

文章编号: 1007-6069(2021)01-0207-12

南北地震带地区地震烈度衰减关系研究

杨伟松^{1,2}, 王长理^{1,2}, 许卫晓^{1,2}, 杜轲³, 于德湖^{1,2}

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033;
3. 中国地震局工程力学研究所 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 收集了我国南北地震带地区 1970 年~2012 年的 85 次地震事件的烈度等震线资料, 建立了震中烈度与震级之间的经验关系, 利用长轴和短轴椭圆模型拟合得到了该地区的地震烈度衰减关系。同时还搜集整理了近年来基于我国各地区的地震资料, 研究得到的地震烈度衰减关系, 并将其与南北地震带存在地域重合的研究结果与本文结果进行对比分析。该研究结果能够较好地反映南北地震带地区的地震烈度衰减规律, 对该地区的地震灾害快速评估具有一定的参考意义。

关键词: 烈度衰减; 地震烈度; 南北地震带

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

Study on the relationship of seismic intensity attenuation in the North-South seismic zone

YANG Weisong^{1,2}, WANG Changli^{1,2}, XU Weixiao^{1,2}, DU Ke³, YU Dehu^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, 266033, China; 2. Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao, 266033, China;
3. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, 150080, China)

Abstract: Isoseismal maps of the 85 earthquake events from 1970 to 2012 in the north-south earthquake zone of China were collected. Using these data, the empirical relationship between the epicenter intensity and magnitude was established. The long and short axial ellipse model was used to obtain the seismic intensity attenuation relationship in the area. At the same time, the seismic intensity attenuation relationship obtained based on the seismic data in various regions in China during recent years was also collected and discussed, and the results of the regional overlap with the north-south seismic belt were compared with the results of this study. The research results in this paper can better reflect the law of seismic intensity attenuation in the north-south earthquake zone, and have significantly meaning to the rapid assessment of earthquake disasters in this area.

Key words: intensity attenuation; seismic intensity; north-south earthquake zone

引言

地震烈度是表示地面破坏程度的一个重要工具。地震发生后, 随着距离的增大, 传递到场地的能量越来越小, 所造成的地震灾害影响也越来越小, 因此地震烈度会随着距离的增大逐渐减小, 呈现衰减的趋势。地震烈度被广泛应用于地震现场的应急救援、损失评估和恢复重建等工作, 通过烈度衰减关系确定震区不同烈

收稿日期: 2020-02-04; 修订日期: 2020-07-29

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2019M652344); 山东省自然科学基金项目(ZR2020ME246); 山东省重点研发计划项目(2018GSF120004); 青岛市应用基础研究计划项目(19-6-2-8-cg)

作者简介: 杨伟松(1986-), 女, 副教授, 博士, 主要从事地震工程研究. E-mail: yws_qtech2015@163.com

度分布,快速完成地震灾害评估,进而制定应急救援方案,调配救灾资源。

在1996年国家地震局出版的《中国地震烈度区划图(1990)概论》^[1]中,首先将我国的地震烈度衰减关系按照东西部分区的方式分别给出。汪素云等(2000)^[2]大致以105°E为界,将中国分为东部、西部两个区,分别对地震烈度衰减关系进行研究,当时收集的资料截止于1990年;肖亮等(2011)^[3]对中国西部的地震资料进行补充,重新拟合得到了西部地区的地震烈度衰减关系,并通过对比其他研究者证明了结果的可靠性,以及对西部地区工程地震研究的适用性。

通常地震烈度衰减关系会受到场地条件、震源特性和传播介质等因素的影响出现地区差异,所以研究者会针对不同的地区提出更为合适的地震烈度衰减关系。雷建成等(2006)^[4]收集了60个震例,对四川盆地的地震烈度衰减关系进行研究;周中红等(2011)^[5]对甘肃及邻近地区的120个地震进行拟合回归,得到了地震烈度衰减关系;李西等(2012)^[6]收集了云南地区1900年之后的地震烈度资料,通过统一回归的方式得到了该地区的地震烈度衰减关系。其它地区的地震烈度衰减关系也有很多学者进行研究,将这些研究者的地震烈度衰减关系进行收集汇总,见表1。

表1 地震烈度衰减关系汇总

Table 1 Summary of seismic intensity attenuation relationships

研究者	研究地区	地震烈度衰减关系			
		长轴 I_a	标准差 σ	短轴 I_b	标准差 σ
汪素云等(1988) ^[7]	鲁南地区	$I_a = 3.164 + 1.496M - 1.483 \ln(R_a + 15)$	0.41	$I_b = 1.514 + 1.501M - 1.251 \ln(R_b + 7)$	0.37
陈达生等(1989) ^[8]	华北地区	$I_a = 3.727 + 1.429M - 1.538 \ln(R_a + 2)$		$I_b = 1.483 + 1.429M - 1.138 \ln(R_b + 4)$	
中国地震烈度区划图(1990) ^[1]	中国西部	$I_a = 5.643 + 1.538M - 2.109 \ln(R_a + 25)$	0.64	$I_b = 2.941 + 1.363M - 1.494 \ln(R_b + 7)$	0.61
	中国东部	$I_a = 6.046 + 1.480M - 2.081 \ln(R_a + 25)$		$I_b = 2.617 + 1.435M - 1.441 \ln(R_b + 7)$	
华爱军等(1993) ^[9]	山东及邻区	$I_a = 4.182 + 1.398M - 1.532 \lg(R_a + 20)$	0.44	$I_b = 1.220 + 1.450M - 1.113 \lg(R_b + 4)$	0.44
	中国东部	$I_a = 5.019 + 1.446M - 4.136 \log(R_a + 24)$	0.517	$I_b = 2.240 + 1.446M - 3.070 \log(R_b + 9)$	0.517
汪素云等(2000) ^[2]	中国西部	$I_a = 5.253 + 1.398M - 4.164 \log(R_a + 26)$	0.632	$I_b = 2.019 + 1.398M - 2.943 \log(R_b + 8)$	0.632
翟洪涛等(2003) ^[10]	江淮地区	$I_a = 4.345 + 1.381M - 1.554 \ln(R_a + 15)$	0.48	$I_b = 3.228 + 1.373M - 1.423 \ln(R_b + 10)$	0.51
雷建成等(2006) ^[4]	四川盆地地区	$I_a = 4.0293 + 1.3003M - 3.6404 \lg(R_a + 10)$	0.45	$I_b = 2.3816 + 1.3003M - 2.8573 \lg(R_b + 5)$	0.45
李英民等(2007) ^[11]	重庆及邻近地区	$I_a = 1.9390 + 1.7403M - 1.7543 \ln(R_a + 15)$		$I_b = -0.1403 + 1.7403M - 1.3729 \ln(R_b + 7)$	
李光等(2008) ^[12]	安徽及邻区	$I_a = 5.040 + 1.470M - 1.801 \ln(R_a + 27)$	0.452	$I_b = 2.897 + 1.357M - 1.368 \ln(R_b + 10)$	0.452
王继等(2008) ^[13]	华中、华南地区	$I_a = 6.6079 + 0.9543M - 3.5688 \log(R_a + 18)$	0.54	$I_b = 4.9540 + 0.9543M - 2.9566 \log(R_b + 9)$	0.54
苗庆杰等(2008) ^[14]	山东及邻近地区	$I_a = 5.2765 + 1.1536M - 1.4142 \ln(R_a + 20)$	0.48	$I_b = 4.0243 + 1.1392M - 1.2381 \ln(R_b + 11)$	0.47
卢建旗等(2009) ^[15]	中强地震活动区	$I_a = 5.841 + 1.071M - 3.657 \log(R_a + 15)$	0.52	$I_b = 3.944 + 1.071M - 2.845 \log(R_b + 7)$	0.52
周中红等(2010) ^[5]	甘肃地区	$I_a = 4.864 + 1.464M - 1.783 \ln(R_a + 22)$	0.521	$I_b = 3.032 + 1.321M - 1.343 \ln(R_b + 9)$	0.52
崔鑫等(2010) ^[16]	华北地区	$I_a = 3.0117 + 1.5495M - 1.3509 \ln(R_a + 30)$	0.3291	$I_b = 1.7865 + 1.4523M - 1.1155 \ln(R_b + 13)$	0.3402
	新疆区	$I_a = 5.6018 + 1.4347M - 4.4899 \lg(R_a + 25)$	0.5924	$I_b = 3.6113 + 1.4347M - 3.8477 \lg(R_b + 13)$	0.5924
肖亮等(2011) ^[3]	川藏区	$I_a = 6.458 + 1.2746M - 4.4709 \lg(R_a + 25)$	0.6636	$I_b = 3.3682 + 1.2746M - 3.3119 \lg(R_b + 9)$	0.6636
	中国西部	$I_a = 6.2513 + 1.3046M - 4.4496 \lg(R_a + 25)$	0.6761	$I_b = 3.4575 + 1.3046M - 3.4264 \lg(R_b + 10)$	0.6761
高娜等(2012) ^[17]	河北地区	$I_a = 2.996 + 1.371M - 1.358 \ln(R_a + 12)$		$I_b = 1.836 + 1.353M - 1.182 \ln(R_b + 6)$	

续表

研究者	研究地区	地震烈度衰减关系			
		长轴 I_a	标准差 σ	短轴 I_b	标准差 σ
李西等 (2012) ^[61]	云南地区	$I_a = 5.4154 + 1.2792M - 3.8738 \lg(R_a + 21)$	0.5204	$I_b = 3.3421 + 1.1719M - 2.8268 \lg(R_b + 7)$	0.4931
	东部强震区	$I_a = 5.7123 + 1.3626M - 4.2903 \lg(R_a + 25)$	0.5826	$I_b = 3.6588 + 1.3626M - 3.5406 \lg(R_b + 13)$	0.5826
	中强地震区	$I_a = 5.8410 + 1.0710M - 3.6570 \lg(R_a + 15)$	0.52	$I_b = 3.9440 + 1.0710M - 2.8450 \lg(R_b + 7)$	0.52
俞言祥等 (2013) ^[18]	新疆区	$I_a = 5.6018 + 1.4347M - 4.4899 \lg(R_a + 25)$	0.5924	$I_b = 3.6113 + 1.4347M - 3.8477 \lg(R_b + 13)$	0.5924
	青藏区	$I_a = 6.4580 + 1.2746M - 4.4709 \lg(R_a + 25)$	0.6636	$I_b = 3.3682 + 1.2746M - 3.3119 \lg(R_b + 9)$	0.6636
	重庆及邻区	$I_a = 6.0038 + 1.1291M - 4.1162 \lg(R_a + 15)$	0.336	$I_b = 3.6467 + 1.1346M - 13.0391 \lg(R_b + 7)$	0.3052
丁娟等 (2015) ^[20]	安徽及近邻区	$I_a = 4.345 + 1.381M - 1.554 \ln(R_a + 15)$	0.4519	$I_b = 2.9704 + 1.3179M - 1.2565 \ln(R_b + 12)$	0.3893
张维佳等 (2015) ^[21]	浙江及邻区	$I_a = 5.073 + 1.011M - 2.698 \lg(R_a + 24)$	0.624	$I_b = 3.789 + 0.942M - 2.156 \lg(R_b + 9)$	0.649
杨彦明等 (2016) ^[22]	内蒙古阿拉善地区	$I_a = -4.1494 + 2.1395M - 0.5797 \ln(R_a + 11)$	0.6453	$I_b = -4.9605 + 2.1898M - 0.5476 \ln(R_b + 1)$	0.6054
	内蒙古中部地区	$I_a = 2.7517 + 1.2610M - 1.0941 \ln(R_a + 12)$	0.5193	$I_b = 2.5671 + 1.0966M - 0.9338 \ln(R_b + 6)$	0.5362
	安徽华北断块区	$I_a = 5.5388 + 1.1362M - 1.4095 \ln(R_a + 25)$	0.2658	$I_b = 3.7484 + 1.0801M - 1.1221 \ln(R_b + 6)$	0.2122
丁娟等 (2016) ^[23]	安徽秦岭-大别山褶皱带	$I_a = 3.4334 + 1.3783M - 1.2744 \ln(R_a + 24)$	0.5233	$I_b = 1.423 + 1.3819M - 0.9448 \ln(R_b + 8)$	0.4766
	安徽下扬子断块区	$I_a = 3.2133 + 1.7004M - 1.6539 \ln(R_a + 25)$	0.4436	$I_b = 0.1532 + 1.8228M - 1.2846 \ln(R_b + 9)$	0.4032
谷国梁等 (2016) ^[24]	天津市及邻区	$I_a = 4.612 + 1.022M - 1.292 \ln(R_a + 10)$	0.586	$I_b = 3.753 + 0.998M - 1.134 \ln(R_b + 6)$	0.532
张方浩等 (2016) ^[25]	云南滇西区域	$I_a = 6.8053 + 1.2972M - 4.7603 \lg(R_a + 22)$	0.5621	$I_b = 5.3315 + 1.2013M - 4.1917 \lg(R_b + 10)$	0.4786
	云南川滇区域	$I_a = 4.2456 + 1.4025M - 3.8238 \lg(R_a + 11)$	0.5018	$I_b = 3.5915 + 1.1432M - 2.8546 \lg(R_b + 5)$	0.4426
	云南川滇东部区域	$I_a = 6.9753 + 1.3067M - 4.7952 \lg(R_a + 23)$	0.4891	$I_b = 5.5615 + 1.1762M - 4.0829 \lg(R_b + 12)$	0.4632
杨凡 (2017) ^[26]	河北及邻区	$I_a = 2.61 + 1.445M - 1.264 \ln(R_a + 12)$	0.348	$I_b = 1.602 + 1.411M - 1.101 \ln(R_b + 6)$	0.329
王杰民等 (2017) ^[27]	胶东地区	$I_a = 3.1525 + 0.8213M - 0.6123 \ln(R_a + 23)$	0.5609	$I_b = 2.7632 + 0.7901M - 0.5229 \ln(R_b + 14)$	0.5049
何奕成等 (2018) ^[28]	江苏及邻区	$I_a = 4.5159 + 1.2662M - 1.4373 \ln(R_a + 17) - 0.0012R_a$	0.533	$I_b = 3.7976 + 1.2662M - 1.3972 \ln(R_b + 11) - 0.0004R_b$	0.533

从我国北方的宁夏,经甘肃省的东部、四川省的西部、直至云南,有一条纵贯中国大陆南北的地震密集带,被称为中国南北地震带。重点对南北地震带地区的地震烈度衰减关系模型进行拟合分析,并与相关研究者的地震烈度衰减关系进行对比研究。

1 地震烈度资料

在地震烈度衰减关系的统计中,可以通过长轴可转向和长轴不可转向两种方法收集地震烈度等震线长短轴数据,但其两者的拟合结果差异不大,因此采用长轴可转向的方法收集数据。主要从《中国震例》中选取了南北地震带地区 1970 年~2012 年的 85 个 $M_s \geq 5.0$ 的地震^[29-40],共 169 条烈度等震线资料。图 1 中给出了所选用地震资料的震级-距离分布图,可以看出震级-距离分布的比较理想,适合进行统计回归。根据数据范围可以推定回归得到的衰减关系适用范围为震级 5.0~8.0,距离为 0~400 km。表 2 给出了所选用的地震等震线资料,相应地震震级范围和烈度等震线数据分布见表 3。

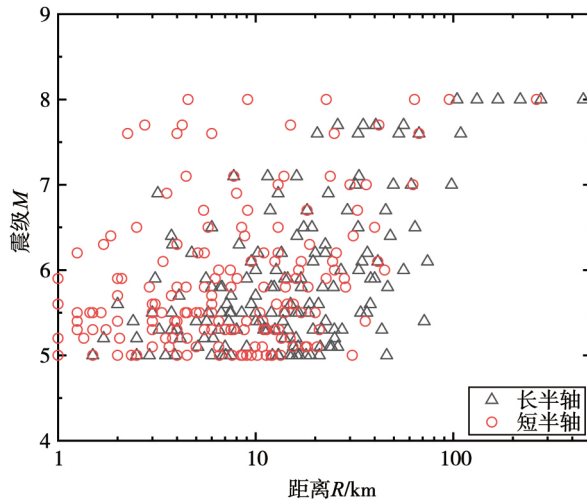


图1 震级-距离分布图

Fig. 1 Distribution of magnitude and distance

表2 地震等震线资料

Table 2 Isoseismic data

序号	发震日期	纬度 N/°	经度 E/°	参考地名	震级 M_S	震中烈度 I_0	烈度 I	长半轴/km	短半轴/km
1	1970-01-05	24°01′	102°41′	云南通海	7.7	10	10	26.00	2.75
							9	35.00	4.25
							8	40.50	15.00
							7	56.00	42.00
2	1970-12-03	35°51′	105°24′	宁夏西吉	5.5	7	7	3.75	1.65
							6	7.40	4.40
3	1971-06-28	37°52′	106°11′	宁夏吴忠	5.1	6	6	7.00	3.00
4	1973-02-06	31°29′	100°32′	四川炉霍	7.6	10	10	20.50	2.25
							9	33.00	4.00
							8	53.00	6.00
							7	67.00	25.00
5	1973-08-11	32°53′	103°55′	四川松潘	6.5	7	7	6.00	2.50
							6	17.50	8.50
							6	109.00	67.00
6	1974-05-11	28°12′	103°55′	云南大关	7.1	9	9	7.75	4.45
							8	11.50	7.75
							7	16.10	13.90
							6	33.30	23.85
7	1976-11-07	27°27′	101°05′	四川盐源	6.7	9	9	11.85	5.45
							8	18.20	9.10
							7	29.10	18.20
							6	45.50	32.75
8	1978-05-19	25°11′	102°21′	云南下关	5.3	6	6	3.75	1.75
9	1978-07-13	32°01′	102°57′	四川黑水	5.4	6	6	7.30	3.00
10	1981-01-24	30°59′	101°06′	四川道孚	6.9	9	8	3.20	0.60
							7	13.00	3.55
							6	23.30	8.00
							6	27.00	16.50
11	1982-04-14	36°48′	105°31′	宁夏海原	5.5	7	7	7.50	3.00
							6	16.50	10.50
							6	27.00	16.50
12	1982-06-16	31°50′	99°51′	四川甘孜	6.0	7	7	10.00	6.50
							6	27.00	16.50

续表

序号	发震日期	纬度 N/°	经度 E/°	参考地名	震级 M_S	震中烈度 I_0	烈度 I	长半轴/km	短半轴/km
13	1982-07-03	26°27′	99°55′	云南剑川	5.4	7	7	5.00	2.00
							6	13.75	6.50
14	1984-01-06	37°50′	102°16′	甘肃武威	5.3	6	6	11.25	5.50
15	1984-11-23	38°05′	106°14′	宁夏灵武	5.3	7	7	3.25	1.25
							6	11.00	7.50
16	1985-09-02	23°34.7′	102°38.8′	云南建水	5.3	7	7	4.00	1.50
							6	11.00	6.00
17	1986-03-13	26°10′	100°12′	云南鹤庆	5.3	6	6	8.00	3.00
18	1986-08-07	29°17′	100°48′	四川理塘	5.6	7	7	15.00	3.00
							6	38.00	15.50
19	1986-10-07	25°24′	102°26′	云南省富民、 武定	5.2	6	6	5.50	3.50
20	1987-01-08	34°13′	103°18′	甘肃迭部	5.9	7	7	14.50	6.25
							6	40.00	16.00
21	1987-08-10	38°03′	106°18′	宁夏灵武	5.5	7	7	5.75	1.25
							6	12.00	6.00
22	1988-01-04	38°04′	106°20′	宁夏灵武	5.5	7	7	3.00	1.50
							6	12.00	4.50
23	1988-01-10	27°14′	100°54.5′	云南宁蒗	5.5	7	7	8.50	5.20
							6	18.50	14.00
24	1988-04-15	26°19′	102°43′	四川会东	5.2	7	7	2.50	1.00
							6	14.00	4.50
25	1988-11-22	38°35′	99°32′	甘肃肃南	5.7	6	6	7.50	3.75
26	1989-09-20	25°28′	103°07′	云南嵩明	5.0	6	6	3.50	2.00
27	1989-11-02	35°59′45″	106°16′50″	宁夏固原	5.0	6	6	2.50	1.00
28	1990-10-20	37°07′	103°37.5′	甘肃天祝-景泰	6.2	8	8	4.75	1.25
							7	13.50	5.50
							6	22.50	11.00
29	1992-12-18	26°16′	100°34′	云南永胜	5.4	6	6	5.65	3.90
30	1993-01-27	23°00′	101°03′	云南普洱	6.3	8	8	3.80	1.70
							7	8.25	4.00
							6	22.50	18.75
31	1993-02-01	25°51′	101°21′	云南大姚	5.3	6	6	8.00	5.50
32	1993-05-24	31°45′	98°42′	四川德格	5.0	6	6	18.00	9.00
33	1993-07-17	27°47′	99°42′	云南中甸	5.8	6	6	12.00	5.50
34	1993-08-07	29°01′26″	103°40′17″	四川沐川凤村	5.0	7	7	2.90	1.50
							6	6.80	4.50
35	1994-12-30	29°02′15″	103°38′30″	四川沐川杨村	5.7	7	7	4.10	2.00
							6	10.00	6.00
36	1995-04-25	22°46′	102°44′	云南金平	5.5	7	7	6.70	1.45
							6	14.00	3.35
37	1995-07-02	36°25′	103°10′	甘肃永登	5.8	8	8	6.60	2.90
							7	12.40	7.50
							6	21.80	18.40
38	1996-02-03	27°05′	100°16′	云南丽江	7.0	9	9	32.00	13.00
							8	49.75	30.00
							7	61.25	36.25
							6	98.00	62.50
39	1996-02-28	29°02′	104°35′	四川宜宾	5.4	7	7	2.40	1.25

续表

序号	发震日期	纬度 N/°	经度 E/°	参考地名	震级 M_s	震中烈度 I_0	烈度 I	长半轴/km	短半轴/km
							6	10.00	4.00
40	1996-06-01	37°21.5′	102°50′	甘肃古浪	5.4	6	6	10.50	9.00
41	1996-12-21	30°25′	99°19′	四川白玉-巴塘	5.5	7	7	16.00	6.00
							6	34.00	17.00
42	1997-01-30	22°24′	101°24′	云南景洪-江城	5.6	7	7	7.15	3.10
							6	20.80	14.45
43	1998-12-01	26°32′	104°05′	云南宣威	5.1	7	7	23.65	18.20
							6	5.10	3.65
44	1999-09-14	31°34′45″	104°07′05″	四川绵竹	5.0	6	6	7.50	2.50
45	2000-01-15	25°35′	101°07′	云南姚安	6.5	8	8	19.25	5.75
							7	33.00	13.00
							6	64.00	40.00
46	2000-01-27	24°11′	103°34′	云南丘北-弥勒	5.5	7	7	10.00	5.00
							6	36.50	20.00
47	2000-06-06	37.1°	103.9°	甘肃景泰	5.9	8	8	3.10	1.00
							7	5.60	2.00
48	2001-02-23	29°20′	101°04′	四川雅江	6.0	8	8	12.70	7.45
							7	33.20	25.05
							6	56.05	44.90
49	2001-03-12	22°21′	99°47′	云南澜沧	5.0	6	6	14.80	9.50
50	2001-04-10	24°48′	99°01′	云南施甸	5.2	6	6	16.00	13.50
51	2001-04-12	24°50′	99°01′	云南施甸	5.9	8	8	9.00	2.10
							7	16.95	14.30
							6	38.15	28.10
52	2001-05-24	27°42′	100°50′	四川盐源- 云南宁蒗	5.8	7	7	6.75	4.45
							6	24.75	14.15
53	2001-06-08	24°49′	98°59′	云南施甸	5.3	6	6	14.50	11.00
54	2001-07-10	24°52′	101°31′	云南楚雄	5.3	6	6	19.50	8.75
55	2001-07-11	39°11′	98°01′	甘肃肃南	5.3	6	6	6.50	4.00
							5	12.50	7.75
56	2001-07-15	24°20′	102°21′	云南江川	5.1	6	6	9.00	6.50
57	2001-09-04	23°39′	100°37′	云南景谷	5.0	6	6	15.25	10.20
58	2002-08-08	30.9°	100.0°	四川新龙	5.3	7	7	11.50	5.50
							6	25.00	12.50
59	2002-12-14	39°42′	97°18′	甘肃玉门	5.9	7	7	14.02	8.05
							6	38.14	22.73
60	2003-07-21	25°57′	101°14′	云南大姚	6.2	8	8	10.25	5.10
							7	20.00	13.00
							6	36.75	25.60
61	2003-08-21	27°28′	101°10′	四川盐源	5.0	6	6	18.95	11.31
62	2003-10-25	38.4°	101.2°	甘肃民乐-山丹	6.1	8	8	9.50	3.40
							7	19.50	12.50
							6	34.50	24.50
63	2003-11-13	34°46′	103°56′	甘肃岷县-临潭 -卓尼	5.2	8	8	1.70	1.35
							7	4.15	2.05
							6	6.10	3.80
64	2003-11-15	27°10′	103°37′	云南鲁甸	5.1	7	7	7.00	5.00

续表

序号	发震日期	纬度 N/°	经度 E/°	参考地名	震级 M_s	震中烈度 I_0	烈度 I	长半轴/km	短半轴/km
							6	16.40	10.80
65	2003-11-26	27°12′	103°38′	云南鲁甸	5.0	7	7	7.05	6.55
							6	16.61	12.13
66	2004-08-10	27°10′	103°36′	云南鲁甸	5.6	8	8	2.00	1.00
							7	9.50	6.00
							6	18.75	12.75
67	2004-09-07	34.7°	103.9°	甘肃岷县-临潭-卓尼	5.0	7	7	6.00	4.00
							6	13.00	9.50
68	2004-10-19	25°06′	99°05′	云南保山	5.0	6	6	16.18	8.61
69	2004-12-26	24°40′	101°33′	云南双柏	5.0	6	6	13.05	11.97
70	2005-08-05	24°33.4′	103°08′	云南会泽	5.3	6	6	27.35	11.36
71	2005-08-13	23°36′	104°04′	云南文山	5.3	6	6	21.60	13.10
72	2006-07-22	28°01′	104°08′	云南盐津	5.1	6	6	21.21	15.45
73	2006-08-25	28°02′	104°06′	云南盐津	5.1	7	7	15.52	9.92
							6	24.23	17.84
74	2007-06-03	23.0°	101.1°	云南宁洱	6.4	8	8	3.75	1.85
							7	16.15	8.80
							6	48.00	31.15
75	2008-05-12	31.01°	103.42°	四川汶川	8.0	11	11	104.50	4.55
							10	131.80	9.10
							9	168.15	22.75
							8	218.15	63.65
							7	277.25	95.45
							6	454.50	263.60
76	2008-08-05			云南文山	5.3	6	6	21.60	13.10
77	2008-08-20	25.12°	97.93°	云南盈江	5.0	8	8	3.91	2.35
							7	15.29	8.42
							6	46.02	30.84
78	2008-08-30	26.2°	101.9°	四川攀枝花仁和-凉山州	6.1	8	8	19.50	9.50
							7	41.50	17.00
							6	74.00	41.50
79	2009-11-02	26°00′	100°42′	云南宾川	5.0	6	6	21.00	13.39
80	2010-01-31	30°16′	105°41′	四川遂宁-重庆潼南	5.0	7	7	1.50	0.65
							6	12.15	7.60
81	2010-02-25	25.4°	101.9°	云南禄丰-元谋	5.1	6	6	26.05	20.46
82	2011-03-10	24.72°	97.92°	云南盈江	5.8	8	8	6.00	4.00
							7	17.00	11.00
							6	46.50	28.50
83	2011-04-10	31.4°	100.7°	四川炉霍	5.3	7	7	19.50	7.00
							6	43.50	21.00
84	2011-08-09	25.1°	98.7°	云南腾冲	5.2	6	6	25.11	14.94
85	2012-05-03	40.58°	98.62°	甘肃金塔	5.4	7	7	22.60	10.87
							6	71.27	35.88

表3 地震震级和烈度分布
Table 3 Magnitude and intensity distribution

震级范围	地震次数	不同烈度值的等震线数							合计
		5	6	7	8	9	10	11	
5.0~5.9	68	1	67	36	7				111
6.0~6.9	12		12	12	10	1			35
7.0~7.9	4		3	4	4	4	2		17
≥8	1		1	1	1	1	1	1	6
合计	85	1	83	53	22	6	3	1	169

地震烈度等震线是相同烈度区域的外包线,由震中烈度等震线包围形成的区域即为极震区。通常情况下,烈度在极震区内是饱和的,该范围内任意一点的烈度值都是相同的,所以需要在极震区内增加一些数据点来满足要求,这是近场补点。近场补点仅在震中烈度为Ⅶ度以上和最内圈等震线半径大于5 km的情况下进行。另外,远场地震烈度会逐渐减小,并在长短轴方向的差异逐渐减小,等震线趋于圆形,所以需要增加远场补点来满足这样的要求。有感烈度值取3~4度的平均值3.5度,取有感范围的半径作为远场控制点^[41]。

2 模型选择与计算结果

在发震构造和场地条件的影响下,地震烈度等震线通常会呈现椭圆形或近椭圆形,沿发震断层方向烈度衰减较慢,而与断层垂直方向上烈度衰减较快,衰减快慢的方向差别到了远场逐渐消失,等震线趋于圆形。为了考虑地震烈度沿发震构造不同方向衰减规律的差异特点,通常采用沿长轴方向和短轴方向分别统计分析其衰减关系。采用椭圆烈度衰减模型的计算公式,其地震烈度衰减模型通用表达形式为:

$$I = A + BM + C \ln(R + R_0) + \varepsilon \quad (1)$$

椭圆模型长短轴公式分别为:

$$I_a = A_a + B_a M + C_a \ln(R_a + R_{0a}) + \varepsilon \quad (2)$$

$$I_b = A_b + B_b M + C_b \ln(R_b + R_{0b}) + \varepsilon \quad (3)$$

式中: a 和 b 分别表示长轴和短轴方向; I 表示烈度; M 表示震级; R 是震中距; A 、 B 和 C 是回归系数; R_0 是回归参数; ε 为回归分析中表示不确定性的随机变量,通常假定为对数正态分布,其均值为0,标准差为 σ 。

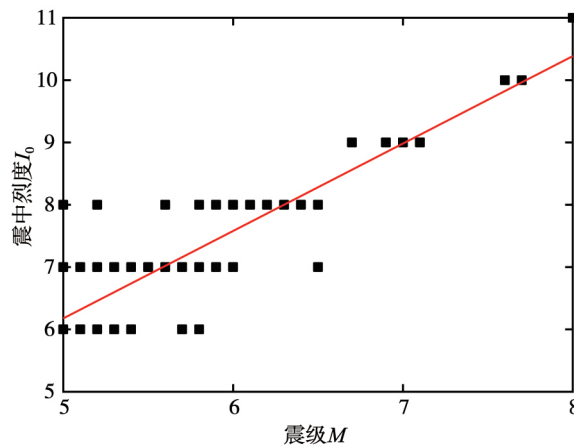


图2 震中烈度-震级关系图

Fig. 2 Epicenter intensity-magnitude map

陈达生等^[8]在研究不同的预设常数对衰减曲线的影响时发现,随着选取的 R_0 的增大,回归分析结果在近场与远场的烈度值逐渐减小,而在中场的烈度值逐渐增大,并建议 R_0 取值应使震中烈度和震级关系更接

近真实情况。首先基于所选的地震资料,对震中烈度和震级的经验关系进行拟合回归,见式(4)和图2。

$$I_0 = 1.4031M - 0.8391 \quad \sigma = 0.568 \quad (4)$$

为了使地震烈度衰减关系的近场烈度更符合回归得到的震中烈度-震级关系, R_0 在长轴和短轴方向分别取值为 34 和 6, 最终得到我国南北地震带地区的地震烈度衰减关系为:

$$I_a = 7.4753 + 1.2093M - 1.9570 \ln(R_a + 34) \quad \sigma = 0.698 \quad (5)$$

$$I_b = 4.4276 + 0.9438M - 1.1857 \ln(R_b + 6) \quad \sigma = 0.584 \quad (6)$$

3 对比与讨论

南北地震带地区位于我国东西部分界处,但是大部分地区属于西部地区,因此图3给出了南北地震带地区与我国西部地区(地震烈度区划图(1990)^[1];汪素云等(2000)^[2];肖亮等(2011)^[3])的地震烈度衰减关系作对比分析研究。地震烈度区划图(1990)之后,汪素云(2000)、肖亮等(2011)分别在以往研究者的基础上增加了近期地震数据,完善了我国西部地区地震烈度数据库,研究得到的烈度衰减关系呈现出近场烈度减小、远场烈度增大的趋势。南北地震带地区的地震数据主要来自我国西部地区,两者的地震烈度具有相似的衰减趋势,但我国西部地区的地震烈度数据又包含新疆和西藏等地区,所以两者的地震烈度衰减关系也有不同。地震烈度衰减关系整体衰减趋势较慢,分别从震中距为 1 km、30 km 和 200 km 处开始,本文结果的 5.0、6.0 和 7.0 级地震的烈度高于其他研究者,说明南北地震带地区的地震烈度衰减关系具有远场烈度衰减较慢的特点。另外,相比我国西部地区,南北地震带地区的长短轴烈度衰减的差异更加明显,50 km 之后长轴方向的烈度衰减明显加快,而短轴方向却保持较平缓的衰减趋势,充分体现了地震烈度衰减规律由于场地条件、震源特性和传播介质等因素的影响,具有一定的地域差异性。

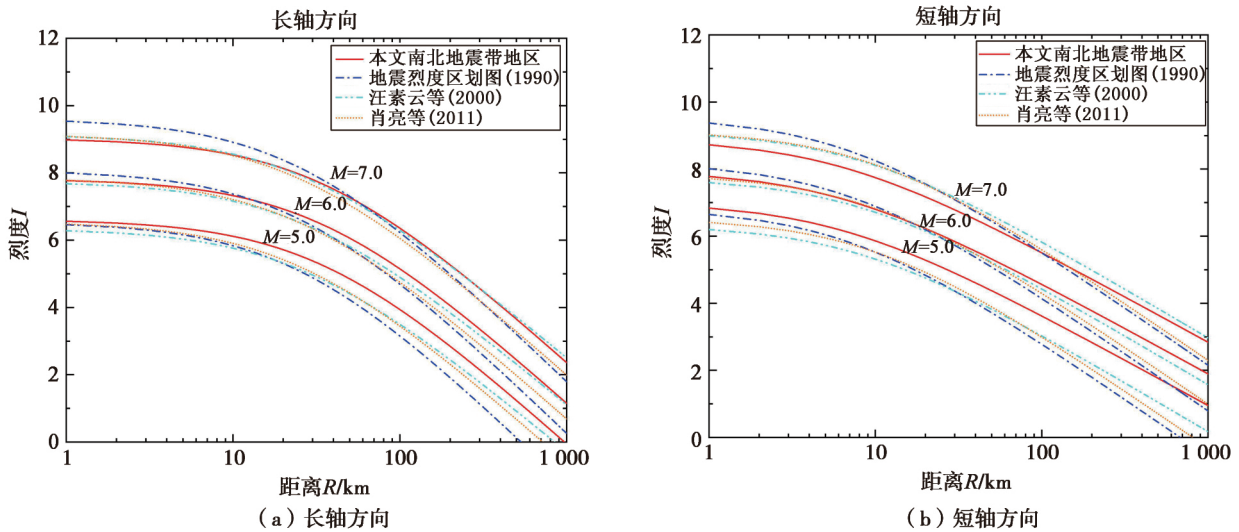


图3 本文结果与中国西部地震烈度衰减关系对比

Fig. 3 Comparison between the results of this paper and the attenuation of earthquake intensity in western China

南北地震带地区内部也会因为地域的差异,形成不同的烈度衰减关系,早前就有研究者对南北地震带的部分区域研究地震烈度衰减关系,因此图4给出了本文结果与部分地区的对比结果。从中可以看出:本文的烈度衰减关系相比于四川盆地^[4]、甘肃地区^[5]和云南地区长轴方向衰减稍快^[6],四川盆地在各地区之间的地震烈度衰减最快。但是本文结果与其他研究者的地震烈度关系整体上是相似的,近场范围的震中烈度相差很小,与震级的经验关系也较为吻合,远场范围的烈度差距在 0.3 度之内,说明本文结果能够较好地反映南北地震带地区的地震烈度衰减关系。

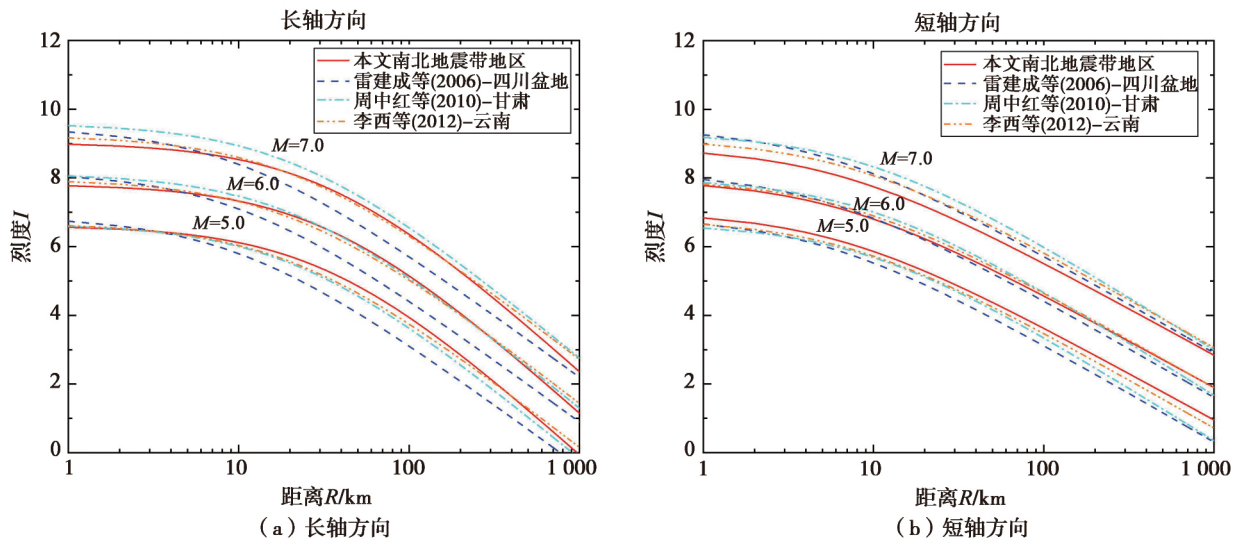


图4 本文结果与南北地震带部分地区地震烈度衰减关系对比

Fig. 4 Comparison between the results of this paper and the attenuation of seismic intensity in some areas of the North-South Seismic Belt

4 结论

收集了1970年~2012年我国南北地震带地区的85个地震的烈度等震线资料,采用长轴可转向的方法拟合得到了我国该地区的地震烈度衰减关系,适用震级范围为5.0~8.0,距离为0~400 km。将在研究过程中的发现,总结如下:

(1) 地震烈度衰减关系具有区域差异性。我国西部不仅包括南北地震带地区,还有新疆、西藏等地区,与西部地区烈度衰减关系相比,本文结果的衰减趋势总体较慢,且长轴方向较短轴方向衰减明显较快;在南北地震带的地域内,四川盆地比甘肃、云南地区的烈度衰减要快。

(2) 在与四川盆地、云南和甘肃地区的对比中,本文结果不仅与其烈度衰减趋势基本相似,在近、远场范围的烈度差距都在0.3度之内,充分体现了本文结果在南北地震带地区的适用性。

(3) 总体看来:本文结果合理体现了近场长短轴一致,远场符合有感范围的特点,能够较好地反映南北地震带地区的地震烈度衰减规律,对于该地区的地震灾害快速评估具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 国家地震局. 中国地震烈度区划图(1990)概论[M]. 地震出版社,1996:137-144.
National Seismological Bureau. An Introduction to the Seismic Intensity Division Map of China (1990) [M]. Earthquake Publishing House, 1996: 137-144. (in Chinese)
- [2] 汪素云,俞言祥,等. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. 中国地震,2000,16(2):99-106.
WANG Suyun, YU Yanxiang, et al. Development of attenuation relations for ground motion in China[J]. Earthquake Research in China, 2000, 16(2): 99-106. (in Chinese)
- [3] 肖亮,俞言祥. 中国西部地区地震烈度衰减关系[J]. 震灾防御技术,2011,6(4):358-371.
XIAO Liang, YU Yanxiang. Earthquake intensity attenuation relationship in western China[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2011, 6(4): 358-371. (in Chinese)
- [4] 雷建成,高孟潭,俞言祥. 西南地区近代地震的震中烈度与有感半径的统计研究[J]. 震灾防御技术,2006,1(2):137-145.
LEI Jiancheng, GAO Mengtan, YU Yanxiang. The statistical study on near-epicenter intensity and sensible radius of recent earthquakes in south-west China[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2006, 1(2): 137-145. (in Chinese)
- [5] 周中红,何少林,陈文凯. 甘肃省地震烈度衰减关系研究[J]. 西北地震学报,2010,32(1):72-75.
ZHOU Zhonghong, HE Shaolin, CHEN Wenkai. Parameters in seismic intensity affecting field model of Gansu area[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2010, 32(1): 72-75. (in Chinese)
- [6] 李西,郭君,陈坤华,等. 基于GIS的初评估方法在盈江5.8级及缅甸7.2级地震后的应用[J]. 地震研究,2012,35(1):106-111.
LI Xi, GUO Jun, CHEN Kunhua, et al. Application of primary assessment method based on GIS after the Yingjiang MS5.8 and Myanmar MS7.2 Earthquakes[J]. Journal of Seismological Research, 2012, 35(1): 106-111. (in Chinese)

- [7] 汪素云, 武宦英. 鲁南地区地震动参数的衰减关系[J]. 中国地震, 1988, 4(3): 182-186.
WANG Suyun, WU Huaning. Attenuation relations of ground motion parameters in Lunan area[J]. Earthquake Research in China, 1988, 4(3): 182-186. (in Chinese)
- [8] 陈达生, 刘汉兴. 地震烈度椭圆衰减关系[J]. 华北地震科学, 1989, 7(3): 31-42.
CHEN Dasheng, LIU Hanxing. Elliptical attenuation relationship of earthquake intensity[J]. North China Earthquake Sciences. 1989, 7(3): 31-42. (in Chinese)
- [9] 华爱军, 魏光兴, 蒋海昆. 胶东及其北部沿海地震烈度衰减关系[J]. 地震学刊, 1993, 13(4): 26-29.
HUA Aijun, WEI Guangxing, JIANG Haikun. Earthquake intensity attenuation relationship in Jiaodong and its northern coast[J]. Journal of Seismology, 1993, 13(4): 26-29. (in Chinese)
- [10] 翟洪涛, 刘欣, 刘庆忠, 等. 江淮地区地震烈度衰减关系的研究[J]. 华北地震科学, 2003, 21(4): 30-34.
ZHAI Hongtao, LIU Xin, LIU Qingzhong, et al. Study on the attenuation of seismic intensity in jianghuai area[J]. North China Earthquake Sciences, 2003, 21(4): 30-34. (in Chinese)
- [11] 李英民, 蔡辉腾, 韩军. 重庆及邻近地区地震烈度衰减关系研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(1): 17-22.
LI Yingmin, CAI Huiteng, HAN Jun. Study on attenuation relation of seismic intensity in Chongqing and its adjacent areas[J]. Journal of Disaster Prevent and Mitigation Engineering, 2007, 27(1): 17-22. (in Chinese)
- [12] 李光, 童远林, 郑颖平. 安徽及邻区地震烈度衰减关系研究[J]. 华南地震, 2008, 28(3): 49-55.
LI Guang, TONG Yuanlin, ZHENG Yingping. Study on seismic intensity attenuation law in anhui and the neighboring area [J]. South China Journal of Seismology, 2008, 28(3): 49-55. (in Chinese)
- [13] 王继, 俞言祥. 华中华南中强地震区地震烈度衰减关系研究[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(1): 20-26.
WANG Ji, YU Yanxiang. Seismic intensity attenuation law in moderate intense seismic zone of central and southern China[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(1): 21-26. (in Chinese)
- [14] 苗庆杰, 许萍. 山东及近邻区地震烈度衰减关系探讨[J]. 西北地震学报, 2008, 30(3): 282-287.
MIAO Qingjie, XU Ping. Study on the formula of seismic intensity attenuation in Shandong and its adjacent areas[J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(3): 282-287. (in Chinese)
- [15] 卢建旗, 李山有, 李伟. 中强地震活动区地震动衰减关系的确定[J]. 世界地震工程, 2009, 25(4): 33-43.
LU Jianqi, LI Shanyou, LI Wei. Study on ground motion attenuation relationship of moderate earthquake risk areas[J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(4): 33-43. (in Chinese)
- [16] 崔鑫, 苗庆杰, 王金萍. 华北地区地震烈度衰减模型的建立[J]. 华北地震科学, 2010, 28(2): 18-21.
CUI Xin, MIAO Qingjie, WANG Jinping. Model of the seismic intensity attenuation for north China [J]. North China Earthquake Sciences, 2010, 28(6): 18-21. (in Chinese)
- [17] 高娜, 贾军鹏, 魏艳旭, 等. 地震灾害评估软件烈度衰减系数研究[J]. 华北地震科学, 2012, 30(1): 6-11.
GAO Na, JIA Junpeng, WEI Yanxu, et al. Study on the intensity attenuation coefficient of seismic disaster assessment software[J]. North China Earthquake Sciences, 2012, 30(1): 6-11. (in Chinese)
- [18] 俞言祥, 李山有, 肖亮. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J]. 震灾防御技术, 2013, 8(1): 24-33.
YU Yanxiang, LI Shanyou, XIAO Liang. Development of ground motion attenuation relations for the new seismic hazard map of China [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2013, 8(1): 24-33. (in Chinese)
- [19] 秦娟, 蔡辉腾, 李光, 等. 重庆及邻区震后烈度分布评估模型构建[J]. 地震工程学报, 2013, 35(2): 394-400.
QIN Juan, CAI Huiteng, LI Guang, et al. Study on model building of post-earthquake intensity in Chongqing and its adjacent areas[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(2): 394-400. (in Chinese)
- [20] 丁娟, 何琳, 叶峰, 等. 安徽及邻区地震烈度衰减特征研究[J]. 地震地磁观测与研究, 2015, 36(3): 43-48.
DING Juan, HE Lin, YE Feng, et al. Attenuation relation of seismic intensity in Anhui Province and its neighbor area[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2015, 36(3): 43-48. (in Chinese)
- [21] 张维佳, 姜立新, 李东平. 浙江及邻区地震烈度衰减关系研究[J]. 震灾防御技术, 2015, 10(4): 902-912.
ZHANG Weijia, JIANG Lixin, LI Dongping. Seismic intensity attenuation relationship of Zhejiang province and its neighboring areas [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2015, 10(4): 902-912. (in Chinese)
- [22] 杨彦明, 戴勇, 张国清, 等. 内蒙古中西部地区地震烈度衰减关系[J]. 地震地磁观测与研究, 2016, 37(1): 30-37.
YANG Yanming, DAI Yong, ZHANG Guoqing, et al. Attenuation relation of seismic intensity in the middle and western regions of Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2016, 37(1): 30-37. (in Chinese)
- [23] 丁娟, 于书媛, 王义. 安徽分区地震烈度衰减关系研究[J]. 地震地磁观测与研究, 2016, 37(6): 27-31.
DING Juan, YU Shuyuan, WANG Yi. Research on seismic intensity attenuation relationship of three partitions of Anhui Province[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2016, 37(6): 27-31. (in Chinese)
- [24] 谷国梁, 邱虎, 王晓蕾, 等. 天津市及邻区地震烈度衰减关系研究[J]. 震灾防御技术, 2016, 11(1): 35-43.
GU Guoliang, QIU Hu, WANG Xiaolei, et al. Attenuation relationship of seismic intensity in Tianjin city and its adjacent areas [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2016, 11(1): 35-43. (in Chinese)
- [25] 张方浩, 蒋飞蕊, 李永强, 等. 云南地区地震烈度评估模型研究[J]. 中国地震, 2016, 32(3): 511-521.

- ZHANG Fanghao ,JIANG Feirui ,LI Yongqiang , et al. Study of the evaluation model of the earthquake influence in Yunnan [J]. Earthquake Research in China ,2016 ,32(3) :511 – 521. (in Chinese)
- [26] 杨凡. 河北及邻区地震烈度衰减关系研究[J]. 地震地磁观测与研究,2017,38(2):98–103.
YANG Fan. Study on seismic intensity attenuation relationship in Hebei and adjacent areas [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research ,2017 ,38(2) :98 – 103. (in Chinese)
- [27] 王杰民,曲利,索锐. 胶东地区地震烈度衰减关系[J]. 地震地磁观测与研究,2017,38(4):32–36.
WANG Jiemin ,QU Li ,SUO Rui. Attenuation relation of seismic intensity in Jiaodong area [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research ,2017 ,38(4) :32 – 36. (in Chinese)
- [28] 何奕成,徐年,吴珍云,等. 江苏及邻区地震烈度衰减关系[J]. 地震地磁观测与研究,2018,39(1):60–66.
HE Yicheng ,XU Nian ,WU Zhenyun , et al. Study on seismic intensity attenuation law in Jiangsu and its adjacent areas [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research ,2018 ,39(1) :60 – 66. (in Chinese)
- [29] 张肇诚,罗兰格,李海华,等. 中国震例(1966–1975) [M]. 北京:地震出版社,1988.
ZHANG Zhaocheng ,LUO Lange ,LI Haihua , et al. Examples of Earthquakes in China (1966 – 1975) [M]. Beijing: Earthquake Publishing House ,1988. (in Chinese)
- [30] 张肇诚,罗兰格,李海华,等. 中国震例(1976–1980) [M]. 北京:地震出版社,1990.
ZHANG Zhaocheng ,LUO Lange ,LI Haihua , et al. Examples of Earthquakes in China (1976 – 1980) [M]. Beijing: Earthquake Publishing House ,1990. (in Chinese)
- [31] 张肇诚,罗兰格,李海华,等. 中国震例(1981–1985) [M]. 北京:地震出版社,1990.
ZHANG Zhaocheng ,LUO Lange ,LI Haihua , et al. Examples of Earthquakes in China (1981 – 1985) [M]. Beijing: Earthquake Publishing House ,1990. (in Chinese)
- [32] 张肇诚,郑大林,徐京华,等. 中国震例(1986–1988) [M]. 北京:地震出版社,1999.
ZHANG Zhaocheng ,ZHENG Dalin ,XU Jinghua , et al. Examples of Earthquakes in China (1986 – 1988) [M]. Beijing: Earthquake Publishing House ,1999. (in Chinese)
- [33] 张肇诚,郑大林,徐京华,等. 中国震例(1989–1991) [M]. 北京:地震出版社,2000.
ZHANG Zhaocheng ,ZHENG Dalin ,XU Jinghua , et al. Examples of Earthquakes in China (1989 – 1991) [M]. Beijing: Earthquake Publishing House ,2000. (in Chinese)
- [34] 陈棋福,郑大林,车时,等. 中国震例(1992–1994) [M]. 北京:地震出版社,2002.
CHEN Qifu ,ZHENG Dalin ,CHE Shi , et al. Examples of Earthquakes in China (1992 – 1994) [M]. Beijing: Earthquake Publishing House , 2002. (in Chinese)
- [35] 陈棋福,郑大林,刘桂萍,等. 中国震例(1995–1996) [M]. 北京:地震出版社,2002.
CHEN Qifu ,ZHENG Dalin ,LIU Guiping , et al. Chinese Earthquake Cases (1995 – 1996) [M]. Beijing: Earthquake Publishing House , 2002. (in Chinese)
- [36] 陈棋福,郑大林,高荣胜,等. 中国震例(1997–1999) [M]. 北京:地震出版社,2003.
CHEN Qifu ,ZHENG Dalin ,GAO Rongsheng , et al. Examples of Earthquakes in China (1997 – 1999) [M]. Beijing: Earthquake Publishing House ,2003. (in Chinese)
- [37] 陈棋福,郑大林,车时,等. 中国震例(2000–2002) [M]. 北京:地震出版社,2008.
CHEN Qifu ,ZHENG Dalin ,CHE Shi , et al. Examples of Earthquakes in China (2000 – 2002) [M]. Beijing: Earthquake Publishing House , 2008. (in Chinese)
- [38] 蒋海昆,付虹,杨马陵,等. 中国震例(2003–2006) [M]. 北京:地震出版社,2014.
JIANG Haikun ,FU Hong ,YANG Maling , et al. Examples of Earthquakes in China (2003 – 2006) [M]. Beijing: Earthquake Publishing House ,2014. (in Chinese)
- [39] 蒋海昆,付虹,杨马陵,等. 中国震例(2007–2010) [M]. 北京:地震出版社,2018.
JIANG Haikun ,FU Hong ,YANG Maling , et al. Examples of Earthquakes in China (2007 – 2010) [M]. Beijing: Earthquake Publishing House ,2018. (in Chinese)
- [40] 蒋海昆,杨马陵,付虹,等. 中国震例(2011–2012) [M]. 北京:地震出版社,2018.
JIANG Haikun ,YANG Maling ,FU Hong , et al. Examples of Earthquakes in China (2011 – 2012) [M]. Beijing: Earthquake Publishing House ,2018. (in Chinese)
- [41] 汪素云,时振梁. 有感半径与震级的关系及其应用[M]//国家地震局震害防御司. 中国地震区划文集. 北京:地震出版社,1993:179–184.
WANG Suyun ,SHI Zhenliang. The Relationship Between the Sensed Radius and the Magnitude and Its Application [M] // Department of Earthquake Disaster Prevention , National Earthquake Administration of China. Anthology of China Earthquake Division. Beijing: Earthquake Press , 1993: 179 – 184. (in Chinese)