

文章编号: 0253-3782(2001)05-0502-12

北京西北活动构造定量资料与未来 强震地点的讨论^{*}

冉勇康 陈立春 徐锡伟

(中国北京 100029 中国地震局地质研究所)

摘要 通过阐述北京西北的活动构造定量数据及其精度, 用确定性方法、概率方法和综合评分方法, 通过排队, 比较出北京西北及邻近地区未来强震可能发生的地点, 讨论预测结果中存在的一些问题。结果显示, 未来强震最危险的断裂段为: 阳原盆地南缘断裂 B 段和 A 段、延庆盆地的燕水段、宣化盆地南缘断裂、怀安镇南缘断裂东段和阳高一天镇北缘断裂东段等段落。亦即阳原-深井盆地为最危险区; 天镇-怀安镇-宣化盆地为次危险区; 万全-张家口和蔚县东北-矾山西南为更次危险区。

关键词 北京西北 活动构造定量资料 综合方法 强震地点

中图分类号: P546 **文献标识码:** A

引言

北京西北地区指东经 $114^{\circ} \sim 116.5^{\circ}$, 北纬 $39^{\circ} \sim 41^{\circ}$ 的山区部分。本区处于近东西向燕山、北东向-北北东向山西和北西向张家口-蓬莱活动构造区(带)的交接部位。长期的构造发展演化, 造就了区内的盆岭构造特征和多组不同规模的断裂系统, 主要有北北东-北东、北北西-北西和近东西向盆地与断裂。北东向活动断裂是区内最活动的主干断裂, 其规模较大, 一般长度都在几十至百余千米; 其次是与之近于正交的北西向活动断裂, 其断续分布, 地表出露规模比北东及北北东向断裂小; 另外, 在研究区北部发育规模不大的近东西向活动断裂。这几组断裂对区域构造地貌、第四纪地质、新构造运动起控制作用, 并伴生有多次历史强震。

由于研究区地理和构造位置的重要性, 许多学者和研究组在该区域开展过活动构造的研究工作, 积累了丰富的资料。例如, 20 世纪 70 年代北京地区的地震地质会战; 北京地区工程地震安全性评价项目有关断裂活动性方面的研究; 延怀盆地活动断裂大比例尺(1/5 万)地质填图与浅层探测等。近年, 笔者系统研究了北京西北地区的活动构造并整理了前人的资料(冉勇康等, 1991, 1992, 1995; 段瑞涛, 1994; 方仲景等, 1995; 尹功明等, 1997; 徐锡伟, 1998), 取得了一批定量数据。尽管这些数据存在一定的不确定性和不完整性, 但相对而言, 是目前国内资料最齐全、精度最高的极少数地区之一。利用活动构造定

* 国家重大基础理论规划项目《强震机理与预测》(95130105)和中国地震局重点项目(95040803)资助。
2001-01-04 收到初稿, 2001-08-13 收到修改稿并决定采用。

量资料探讨区域强震发生地点是强震机理与预测现阶段的主攻方向。本研究给出了该区域的活动构造定量数据及其精度，并尝试用通行的确定性和与时间相依的概率方法以及综合评分方法，评价北京西北未来强震可能发生的地点；在展示活动构造阶段性预测结果的同时，讨论了其中存在的一些问题。

1 资料

根据地质地貌、地层及断层物质的测年结果分析，研究区内共有 28 条断裂在第四纪期间有过不同程度的活动，其中有 21 条断裂在晚更新世有过明显活动（图 1）。

1.1 定量资料的获取

针对这 21 条断裂的具体情况，开展不同程度的定量研究工作，以获取可以用来确定未来强震发生地点的定量参数，其中包括：位移速率、古地震期次、大地震重复间隔、最后一次事件的离逝时间、同震位移量、破裂分段及段落长度。由于地质记录的不完整和不平衡，采用以下技术方法尽可能精细地获取活动断裂定量数据：

1) 依据正断层运动往往造成层状上升地貌面的特点，实测典型地点平面和剖面，获取各级地貌面的累计位移量。

2) 利用探槽和天然剖面中标志层或崩积楔显示的直接断错证据，确定古地震事件及其同震位移量或累计位移量。

3) 通过不同期次断错地层、地貌面的实验室年代测定和区域对比分析，确定各级地貌面被断错的起始年代、古地震发生的年代[不同探槽之间的事件对比采用逐次限定方法（毛凤英，张培震，1995）]和最后一次事件的时间等。

4) 由地貌面形成年代及其位移量求取平均位移速率。

5) 依据断裂的几何特征、古地震分布和其它活动遗迹划分地震破裂段落。

6) 根据古地震实际重复间隔和用同震位移量与平均位移速率比，求大地震平均重复间隔。

7) 对于参数不全的断裂，采用构造类比的方法判断断裂的位移速率和大体的同震位移量。

研究的结果为：有 18 条断裂获得完整或不完整的定量数据（表 1）。

1.2 定量资料的精度

在已获得的断裂活动性定量数据中，不同断裂上的数据精度是不平衡的。按各断裂研究的实际情况，可将各断裂和断裂段关键参数（平均位移速率、古地震期次和时代）的精度差

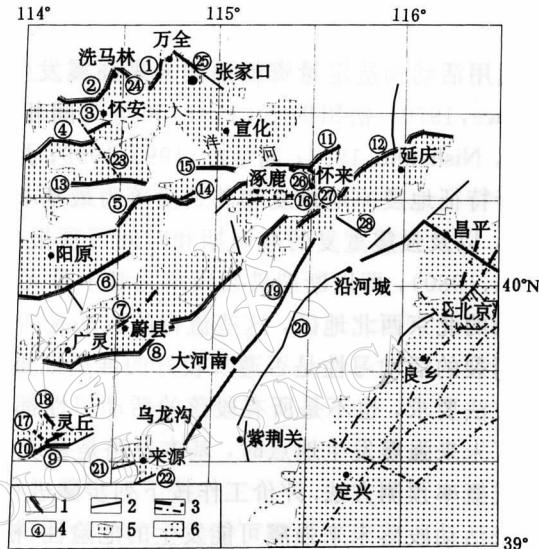


图 1 北京西北地区活动断裂图

1. 晚更新世和全新世(双线)活动断裂，2. 第四纪早、中期活动断裂，3. 隐伏活动断裂，4. 断裂编号(断裂名称见表 1)，5. 第四纪盆地，6. 北京平原

异划分为 3 个等级. 关于位移速率精度: 由多个测年数据和实测位移量确定的为 A, 位移量或测年数据单一的为 B, 位移量或年代数据中有一个为推测的为 C; 关于古地震精度: 由多个探槽和年代数据控制的定为 A, 单一探槽但有确定的证据和多个年代数据探制的为 B, 事件证据不明确或年代控制不好的为 C.

表 1 中研究精度较高的断裂(A 级)有天镇-阳高盆地北缘断裂西段、阳原盆地南缘断裂、延庆盆地北缘断裂、怀涿盆地北缘断裂、新保安-沙城断裂和宣化盆地北缘断裂; 而研究精度较差的(C 级)为万全盆地北缘断裂、阳原盆地北缘断裂的东段、灵丘盆地南缘断裂、洗马林断裂和张家口断裂; 其它断裂精度为 B 级.

2 方法

运用活动构造定量资料预测未来强震发生潜势的基本方法主要有两类: 确定性方法 (Wallace, 1970; 松田时彦, 1981) 和与时间相依概率方法 (Nishenko, Buland, 1987; McCalpin, Nishenko, 1996; 闻学泽, 1995, 1999; 张培震, 毛凤英, 1996). 这两种方法的出发点都基于特征地震原地重复和破裂段落为最基本的发震单元的理论 (Schwartz, Coppersmith, 1984), 以及强震重复的准周期和时间可预报模型 (Savage, Cockerham, 1987; Shimazaki, Nakata, 1980), 即以断裂破裂段落为基本单元来估计未来强震的危险性. 对于具有特殊构造背景的北京西北地区, 这些流行的方法是否合适, 一是取决于方法所要求的资料精度, 二是断裂的活动习性是否遵从较好的准周期重复特征. 前述表明, 目前资料精度只是部分满足方法要求, 也不是所有段落的活动习性都遵从较好的准周期重复特征. 因此, 在讨论该地区未来强震发生地点时, 基本思路是系统误差基础上的危险性排队法, 不是直接的确定性或概率预测方法. 评价工作按下列步骤进行: 1) 段落的消逝率计算. 逐个分析晚更新世以来活动段落未来强震可能发生的危险性 (松田时彦, 1981), 判定最近时间段最危险的发震段落.

$$V = \frac{T_e + \Delta T}{T_{av}} \geq 0.5 \quad (1)$$

式中, T_e 为离逝时间; ΔT 为预测时段, 本研究设该值为 0; T_{av} 为平均重复间隔; V 为消逝率, 一般认为当消逝率大于或等于 0.5 时, 断层有发生地震的危险.

由于已获得的断裂活动性参数的完整性 (具备断裂平均位移速率、古地震重复间隔、最后一次事件的离逝时间和同震位移量视为完整) 和精度不相同, 其判定精度也不同. 在没有古地震重复间隔值和(或)没有同震位移量的段落, 用平均位错速率和经验获得的同震位移量推断重复间隔. 以 D 表示可比同震最大位移量, 以 cm 为单位. M 表示震级, L 表示破裂长度或发震段落长度, 以 km 为单位. 则 (邓起东等, 1992)

$$\lg D = M - (5.9 + \lg L) \quad (\text{剩余标准差 } 0.574) \quad (2)$$

$$R = \frac{D}{S} \quad (3)$$

式中, R 为平均重复间隔, S 为段落平均位移速率 (Wallace, 1970).

表 1 中一些平均重复间隔数值的误差范围很大, 说明地震重复不符合准周期模型, 而可能符合丛集模型 (Sieh *et al.*, 1989; McCalpin, Nishenko, 1996). 对于丛集模型, 丛中重复间隔时间短, 视为“短周期”; 丛集间隔时间长, 视为“长周期”. 可通过古地震时间分布判

表 1 活动断裂定量参数一览表

| 断裂编号 | 断裂名称 | 段落名称 | 段落长度/km | 平均滑动速率/mm·a ⁻¹ | 速率精度 | 古地震期次 | 古地震平均重复间隔/a | 同震位移量/m | 最晚活动时间(或离逝时间) | 古地震精度 |
|------|---------------|------|---------|---------------------------|------|-------|-------------|---------|--------------------------------|-------|
| 1 | 万全盆地 北缘 | 北段 | 8 | | | | | | Q ₂ | |
| | | 南段 | 12 | 0.08 | C | | | | 晚于 28300 年 B.P | |
| 2 | 怀安盆地 北缘 | 东段 | 16 | 0.21 | B | 1 | | 3.8 | 早于 5140 年 B.P | B |
| | | 中段 | 13 | | | | | | Q ₃ | |
| | | 西段 | 14 | | | | | | Q ₂ | |
| 3 | 花山盆地 北缘 | | 8.5 | | | | | | Q ₃ | |
| 4 | 天镇盆地 北缘 | 西段 | 34 | 0.34 | A | 5 | 2584±2216 | | 7972±85 年 | A |
| | | 东段 | 24 | 0.24 | B | 4 | 2896±1354 | 4.3 | 6007±95 年 | B |
| 5 | 阳原盆地 北缘 | 西段 | 24 | | | | | | Q ₂ | |
| | | 中段 | 29 | 0.14 | B | 1 | | | 晚于 19370 年 B.P | B |
| | | 东段 | 10 | 0.02 | C | | | 2.6 | Q ₃ ~Q ₁ | |
| 6 | 阳原盆地 南缘 | A 段 | 25 | 0.44 | A | 5 | 4080±1837 | 1.5± | 3900±100 年 | A |
| | | B 段 | 17 | 0.37 | A | 4 | 3065±1594 | 2± | 6650±50 年 | A |
| 8 | 蔚县盆地 南缘 | 西段 | 10 | | C | | | | Q ₂ | |
| | | 中西段 | 26 | 0.46 | B | | | | Q ₃ | |
| | | 中段 | 38 | 0.43 | A | | | | 晚于 51400 年 B.P | |
| | | 中东段 | 24 | 0.69 | B | 1 | | | >2.2 | |
| | | 东段 | 14 | | B | | | | 8050~7750 年 | A |
| 9 | 灵丘盆地 南缘 | 西段 | 8 | | | | | | Q ₂ | |
| | | 中段 | 20 | 0.26 | C | | | | Q ₂ | |
| | | 东段 | 9 | | | | | | 1626 年 7 级地震? | |
| 11 | 怀涿盆地 北缘 | 西黄段 | 17.5 | 0.5 | A | 4 | 9400±1892 | 2 | 1720 年 6 1/4 级地震? | A |
| | | 黄西段 | 8.5 | 0.3 | B | | | | Q ₃ | |
| | | 西鸡段 | 6.5 | 0.29 | A | | | | Q ₃ | |
| | | 棘隆段 | 8 | 0.45 | A | 4 | 11273±5785 | 1.7 | 2880±75 年 | A |
| | | 沈长段 | 15 | 0.43 | A | 6 | 6980±4487 | 2± | 4400±900 年 | A |
| 12 | 延庆-矾山 盆地北缘 | 营辛段 | 6 | 0.19 | B | 2 | 24270? | | 1483 年 6 1/4 级地震? | B |
| | | 辛韩段 | 19.5 | 0.35 | A | 3 | 6431±473 | 1.5~3.6 | 6599±155 年 | B |
| | | 韩方段 | 23 | 0.44 | A | 5 | 4646±1150 | 1.3~3.6 | 1484 年 6 1/4 级地震 | B |
| | | 方狼段 | 13.5 | 0.24 | A | 2 | 9350 | 0.8~3.6 | 4900±400 年 | B |
| | | 狼桑段 | 22 | 0.387 | A | 4 | 9096±4226 | 1~5.4 | 1337 年 6 1/2 级地震 | A |
| | | 燕水段 | 17.5 | 0.12 | A | 3 | 10775±178 | 0.8~2.2 | 10500±497 年 | A |
| 13 | 怀安镇盆地 南缘 | 西段 | 18 | | | | | | Q ₂ | |
| | | 东段 | 29 | 0.38 | B | | | | 晚于 15900 年 B.P | |
| 14 | 深井盆地南缘 | | 16 | 0.18 | B | | | | Q ₃ ~Q ₁ | |
| 15 | 宣化盆地南缘 | | 16 | 0.38 | A | 3 | 1615±360 | | 5310±440 年 | A |
| 16 | 桑干河 | | 32 | 0.36 | B | 1 | | >0.9 | 晚于 27500 年 B.P | |
| 19 | 孙庄子乌 龙沟 | 北段 | 67 | 0.09 | B | | | | 58500~34400 年 | |
| | | 南段 | 48 | 0.03 | B | | | | 早于 44000 年 B.P | |
| 24 | 洗马林 | 洗马林 | 16 | >0.1 | C | 1 | | | 1~1.5 | |
| 25 | 张家口 | 西段 | 15 | | | | | | 晚于 6020 年 B.P | B |
| | | 东段 | 15 | | | | | | 21900±1700 年 | |
| 26 | 新保安-沙城 | 新沙段 | 32 | 0.194 | A | 4 | 7643±401 | 1± | 1720 年 6 1/4 级地震? | A |

注: 表中一些平均重复间隔值误差范围较大, 原因后文将阐述, 离逝时间由最新断错地层和未断错地层的样品测年结果控制, 早于或晚于某一时间的数据为仅有上限或下限年代控制, 其精度较差, 对消逝率的计算有影响. 这一误差将转移到后文的消逝率精度上, 然后在综合评分中用权重的办法给予降低.

断潜在发震段落现在处于长或短周期复发阶段. 所处阶段的平均重复间隔即趋势重复间隔, 可由式 4 计算(冉勇康, 邓起东, 1999).

$$T_{av1} = \frac{1}{n} \sum_i^n R_{1i} \quad (i = a, b, \dots, n) \quad (4a)$$

$$T_{av2} = \frac{1}{n} \sum_i^n R_{2i} \quad (i = a, b, \dots, n) \quad (4b)$$

式中, T_{av1} 代表 $R_{1a}, R_{1b} \dots$ 的平均值, 表示短周期的平均重复间隔; T_{av2} 代表 R_{2a}, R_{2b}, \dots 的平均值, 表示长周期的平均重复间隔. 最后, 按计算的消逝率值大小划分 A, B, C, D 级危险段落.

2) 段落的地震危险性概率分析. 依据 NB 模型的建模思想, 利用京西北地区的活动构造资料, 建立概率模型(陈立春, 冉勇康, 2001). 用新建立的京西北模型和 NB 模型分析每一个段落的累积概率

$$f(T) = \frac{1}{0.2464 \times \sqrt{2\pi T_a}} \exp\left[\frac{-(T/T_a - 1.0003)^2}{2 \times 0.2464^2}\right] \quad (5)$$

式中, $f(T)$ 为概率密度函数; T_a 为平均复发间隔; T 为离逝时间.

理论上条件概率更适合于活动断裂地震潜势的定量评估, 但对于京西北盆岭构造区, 计算条件概率存在一个问题: 我们要预测的未来时段 Δt 一般是 30 年或者 50 年, 而断裂强震复发间隔 T_a 往往是几百年、几千年, 这样, 在条件概率计算公式中, 分子的两项近似相等或者对小数位数过于敏感, 因此, 计算条件概率意义不大. 考虑到累积概率至少已能大致反映各断裂段落的地震危险性, 故只计算各断裂段落自最后一次强震事件累积到 2000 年的累积概率.

3) 考虑综合因素的危险性评分. 为降低活动构造资料不确定性、区域构造活动趋势和断裂相互作用对强震发生的影响, 采用综合评分方法评价未来强震最可能发生的地点. 这里的“综合”包括如下因子: 计算的段落消逝率、危险度精度、段落所属断裂的总体活动水平、区域构造带的活动水平、区域强震活动趋势(M 大于 6 的历史地震释放)等. 首先根据各个 A 和 B 级段落危险区的消逝率, 赋予它们不同的分值, 其它各因子根据具体情况加或减分, 分值最高的段落为最危险段落(由于累积概率的计算结果与消逝率方法计算结果一致, 不单独赋分). 赋分原则为:

消逝率: $0.5 \sim 0.7 = 8$ 分; $0.71 \sim 0.99 = 9$ 分; $1 \sim 1.3 = 10$ 分; $1.39 \sim 1.6 = 11$ 分; $1.61 \sim 2 = 12$ 分; $2.1 \sim 2.5 = 13$ 分; $2.51 \sim 2.99 = 14$ 分; $> 3 = 15$ 分. 消逝率为不定数的, 可信度差, 故最大取值不超过 13 分.

消逝率精度: 为减小由于断层最后一次事件年代误差给消逝率带来的影响, 精度差的消逝率结果要减分: A 级减 0 分; B 级减 1 分; C 级减 3 分; D 级减 5 分. 古地震资料加 1 分.

段落活动水平: 速率 $\leq 0.5 \text{ mm/a}$ 减 1 分; $\leq 0.3 \text{ mm/a}$ 减 2 分; $\leq 0.1 \text{ mm/a}$ 减 3 分.

区域构造活动水平: 北西向构造带加 2 分; 北东向加 1 分; 近东西加 0 分.

段落位置发生过历史地震: $6 \sim 6.4$ 级减 2 分; $6.5 \sim 6.9$ 级减 5 分. 靠近震中的段落分别减 1 分和 3 分(表 6 中震级后加 f 者).

4) 圈定未来强震最可能发生的地点. 几个综合评分值较高的相邻段落视为一个未来

强震危险地点, 再通过分值排队比较出最危险地点.

3 评价结果

3.1 消逝率方法

对研究区内 18 条晚更新世以来活动断裂(不包括 3 条活动性弱或无资料的隐伏断裂)的 31 个晚更新世以来活动段落的计算结果列于表 2 和表 3 中. 表 2 由段落的平均位移速率推算强震的平均重复间隔时间, 再根据段落最后一次断错地表的离逝时间求消逝率. 表 3 根据古地震的实际重复间隔时间求取消逝率. 显然, 就有古地震资料的段落而言, 表 3 的可信度比表 2 大得多. 但是, 在研究区仅 7 条断裂的 16 个段落有较好的古地震研究, 覆盖面不全. 鉴于此, 表 2 是表 3 的补充. 在表 2 中, 如果 7 和 7.5 两个震级档所求得的消逝率存在一个级差, 那么段落长度小于 20 km 的取 7 级档的消逝率为该段落的危险度判定值; 其它取 7.5 级档消逝率为危险度判定值. 如果两个震级档的消逝率为两个级差, 则取中间级. 例如, 蔚县盆地南缘断裂的中段, 两个震级档的危险度为 A 和 C, 则取 B 为其危险度值.

根据表 2 和表 3 的计算结果和取值原则, 各段落的消逝率为: 16 个段落大于或等于 1, 为 A 级危险区, 已处于随时可能发震的阶段; 7 个段在 0.5~1 之间, 为 B 级危险区, 接近强震复发的时段; 5 个和 4 个段小于 0.5 和 0.1, 属 C 级和 D 级危险区.

3.2 概率方法

用京西北模型(陈立春, 冉勇康, 2001)和 NB 模型(Nishenko, Buland, 1987)评价京西北强震发生的累积概率—自最后一次强震事件累积到现在的发震概率. 对已得到古地震目录的断裂, 在累积概率的计算公式中代入各断裂段落的平均重复间隔和离逝时间, 即可得到各段落自最后一次事件至 2000 年的累积发震概率(表 4). 其中, F4 西段和 F11 沈长段分别以长间隔平均重复间隔、短间隔平均重复间隔计算. 对其它断裂, 则考虑估计的不同震级而分别计算, 即代入各断裂段落以位移速率推断的不同震级的重复间隔和离逝时间, 分别计算各段落自最后一次事件至 2000 年的累积发震概率(表 5).

累积概率计算结果, 京西北盆岭构造区未来可能发生强震的断裂段落有: 天镇—阳高盆地北缘断裂、阳原盆地南缘断裂、延庆盆地北缘断裂辛韩段、矾山盆地北缘断裂燕水段、宣化盆地南缘断裂. 这与从消逝率角度分析得到的结论是一致的.

3.3 综合评分及未来强震危险区

按上述原则, 危险段落的积分结果如表 6 所示. 最危险段落的次序为: 阳原盆地南缘断裂 B 段和 A 段; 延矾盆地的燕水段; 宣化盆地南缘断裂; 怀安镇南缘断裂东段; 阳高—天镇北缘断裂东段等段落. 另外, 阳原盆地至深井盆地的 4 个相邻段落是京西北最高积分区域, 其它还有 3 个次高积分区域(图 2). 因此, 依据危险性排队的原则, 未来京西北地区强震发生的危险程度依次为: 阳原—深井盆地为最危险区; 天镇—怀安镇—宣化盆地为次级危险区和万全—张家口、蔚县东北—矾山西南为更次危险区.

4 讨论

4.1 预测结果存在的问题

在上述的段落强震确定性方法和与时间相依的概率方法分析中, 存在预测结果与实际发生情况有较大差异的现象, 即一些段落的消逝率大于 1 和累积发震概率为 100%, 但是

表 2 基于位移速率推算的平均重复间隔的段落地震危险性评价

| 断裂 编号 | 断裂名称 | 段落 名称 | 同震位 移量 [*] /m | 由位移速率推断 的平均重复间隔 /a | | 最晚活动 时间(或 离逝时 间) | 发生 M7 的 消逝率 | 发生 M7.5 的 消逝率 | 危 险 性类 别 ^{**} | 精 度 *** |
|----------|-----------------|----------|------------------------------|--------------------------|--------|--------------------------------|-------------------|---------------------|---------------------------------|---------------|
| | | | | M7 | M7.5 | | | | | |
| 1 | 万全盆地北缘断裂 | 北段 | | | | Q ₂ | | | 0; 0 | |
| | | 南段 | 1 | 12500 | | ≤28300 年 | ≤2.26 | | A; 0 | C |
| 2 | 怀安盆地北缘断裂 | 东段 | 0.79; 3.8 | 3762 | 18095 | ≥5140 年 | ≤1.37 | ≥0.28 | A; C | C; C |
| | | 中段 | | | | Q ₃ | | | B; 0 | D |
| | | 西段 | | | | Q ₂ | | | 0; 0 | |
| 3 | 花山盆地北缘断裂 | | | | | Q ₃ | | | B; 0 | D |
| 4 | 天镇—阳高盆地北 缘断裂 | 西段 | 1.4; 2.8 | 4117 | 8235 | 7972 年 | 1.94 | 0.97 | A; B | A; A |
| | | 东段 | 0.84; 1.66 | 3500 | 6917 | 6007 年 | 1.72 | 0.87 | A; B | B; B |
| 5 | 阳原盆地北缘断裂 | 西段 | | | | Q ₂ | | | | |
| | | 中段 | 0.84; 2.6 | 6000 | 18571 | <19370 年 | 3.23 | 1.04 | A; A | C; B |
| | | 东段 | 1.26 | 63000 | | Q ₃ ~Q ₁ | <0.1 | | D; 0 | D |
| 6 | 阳原盆地南缘断裂 | A 段 | 0.84; 2± | 1909 | 4545 | 3900±100 年 | 2.04 | 0.86 | A; B | B; A |
| | | B 段 | 0.74; 1.5± | 2000 | 4054 | 6650±50 年 | 3.33 | 1.64 | A; A | B; A |
| 8 | 蔚县盆地南缘断裂 | 西段 | | | | Q ₂ | | | | |
| | | 中西段 | 0.84; 1.53 | 1826 | 3326 | Q ₃ | | | >1 | |
| | | 中段 | 0.84; 6.12 | 1953 | 14232 | >5095 年 | 2.60 | 0.36 | A; C | C; C |
| | | 中东段 | 0.84; >2.2 | 1217 | >3188 | 7904±154 年 | 6.49 | <2.48 | A; A | C; B |
| | | 东段 | | | | Q ₂ | | | | |
| 9 | 灵丘盆地南缘断裂 | 西段 | | | | Q ₂ | | | | |
| | | 中段 | 1.0±; 2.0 | 2941 | 5882 | AD1626 年 | 0.13 | 0.06 | C; D | A; B |
| | | 东段 | | | | Q ₂ | | | | |
| 11 | 怀涿盆地北缘断裂 | 西黄段 | 0.71; 2 | 1420 | 4000 | AD1720 年 | 0.2 | 0.07 | C; D | B; A |
| | | 黄西段 | | | | Q ₃ | | | | |
| | | 西鸡段 | | | | Q ₃ | | | | |
| | | 棘隆段 | 1.7; ? | 3778 | | 2880 年 | 0.76 | | B; 0 | A |
| | | 沈长段 | 2±; ? | 4651 | | 4400 年 | 0.95 | | B; 0 | A |
| 12 | 延庆-矾山盆地北 缘断裂 | 营辛段 | 2.1; ? | 11052 | | AD1484 年 | 0.05 | | D; 0 | B |
| | | 辛韩段 | 1.5; 3.6 | 4285 | 10285 | 6599 年 | 1.5 | 0.64 | A; B | A; A |
| | | 韩方段 | 1.3; 3.6 | 2955 | 8182 | AD1484 年 | 0.17 | 0.06 | C; D | A; A |
| | | 方狼段 | 0.8; 3.6 | 3333 | 15000 | 4900 年 | 1.47 | 0.33 | A; C | A; A |
| | | 狼桑段 | 1.0; 5.4 | 2632 | 14210 | AD1337 年 | 0.25 | 0.05 | C; D | A; A |
| | | 燕水段 | 0.8; 2.2 | 6667 | 18333 | 10500 年 | 1.57 | 0.57 | A; B | A; A |
| 13 | 怀安镇南缘断裂 | 西段 | | | | Q ₂ | | | | |
| | | 东段 | 0.84; 1.38 | 2210 | 3632 | <15900 年 | <7.19 | <4.38 | A; A | C; C |
| 14 | 深井盆地南缘断裂 | | 0.79; ? | 4389 | | Q ₃ ~Q ₁ | <2.28 | | A; 0 | D |
| 15 | 宣化盆地南缘断裂 | | 0.62; 1.92 | 1631 | 5052 | 5310 年 | 3.26 | 1.05 | A; A | A; A |
| 16 | 桑干河断裂 | | 0.84; >0.9 | 2333 | >2500 | <27500 年 | <11 | <11 | A; A | D; D |
| 19 | 孙庄子—乌龙沟 断裂 | 北段 | ?; 2.37 | | 26333 | 46450±12050 年 | | | 0; A | 0; C |
| | | 南段 | ?; 3.72 | | 124000 | 44000 年 | | | 0; C | 0; C |
| 24 | 洗马林断裂 | 洗马林 | 1; 1.5 | 10000 | 15000 | <6020 年 | <0.60 | <0.40 | B; C | C; C |
| 25 | 张家口断裂 | 西段 | | | | 21900±千年 | | | A; 0 | D |
| | | 东段 | | | | Q ₂ | | | | |
| 26 | 新保安—沙城断裂 | 新沙段 | 1.1±; ? | 5789 | | AD1720 年 | 0.05 | | D | A |

* 两个数字分别为 $M \approx 7$ 和 $M \approx 7.5$ 地震的同震位移量, 正体为实测值, 斜体为经验公式推算值

** 两个字母分别表示 $M \approx 7$ 和 $M \approx 7.5$ 地震的消逝率; A 级: 消逝率 ≥ 1 ; B 级: 消逝率 $\geq 0.5 \sim \leq 1$; C 级: 消逝率 $\geq 0.1 \sim \leq 0.5$; D 级: 消逝率 ≤ 0.1 ; 0 表示不存在

*** 两字母分别表示 $M \approx 7$ 和 $M \approx 7.5$ 地震的危险性评估精度; A 为所有参数实测, 并相对可靠; B 为有一项参数非实测; C 为有两项非实测参数或可靠性差; D 为 3 项以上非实测参数或可靠性差

表3 基于古地震重复趋势的段落地震危险性评价

| 断裂 编号 | 断裂 名称 | 段落 名称 | 古地震重 复 模 型及趋 势 [*] | 古地震平 均重 复 间 隔/a | 古地震趋 势重 复间 隔/a | 同震位移 量/m | 最晚活动时 间(或离 逝时间) | 消逝率 | 危 险 类 别 | 精 度 |
|----------|---------------------|----------|---|-----------------------------|-------------------------|-------------|-----------------------|------|------------------|--------|
| 4 | 天镇盆地 北缘断裂 | 西段 | 长短相间,长间隔 | 2584±2216 | 4471±484 | 1.4~2.8 | 7972年 | 1.78 | A | A |
| | | 东段 | 准周期 | 2896±1354 | | | 6007年 | 2.07 | A | B |
| 6 | 阳原盆地 南缘断裂 | A段 | 长短相间,长间隔 | 4080±1837 | 4962±626 | 2± | 3900±100年 | 0.79 | B | A |
| | | B段 | 长短相间,长间隔 | 3065±1594 | 6575±1680 | 1.5± | 6650±50年 | 1.01 | A | A |
| 9 | 灵丘盆地 南缘断裂 | 中段 | 准周期 | 3603±273 | | 1.0± | AD1626年 | 0.10 | C | B |
| 11 | 怀涿盆地 北缘断裂 | 西黄段 | 准周期 | 9400±1892 | | 2± | AD1720年 | 0.03 | D | A |
| | | 棘隆段 | 长短相间,短间隔 | 11273±5785 | 4950± | 1.7 | 2880年 | 0.58 | B | A |
| | | 沈长段 | 长短相间,长间隔 | 6980±4487 | 9833±3109 | 2± | 4400年 | 0.45 | C | A |
| 12 | 延庆-硤 山盆地北 缘断裂 | 营辛段 | 准周期 | 24270? | | | AD1484年 | 0.02 | D | C |
| | | 辛韩段 | 准周期 | 6431±473 | | 1.5~3.6 | 6599年 | 1.03 | A | B |
| | | 韩方段 | 准周期 | 4646±1150 | | 1.3~3.6 | AD1484年 | 0.11 | C | A |
| | | 方狼段 | 准周期 | 9350 | | 0.8~3.6 | 4900年 | 0.52 | B | B |
| | | 狼桑段 | 长短相间,短间隔 | 9096±4226 | 6669±432 | 1.0~5.4 | AD1337年 | 0.10 | C | A |
| | | 燕水段 | 准周期 | 10775±178 | | 0.8~2.2 | 10500年 | ≈1 | A | A |
| 15 | 宣化盆地 南缘断裂 | | 长短相间,长间隔 | 1615±360(短) | >5310 | 0.62~1.92 | 5310年 | >1 | A | B |
| 26 | 新保安- 沙城断裂 | 新沙段 | 准周期 | 7643±401 | | 1.1± | AD1720年 | 0.04 | D | A |

* 模型判定据冉勇康(1997)

** A级: 消逝率 ≥ 1 表示已到或超过了强震复发期, 为最危险段落; B级: 消逝率 $\geq 0.5 \sim \leq 1$, 表示接近强震复发期, 为危险段落; C级: 消逝率 $\geq 0.1 \sim \leq 0.5$, 表示不到复发危险期; D级: 消逝率 ≤ 0.1 表示远离复发危险期

*** A为所有参数实测, 有两个以上探槽限定事件; B为有一项参数可靠性差或事件仅为一个探槽限定; C为有两项非实测参数或可靠性差

表4 基于古地震趋势重复间隔的段落概率地震危险性评价

| 断裂 编号 | 断裂名称 | 段落 名称 | 平均重 复 间 隔/a | 重复间隔 中位数 | 最晚活动时间 (或离逝时间) | 累积概率 | |
|----------|-----------------|----------|----------------------|-------------|-------------------|--------|--------|
| | | | | | | 京西北模型 | NB模型 |
| 4 | 天镇-阳高盆地北 缘断裂 | 西段 | 长 4471 | 4413 | 7972年 | 99.94% | 99.76% |
| | | 短 697 | | 688 | | 100% | 100% |
| 6 | 阳原盆地南缘断裂 | 东段 | 2836 | 2799 | 6007年 | 100% | 99.99% |
| | | A段 | 4080 | 4027 | 3900±100年 | 44.81% | 48.28% |
| 9 | 灵丘盆地南缘断裂 | B段 | 3065 | 3025 | 6650±50年 | 100% | 99.99% |
| | | 中段 | 3603 | 3556 | AD1626年 | 0.01% | 0 |
| 11 | 怀涿盆地北缘断裂 | 沈长段 | 长 13350 | 13176 | 4400年 | 0.34% | 0 |
| | | 短 2700 | | 2665 | | 99.57% | 99.25% |
| | | 棘隆段 | 12570 | 12406 | 2880年 | 0.09% | 0 |
| | | 西黄段 | 8600 | 8488 | AD1720年 | 0% | 0 |
| | | 方狼段 | 7475 | 7378 | 4900年 | 8.50% | 3.52% |
| | | 辛韩段 | 4846 | 4783 | AD1484年 | 0.01% | 0 |
| 12 | 延庆-硤山盆地 北缘断裂 | 燕水段 | 6626 | 6540 | 6599年 | 50.51% | 54.92% |
| | | 狼桑段 | 10900 | 10758 | 10500年 | 44.77% | 48.23% |
| | | 1594 | | | AD1337年 | 0.01% | 0 |
| | | 1615 | | | 5310年 | 100% | 100% |
| 15 | 宣化盆地南缘断裂 | 新沙段 | 7658 | 7558 | AD1720年 | 0% | 0 |
| 26 | 新保安-沙城断裂 | | | | | | |

表 5 基于位移速率推算的平均重复间隔的段落概率地震危险性评价

| 断裂 编号 | 断裂名称 | 段落 名称 | 位移速率推断的 平均重复间隔/a | | 最晚活动时间 (或离逝时间) | M7 累积概率 | | M7.5 累积概率 | |
|----------|-----------|----------|---------------------|----------|---------------------|-----------|----------|-----------|----------|
| | | | M7 | M7.5 | | 京西北 模型 | NB 模型 | 京西北 模型 | NB 模型 |
| 1 | 万全盆地北缘断裂 | 南段 | 12500 | | ≤ 28300 年 | 100% | 100% | | |
| 2 | 怀安盆地北缘断裂 | 东段 | 3762 | 18095 | ≥ 5140 年 | 93.1% | 93.3% | 0.2% | 0 |
| 5 | 阳原盆地北缘断裂 | 中段 | 6000 | 18571 | < 19370 年 | 100% | 100% | 56.9% | 59.6% |
| 8 | 蔚县盆地南缘断裂 | 中段 | 1953 | 14232 | > 5095 年 | 100% | 100% | 0.5% | 0 |
| | | 中东段 | 1217 | > 3188 | 7904 ± 154 年 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 13 | 怀安镇南缘断裂 | 东段 | 2210 | 3632 | < 15900 年 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 16 | 桑干河断裂 | | 2333 | > 2500 | < 27500 年 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 19 | 孙庄子—乌龙沟断裂 | 北段 | | 26333 | 46450 ± 12050 年 | | | 99.9% | 99.6% |
| | | 南段 | | 124000 | 44000 年 | | | 0.4% | 0 |
| 24 | 洗马林断裂 | 洗马林 | 10000 | 15000 | < 6020 年 | 5.3% | 1.0% | 0.8% | 0 |

表 6 京西北地区地震危险段落综合评分

| 断裂 编号 | 断裂名称 | 段落 名称 | 段落长 度/km | 段落平均滑动 速率/mm. a ⁻¹ | 消逝率 | 危险性 类别 | 精度 | 历史地 震(M) | 综合 积分 |
|----------|---------------|----------|-------------|----------------------------------|-------------|-----------|----|-------------|----------|
| 1 | 万全盆地北缘 | 南段 | 12 | 0.08 | ≤ 2.26 | A | C | | 8 |
| 2 | 怀安盆地北缘 | 东段 | 16 | 0.21 | ≤ 1.37 | A | C | 6.2f | 5 |
| 4 | 天镇—阳高盆地 北缘 | 西段 | 34 | 0.34 | 1.78 | A | A | 6.5 | 7 |
| | | 东段 | 24 | 0.24 | 2.07 | A | B | 6.5f | 8 |
| 5 | 阳原盆地北缘 | 中段 | 29 | 0.14 | 1.04 | A | B | | 8 |
| 6 | 阳原盆地南缘 | A 段 | 25 | 0.44 | 0.79 | B | A | | 10 |
| | | B 段 | 17 | 0.37 | 1.01 | A | A | | 11 |
| 8 | 蔚县盆地南缘 | 中西段 | 26 | 0.46 | > 1 | A | D | | 5 |
| | | 中段 | 38 | 0.43 | 0.92* | B | C | 6.5 | 1 |
| | | 中东段 | 24 | 0.69 | < 2.48 | A | B | 6.5f | 9 |
| 11 | 怀涿盆地北缘 | 棘隆段 | 8 | 0.45 | 0.58 | B | A | 6.5f | 6 |
| 12 | 延庆—矾山盆地 北缘 | 辛韩段 | 19.5 | 0.35 | 1.03 | A | B | 6.7f | 7 |
| | | 狼方段 | 13.5 | 0.24 | 0.52 | B | B | 6.5 | 4 |
| | | 燕水段 | 17.5 | 0.12 | 1 | A | A | | 10 |
| 13 | 怀安镇南缘 | 东段 | 29 | 0.38 | < 4.38 | A | C | | 9 |
| 14 | 深井盆地南缘 | | 16 | 0.18 | < 2.28 | A | D | | 6 |
| 15 | 宣化盆地南缘 | | 16 | 0.38 | > 1 | A | A | | 10 |
| 16 | 桑干河断裂 | | 32 | 0.36 | < 11 | A | D | 6.5f | 4 |
| 19 | 孙庄子—乌龙沟 | 北段 | 67 | 0.09 | 1.76 | A | C | | 6 |
| 24 | 洗马林 | | 16 | > 1 | < 0.6 | B | C | | 5 |
| 25 | 张家口 | 西段 | 15 | | 1~2 | A | D | | 7? |

* 该值由两个震级档消逝率加权平均获得

强震并没有发生. 从理论上讲, 出现这种现象存在两种可能性: 其一, 活动构造的定量资料存在不确定性, 导致预测结果的误差; 其二, 这种现象本身暗示着构造活动的某种特征, 而现行重复模型不能很好地模拟断裂实际的重复特征. 在前面的活动构造资料精度的分析中已明确了活动构造定量资料存在不确定性和不完整性, 显然, 第一因素导致的预测误差

是不可否认的。而第二因素的影响同样也是存在的。

图3为研究区有较好古地震资料的断裂的古地震时空分布。显然, 距今27640年以来可以明确地划分出4个活跃期和相应的平静期。早期两个活跃期的古地震平均重复间隔时间为 423 ± 165 年和 424 ± 215 年, 后两个活跃期古地震平均重复间隔时间为 214 ± 215 年和 234 ± 231 年; 平静期的平均重复间隔则由早至晚分别为 1233 ± 1023 、 1085 ± 256 、 1032 ± 564 和 1006 ± 858 年。早期的古地震事件存在遗漏较多的可能性, 因此可以认为, 活跃期的古地震重复间隔为200余年, 平静期为1000余年, 二者相差约5倍(图3)。另外, 活跃期和平静期的持续时间也存在一定规律性, 即平静期持续时间比活跃期长出约1/3。前3个活跃的持续时间为2540、2120和2425年, 平静期持续时间为3700、3255和3095年; 后一个活跃期为5605年, 而后一个平静期开始于距今4900年以来。若认为平静期应比相应活跃期长, 那么目前该研究区域还处在构造活动平静期以内。这可能是一些高消逝率和高概率段落未发震的主要原因。

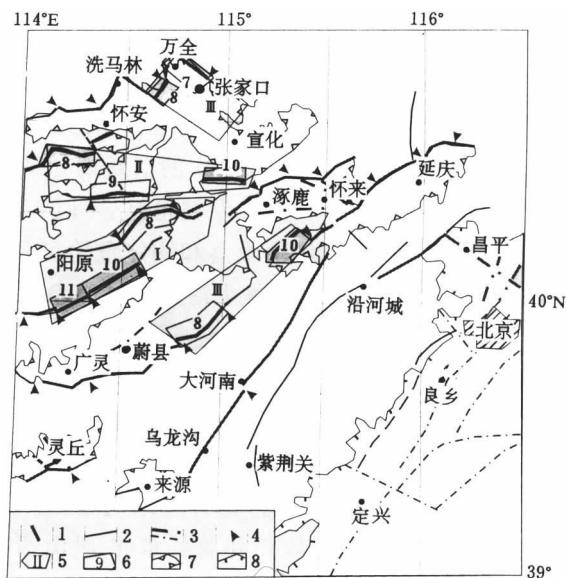


图2 京西北活动断裂地震危险性预测示意图

1.晚更新世以来活动的断裂; 2.第四纪早中期活动的断裂; 3.隐伏断裂; 4.断裂分段标志; 5.几个段落组成的危险区, 罗马字母数越小的区域越危险; 6.危险段落, 阿拉伯数字越大危险程度越高; 7.盆地边界, 三角在盆地一侧; 8.北京平原的边界, 小棒在平原一侧

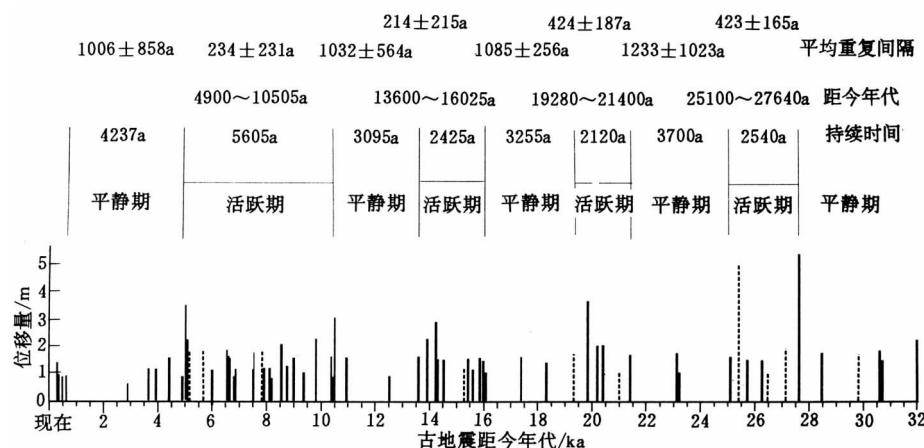


图3 京西北地区区域古地震重复特征

4.2 预测结果的意义

尽管由消逝率和概率方法预测的结果存在问题,但通过综合因素评分,而不是直接运用前二者的预测结果,理论上还是可行的。我们要评价的只是强震发生的地点,活动构造定量资料的不确定性对预测时间的影响已被淡化。如果承认地震活动具有分形特征,即承认京西北地震重复存在不同层次的活跃期和平静期,那么一些高消逝率和高概率段落未在准周期框架下的发震时间未发震也是合理的。综合评分通过降低不确定性的影响,以系统误差的状况排队比较危险段落和圈定危险区,是目前资料条件下的现实办法。预测结果对从其它角度讨论未来强震发生潜势有重要参考价值。

5 结论

京西北盆岭构造区未来强震最危险的段落次序为:阳原盆地南缘断裂B段和A段;延庆盆地的燕水段;宣化盆地南缘断裂;怀安镇南缘断裂东段;阳高一天镇北缘断裂东段等段落。其中最危险区为阳原-深井盆地危险区;次级危险区为天镇-怀安镇-宣化盆地危险区;再次危险区为万全-张家口和蔚县东北-矾山西南危险区。预测结果随资料的增加和方法的改进而可能调整。

参 考 文 献

- 陈立春,冉勇康。2001. 京西北盆岭构造区强震复发概率模型及地震潜势定量评估[J]. 地震地质(待发表)
- 邓起东,于党华,叶文华。1992. 地质地表破裂参数与震级关系的研究[A]. 见:《活动断裂研究》编委会编. 活动断裂研究(2)[C]. 北京:地震出版社, 247~263
- 段瑞涛。1994. 阳原盆地及邻近地区活动断裂与地震危险性研究[D][学位论文]. 中国地震局地质研究所, 1~85
- 方仲景,郑炳华,段瑞涛。1995. 晋冀北地区的活动断裂及其与地震相关性的研究[A]. 见:中国地震局地质研究所编. 地震危险性预测研究(1995年度)[C]. 北京:地震出版社, 91~101
- 毛凤英,张培震。1995. 古地震研究的逐次限定法与新疆北部主要断裂带的古地震研究[A]. 见:《活动断裂研究》编委会编. 活动断裂研究(4)[C]. 北京:地震出版社, 153~164
- 冉勇康,邓起东。1999. 大地震重复特征与平均重复间隔的取值问题[J]. 地震地质, 21(4): 316~323
- 冉勇康,方仲景,李志义,等。1991. 怀来-涿鹿盆地周缘的活动断裂及其基本特征[A]. 见:《活动断裂研究》编委会编. 活动断裂研究(1)[C]. 北京:地震出版社, 140~155
- 冉勇康,方仲景,李志义,等。1992. 怀来-涿鹿盆地北缘断裂上的古地震重复序列与断裂分段[J]. 中国地震, 8(3): 74~85
- 冉勇康,方仲景,王景钵,等。1995. 怀来东园村砖瓦厂北西向断层大剖面[A]. 见:《活动断裂研究》编委会编. 活动断裂研究(4)[C]. 北京:地震出版社, 116~122
- 松田时彦。1981. 日本活断层和破坏性地震——强震分区和警告断裂层带. 见[苏]N E 古宾, [日]松田时彦著, 沈德富等译. 活断层研究. 北京:地震出版社, 152~161
- 闻学泽。1995. 活动断裂地震潜势的定量评估[M]. 北京:地震出版社, 1~150
- 闻学泽。1999. 中国大陆活动断裂段破裂地震复发间隔的经验分布[J]. 地震学报, 21(6): 616~622
- 徐锡伟。1998. 山西高原恒山和六棱山西北缘断裂的运动学基本特征及其地震危险性评估[A]. 见:《活动断裂研究》编委会编. 活动断裂研究(6). 北京:地震出版社, 74~87
- 伊功明,徐锡伟,孙瑛杰,等。1997. 河北省阳原六棱山北麓断裂古地震年代学的初步研究[J]. 中国地震, 13(1): 18~26
- 张培震,毛凤英。1996. 活动断裂定量研究与中长期强地震危险性概率评价. 见:《活动断裂研究》编委会编. 活动断裂研究(5). 北京:地震出版社, 12~31
- McCalpin J, Nishenko S P. 1996. Holocene paleoseismicity, temporal clustering, and probabilities of future large($M > 7$)

- earthquakes on the Wasatch fault zone, Utah[J]. *J Geophys Res*, **101**(B3): 6 233~6 253
- Nishenko S P, Buland R. 1987. A general recurrence interval distribution for earthquake forecasting[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **77**(4): 1 382~1 399
- Savage J C, Cockerham R S. 1987. Quasi-periodic occurrence of earthquakes in the 1978~1986 Bishop-Mammoth Lakes Sequence, eastern California[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **77**(4): 1 347~1 358
- Schwartz D P, Coppersmith K J. 1984. Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones[J]. *J Geophys Res*, **90**: 5 681~5 698
- Shimazaki, Nakata. 1980. Time-predictable recurrence model for large earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **7**: 279~282
- Sieh K E, Stuiver, M, Brillinger D. 1989. A more precise chronology of earthquakes produced by the San Andreas fault in southern California[J]. *J Geophys Res*, **94**: 603~623
- Wallace R E. 1970. Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault[J]. *Geol Soc Amer Bull*, **81**: 2 875~2 890

QUANTITATIVE DATA ABOUT ACTIVE TECTONICS AND POSSIBLE LOCATIONS OF STRONG EARTHQUAKES IN THE FUTURE IN NORTHWEST BEIJING

Ran Yongkang Chen Lichun Xu Xiwei

(Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China)

Abstract: Deterministic, probabilistic and composite-grading methods are used to get the possible locations of strong earthquakes in the future in Northwest Beijing and its vicinity based on the quantitative data and their accuracy about active tectonics in the research area and by ordering, some questions in the results are also discussed. It shows that the most dangerous fault segments for strong earthquakes in the future include: segments B and A of the southern boundary fault of the Yangyuan basin, the southern boundary fault of the Xuanhua basin, the east segment of the southern Huai'an fault and the east segment of the northern Yanggao-Tianzhen fault. The most dangerous area is Yangyuan-Shenjing basin, the second one is Tianzhen-Huai'an-Xuanhua basin and the third dangerous areas are Wan-quan-Zhangjiakou and northeast of Yuxian to southwest of Fanshan.

Key words: Northwest Beijing; quantitative data of active tectonics; composite method; locations of strong earthquakes