

汶川 8.0 级地震序列时空分布研究

姜振泉, 刘芙荣, 徐瑞朋

(中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 基于四川防震减灾信息网以及中国地震台网中心、中国地震信息网、国家地震科学数据共享中心提供的汶川 8.0 级地震目录资料, 对 2008 年 5 月 12 日至 2010 年 3 月 1 日共 1 613 次 3.0 级及以上余震的地震序列进行了时空分布分析。结果表明: 汶川 8.0 级地震的余震大致可分为 7 个阶段, 主震后 18 天应列为大地震强余震发生的警戒时间; 地震序列的 b 值为 0.751, 印证了在类型相同的情况下主震震级越大 b 值越高的观点; 地震序列的 p 值为 1.117, 与全球地震衰减速率相当; 汶川地震的余震分布主要沿龙门山断裂走向北东向扩展, 且具有明显分区性, 自南向北分为南、中、北 3 区段, 南区为地震起始破裂段, 地震后期余震则主要分布在北区; 震源深度分布在 10~40 km, 集中在 10~20 km, 表明龙门山断裂主要发生在中上地壳, 且震源深度由南向北呈现逐渐变浅的趋势; 震源深度扩展, 南区呈明显脉冲状, 中区主要是依次由 15、30、25 km 深度向深、浅层同时扩展, 北区余震深度分布呈“乙”字型, 最后稳定在 15 km 左右。

关键词: 地震序列; $M_s \geq 3$ 级余震; 时空分布; 龙门山断裂; 汶川地震

中图分类号: P315.75 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2011)04-0428-06

Study on Temporal and Spatial Distributions of Seismic Sequence of the $M_s=8.0$ Wenchuan Earthquake

JIANG Zhen-quan, LIU Fu-rong, XU Rui-peng

(School of Resource and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the earthquake catalogue of the $M_s=8.0$ Wenchuan Earthquake from Sichuan Earthquake Information Network, China Earthquake Networks Center, China Earthquake Information Nets and National Earthquake Scientific Data Sharing Center, the temporal and spatial distributions of seismic sequence of 1 613 aftershocks with $M_s \geq 3$ from May 12th, 2008 to March 1st, 2010 were analyzed. The results showed that the aftershocks of the $M_s=8.0$ Wenchuan Earthquake could be divided into seven stages, and the 18 days after principal shock should be the alert time for the strong aftershock; the b value of seismic sequence was 0.751, which confirmed the view ‘the greater magnitude, the higher b value’; the p value of seismic sequence was 1.117, which was considerable to global seismic attenuation rate; the distribution of aftershocks expanded along northeast direction of Longmen Mountain Fault, and was obviously zonal; the distribution of aftershocks could be divided into south, middle and north sections, and the south section was the starting part of earthquake rupture while the later aftershocks distributed mainly in the north section; focal depths were 10~40 km, especially 10~20 km, which showed that the Longmen Mountain Fault were mainly in the upper crust and the focal depth gradually decreased from south to north; focal depth expanded, and the distributions of aftershocks in south section were obviously pulsed, and the distribution in middle section expanded respectively from 15, 30, 25 km focal depths to deep and shallow at the same time, and the distributions in north section were flexural and were about 15 km steadily in the end.

Key words: seismic sequence; aftershock with $M_s \geq 3$; temporal and spatial distributions; Longmen Mountain Fault; Wenchuan Earthquake

收稿日期: 2011-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41102201); 中国博士后基金项目(2011M500971)

作者简介: 姜振泉(1956-), 男, 山东威海人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, 从事工程地质及灾害地质研究。E-mail: jiangzhenquan123@163.com

0 引言

地震序列是指在一定的时空范围内连续发生的一系列地震,且其发震机制具有某种内在联系或有共同发震构造的一组地震的总称。长期以来,由于其时间、地点上的集中性而成为地震研究的热点之一。地震序列不仅反映了地震的时空分布规律,而且在地震预报方面更是测震学的重要内容^[1]。

目前,中国大陆地区面波震级 $M_s \geq 5.0$ 地震序列特征已有较系统的研究^[2-3]。但8.0级及以上地震序列则由于地震资料不丰富,对其地震序列特征了解还不成熟^[4]。因此,笔者选取2008年5月12日14时28分发生在四川省汶川县的8.0级地震序列进行研究,加深对8.0级地震序列的了解。

另外,关于汶川8.0级地震余震的持续时间还不确定,目前有关学者关于地震序列研究给出的时间尺度偏小,必然影响序列目录的完整性,难以充分反映汶川地震的时空分布规律^[5-12]。根据吴开统等统计结果^[1],地震序列与震级的关系采用

$$\lg T_N = 0.70(\pm 0.08)M - 2.62(\pm 0.49) \quad (1)$$

式中: T_N 为持续时间; M 为主震震级(均取 M_s)^[1]。由式(1)可粗略计算出汶川地震余震的持续时间为1.5~3.5年,因此可将2008年5月12日至2010年3月1日在龙门山断裂带发生的地震活动视为汶川8.0级地震的余震序列。

笔者以汶川地震8.0级主震及龙门山断裂带上发生的截止2010年3月1日的3.0级以上的1613次余震为研究对象(资料来自于四川防震减灾信息网以及中国地震台网中心、中国地震信息网、国家地震科学数据共享中心),具体研究范围为包围震源区区域($30.0^\circ \sim 33.5^\circ \text{N}$, $102.5^\circ \sim 106.0^\circ \text{E}$)。根据统计学原理,对汶川地震序列从时间和空间两方面进行统计分析。

1 地震序列时间上的分布

自2008年5月12日至2010年3月1日,在龙门山断裂带共记录到3级以上地震1613次。其中7级以上0次,6.0~6.9级8次,5.0~5.9级41次,4.0~4.9级264次,3.0~3.9级1300次,最大余震为6.4级。

1.1 3级以上地震时序分布

主震震级8.0级,到2010年3月1日为止,主震释放的能量约占全序列的98.3%。汶川地震之后的最大级地震为6.4级,时间为2008年5月

25日16点21分。另外,还发生了一系列6级以上强余震。截止到2010年3月1日汶川地震余震的每日最大震级曲线见图1。

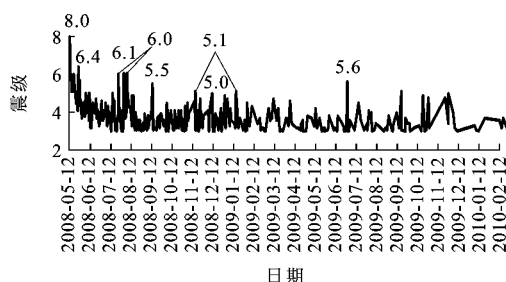


图1 汶川地震余震每日最大震级曲线

Fig. 1 Curve of Maximum Magnitude per Day for Aftershocks of Wenchuan Earthquake

由图1可直观将汶川地震余震分为7个阶段,地震后初期的发震概率最大,时间尺度最短(只有18天)而发生强余震频度最大,这是一个危险的时间段,由于最容易发生强余震,所以应将它列为大地震后强余震发生的警戒时间。此时间段后,基本40天左右为一个阶段,分为3个阶段。第一阶段每日最大震级基本在4、5级,分布较平稳;第二阶段出现连续的6级以上强余震;第三阶段每日最大震级基本在5级以下,其中有个5.5级;总体来说,地震释放能量呈逐渐衰减的态势,中间起伏较大。150天后,地震强度持续降低,中有起伏,但相对比较平稳。可见此次汶川8.0级地震为典型的主震余震型,余震活动丰富,持续时间比较长,起伏剧烈。

1.2 3级以上地震日频次统计

从余震日频度曲线可以看出汶川地震频度衰减的情况(图2)^[13]。目前,一般用大森-宇津公式 $N_t = N_0 t^{-p}$ 来表示。其中: N_t 为地震频度, t 为时间; N_0 为第一单位时间内的地震次数; p 为表征地震频度

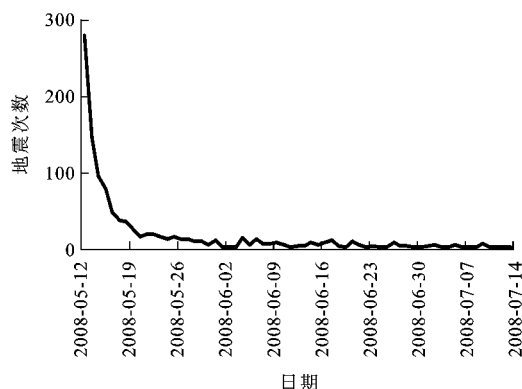


图2 汶川地震序列余震日频度曲线

Fig. 2 Curve of Aftershock Frequency per Day for Seismic Sequence of Wenchuan Earthquake

衰减快慢的衰减系数。对汶川地震序列而言,统计 3 级以上地震的 p 值,其拟合曲线为: $N_i = 263t^{-1.117}$, p 为 1.117 (统计时间为 2008 年 5 月 12 日到 2008 年 7 月 14 日),与唐山地震的 0.98^[13] 相比,地震衰减速率较快,与全球地震衰减速率相当^[14]。

1.3 3 级以上地震震级-频度关系

古登堡-里希特(Gutenberg-Richter)震级频度关系 b 值是刻画地震序列的重要参数。一般来说, b 值越小,震级较高的地震所占比例愈大^[15]。图 3 对震级的分划为 0.1 个震级的间隔,应能较真实地反映地震序列的 b 值。

由图 3 可知,汶川 8.0 级地震序列的 b 值为 0.751。并得出拟合直线方程

$$\lg N = 4.595 - 0.751M \quad (2)$$

式中: N 是某一震级的频度。由上述拟合直线方程计算的 b 值截距为 6.12,与目前震后最大余震 6.4 级相差 0.28 级,与震后一个月根据 b 值截距法所估算的 6.14 差别不大^[16]。这证明震后可根据 b 值截距法对最大余震做出初步预测。

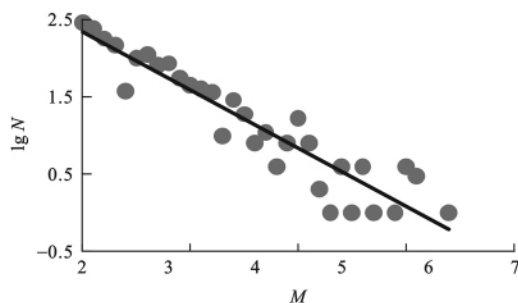


图 3 地震序列 b 值曲线

Fig. 3 Curve of the b Value for Seismic Sequence of Wenchuan Earthquake

根据中国大陆 1966 年以来 20 次 7 级以上地震的 b 值统计,可知此次汶川 8.0 级地震 b 值高于所有之前发生的主震余震型地震 b 值,从而进一步证实前人提出的地震序列 b 值与主震震级和序列类型有关的观点。在类型相同的情况下,主震震级越大,地震序列 b 值越高^[17]。

2 地震序列空间上的分布

2.1 余震震中分布

图 4 是根据 $M_s \geq 3$ 的地震绘制的汶川 8.0 级地震余震分布图。由图 4 可知,余震主要沿北东向龙门山断裂带呈条形展布,余震序列沿走向分布长度达 330 km。余震区根据走向及展布宽度可明显

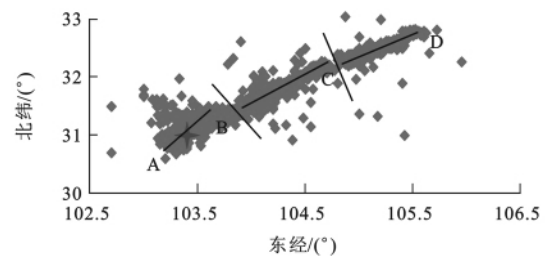


图 4 汶川地震 $M_s \geq 3$ 级余震分布

Fig. 4 Distribution of Aftershocks with $M_s \geq 3$ in Wenchuan Earthquake

分为 3 段^[18-19],走向呈现由北东向北东东向转变的过程,宽度则由南向北逐渐变窄。主震基本位于整个地震序列最南端。

余震南段地震区 AB 段最大宽度约 80 km,主要集中在 40 km 左右,包括汶川县大金坪和映秀镇、都江堰市虹口乡、彭县小鱼洞、绵竹市汉旺镇和清平乡以及理县米亚罗镇以东的地区,长约 135 km^[20]。汶川地震后,龙门山断裂带上共记录 3 级以上地震 1 613 次,发生在 AB 段 766 次,将近一半;5~5.9 级地震共 41 次,发生在这一区域 19 次;8 次 6 级以上地震中 3 次发生在这一区域,并且距地震主震时间比较近的几次较大余震也发生在这一区域。这说明余震南段是汶川 8.0 级地震起始主破裂段。

余震中段地震区 BC 段主要从安县高川经北川到平武南坝区,长度约 90 km^[20],宽度约 30 km。发生在这一区域段 3 级以上地震 443 次。其中 5~5.9 级 13 次,6 级以上 1 次。可见 BC 段是三段区域中相对比较平静的区域,强余震发生较少。

余震北段地震区 CD 段主要从平武到青川,长度约 100 km,宽度约 20 km^[20]。发生在这一区域段 3 级以上地震 404 次,与 BC 段基本相当。其中 5~5.9 级 9 次,6 级以上 4 次,最强余震青川 6.4 级地震发生在该段。强余震活动比较频繁,尤其在震后 7 天后,大部分余震发生在这一区域。这可能是由于断裂终端具有较高的应力累积状态,在序列调整过程中再次发生错动以释放应力造成的。

2.2 余震区的平面扩展

众所周知,余震区在主震发生时只有一定的范围,以后慢慢发展,并经过一个稳定时期形成最终余震区。针对 50 次 5 级以上余震的扩展,总体来说,汶川地震余震基本沿着龙门山断裂带呈北东向条状展布,且主要在震中北端,呈现明显的单侧破裂。初始破裂集中在余震区南段,之后呈跳跃状有往复地

逐渐向北段扩展,其中有向北西向扩展的趋势,可能为一分支断裂,也可能是此处倾角缓、破裂区宽度较大的缘故。余震后期,北段活动强度较大,但也有由北逐渐向南扩展的趋势,中段地震强度较小。一定时期的地震分布具有区域性。因此,一个区域在发生一次强余震后,更要注意第二次强余震的发生。

2.3 余震震源深度分布

震源深度作为地震的基本参数之一,为地震孕育、发生的深部环境等提供了重要研究线索^[21-22]。汶川地震主震深度为 14 km^[23]。另外根据前面将余震分成的南、中、北 3 个区域,分别对余震震源深度做以统计(表 1、2)。

表 1 显示 17 个中强余震主要分布在 10~20 km 的深度范围内,表明这些余震位于中上地壳。

表 1 汶川地震 5.5 级以上余震的震源深度
Tab. 1 Focal Depth of Aftershocks with $M_s \geq 5.5$ in Wenchuan Earthquake

经度	纬度	震级	深度/km	区段
104.10°E	31.40°N	5.6	20	BC
105.60°E	32.90°N	5.5	6	CD
105.48°E	32.78°N	6.1	10	CD
104.70°E	32.10°N	6.1	20	BC
105.47°E	32.82°N	6.0	10	CD
105.55°E	32.80°N	5.6	10	CD
105.58°E	32.77°N	5.7	19	CD
105.33°E	32.55°N	6.4	21	CD
104.90°E	32.25°N	6.0	22	BC
103.18°E	31.35°N	5.9	15	AB
103.38°E	31.32°N	5.6	43	AB
103.20°E	30.95°N	6.1	33	AB
103.82°E	31.42°N	5.6	36	AB
103.42°E	31.30°N	6.0	33	AB
103.65°E	31.25°N	6.0	14	AB
103.58°E	31.27°N	5.5	13	AB
103.40°E	31.00°N	8.0	14	AB

表 2 汶川地震 3 级以上余震深度分布频次
Tab. 2 Frequency Distribution of Focal Depth of Aftershocks with $M_s \geq 3$ in Wenchuan Earthquake

区段	深度分布频次				
	<10 km	10~20 km	20~30 km	30~40 km	>40 km
AB	142	269	181	59	9
BC	90	201	86	36	15
CD	76	144	89	18	2

结合龙门山断裂带周边其他较大震级地震事件的研究结果,推测龙门山断裂带的最新活动主要限于中上地壳内。发生在 AB 段的强余震深度分布在 15~45 km,集中分布在 30 km;发生在 BC 段的强余震深度都在 20 km 左右分布;而 CD 段为 6~20 km,呈现自南向北震源深度逐渐变浅的趋势。

表 2 显示汶川地震 3 级以上余震深度范围在小于 10 km、10~20 km、20~30 km、30~40 km 的分布频次比例均为 3:6:3:1,AB 段集中分布在 10~40 km,BC 段集中分布在 10~40 km,CD 段集中分布在 10~30 km。震源深度发展趋势与 17 次强震趋势基本相同。

2.4 余震震源深度扩展

余震活动向深部的扩展使余震活动范围不断扩大,地震能量不断得到释放。笔者分别对汶川地震余震的南、中、北 3 个区域 4 级以上地震深度随时间的变化进行统计(图 5)。

南区的主破裂初始扩展朝上部和向下部同时存在,但后期整体趋势为脉冲式,在 15~25 km 之间起伏。中段的地震分布明显少于南段,5 月 12 日深度扩展主要是从主震破裂向上下发展;13 日从 15~30 km 同时向中间发展;14~17 日,基本以日为单位呈现由浅到深的扩展,18 日之后则由深向浅部扩展;2008 年 6 月 1 日后,深度依次从 15、30、25 km 左右向上下同时扩展。北区的初始扩展基本以 20 km 为中心,向上下扩展,到 2008 年 6 月 17 日,震源深度在 10~20 km 之间;2008 年 6 月 17 日之后的两个月内,大部分余震维持在 10 km 左右;2008 年 8 月 15 日之后,深度逐渐变大到 25 km,继而缓慢上升,维持到 15 km 左右;整体趋势呈“乙”字型。

总体来说,与主震前相比,主震后震源都向深层和浅层双侧扩展。南区呈明显脉冲状;中区依次由 15、30、25 km 向深、浅层同时扩展;北区余震深度分布呈“乙”字型,最后稳定在 15 km 左右。

3 结语

(1)汶川 8.0 级地震余震大致可分为 7 个阶段,主震后 18 天应列为大地震强余震发生的警戒时间。

(2)地震序列的 b 值为 0.751,印证了前人提出的在类型相同情况下主震震级越大序列 b 值越高的观点,可对地震后最大余震做出推测;地震序列的 p 值为 1.117,与全球地震衰减速率相当。

(3)汶川地震的余震分布主要沿龙门山断裂走

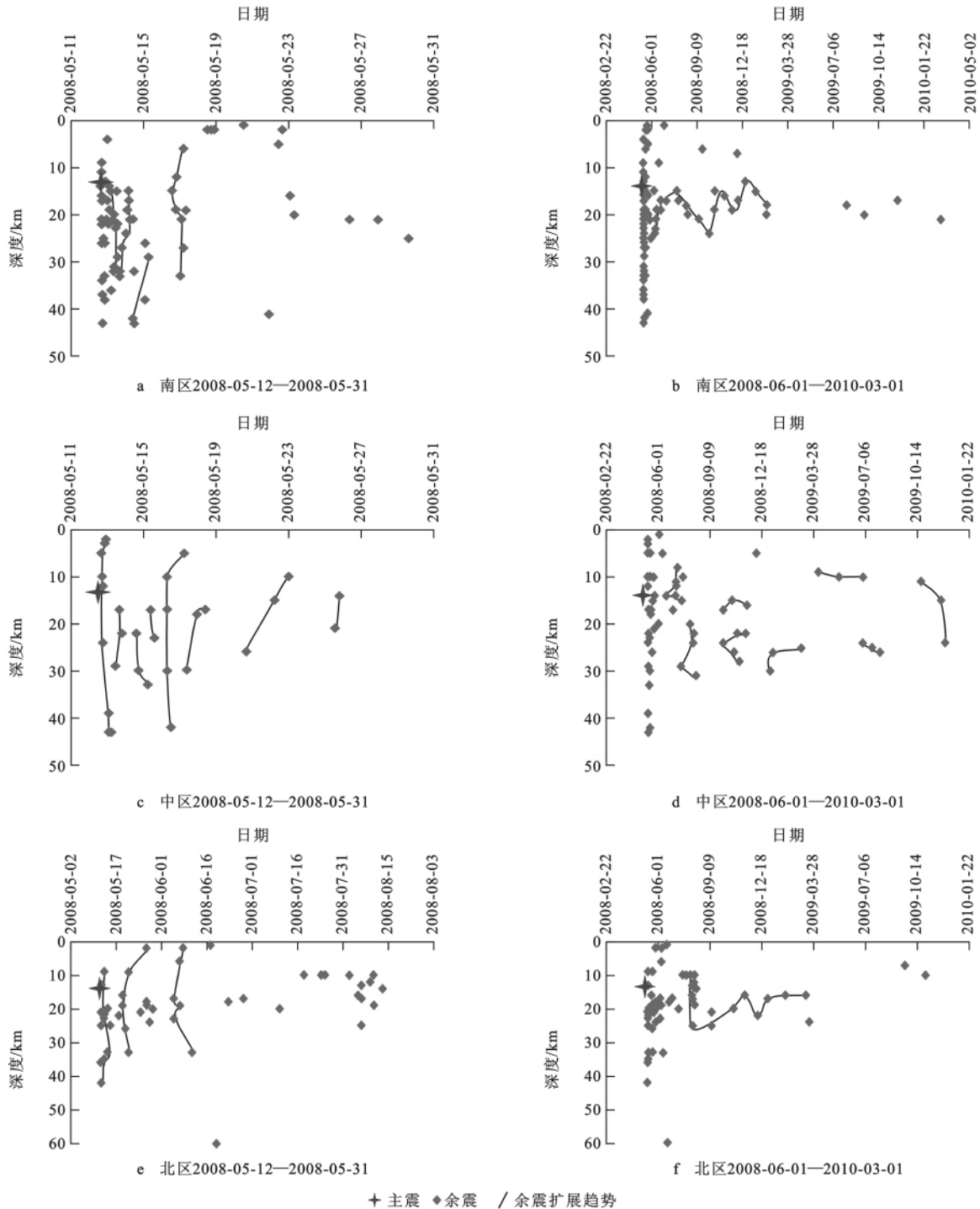


图 5 南、中、北 3 个区域 4 级以上地震震源深度扩展

Fig. 5 Expansion of Focal Depth of Earthquakes with $M_s \geq 4$ in South, Middle and North Sections

向北东向扩展,且具有明显分区性,自南向北分为南、中、北 3 段。南区为地震起始破裂段,地震后期余震则主要分布在北区,呈现明显单侧破裂特征;震源深度分布在 10~40 km,集中在 10~20 km,表明龙门山断裂的最新活动主要发生在中上地壳,且震源深度由南向北呈现逐渐变浅的趋势。

(4)震源深度扩展,南区呈明显脉冲状;中区主

要是依次由 15、30、25 km 深度向深、浅层同时扩展;北区余震深度分布呈“乙”字型,最后稳定在 15 km 左右。

参考文献:

- [1] 吴开统,焦远碧,吕培苓,等.地震序列概论[M].北京:北京大学出版社,1990.

- [2] 蒋海昆,傅征祥,刘杰,等. 中国大陆地震序列研究[M]. 北京:地震出版社,2007.
- [3] 蒋海昆,李永莉,曲延军,等. 中国大陆中强地震序列类型的空间分布特征[J]. 地震学报,2006,28(4):389-398.
- [4] 苏有锦,赵小艳. 全球8级地震序列特征研究[J]. 地震研究,2008,31(4):308-316.
- [5] 王青,李国蓉,梁斌,等. 龙门山地震带5.12汶川地震余震空间分布特征[J]. 地质科技情报,2009,28(2):1-6.
- [6] 李志雄,邵志刚,赵翠萍,等. 汶川8.0级地震序列活动的分段性研究[J]. 地震,2009,29(1):26-32.
- [7] 蒋海昆,黎明晓,吴琼,等. 汶川8.0级地震序列及相关问题讨论[J]. 地震地质,2008,30(3):746-758.
- [8] 程万正,阮祥,张致伟. 汶川8.0级地震序列及震型判定[J]. 地震,2009,29(1):15-25.
- [9] 程万正. 汶川8.0级地震序列的时空扩展与强余震趋势的阶段估计[J]. 四川地震,2009(4):1-11.
- [10] 华卫,陈章立,郑斯华. 2008年汶川8.0级地震序列震源参数分段特征的研究[J]. 地球物理学报,2009,52(2):365-371.
- [11] 王卫民,赵连锋,李娟,等. 四川汶川8.0级地震震源过程[J]. 地球物理学报,2008,51(5):1043-1410.
- [12] 刘凯,廖顺宝,张赛. 中国地震发生频率与烈度的空间分布[J]. 地理科学进展,2008,27(3):13-18.
- [13] 陈非比,张建华,刘秉良. 唐山地震[M]. 北京:地震出版社,1979.
- [14] Utsu T. Aftershocks and Earthquake Statistics: Some Parameters Which Characterize Aftershock Sequence and Their Interrelation[J]. Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Series 7, 1969(2):129-195.
- [15] 王俊,阮祥,郑江蓉,等. 汶川地震序列b值的分析研究[J]. 地震地磁观测与研究,2009,30(2):15-21.
- [16] 韩志军,王桂兰,周成虎,等. 地震序列研究现状与研究方向探讨[J]. 地球物理学进展,2003,18(1):74-78.
- [17] 焦远碧. 地震序列类型、地震序列b值与地震大形势关系初探[J]. 地震,1998,18(1):33-40.
- [18] 彭建兵,马润勇,范文,等. 汶川大震的科学思考[J]. 地球科学与环境学报,2009,31(1):1-29.
- [19] 白贵霞,程传录,郭春喜,等. 汶川地震地形形变监测与分析[J]. 地球科学与环境学报,2010,32(2):205-210.
- [20] 吕坚,苏金蓉,靳玉科,等. 汶川8.0级地震序列重新定位及其发震构造初探[J]. 地震地质,2008,30(4):917-925.
- [21] 刘春,吴忠良,蒋长胜. 汶川地震序列中较大深度余震的一种可能的直接观测证据[J]. 中国地震,2009,6(2):113-122.
- [22] 秦四清,熊巨华,薛雷,等. 强震的孕育规律与孕震模式[J]. 地球科学与环境学报,2011,33(3):311-316.
- [23] 杨国栋. 汶川8.0级地震序列动态跟踪过程对地震预报的启示[J]. 西北地震学报,2009,31(2):201-206.

(上接第427页)

- [41] 杨卫波,施明恒,陈振乾. 基于解析法的地下岩土热物性现场测试方法的探讨[J]. 建筑科学,2009,25(8):60-64.
- [42] Ingersoll L R, Zobel O J, Ingersoll A C. Heat Conduction with Engineering, Geological and Other Applications [M]. New York: McGraw Hill, 1954.
- [43] 刘正华,陈汝东,李芑,等. 土壤源热泵系统埋地换热器换热性能研究[J]. 流体机械,2007,35(3):63-67.
- [44] 张于峰,陈成敏,聂金哲,等. U型埋管系统地下传热数值模拟[J]. 天津大学学报,2010,43(8):717-721.
- [45] 王余富,谢永利. 岩石导热系数确定的一种新方法[J]. 低温建筑技术,2009(9):11-12.
- [46] 闵凯,刘斌,温广. 导热系数测量方法与应用分析[J]. 保鲜与加工,2005,5(6):35-38.
- [47] 沈珍瑶,李国鼎,李书绅. 高压实膨润土的导热性能[J]. 大坝观测与土工测试,1998,22(3):39-40.
- [48] 彭担任,王占国,孙新刚,等. 煤层岩体中声波速度与导热系数的关系[J]. 矿业安全与环保,1999(1):11-13.
- [49] 欧新功,金振民,夏斌,等. 利用超高压变质岩的P波速度估算地下岩石的热导率[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2006,31(4):564-568.