

# 区域地震稳定性的区域地震动力学评价

陈红旗<sup>1</sup>, 彭建兵<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 四川 成都 610059;

2. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 运用区域地震动力学理论, 分孕震、发震和应震等3个专题层, 系统评价了渭河盆地地震稳定性。研究认为渭河盆地拥有多层立交孕震模式, 当局部孕震单元满足发震动力学条件时, 多以粘滑断错模式发震, 同时因边界效应断块发生升降运动, 对地震作用的地震响应模式可概化为下托上展。研究表明, 区域地震动力学理论更全面深入地刻画了区域地震稳定性, 是一种区域地震稳定性评价的有效方法。

[关键词] 工程地质; 区域地震动力学; 地震; 盆地; 断裂; 稳定性

[中图分类号] P642.4 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2004)04-0058-05

[作者简介] 陈红旗(1973—), 男, 河南睢县人, 讲师, 博士, 现从事地质灾害评价及防治研究工作。

文献[1]指出“研究区域稳定必须重点研究地震”, 区域稳定动力学理论将该观点提升到区域地震动力学的层次, 在研究思路和方法上实现了静态到动态、地表到深层、区域到全球的转变。区域地震动力学的研究目的在于确定研究区各类地震发生的构造条件及地震危险、预测震灾, 总体反映区域地震稳定性<sup>[2]</sup>。渭河盆地是中国大陆强震活动区之一, 不仅拥有丰富的地震历史, 未来又有一定地震危险, 因此, 对该区开展地震稳定性评价十分必要, 近年来国内外多次强震中呈现的盆地效应(Meocgo, 1985; Northridge, 1994; Kobe, 1995; 台湾集集, 1999)使得这一课题具有较高地理论价值。为此, 以渭河盆地为例, 尝试运用区域地震动力学理论评价区域地震稳定性。

## 1 渭河盆地区域稳定动力学特征

渭河盆地西起宝鸡, 东至韩城, 南靠秦岭, 北偎鄂尔多斯块体(图1)。早第三纪以来, 受喜马拉雅运动影响, 区内中生代隆起构造破裂解体, 并发生大幅度伸展和下沉。由于控制盆地的南缘边界断裂强烈活动, 导致了盆地内部断裂及北侧断裂活动, 整体呈现断陷盆地和掀斜断块的结构特

征<sup>[2~4]</sup>。在秦岭山体 and 鄂尔多斯块体持续上升背景下, 伴随地幔隆升和地壳减薄, 盆地边缘呈挤压变形, 盆地内部表现为直观的断裂伸展样式(图2)。地幔上隆派生的上拱力、低速高导层的拖曳力、相邻山体隆升附加应力场等联合而成区域深层动力系统, 提供了盆地生成发展的原动力; 断裂伸展与断块掀斜升降相辅相成, 共同构成区域浅层动力系统, 提供了区域构造活动的持久源动力; 在地貌演化、人类工程活动营力和地震动力等区域表层动力作用下, 表层势能分布不均, 导致局部地质灾害。

## 2 孕震动力学专题

区域孕震动力学环境是一个包括孕震单元、孕震动力和孕震模式的多因素敏感系统, 它决定于区域地质体对应变的包容能力, 反映了区域地质体剧烈失稳的可能。

### 2.1 孕震单元

多项地球物理探测工作揭示(张少泉等, 1985; 丁韞玉等, 1987; 谢振乾, 1990), 渭河盆地纵向上显示出明显的分层结构, 依据各层位物化特征及温压条件, 由深及浅本区拥有4层孕震单元(图2中I~IV)。

(1)上地幔流变层: 依据近代地震资料, 埋深在60~400 km(有人认为80~250 km)之间存在流变层<sup>[2]</sup>。以该层位为中心的软硬互层构成孕震单元,

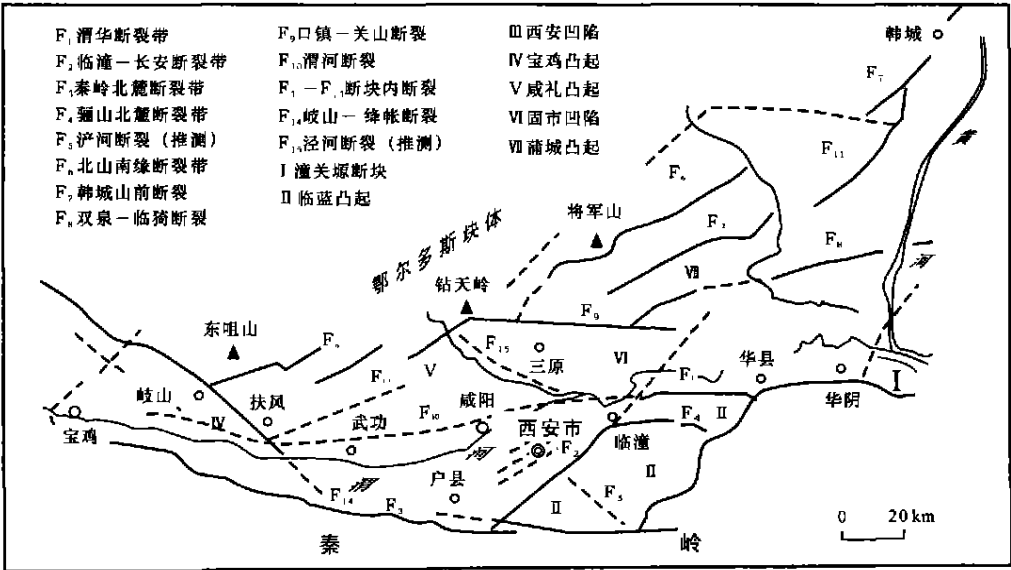
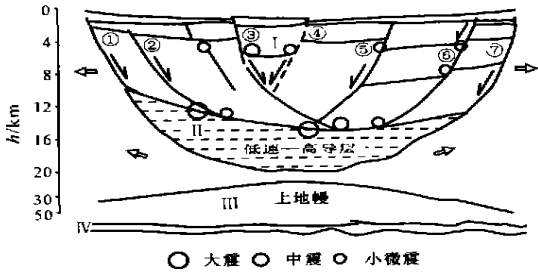


图 1 渭河盆地分布及区域地质构造

Fig. 1 Weihe basin allocation and regional geological texture



①秦岭北缘断裂; ②余下断裂; ③渭河断裂; ④渭河北岸断裂; ⑤口镇—关山断裂; ⑥礼泉—合阳断裂; ⑦盆地北缘断裂

①秦岭北缘断裂; ②余下断裂; ③渭河断裂; ④渭河北岸断裂; ⑤口镇—关山断裂; ⑥礼泉—合阳断裂; ⑦盆地北缘断裂

图 2 渭河盆地地区孕震动力学环境

Fig. 2 Weihe basin regional seismic implicit dynamics

为中深源地震发源地。

(2) 幔壳过渡流变层: 因地幔隆升, 渭河盆地范围的幔壳界面在 33~44 km 之间<sup>[5]</sup>, 以西安和华县为峰值点, 以渭河断裂为中轴构成双峰隆起结构体。幔壳间过渡流变层将上地幔和下地壳分割成两个不同的应力应变孕积单元, 其本身又能够对应力应变运移调整。在深层动力作用下, 该层位可孕育一定强度地震。数值模拟显示, 优势孕震部位在于隆起中心、陡变带和转折部位。幔壳过渡流变层、上地幔流变层拥有特殊温压条件, 且构造简单, 因此孕震能力较弱。

(3) 中地壳低速高导层: 地幔上隆, 在中地壳部位因热力效应形成低速高导层, 埋深在 10~20 km 之间<sup>[3]</sup>, 与新生代沉积和地幔隆起相对应(图 3)。

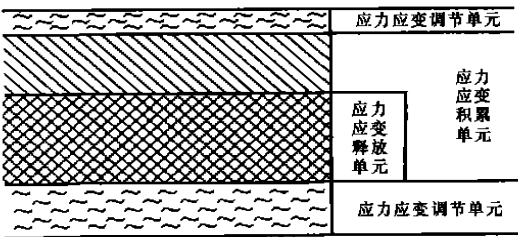


图 3 低速高导层孕震单元分层组合

Fig. 3 Layering combination of implicit seismic unit; low-velocity pet-conductive layer

低速高导层同上下刚硬体一起构成应力应变积累单元、调节单元、释放单元的组合<sup>[1]</sup>, 它不仅担负着上下物质的中转任务, 又是浅深层动力的交流通道, 尤其作为地球深层内动力释放的窗口, 孕震意义重大。上下结构构造连通程度和方式是影响地震能量孕育的关键因子。

(4) 盆地基底面: 将新生代下伏地层称为盆地基底, 新生代以松散多相沉积物为主, 强度弱于下伏 3~5 km 的基底<sup>[5]</sup>, 因此基底面构成地球介质强度分异界面。界面上下的演变为完全不同的地质历程, 所以基底面又构成深浅构造分异界面, 如基底上下断裂构造的间断和继承。上述基底面出演的角色, 决定了该层位具有一定孕震能力, 但鉴于围岩强度较低且破裂发育, 孕震规模较小, 且很分散。

多项地球物理探测工作同时揭示(张少泉等, 1985; 丁韞玉等, 1987; 谢振乾, 1990), 本区横向上呈分块结构, 这反映了盆区断裂的伸展交割和盆地

升降(见图 2)。对上地壳断裂发育的本区而言,断裂孕震效应非常关键。就应力分布和传播而言,活断层可改变应力作用方向与状态,还能将应力场内作用应力转换为主要沿循断层传播的表面应力,致使断裂附近剪切应力增强,从而孕育地震能(见图 2)。断裂延展深度、方位、规模及交切关系等是孕震行为影响因子。近东西向控盆断裂,孕震能力最强;北东向、北东东向断裂与区域应力场吻合,有一定孕震能力;北西向断裂目前整体活动微弱,不是主要孕震断裂,但是,对于极力参与断块升降的泾阳-蓝田断裂(有资料显示深切达 30 km)等孕震规模也不斐。控盆断裂可孕育中震,而浅表层断裂与小震微震相关,基底隐伏断裂上断点孕震将对本区稳定构成最大危险。

## 2.2 孕震动力

本区孕震动力主要来源于:①地幔隆升和软流层流展带来底部竖向上拱力、水平剪切力和侧向拖曳力;②北东、北东东挤压、北西拉张的区域构造应力场<sup>[3~5]</sup>;③盆地内部转换应力场;④人工爆炸、抽蓄水、开挖等表层附加人工应力场。

## 2.3 多层立交孕震模式

震源能量积累是孕震单元同孕震动力的耦合,鉴于此,本区地球内部构成多层立交孕震模式(见图 2),断裂孕震单元与分层孕震单元交汇控制了孕震空间特征。

(1) 3~5 km 为浅源地震发育深度,孕震规模小,多集中于上地壳破裂发育区域,如西安附近。

(2) 10~20 km 为主要孕震深度,孕震能力最强,规模不等。

(3) 30~80 km 孕震能力最弱。

(4) 断裂交叉部位孕震能力>东西断裂>北东、北东东断裂>北西西断裂。

(5) 华县、西安为两个孕震平面影射中心,而盆地两端因应力应变孕积环境闭塞,成为能力仅次于西安、华县的两个优势孕震部位。

# 3 发震动力学专题

特定孕震动力学环境下,地震发生与否取决于场区的发震动力学环境。发震动力学的研究旨在确定区域发震单元、研究区域发震条件、寻找发震部位以及总结发震模式。依据发震力学行为,本区发震条件可概括为孕育最大的地震能量、最小孕震

点包裹体强度和最方便的地震能量释放空间等三点的耦合。

## 3.1 发震单元

依据孕震单元与发震条件的耦合,渭河盆地发震单元可总结为:

(1) 深浅遥相呼应的断裂过渡带和深部热力学性质变异带等深部异常体。

(2) 深部缓倾层面同表层次级结构面及同级结构面构成的横向立体体。

(3) 失衡断块边界、渭河断裂枢纽段等结构构造异常体。

(4) 断裂锁固、转折分叉、裂端等障碍体<sup>[1]</sup>。

## 3.2 发震动力

盆地内部震源机制解一致表明(国家地震局鄂尔多斯周缘活动断裂系课题组, 1988), 本区地震以倾滑型错动为主, 主压应力轴方向大致为北东东—南西西向, 主张应力轴为北北西—南南东向。地壳这种应力状态, 可使渭河盆地中的北西、北东—北北东和东西向断裂发生倾向滑动, 更易使近东西向断裂粘滑发震(1992, 李永善对华县大震的倾滑位错模型模拟结果与此吻合)。在地幔隆升、软流层流展等深层动力作用下, 载荷体由深及浅由塑性向脆性转变, 对应力的应变速率随之发生非线性变化, 在应变速率的极值点可能因应变协调失横及相容方程的不连续, 在断层倾角变化最大弯曲部位将破裂发震。另外, 因为低速高导层、基底等层位存在先天断错或非均衡柔皱, 引起顶层非均衡受力而带来挠曲破裂发震; 在浅层动力作用下, 区域原始破裂构造格局在尚未顺应区域构造背景的部位(同西北工业大学反倾地裂缝相似), 将以断裂扭动和断块升降纵扭的形式弱化局部闭锁点强度; 在地震动力和人类活动等表层动力作用下, 临界状态孕震单元将会被诱发或触发提前失稳发震。

## 3.3 粘滑断错发震模式

本区发震模式可分为两个层次:①深层以控盆断裂正断粘滑为主, 以盆地扩展和断块升降为代价;②浅层以剪切破裂为主, 以盆地表层破裂和次级断块掀斜为代价。依据断裂带及其附近地质体的力学机制, 区域发震模式主要表现为块体沿活断层发生剪切变形破坏和位移, 主断裂吸收盆地应力集中, 往往以群体化、大众化发震, 而其所牵动的反向或次级断裂伸展使区域发震表现出个性化和差异性。

(1) 平面分布沿盆地中轴东西成带, 固市凹陷

和西安凹陷转折部位为与东西向地震带交切的南北地震带。

(2)剖面分布具层次性, 3 ~ 5 km 小震或微震频繁发生, 10 ~ 20 km 为中强震发生处, 这与历史地震震源深度分布一致(图 4)。

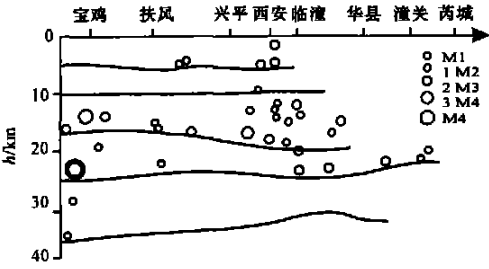


图 4 渭河盆地历史地震震源深度分布

Fig. 4 Depth distribution of historic earthquakes in Weihe basin

(3)小震分布具丛集性, 集中分布于盆地两端和西安、渭南等处。

(4)盆地中间部位以垂向运动为主, 表现为次级断块升降掀斜; 而盆地南北边界带有一定扭剪分量, 而端部多以水平分量为重。

4 应震动力学专题

区域应震动力学环境是指在地震作用情形下的区域响应特征, 它反映了区域抗震能力, 决定了区域地震稳定性。

4.1 应震单元

应震单元的划分主要依据区域地质体对地震作用的敏感程度。从小尺度而言, 则为破裂发育、断块及次级断块存在。通过与 9. 21 集集地震台中盆地效应的对比研究, 本区主要应震单元有:

(1)依据文献[ 6], 盆地为一二级应震单元, 地震灾害盆地效应为其整体特征。

(2)断裂与断块为二级应震单元。断裂单元包括那些隐伏断裂、出露断裂; 断块包括盆地内部一级块体和次级块体。

(3)地貌、富水层、人类强干扰区等构成三级应震单元。特别指出地下流体是本区敏感的地震响应因子。

4.2 应震动力

应震动力反映了区域地质体对地震输能的消化学行为, 或高速活动实现动能转化, 或趋近失稳进行势能储蓄。本区断裂为张性, 局部曾扭性,

因此在强震前段可能以剪滑弱化机理响应, 并最终导致接近压性或扭性, 进入下期张性蠕动或压性扭性聚能。在扭性段则易顺应区域构造应力场形式。地震作用时地下流体涨落, 常破坏“水力学-岩土力学-地质力学”耦合模型平衡, 如 1976 年唐山地震前后西安地裂缝的剧烈活动, 就与远场地震和近场(或场源)小(微)震动水应力有关<sup>[4]</sup>。

4.3 下托上展应震模式

渭河盆地作为一级应震单元, 盆地地质体地震响应应具有协调和自组织能力, 地震能量的运移遵守费马原理。由于盆地北部鄂尔多斯块体相对稳定, 而南部秦岭山地相对主动, 同时考虑到渭河地震带靠近中国南北地震带与华北地震带复合交接部位, 以及印度板块对大华北板块的主动挤压, 盆地地震迁移特征可总结为: ①南侧多有强震, 北侧为小震, 而中部小震微震丛集; ②渭河地震活跃期内, 大震东西跳跃迁移(彭建兵, 1992), 丛集小震响应反向迁移; ③渭河地震平静期内, 盆内外在汾渭地震带或更广区域内东西迁移; 作为二级应震单元, 断裂通过伸展粘滑断错吸收了主要地震能量, 断块(包括次级块体)不同程度地掀斜来保证位移边界连续; 地裂缝、节理裂隙、地貌分异边界、地层横向多元结构等三级应震单元, 将在区域张性环境下多点并发影响场地稳定, 富水层震时孔隙水压力瞬间增高, 有效应力降低, 弱化岩土体强度, 导致地质灾害。考虑到工程影响建造主要为第四系, 依据渭河盆地的浅表层构造, 可将地震作用下渭河盆地比作盛有已分割蛋糕的碗, 断块体升降、断裂伸展滑错位移、表层因具开放上边界而伸展, 姑且称其为“下托上展”模式。

5 区域地震稳定性

在渭河盆地内部, 分层孕震单元和断裂孕震单元组成多层立交孕震模式。当孕震单元符合发震条件将成为发震单元, 以粘滑断错模式发震, 同时因边界效应, 断裂分割块体升降运动。构造互动为盆内地震的主要响应形式, 地震动效应决定了盆外地震时盆内的稳定性, 总体特征可概化为下托上展模式。通过综合专题层评定, 区域地震稳定性如图 5。

地震稳定性评价的区域地震动力学方法具有广阔的拓展空间, 进一步研究可采用 GIS 和具体评判模型的耦合技术方案, 首先利用 GIS 建立区域地

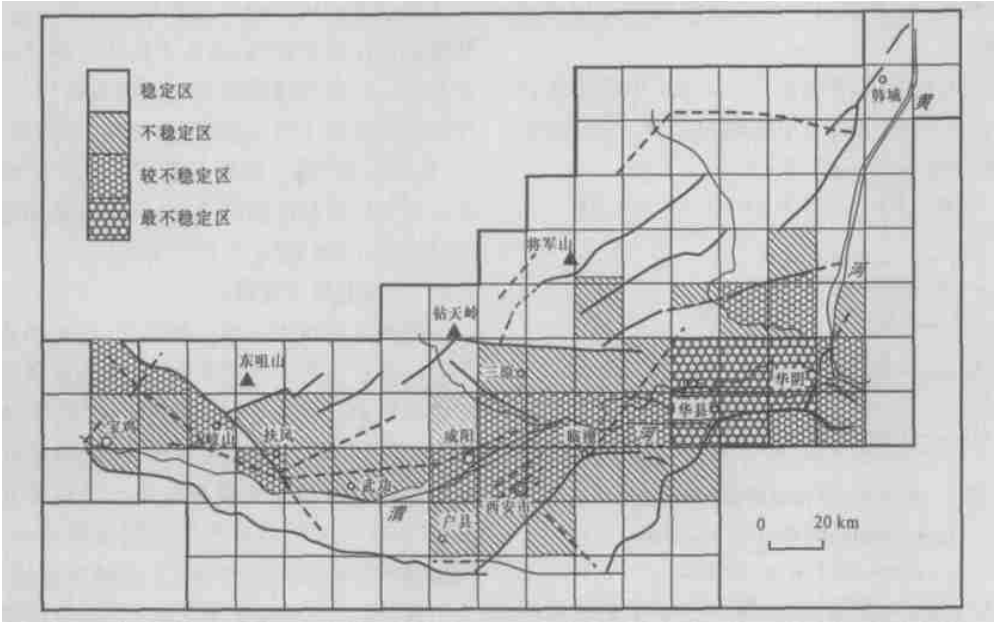


图 5 渭河盆地地震稳定性示意图

Fig. 5 The diagram of seismic stability in Weihe basin

震稳定性评价的地震动力学专题层(孕震专题、发震专题、应震专题), 然后采用适当评判模型对研究区进行三维地震稳定性评价, 并结合地震危险性概率计算, 可实现评价的最终量化。

[ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] 刘国昌. 区域稳定工程地质[ M ]. 长春: 吉林大学出版社, 1993. 1 ~ 3.  
[ 2 ] 彭建兵. 区域稳定动力学研究[ M ]. 北京: 科学出版社, 2001. 3 ~ 35.

[ 3 ] 彭建兵. 渭河盆地活动断裂与地质灾害[ M ]. 西安: 西北大学出版社, 1992. 93 ~ 122.  
[ 4 ] 陈红旗. 西安地裂缝地震动效应研究[ D ]. 西安: 长安大学, 2002. 15 ~ 29.  
[ 5 ] 陕西省地质矿产局. 西安地区区域地壳稳定性与地质灾害评价研究报告[ R ]. 西安: 陕西省地质矿产局, 1990. 49.  
[ 6 ] 陶夏新. 中国地震工程地质学之发展[ J ]. 世界地震工程, 2000, 16(3): 3 ~ 6.  
[ 7 ] A lin, T quchi, A chen, et al. Co-seismic Displacements, Folding and Shortening Structures along the Chelungpu Surface Rupture Zone Occured During the 1999 Chi-Chi (Taiwan) Earthquake [ J ]. Tectonophysics, 2001, 330: 225 ~ 244.

Exercising regional seismic dynamics to estimate seismic stability

CHEN Hong-qi<sup>1</sup>, PENG Jian-bing<sup>2</sup>

(1. National Laboratory of Geo-Hazards Prevention and Geo-Enviroment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract** It is found that the regional seismic dynamics could describe all sides of regional seismic stability, thus, it should be the most valid method to estimate regional seismic stability. Following the theory of regional seismic aynamics, the regional seismic stability of Weihe basin is estimated from three special topics, that is, earthquake implicit, earthquake generating and earthquake responding. It is found that there is multilayered intercross earthquake implicit mode, and when local earthquake-implicit unit meets the dynamic need of generating earthquake, the earthquake will be generated in the way of stick-slip. Meanwhile, up-and-down movement will happen due to the boundary effect. The earthquake responding model is thought to be "lower-support and upper-spreading."

**Key words** engineering geology; regional seismic dynamics; earthquake; basin; fault; stability

[ 英文审定: 苏生瑞 ]