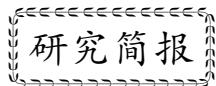


孙银涛, 徐国栋, 龙海云, 许立红. 2016. 震级与破裂长度统计关系研究. 地震学报, 38(5): 803-806. doi:10.11939/jass.2016.05.014.

Sun Y T, Xu G D, Long H Y, Xu L H. 2016. Relationship between magnitude and rupture length. *Acta Seismologica Sinica*, 38(5): 803-806. doi:10.11939/jass.2016.05.014.



震级与破裂长度统计关系研究^{*}

孙银涛¹⁾ 徐国栋^{1),*} 龙海云²⁾ 许立红¹⁾

1) 中国河北三河 065201 防灾科技学院

2) 中国北京 100045 中国地震台网中心

关键词 矩震级 面波震级 破裂长度 断层类型

doi:10.11939/jass.2016.05.014 中图分类号: P315.5 文献标志码: A

Relationship between magnitude and rupture length

Sun Yintao¹⁾ Xu Guodong^{1),*} Long Haiyun²⁾ Xu Lihong¹⁾

1) Institute of Disaster Prevention, Hebei Sanhe 065201, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Key words: moment magnitude; surface wave magnitude; rupture length; fault type

本文在收集整理分析中国大陆 1902—2014 年 132 次板内浅源地震事件的相关数据(包括震级、发震时间、地点、断层类型、地震矩、地表破裂长度、余震分布长度、波谱反演得到的震源处破裂长度等)的基础上, 给出了震级与震源破裂长度和余震分布长度的经验公式, 并对震级与破裂长度之间的相关性进行了分析. 表 1 给出了本文所用部分地震序列的相关参数.

表 1 本文所用部分地震序列及其相关参数

Table 1 Partial earthquake sequences of China and related parameters used in this paper

序号	发震时刻		地点	北纬 /°	东经 /°	M_0 /(10^{18} N·m)	中国 M_s	美国 M_s	M_w	L_1 /km	L_2 /km	L_3 /km	断层类型	来源	
	年-月-日	时:分													
1	1988-11-06	21:03	云南澜沧	22.9	99.8	36.6	7.6	7.3	7.0	70	70		右旋	邓起东等(1992)	
2	1996-02-03	19:14	云南丽江	27.3	100.2	9.94	7.0	6.5	6.6		42	41	正	蒋海昆等(2007)	
3	2008-03-21	06:33	新疆于田	35.6	81.6	54.3	7.3	7.3	7.1	31			正	徐锡伟等(2011)	
4	2008-05-12	14:28	四川汶川	31.0	103.4	897	8.0	8.1	7.9		300		逆	张勇等(2008)	
5	2010-04-14	07:49	青海玉树	33.2	96.6			7.1		6.9	65	65		走滑	陈立春等(2010)
6	2013-04-20	08:02	四川芦山	30.3	103.0	10.2	7.0	6.8	6.6		40		逆	苏金蓉等(2013)	
7	2014-08-03	16:30	云南鲁甸	27.1	103.3	2.12	6.5	6.2	6.2		22		走滑	张广伟等(2014)	
8	2014-10-07	21:49	云南景谷	23.4	100.5	1.89	6.6	6.1	6.1		20		左旋	徐甫坤等(2015)	

注: M_0 为地震矩, L_1 表示地表破裂长度, L_2 表示余震长度, L_3 表示基于波谱方法得到的震源处破裂长度.

* 基金项目 国家科技支撑计划(2013BAK05B02)和中央高校基本科研业务费(ZY20150315)联合资助.

收稿日期 2016-01-24 收到初稿, 2016-03-31 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: gdxu1850@qq.com



本文所用面波震级有两种：一种是采用中国记录的面波震级（下文简称为中国面波震级） $M_{S\text{-China}}$ ，另一种是采用美国地质调查局（USGS）和全球地震矩张量（global centroid moment tensor，简写为 GCMT）目录所记录的面波震级（下文简称为美国面波震级） $M_{S\text{-US}}$ ，数据均从 USGS 和 GCMT 网站上下载所得，其中 1976 年以前的 $M_{S\text{-US}}$ 引自 USGS，1976 年以后的 $M_{S\text{-US}}$ 引自 GCMT。所用矩震级也分为两部分：1976 年以后的地震事件矩震级 M_w 引自 GCMT，1976 年之前的矩震级 M_w 引自 USGS，GCMT 和相关文献。所有矩震级均保留一位小数，参与回归分析。

图 1a 给出了美国面波震级 $M_{S\text{-US}}$ 与矩震级 M_w 的回归关系，可以看出： $M_{S\text{-US}}$ 为 5.5—7.7 时，其值与 M_w 基本相等； $M_{S\text{-US}}$ 为 4.5—5.5 时，其值较 M_w 整体偏小； $M_{S\text{-US}} > 7.7$ 时，其值较 M_w 整体偏大。图 1b 给出了中国面波震级 $M_{S\text{-China}}$ 与矩震级 M_w 的回归关系，可以看出， $M_{S\text{-China}}$ 为 4.5—8.6 时， $M_{S\text{-China}} > M_w$ ，但随着震级的增大，这种差距在减小。图 1c 给出了 $M_{S\text{-China}}$ 与 $M_{S\text{-US}}$ 的对比，可以看出，二者的相对平均偏差为 5.5%，最大绝对偏差为 0.19，而且相对偏差大于 10% 的 $M_{S\text{-China}}$ 主要集中在 4.5—6.0 之间。

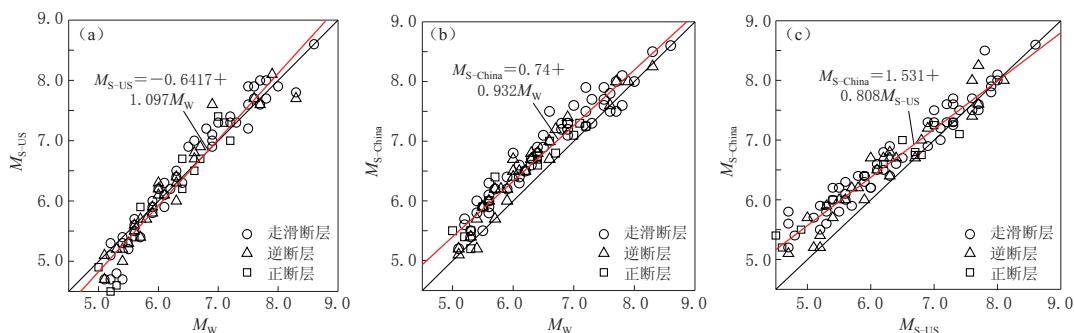


图 1 美国面波震级($M_{S\text{-US}}$)、中国面波震级($M_{S\text{-China}}$)及矩震级(M_w)的关系

(a) $M_{S\text{-US}}$ 与 M_w 的关系；(b) $M_{S\text{-China}}$ 与 M_w 的关系；(c) $M_{S\text{-China}}$ 与 $M_{S\text{-US}}$ 的关系

Fig. 1 Relationship among surface wave magnitude of US ($M_{S\text{-US}}$), surface wave magnitude of China ($M_{S\text{-China}}$) and moment magnitude M_w

(a) $M_{S\text{-US}}$ versus M_w ; (b) $M_{S\text{-China}}$ versus M_w ; (c) $M_{S\text{-China}}$ versus $M_{S\text{-US}}$

震源破裂长度的估算方法中，有两种应用得较多。其一，采用余震空间分布的方法来确定；其二，采用地震波资料反演震源参数，通过 P 波或 S 波的时频特性来求解震源的破裂参数（沈建文等，1990）。鉴于 $M_s < 6.0$ 地震所造成的破裂不明显或位移不显著，本文选取 $M_s 6.0—8.6$ 地震事件用于拟合震级与断层破裂长度的关系。

针对不同的断层类型，利用最小二乘法计算分析了中国面波震级($M_{S\text{-China}}$)、美国面波震级($M_{S\text{-US}}$)、平均面波震级(\bar{M}_s)、矩震级与地表破裂长度、余震破裂长度和基于波谱分析所获取的地下破裂长度之间的关系。因 $M_{S\text{-China}}$ 与 $M_{S\text{-US}}$ 的偏差不大，这里仅给出平均面波震级 \bar{M}_s 与地表破裂长度和地下破裂长度之间的拟合表达式，具体列于表 2。本文参考 Wells 和 Coppersmith(1994)的方法，通过改变数组的大小来评估各种相关关系的稳定性，并通过在每组数据中抽出两组数据后观察其相关系数的变化来检测数据拟合的稳定性。结果显示：数据点为 10 个或 10 个以上时，震级与破裂长度之间的相关性较好，两组数据的回归系数在 95% 的置信水平下无明显区别，其相关系数的差值基本上都在小数点后两位；8 个数据点以下的回归则视为不稳定。因此在地表破裂长度以及由波谱反演得到的地下破裂长度回归方程中仅分析走滑断层和所有断层两种情况下的回归公式，以便根据各个回归关系式的相关系数来评估震级与破裂长度之间的相关性。

从表 2 可以看出：地表破裂长度与面波震级的相关性优于其与矩震级的相关性；余震破裂长度和基于波谱反演所得地下破裂长度与矩震级的相关性优于其与面波震级相关性。图 2a 比较了本文所得经验公式与邓起东等(1992)给出的经验公式(以下简称邓式)，可以看出，当 M_s 为 6.4—8.6 时邓式所对应的地

表 2 震级与破裂长度的回归关系式

Table 2 Regression relationship between magnitude and rupture length

经验公式	断层类型	a	b	相关系数	标准差	震级范围	样本数
$M_S = a + b \lg L_1$	走滑	5.7040	0.9871	0.774	0.2699	6.9—8.6	20
	所有	5.9024	0.8954	0.823	0.2803	6.4—8.6	30
$M_W = a + b \lg L_1$	走滑	5.0865	1.2114	0.731	0.3766	6.4—8.6	21
	所有	5.3162	1.1201	0.753	0.3906	6.0—8.6	29
$M_S = a + b \lg L_2$	走滑	3.7380	1.9259	0.899	0.3589	5.0—8.1	37
	逆	4.2191	1.3478	0.786	0.4363	4.9—8.1	26
	正	3.5181	1.7882	0.543	0.5912	4.9—7.3	10
	所有	3.8235	1.7325	0.817	0.4594	4.9—8.1	78
$M_W = a + b \lg L_2$	走滑	3.7505	1.7830	0.898	0.3373	5.1—7.8	38
	逆	4.2674	1.2002	0.816	0.3393	5.1—7.9	28
	正	3.4062	1.8221	0.880	0.2941	5.0—7.0	16
	所有	3.8005	1.6414	0.853	0.3746	5.0—7.9	82
$M_S = a + b \lg L_3$	走滑	3.5189	2.0049	0.833	0.5492	5.1—8.0	16
	所有	3.5577	2.0162	0.812	0.5548	4.9—8.0	21
$M_W = a + b \lg L_3$	走滑	3.6598	1.8143	0.848	0.4343	5.2—7.7	20
	所有	3.7433	1.7899	0.836	0.4259	5.2—7.7	25

注: 第一列经验公式中, L_1 表示地表破裂长度, L_2 表示余震破裂长度, L_3 表示基于波谱反演所得的地下破裂长度.

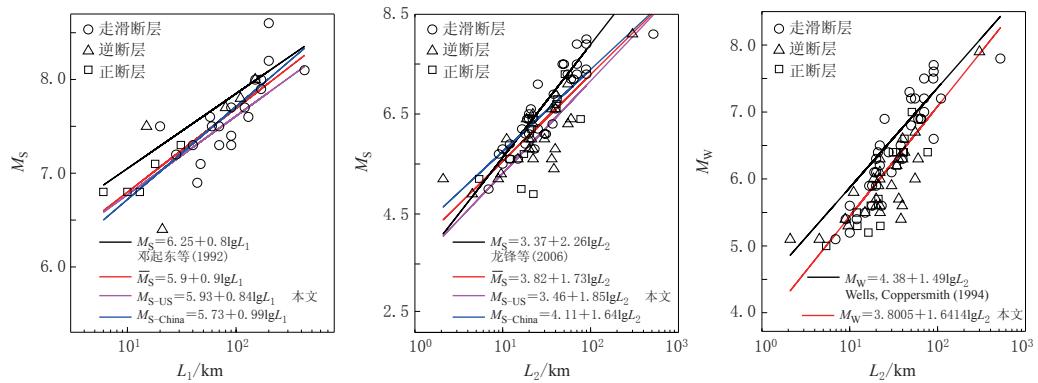


图 2 破裂长度与震级的回归关系

(a) 地表破裂长度 L_1 与 M_S 的关系; (b) 地表破裂长度 L_2 与 M_S 的关系;

(c) 地表破裂长度 L_2 与 M_W 的关系

Fig. 2 Regression relationship among rupture length and magnitude

(a) Surface rupture length L_1 versus M_S ; (b) Underground rupture length L_2 versus M_S ; (c) L_2 versus M_W

表破裂长度 L_1 始终小于本文结果, 并且随着震级的增大, 由邓式计算出的破裂长度增大的速率大于本文公式, 这可能是由于本文仅使用了 1902 年以后的地震数据并增加了最新的地震数据所致; 图 2b 中, 当 $M_S > 5.3$ 时, 本文结果大于龙锋等(2006)的经验公式所确定的地下破裂长度; 图 2c 为本文结果与 Wells 和 Coppersmith(1994)经验公式所得结果的比较, 可以看出, 本文经验公式所对应的由余震确定的地下破裂长度总体比 Wells 和 Coppersmith(1994)所得结果大, 但是随着震级的增大, 这种差距在逐渐减小.

通过比较不同断层类型的回归方程来评估断层类型对破裂长度的影响, 其结果表明, 震级与破裂长度的回归方程在 95% 的置信水平上与断层类型无关, 这与 Wells 和 Coppersmith(1994)的结果相一致.

参 考 文 献

陈立春, 王虎, 冉勇康, 孙鑫喆, 苏桂武, 王继, 谭锡斌, 李智敏, 张晓清. 2010. 玉树 $M_S 7.1$ 级地震地表破裂与历史大

- 地震[J]. 科学通报, **55**(13): 1200–1205.
- Chen L C, Wang H, Ran Y K, Sun X Z, Su G W, Wang J, Tan X B, Li Z M, Zhang X Q. 2010. The $M_{\text{S}}7.1$ Yushu earthquake surface rupture and large historical earthquakes on the Garzê-Yushu fault[J]. *Chinese Science Bulletin*, **55**(31): 3504–3509.
- Deng起东, 于贵华, 叶文华. 1992. 地震地表破裂参数与震级关系的研究[G]//活动断裂研究(2). 北京: 地震出版社: 247–264.
- Deng Q D, Yu G H, Ye W H. 1992. Relationship between earthquake magnitude and parameters of surface ruptures associated with historical earthquakes[G]// *Research on Active Fault* (2). Beijing: Seismological Press: 247–264 (in Chinese).
- 蒋海昆, 郑建常, 吴琼, 曲延军, 李永莉, 代磊. 2007. 中国大陆中强以上地震余震分布尺度的统计特征[J]. 地震学报, **29**(2): 151–164.
- Jiang H K, Zheng J C, Wu Q, Qu Y J, Li Y L, Dai L. 2007. Statistical features of aftershock distribution size for moderate and large earthquakes in Chinese mainland[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **29**(2): 151–164 (in Chinese).
- 龙锋, 闻学泽, 徐锡伟. 2006. 华北地区地震活断层的震级-破裂长度、破裂面积的经验关系[J]. 地震地质, **28**(4): 511–535.
- Long F, Wen X Z, Xu X W. 2006. Empirical relationships between magnitude and rupture length, and rupture area, for seismogenic active faults in North China[J]. *Seismology and Geology*, **28**(4): 511–535 (in Chinese).
- 沈建文, 邱瑛, 赵志贺. 1990. 震级-破裂长度关系与断层破裂模型[J]. 地球物理学报, **33**(2): 242–248.
- Shen J W, Qiu Y, Zhao Z H. 1990. Rupture length magnitude relationship and fault-rupture model[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **33**(2): 242–248 (in Chinese).
- 苏金蓉, 郑钰, 杨建思, 陈天长, 吴朋. 2013. 2013年4月20日四川芦山 $M_{\text{7.0}}$ 级地震与余震精确定位及发震构造初探[J]. 地球物理学报, **56**(8): 2636–2644.
- Su J R, Zheng Y, Yang J S, Chen T C, Wu P. 2013. Accurate locating of the Lushan, Sichuan $M_{\text{7.0}}$ earthquake on 20 April 2013 and its aftershocks and analysis of the seismogenic structure[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(8): 2636–2644 (in Chinese).
- 徐甫坤, 刘自凤, 张竹琪, 李静, 刘丽芳, 苏有锦. 2015. 2014年云南景谷 $M_{\text{S6.6}}$ 地震序列重定位与震源机制解特征[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, **40**(10): 1741–1754.
- Xu F K, Liu Z F, Zhang Z Q, Li J, Liu L F, Su Y J. 2015. Double difference relocation and focal mechanisms of the Jinggu $M_{\text{S6.6}}$ earthquake sequences in Yunnan Province in 2014[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, **40**(10): 1741–1754 (in Chinese).
- 徐锡伟, 谭锡斌, 吴国栋, 陈建波, 沈军, 方伟, 宋和平. 2011. 2008年于田 $M_{\text{S7.3}}$ 地震地表破裂带特征及其构造属性讨论[J]. 地震地质, **33**(2): 462–471.
- Xu X W, Tan X B, Wu G D, Chen J B, Shen J, Fang W, Song H P. 2011. Surface rupture features of the 2008 Yutian $M_{\text{S7.3}}$ earthquake and its tectonic nature[J]. *Seismology and Geology*, **33**(2): 462–471 (in Chinese).
- 张勇, 冯万鹏, 许力生, 周成虎, 陈运泰. 2008. 2008年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学: D辑, **38**(10): 1186–1194.
- Zhang Y, Feng W P, Xu L S, Zhou C H, Chen Y T. 2009. Spatio-temporal rupture process of the 2008 great Wenchuan earthquake[J]. *Science in China: Series D*, **52**(2): 145–154.
- 张广伟, 雷建设, 梁姗姗, 孙长青. 2014. 2014年8月3日云南鲁甸 $M_{\text{S6.5}}$ 级地震序列重定位与震源机制研究[J]. 地球物理学报, **57**(9): 3018–3027.
- Zhang G W, Lei J S, Liang S S, Sun C Q. 2014. Relocations and focal mechanism solutions of the 3 August 2014 Ludian, Yunnan $M_{\text{S6.5}}$ earthquake sequence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(9): 3018–3027 (in Chinese).
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(4): 974–1002.