

# 郑州市断裂最大潜在地震发震概率评价<sup>1</sup>

王继<sup>1)</sup> 田勤俭<sup>2)</sup> 高占武<sup>1)</sup>

1) 中国地震灾害防御中心, 北京 100029

2) 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

**摘要** 根据“郑州市城市活断层探测与地震危险性评价(二期)”综合目标区断层最大潜在地震判定结果, 郑州市近东西向断裂有老鸦陈断裂和上街断裂等。老鸦陈断裂第四纪不活动, 上街断裂等可能具有发生5—5.5级地震的能力。为了得到最大地震的发震概率, 划分了统计区及潜在震源区, 得到了地震活动性参数及空间分布函数。最终得出了郑州市断裂未来50年发生1次5级以上地震的概率为6%, 未来100年发生1次5级以上地震的概率为11%。

**关键词:** 郑州市 断裂探测 地震危险性评价

## 引言

《郑州市城市活断层探测与地震危险性评价(二期)》属于中国地震观测网络工程城市活断层探测项目。2006年9月, 中国地震局地震预测研究所与河南省地震局签署了第二阶段郑州市城市活断层探测与地震危险性评价地质部分的技术服务合同。目标区活动断层地震危险性综合评价属于第二阶段中的第四专题“老鸦陈断层地质调查与地震危险性综合评价”的第4个子专题, 该项目已通过验收, 本文主要内容取自该专题成果。

## 1 地震危险性评价方法

对于第四纪有活动的断裂, 最大震级和地震危险性评价依据有很多方法(中国地震局, 2005; 闻学泽, 2007)。由于断裂所在的目标区附近地震很少, 不能依据本身的地震活动判定地震危险性, 因此, 将地震统计范围扩大到与目标区断裂相关的区域断裂上。通过一定区域范围内地震活动性的统计分析, 获取与地震危险性评价相关的 $b$ 值、地震年发生率等活动性参数, 评价相关区域的地震危险性; 根据地震构造模型, 通过统计区域内相关断裂地震活动比较, 评价目标断裂的地震危险性。

## 2 统计区地震危险性概率分析

统计区位于华北平原地震带的华北南部地震构造区的一部分, 该区分布一组近北西走向

1 基金项目 我国地震重点监视防御区活动断层地震危险性评价项目资助

[收稿日期] 2012-06-27

[作者简介] 王继, 男, 生于1972年。副研究员, 一级地震安评工程师。主要研究方向: 工程地震。E-mail: 88015314@163.com

的断裂系(图1),根据断裂分布、历史地震和现代小地震的分布,可以划分为4个潜在震源区,震级上限从5.5级—6.5级。

**潜源1:**近东西向,是活动断裂探测的目标区,包括郑州市,主要断裂有:上街-中牟断裂(F20);老鸦陈断裂(F13)。发生过1次 $4\frac{3}{4}$ 级地震。

#### (1) 中牟断裂(F20)

走向北西西,倾向北北东,倾角 $65^{\circ}$ — $70^{\circ}$ ,正断裂,北盘下降,断距浅层100—200m,深层200—700m,目标区内长约36km。中牟断裂西段(花园口断裂以西)切割新生界地层等厚线;东段则没有切割新生界地层等厚线。根据浅层地震反射勘探和钻孔剖面图分析认为,中牟断裂没有错断晚第三纪以来地层等厚线,中牟断裂错断的最新地层为上第三系,没有断错第四纪以来的地层,是一条前第四纪断裂。

#### (2) 上街断裂(F20)

西起荥阳县上街镇附近,向东经郑州市区,一直延伸到中牟县境内,终止于白沙一带,全长约120km,走向近东西,倾向北,倾角 $70^{\circ}$ ,为一正断层。

上街断裂的勘探使用了4种手段:地球化学勘探、浅层地震勘探、高密度电法勘探,并利用收集钻孔资料进行跨断裂地层对比。

结果显示,上街断裂并不是一条简单的断裂,它应该是由多个分支断裂组成的断裂带。上街断裂在早第三纪时期仍在活动,但晚第三纪以来已不再活动。因此综合勘探结果认为,该断裂为前第四纪断裂。

#### (3) 老鸦陈断裂(F13)

断裂北起黄河南岸,从邙山东侧地貌陡坎处通过,向南东方向延伸经河南省体育馆东侧穿过市区,并与上街断裂、须水断裂交汇。根据物探结果,老鸦陈断裂是一条走向北北西、倾向北南、倾角 $60^{\circ}$ — $70^{\circ}$ 的正断裂。该断裂错断了新第三纪以前的地层,自新第三纪以来已不再活动。

根据以上结果,判定该潜源区的震级上限为5.5级。

**潜源2:**包括封门口-五指岭断裂(F14)、新安-郟县断裂(F15)和朝阳-偃师断裂(F21)。发生的主要地震有1个 $5\frac{1}{2}$ 级地震和2个 $4\frac{3}{4}$ 级地震。根据第四代地震区划图的结果,该潜源区的震级上限为6级。

**潜源3:**包括薄壁断裂(F3)、李万-武陵断裂(F12)和盘古寺-新乡断裂(F19)。发生的主要地震有1个6级地震和1个 $5\frac{1}{2}$ 级地震。根据第四代地震区划图的结果,该潜源区的震级上限为6.5级。

**潜源4:**包括颍桥-李集断裂(F16)、鲁山-漯河断裂(F17)和禹县-太康断裂(F22)。发生的地震主要有2个6级地震,1个 $5\frac{3}{4}$ 级地震,2个 $5\frac{1}{2}$ 级地震,2个5级地震,1个 $4\frac{3}{4}$ 级地震。根据第四代地震区划图的结果,该潜源区的震级上限为6.5级。

为了给出潜在震源区1的地震活动性参数,将这4个潜在震源区按1个断裂系统来考虑,作为1个统计区来考虑其地震活动性参数,再根据多因子判别方式,分配潜在震源区1的地震活动性参数。

## 2.1 基本计算公式

统计区包含有多条相同或不同方向的、有中强地震发生能力的断裂或断裂段落,但往往不易分出主、次级断裂,有时也难以进一步细分段。因此,这类统计区内震级 $\geq M$ 破坏性地

震的发生时间进程可以近似为泊松过程 (Connel, 1968)。这种随机的泊松过程是无记忆的, 即在时段内地震发生的概率与小区内过去的破坏性地震发生时间、地点无关。从而, 在任意给定长度为 $\Delta T$ 的时段内, 任一具有发震能力的断裂 (或小段) 上发生  $K$  次震级 $\geq M_1$  破坏性地震的概率  $P_1$  可由泊松近似 (闻学泽, 2007):

$$P_1[\Delta T \text{年内发生 } K \text{ 次震级} \geq M_1 \text{ 的地震}] = \frac{(V_1 \times \Delta T)^K}{k!} \exp(-V_1 \times \Delta T) \quad (1)$$

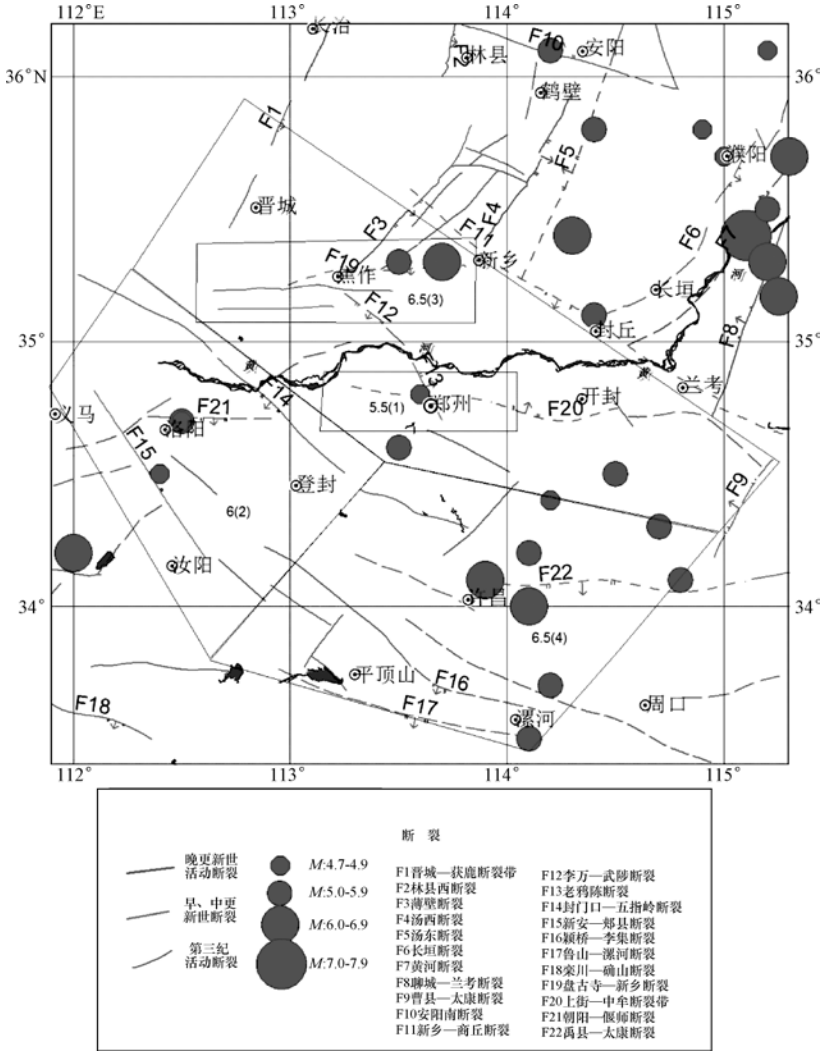


图 1 统计区及潜在震源区分布

Fig. 1 Statistical units and distribution of potential source area

而发生  $K$  次震级 $\geq M_2$  的地震破坏性的概率  $P_2$  为:

$$P_2[\Delta T \text{年内发生 } K \text{ 次震级} \geq M_2 \text{ 的地震}] = \frac{(V_2 \times \Delta T)^K}{k!} \exp(-V_2 \times \Delta T) \quad (2)$$

因此, 设以上提到的震级  $M_1 > M_2$ , 则在相同的 $\Delta T$  时段内, 小区内发生  $K$  次震级在  $M_1$

和  $M_2$  之间的地震概率  $P$ , 可由概率减法得到:

$$P[\Delta T \text{ 年内发生 } K \text{ 次震级在 } M_1 \text{ 和 } M_2 \text{ 之间的地震}] = P_2 - P_1 \quad (3)$$

以上式 (1) 一式 (3) 的  $\Delta T$  是给定的预测时段, 可根据需要设为 10—200 年中的任意长度。式中的  $V_1$  和  $V_2$  也可写成  $V(\geq M_1)$  和  $V(\geq M_2)$ , 分别是小区内震级  $\geq M_1$  和  $\geq M_2$  地震的平均年发生率。去掉脚标后改记为  $V(\geq M)$ , 它与地震的平均复发间隔  $T(\geq M)$  存在如下关系:

$$V(\geq M) = \frac{1}{T(\geq M)} \quad (4)$$

对于大小处于小区的震级—频度关系 (式 7) 线性段之内、震级  $\geq M$  的破坏性地震, 有:

$$T(\geq M) = \frac{1}{10^{(a-bM)}} \quad (5)$$

或者

$$V(\geq M) = 10^{(a-bM)} \quad (6)$$

式中,  $a$ 、 $b$  来自于同一断裂系的震级—频度关系的参数:

$$\log N(\geq M) = a - bM \quad (7)$$

由上述可见, 若要估算小区内震级处于震级—频度 (式 7) 线性段 (亦称 G—R 关系) 的最大截距震级  $M_m (=a/b)$  左侧的破坏性地震的概率, 关键是能估计出可靠的、具有长期代表性的 G—R 关系参数  $a$  和  $b$  值, 接着由式 (6) 估计出震级  $\geq M$  地震的年发生率, 最后再由式 (1)、(2)、(3) 估算出破坏性地震的发生概率。

为了综合现代台网地震资料与历史记载的破坏性地震资料来估计断裂系的长期、稳定的 G—R 关系参数  $a$  和  $b$  值, 同样可考虑由式 (8) 将不同震级档 ( $\geq M_i$ ) 的地震在其完整记录 (或记录) 时段 ( $T_0 - T_i$ ) 中的次数  $n_i(M_i)$  归算到一个时间单位 ( $t$ ), 得到某震级档  $i$  在地震  $t$  年中理论频度 (次数) 的估值:

$$n(M_i)_t = \frac{n_i(M_i) \times t}{(T_0 - T_i)} \quad (8)$$

式中,  $T_i$  和  $T_0$  分别是第  $M_i$  震级档地震的完整记录 (或记载) 的起始和终止年份;  $T_i$  则依不同断裂段 (小区)、不同震级范围地震的完整记录 (或记载) 时段的不同而变化。  $T$  是不同震级档的地震频数  $n_i(M_i)$ , 要统一到相同长的时段。同时还应充分考虑人文历史发展的地理差异对历史地震记载的影响, 来设定保守的  $t$  和  $T_i$  的取值方案。

## 2.2 统计区活动性参数确定

### 2.2.1 地震资料完整性分析

图 2 给出了断裂系自 1000 年以来  $M_S \geq 4.7$  级地震的  $M-T$  图和应变释放曲线。本区最早的 6 级地震记载于 1524 年, 5 级地震最早记载于公元前 519 年, 自 1484 年以来  $M_S \geq 5$  级地震基本完整可靠 (黄玮琼等, 1994)。

对于现代地震目录, 本区 1980 年以来处于区域地震台网  $M_L \geq 2.0$  ( $M_S 1.5$ ) 级地震的有效监测范围内 (焦远碧等, 1990)。

### 2.2.2 统计区地震资料和震级频度关系 $b$ 值

从中国地震台网目录和中国强震目录中选出 1980—2006 年的  $M_S \geq 1.5$  级地震以及历史上 (包括现代)  $M_S \geq 4.7$  级地震资料 (表 1)。取震级分档间距  $\Delta T = 0.5$ , 由最小二乘法计算式 (4) 的参数  $a$  和  $b$  值,  $a = 1.682$ ,  $b = 0.6521$ 。统计区所用的资料时间段和数据如表 2 所示, 图 3 给出了统计区震级—频度关系图。

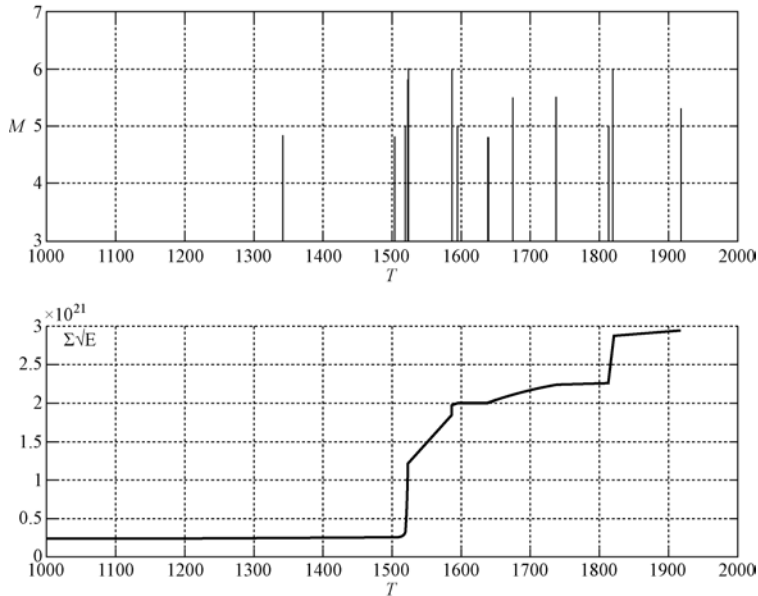


图 2 统计区  $M-T$  图及应变释放曲线

Fig. 2  $M-T$  diagram and the strain release curve in statistical unit

表 1 统计区破坏性地震目录 ( $M_S \geq 4.7$ ) (公元前 519 年—2006 年)

Table 1 Devastating earthquake catalog ( $M_S \geq 4.7$ ) (519 B.C. to 2006) in statistical unit

| 发震时间<br>年-月-日 | 北纬 ( $^{\circ}$ ) | 东经 ( $^{\circ}$ ) | 震级             | 震中烈度 | 精度 |
|---------------|-------------------|-------------------|----------------|------|----|
| -519-08-08    | 34.7              | 112.5             | $5\frac{1}{2}$ | 7    | 3  |
| 294-12-00     | 33.7              | 114.2             | $5\frac{1}{2}$ |      | 5  |
| 927-08-00     | 34.8              | 113.6             | $4\frac{3}{4}$ | 6    | 4  |
| 1342-04-23    | 34.5              | 114.5             | $4\frac{3}{4}$ | 6    | 3  |
| 1504-08-24    | 34.4              | 114.2             | $4\frac{3}{4}$ | -    | 0  |
| 1519-11-23    | 33.5              | 114.1             | 5              | -    | 0  |

|            |      |       |                |   |   |
|------------|------|-------|----------------|---|---|
| 1522-02-07 | 34.2 | 114.1 | $5\frac{3}{4}$ | 7 | 0 |
| 1524-02-14 | 34   | 114.1 | 6              | 7 | 0 |
| 1587-04-10 | 35.3 | 113.7 | 6              | 8 | 3 |

续表

| 发震时间<br>年-月-日 | 北纬 (°) | 东经 (°) | 震级             | 震中烈度 | 精度 |
|---------------|--------|--------|----------------|------|----|
| 1587-04-10    | 35.3   | 113.5  | $5\frac{1}{2}$ |      | 3  |
| 1594-03-24    | 34.3   | 114.7  | 5              |      | 4  |
| 1638-12-22    | 34.5   | 112.4  | $4\frac{3}{4}$ |      | 3  |
| 1640-04-00    | 34.7   | 112.5  | $4\frac{3}{4}$ | 6    | 3  |
| 1675-00-00    | 34.1   | 114.8  | $5\frac{1}{2}$ | 7    | 3  |
| 1737-09-30    | 35.1   | 114.4  | $5\frac{1}{2}$ | 7    | 2  |
| 1814-01-10    | 34.6   | 113.5  | 5              | 6    | 3  |
| 1820-08-04    | 34.1   | 113.9  | 6              | 8    | 2  |
| 1918-08-09    | 34.5   | 114.5  | 5.3            | 6    | 0  |

表 2 地震资料的选取时间和数据

Table 2 Statistical seismic data at different magnitude intervals

| 震级      | 统计时段 (年)  | 统计年限 (年) | 次数 | 年发生率   | 累积年发生率 |
|---------|-----------|----------|----|--------|--------|
| 1.5—1.9 | 1980—2006 | 27       | 81 | 3.0000 | 5.4284 |
| 2.0—2.4 | 1980—2006 | 27       | 46 | 1.7037 | 2.4284 |
| 2.5—2.9 | 1980—2006 | 27       | 12 | 0.4444 | 0.7247 |
| 3.0—3.4 | 1980—2006 | 27       | 4  | 0.1481 | 0.2803 |
| 3.5—3.9 | 1980—2006 | 27       | 1  | 0.0370 | 0.1321 |
| 4.0—4.4 | 1980—2006 | 27       | 2  | 0.0741 | 0.0951 |
| 4.5—4.9 | 1980—2006 | 27       | 0  | 0      | 0.0210 |
| 5.0—5.4 | 1484—2006 | 523      | 4  | 0.0076 | 0.0210 |
| 5.5—5.9 | 1484—2006 | 523      | 4  | 0.0076 | 0.0134 |
| 6.0—6.4 | 1484—2006 | 523      | 3  | 0.0057 | 0.0057 |

### 2.2.3 统计区年平均发生率、复发间隔和复发概率

基于以上参数，根据式 (1) 一式 (7)，计算出震级  $\geq M$  破坏性地震的平均复发间隔  $T$

(年), 以及未来 50 年和 100 年的发震概率见表 3。

4 级以上地震年平均发生率 ( $V_4$ ) 代表未来时间段内地震统计区地震活动的平均水平。由前面得出的  $b$  值结合活跃期地震活动水平推算得到, 统计区:  $V_4$  值=0.1185。

地震年平均发生率  $V_4$  代表未来 100 年内统计区地震活动的水平。为了如实地反映地震活动的时空不均匀性, 需要将统计区内的地震年平均发生率, 按预测结果合理地分配到相应的各潜在震源中去。这里, 作者应用震级分档的方法来反映地震活动的时空不均匀性, 而且可以避免低估大地震的危险程度。

按地震危险性分析的思路, 统计区内  $m_j$  震级的地震年平均发生率  $V_{mj}$  可以表示为:

$$V_{mj} = \frac{2v \exp[-\beta(m_j - m_0)] \sinh\left(\frac{1}{2}\beta\Delta m\right)}{1 - \exp[-\beta(m_u - m_0)]} \quad (8)$$

式中,  $\beta = b \ln 10$ ,  $b$  为该统计区的震级—频度关系式中的  $b$  值;  $\sinh(x)$  为双曲正弦函数;  $m_u$  为统计区的震级上限, 这里取 6.5;  $m_0$  为起算震级, 这里取 4 级;  $\Delta m$  为震级分档间隔, 这里取为 0.5;  $m_j$  为分档间隔中心对应的震级值。

根据求出的年平均发生率, 根据式 (1) 一式 (7), 计算出分震档的平均复发间隔  $T$  (年), 以及未来 50 年和 100 年的发震概率见表 3。

表 3 统计区地震年平均发生率、平均复发间隔与发震概率

Table 3 Average annual rate, recurrence interval and earthquake occurrence probability in statistical unit

| 震级 ( $M$ )   | $M_S 5.0-5.4$ | $M_S 5.5-5.9$ | $M_S 6.0-6.4$ |   |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---|
| 年平均发生率       | 0.0154        | 0.0073        | 0.0034        | $a=1.682$<br>$b=0.6521$<br>$V_4=0.1185$ |
| 复发间隔 (年)     | 65            | 138           | 292           |   |
| 发震概率 (50 年)  | 0.5366        | 0.3044        | 0.1575        |   |
| 发震概率 (100 年) | 0.7852        | 0.5162        | 0.2902        |   |

### 3 郑州市断裂最大潜在地震发震概率

在地震统计区内, 须把地震统计区各震级档地震的年平均发生率分配给各相应的潜在震源区。本文采用空间分布函数, 根据各潜在震源区发生不同震级档地震可能性的大小, 对统计区各震级档的地震年平均发生率进行不等权分配。空间分布函数  $f_{i,m_j}$  的物理含义是地震统计区内发生 1 个  $m_j$  档震级的地震, 落在第  $i$  个潜在震源区内概率的大小。在同一地震统计区内  $f_{i,m_j}$  满足归一条件:

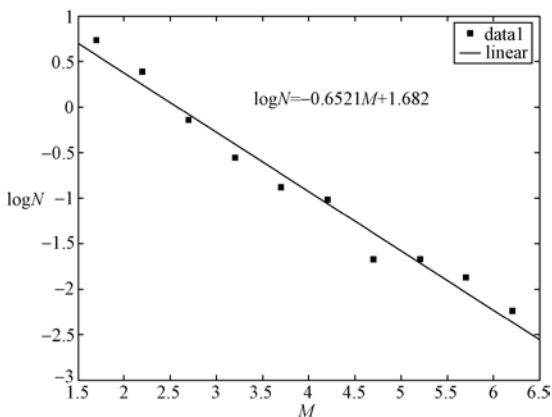


图 3 统计区震级—频度关系图

Fig. 3 Magnitude-frequency curve in statistical unit

$$\sum_{i=1}^n f_{i,m_j} = 1 \quad (\text{对不同震级档 } m_j) \quad (9)$$

这里  $n$  为地震统计区内第  $m_j$  档潜在震源区的总数。在本研究区中,  $m_j$  共分成 3 个震级档, 即: 5.0—5.4、5.5—5.9、6.0—6.4。确定  $f_{i,m_j}$  时, 要考虑以下几个方面 (胡聿贤, 1999): ①使用多因子综合评判方法; ②注意所选因子之间的相互独立性, 尽量删除那些相互重叠的因子; ③各因子赋值标准应是已有震例的总结; ④注意因子的地区性和地震强度的差异。

确定各潜在震源区的空间分布函数  $f_{i,m_j}$  时, 应主要考虑以下几个方面的因子。

### 3.1 各潜在震源区的多因子判断

#### 3.1.1 按面积因素分配参数

各潜在震源区面积因素分配因子见表 4。

表 4 潜在震源区的面积因子

Table 4 Area factor of the potential source area

| 潜在震源区 | $M_0$ | 面积 (km <sup>2</sup> ) | $5.0 \leq M_j < 5.5$ | $5.5 \leq M_j < 6.0$ | $6.0 \leq M_j < 6.5$ |
|-------|-------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 号   | 5.5   | 2574                  | 0.0755               |                      |                      |
| 2 号   | 6.0   | 12880                 | 0.3775               | 0.4083               |                      |
| 3 号   | 6.5   | 3191                  | 0.0935               | 0.1012               | 0.1710               |
| 4 号   | 6.5   | 15470                 | 0.4535               | 0.4905               | 0.8290               |

#### 3.1.2 强震复发间隔与构造空段

对于潜在震源区内有 6 级以上强震重复发生现象存在的地区, 可以根据雷建成 (1991) 的 Weibull 分布得到的强震重复发生的累积危险率  $P(t)$  赋值标准 (表 5)。对于潜在震源区内 6 级以下地震按表 3 的复发间隔计算。

表 5 华北地区强震重复发生的累积危险率 (部分, 据雷建成, 1991)

Table 5 Cumulative reoccurrence risk of strong earthquakes in North China (from Lei Jiancheng, 1991)

| $T$ | 100  | 150  | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 700  | 800  | 900  |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 6→6 | 0.24 | 0.34 | 0.45 | 0.60 | 0.72 | 0.81 | 0.86 | 0.90 | 0.94 | 0.98 |

1 号潜源发生最近 1 次  $4\frac{3}{4}$  级地震是公元 927 年, 距今 1000 年以上, 根据表 5 发生 5 级地震的概率分配为 1; 2 号潜源最近 1 次 5.5 级地震是公元前 519 年, 最近的  $4\frac{3}{4}$  级地震是 1640 年, 距今约 367 年, 发生 5 级以上地震的概率为 1; 3 号潜源最近 1 次大于 6.0 级地震是 1587 年, 距今约 400 年以上, 6 级以上复发概率为 0.72, 5—6 级地震的发震概率为 1; 4 号潜源最近 1 次 6.0 级地震是 1820 年, 最近的 5.5 级地震是 1675 年, 距今约 330 年, 发生 5—6 级地震的概率为 1, 发生 6 级以上地震的概率为 0.45。考虑到各潜在震源区的断裂条数, 该参数应乘以断裂条数。各潜在震源区赋值如表 6 所示。

表 6 潜在震源区的强震复发间隔与构造空段因子



**Table 6 Earthquake recurrence interval and structure gap factor in potential source area**

| 潜在震源区 | $M_u$ | $5.0 \leq M_j < 5.5$ | $5.5 \leq M_j < 6.0$ | $6.0 \leq M_j < 6.5$ |
|-------|-------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 号   | 5.5   | 1 (0.0770)           |                      |                      |
| 2 号   | 6.0   | 5×1 (0.3846)         | 5×1 (0.4167)         |                      |
| 3 号   | 6.5   | 2×1 (0.1538)         | 2×1 (0.1667)         | 2×0.72 (0.3902)      |
| 4 号   | 6.5   | 5×1 (0.3846)         | 5×1 (0.4167)         | 5×0.45 (0.6098)      |

### 3.1.3 根据潜在震源区活动断裂的长度分配参数

各潜在震源区都有一定的第三系以来的活动断裂，以断裂的长度为分配因子，见表 7。

**表 7 潜在震源区活动断裂的长度因子****Table 7 Length factor of active fault in potential source area**

| 潜在震源区 | $M_u$ | 断裂长度 (km) | $5.0 \leq M_j < 5.5$ | $5.5 \leq M_j < 6.0$ | $6.0 \leq M_j < 6.5$ |
|-------|-------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 号   | 5.5   | 37        | 0.0457               |                      |                      |
| 2 号   | 6.0   | 250       | 0.3090               | 0.3238               |                      |
| 3 号   | 6.5   | 152       | 0.1879               | 0.1969               | 0.2912               |
| 4 号   | 6.5   | 370       | 0.4574               | 0.4793               | 0.7088               |

## 3.2 各潜在震源区的空间分布函数 $f_{i,m_j}$

根据以上因子判断的参数，得出了各潜在震源区的空间分布函数（表 8）和各震级档的年平均发生率（表 9）。各潜在震源区空间分布函数定义为确定方法的原因是，从前述 3 个因子中选择因子，用等权求各方法来确定其值大小。在进行具体分析时，由所选用的因子（ $k$ ）单独对统计区内能够发生相应震级档次（ $m_j$ ）地震的潜在震源区（ $i$ ）赋值（ $w_{i,m_j,k}$ ）；对每一个因子（ $k$ ）在统计区内归一化，得到因子载荷  $Q_{i,m_j,k}$ ，此时，作者在分配各潜在震源区赋值时已经进行了归一化处理：

$$Q_{i,m_j,k} = w_{i,m_j,k} \frac{w_{i,m_j,k}}{\sum_i w_{i,m_j,k}} \quad (10)$$

由各因子之和得到各震级档的总荷载  $R_{i,m_j}$ ：

$$R_{i,m_j} = \sum_k Q_{i,m_j,k} \quad (11)$$

再由总荷载量（ $R_{i,m_j}$ ）在统计区内的归一化，即可以得到各潜在震源区的空间分布函数  $f_{i,m_j}$ ：

$$f_{i,m_j} = \frac{R_{i,m_j}}{\sum_i R_{i,m_j}} \quad (12)$$

各潜在震源区的地震活动年平均发生率  $V_{i,m_j}$  为：

$$v_{i,mj} = v_{mj} \times f_{i,mj} \quad (13)$$

表 8 各潜在震源区空间分布函数

Table 8 Spatial distribution function of the potential source area

| 潜在震源区 | $5.0 \leq M_j < 5.5$ | $5.5 \leq M_j < 6.0$ | $6.0 \leq M_j < 6.5$ |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 号   | 0.0765               |                      |                      |
| 2 号   | 0.3822               | 0.4139               |                      |
| 3 号   | 0.1337               | 0.1449               | 0.3171               |
| 4 号   | 0.4076               | 0.4412               | 0.6829               |
| 总计    | 1.0                  | 1.0                  | 1.0                  |

表 9 各潜在震源区年平均发生率

Table 9 Average annual occurrence rate of each potential source area

| 潜在震源区 | $5.0 \leq M_j < 5.5$ | $5.5 \leq M_j < 6.0$ | $6.0 \leq M_j < 6.5$ |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 号   | 0.0012               |                      |                      |
| 2 号   | 0.0059               | 0.0030               |                      |
| 3 号   | 0.0021               | 0.0011               | 0.0011               |
| 4 号   | 0.0063               | 0.0032               | 0.0023               |
| 总计    | 0.0154               | 0.0073               | 0.0034               |

### 3.3 潜在震源区 1 的年平均发生率、复发间隔和复发概率

基于以上统计区的参数，根据式 (1) 一式 (7)，表 10 给出了潜在震源区 1 的年平均发生率、复发间隔和复发概率。

表 10 潜在震源区 1 的年平均发生率、复发间隔和发震概率

Table 10 Annual average rate, average recurrence interval and earthquake occurrence probability of potential source area #1

| 震级            | 年平均发生率 | 复发间隔<br>(年) | 发震概率<br>(50 年) | 发震概率<br>(100 年) | 发震概率<br>(1000 年) |
|---------------|--------|-------------|----------------|-----------------|------------------|
| $M_s 5.0-5.4$ | 0.0012 | 830         | 0.0582         | 0.1131          | 0.6988           |

综合上述研究结果，可以认为郑州市断裂 50 年内发生 1 次 5—5.4 级地震的概率约为 6%；100 年内发生 1 次 5—5.4 级地震的概率约为 11%。因此，该断裂活动微弱，发震概率很低。

## 4 结论

综合地震危险性分析结果，本文认为郑州市目标区断裂可能具有发生 5—5.5 级地震的能力，未来 50 年发生 1 次 5 级以上地震的概率为 6%，未来 100 年发生 1 次 5 级以上地震的概率为 11%。同时，本文还尝试给出了中弱活动断裂的地震危险性分析方法，中弱活动断裂不

能完全用地质学的断裂活动性方法给出其地震危险性, 要结合地质学与地震活动性方法综合考虑。

## 参考文献

- 胡聿贤主编, 1999. 地震安全性评价技术教程. 北京: 地震出版社.
- 黄玮琼, 李文香, 曹学锋, 1994. 中国大陆地震资料完整性研究之二——分区地震资料基本完整的起始年分布图像. 地震学报, **16** (4): 423—432.
- 焦远碧, 吴开统, 1990. 中国地震台网检测能力及台网观测条件质量评定. 中国地震, **6** (4): 1—7.
- 雷建成, 时振梁, 鄢家全, 1991. 确定潜在震源区地震年平均发生率的方法研究. 地震学报, **13** (4): 496—504.
- 闻学泽, 2007. 隐伏活动断层的现今活动习性 with 地震危险性评价方法. 四川省地震局、中国地震局地质研究所.
- 中国地震局, 2005. 中国地震活动断层探测技术系统技术规程. 北京: 地震出版社.
- Connel C.A., 1968. Engineering Seismic Risk Analysis. Bull. Seis. Soc. Am., **58** (5):1583—1606.

# Occurrence Probability Evaluation of the Maximum Potential Earthquake along Zhengzhou City Faults

Wang Ji<sup>1)</sup>, Tian Qinjian<sup>2)</sup> and Gao Zhanwu<sup>1)</sup>

1) China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China

2) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

**Abstract** Based on the results from project “The active fault detection and seismic risk evaluation (Phase II) of Zhengzhou City”, there exist two east-west trending faults, i.e Lao Yachen fault and the Shanjie fault. The Lao Yachen fault was not active in Quaternary, whereas it is likely for a  $M5-5.5$  earthquake to occur along the Shanjie fault. In this study, we divided the study area into statistical units and obtained the seismic parameters and the spatial distribution function for the potential source areas. Finally, we estimated the probability of  $M5.0$  earthquake along faults in Zhengzhou City as 6% in the next 50 years and 11% in 100 years.

**Key words:** Zhengzhou City; Fault detection; Seismic risk evaluation