

文章编号: 0253-3782(2005)04-0367-10

# 中国大陆百年(1901~2001 年)浅源强震活动及生命损失回顾与分析<sup>\*</sup>

傅征祥<sup>1)</sup> 刘桂萍<sup>2)</sup> 邵辉成<sup>3, 4)</sup> 丁 香<sup>1)</sup>

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

2) 中国北京 100036 中国地震局监测预报司

3) 中国西安 710068 陕西省地震局

4) 中国西安 710072 西北工业大学工程力学系

**摘要** 简要回顾和初步分析了中国大陆百年(1901~2001 年)浅源地震活动( $M_s \geq 6.0$ )及生命损失的某些特征。1901~2001 年中国大陆发生约 420 次 6 级以上的浅源强震, 其中 88% 发生在大陆西部。其原因可能与西部活动地块的变形与运动相对强烈有关; 大陆西部的平均震源深度(25 km)比东部(16 km)的深, 这可能与大陆西部地壳厚度比东部明显的厚有关; 震源深度随深度的不均匀分布, 可能与地壳断层摩擦学和流变学性质随深度变化有关; 大陆浅源强震活动呈现时-空群集的过程; 反映地震强度分布的震级( $M_s$ )-频度( $N_c$ )关系是  $\lg N_c = 8.64 - 0.99 M_s$ 。在 1901~2001 年间地震造成生命损失约 60 余万人, 其中, 河北省和宁夏回族自治区损失最大, 地震死亡人数分别约是 250 700 和 246 200 人; 地震死亡人数与地震震级的统计关系并没有显示出一种良好的线性相关关系, 表明地震生命损失除了与地震释放的能量和地面震动大小有关外, 还应与地震发生的时间、地震区的建筑物破坏程度和人口密度等多种因素直接相关。地震死亡人数( $D$ )及其事件的累计频度( $N_c$ )的关系是  $\lg N_c = 2.40 - 0.39 \lg D$ , 表明地震死亡人数的分布是分形的。

**关键词** 中国大陆 浅源强震活动 生命损失 1901~2001 年

**中图分类号:** P315.5      **文献标识码:** A

## 引言

众所周知, 中国位于欧亚板块东南部, 受太平洋板块和菲律宾海板块向西俯冲, 以及印度板块向北碰撞的作用。因此, 中国是一个地震活动相当强烈的国家。中国的地震活动主要有两种类型, 即中国大陆大多数地震属于板内地震, 而台湾省兼有板间和板内地震。

据地震活动和生命损失的资料<sup>①</sup>(中国地震局监测预报司, 1996, 2001; 楼宝裳, 1996; 中国地震年鉴编委会, 1997; 2002)统计, 中国大陆百年(1901~2001 年)强震( $M_s \geq 6.0$ )的 95% 是震源深度小于 70 km 的浅源地震。几乎所有的地震灾害都是由浅源地震造成的。1901~2001 年的 101 年中, 中国大陆共发生 417 次浅源强震( $M_s \geq 6.0$ , 含余震), 造成约 60 余万居民死亡。表 1 和表 2 给出了 20 世纪中国大陆  $M_s \geq 7.5$  浅源大地震和地震造成死亡人数超过 5 000 人的目录。

\* 科技部科研所社会公益研究专项(2004DIA3J010)和地震科学联合基金(104016)资助。

① 中国地震局监测预报司预报管理处, 1999. 中国强地震目录(公元前 23 世纪—公元 1999 年)。

2004-02-03 收到初稿, 2005-04-15 收到修改稿并决定采用。

本文概要地回顾和分析了 1901~2001 年中国大陆浅源强震活动及其生命损失时、空、强的某些特征。

## 1 大陆浅源强震活动

### 1.1 空间分布不均匀

1) 图 1 给出了 1901~2001 年中国大陆浅源强震 ( $M_s \geq 6.0$ ) 的震中分布。由图可知, 大多数地震发生在中国大陆西部。假如以  $107^{\circ}\text{E}$  为界, 把中国大陆划分为东、西两部分, 它们的面积分别约占大陆总面积的 45% 和 55%, 而 6 级以上浅震分别约占大陆全部浅震的 12% 和 88% (表 3)。即西部 6 级以上浅震的年平均活动频度约是东部的 7 倍。

在欧亚、太平洋、印度和菲律宾海板块的联合作用下, 中国活动地块的变形与运动是中国大陆强震孕育与发生的重要原因 (张培震等, 2003)。李延兴等 (2003) 根据中国大陆及周边地区最近几年 GPS 观测得到的由 1 598 个 GPS 站速度组成的统一速度场, 估计中国大陆各活动地块的运动与应变参数, 分析了各活动地块的运动与应变状态, 指出, 从大区域看, 无论是主应变率或最大剪切应变率, 大陆西部平均是东部的 6.7 倍。所以, 中国大陆浅源强震 ( $M_s \geq 6.0$ ) 大多数发生在中国大陆西部, 可能与西部活动地块的变形与运动相对强烈有关。

2) 图 2 给出了 1900~2001 年中国大陆 7.5 级以上浅源大地震震中分布图。图中以 4 种符号表示出 4 个时间段的震中分布。该图明显地表明不同时间段的地震活动群集在一个主体地区内; 并且, 不同时间段的地震群体活动地区是不重复的。在 1902-01~1916-12 时间段中, 群体活动地区在新疆南北天山; 在 1920-01~1947-03 时间段中, 群体活动向东迁移到在宁夏-甘肃-青海地区; 在 1947-07~1988-12 时间段中, 群体活动地区向南迁移到西藏东部-四川-云南; 在 1997-01~2001-12 时间段中, 1997 年玛尼和 2001 年昆仑山口西大地震发生在西藏北部和青海-新疆交界处, 那里是前 3 个时间段中并没有发生 7.5 级以上大地震的区域 (大陆西部的腹部)。因此, 在今后一二十年内, 西藏北部、青海-新疆交界及邻

表 1 中国大陆浅源强震目录 (1901~2001 年,  $M_s \geq 7.5$ ,  $h \leq 70 \text{ km}$ )

年-月-日	$\varphi_N/(\text{°})$	$\lambda_E/(\text{°})$	$M_s$	震中烈度 $I_0$	地区
1902-08-22	39.9	76.2	8.3	X	新疆
1906-12-23	43.5	85.0	7.7	X	新疆
1914-08-05	43.5	91.5	7.5	X	新疆
1916-08-28	30.0	81.0	7.5	*	西藏
1920-12-16	36.7	104.9	8.5	Ⅷ	宁夏
1927-05-23	37.7	102.2	8.0	Ⅺ	甘肃
1931-08-11	47.1	89.8	8.0	Ⅺ	新疆
1932-12-25	39.7	96.7	7.6	X	甘肃
1933-08-25	31.9	103.4	7.5	X	四川
1937-01-07	35.5	97.6	7.5	X	青海
1947-03-17	33.3	99.5	7.7	*	青海
1947-07-29	28.6	93.6	7.7	*	西藏
1950-08-15	28.4	96.7	8.6	>Ⅹ	西藏
1951-11-18	31.1	91.4	8.0	>Ⅹ	西藏
1955-04-14	30.0	101.8	7.5	X	四川
1970-01-05	24.2	102.6	7.8	X	云南
1973-02-06	31.3	100.7	7.6	X	四川
1976-07-28	39.4	118.0	7.8	Ⅺ	河北
1997-11-08	35.2	87.3	7.5	*	西藏
2001-11-14	36.1	90.9	8.1	*	青海-新疆

注: \* 号表示所引的目录中没给出震中烈度值。

表 2 中国大陆地震死亡人数 ( $\geq 5000$  人)  
事件表 (1901~2001 年)

年-月-日	$\varphi_N/(\text{°})$	$\lambda_E/(\text{°})$	$M_s$	死亡人数	地区
1902-08-22	39.9	76.2	8.3	5 653	新疆
1920-12-16	36.7	104.9	8.5	235 502	宁夏
1921-04-12	35.8	106.2	6.5	10 000	宁夏
1925-03-16	25.7	100.4	7.0	5 800	云南
1927-05-23	37.7	102.2	8.0	41 420	甘肃
1933-08-25	31.9	103.4	7.5	6 865	四川
1966-03-02	37.5	115.1	7.2	8 064	河北
1970-01-05	24.2	102.7	7.7	15 621	云南
1976-07-28	39.4	118.0	7.8	242 000	河北

近地区可能是中国大陆一个新的7.5级以上大地震的群体活动地区.

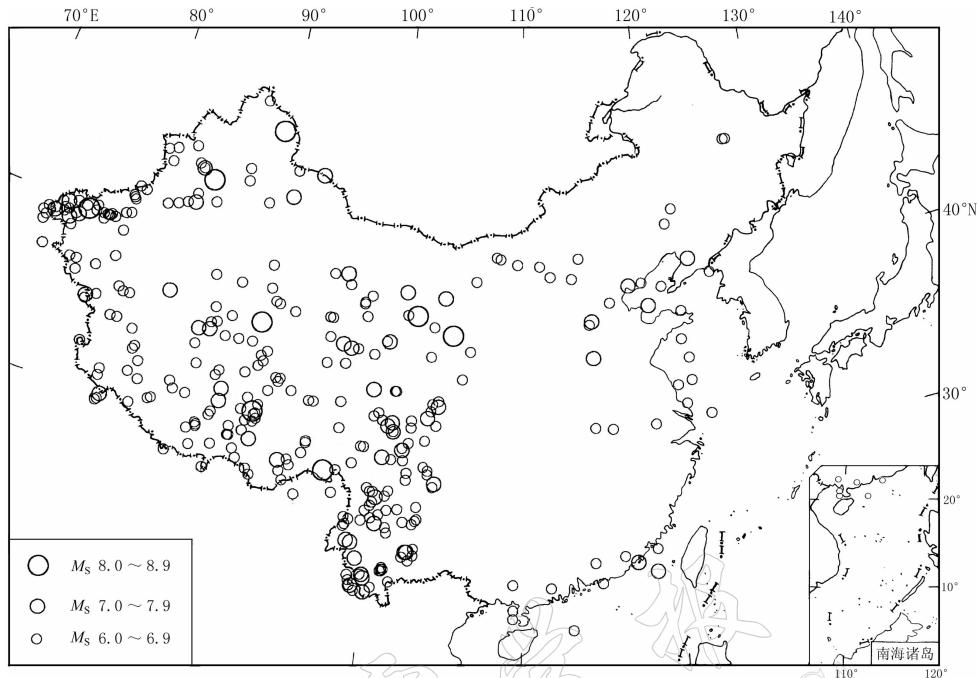


图1 中国大陆(1901~2001年)浅源强震( $M_s \geq 6.0$ )震中分布图

表3 中国大陆浅源强震震中地理分布频次(N)统计(1901~2001年,  $M_s \geq 6.0$ ,  $h \leq 70$  km)

$M_s$	中国大陆	大陆西部	大陆东部	平均复发时间/a
8.0~8.9	7	7(100%)	0(0%)	14.4
7.0~7.9	59	51(86%)	8(14%)	1.71
6.0~6.9	351	308(88%)	43(12%)	0.29
$\leq 6.0$	417	366(88%)	51(12%)	0.24

在1901~2001年间,中国大陆7.5级以上大地震的群体活动地区,在约20年左右的时间尺度内不重复地迁移的现象,基本上出现在大陆西部.这样的群体活动地区的迁移现象可能表明,在某一个群体活动地区内,地震断层上长期(几百年至几千年)积累的应力似乎同时(几十年左右的时间尺度)达到临界水平和基本上释放完毕.群体活动地区内的各次地震之间也可能存在相互作用(应力触发和影区),促成区内地震短期内丛集发生(Harris, 1998; 傅征祥等, 2001).

3) 在1950年之后,中国地震目录<sup>①</sup>还给出地震深度资料,共计有972次浅震( $M_s \geq 4.7$ ,  $h \leq 70$  km)有深度记录.图3a给出沿着纬向(东西方向)震源深度分布图.该分布图表明,约以 $106^{\circ}\text{E}$ 为界的大陆东西两部分震源深度分布有明显变化.在大陆东部几乎所有事件都发生在深度35 km以内;而西部有相当一部分地震发生在35 km以下.另外,东部地震平均深度为( $16 \pm 7$ ) km,西部地震平均深度为( $25 \pm 13$ ) km,表明西部地震的平均深度较东部显著的深.这个观测结果与张国民等(2002)使用1970~2000年 $M_L \geq 2.0$ 目录的研

① 中国地震局监测预报司预报管理处, 1999. 中国强地震目录(公元前20世纪—公元1999年).

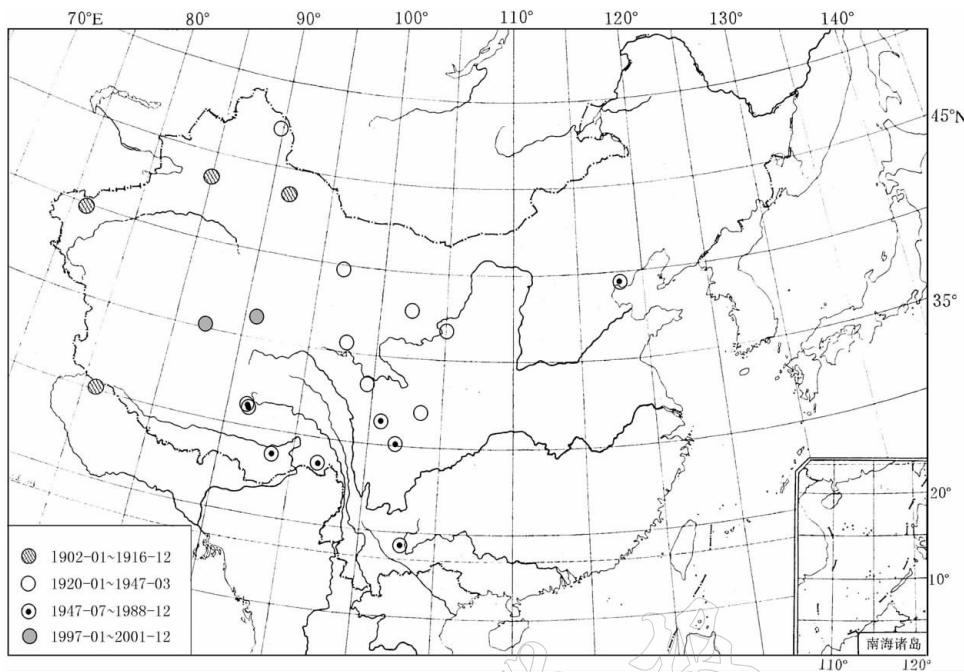
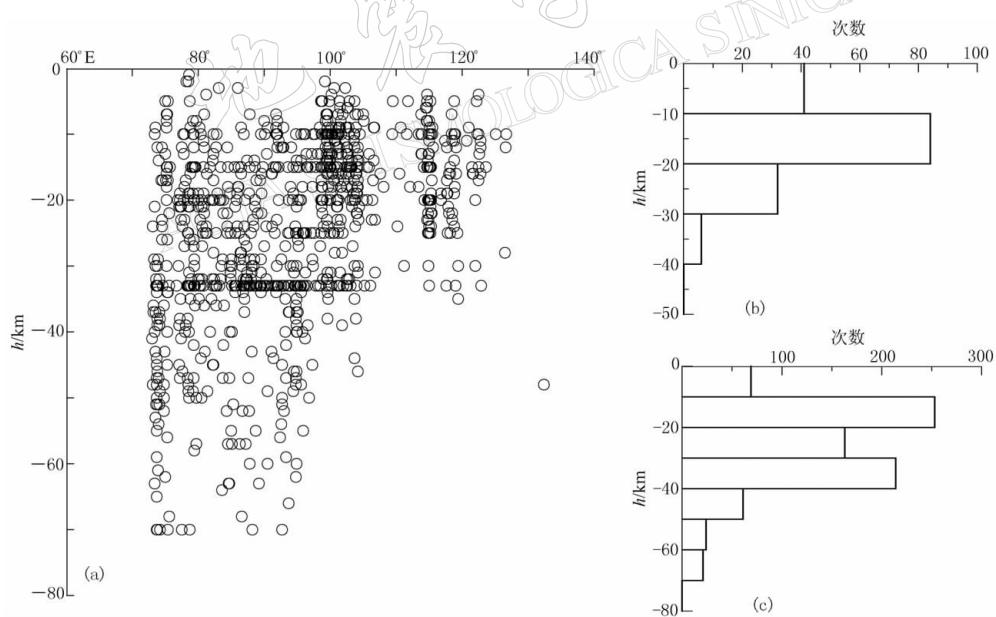
图 2 中国大陆(1901~2001 年)浅源强震( $M_s \geq 7.5$ )震中分布图

图 3 中国大陆地震震源深度的变化. (a) 中国大陆沿纬向震源深度分布图; (b) 大陆东部震源深度随深度变化图; (c) 大陆西部震源深度随深度变化图

究结论不矛盾。

板块构造理论认为, 地球外壳(岩石圈)在地质时期中保持刚性, 并传递弹性应力, 特别是在上半部(地壳) (Turcotte, Schubert, 1982). 地壳中的构造地震与断层活动有关, 通

常断层某些段落是锁住不动的, 在区域构造力作用下积累应力。当断层闭锁段上的应力达到临界值时, 断层快速滑动, 发生地震。可以设想, 有足够刚性的地壳越厚, 就有发生较深地震的可能性。中国大陆东西两部分的地壳厚度存在明显的差异。(史志宏等, 1989)依据重力观测资料, 得到东西部地壳厚度分别为32~44 km和44~67 km; Li和Mooney(1997)基于深部地震探测资料, 得到东西部地壳厚度分别为30~45 km和45~70 km。因此, 大陆东西两部分的地壳厚度的明显差异, 可能是两部分震源深度差异的一个重要构造因素。同时, 还可能取决于地壳不同层位的力学行为、变形特征和破裂方式等因素(张国民等, 2002)。

图3b, c分别给出了大陆东西两部分震源深度随深度的变化。总的说来, 呈现出一种“钟形”的不均匀分布, 即地壳中部, 特别是在10~19 km深度上的地震频度相对较高。另外, 西部地震的平均深度(25±13) km较东部(16±7) km的深。在地壳中, 物性、结构和热力学条件是随着深度变化的; 地壳中的地震断层带性质随深度由摩擦性状向韧性性状转换。断层带摩擦强度和韧性强度依赖于诸多物理条件, 主要有温度、压力和矿物成分(Byerlee, 1978; Strelau, 1986)。Jaoul等(1984)采用实验中得到的摩擦和流动律, 计算出地壳中剪切强度随深度的分布。Sibson(1982)提出用地壳断层摩擦性状向韧性性状转换解释地震深度变化的断层带强度模型。Strelau(1986)进一步提出具有过渡带的改进断层带强度模型。图4是断层带强度模型的示意图。对比图3b, c与图4表明, 震源深度分布可能与地壳断层上剪切强度随深度的变化相关。

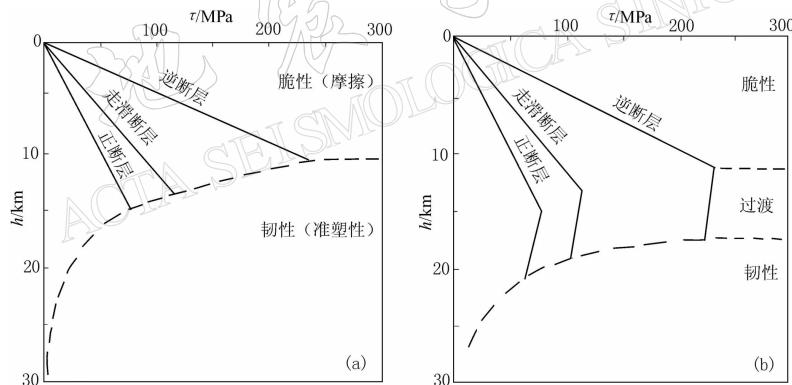


图4 地壳地震断层摩擦性状向韧性性状转换的断层带强度模型示意图

(a) 简单模型; (b) 具有过渡带的模型

## 1.2 时间群集分布

图5给出了1901~2001年中国大陆浅源强震( $M_s \geq 7.0$ )活动的时间分布。地震活动序列是否具有周期性、准周期、泊松和群集, 可以用所谓相邻地震间隔时间 $\Delta t$ 的变异系数 $C_v$ 去区分(Kagan, Jackson, 1991):

$$C_v = \sigma / \Delta T \quad (1)$$

式中,  $\Delta T$ 和 $\sigma$ 分别是间隔时间 $\Delta t$ 的平均值和标准偏差的描述。当 $C_v = 0$ ,  $0 \sim 1$ ,  $1$ 和 $> 1$ 时, 分别代表地震序列具有周期性、准周期、泊松和群集过程的性质。按照中国大陆1901~2001年浅源强震( $M_s \geq 7.0$ )的时间进程,  $\Delta T = 1.15$  a和 $\sigma = 1.33$  a可以得到 $C_v = 1.16$ , 表明其具有群集的性质。直观地看, 在1901~2001年间, 有3个明显的在5年以上

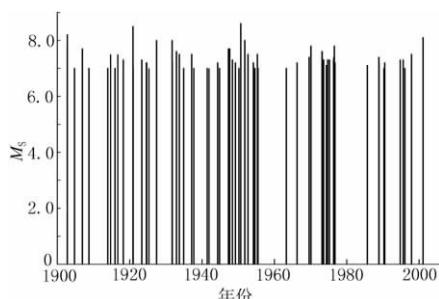


图 5 中国大陆(1901~2001 年)浅源强震( $M_s \geq 7.0$ )时间分布图

的时间段落中没有 7 级以上的大地震(1908-08~1913-12; 1955-04~1963-04; 1976-08~1985-08), 即这 3 个无震时间间隔分别约为整个过程事件间隔时间标准偏差  $\sigma$  的 3.8, 6.0 和 6.8 倍, 其平静的表现在统计上是显著的. 大陆的强震活动的多年群集性质, 一些研究者称之为地震的幕式活动, 并划分出平静幕和活跃幕, 应用在地震中长期趋势的研究中(马宗晋等, 1982; 傅征祥, 程燕, 1986; 张国民, 1987).

1901~2001 年中国大陆 8 级大地震群集分布同样引人注目. 表 1 表明 1901~2001 年中国大陆 8 级大地震共发生 7 次, 其中 6 次发生在 1951 年之前, 大约平均每 10 年发生一次; 之后平静了 50 年, 直到 2001 年 11 月 14 日发生昆仑山口西 8.1 级大地震. 它的发生, 是否意味着在 21 世纪上半叶, 中国大陆西部 8 级地震会再度群集活跃起来, 是一个值得深入探讨的问题.

### 1.3 强度分布

Gutenberg 和 Richter(1954) 曾给出地震震级和频度的经验关系

$$\lg N_c = a - bM_s \quad (2)$$

式中,  $M_s$  和  $N_c$  分别是地震震级和累计频度;  $a$  和  $b$  是统计常数. 图 6 是 1901~2001 年大陆浅源强震( $M_s \geq 6.0$ )的震级( $M_s$ )-频度( $N_c$ )统计关系

$$\lg N_c = 8.64 - 0.99M_s \quad (3)$$

式(3)表明, 反映中国大陆地震强度分布的参数  $b = 0.99$ . 它与 Gutenberg 和 Richter(1954) 利用 1904~1946 年全球浅源地震( $M_s \geq 6.0$ )统计资料得到的  $b$  值(0.90), 与吴佳翼和曹学锋(1987) 利用 1964~1983 年全球浅源地震( $M_s \geq 6.0$ )资料得到的  $b$  值(1.08)差别不大. 所以, 1901~2001 年中国大陆地震活动参数的  $b$  值(0.99)是可以接受的.

基于震级( $M_s$ )-频度( $N_c$ )关系, 应用地震震级与地震矩, 以及地震矩与地震断层长度的关系, 可证明地震断层长度的分布是分形的, 即一群地震断层长度具有自相似的复杂性(陈颙, 陈凌, 1998).

## 2 地震生命损失

1901~2001 年中国大陆的地震死亡人数达到 60 余万人, 其中, 最惨烈的地震生命损失是 1920 年 12 月宁夏海原 8.6 级和 1976 年 7 月河北唐山 7.8 级地震造成的, 其死亡人数分别是 235 502 人和 242 000 人, 是同期全球地震生命损失之最. 表 2 给出了中国大陆 1901~2001 年地震死亡超过 5 000 人的地震事件.

### 2.1 空间分布不均匀

若以中国大陆行政省份为统计单元(直辖市北京市和天津市归入河北省, 上海市归入

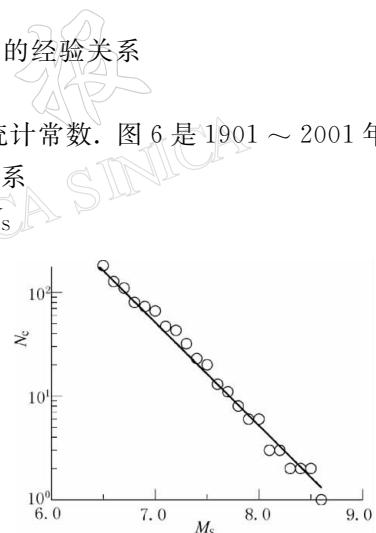


图 6 中国大陆(1901~2001 年)浅源强震( $M_s \geq 6.0$ )的震级( $M_s$ )-频度( $N_c$ )关系

江苏省,重庆市归入四川省统计),各省的地震生命损失见表4.表4表明中国大陆百年(1901~2001年)中,河北省和宁夏回族自治区的地震死亡人数最多,均约24万人;浙江、湖南和吉林省均没有地震生命损失.

表4 中国大陆分省百年(1901~2001年)中地震死亡人数

省份	河北	宁夏	甘肃	云南	四川	新疆	山东	西藏	辽宁	广东	山西	黑龙江	青海	广西
死亡人数(D)	250723	246269	41948	29230	18855	6699	3898	3556	1331	1039	592	132	124	95
省份	江苏	内蒙	安徽	湖北	福建	江西	贵州	河南	海南	陕西	浙江	湖南	吉林	总和
死亡人数(D)	74	62	31	6	5	3	2	1	1	1	0	0	0	604677

注:北京市和天津市归入河北省统计,上海市归入江苏省统计,重庆市归入四川省统计.

根据长期历史地震活动的资料,河北省、陕西省、山西省和宁夏回族自治区是我国重要的强震活动省份.有历史地震活动记载以来,那里曾分别发生过5次和6次7级以上的大地震.同时,1976年7月河北唐山7.8级地震发生在百万人口的工业城市下面,造成重大的人员伤亡和经济损失;1920年12月的宁夏海原8.6级巨大地震释放的能量特别大,加上地震区居民的居住条件差,不少人住在抗震性能较差的窑洞内,一旦窑洞倒塌,室内的死亡率便很高.1303年山西省洪洞发生8级大地震,造成超过20万人死亡.陕西省华县位于富饶的渭河平原东部,土壤肥沃、农业发达和人口密集;由于平原松散沉积物较厚,地下水位较高;在16世纪的1556年1月曾发生华县8 $\frac{1}{4}$ 级巨大地震时,地震使砂土液化地基失效,导致抗震性能差的土坯房和窑洞大量倒塌,加上地震发生在子夜,造成83万人惨死.山西省和陕西省在20世纪仍有中强地震发生,但未造成人员死亡.浙江省属于弱震省,历史上曾发生的最大地震是5级,没有人员死亡的记录.湖南省历史上于1631年8月曾发生常德6 $\frac{3}{4}$ 级地震,死亡80人;在20世纪仍有中小地震发生,但未造成人员死亡.吉林省的强地震活动主要是深源地震,并未造成人员伤亡;1901~2001年间,曾发生为数不多的浅源地震,其中,最大的浅源地震(5.8级)发生在1960年4月,造成轻伤5人.

地震造成人员死亡的最主要原因是地震动作用下,住房和建(构)筑物倒塌,砸死或窒息其内的人员.所以,地震生命损失除了与地震释放的能量和地面震动大小有关外,还与地震发生的时间(晚间入睡时间或白天室内上班上课时间)、地震区的建筑物破坏程度和人口密度等多种因素直接相关.这样,地震死亡人数与地震震级的统计关系就不可能是一种良好的线性相关关系.图7是中国大陆百年(1901~2001年)中地震死亡人数(D)与地震震级( $M_S$ )的统计关系.图7表明,对于每一次地震造成的人员死亡数是

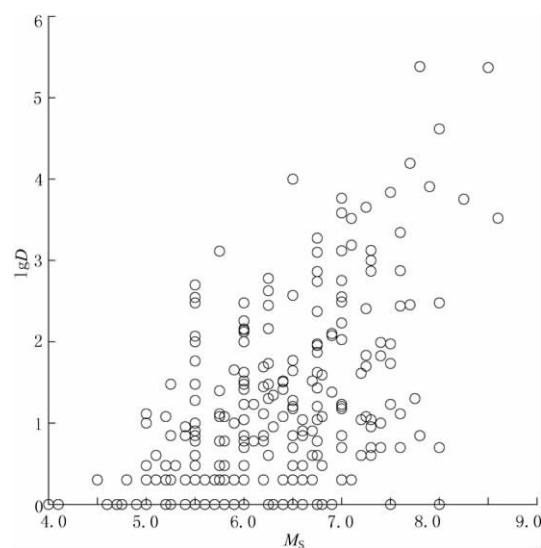


图7 中国大陆(1901~2001年)地震死亡人数(D)与震级( $M_S$ )的关系

一个较宽的范围。同时，最大的死亡人数似乎是受震级大小制约的。

## 2.2 时间集中分布

表 5 给出以 10 年为一个统计时间间隔，中国大陆百年(1901~2001 年)中地震死亡人数( $D$ )，以及造成人员死亡的地震灾害事件数( $n$ )随时间的变化过程。另外，2001 年全年共有造成人员死亡的地震灾害事件 5 次，死亡共 9 人。

表 5 中国大陆百年(1901~2001 年)中地震死亡人数随时间变化

时间	1901~ 1910 年	1911~ 1920 年	1921~ 1930 年	1931~ 1940 年	1941~ 1950 年	1951~ 1960 年	1961~ 1970 年	1971~ 1980 年	1981~ 1990 年	1991~ 2000 年	2001 年
死亡人数	6 623	239 973	64 635	12 793	5 411	1 707	24 356	247 391	1 217	559	9
灾害事件	11	14	20	23	21	16	22	29	31	36	5

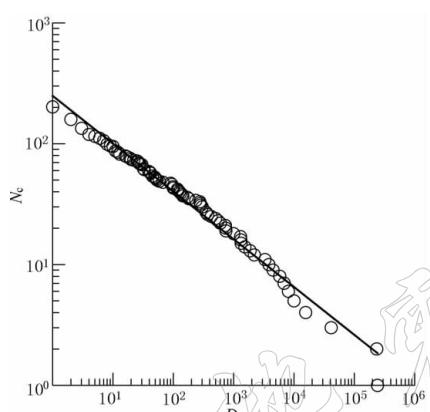


图 8 中国大陆(1901~2001 年)地震死亡人数( $D$ )与频度( $N_c$ )的关系

表 4 表明我国大陆上世纪的地震死亡人数年均为 6 000 人左右，实际上其时间分布很不均匀(表 5)。在 1911~1920 年和 1971~1980 年间，我国大陆地震死亡人数最多，都超过 20 万人，主要原因是 1920 年宁夏海原和 1976 年河北唐山大地震的后果。另外，地震造成人员死亡的成灾事件有数似乎随时间有递增的趋势，但不排除在 20 世纪初期，地震死亡人数很少的成灾事件有记录遗漏的因素。

## 2.3 强度分布

根据上述的地震灾害记录资料，可以获得地震死亡人数( $D$ )及其事件的累计频度( $N_c$ )之间存在如下统计关系(图 8)：

$$\lg N_c = 2.40 - 0.39 \lg D \quad (4)$$

或

$$N_c (\geq D) \propto D^{-0.39} \quad (4')$$

式(4')表明，与其它许多自然现象的复杂性一样(陈颤，陈凌，1998)，地震死亡人数  $D$  的分布是分形的。

## 3 小结

1) 在 1901~2001 年的百年间，中国大陆的浅源强震活动( $M_s \geq 6.0$ ,  $h \leq 70$  km)呈现出时、空、强分布的不均匀性。其中，88% 的 6 级以上浅源强震发生在大陆西部，可能与西部活动地块的变形与运动相对强烈有关；GPS 观测表明，无论是主应变率或最大剪切应变率，西部平均是东部的 6.7 倍。大陆西部的平均震源深度比东部的深，是由于能够积累和传递应力的地壳厚度，总体上西部比东部约厚一二十公里；震源深度随深度的不均匀分布，可能与地壳断层摩擦学和流变学随深度变化有关；大陆浅源强震时间-空间的群集迁移过程，可能反映在某一个群体活动地区内，地震断层上积累的应力似乎同时(几十年左右的时间尺度)达到临界水平和基本上释放完毕，以及群体内各次地震之间可能存在相互作用；反映地震强度分布的震级( $M_s$ ) - 频度( $N_c$ )关系是  $\lg N_c = 8.64 - 0.99 M_s$ ，它意味着地

震断层长度的分布是分形的,即一群地震断层长度具有自相似的复杂性。

2) 在1901~2001年的百年间,地震造成的生命损失约60余万人,河北省和宁夏回族自治区损失最大,地震死亡人数分别约是250 700和246 200人。主要是由于1920年12月的宁夏海原8.6级和1976年7月河北唐山7.8级地震。地震死亡人数与地震震级的统计关系不是一种线性相关关系,对于每一次地震造成的人员死亡数是一个较宽的范围,它表明地震生命损失除了与地震释放的能量和地面震动大小有关外,还与地震发生的时间(晚间入睡时间或白天室内上班上课时间)、地震区的建筑物破坏程度和人口密度等多种因素直接相关。反映地震生命损失程度的死亡人数( $D$ )-频度( $N_c$ )关系是 $\lg N_c = 2.40 - 0.39 \lg D$ ,它意味着地震死亡人数的分布是分形的。

本文仅简要回顾和初步分析了中国大陆百年(1901~2001年)浅源地震活动及生命损失的某些特征,今后还需继续进行更细致和深入的研究。

## 参 考 文 献

- 陈颙,陈凌。1998.分形几何学[M].北京:地震出版社,163~167。
- 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,(2):28~35。
- 傅征祥,刘桂萍,陈棋福。2001.青藏高原北缘海原-古浪-昌马大地震相互作用的动力学分析[J].地震地质,23(1):35~42。
- 李延兴,杨国华,李智,等。2003.中国大陆活动地块的运动与应变状态[J].中国科学,D辑,33(增刊):65~81。
- 楼宝裳。1996.中国古今地震灾情总汇[M].北京:地震出版社,1~272。
- 马宗晋,傅征祥,张郢珍,等。1982.1966~1976年中国九大地震[M].北京:地震出版社,198~204。
- 史志宏,刘占坡,殷秀华。1989.地壳厚度(重力反演)[A].见:马杏垣主编.中国岩石圈动力学地图集[C].北京:地震出版社,12。
- 吴佳翼,曹学锋。1987.全球地震活动性定量研究(二)[J].地震学报,9(3):225~238。
- 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。
- 张国民,汪素云,李丽,等。2002.中国大陆地震震源深度及其构造含义[J].科学通报,47(9):1 064~1 071。
- 张培震,邓起东,张国民,等。2003.中国大陆的强震活动与活动地块[J].中国科学,D辑,33(增刊):12~20。
- 中国地震局监测预报司。1996.1990~1995中国大陆地震灾害损失资料汇编[M].北京:地震出版社,1~232。
- 中国地震局监测预报司。2001.1996~2000中国大陆地震灾害损失资料汇编[M].北京:地震出版社,1~386。
- 中国地震年鉴编委会。1997.中国地震年鉴(1995)[M].北京:地震出版社,137~182。
- 中国地震年鉴编委会。2002.中国地震年鉴(2001)[M].北京:地震出版社,133~140。
- Byerlee J D. 1978. Friction of rock[J]. *Pure Appl Geophys*, 116: 615~626。
- Gutenberg B, Richter C F. 1954. *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*[M]. New Jersey: Princeton University Press, 16~20。
- Harris R A. 1998. Introduction to special section stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard[J]. *J Geophys Res*, 103(B10): 24 347~24 358。
- Jaoul O, Tullis J A, Kronenberg A K. 1984. The effect of varying water content on the creep behavior of Heavitree quartz[J]. *J Geophys Res*, 89: 4 289~4 312。
- Kagan Y Y, Jackson D D. 1991. Long-term earthquake clustering[J]. *Geophys J Int*, 104(1): 117~133。
- Li S, Mooney W D. 1997. Crustal structure of China from deep seismic sounding profile[J]. *EOS Trans Am Geophys Union* 78, 46(Suppl): 470。
- Sibson R H. 1982. Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in continental crust of the United States[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 72: 151~163。
- Strelau J. 1986. A discussion of the depth extent of rupture in large continental earthquakes[A]. In: Das S, Boatwright J, Scholz C eds. *Earthquake Source Mechanics, American Geophysical Union Geophysics Monograph 37*[C]. Wash-

ington D C: American Geophysical Union, 131~146  
 Turcotte D L, Schubert G. 1982. *Geodynamics*[M]. New York: John Wiley & Sons, 6~7

# AN OVERVIEW ON SHALLOW STRONG EARTHQUAKE ACTIVITY AND EARTHQUAKE LIVE LOSSES OF CHINESE MAINLAND IN THE CENTENARY FROM 1901 TO 2001

Fu Zhengxiang<sup>1)</sup> Liu Guiping<sup>2)</sup> Shao Huicheng<sup>3, 4)</sup> Ding Xiang<sup>1)</sup>

1) *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

2) *Department of Earthquake Monitoring and Prediction, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

3) *Earthquake Administration of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China*

4) *Department of Engineering Mechanics, Northwest Industrial University, Xi'an 710072, China*

**Abstract:** This paper reviews and analyses briefly the general characteristics of shallow strong earthquakes ( $M_s \geq 6.0$ , focal depth  $h \leq 70$  km) in space, time and magnitude and earthquake fatalities of Chinese mainland in the centenary from 1901 to 2001. During the period from 1901 to 2001, there occurred about 420 strong shallow earthquakes with magnitude  $M_s \geq 6.0$ , 88% of them occurred in the western part of the mainland, which might be related to the strong deformation and motion of the active blocks in the western part. The average focal depth (25 km) in the western part is deeper than that (16 km) in the eastern part, which might be related to obviously thicker crustal thickness in the western part. The inhomogeneous distribution of focal depths with the depth profile is related to the variation of frictional and rheologic characteristics with depth in the crust. The shallow strong earthquake activity of Chinese mainland shows a tempo-spatial clustering process. The relation between earthquake magnitude  $M_s$  and cumulative frequency  $N_c$  is  $\lg N_c = 8.64 - 0.99 M_s$ . About 600 000 people died by the earthquakes of Chinese mainland from 1901 to 2001, the most serious earthquake live losses occurred in Hebei Province (250 723 people died) and Ningxia Hui Autonomous Region (246 269 died). There is no a statistically linear relationship between earthquake live losses and magnitudes. The statistical relationship between the earthquake deaths  $D$  and cumulative frequency  $N_c$  is  $\lg N_c = 2.40 - 0.39 \lg D$ , which shows a fractal distribution.

**Key words:** Chinese mainland; shallow-depth strong earthquake activity; live losses; 1901~2001