9,27-28]</sup>,同时结合前述的区域地裂缝与构造断裂带活动的强相关性,可

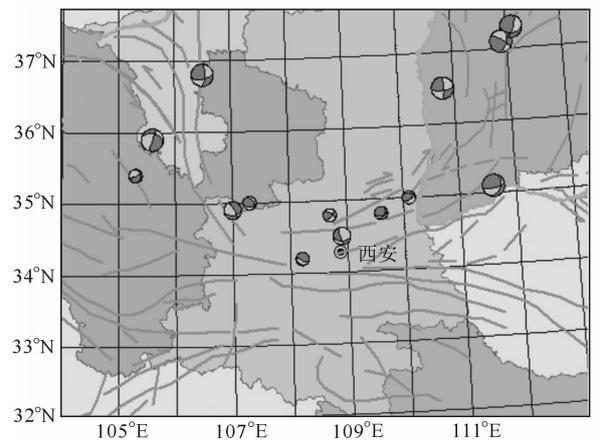


图 6 渭河盆地地震源机制解图  $M_L \geq 3.0$   
 (引自王卫东 2010)

Fig. 6 The focal mechanism solution of Weihe basin  $M_L \geq 3.0$  (quote from Wang Weidong, 2010)

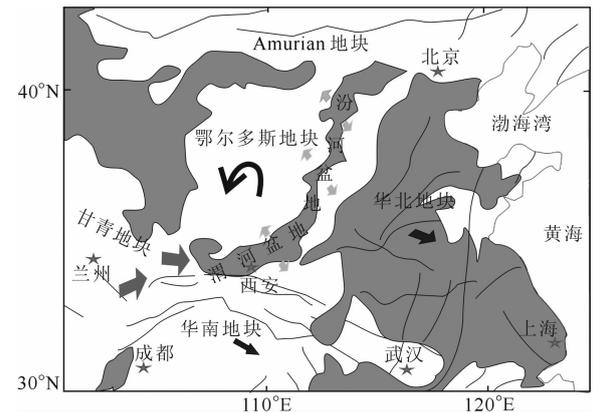


图 7 汾渭河盆地及其周边地块活动构造图  
 (据邓启东)

Fig. 7 The activity tectonic of Weihe basin and its surrounding blocks

进一步推断:区域构造应力场的不均匀性导致了区域断裂的差异性活动,即渭河盆地中、东部的构造活动较西部具有显著的活跃性,进而导致与其密切相关的通达地表的地裂缝多发。因此,盆地内东、西部构造应力场的显著差异性造成盆地东、西部地裂缝分布不均衡性的根本内因。

关于渭河盆地差异性构造应力场形成的构造动力学背景我们可作如下分析:印度板块与欧亚板块发生碰撞产生的动力学效应,会使甘青块体产生东向运动,一方面会对渭河盆地西部形成挤压力源(图 7 中红色箭头所示),另一方面会对鄂尔多斯块体产生一种逆时针的转动作用(图 7 中黑色箭头所示),再者附加菲律宾海板块的高角度仰冲碰撞和琉球岛弧的显著弧后扩张的联合作用下,会对华北和华南块体产生南东向的推动作用(图 7 中蓝色箭头所

示),但华北地块向南东的运动量大于华南地块,同时伴随着盆地内深部地幔小尺度对流的拖拽力作用,在鄂尔多斯与华南地块之间形成了 NW—SE 向拉张环境<sup>[29-32]</sup>(图 7 中绿色箭头所示).在这种动力源机制作用下形成了统一的渭河盆地断陷带,使得盆地整体拉张运动且内部地壳垂直运动显著,致使渭河盆地上部地壳脆性断层产生不均匀剪切运动,从而在地层中形成一系列错断面,发展至地表即造成地裂灾害的发生.由此可见,以 GPS 变量作为区域动力学模型的地表约束条件,可定量地揭示构造因素是渭河盆地地裂缝群发的本源.

## 5 结论与讨论

本文利用高精度 GPS 监测成果通过建立区域有限元动力学模型,获得了渭河盆地现今构造应力特征参数及其分布特征,该成果与地质、地球物理研究所得区域以往长期构造变形背景具有较好的继承性特征<sup>[13-14,21-25]</sup>.同时,通过对应力场分布特征分析,首次基于大地测量反演研究成果,定量揭示出了区域构造应力场与盆地内地裂缝群发的内在动力学联系,得出区域现今 NW—SE 向拉张应力是渭河盆地地裂缝群发的力源机制之本,而且进一步分析发现盆地内构造应力场区域上的显著差异性,也正是造成渭河盆地地裂缝不均衡发育的根本原因.

此外,本文 GPS 数据利用了渭河盆地 2001—2008 年的监测数据,2008 年监测时间在汶川地震后.但是对比震前(2001—2007 年)渭河盆地构造应力场<sup>[43]</sup>与本文结果可以看出:汶川地震主要对渭河盆地西部局部区域地壳构造应力场有明显的影响,但对渭河盆地整体构造应力场没有显著影响,整个渭河盆地现今构造应力场均呈现出西部局部地区压缩、中东部大部分区域拉张的特征;且盆地中、东部大部分区域所呈现出的以 NW—SE 向拉张构造应力场与地裂缝走向均呈近似垂直的关系.因此,汶川地震没有改变渭河盆地、特别是盆地中、东部现今构造应力场的基本特征.

基于以上对盆地内典型地裂缝发育及活动的成因机理的分析研究,并结合前人的研究成果<sup>[11-16]</sup>,可以总结渭河盆地地裂缝发育及活动的成因机理模式为:地裂缝实质上是活断层在现今区域 NW—SE 向拉张应力场作用下,以蠕滑形式使地层错断破裂而形成的,构造因素是地裂缝产生的根本因素,它决定着地裂缝活动的性质和展布方向.因此,断层及其活

动形成了地裂缝的原型,在此基础上叠加其它影响因素如抽取地下水、降雨渗透和地震等,明显加剧了地裂缝的现今活动,多因素构成了地裂缝形成发展的内外耦合成因模式.

**致 谢** 感谢陶本藻、陈永奇教授、王敏、崔笃信研究员,王文萍、胡亚轩、张晓亮高级工程师为本文提供的数据及给予的帮助.

## 参考文献(References)

- [1] 张希,张晓亮,张四新等. 青藏块体东北缘近期 GPS 水平运动特征与汶川大地震影响. 地震研究,2010,33(4):265-268.  
Zhang X, Zhang X L, Zhang S X, et al. Features of current horizontal movement observed by GPS and influence of the great Wenchuan earthquake in the northeastern margin of Qinghai-xizang block. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 2010, 33(4): 265-268.
- [2] 范俊喜,马瑾,刁桂苓. 由小震震源机制解得到的鄂尔多斯周边构造应力场. 地震地质,2003,25(1):88-99.  
Fan J X, Ma J, Diao G Z. Contemporary tectonic stress field around the Ordos fault block inferred from earthquake focal mechanisms. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2003, 25(1): 88-99.
- [3] 范俊喜,马瑾,甘卫军. 鄂尔多斯地块运动的整体性与不同方向边界活动的交替性. 中国科学(D辑),2003,33(增刊).  
Fan J X, Ma J, Gan W J. The motion integration and activity alternating of different orientation boundary of erdos block. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2003, 33(Supplement).
- [4] 胡亚轩,崔笃信,季灵运等. 鄂尔多斯块体及其周缘上地幔各向异性分析研究. 地球物理学报,2011,54(6):1549-1558, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.014.  
Hu Y X, Cui D X, Ji L Y, et al. Seismic anisotropy of upper mantle in Ordos block and adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(6): 1549-1558, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.014.
- [5] 李延兴,张静华,李智等. 太平洋板块俯冲对中国大陆的影响. 测绘学报,2006,35(2):99-105  
Li Y X, Zhang J H, Li Z, et al. The underthrust of Pacific plate to Eurasian plate and its effect on Chinese mainland. *Acta Geodaetica et Carto Graphica Sinica* (in Chinese), 2006, 35(2): 99-105.
- [6] 戴王强,任隽,赵小茂等. GPS 初步揭示的渭河盆地及邻地区地壳水平运动特征. 地震学报,2004,26(3):256-260.  
Dai W Q, Ren J, Zhao X M, et al. Characteristics of horizontal crustal movement in weihe basin and adjacent zones by GPS observation. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2004, 26(3): 256-260.
- [7] 冯希杰,戴王强. 渭河盆地断层活动横向迁移. 地震学报,2004,26(2):174-182.  
Feng X J, Dai W Q. Lateral migration of fault activity in

- weihe basin. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2004, 26(2):174-182.
- [8] 彭建兵, 邓亚虹. 汾渭盆地地裂缝成因与构造活动研究工作项目报告. 陕西: 长安大学, 2009.  
Peng J B, Deng Y H. Ground fissures causes and tectonic activity in Fenwei basin. *Research Project Report* (in Chinese), Chang'an University Shaanxi, 2009.
- [9] 祝意青, 王庆良, 田勤俭等. 关中地区地壳形变综合分析与研究. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(4):56-62.  
Zhu Y Q, Wang Q L, Tian Q J, et al. Comprehensive analysis and study of crustal deformation in Guanzhong area. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2006, 26(4):56-62.
- [10] 胡斌, 祝意青, 田勤俭等. 关中地区重力场及其时空动态演化特征. 中国地震, 2006, 22(2):172-181.  
Hu B, Zhu Y Q, Tian Q J, et al. Study on gravity field and its dynamic evolutionary characteristics in the guanzhong area. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2006, 22(2):172-181.
- [11] 彭建兵, 陈立伟, 黄强兵等. 地裂缝破裂扩展的大型物理模拟试验研究. 地球物理学报, 2008, 51(6):1826-1834.  
Peng J B, Chen L W, Huang Q B, et al. Large-scale physical simulative experiment on ground fissure expansion mechanism. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(6):1826-1834.
- [12] 彭建兵, 范文, 李喜安等. 汾渭盆地地裂缝成因研究中的若干关键问题. 工程地质学报, 2007, 15(4):433-440.  
Peng J B, Fan W, Li X A, et al. Some key questions in the formation of ground fissures in the fenwei basin. *Journal of Engineering Geology* (in Chinese), 2007, 15(4):433-440.
- [13] 彭建兵, 张俊, 苏生瑞等. 渭河盆地活动断裂与地质灾害. 西安: 西北大学出版社, 1992.  
Peng J B, Zhang J, Sun S R, et al. The activity faults and ground fissures disaster of weihe basin. Xi'an: Northwestern University Press, 1992.
- [14] 张家明. 西安地裂缝研究. 西安: 西北大学出版社, 1990.  
Zhang J M. Research on ground fissures in Xi'an. Xi'an: Northwestern University Press, 1990.
- [15] 陈志新, 袁志辉, 彭建兵等. 渭河盆地地裂缝发育基本特征. 工程地质学报, 2007, 15(4):441-447.  
Chen Z X, Yuan Z H, Peng J B, et al. Basic characteristics about ground fractures development of weihe basin. *Journal of Engineering Geology* (in Chinese), 2007, 15(4):441-447.
- [16] 李新生. 对西安地裂缝形成机制的几点新看法. 西安地质学院学报, 1994, 16(2):75-80.  
Li X S. Some new view on the genetic mechanism of Xi'an ground fractures. *Journal of Xi'an College of Geology* (in Chinese), 1994, 16(2):75-80.
- [17] 傅永华. 有限元分析基础. 武汉: 武汉大学出版, 2003.  
Fu Y H. Fundamentals of finite element analysis. Wuhan: Wuhan University press, 2003.
- [18] 蒋锋云, 王双绪, 张希等. 用二维有限元研究青藏块体东北缘地壳的水平运动. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(4):21-30.  
Jiang F Y, Wang S X, Zhang X, et al. On horizontal crust movement in northeastern margin of Qinhai-Tibet block with 2D FEM. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2007, 27(4):21-30.
- [19] 张晓亮, 江在森, 王双绪等. 青藏块体东北缘及其周围地区现今时空运动变形特征. 中国地震, 2003, 19(4):377-385.  
Zhang X L, Jiang Z S, Wang S X, et al. The present motion and deformation features with spatial time of the northeastern margin of the Qinghai-Tibet block and its adjacent area. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2003, 19(4):377-385.
- [20] 王卫东. 泾阳 4.8 级地震的构造背景. 西北地震学报, 2002, 24(2):145-149.  
Wang W D. Tectonic background of jingyang Ms4. 8 earthquake. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 2002, 24(2):145-149.
- [21] 国家地震局. 鄂尔多斯周缘活动断裂系. 北京: 地震出版社, 1988.  
The State Seismological Bureau. The activity faults of Orders surrounding. Beijing: Earthquake Press, 1998.
- [22] 宋立胜. 陕西省地震志. 北京: 地震出版社, 1989.  
Song L S. The earthquake records of Shanxi. Beijing: Earthquake Press, 1989.
- [23] 姜家兰. 陕西及其邻近地区现代构造应力场. 西北地震学报, 1991, 13(4):85-88.  
Jiang J L. Recent tectonic stress field in Shaanxi province and its adjacent area. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 1991, 13(4):85-88.
- [24] 王卫东. 西安地裂缝形成的区域稳定动力学背景研究[博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.  
Wang W D. Study on the regional stability dynamical background in the forming of Xi'an Ground fissures. [PHD's thesis]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [25] 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. 西安地质学院学报, 1991, 12(1):46-52.  
Xie Z Q, Fang J A, Tian X T, et al. The evolution of the structural stress field and analysis of the formation mechanism in the weihe basin. *Journal of Xi'an College of Geology* (in Chinese), 1991, 12(1):46-52.
- [26] 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛等. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区. 地球物理学报, 2004, 47(4):654-662.  
Xie F R, Cui X F, Zhao J T, et al. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(4):654-662.
- [27] 胡斌, 祝意青, 江在森. 关中地区垂直形变场及其动态演化特征. 地震研究, 2006, 29(2):151-156.  
Hu B, Zhu Y Q, Jiang Z S. Vertical Crust deformation field in the Guanzhong area and its dynamic evolution characteristics. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 2006, 29(2):151-156.
- [28] 胡亚轩, 王庆良, 崔笃信等. 根据断层形变剖面资料分析泾阳

- 口镇—关山断裂活动状况. 灾害学, 2008, 23 增刊.
- Hu Y X, Wang Q L, Cui D X, et al. Analysis on activity of Kouzhen-Guanshan fault in Jingyang based on deformation profile data. *Journal of Catastrophology* (in Chinese), 2008, 23(Supplement).
- [29] Clark M K, Royden L H. Topographic ooze: building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology (Boulder)*, 2000, 28(8):703-706.
- [30] England P C, Houseman, G A. Extension during continental convergence with special reference to the Tibetan plateau. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94(17):561-597.
- [31] 李树德. 中国东部山西地堑系的形成机制及构造地貌、地震探讨. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(4):467-474.
- Li S D. The morphotectonics seismicity and origin of Shanxi graben system, east Chian. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 1997, 33(4):467-474.
- [32] 崔笃信, 王庆良, 胡亚轩等. 青藏高原东北缘岩石圈变形及其机理. 地球物理学报, 2009, 52(6):1490-1499.
- Cu D X, Wang Q L, Hu Y X, et al. Lithosphere deformation and deformation mechanism in northeastern margin of Qinghai-Tibet plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(6):1490-1499.
- [33] 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. 武汉大学学报信息科学版, 2011, 36(7):830-834.
- QU W, Zhang Q, Wang Q L, et al. Research on Present Crustal Horizontal Deformation Feature of Weihe Basin and Its Tectonic Activity. *Geomatics and information Science of Wuhan University* (in Chinese), 2011, 36(7):830-834.

(本文编辑 刘少华)