

# 中卫—同心活动断裂带现代构造应力分布特征及地震破裂危险区判定

王爱国<sup>1,2</sup>, 杨斌<sup>1</sup>, 张向红<sup>1</sup>, 柳煜<sup>1</sup>

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃兰州 730000)

**摘要:**采用弹性模型对中卫—同心活动断裂带在区域现代构造应力场作用下的应力分布特征进行数值模拟,并在此基础上应用岩石破裂危险度 $KR$ 及断层滑动危险系数 $KF$ 两个判别指标对该断裂带未来地震破裂危险区进行判定。结果显示该活动断裂带上的应力分布具有明显的分段性,大致以红谷梁和同心为界分为三个区段。地震破裂危险区段主要位于红观观至红谷梁东区段,在地震发生时起始破裂区位于中卫南—碱沟,破裂向两侧扩展,向东很快衰减,而向西破裂扩展范围较大,可达红观观。

**关键词:**中卫—同心活动断裂带; 现代构造应力; 地震破裂危险区; 数值模拟

**中图分类号:** P315.2; P315.72<sup>\*7</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2006)01-0020-06

## Characteristics of Present Tectonic Stress along Zhongwei - Tongxin Active Fault Zone and Predication of Earthquake Rupture Risk Area

WANG Ai-guo<sup>1,2</sup>, YANG Bin<sup>1</sup>, ZHANG Xiang-hong<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The characteristics of present tectonic stress along Zhongwei - Tongxin fault zone are obtained by using the finite-element simulation with an elastic model, and the future earthquake rupture risk areas are predicated using rock rupture risk coefficient ( $KR$ ) and fault gliding risk coefficient ( $KF$ ) as criteria in this article. The result shows that the modern stress along the fault zone has a feature of segmentation and can be divided into three segments. The earthquake rupture risk areas is from Hongguanguan to Hongguliang. When earthquake occur, the initial rupture area will locate from south Zhongwei to Jiangou, and quickly expands to two sides. Toward east the rupture stops quickly and toward west it attenuates slowly until it reaches Hongguanguan.

**Key words:** Zhongwei - Tongxin fault zone; Modern tectonic stress; Earthquake rupture risk area; Finite-element simulation

## 0 引言

中卫—同心活动断裂带地处青藏高原东北缘,为北祁连山活动断裂系东段北支的重要组成部分。该断裂带西起红观观,东经甘塘、孟家湾、双井子、小

洪沟、同心西王团至固原七里营,由东西向转为北北西向弧形延伸长200余公里(图1),由多条断裂段雁列而成,宽3~16 km。晚第三纪及其以前该断裂

收稿日期:2005-08-03

基金项目:中国科学院知识创新工程重大项目资助(KZCX1-SW-04);国家自然科学基金重大项目(90102006);中国地震局兰州地震研究所论著号:LC20060009

作者简介:王爱国(1972—),男(汉族),湖北洪湖人,副研究员,主要从事地震地质、工程地震、寒区工程方向的研究。

带表现了多次强烈的向北不均匀逆冲活动特征;第三纪末至第四纪初形成了前展式推覆构造掩冲带<sup>[1]</sup>。中更新世以来其新活动转为左旋走滑。晚

更新世以来该断裂带至少发生6次7级以上古地震事件<sup>[2]</sup>,1709年中卫南7½级地震的发生是该活动断裂带最近一次破裂和错动的结果。

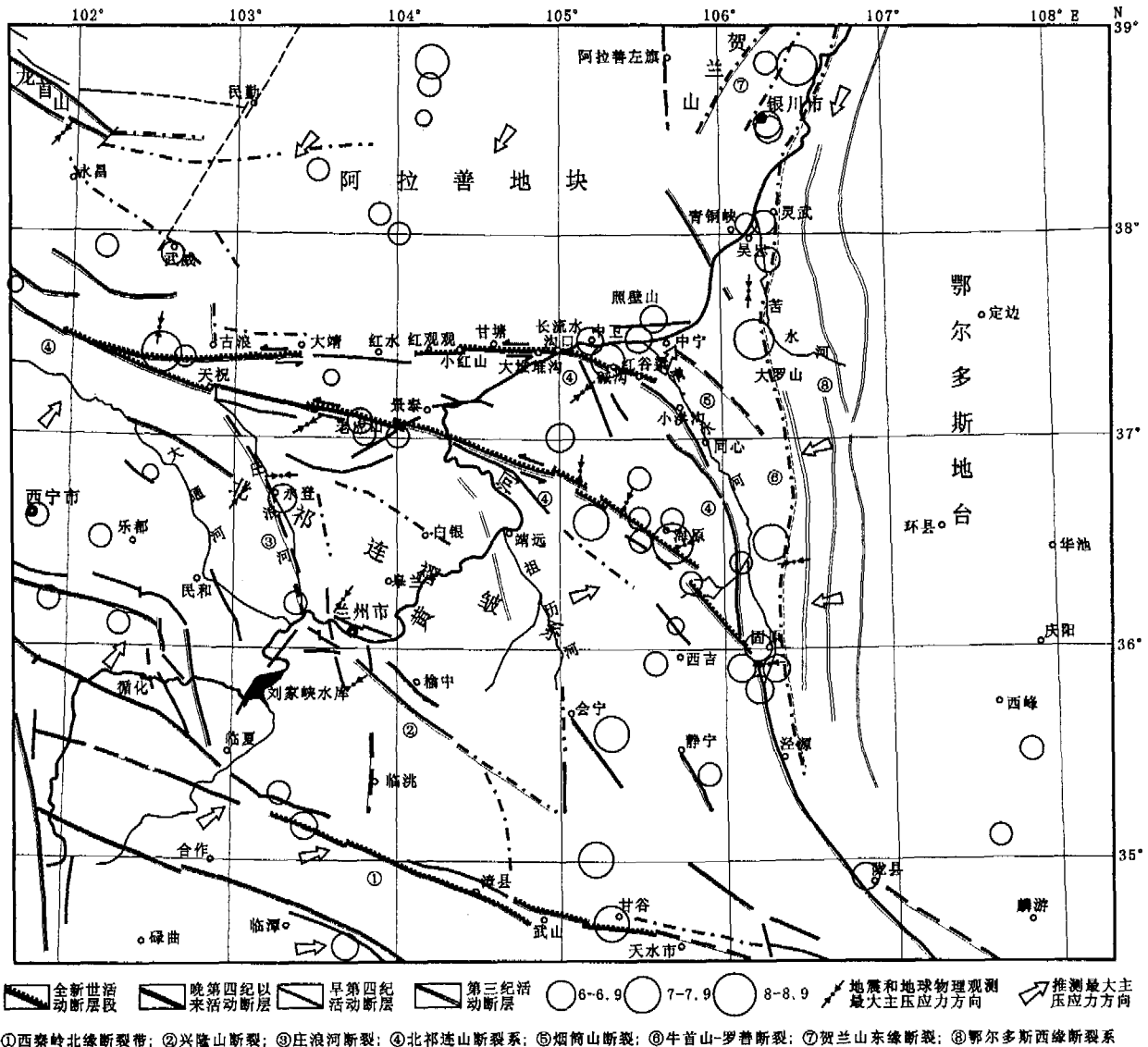


图1 中卫活动断裂带及附近地区地震构造及现代构造应力场分布图

Fig.1 The seismic tectonic map near Zhongwei active fault and distribution of modern principal stress.

强震的发生是在一定的构造应力场条件下断层活动的结果,断裂的活动方式与该断裂所受构造应力息息相关<sup>[3]</sup>。为研究该断裂带的活动性及力学特征,在野外实际调查的基础之上,对该断裂带在现代构造应力场作用下的应力分布特征进行了数值模拟,并对该断裂带未来地震破裂危险区进行了判定,为正确认识和评价该断裂带活动性、活动特征及未来地震危险性提供一定依据。

### 1 区域构造应力场特征

本区岩石圈的应力以水平应力为主,不同时期的构造应力场是不一致的。

在前新生代漫长的构造演化过程中,本区区域主压应力方向主要以近南北向为主,但海西-印支期则以南北向拉应力为主,构成伸展环境,因而前新生代不同构造层的构造轴向均为近东西向。第三纪末区域主应力方向为NE-SW向,南部应力大于北部,从而形成向NE突出的近EW向展布的弧形再生山链,沿主要活动断裂带前新生代基岩普遍逆冲于第三系之上,形成规模不等的推覆体,在断裂的下盘形成断陷盆地。早更新世晚期以后,基本经过准平原化的青藏高原东北部地区在整体挤压隆升背景中进入断块间剪切差异活动的新时期,本区应力场发生重大转变,区域主压应力方向转变成NEE—

SWW向。从此,本区的构造形变呈现出一种新的面貌,区内主要弧形断裂带由挤压逆冲转为左旋走滑,这些断裂所分割的条带状块体则向SE 滑移挤出。

区域断层走向及力学性质的综合分析表明<sup>①</sup>,中更新世以来,青藏高原西北部地区受到 N20~30°E 的最大优势挤压力作用;青藏高原中北部地区受到 N40~50°E 的最大优势挤压力作用;青藏高原东北部地区受到 N60~70°E 的最大优势挤压力;而吉兰泰—银川盆地区大致受到 N50°E 左右的最大优势挤压力作用。

现代地震震源机制、地形变、地应力测量与地震破裂带资料一致表明<sup>①</sup>,青藏高原东北缘现今应力状态基本继承了中更新世以来的特点。由西而东和由北而南,最大挤压力优势方向由 NE—SW 逐渐转变为 NEE—SWW 方向。

青藏高原东北边缘地区的地震和地球物理观测资料研究表明<sup>[4]</sup>,区域主压应力方位为:弧形构造带上 11 次中小地震( $M \geq 3.0$ )的震源机制解 P 轴方向主压应力优势方位为 77°,平均仰角为 18.7°,接近水平;小震综合面角 P 轴平均方位为 78°;由地应力测量确定的 P 轴平均方位为 69°。平均最大主压应力方向为 75°(图 1)。

## 2 区域现代构造应力场模拟计算

### 2.1 有限元模型

模型包括鄂尔多斯地台、阿拉善地台和青藏高原东北部广大地区,具体计算范围为北纬 34.5°—39°,东经 101.8°—108.2°。区内主要断裂带为西秦岭北缘断裂带、兴隆山断裂、庄浪河断裂、北祁连山断裂系、烟筒山断裂、牛首山—罗山断裂系、贺兰山断裂和鄂尔多斯西缘断裂系。为建模方便,各断裂带的宽度均以 10 km 计。计算在大型有限元软件 Ansys 中完成。

采用弹性体单元,将介质划分为五类,各类介质的参数如表 1。

表 1 模型介质类型的划分及介质参数

介质类型	介质名称	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$
A1	盆地外断层	2.5E4	0.30
A2	盆地内断层	2.0E4	0.35
A3	沉积盆地	4.0E4	0.25
A4	地台区	9.0E4	0.15
A5	地槽区	6.0E4	0.26

由于阿拉善地块和鄂尔多斯地台作为构造应力的阻挡体,将模型北部边界进行 SN 方向位移约束,

将模型东侧边界进 EW 向位移约束。区域总体受力来自 SW 侧,在西南角两侧边界上加压。根据西南角实际应力场方向近 N55°E,按两侧边界线长度,将应力分配到两边界上,使总应力场方向与实际一致。

### 2.2 计算方法及结果评价

对模型先进行试算,对比计算结果与实际应力场的吻合程度,再适当调整边界应力进行计算,直到两者基本相符。图 2 为模拟得到的主应力场分布矢量图,除局部地方因边界条件影响有所偏差外,基本反映了区域构造应力场的特征。沿青藏高原东北缘,从西到东主压应力方向由 NNE 转变为 NE 再转变为 NEE。鄂尔多斯西缘由北至南,主压应力方向由 NNE 逐渐转变为近东西方向。西海固地区主压应力方向为 N60°E,靖远地区为 N49°E,古浪以北地区为 N10°E,在中卫、中宁及景泰地区平均为 N55°E,庆阳地区约 N77°E,银川盆地约为 N40°E。这种应力场的特点与前述图 1 所示的主压应力方向基本一致。主压应力的大小在模型西南部为几十兆帕,在古浪、中卫、海原台等地为几兆帕,数量级与北祁连山的 20~30 MPa、中卫及海原的几兆帕一致<sup>[5]</sup>。

另外,应用模型模拟计算出的位移场、平面最大主压应力及平面最大剪应力的特征,基本反映了研究区的地壳运动形态和应力场特征,与根据地质资料得到的结果相吻合,说明所加边界条件及模拟得到的应力场是一个较符合实际情况的构造应力场。

## 3 中卫—同心活动断裂带应力分布特征

中卫—同心活动断裂带上的应力值从模拟得到的区域应力场中提取。图 3 给出了断裂带上最大主压应力  $\sigma_1$ 、中间主压应力  $\sigma_2$ 、最小主压应力  $\sigma_3$ 、剪应力  $\sigma_{XY}$  和应力强度  $\sigma_{INT}$  ( $\sigma_{INT} = \text{MAX}(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|)$ ) 大小分布曲线。根据剪应力值的正负,祁连山北缘断裂系北支走滑方式总体表现为左旋,体现了在青藏高原整体隆升后向北挤压扩展过程中,其东北缘整体向东南滑移挤出的应力特点。

从图 3 可以看出,基本以碱沟为界,以西最大主压应力  $\sigma_1$ 、剪应力  $\sigma_{XY}$  和应力强度  $\sigma_{INT}$  相对较大,而中间主压应力  $\sigma_2$  和最小主压应力  $\sigma_3$  相对较小;碱沟以东刚好相反。断裂带上各应力值的高峰值和低

① 杨斌,周俊喜,等. 黄河黑山峡大柳树与小观音两坝址构造稳定性对比研究报告. 兰州地震工程院,2002.

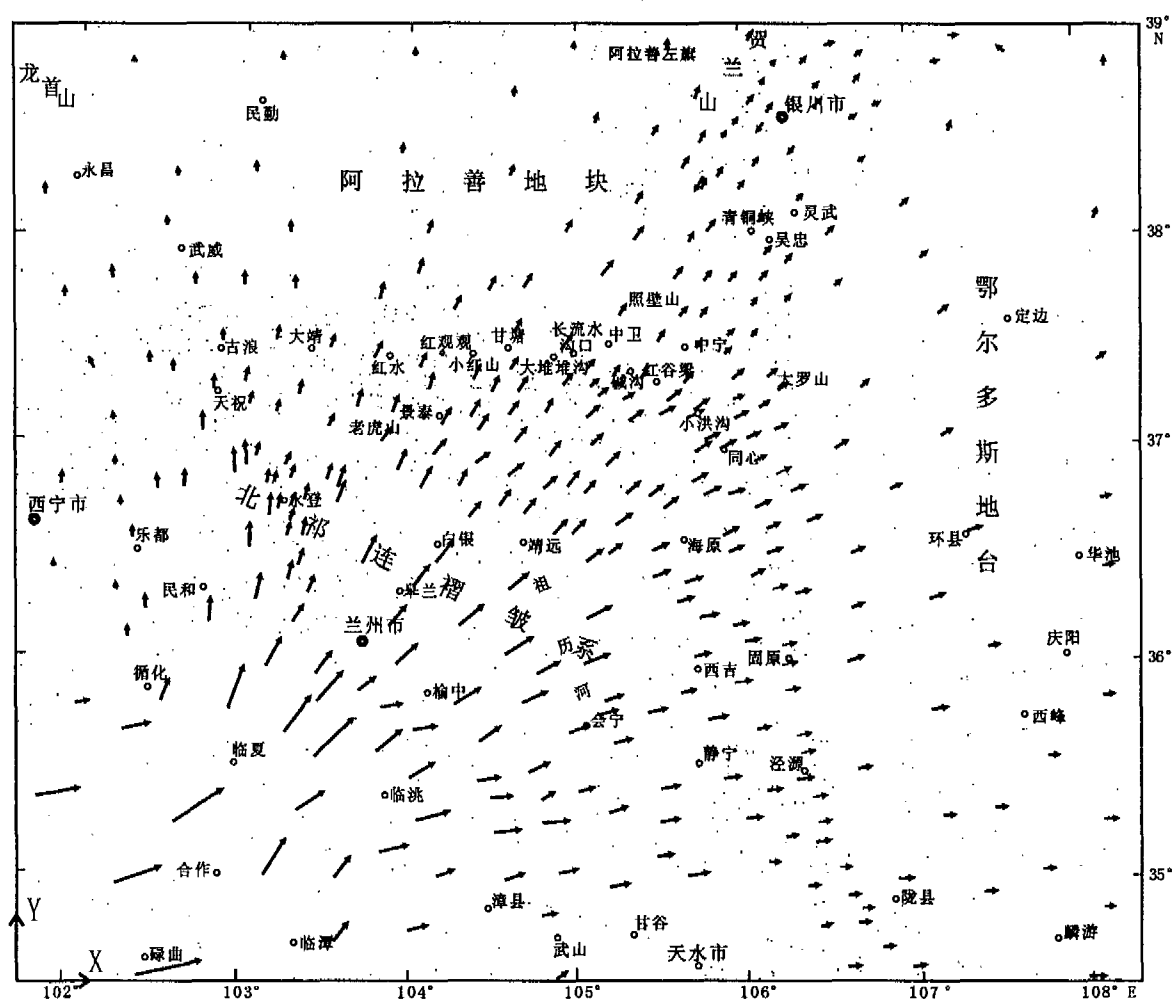


图2 有限元网格模型及模拟得到的区域主压应力场矢量图

Fig. 2 The finite - element model and the principal stress vector obtained by simulation.

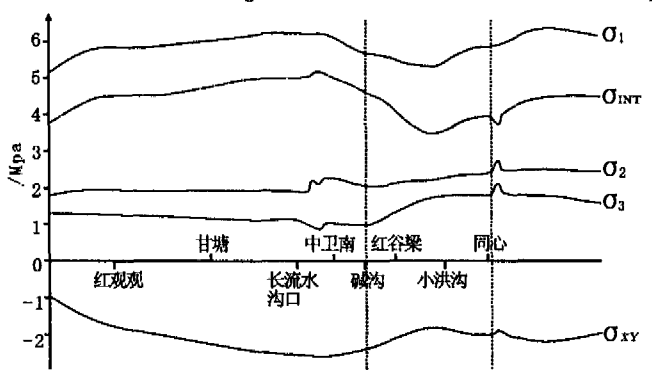


图3 中卫~同心活动断裂带应力分布曲线

Fig. 3 Principal stress and shearing stress along Zhongwei - Tongxin Fault zone.

峰值点分别位于中卫南及小洪沟附近。同心以南,各应力值均相对抬升。

一般来说,在同等应力值的情况下剪应力和应力强度高值区均有利于走滑变形和破坏。可以看出,中卫—同心活动断裂带上剪应力分布相对低值区在红谷梁东—同心一带,1709年中卫南地震破裂

带主要位于甘塘—红谷梁剪应力相对高值区内;应力强度在该断裂带上的分布与剪应力基本相似,相对高值区也为位于红观观—红谷梁一带。

### 4 地震破裂危险区判定

#### 4.1 判定指标

王爱国等<sup>[6]</sup>曾提出了岩石破裂危险度  $KR$  和断层滑动危险系数  $KF$  两个判定地震破裂的力学指标及判定阈值,这里继续沿用该判定指标。

衡量岩石破裂危险程度的指标——岩石破裂危险度  $KR$  定义如下:

$$KR = \begin{cases} \tau_{max}/\sigma'_n/0.85 = (\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3)/0.85 & \sigma'_n < 200 \\ (\tau_{max} - 60)/\sigma'_n/0.6 = (\sigma_1 - \sigma_3 - 120)/(\sigma_1 + \sigma_3)/0.6 & 200 < \sigma'_n < 2000 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别为最大与最小主压应力,单位 MPa。当  $KR < 0.7$  时,岩石不会破裂;当  $KR > 1.35$  时,只要岩石受压达到岩石破坏强度,就会发生破裂;而  $KR = 0.7 \sim 1.35$  为一种临界状态区间。

衡量断层滑动危险程度的指标—断层滑动危险系数  $KF$  定义如下:

$$KF = \tau_n / \sigma_n' \quad (2)$$

其中  $\sigma_n'$  为断层面上点的正应力; $\tau_n$  为断面上的剪应力。断层面上某点的滑动危险系数  $KF$  可用该点断面的产状及应力计算得出。当  $KF \geq 0.75$  时,断层处于滑动状态;当  $KF < 0.4$  时,断层处于闭锁状态;而  $KF = 0.4 \sim 0.75$  为一种临界状态区间。

地震破裂危险区的确定依据这两个指标,岩石破裂危险度  $KR$  达到临界状态为地震破裂的必要条件,而断层滑动危险系数  $KF$  达到临界状态为地震破裂的充分条件。因此,地震破裂危险区的范围取两者的合集来确定,即  $KR > 0.7$  或  $KF > 0.4$  的断层区段。其中断层滑动危险系数  $KF$  达到临界状态的区域为起始破裂区或震源区,地震破裂危险度  $KR$  达到临界状态的区域为破裂扩展区。

#### 4.2 中卫—同心活动断裂带岩石破裂危险度 $KR$ 分析

根据前面对岩石破裂危险度的定义过程,对模拟计算得到的结果数据进行计算得到区域岩石破裂危险度值的分布。从计算结果看,在模型所施加的作用模式之下,破裂最易发生于青藏高原东北缘弧形断裂系统中。

图4给出了中卫—同心活动断裂带上的  $KR$  值分布。从图中可以看出,岩石破裂危险度高值区位于该断裂带中西段,最高值点恰位于中卫南附近。根据岩石破裂危险度判定指标,中卫—同心活动断裂带近东西向区段基本处于破裂临界值范围。但从  $KR$  值看,基本都小于1,只在中卫南极短范围内接近1,说明从岩石破裂条件看,中卫南区段相对容易产生破裂而发震。对比1709年中卫南7½级地震, $KR > 0.7$  区域基本对应了该地震地表破裂带长度及分布区段,峰值及衰减特征也基本一致,高值区位于中卫南—碱沟东,并且向东衰减快,向西衰减慢。

#### 4.3 中卫—同心活动断裂带断层滑动危险系数 $KF$ 分析

图5给出了沿该断裂带剪应力与垂直断裂走向的正应力的比值即危险系数  $KF$  的分布曲线, $KF > 0.4$  区间位于大堆堆沟—红谷梁区段。该区段是中卫活动断裂带中更新世以来活动的高速率区段,也

是1709年中卫南地震破裂带的主体地段,说明该区段往往为地震的起始破裂区段。 $KF$  峰值区位于碱沟附近,与1709年中卫南地震震中区刚好对应,曲线反映的  $KF$  值的变化也是向东衰减快,向西衰减慢,与该次地震的地表破裂位移衰减规律一致。

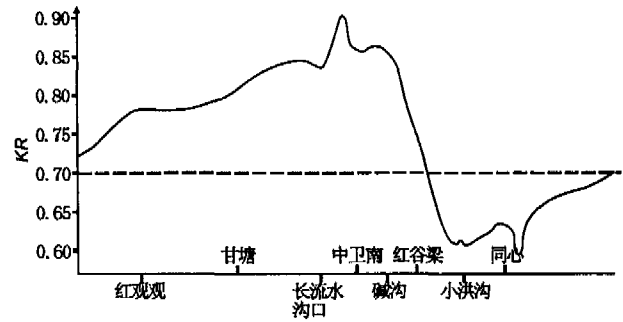


图4 中卫—同心活动断裂带  $KR$  值分布曲线

Fig. 4  $KR$  value along Zhongwei - Tongxin Fault zone.

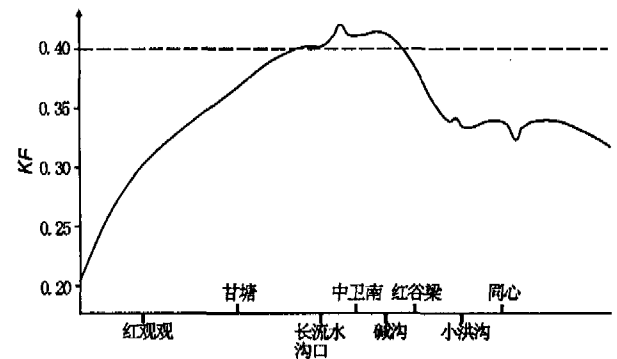


图5 中卫—同心活动断裂带  $KF$  值分布曲线

Fig. 5  $KF$  value along Zhongwei - Tongxin Fault zone.

## 5 结论与探讨

通过以上区域构造应力场特征的模拟及中卫—同心活动断裂带岩石破裂危险度与断层危险系数分析,对该断裂带应力场分布及地震破裂特征得到如下几点认识:

(1) 研究区构造应力场主要来源于印度地块向北推挤过程中的青藏高原东北部边缘效应及重力扩散作用,形成了研究区独特的弧形断裂构造体系及应力场特征。

(2) 中卫—同心活动断裂带上的现代构造应力分布具有明显的分段性,大致以碱沟和同心为界分为三个区段:碱沟以西最大主压应力、剪应力和应力强度相对较大,而中间主压应力和最小主压应力相对较小,峰值区位于中卫南;碱沟至同心区段刚好与此相反,中间主压应力和最小主压应力相对较大,而最大主压应力、剪应力和应力强度相对较小,峰值区位于小洪沟;同心以南各应力值均有明显抬升。

(3) 由岩石破裂危险度  $KR > 0.7$  和断层滑动危险系数  $KF > 0.4$  所确定的中卫—同心活动断裂带上地震破裂危险区范围西起红观观, 东至红谷梁东, 总长近 120 km;  $KR$  峰值区位于中卫南—碱沟东,  $KF > 0.4$  区段位于大堆堆沟—红谷梁之间。表明在现代构造应力场作用下, 中卫活动断裂带地震破裂危险区段主要位于红观观至红谷梁东区段。在地震发生时起始破裂区位于中卫南—碱沟, 破裂向两侧扩展, 向东迅速衰减, 而向西衰减缓慢, 破裂扩展范围可达红观观。

由于模拟基于弹性体, 主要研究区域现代构造应力场作用下中卫—同心活动断裂带上总体应力分布特征, 对 1709 年中卫南 7.5 级地震及 1920 年海原 8.0 级地震的应力调整作用在此研究中无法体现, 同时, 对于破裂危险区的判定, 也不包含具体时间信息, 因此, 在现代构造应力场作用下发生的 1709 年中卫南地震与模拟得到的地震破裂危险区

段分布特征有较好的一致性。另外, 文中  $KR$  与  $KF$  的判定阈值为根据前人研究及经验所取, 在此只作为一次算例, 1709 年中卫南地震可作为实例反证取值的合理性。

#### [参考文献]

- [1] 李天兵, 孟方, 王美芳, 等. 宁夏中西部香山—天景山地区逆冲推覆构造的特征及演化[J]. 地质通报, 2005, 24(4): 309—315.
- [2] 闵伟, 张培震, 邓起东. 中卫—同心断裂带全新世古地震研究[J]. 地震地质, 2001, 23(3): 357—366.
- [3] 庄培仁, 常志忠编著. 断裂构造研究[M]. 北京: 地震出版社, 1996.
- [4] 国家地震局地质研究所, 宁夏回族自治区地震局. 海原活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 1990. 256—264.
- [5] 薛宏运, 郗家全. 鄂尔多斯地块周围的现代地壳应力场[J]. 地球物理学报, 1984, 27(2): 144—152.
- [6] 王爱国, 杨斌, 马巍, 等. 中卫活动断裂带地震破裂危险区演化特征模拟[J]. 高原地震, 2004, 16(1): 9—17.