

王迪,冉喜阳,龙锋,等. 2025. 川滇地区强震序列震级-破裂长度定标律特征研究[J]. 地震研究, 48(3): 370-381, doi: 10.20015/j.cnki. ISSN1000-0666. 2025. 0039.

Wang D, Ran X Y, Long F, et al. 2025. Study on the characteristics of magnitude and rupture-scale calibration law for strong earthquake sequences in Sichuan-Yunnan region[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(3): 370-381, doi: 10.20015/j.cnki. ISSN1000-0666. 2025. 0039.

# 川滇地区强震序列震级-破裂长度定标律特征研究\*

王 迪, 冉喜阳, 龙 锋<sup>✉</sup>, 赵 敏, 何 畅

(四川省地震局, 四川 成都 610041)

**摘要:** 基于1970—2021年川滇地区 $M_s \geq 5.0$ 地震序列数据, 整理已发表的震源谱、地壳形变、余震分布等研究成果, 获得125次地震的可靠破裂长度。采用最小二乘法, 建立川滇地区震级-破裂长度的线性回归关系式。从震源机制解类型、不同区域构造环境、不同时间段3个方面分析了川滇地区强震序列定标律特征。研究发现, 震级与破裂长度的对数之间存在线性关系, 表现出错动类型以及时空差异性。结果表明: 理论上在相同震级下, 逆冲型地震的破裂长度小于走滑型地震的破裂长度;  $M_s \geq 6.5$ 时, 逆冲型地震的破裂长度大于正断型地震的破裂长度;  $M_s \geq 5.5$ 时, 走滑型地震的破裂长度大于正断型地震的破裂长度; 孤立型地震序列的破裂长度低于同等级其他类型地震的破裂长度。地震监测台网高质量的观测对地震的破裂长度有着较好的约束。

**关键词:** 川滇地区; 定标律; 破裂长度; 地震序列

**中图分类号:** P315.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2025)03-0370-12

doi: 10.20015/j.cnki. ISSN1000-0666. 2025. 0039

## 0 引言

地震参数的定标律是地震学研究中的一个重要问题, 通过经验关系联系着若干个独立维度的物理量。当一次地震发生后, 利用定标律可由一个已知参量快速估算出一系列相关的参数值, 这对大震发生时快速分析地震破裂过程的某些基本特征和震情趋势判定是非常有帮助的(秦嘉政等, 2008)。在与地震相关的所有定标律中, 震级-破裂长度关系连结着能量与破坏, 在应急救援、震灾预防、中长期地震预测等方面有着重要的应用, 目前国内外已经建立起了不同区域、不同尺度的震级-破裂长度关系的定标律(龙锋等, 2006; Cheng et al., 2019)。

青藏高原是中国大陆强震发生最活跃的大尺度构造, 川滇地区作为青藏高原东部的重要边界, 处在印度板块向中国大陆NE向挤压作用的前沿地带, 区内活动断裂众多, 构造活动强烈, 是我国地震活动最频繁的地区之一(张培震等, 2003)。特别是在2008年开始的这一轮地震活跃幕, 青藏高原大多数强震发生在川滇地区(陈大庆等, 2023; 吴中海, 2024)。2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震后, 川滇地区5级地震较活跃, 在边界断裂上发生了2013年四川芦山 $M_s 7.0$ 地震、2014年云南鲁甸 $M_s 6.5$ 地震、2014年云南景谷 $M_s 6.6$ 地震、2017年四川九寨沟 $M_s 7.0$ 地震以及2022年泸定 $M_s 6.8$ 地震等强震; 同时, 在历史少震、弱震区也发生了一系列 $M_s \geq 5.0$ 地震, 如2020年石渠 $M_s 5.6$ 地震、青白江 $M_s 5.0$ 地震以及2017年以来川东南地

\* 收稿日期: 2024-10-15.

**基金项目:** 中国地震局监测预报司震情跟踪青年课题(2024010503); 四川省地震局地震科技专项(LY2502, LY2201); 地震科技星火计划攻关项目(XH23033A)。

**第一作者简介:** 王 迪(1992-), 工程师, 主要从事地震学和地震预测方法研究. E-mail: 2414169935@qq.com.

**✉通信作者简介:** 龙 锋(1981-), 高级工程师, 主要从事地震学和地震活动性研究. E-mail: icy1111@163.com.

区一系列  $M_s 5.0 \sim M_s 6.0$  地震，为构建川滇地区的震级-破裂长度定标律积累了充足的样本量。

不同类型地震序列的时空演化存在差异已被广泛研究（梁姗姗等，2020；易桂喜等，2021）。对于震级-破裂长度关系，发震断层属性、地震序列所处构造单元等因素都会影响其具体形式。本文通过收集整理 1970—2021 年川滇地区  $M_s \geq 5.0$  地震的震级和破裂长度参数，构建该区域的定标律，分析地震空间分布、区域构造环境、发震机理对定标律的影响。

## 1 数据选取

Wells 和 Coppersmith (1994) 在统计全球地震震级-破裂长度关系时，将地震破裂按地下破裂和地表破裂分类。其中地下破裂可根据余震密集区长度测量和震源过程反演获得（吴开统等，1990；Zhou *et al.*, 2010）。川滇地区强震序列样本丰富，台网监测能力较强，适合开展地下破裂长度研究，而地表破裂样本少，本文不做研究。本文采用的 5 级地震目录来自于《中国 5 级地震目录汇编》（中国地震局监测预报司，2023），从中挑选出 1970—2021 年川滇地区（ $97^\circ \sim 109^\circ \text{E}$ 、 $21^\circ \sim 35^\circ \text{N}$ ） $M_s \geq 5.0$  地震共计 359 次，去除其中  $M_s \geq 5.0$  的强余震，同时剔除余震低于 30 次的地震，最终得到可供研究的川滇地区  $M_s \geq 5.0$  地震 162 次。

本文收集整理已发表的基于震源谱、地壳形变、余震分布等研究成果，得到 162 次地震的震源破裂长度参数。对于没有研究成果可供参考的地震，则依据川滇两省地震台网产出的地震目录，测量相应地震序列的长轴长度作为其破裂长度。对于同一地震，不同研究者采用不同方法得到的破裂长度参数往往不同，本文采用以下规则进行挑选：①对于由余震分布得到的破裂长度参数，首选由较高精度定位方法得到的结果。②对于采用地震目录获取的破裂长度参数，鉴于 1970—2007 年川滇地区地震监测能力偏弱，为了保证有足够的样本量，用主震后 15 d 的地震序列目录进行测量，而 2008—2021 年地震采用震后 5 d 的小震目录。如果在震后 5 d 内发生了  $M_s \geq 5.0$  最大余震，那么目录截止时间在最大余

震发生之前，这样既积累了足够的样本，又避免了强余震触发的次级破裂干扰了主震破裂长度的测量（Cheng *et al.*, 2019）。③如果是震群型地震，选择第一个主震序列进行研究。④如果震后余震高于 30 次，但空间分布较分散，未出现明显的聚集现象，那么本次地震将不予考虑。⑤经过以上原则挑选后，若对于同一次地震仍有多个相近结果的破裂长度参数，则对其取平均值作为最终结果（龙锋等，2006）。根据上述原则，最终整理得到了川滇地区  $M_s \geq 5.0$  地震序列共计 125 个（图 1、表 1）。

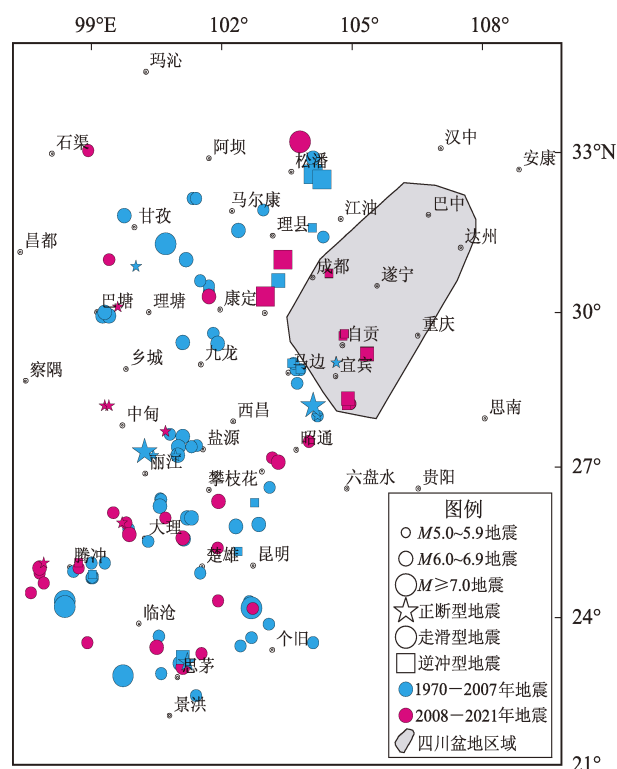


图 1 本文收集到的川滇地区 125 次  $M_s \geq 5.0$  地震震中分布

Fig. 1 Epicenters of the 125  $M_s \geq 5.0$  events selected in this study in Sichuan-Yunnan region

## 2 震级-破裂长度经验关系

### 2.1 川滇地区总体定标律

本文所收集到 125 次地震的相关信息，除了时空强参数，还包括不同来源、不同方法测量得到的破裂参数（表 1）。需要说明的是，由于震源机制解类型判断标准多样，本文并未对这些地震的

表 1 1970—2021 年川滇地区 125 次  $M_s \geq 5.0$  地震的震源破裂长度数据及其来源

Tab. 1 Source rupture-scale data of  $M_s \geq 5.0$  earthquakes in Sichuan-Yunnan region during 1970—2021 and their sources

序号	发震日期	发震地点	震中位置		$M_s$	类型	破裂长度 $L/\text{km}$	破裂长度 $L$ 来源/km	获取方法	$R$ 值
			$\varphi_N/(\circ)$	$\lambda_E/(\circ)$						
1	1970-01-05	云南通海	24.20	102.68	7.7	NW 右旋走滑	56	54.6,56	波谱方法	-0.038 03
2	1970-02-07	云南普洱	23.08	101.03	6.2	走滑	15.5	15.5	余震区长度	-0.133 73
3	1970-02-24	四川大邑西	30.60	103.30	6.2	逆冲	21.4	21.4	波谱方法	0.025 55
4	1970-07-31	四川雷波	28.63	103.73	5.4	走滑	14.5	14.5	波谱方法	0.051 60
5	1970-09-05	四川壤塘	32.15	101.33	5.5	走滑	6.8	6.8	余震区长度	-0.360 29
6	1970-11-08	四川壤塘	32.15	101.40	5.5	走滑	15.8	15.8	波谱方法	0.055 23
7	1971-02-05	云南保山	25.10	99.30	5.8	走滑	16.8	16.8	余震区长度	-0.000 14
8	1971-04-28	云南普洱	23.00	101.10	6.7	走滑	55	55	波谱方法	0.135 49
9	1971-08-16	四川马边	28.90	103.80	5.9	走滑	18.7	18.7	波谱方法	0.012 07
10	1971-08-17	四川马边	28.90	103.80	5.7	逆冲	11.3	11.3	波谱方法	-0.055 12
11	1971-09-14	云南普洱	23.00	100.80	6.2	—	35.2	35.2	余震区长度	—
12	1972-01-23	云南建水	23.43	102.43	5.5	走滑	11.2	20.4;11.2	余震区长度;波谱方法	-0.079 33
13	1972-04-08	四川康定	29.60	101.80	5.2	走滑	15	15	余震区长度	0.116 21
14	1972-09-27	四川康定	30.40	101.70	5.6	走滑	16	16	波谱方法	-0.017 74
15	1972-09-30	四川康定	30.50	101.70	5.6	走滑	16	16	波谱方法	0.033 77
16	1973-02-06	四川炉霍	31.30	100.70	7.6	走滑	120	135;120;90	余震区长度;波谱法 地壳形变	0.142 13
17	1973-06-02	云南腾冲	24.93	98.58	5.1	走滑	15	15	余震区长度	0.142 58
18	1973-06-29	四川马边	28.90	103.70	5.5	走滑	26.3	26.3	余震区长度	0.202 48
19	1973-08-11	四川松潘	32.90	104.10	6.5	走滑	40	40	余震区长度	0.099 57
20	1973-08-16	云南普洱	23.10	101.20	6.3	正断	36.5	36.5	余震区长度	0.136 59
21	1974-05-11	云南大关	28.20	104.10	7.1	正断	21	22,20	余震区长度	-0.173 25
22	1975-01-12	云南楚雄	24.90	101.50	5.6	走滑	21	21	余震区长度	0.120 07
23	1975-01-15	四川九龙	29.40	101.90	6.2	走滑	23	23;30	波谱方法;余震区长度	0.008 97
24	1975-07-09	云南通海—开远	23.87	103.08	5.2	走滑	17	17	余震区长度	0.155 25
25	1975-09-04	云南漾濞	25.78	99.85	5.2	走滑	25	25	余震区长度	0.201 08
26	1975-12-01	云南丽江	27.23	100.42	5.0	正断	15	15	余震区长度	0.132 72
27	1976-02-16	云南思茅	22.87	100.60	5.7	走滑	22.6	22.6	余震区长度	0.117 89
28	1976-05-29	云南龙陵	24.33	98.38	7.3	右旋走滑	26.2	90,92,100;26.2	余震区长度;波谱方法	-0.192 01
29	1976-05-29	云南龙陵	24.22	98.38	7.4	左旋走滑	56.7	56.7	频谱方法	0.018 22
30	1976-08-16	四川松潘	32.60	104.10	7.2	逆冲兼左旋走滑	30	70,30,57.2	余震区长度	-0.128 56
31	1976-08-23	四川平武	32.50	104.30	7.2	逆冲兼左旋走滑	25	25	余震区长度	-0.192 48
32	1976-11-07	四川盐源	27.60	101.10	6.7	左旋走滑型	37.6	40,37.6	余震区长度	0.044 83
33	1976-12-13	四川盐源	27.40	101.00	6.4	右旋走滑型	30	30	余震区长度	0.044 40
34	1978-05-19	云南下关	25.53	100.30	5.3	右旋走滑	15.5	25,15.5	余震区长度	0.100 73
35	1978-07-13	四川黑水	31.93	102.95	5.4	走滑	13.7	13.7	余震区长度	0.031 04
36	1979-03-15	云南普洱	23.20	101.10	6.8	右旋逆冲	26	26	余震区长度	0.018 79
37	1981-01-24	四川道孚	31.00	101.17	6.9	左旋走滑	39.5	40;38,36;36	地壳形变;波谱方法; 余震区长度	-0.081 63
38	1982-06-16	四川甘孜	31.83	99.75	6.0	左旋走滑	15.5	17;23,10	波谱方法;余震区长度	-0.157 07
39	1985-04-18	云南禄劝	25.87	102.85	6.3	右旋走滑	15.6	5,100,20,15.6	余震区长度	0.073 49
40	1985-09-02	云南建水	23.60	102.68	5.3	左旋走滑	14.3	14.3	余震区长度	0.171 96

续表 1

序号	发震日期	发震地点	震中位置		$M_s$	类型	破裂长度	破裂长度 $L$	获取方法	$R$ 值
			$\varphi_N / (^\circ)$	$\lambda_E / (^\circ)$			$L/km$	来源/ $km$		
41	1986-08-12	四川盐源	27.42	101.42	5.2	走滑	18	28,18	余震区长度	0.047 85
42	1986-10-07	云南富民、武定	25.33	102.37	5.1	左旋逆冲	15	16,15	余震区长度	-0.183 19
43	1988-01-10	云南宁蒗	27.22	100.93	5.5	正断右旋错动	16	16	余震区长度	0.149 39
44	1988-04-15	四川会东	26.30	102.75	5.2	逆冲型	10	10	余震区长度	-0.073 36
45	1988-06-02	四川道孚	30.60	101.50	5.0	左旋走滑	6.7	6.7	余震区长度	0.244 31
46	1988-11-06	云南澜沧	22.83	99.72	7.6	右旋走滑	125	<sup>125,150,140,125;</sup> 51,50,30	余震区长度;地壳形变	0.074 18
47	1989-04-16	四川巴塘	29.93	99.25	6.7	左旋走滑	52	60,52	余震区长度	0.123 21
48	1989-04-25	四川巴塘	29.93	99.40	6.7	左旋走滑	30	30	余震区长度	-0.018 58
49	1989-05-03	四川巴塘	30.00	99.30	6.4	右旋走滑	43	43	余震区长度	0.135 86
50	1989-09-22	四川小金	31.55	102.38	6.6	左旋走滑	8.4	8.4;13	频谱方法;余震区长度	-0.594 28
51	1991-07-01	云南施甸	24.87	99.02	5.0	逆冲	15	28,15	余震区长度	0.275 82
52	1991-07-22	云南施甸	24.80	99.00	5.2	左旋走滑	19.2	45,19.2	余震区长度	0.190 04
53	1992-12-18	云南永胜	26.37	100.58	5.4	左旋走滑	11	12.5,11	余震区长度	-0.057 66
54	1992-12-22	云南永胜	26.36	100.60	5.1	左旋走滑	7.6	7.6	余震区长度	0.116 30
55	1993-08-07	四川沐川	29.02	103.60	5.0	右旋逆断层错动	9.2	15,9.2	余震区长度	-0.144 86
56	1994-12-30	四川沐川	29.02	103.65	5.7	走滑逆断层错动	22	25,22	余震区长度	0.110 21
57	1995-10-24	云南武定	25.83	102.32	6.5	左旋走滑	24	40,24	余震区长度	-0.045 17
58	1996-02-03	云南丽江	27.30	100.22	7.0	正断左旋	45	60,45;33,30	余震区长度;地壳形变	0.076 95
59	1996-02-28	四川自贡	29.03	104.63	5.4	右旋正断	11.5	11.5,12	余震区长度	-0.057 04
60	1997-01-30	云南景洪—江城	22.42	101.40	5.6	左旋倾滑	16.4	17,16.4	余震区长度	0.042 30
61	1998-11-19	云南宁蒗	27.23	100.98	6.2	右旋走滑	16.4	26,16.4	余震区长度	-0.110 86
62	1999-09-14	四川绵竹	31.60	104.08	5.0	逆冲	8.4	15,8.4	余震区长度	0.078 53
63	1999-11-30	四川绵竹	31.43	104.33	5.0	右旋走滑	8.6	15,8.6	余震区长度	-0.045 91
64	2000-01-15	云南姚安	25.58	101.12	6.5	右旋走滑	22	22	余震区长度	-0.074 59
65	2001-02-14	四川雅江	29.40	101.08	5.0	右旋走滑	11	17,20,11,16.5	余震区长度	0.061 45
66	2001-02-23	四川雅江	29.42	101.10	6.0	左旋走滑	17.5	33,35,17.5,12.4	余震区长度	-0.035 77
67	2001-04-10	云南施甸	24.80	99.02	5.2	右旋走滑	9.6	10,9.6	余震区长度	-0.058 18
68	2001-04-12	云南施甸	24.83	99.02	5.9	右旋走滑	16	16	余震区长度	-0.279 17
69	2001-05-24	四川盐源—云南宁蒗	27.64	100.80	5.8	左旋走滑	20	20	余震区长度	0.058 07
70	2001-06-08	云南施甸	24.82	99.01	5.3	左旋走滑	13.5	13.5	余震区长度	0.053 00
71	2001-07-15	云南江川	24.33	102.63	5.1	右旋走滑	8	8	余震区长度	-0.116 62
72	2001-09-04	云南景谷	23.63	100.55	5.0	左旋走滑	15.5	15.5	余震区长度	0.178 88
73	2001-10-27	云南永胜—宾川	26.23	100.57	6.0	左旋走滑	13	13	余震区长度	-0.155 80
74	2002-08-08	四川新龙	30.87	100.02	5.3	正倾滑动	16	16	余震区长度	0.089 88
75	2003-07-21	云南大姚	26.00	101.20	6.2	右旋走滑	35	25,35	余震区长度	0.126 00
76	2003-08-21	四川盐源	27.40	101.30	5.0	右旋走滑	15.5	15.5	余震区长度	0.068 17
77	2003-10-16	云南大姚	26.00	101.30	6.1	右旋走滑	26	26	余震区长度	0.178 88
78	2004-10-19	云南保山	25.10	99.00	5.0	右旋走滑	8.6	8.6	余震区长度	-0.045 91
79	2005-08-05	云南会泽	26.60	103.10	5.3	右旋走滑	14.7	21.9,14.7,30	余震区长度	0.083 00
80	2005-08-13	云南文山	23.50	104.10	5.3	右旋走滑	19.5	45,19.5	余震区长度	0.170 23
81	2006-07-22	云南盐津	28.00	104.20	5.1	正断为主兼有走滑	9	9	余震区长度	-0.095 42
82	2006-08-25	云南盐津	28.00	104.20	5.1	走滑	9	9	余震区长度	-0.056 76

续表 1

序号	发震日期	发震地点	震中位置		$M_s$	类型	破裂长度	破裂长度 $L$	获取方法	$R$ 值
			$\varphi_N / (^{\circ})$	$\lambda_E / (^{\circ})$			$L/km$	来源/ $km$		
83	2007-06-03	云南宁洱	23.00	101.10	6.4	右旋走滑	40	40,26,19	余震区长度	0.118 92
84	2008-03-21	云南盈江	24.50	97.60	5.0	左旋走滑	14.5	14.5	余震区长度	0.158 41
85	2008-05-12	四川汶川	31.00	103.40	8.0	逆冲	330	330;355	余震区长度;地壳形变	0.220 37
86	2008-08-20	云南盈江	25.10	97.90	5.0	正倾滑动	15	15	余震区长度	0.121 73
87	2008-08-21	云南盈江	24.90	97.80	5.9	右旋走滑	28.3	28.3	余震区长度	0.134 52
88	2008-08-30	四川攀枝花	26.32	101.92	6.1	左旋走滑	30	30,30	余震区长度	0.107 38
89	2009-07-09	云南姚安	25.60	101.10	6.0	右旋走滑	27	30,27	余震区长度	0.100 51
90	2009-11-02	云南宾川	26.00	100.70	5.0	左旋走滑	7.8	7.8	余震区长度	-0.095 62
91	2010-02-25	云南禄丰—元谋	25.40	101.90	5.1	左旋走滑	5.9	20,5.9	余震区长度	-0.308 18
92	2011-03-10	云南盈江	24.70	97.90	5.8	直立走滑左旋错动	12	12,14	余震区长度	-0.135 56
93	2011-06-20	云南保山	25.10	98.70	5.2	逆走滑	7.5	11,7.5	余震区长度	-0.058 01
94	2011-08-09	云南腾冲	25.00	98.70	5.2	右旋走滑	9.7	11,9.7	余震区长度	-0.053 35
95	2012-06-24	云南宁蒗	27.70	100.70	5.7	正断兼右旋走滑	16.9	25,40,16.9	余震区长度	0.081 90
96	2012-09-07	云南彝良	27.50	104.00	5.7	右旋走滑兼逆冲	20	28,20	余震区长度	-0.020 63
97	2013-01-18	四川白玉	31.00	99.40	5.4	左旋走滑	12	12	余震区长度	-0.031 63
98	2013-03-03	云南洱源	25.90	99.70	5.5	正断	10	10	余震区长度	-0.288 31
99	2013-04-20	四川芦山	30.30	103.00	7.0	逆冲	35	40,35,30	余震区长度	-0.221 77
100	2013-08-28	云南香格里拉	28.20	99.30	5.1	正断	6	6	余震区长度	-0.226 56
101	2013-08-31	云南德钦—四川得荣	28.20	99.40	5.8	正断	17	17	余震区长度	-0.192 66
102	2014-05-24	云南盈江	25.00	97.80	5.6	左旋走滑	8	8	余震区长度	-0.061 11
103	2014-05-30	云南盈江	25.00	97.80	6.1	右旋走滑	12	13,11,12	余震区长度	-0.132 45
104	2014-08-03	云南鲁甸	27.10	103.30	6.5	左旋走滑	15	16,22,15	余震区长度	-0.116 95
105	2014-10-07	云南景谷	23.40	100.50	6.6	右旋走滑	17.2	20,17.2	余震区长度	0.025 07
106	2014-11-22	四川康定	30.30	101.70	6.3	左旋走滑	20	76,20	余震区长度	-0.146 50
107	2015-03-01	云南沧源	23.50	98.90	5.5	左旋走滑	10	10	余震区长度	-0.343 31
108	2016-05-18	云南云龙	26.10	99.50	5.0	走滑兼正断	7.5	7.5	余震区长度	0.006 54
109	2016-09-23	四川理塘	30.10	99.60	5.1	正断	10	10	余震区长度	-0.045 30
110	2017-03-27	云南漾濞	25.90	99.80	5.1	右旋走滑	10	10	余震区长度	-0.008 41
111	2017-08-08	四川九寨沟	33.20	103.80	7.0	左旋走滑	38	38,42,58,35	余震区长度	-0.011 28
112	2018-08-13	云南通海	24.19	102.71	5.0	走滑	6.1	10,6.1	余震区长度	-0.244 57
113	2018-08-14	云南通海	24.19	102.71	5.0	走滑	6.6	10,6.6	余震区长度	-0.192 61
114	2018-09-08	云南墨江	23.28	101.53	5.9	走滑	9	9	余震区长度	-0.316 74
115	2018-12-16	四川兴文	28.24	104.95	5.7	走滑	9.3	12,9.3	余震区长度	-0.106 83
116	2019-01-03	四川珙县	28.20	104.86	5.3	逆冲	6.1	6.1	余震区长度	-0.226 08
117	2019-06-17	四川长宁	28.34	104.90	6.0	逆冲兼走滑	25	25,30	余震区长度	0.125 64
118	2019-09-08	四川威远	29.55	104.79	5.4	逆冲	7	7	余震区长度	-0.183 22
119	2019-12-18	四川资中	29.59	104.82	5.2	逆冲	8	8	余震区长度	-0.025 17
120	2020-02-03	四川青白江	30.74	104.46	5.1	逆冲	6	6	余震区长度	-0.142 14
121	2020-04-01	四川石渠	33.04	98.92	5.6	走滑	12	12	余震区长度	-0.078 10
122	2020-05-18	云南巧家	27.18	103.16	5	右旋走滑	5	5	余震区长度	-0.398 34
123	2021-05-21	云南漾濞	25.67	99.87	6.4	走滑	22	30,25,22	余震区长度	-0.051 49
124	2021-06-10	云南双柏	24.34	101.91	5.1	左旋走滑	10	10	余震区长度	-0.008 41
125	2021-09-16	四川泸县	29.20	105.34	6.0	逆冲	6	6	余震区长度	-0.570 77

错动类型重新分类,而是沿用了已有的研究结果。经统计,125次地震中,走滑型地震91次,正断型地震14次,逆冲型地震19次。由于1971年云南普洱6.2级地震没有分类,本文不纳入分析。从图1可以看出,逆冲型地震主要分布在龙门山断裂带和四川盆地区域;川滇块体边界及其内部大多以走滑型地震为主;正断型地震主要分布在川滇地区西侧一带。从图2可以发现,1970—2021年 $M_s \geq 5.0$ 地震并没有呈现出随着时间逐渐增加的迹象,因此 $M_s \geq 5.0$ 地震目录是完整的。

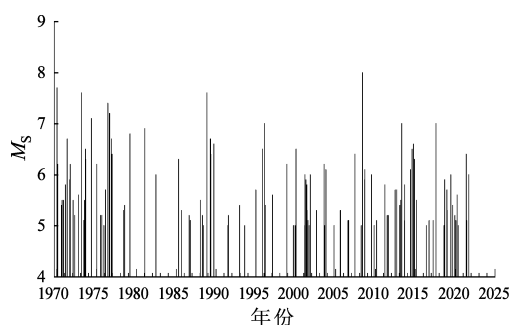


图2 川滇地区125次 $M_s \geq 5.0$ 地震 $M-t$ 图

Fig. 2 The  $M-t$  diagram of the 125 selected  $M_s \geq 5.0$  events in Sichuan-Yunnan region

采用最小二乘法对125次 $M_s \geq 5.0$ 地震建立面波震级-震源破裂长度回归关系,相应的线性回归方程可通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平检验,本文对后续拟合关系都做同样要求。图3中用黑色圆点标记了3个明显偏离拟合线的离群事件,即超过 $\pm 2$ 倍均方差,该阈值可以明显区分丛集区和离群点,后续的分析采用同样的阈值标准。3个离群事件中小金 $M_s 6.6$ 地震和泸县 $M_s 6.0$ 地震均为孤立型,破裂长度偏小(易桂喜等,2021;李欣蔚等,2022),这也是125次地震中仅有的2次孤立型震例。2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震明显高于逆冲型地震平均定标律,这是因为汶川 $M_s 8.0$ 地震由多次子事件构成(王勤彩等,2009;邓起东等,2011;易桂喜等,2012),多次子事件显著拓展了主震破裂的长度,这说明地震序列中地震样本的丰富程度和破裂的复杂性会影响破裂长度的测量,同时也说明了在利用定标律开展震后趋势研判和灾害评估时,孤立型地震序列和巨大地震会偏离由大样本量回归得到的一般认识。

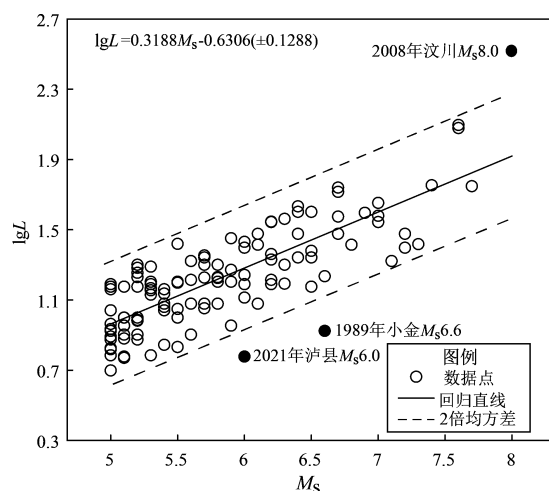


图3 川滇地区 $M_s \geq 5.0$ 地震震级-破裂长度的拟合关系

Fig. 3 Fitted relation between  $\lg L$  and the magnitude of the  $M_s \geq 5.0$  earthquakes in Sichuan-Yunnan region

## 2.2 不同错动类型地震定标律

不同错动方式对破裂长度的影响已被广泛研究(Wells, Coppersmith, 1994)。为进一步研究川滇地区不同错动类型地震定标律的特征,本文分别得到走滑型地震、正断型地震与逆冲型地震的震级-破裂长度线性回归关系式(图4)。其中1989年小金 $M_s 6.6$ 地震明显偏小于走滑型地震定标律给定的破裂长度理论值(图4a),而2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震明显偏大于逆冲型地震定标律给定的破裂长度理论值(图4b),正断型地震样本虽然较少,但其拟合关系仍通过了显著性检验,无明显离群点(图4c)。

将3种错动类型地震定标律绘制在图5中。由图可以看出,在相同震级条件下,走滑型地震的破裂长度大于逆冲型地震的破裂长度; $M_s \geq 6.5$ 时,逆冲型地震的破裂长度大于正断型地震的破裂长度; $M_s \geq 5.5$ 时,走滑型地震的破裂长度大于正断型地震的破裂长度。

由于不同因素会影响地震的实际破裂长度,使其显著高于或低于理论值,为此定义实际破裂长度和拟合破裂长度之间的偏差量为:

$$R = (L - L_s) / L_s \quad (1)$$

式中: $L$ 为实际破裂长度; $L_s$ 为拟合破裂长度; $R < 0$ 为“欠冲”, $R > 0$ 为“过冲”。

图6给出了川滇地区的 $R$ 值地震空间分布,可

以看出“欠冲”地震在云南地区分布较多并且较为分散,  $R < -0.3$  的显著“欠冲”事件发生在块体内部而不是主要边界带上;  $R > 0.2$  的“过冲”地震更多发生在块体边界的断裂带上。

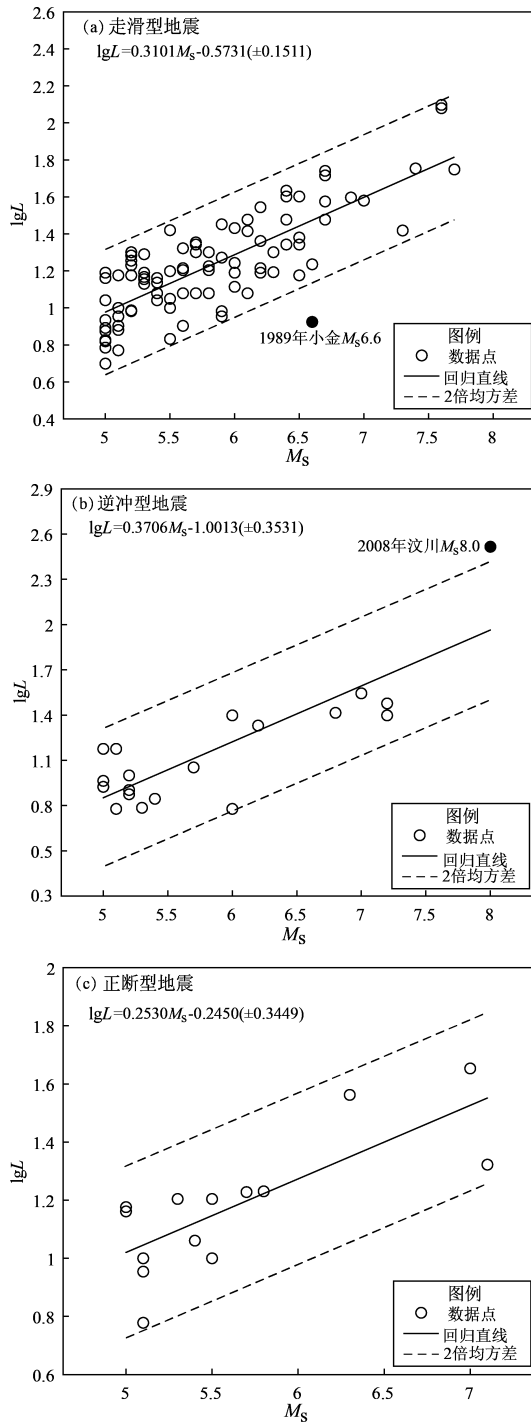


图4 川滇地区3种错动类型地震的  
震级-破裂长度的拟合关系

Fig. 4 Fitted relations between  $M_s$  and  $\lg L$  of three types of earthquakes in Sichuan-Yunnan region

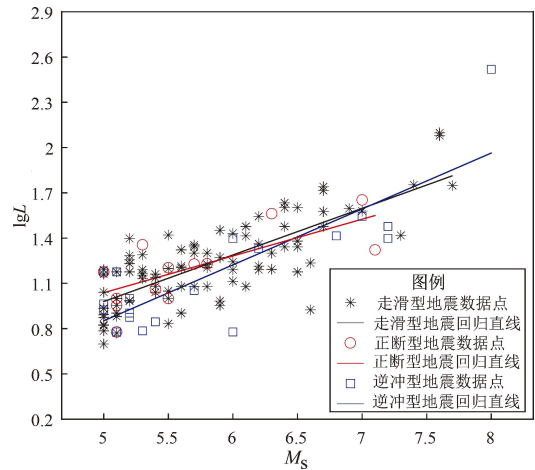


图5 川滇地区不同错动类型地震  
震级-破裂长度的拟合关系

Fig. 5 Fitted relations between  $M_s$  and  $\lg L$  of different types of earthquakes in Sichuan-Yunnan region

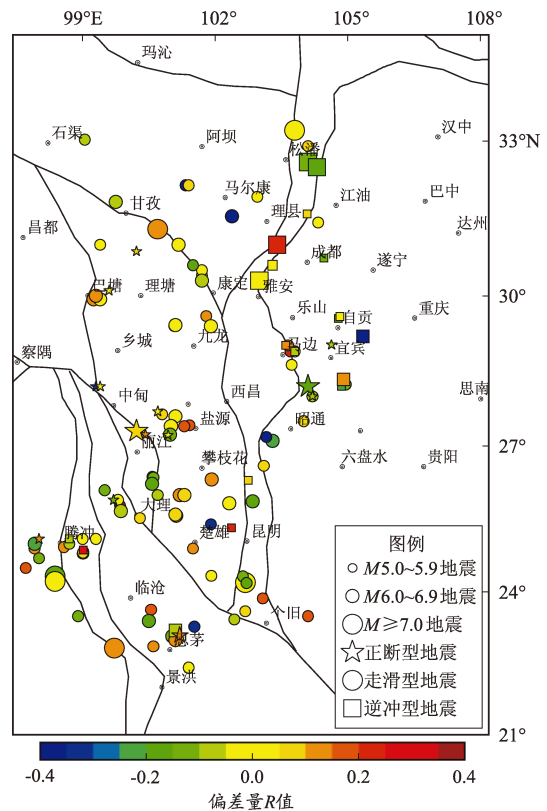


图6 川滇地区带有偏差量  $R$  值的地震震中分布  
Fig. 6 Epicentral distribution involving  $R$ -value in Sichuan-Yunnan region

### 2.3 不同区域构造环境定标律

川滇地区包含了青藏高原东南缘和华南块体西北缘的四川盆地(张培震等, 2003; 徐锡伟等, 2003), 二者的演化过程、区域构造环境有很大差

异。近年来,四川盆地中强地震频发,其发震构造和机理被广泛研究(易桂喜等,2019,2020,2021;张致伟等,2012;Long *et al.*,2020;李欣蔚等,2022)。不少研究指出,四川盆地南缘的显著地震可能为区域内工业活动触发所致(雷兴林等,2014,2020;Lei *et al.*,2019a,b;Meng *et al.*,2019)。因此本文将川滇地区分为青藏高原东南缘和四川盆地2个区域进行定标律研究。青藏高原东南缘有116次 $M_s \geq 5.0$ 地震,四川盆地有9次 $M_s \geq 5.0$ 地震。

在对青藏高原东南缘进行定标律构建时,发现116次 $M_s \geq 5.0$ 地震有着较好的线性特征(表2),但从青藏高原东南缘震级-破裂长度的拟合关系(图7)可以看出,2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震和1989年小金 $M_s 6.6$ 地震仍表现为离群点。由于四川盆地样本偏少,在线性回归时未能通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验。为此,本文将震级下限降低到 $M_s 4.5$ ,并收集采用CAP波形反演方法计算得到的矩震级 $M_w$ (表3),最终获得15次 $M_w \geq 4.5$ 地震,20次 $M_s \geq 4.5$ 地震,同时建立两种震级标度下的定标律,回归方程均通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验

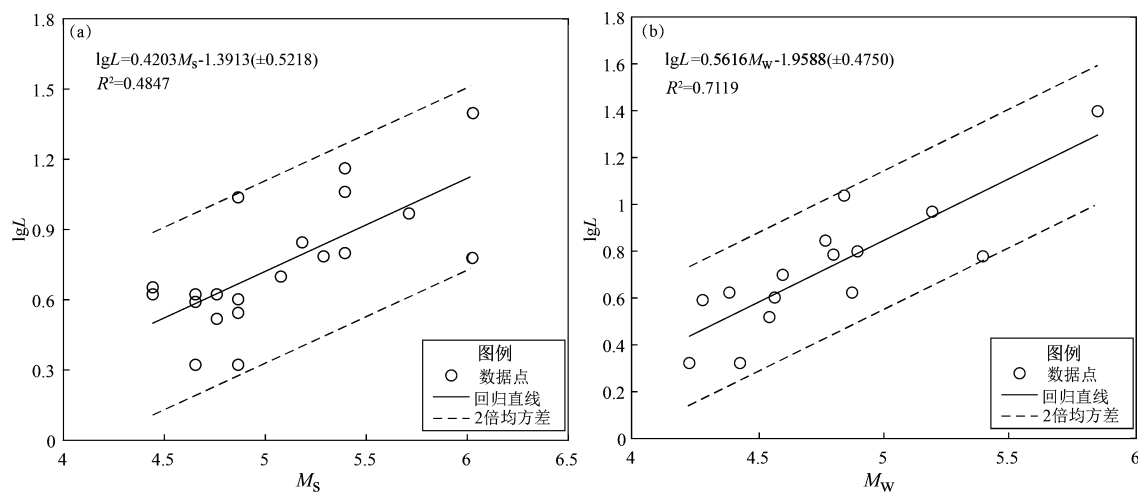


图8 四川盆地地震震级-破裂长度的拟合关系

Fig. 8 The fitted relation between  $M_s$  and  $\lg L$  of earthquakes in the Sichuan Basin

## 2.4 不同时间段的定标律

四川地震台网和云南地震台网均在2007年完成数字化升级改造,形成数字化台网,监测能力得到提升(龙锋等,2009)。所以本文从时间维度上将125次 $M_s \geq 5.0$ 地震分为2个时间段进行讨论,1970—2007年为第一时段,2008—2021年为第二时段,建立震级-破裂长度的线性回归方程,见表2。

(表2)。图8显示, $M_w$ 比 $M_s$ 拟合效果更好,后者的 $R^2$ 要显著小于前者。这可能反映了盆地的场地响应和复杂的结构影响了 $M_s$ 测量的稳定性(吴微微等,2016)。易桂喜等(2020)也发现川东南地区 $M_w$ 与 $M_s$ 之间存在统计差异。

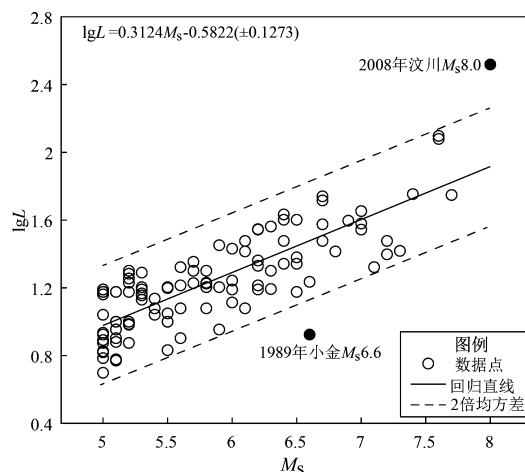


图7 青藏高原东南缘地震震级-破裂长度的拟合关系

Fig. 7 The fitted relation between  $M_s$  and  $\lg L$  of earthquakes in the Qinghai-Tibet Plateau

从图9中2个时段的定标律对比发现,偏离定标的地震均与全部样本量定标律相同,但第一时段地震的 $R^2$ (0.6263)小于第二时段地震的 $R^2$ (0.6998),说明测震台网高质量的观测数据对地震的破裂长度有着较好的约束。第二时段的拟合斜率大于第一时段,有可能是监测能力的提升使得余震记录更完备,进而拓展了破裂的长度。



表 2 川滇地区地震震级-破裂长度的线性回归结果

Tab. 2 Regression results of earthquake magnitude - source rupture length in Sichuan - Yunnan region

资料来源	样本数	按 $M_S = a + b \lg L$ 回归		按 $\lg L = c + d M_S$ 回归		$R^2$ 值
		$a$ 值	$b$ 值	$c$ 值	$d$ 值	
全部地震	125	3.393 3	1.975 6	-0.630 6	0.318 8	0.629 7
走滑型地震	91	3.360 4	1.991 5	-0.573 1	0.310 1	0.617 6
逆冲型地震	19	3.665 9	1.877 8	-1.001 3	0.370 6	0.696 0
正断型地震	14	2.877 0	2.335 8	-0.245 0	0.253 0	0.591 0
青藏高原东南缘 $M_S \geq 5.0$ 地震	116	2.066 6	3.266 7	-0.582 2	0.312 4	0.645 6
四川盆地 $M_S \geq 5.0$ 地震	9			未通过检验		
四川盆地 $M_S \geq 4.5$ 地震	20	4.227 6	1.153 2	-1.391 3	0.420 3	0.484 7
四川盆地 $M_W \geq 4.5$ 地震	15	3.855 7	1.267 7	-1.955 8	0.561 6	0.711 9
1970—2007 年地震	83	2.901 9	2.322 6	-0.303 7	0.269 7	0.626 3
2008—2021 年地震	42	3.766 8	1.714 1	-1.200 5	0.408 3	0.699 8

表 3 四川盆地地震的震源破裂长度数据及其来源

Tab. 3 Source rupture scale data of earthquakes in the Sichuan Basin and their sources

序号	发震日期	发震地点	震中位置		$M_S$	$M_W$	破裂长度 $L/\text{km}$	获取方法
			$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$				
1	1970-07-31	四川雷波	28.63	103.73	5.4	—	14.5	余震区长度
2	1996-02-28	四川自贡	29.03	104.63	5.4	—	11.5	余震区长度
3	2013-02-19	四川兴文	28.30	104.90	4.5	4.87	4.5	余震区长度
4	2013-02-19	四川三台	31.20	105.20	4.7	—	4.2	余震区长度
5	2013-04-25	四川长宁	28.40	104.90	4.8	4.41	4.2	余震区长度
6	2014-07-29	四川梓潼	31.48	105.25	4.9	4.84	10.9	余震区长度
7	2015-02-07	四川长宁	28.34	104.94	4.5	—	4.2	余震区长度
8	2017-01-28	四川筠连	28.09	104.72	4.9	—	3.5	余震区长度
9	2017-05-04	四川珙县	28.19	104.87	4.9	4.58	4	余震区长度
10	2018-12-16	四川兴文	28.24	104.95	5.7	5.17	9.3	余震区长度
11	2019-01-03	四川珙县	28.20	104.86	5.3	4.8	6.1	余震区长度
12	2019-02-24	四川荣县	29.47	104.49	4.7	4.26	2.1	余震区长度
13	2019-02-25	四川荣县	29.48	104.49	4.9	4.45	2.1	余震区长度
14	2019-06-17	四川长宁	28.34	104.90	6	5.79	25	余震区长度
15	2019-09-08	四川威远	29.55	104.79	5.4	4.89	6.3	余震区长度
16	2019-12-18	四川资中	29.59	104.82	5.2	4.77	7	余震区长度
17	2020-02-03	四川青白江	30.74	104.46	5.1	4.61	5	余震区长度
18	2021-09-03	四川珙县	28.09	104.92	4.8	4.56	3.3	余震区长度
19	2021-09-16	四川泸县	29.20	105.34	6	5.36	6	余震区长度
20	2021-11-17	四川珙县	28.14	104.75	4.7	4.31	3.9	余震区长度

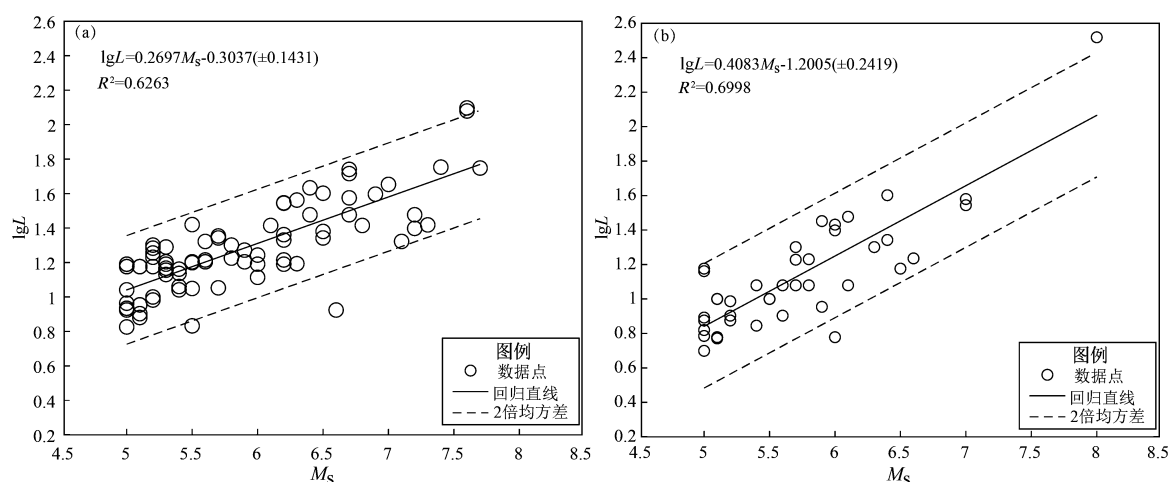


图9 1970—2007年(a)和2008—2021年(b)地震震级-破裂长度的拟合关系

Fig. 9 The fitted relation between  $M_s$  and  $\lg L$  of earthquakes from 1970 to 2007 (a) and from 2008 to 2021 (b)

### 3 结论

本文整理 1970—2021 年川滇地区  $M_s \geq 5.0$  地震资料, 获得 125 次地震的破裂长度, 通过最小二乘法建立震级-破裂长度线性回归关系, 得到以下结论:

(1) 对走滑型地震、逆冲型地震、正断型地震建立的震级-破裂长度线性回归方程, 均可在  $\alpha = 0.05$  的显著性水平下通过检验。在相同震级下, 逆冲型地震的破裂长度小于走滑型地震的破裂长度;  $M_s \geq 6.5$  时, 逆冲型地震的破裂长度大于正断型地震的破裂长度;  $M_s \geq 5.5$  时, 走滑型地震的破裂长度大于正断型地震的破裂长度。

(2) 根据区域构造不同, 将川滇地区分为青藏高原东南缘与四川盆地来研究, 得到青藏高原东南缘  $M_s \geq 5.0$  地震线性回归方程可在  $\alpha = 0.05$  的显著性水平下通过检验, 但四川盆地  $M_s \geq 5.0$  地震的线性回归未通过检验, 加入 2008 年后的  $M_s 4.5 \sim 4.9$  地震的破裂长度后建立的线性回归方程通过检验。矩震级  $M_w$  比面波震级  $M_s$  有着更好的拟合效果, 这可能反映了盆地的场地响应和复杂的结构影响了  $M_s$  测量的稳定性。

(3) 考虑到四川测震台网与云南测震台网测震能力的时间不均匀性, 将时间尺度分为 2 个时段分别进行线性拟合, 线性回归方程均可在  $\alpha = 0.05$  的显著性水平下通过检验。第一时段 (1997—2007 年) 的拟合方差比较大, 第一时段

的相关系数小于第二时段 (2008—2021 年) 的相关系数, 第二时段的拟合效果更好, 说明监测台网高质量的观测数据对地震的破裂长度有着较好的约束。

### 参考文献:

- 陈大庆, 叶秀薇, 方震, 等. 2023. 青藏高原强震活动特征研究[J]. 华南地震, 43(4): 1-7.
- Chen D Q, Ye X W, Fang Z, et al. 2023. Study on characteristics of strong earthquake activity in Qinghai-Tibet Plateau[J]. South China Journal of Seismology, 43(4): 1-7. (in Chinese)
- 邓起东, 陈桂华, 朱艾斓. 2011. 关于 2008 年汶川  $M_s 8.0$  地震震源断裂破裂机制几个问题的讨论[J]. 中国科学: 地球科学, 41(11): 1559-1576.
- Deng Q D, Chen G H, Zhu A L. 2011. Discussion on several issues concerning the fault rupture mechanism of the source of the 2008 Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake[J]. Scientia Sinica Terrae, 41(11): 1559-1576. (in Chinese)
- 雷兴林, 李霞颖, 李琦, 等. 2014. 沉积岩储藏系统小断层在油气田注水诱发地震中的作用——以四川盆地为例[J]. 地震地质, 36(3): 625-643.
- Lei X L, Li X Y, Li Q, et al. 2014. Role of immature faults in injection-induced seismicity in oil/gas reservoirs: A case study of the Sichuan basin, China[J]. Seismology and Geology, 36(3): 625-643. (in Chinese)
- 雷兴林, 苏金蓉, 王宏伟. 2020. 四川盆地南部持续增长的地震活动及其与工业注水活动的关联[J]. 中国科学: 地球科学, 50(11): 1505-1532.
- Lei X L, Su J R, Wang Z W. 2020. Growing seismicity in the Sichuan Basin and its association with industrial activities[J]. Scientia Sinica Terrae, 50(11): 1505-1532. (in Chinese)
- 李欣蔚, 张广伟, 谢卓娟, 等. 2022. 2021 年四川泸县  $M 6.0$  地震发震

- 机理及地震活动时空演化特征[J]. 地球物理学报, 65(11): 4284–4298.
- Li X W, Zhang G W, Xie Z J, *et al.* 2022. Seismogenic mechanism of the 2021  $M_6.0$  Luxian earthquake and seismicity spatio-temporal characteristics around the source region[J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(11): 4284–4298. (in Chinese)
- 梁姗姗, 徐志国, 盛书中, 等. 2020. 2019 年四川长宁 6.0 级地震主震及中强余震( $M_s \geq 4.0$ )的震源机制及其应力场[J]. 地震地质, 42(3): 547–561.
- Liang S S, Xu Z G, Sheng S Z, *et al.* 2020. Focal mechanism solutions and stress field of the 2019 Changning, Sichuan mainshock and its moderate strong aftershocks( $M_s \geq 4.0$ ) [J]. Seismology and Geology, 42(3): 547–561. (in Chinese)
- 龙锋, 闻学泽, 倪四道. 2009. 区域最小完整性震级时空分布的确定—以龙门山断裂带为例[J]. 地震, 29(3): 27–36.
- Long F, Wen X Z, Ni S D. 2009. Determination of temporal-spatial distribution of the regional minimum magnitudes of completeness: Application to the Longmenshan Fault Zone[J]. Earthquake, 29(3): 27–36. (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)
- 秦嘉政, 刘丽芳, 钱晓东. 2008. 根据地震定标律研究汶川 8.0 级地震的破裂特征[J]. 地震研究, 31(S1): 458–463.
- Qin J Z, Liu L F, Qian X D. 2008. Analysis of rupture characteristics of the  $M_s 8.0$  Wenchuan earthquake based on seismic scaling law [J]. Journal of Seismological Research, 31(S1): 458–463. (in Chinese)
- 王勤彩, 陈章立, 郑斯华. 2009. 汶川大地震余震序列震源机制的空间分段特征[J]. 科学通报, 54(16): 2348–2354.
- Wang Q C, Chen Z L, Zheng S H. 2009. The spatial segmentation characteristics of the focal mechanism of the aftershock sequence of the Wenchuan earthquake [J]. Chinese Science Bulletin, 54(16): 2348–2354. (in Chinese)
- 吴开统, 焦远碧, 吕培琴, 等. 1990. 地震序列概论[M]. 北京: 北京大学出版社, 138–141.
- Wu K T, Jiao Y B, Lyu P Q, *et al.* 1990. Introduction to earthquake sequences [M]. Beijing: Peking University Press, 138–141. (in Chinese)
- 吴微微, 苏金蓉, 魏娅玲, 等. 2016. 四川地区介质衰减、场地响应与震级测定的讨论[J]. 地震地质, 38(4): 1005–1018.
- Wu W W, Su J R, Wei Y L, *et al.* 2016. Discussion on attenuation characteristics, siteresponse and magnitude determination in Sichuan[J]. Seismology and Geology, 38(4): 1005–1018. (in Chinese)
- 吴中海. 2024. 青藏高原 1990 年以来的  $M_w \geq 6.5$  强震事件及活动构造体系控震效应[J]. 地震科学进展, 54(1): 10–24.
- Wu Z H. 2024. The  $M_w \geq 6.5$  strong earthquake events since 1990 around the Tibetan Plateau and control-earthquake effect of active tectonic system[J]. Progress in Earthquake Sciences, 54(1): 10–24. (in Chinese)
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J]. 中国科学: 地球科学, 33(S1): 151–162.
- Xu X W, Wen X Z, Zheng R Z, *et al.* 2003. The latest structural changes and dynamic sources of active blocks in the Sichuan Yunnan region [J]. Scientia Sinica Terrae, 33(S1): 151–162. (in Chinese)
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 2019. 2019 年 6 月 17 日四川长宁  $M_s 6.0$  地震序列震源机制解与发震构造分析[J]. 地球物理学报, 62(9): 3432–3447.
- Yi G X, Long F, Liang M J, *et al.* 2019. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 17 June 2019  $M_s 6.0$  Sichuan Changning earthquake sequence [J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(9): 3432–3447. (in Chinese)
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 2020. 四川盆地荣县—威远—资中地区发震构造几何结构与构造变形特征: 基于震源机制解的认识和启示[J]. 地球物理学报, 63(9): 3275–3291.
- Yi G X, Long F, Liang M J, *et al.* 2020. Geometry and tectonic deformation of seismogenic structures in the Rongxian-Weiyuan-Zizhong region, Sichuan Basin: Insights from focal mechanism solutions [J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(9): 3275–3291. (in Chinese)
- 易桂喜, 龙锋, 张致伟. 2012. 汶川  $M_s 8.0$  地震余震震源机制时空分布特征[J]. 地球物理学报, 55(4): 1213–1227.
- Yi G X, Long F, Zhang Z W. 2012. Spatial and temporal variation of focal mechanisms for aftershocks of the 2008  $M_s 8.0$  Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(4): 1213–1227. (in Chinese)
- 易桂喜, 赵敏, 龙锋, 等. 2021. 2021 年 9 月 16 日四川泸县  $M_s 6.0$  地震序列特征及孕震构造环境[J]. 地球物理学报, 64(12): 4449–4461.
- Yi G X, Zhao M, Long F, *et al.* 2021. Characteristics of the seismic sequence and seismogenic environment of the  $M_s 6.0$  Sichuan Luxian earthquake on September 16, 2019 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(12): 4449–4461. (in Chinese)
- 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: 地球科学, 33(S1): 12–20.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, *et al.* 2003. Strong earthquake activity and active blocks in Chinese Mainland [J]. Scientia Sinica Terrae, 33(S1): 12–20. (in Chinese)
- 张致伟, 程万正, 梁明剑, 等. 2012. 四川自贡—隆昌地区注水诱发地震研究[J]. 地球物理学报, 55(5): 1635–1645.
- Zhang Z W, Cheng W Z, Liang M J, *et al.* 2012. Study on earthquakes induced by water injection in Zigong-Longchang area, Sichuan [J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(5): 1635–1645. (in Chinese)
- Cheng J, Rong Y, Magistrale H, *et al.* 2019. Earthquake rupture scaling relations for mainland China [J]. Seismological Research Letters, 91(1): 248–261.
- Lei X L, Wang Z, Su J. 2019a. The December 2018  $M_L 5.7$  and January

- 2019  $M_L 5.3$  Earthquakes in South Sichuan Basin induced by Shale gas hydraulic fracturing[J]. *Seismological Research Letters*, 90(3): 1099 – 1110.
- Lei X L, Wang Z, Su J. 2019b. Possible link between long-term and short-term water injections and earthquakes in salt mine and Shale gas site in Changning, south Sichuan Basin, China [J]. *Earth and Planetary Physics*, 3(6): 510 – 525.
- Long F, Zhang Z, Qi Y, *et al.* 2020. Three dimensional velocity structure and accurate earthquake location in Changning – Gongxian area of southeast Sichuan [J]. *Earth and Planetary Physics*, 4(2): 163 – 177.
- Meng L, McGarr A, Zhou L, *et al.* 2019. An investigation of seismicity induced by hydraulic fracturing in the Sichuan Basin of China based on data from a temporary seismic network [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(1): 348 – 357.
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 974 – 1002.
- Zhou C, Diao G, Geng J, *et al.* 2010. Fault plane parameters of Tancheng  $M_{8\frac{1}{2}}$  earthquake on the basis of present-day seismological data[J]. *Earthquake Science*, 23(6): 567 – 576.

## Study on the Characteristics of Magnitude and Rupture-scale Calibration Law for Strong Earthquake Sequences in Sichuan-Yunnan Region

WANG Di, RAN Xiyang, LONG Feng, ZHAO Min, HE Chang  
(*Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, Sichuan, China*)

### Abstract

Based on the data of  $M_s \geq 5.0$  earthquake sequences since 1970, and referring to the research results involving the source spectrum, the crustal deformation and the aftershock distribution in Sichuan-Yunnan region, we obtained the rupture-length of 125 earthquakes. Then we established the linear regression relation between the magnitude ( $M_s$ ) and the logarithm of the rupture-scale ( $\lg L$ ) in Sichuan-Yunnan region by using the least square method. Further, we analyzed the characteristics of this scaling law based on three aspects: the type of source mechanism solution, the regional structures and the different seismic periods. We found that this relation varies in the context of the type of seismic dislocation and the spatial and temporal difference of earthquakes. Theoretically, for the earthquakes with the same magnitude, the rupture length of the thrust earthquake should be shorter than that of the strike – slip earthquake. When  $M_s \geq 5.5$ , the rupture length of the strike – slip earthquake is longer than that of the positive fault earthquake. When  $M_s \geq 6.5$ , the rupture-length of thrust earthquake is longer than that of the normal fault earthquake. When their magnitudes are the same, the rupture length of the isolated-type earthquake is shorter than the ones of other types of earthquakes. In addition, the high-quality observational data of the seismic network play a decisive role in calculating the rupture-scale of the earthquakes.

**Keywords:** Sichuan-Yunnan region; scaling law; rupture-scale; strong-earthquake sequence