

地震人员伤亡与压埋人员评估方法的初步研究 ——以福建省漳州市区为例^{*}

许建东¹, 危福泉², 张来泉³, 方宏芳³, 李 华⁴

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029 2 福建省地震局, 福州 350003
3 漳州市地震局, 福建 漳州 363000 4 北京交通大学, 北京 100044)

摘要: 以建筑物震害预测分析为基础, 以街道办事处为单元, 用最新的人口调查数据对福建省漳州市区进行了不同地震烈度情况下的人员伤亡预测, 并提出了地震灾害中因建筑物倒塌而被压埋人员的评估方法, 初步预测了不同地震烈度下、不同时间段内各街道办事处可能的压埋人数。这一结果对于制定地震紧急救援决策和灾害减轻措施、采取有效的地震应急响应具有重要的辅助决策意义。

关键词: 震害预测; 人员伤亡; 压埋人员; 漳州市

中图分类号: P315.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2008)04-0382-06

0 引言

影响地震人员伤亡的因素很多, 其中包括建筑物倒塌数量、人口密度、地震发生时间、救援措施是否得力等, 但最主要的影响因素是建筑物的倒塌。建筑物倒塌一定会造成经济损失, 但并不一定会造成人员伤亡, 这还与室内人员的数量有关。此外, 地震发生时间对人员伤亡的影响也很大。统计结果显示, 1303 年以来, 中国大陆 $M_s \geq 7.5$ 地震发生在夜间的占了 67.5%, 死亡人数超过 20 万的 4 次强烈地震都发生在夜间。因此, 应综合考虑影响人员伤亡的各种因素, 在建筑结构震害预测的基础上进行人员伤亡预测。

预测震后被压埋人员的数量, 对地震紧急救援和救灾力量的部署是非常必要的 (许建东等, 2005; 郭红梅等, 2008)。这里所说的被压埋人员是指原居住的房屋因地震倒塌或发生了某种程度的破坏, 由于受伤或是由于建筑物废墟的阻碍, 无法自由行动, 需要他人 (非专业或专业救援人员) 协助方可脱离困境的人员。

本文中笔者在进行震害预测分析的基础上, 以街道办事处为单元, 用最新的人口调查数据对福建省漳州市区进行了不同地震烈度情况下的人员伤亡预测; 同时, 提出了对地震灾害中因建筑

物倒塌而导致的压埋人员的评估方法, 初步预测了不同地震烈度下、不同时间段内各街道办事处可能的压埋人数。

1 地震伤亡人员预测与结果

对地震伤亡人员的预测目前还主要是经验性和统计性的估计, 这主要是因为地震时造成人员伤亡的偶然因素很多, 难以用严格的数学解析方法进行描述。我们根据前人的相关研究成果 (李帆等, 2001; 于山等, 2005; 马玉宏等, 2000), 以尹之潜 (1996) 提出的人员伤亡估计方法为基础, 结合研究区的具体情况, 提出了适合该地区的地震人员伤亡估算模型:

$$M_d(D) = C\eta(A_0 r_0 + A_1 r_1 + A_2 r_2 + A_3 r_3)$$

$$M_h(D) = C\eta(A_0 r_0 + A_1 r_1 + A_2 r_2 + A_3 r_3) \quad (1)$$

式中, $M_d(D)$ 为预测地区地震烈度为 D 时的死亡人数; $M_h(D)$ 为预测地区地震烈度为 D 时的重伤人数; C 为地震时人员在室内的百分比; A_0 为毁坏房屋的面积; A_1 为严重破坏房屋的面积; A_2 为中等破坏房屋的面积; A_3 为轻微破坏房屋的面积; η 为房屋内人员的密度; r_0, r_1 分别为毁坏房屋内的人员死亡率和重伤率; r_2, r_3 分别为严重破坏房

* 收稿日期: 2008-07-02.

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目 (2006BAC13B04-05) 资助.

屋内的人员死亡率和重伤率； I_m 、 I_b 分别为中等破坏房屋内的人员死亡率和重伤率； I_0 为轻微破坏房屋内的人员重伤率。

可以看出，该估算模型不仅考虑了不同类型建筑遭受地震破坏时对人员伤亡的影响，而且也强调了地震发生时人员在室内的概率对预测结果的影响。因此，有必要根据建筑物的功能对其进行合理分类，以反映不同时段人员在室内的概率

变化。本研究按照使用功能将漳州市区的主要建筑结构分为三类，第 I 类（起居类）：住宅、公寓、学生和职工集体宿舍、宾馆、招待所等；第 II 类（办公类）：办公室、医院、学校等场所；第 III 类（娱乐类）：体育馆、车站、候机室、影剧院等公共场所。表 1 按平日和假日分时段给出了不同场所人员粗略的百分比，考虑了时间因素在估计死亡率、重伤率和压埋率时的影响。

表 1 一天内不同时段不同场所人员的百分比

结构类型	时间	不同时段人员的百分比				
		22 :00—6 :00	6 :00—8 :00	8 :00—17 :00	17 :00—19 :00	19 :00—22 :00
I 类	平日	0.90	0.40	0.15	0.40	0.50
	假日	0.95	0.70	0.60	0.70	0.80
II 类	平日	0.05	0.40	0.85	0.40	0.30
	假日	0.02	0.03	0.10	0.03	0.02
III 类	平日	0.02	0.03	0.50	0.50	0.65
	假日	0.02	0.05	0.65	0.60	0.70

依据研究区各类结构震害预测的结果，再根据上面公式，即可计算出研究区在 VI、VII、VIII、IX、X 度强度情况下不同时间段内发生地震时的人员死亡和受伤情况（图 1、2），其中，V 度时的死亡和重伤人数在任何类房屋及任何时段均为零。

式中 d 为死亡率， $d = \text{死亡人数} / \text{总人数}$ ； H_b 为受伤率； Y_m 为被压埋人员率； I_b 为压埋但无伤率。

于是被压埋人员率 Y_m 就可以由以下公式得出：

$$Y_m = \frac{H_b + d}{1 - I_b} \quad (5)$$

2 压埋人员预测模型与结果

2.1 预测模型分析

尹之潜（1996）根据国内 8 次地震的统计结果得出过估算人员伤亡的经验公式：

白天发生地震时：

$$\begin{aligned} d &= 0.000971 e^{5(I-7)} D_p \\ W &= 0.008829 e^{5(I-7)} D_p \end{aligned} \quad (2)$$

夜间发生地震时：

$$\begin{aligned} d &= 0.0126(I - 4.76) / (I + 0.25) e^{75(I-7)} D_p \\ W &= 0.068 / (I + 0.25) e^{75(I-7)} D_p \end{aligned} \quad (3)$$

式中 d 为死亡率； W 为受伤率； I 为地震烈度； D_p 为建筑破坏率， $D_p = \text{倒塌率} + 1/2 \text{严重破坏率}$ 。

一般来说，死亡率和受伤率之间存在如下关系：

$$H_b = (1 - I_b) Y_m - d \quad (4)$$

另外，地震时人员压埋的多少与室内人员多少有关系，因此人员的压埋率与一天 24 小时人们活动的空间位置有关。对于城市居民来说，一天 24 小时的活动可分为 3 个主要时段（尹之潜，1996）：第一段为上下班途中，时间为 6 :00 ~ 8 :00 和 16 :00 ~ 19 :00 大部分职工和中小学生在上班、上学和下班、放学的路上，老人、学龄前儿童和无业者大部分在自己居住的房内，办公室和工厂的车间人员很少；第二段为办公阶段，时间为 8 :00 ~ 16 :00 大部分人员都在工厂里的车间、机关里的办公室和学校里的教室中，商店也是顾客最多的时候；第三段为休息娱乐阶段，时间为 19 :00 到次日早晨 6 :00 大部分人员在自己的住宿处或公共娱乐场所。

从上述城市中人们一天的活动情况可以得出下面的结论：如果大地震发生在白天，可能的压埋人员主要集中在 II 类（办公类）建筑中；如果发生在夜间，压埋人员则主要集中在 I 类（起居类）和 II 类（娱乐类）建筑里。在上、下班的时间段里有相当一部分人员在户外，所以如果在这

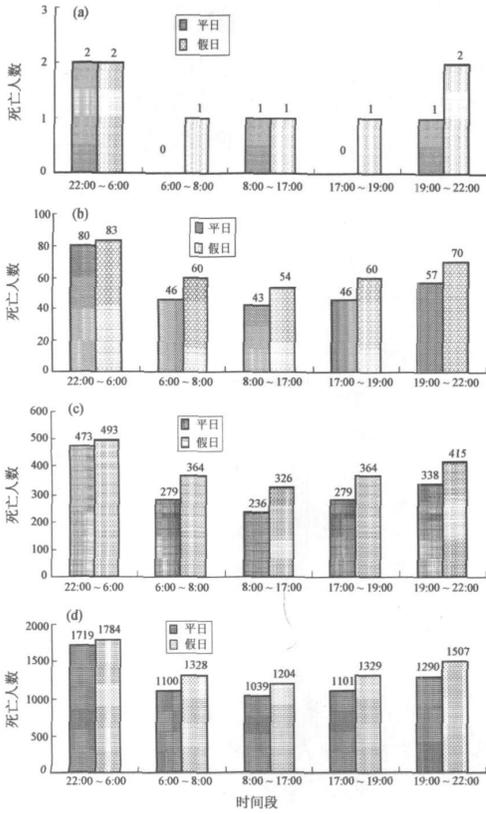


图 1 不同强度不同时段地震造成人员死亡分布预测 (a) VI度; (b) VII度; (c) VIII度; (d) IX度

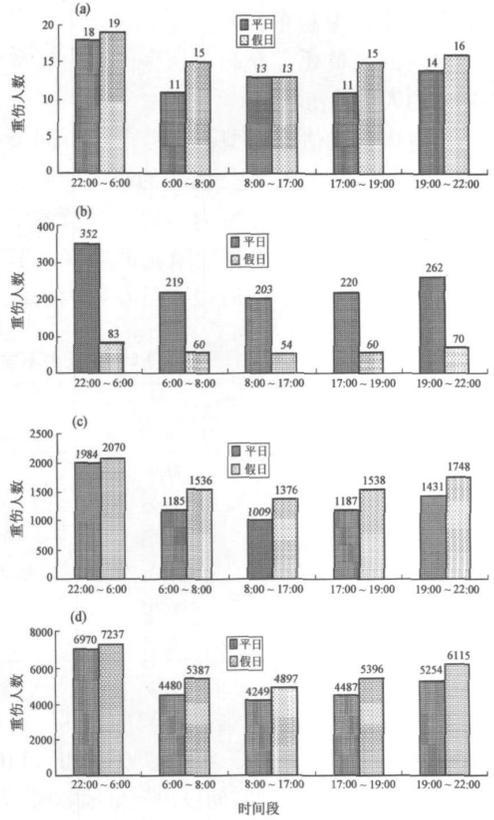


图 2 不同强度不同时段地震造成人员重伤分布预测 (a) VII度; (b) VIII度; (c) IX度; (d) X度

段时间发生地震, 压埋人员应该最少。

2.2 压埋人员预测实例

根据上述计算模型, 以研究区街道办事处为单元, 我们分析估算了研究区不同地震烈度下可能的压埋人员数量。

表 2为最新统计的以街道办事处为划分单元的常

住人口数, 这也是估算压埋人数时所使用的的人口基数。

如前所述, 建筑结构震害预测是压埋人员预测模型中最为重要的因素之一。在本研究中, 漳州市区各街道办事处不同类型建筑结构震害矩阵引用了“漳州市区震害预测及减灾对策”的研究成果^①, 详见表 3~6。

表 2 漳州市区不同街道办事处常住人口数

街道办事处	办事处 1	办事处 2	办事处 3	办事处 4	办事处 5	办事处 6
常住人口数	70 542	29 543	64 175	68 037	52 414	39 377

表 3 漳州市区 VII度震害矩阵

街道办事处	单层		2~3层		4层以上	
	严重破坏	倒塌	严重破坏	倒塌	严重破坏	倒塌
办事处 1	0.03	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00
办事处 2	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
办事处 3	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00
办事处 4	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00
办事处 5	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00
办事处 6	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00

① 福建省地震局, 漳州市区震害预测及减灾对策报告, 1998

表 4 漳州市区 VII 度震害矩阵

街道办事处	单层		2~3层		4层以上	
	严重破坏	倒塌	严重破坏	倒塌	严重破坏	倒塌
办事处 1	0.18	0.03	0.13	0.02	0.10	0.01
办事处 2	0.18	0.03	0.13	0.02	0.04	0.00
办事处 3	0.18	0.03	0.13	0.02	0.11	0.02
办事处 4	0.18	0.03	0.13	0.02	0.05	0.03
办事处 5	0.18	0.03	0.13	0.02	0.04	0.02
办事处 6	0.18	0.03	0.13	0.02	0.00	0.00

表 5 漳州市区 IX 度震害矩阵

街道办事处	单层		2~3层		4层以上	
	严重破坏	倒塌	严重破坏	倒塌	严重破坏	倒塌
办事处 1	0.52	0.20	0.40	0.15	0.54	0.10
办事处 2	0.52	0.20	0.40	0.15	0.54	0.04
办事处 3	0.52	0.20	0.40	0.15	0.49	0.12
办事处 4	0.52	0.20	0.40	0.15	0.48	0.08
办事处 5	0.52	0.20	0.40	0.15	0.52	0.07
办事处 6	0.52	0.20	0.40	0.15	0.20	0.00

表 6 漳州市区 X 度震害矩阵

街道办事处	单层		2~3层		4层以上	
	严重破坏	倒塌	严重破坏	倒塌	严重破坏	倒塌
办事处 1	0.27	0.71	0.36	0.53	0.38	0.59
办事处 2	0.27	0.71	0.36	0.53	0.52	0.38
办事处 3	0.27	0.71	0.36	0.53	0.45	0.55
办事处 4	0.27	0.71	0.36	0.53	0.42	0.53
办事处 5	0.27	0.71	0.36	0.53	0.49	0.48
办事处 6	0.27	0.71	0.36	0.53	0.60	0.20

根据各街道办事处建筑物调查的结果, 经归纳总结后可以得出不同结构类型建筑物的比例数 (表 7)。

如果定义建筑破坏率 $D_p = \text{倒塌率} + 1/2 \text{严重破坏率}$, 那么 D_p 就可以通过震害矩阵和各类建筑物比例数的加权累积得到 (表 8)。

表 7 漳州市区各类建筑物栋数与比例数

街道办事处	单层建筑物		2~3层建筑物		4层以上建筑物	
	栋数	比例数	栋数	比例数	栋数	比例数
办事处 1	41	0.097 9	180	0.429 6	198	0.472 6
办事处 2	29	0.107 8	192	0.713 8	48	0.178 4
办事处 3	131	0.329 1	146	0.366 8	121	0.304 0
办事处 4	81	0.309 2	143	0.545 8	38	0.145 0
办事处 5	14	0.046 8	70	0.234 1	215	0.719 1
办事处 6	16	0.280 7	36	0.631 6	5	0.087 7

表 8 漳州市区街道办事处建筑破坏率 (D_p)

街道办事处	人口总数	VI 度	VII 度	IX 度	X 度
办事处 1	70 542	0.008 1	0.076 6	0.370 2	0.756 3
办事处 2	29 543	0.008 8	0.077 2	0.354 7	0.712 1
办事处 3	64 175	0.011 6	0.093 5	0.390 8	0.774 2
办事处 4	68 037	0.011 5	0.091 5	0.379 7	0.756 1
办事处 5	52 414	0.010 2	0.054 3	0.340 8	0.727 1
办事处 6	39 377	0.010 5	0.087 4	0.358 9	0.729 5

在此基础上, 根据死亡率、受伤率、压埋但无伤率和被压埋人员率之间的关系, 就可以估算出不

同地震烈度下可能的压埋人数 (图 3) 其中, V度时的压埋人数在任何类房屋和任何时间段内均为零。

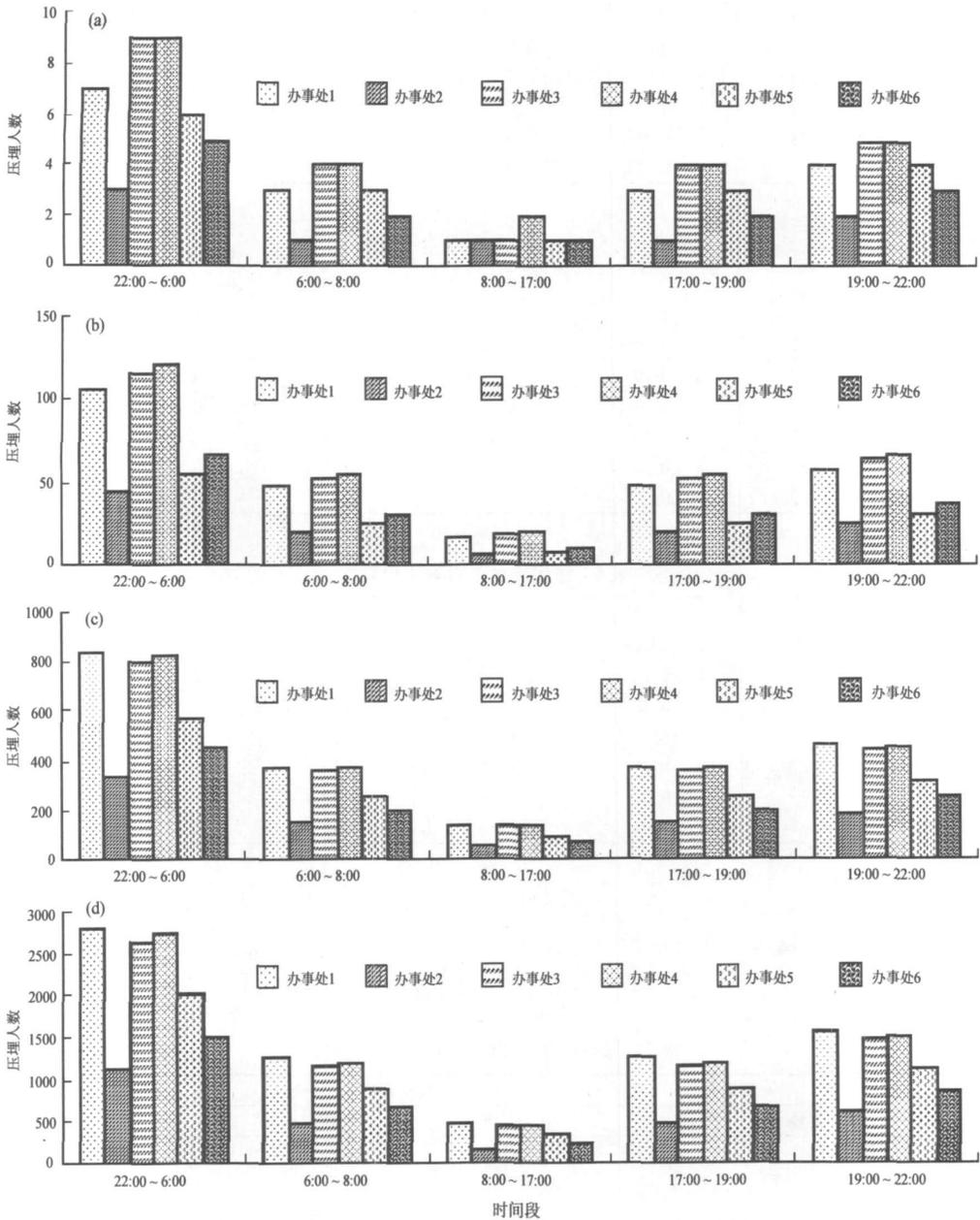


图 3 不同强度不同时段各街道办事处地震压埋人员分布预测 (a) VI度; (b) VII度; (c) VIII度; (d) IX度

大地震所造成的压埋人员的预测目前还处于探索研究阶段, 所涉及的既有科学因素, 也有社会因素, 既有确定性因素, 亦有一定程度的偶然因素。本研究所做出的预测, 仅仅是在前人相关统计研究的基础上, 尽可能考虑各种因素的影响而给出的初步评估。尽管预测结果精确到了个位数, 但在实际应用中应该理解为某个量级或是某

个范围。比如说, 预测的压埋人数为 156人, 则可理解为压埋人数在 100~200人之间。另外需要说明的是, 本文中所使用的压埋人员预测方法涉及到震害预测、建筑物调查和人口统计等多方面的资料和数据, 而目前已有的城市震例中均缺乏这类基础数据, 因此本方法还停留在理论研究阶段, 没有经过实际震例的检验。尽管如此, 本研究所

使用的方法和得到的结果, 对于城市规划、防震减灾应急预案和紧急救援决策的制定, 均具有重要的辅助决策意义。

3 结论与讨论

地震时由于建筑物倒塌造成人员被压埋的偶然因素很多, 精确地给出预测结果是很困难的。以往的地震经验表明, 被压埋人员的成活率与当时人员所在建筑的结构和倒塌的类型直接相关, 换句话说, 倒塌的废墟中是否有足够的生存空间是最主要的影响因素, 同时还与救援行动有效与否等因素有关。一般来说, 市区建筑物结构中抗震能力最差的是老旧民房, 在低烈度下人员的压埋主要是由于老旧民房倒塌或严重破坏造成的, 而框架结构建筑的抗震性能要高于老旧民房、多层砌体等, 在低烈度时, 框架结构房屋造成的压埋人员较少, 在高烈度时才有可能造成框架结构

中的人员压埋。本研究在按街道办事处进行压埋人员预测时, 综合考虑了建筑结构、人口、老旧房屋分布等因素, 结果具有一定的合理性。尽管这些结果目前还比较粗略, 但对于制定防震减灾应急规划和紧急救援预案与决策均具有重要的参考价值。

参考文献:

- 郭红梅, 黄丁发, 陈维锋, 等. 2008. 城市地震现场搜救指挥辅助决策系统的设计与开发 [J]. 地震研究, 31 (1): 83—88.
- 李帆, 佟晓君, 苏幼坡. 2001. 城市地震伤亡人数的概率预测模型 [J]. 河北理工学院学报, 22 (3): 81—85.
- 马玉宏, 谢礼立. 2000. 关于地震人员伤亡因素的探讨 [J]. 自然灾害学报, 9 (3): 84—90.
- 许建东, 黄建发. 2005. 地震紧急救援数据库与指挥决策系统现状综述 [J]. 国际地震动态, (3): 8—12.
- 尹之潜. 1996. 地震灾害及损失预测方法 [M]. 北京: 地震出版社.
- 于山, 王海鑫, 马亚杰. 2005. 三层 BP神经网络地震灾害人员伤亡预测模型 [J]. 地震工程与工程振动, 25 (6): 113—117.

Preliminary Study on Evaluating the Number of Casualties and Trapped Victims by a Earthquake —— A Case Study of Zhangzhou City Fujian Province

XU Jian-dong, WEI Fu-quan, ZHANG Lai-quan, FANG Hong-fang, LI Hua

(1. Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China)

(2. Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, Fujian, China)

(3. Earthquake Administration of Zhangzhou City, Zhangzhou 363000, Fujian, China)

(4. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract

In this paper, we propose an analytical method to evaluate the number of casualties injured and trapped victims under different seismic intensities. This method is developed based on the earthquake hazard and vulnerability analysis of building and local population nose count data. Taking Zhangzhou city as an example, we estimate the number of casualties injured and trapped victims under seismic intensity VII, VIII, IX and X respectively. Such information is critical for the local government in earthquake response, emergency management as well as in preparedness for earthquake search and rescue mission.

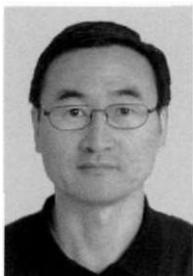
Key words: earthquake hazard prediction, casualty, trapped victim, Zhangzhou city



刘杰 中国地震局台网中心研究员。1986年毕业于北京大学地球物理系，获学士学位；1989年毕业于北京大学地球物理系，获硕士学位；1998年毕业于中国地震局地球物理研究所，获博士学位。目前从事地震预报和地震活动研究。



王海涛 新疆地震局研究员，中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地客座研究员。1982年毕业于云南大学地球物理系，获学士学位；1999年毕业于中国地震局地球物理研究所，获地震学专业博士学位。中国地震学会理事，新疆地震学会理事长。主要从事地震综合预报研究。



许建东 中国地震局地质研究所研究员。1983年毕业于北京大学地质系，获学士学位；1998年获美国纽约州立大学布法罗分校地质系博士学位。现为中国地震学会终身会员，美国地质学会（GSA）会员，联合国灾害评估与协调委员会（UNDAC）。目前的主要研究领域为火山地质、火山灾害、地震应急与救援。



刘耀炜 中国地震局地壳应力研究所研究员。1982年毕业于中国地质大学（武汉）地震地质专业。主要从事地下流体与强震前兆机理、地下流体观测技术与地震预测方法等研究。中国地震局科技委委员，中国地震局地下流体学科技术协调组组长，中国地震学会地震流体专业委员会主任。



苏有锦 云南省地震局研究员。1986年毕业于云南大学地球物理系，获学士学位；1991年毕业于中国科学技术大学固体地球物理专业，获硕士学位。主要从事地震学和地震预测预报研究。



吴小平 云南大学资源环境与地球科学学院教授。1982年毕业于云南大学地球物理系，获学士学位；1988年毕业于中国科学技术大学地球与空间科学系，获硕士学位；2000年毕业于中国科学院云南天文台，获博士学位。主要从事地震学、岩石力学、重力学与固体潮、地球动力学的教学与科研工作。



崔庆谷 云南省地震局高级工程师，2002年毕业于中国地震局地球物理研究所，获博士学位。主要从事地震及前兆观测技术研究工作。



周青云 中国地震局地震预测研究所在职研究生。2008年毕业于北京大学地球物理专业，获学士学位。主要从事震源过程、地震定位及地震活动性分析研究。

注：皇甫岗、秦嘉政、付虹、钱晓东、张建国、崔建文、毛先进、杨润海、毛玉平等人的个人简介已分别刊登在本刊的 Vol.30 No.3, Vol.28 No.4, Vol.30 No.1, Vol.29 No.1, Vol.29 supp, Vol.29 No.4, Vol.31, No.2, Vol.29 No.4, Vol.30 No.3.