

文章编号: 0253-3782(2002)01-0050-07

华北地区强震时空相关性特征分析^{*}

裴 韬¹⁾ 周成虎¹⁾ 李全林²⁾ 陈锦标²⁾

1) 中国北京 100101 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室

2) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

摘要 通过提出时空比例系数 f_{ts} , 从而引入时空距离这一概念, 并因此将地震事件的时空属性耦合在一起. 借助时空距离概念, 对华北地区公元 1500 年以来的强震对进行了时空相关性分析. 结果表明, 当 f_{ts} 取 10 km/a 时, 强震对沿时空距离轴大致分为两类: 时空距离小于 140 km 的强震对彼此具有一定成因关系; 而相距 280 km 以上的强震则为互相独立的地震事件. 该特征可为华北地区强震迁移规律的总结以及趋势预测提供参考.

关键词 华北 相邻强震对 时空距离

中图分类号: P315.08 **文献标识码:** A

引言

强震的时空分布统计特征反映了强震的孕震机理和迁移规律, 是地震趋势预测的重要依据. 近年来该领域内虽已取得不少进展, 但仍存在一些争议.

在强震发生的时间方面, 不少学者认为强震应该视作独立的概率事件, 其发生符合泊松分布, 并提出了多种预报模型, 如平稳泊松模型、分段泊松模型、复合泊松模型等等(王炜, 1987; 王炜, 刘震华, 1987; 胡聿贤, 1990); 而另一种观点则认为, 强震的发生在时间上表现出韵律特征, 并可按照其丛聚性分为地震期和地震幕. 例如, 对于华北地区的强震, 一些学者提出了不同的地震期和地震幕划分方案(马宗晋等, 1982; 傅征祥, 程燕, 1986; 张国民, 傅征祥, 1985; 张国民, 1987; 陆远忠等, 1990).

在强震的空间分布方面, 较早的文献主要针对我国强震的分区和分带进行探讨. 近年的研究借助 GIS、模式识别等技术着重对不同区域内隐含的强震分布格局、模式进行提取和分析(傅征祥, 姜立新, 1997; 杨丽萍等, 2000; 童远林, 2000), 从而为地震的趋势预测提供参考信息. 强震空间分布研究的另一个重点就是关于强震之间的统计相关性. 不少成果显示, 强震之间的相关性与它们之间的距离存在一定的统计关系(王炜等, 1989; 赵根模, 刁桂苓, 1997; Amorese *et al.*, 1999; Kagan, Knopoff, 1980).

由于地震是集时空强属性于一体的点过程数据, 故将时空属性分开讨论的作法已无法满足深入研究的需要, 近年来的成果已显示出时空属性结合的发展趋势. 例如, 对强震之间呼应关系的研究、强震的迁移规律研究等等(Kafka, Levin, 2000; 闻学泽等, 1989; 傅征

^{*} 中国科学院知识创新项目(CXI0G-D00-06 和 KZCX1-Y-02)资助.
2000-11-22 收到初稿, 2001-10-10 收到修改稿, 2001-11-28 决定采用.

祥, 1997; Eneva Hamburger, 1989). Bethoux 等(1998)利用小波分析研究仪器地震的时空分布模式. Kagan 和 Jackson(1999)将地震的时空属性结合起来, 对世界范围内特大地震(矩震级 $M_w \geq 7.5$)的时空分布进行统计后发现, 全球尤其是环太平洋地震带上的特大地震在时空范围内彼此接近(距离小于 100 km, 时间小于 20 年)的比例高达 22%, 并据此对原有的强震时空分布模式提出了质疑.

从上面总结的研究现状看, 时空属性的结合虽然已成为研究的趋势, 但目前的绝大多数研究仍未能将时空属性耦合在统一的概念中, 因此, 强震的时空相关性分析大多还是采取分开处理、综合解释的作法.

本文试图根据地震序列的时空作用域范围而引进时空比例系数 f_{TS} , 从而通过时空距离这一概念将地震事件的时空属性耦合在一起. 由于强震的发生可以反映出孕震区构造活动以及应力集中、释放和调整的状态, 而时间上相邻的强震所组成的强震对(以下简称为强震对)则可体现出上述状态的连续变化. 因此, 本文以华北地区的强震数据为研究对象, 借助时空距离概念, 着重对时间上相邻强震之间的时空距离进行统计分析, 试图揭示相邻强震之间的时空制约和相关特征, 为华北地区强震迁移规律的总结以及活动趋势的预测提供一定依据.

1 华北地区的强震数据

在通常意义上, 华北地区大体上是指贺兰山以东, 燕山、阴山以南, 秦岭-大别以北以及黄海以西的地区, 构造上属于华北板块. 然而在地震资料的使用上也有不少研究者采用了“大华北”的概念, 即向西包括了鄂尔多斯地台以及银川-河套断陷盆地; 向东扩展到黄海、渤海等区域. 其主要依据是: 鄂尔多斯地台的西缘属于南北地震带的北段, 是我国东西构造应力场以及地震分区的界线, 而黄海、渤海的部分地区又与华北地区处在同一构造环境中. 笔者基于研究的系统性以及数据完整性的考虑, 将“大华北”(34°~42°N, 105°~126°E)地区作为研究区(以下仍简称为华北地区), 进行强震的时空特征分析.

华北地区由于受到来自东部太平洋板块和西部青藏块体的挤压, 成为我国东部地震活动最强烈、最频繁的地震区, 其应力状况和地震时空分布具有与其它地震区不同的特征.

由于该区在历史上一直是我国经济和文化较发达的地区, 因而也是历史地震记录和保存最完整的地区. 笔者选取华北及邻区公元 1500 年以来大于等于 6.5 级的强震共 46 条作为研究数据, 其空间分布见图 1.

据黄玮琼等(1994)文章, 华北地区 1484 年以来大于等于 4.7 级的地震记录基本完整, 因此, 笔者所选取的强震目录不应存在遗漏. 在所选取的数据中, 6.5~6.9 级地震 22 条, 7.0~7.9 级地震 18 条, 8.0 级以上的地震 6 条. 其数据列于表 1.

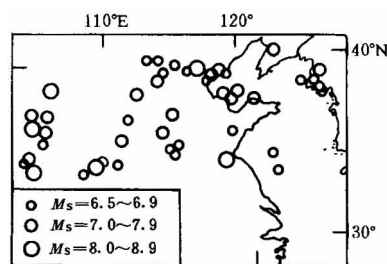


图 1 华北及邻区公元 1500 年以来强震($M \geq 6.5$)分布图

表 1 华北及邻区公元 1500 年以来 $M \geq 6.5$ 的强震数据

序号	年份	λ_E	φ_N	M	序号	年份	λ_E	φ_N	M	序号	年份	λ_E	φ_N	M
1	1501	110.1	34.8	7.0	17	1668	118.5	34.8	8.5*	33	1920	105.8	36.7	8.6*
2	1502	115.3	35.7	6.5	18	1673	113.5	40.5	6.5	34	1920	105.5	36.6	7.0**
3	1548	121.0	38.0	7.0	19	1679	117.0	40.0	8.0	35	1921	106.0	35.9	6.5*
4	1556	109.7	34.5	8.3	20	1683	112.7	38.7	7.0	36	1937	115.1	35.4	6.8*
5	1561	106.2	37.5	7.3	21	1695	111.5	36.0	7.8	37	1937	115.2	35.3	6.7*
6	1568	109.0	34.4	6.8	22	1709	105.3	37.4	7.5	38	1952	125.5	39.0	6.5
7	1597	120.0	38.5	7.0	23	1718	105.2	35.0	7.5	39	1966	115.1	37.5	7.1*
8	1614	112.1	37.2	6.5	24	1720	115.5	40.4	6.8	40	1966	115.1	37.5	6.7**
9	1618	114.5	39.8	6.5	25	1730	116.2	40.0	6.5	41	1966	114.9	37.4	6.8*
10	1622	106.3	36.5	7.0	26	1739	106.5	38.8	8.0	42	1969	119.4	38.2	7.2
11	1624	118.8	39.5	6.5	27	1765	105.0	34.8	6.5	43	1975	122.8	40.7	7.3
12	1626	114.2	39.4	7.0	28	1815	111.2	34.8	6.8	44	1976	117.8	39.4	6.6*
13	1628	114.2	40.6	6.5	29	1830	114.3	36.4	7.5	45	1976	118.2	39.6	7.8**
14	1654	105.5	34.3	8.0	30	1879	122.0	34.0	6.5	46	1976	118.7	39.8	7.1*
15	1665	116.6	39.9	6.5	31	1888	119.0	38.5	7.5					
16	1668	119.2	35.6	6.8	32	1910	122.0	35.0	6.7					

注：* 代表成因上存在一定相关性的非独立地震事件对；** 代表同时属于两个强震对的强震。

2 华北地区强震对的时间相关性分析

首先对华北地区强震对的时间相关性进行分析，即对强震对($M \geq 6.5$ 和 $M \geq 7.0$)的时间跨度进行统计，其结果如图 2 所示。

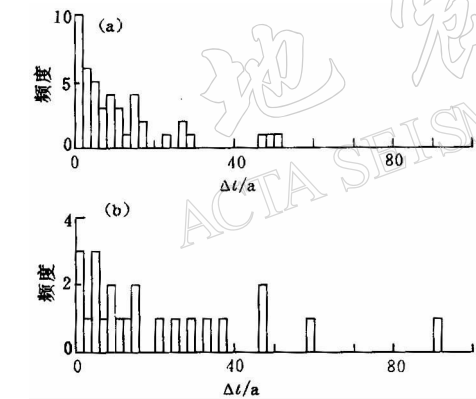


图 2 华北地区公元 1500 年以来强震对时间跨度统计直方图
(a) $M \geq 6.5$; (b) $M \geq 7.0$

在图 2a($M \geq 6.5$)中，时间跨度小于 20 年的强震对有 37 对，占 84.1%；时间跨度大于 20 年的强震对为 7 对，仅为 15.9%。对于 $M \geq 7.0$ 的强震(图 2b)，时间跨度小于 20 年的强震对有 14 对，占总数的 56%，而时间跨度大于 20 年的强震对为 9 对，占总数的 44%。

根据马宗晋等(1982)、傅征祥和姜立新(1997)等文章，华北地区地震活动存在 10~20 年尺度的群集特征，并且地震幕的时间跨度一般在 20 年以内。因此，该区强震对的时间跨度多数小于 20 年。由于这种单纯的时间相关性分析没有考虑空间属性，因而无法获得强震震中在空间位置上的变化信息。

3 华北地区强震对的空间相关性分析

在上述时间相关性研究的基础上，笔者对强震对的空间相关性进行了分析。其主要做法是，计算时间上相邻强震之间的空间距离(即强震对的空间跨度)，并进行统计，得到直方图 3。从图中可以看出，对于 $M \geq 6.5$ 的强震(图 3a)，在 0~1 200 km 的间隔范围内都有强震对分布，只是在 400 km 附近强震对数目相对集中一些。 $M \geq 7.0$ 的直方图(图 3b)与

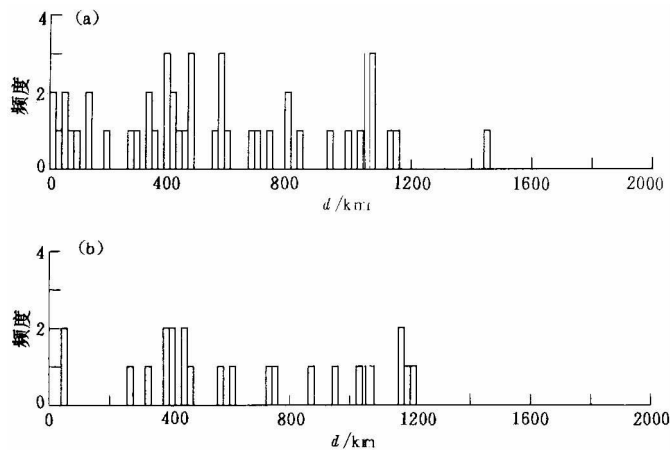


图3 华北地区公元1500年以来强震对空间跨度统计直方图
(a) $M \geq 6.5$; (b) $M \geq 7.0$

$M \geq 6.5$ 图所显示的结果比较类似, 在 400 km 附近强震对的密度较大.

从图3中并未发现强震空间分布的明显特征. 根据一般的认识, 强震的空间分布存在着两种趋势: 一种表现为相互间的“排斥”, 即一次强震发生之后, 在较长的一段时期内, 该孕震区发生强震的概率较小; 而另一种则相反, 表现为“丛聚”现象, 即在较短的时间和近距离范围内, 发生两次或两次以上孕震机制存在一定内在联系的强震, 这种现象多以双震或震群型地震序列的形式出现. 当然, 序列中强余震的发生也是原因之一.

由于本节仅从空间角度进行统计, 所以对于在空间轴上呈现出近似均匀分布的强震对, 我们很难发现其中的“排斥”以及“丛聚”特征, 因而也就无法为地震的趋势估计提供信息.

4 华北地区强震对的时空特征分析

在通常情况下, 地震相关性中所采用的参量一般为空间距离或时间间隔, 而很少将时空要素结合在一起. 本研究提出一种将时空要素结合在一起的时空距离计算公式

$$d_{ij}^* = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + [f_{ts} \cdot (t_i - t_j)]^2}$$

其中, x_i, y_j 为震中坐标; t_j 为发震时间, $i, j = 1, 2, \dots$; f_{ts} 为时空比例系数, 其单位为 km/a.

式中的 f_{ts} 是强震在时空三维空间作用域内的时空比例系数, 是将时空属性统一到高维空间的关键参数. 其取值必须以在时空高维空间内具有一定时空作用域的地震事件为参考, 通过时间与空间轴之间的比例关系来确定. 由于地震序列是在孕震机制上具有某种内在联系或具有共同发震构造的、在一定的空间范围和时间段内连续发生的一系列大小地震, 因而其时空作用范围可用于确定时空比例系数 f_{ts} . 本研究在确定系数 f_{ts} 的大小时, 将华北地区典型地震序列的空间范围长轴与余震持续时间之比作为参考.

本研究选取了华北的几个典型地震序列——邢台、唐山、海城和渤海地震序列. 其中, 邢台序列空间范围的长轴约为 110 km, 持续时间为 20 余年; 渤海序列空间范围的长轴约

为 98 km, 持续时间为 4~5 年; 海城序列空间范围的长轴为 70 km, 持续时间为 6~7 年; 唐山序列空间范围的长轴为 140 km, 持续时间为 5~6 年(吴开统等, 1990; 张肇诚, 1990a, b). 如果用序列空间范围的长轴比序列的持续时间, 则可以得到时空比例系数 f_{ts} . 根据上面所列的数据, 我国华北地区的时空比例系数 f_{ts} 应该在 5~30 km/a 之间. 本研究在计算 f_{ts} 时分别选取 5, 10, 20 km/a 进行了尝试. 计算结果如图 4 所示.

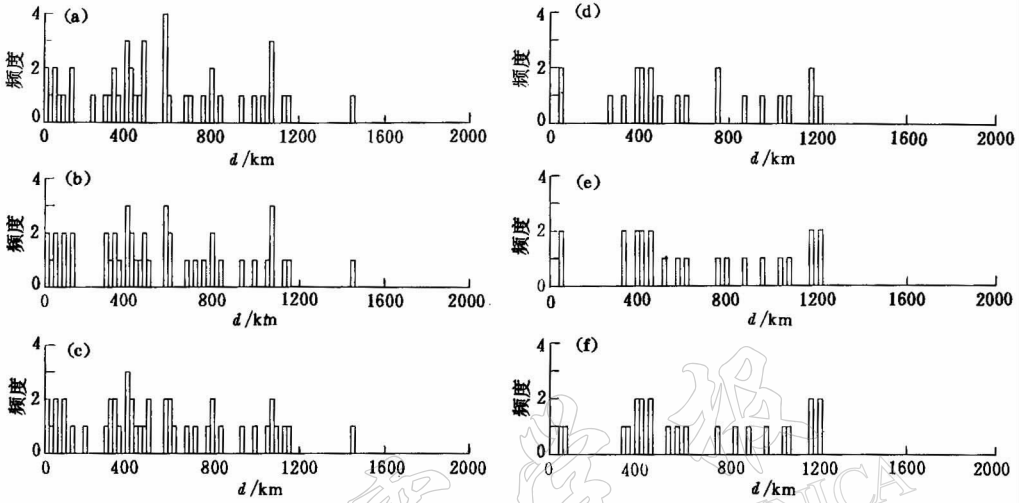


图 4 华北地区公元 1500 年以来强震对时空距离统计直方图

- (a) $M \geq 6.5$, $f_{ts} = 5 \text{ km/a}$; (d) $M \geq 7.0$, $f_{ts} = 5 \text{ km/a}$;
(b) $M \geq 6.5$, $f_{ts} = 10 \text{ km/a}$; (e) $M \geq 7.0$, $f_{ts} = 10 \text{ km/a}$;
(c) $M \geq 6.5$, $f_{ts} = 20 \text{ km/a}$; (f) $M \geq 7.0$, $f_{ts} = 20 \text{ km/a}$

图 4 左列为 $M \geq 6.5$ 时的计算结果. 在 f_{ts} 取 5 km/a 时(图 4a), 点对直方图的分异并不明显. 当 f_{ts} 取 10 km/a 时, 个别空间跨度较小而时间跨度较大的强震对向右偏移, 使得整个直方图沿时空距离轴明显分为两类, 两类之间明显存在 140 km 的空白区域.

为何会出现如此宽的空白区域? 经过逐一细致分析后发现, 时空距离小于 140 km 的强震对可认为是成因上存在一定相关性的非独立地震事件对(表 1 中带有星号的地震记录, 其中带有双星号的地震记录表示同时属于两个强震对的强震). 它们基本上处在同一构造带内, 发震的时间间隔较短, 孕震机制存在一定联系, 并多以震群、双震或余震的形式出现; 时空距离大于 280 km 的强震对可视作独立事件, 彼此之间不存在明显的成因联系. 当 f_{ts} 取 20 km/a 时(图 4c), 强震对又有相互混叠的趋势. 此外, 笔者还对华北地区 $M \geq 7$ 的强震进行了同样的计算, 结果如图 4 右列所示. 图中显示出与 $M \geq 6.5$ 较为类似的结果. 经过逐一分析, 在时空距离小于 100 km 的区域之内, 只分布有海城地震和其 7.0 级强余震, 以及唐山序列的双震; 而在时空距离大于 300 km 的范围里, 则主要为独立的强震事件.

5 讨论

从上面的结果可以看出, 单从时间或空间方面(一维或二维)的分析, 很难发现强震对之间相关性的变化规律, 而将时空要素同时考虑在时空距离公式之内, 进而从三维的角度

对强震对的相关性进行观察, 便可发现其明显的“分异”现象. 将时空要素联系在一起的關鍵是引入时空比例因子 f_{ts} . 经过粗略地估计, 华北地区 f_{ts} 的取值应在 5~30 km/a 之间.

对华北地区公元 1500 年以来的强震对进行统计后发现以下规律: 当 f_{ts} 取 10 km/a 时, 强震对沿时空距离轴可明显地分为两类: 时空距离小于 140 km 的相邻强震对, 它们之间具有一定成因联系, 并以双震、震群以及强余震等形式出现; 而相距 280 km 以上的强震对, 则大多为独立的强震事件.

参 考 文 献

- 傅征祥, 程燕. 1986. 中国大陆近代幕式地震活动的某些特征[J]. 地震, 6(2): 28~35
- 傅征祥, 姜立新. 1997. 中国大陆及邻区大尺度浅源强震空间分布的不均匀性及其板块耦合机制[J]. 中国地震, 13(1): 1~10
- 傅征祥. 1997. 中国大陆地震活动性力学研究[M]. 北京: 地震出版社, 113~162
- 胡聿贤. 1990. 地震危险性分析中的综合概率法[M]. 北京: 地震出版社, 1~8
- 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[J]. 地震学报, 16(4): 423~432
- 陆远忠, 郑兆苾, 陈宇卫, 等. 1990. 我国大陆强震活动的分期及趋势预测[A]. 见: 国家地震局分析预报中心编. 中国地震大形式预测研究[C]. 北京: 地震出版社, 34~49
- 马宗晋, 傅征祥, 张郅珍, 等. 1982. 1966~1976 年中国九大地震[M]. 北京: 地震出版社, 190~197
- 童远林. 2000. 一种可能的中强地震空间分布方式[J]. 地震, 19(4): 1~5
- 王炜. 1987. 华东地区五次中强震前地震危险度 D 值的异常变化[J]. 地震, (1): 17~25
- 王炜, 刘震华. 1987. 地震时间间隔的统计分布及其地震危险度 D 值在华北大地震前的异常变化[J]. 地震学报, 9(2): 113~127
- 王炜, 潘坚云, 黄冰树. 1989. 地震空间集中度 C 值及其在地震预报中的应用[A]. 见: 国家地震局科技司编. 地震预报方法实用化研究文集(地震学专集)[C]. 北京: 学术期刊出版社, 127~143
- 闻学泽, Allen C R, 罗灼礼, 等. 1989. 鲜水河全新世断裂带的分段性、几何特征及其地震构造意义[J]. 地震学报, 11(4): 362~372
- 吴开统, 焦远碧, 吕培苓, 等. 1990. 地震序列概论[M]. 北京: 北京大学出版社, 124~179
- 杨丽萍, 夏玉胜, 王小平, 等. 2000. 中国大陆西部及邻区地震时空分布特征及其强震趋势预测[J]. 西北地震学报, 22(4): 429~435
- 赵根根, 刁桂苓. 1997. 黄海和渤海海域地震空间分布的集群分析[J]. 中国地震, 13(1): 27~35
- 张国民, 傅征祥. 1985. 华北强震的时间分布特点及其物理解释[J]. 地球物理学报, 28(6): 569~578
- 张国民. 1987. 我国大陆强震活动的韵律特征[J]. 地震地质, 9(2): 27~37
- 张肇诚. 1990a. 中国震例(1966~1975)[M]. 北京: 地震出版社, 1~211
- 张肇诚. 1990b. 中国震例(1976~1980)[M]. 北京: 地震出版社, 59~105
- Amorese D, Lagarde J L, Laville E. 1999. A point pattern analysis of the distribution of earthquakes in Normandy (France)[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 89(3): 742~749
- Eneva M, Hamburger M. 1989. Spatial and temporal patterns of earthquake distribution in Bull Seism Soc Amer soviet central Asia; Application of pair analysis statistics[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 79: 1 457~1 476
- Kafka A L, Levin S Z. 2000. Does the spatial distribution of smaller earthquakes delineate areas where larger earthquakes are likely to occur? [J]. *Bull Seism Soc Amer*, 90(3): 724~738
- Kagan Y Y, Knopoff L. 1980. Spatial distribution of earthquakes: the two-point correlation function[J]. *Geophys J R astr Soc*, 62: 303~320
- Kagan Y Y, Jackson D D. 1999. Worldwide doublets of large shallow earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 89(5): 1 147~1 155
- Bethoux N, Ouillon G, Nicalas M. 1998. The instrumental seismicity of the western Alps: Spatio-temporal pattern analysed with the wavelet transform[J]. *Geophys J Int*, 135: 177~194

STATISTICAL ANALYSIS ON TEMPORAL-SPATIAL CORRELATIVITY WITHIN TEMPORAL DOUBLETS OF STRONG EARTHQUAKES IN NORTH CHINA AND ITS VICINITY

Pei Tao¹⁾ Zhou Chenghu¹⁾ Li Quanlin²⁾ Chen Jinbiao²⁾

1) *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*

2) *Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, Beijing 100081, China*

Abstract: In order to unify the time and the space attributes into temporal-spatial distance, the temporal-spatial proportional coefficient f_{ts} is proposed in this paper. In accordance with the new distance concept, the temporal-spatial correlativity within temporal doublets of strong earthquakes in North China and its vicinity since AD 1500 has been analyzed. The computation results indicate that doublets of strong earthquake can be divided into two groups when f_{ts} is endowed with 10 km/a in the new distance formula. The temporal-spatial distance between two points of doublet generally cannot exceed 140 km when two strong quakes in doublet have some causative relation. And those doublets whose temporal-spatial distance exceed 280 km are probably independent seismic events in doublets. This character can be the reference to the migration law summarization and trend prediction.

Key words: North China and its vicinity; temporal doublets of strong earthquake; temporal-spatial distance