

任静,李志强,徐志双,2020. 青海省地震烈度衰减关系研究. 中国地震,36(3):620~629.

# 青海省地震烈度衰减关系研究

任静 李志强 徐志双

中国地震台网中心,北京 100045

**摘要** 选取青海省内 1947~2019 年 33 个  $M_s \geq 5.0$  地震进行地震回归分析,并与前人给出的西部烈度衰减关系、地震灾害评估系统软件及地震烈度分布资料进行对比分析后,得出适合青海省特点的地震烈度衰减关系模型,数据回归后青海省地震震级衰减关系适用范围为  $5.0 \leq M_s \leq 8.0$ ,震中距范围为  $0 \leq R \leq 250 \text{ km}$ 。

**关键词:** 地震烈度 衰减关系 青海省

[文章编号] 1001-4683(2020)03-0620-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地震烈度衰减关系在地震烈度区划、地震灾害损失快速评估及地震安全性评价等相关灾害研究工作中有着重要意义(丁娟等,2015)。地震烈度衰减关系受震源特性、深部构造、传播介质、场地条件、建筑物结构类型、地形和居民点分布等多种因素的影响,具有明显的地区性和方向性(张苏平等,2015)。地震烈度衰减关系通常由历史震例等震线数据拟合得到,整理不同地区历史等震线数据统计可得出适合于相应地区的烈度衰减规律,对此中国许多学者做了大量的研究工作。汪素云等(2000)将中国大陆以  $105^\circ \text{E}$  为界分为东部和西部 2 个区来确定地震烈度衰减关系;肖亮(2011)等将中国西部划分为新疆区和川藏区 2 个统计单元,采用长、短轴椭圆模型重新拟合了西部地区的分区地震烈度衰减关系;周中红等(2010)选取了甘肃省内 1950~2004 年间主震震级  $M_s \geq 5.0$ 、震中烈度  $I \geq \text{V}$  的 20 次地震,通过回归分析得出了适合甘肃地区特点的地震烈度衰减关系;除此之外,前人对新疆、重庆、浙江、云南、安徽、山东等省的烈度衰减关系也进行了相关研究(苗庆杰等,2008;谭明等,2011;秦娟等,2014;张维佳等,2015;丁娟等,2015;张方浩等,2016)。

青海省位于青藏高原北部,是中国地震活动强烈的地区之一,区内活动构造发育,以近 EW 向左旋走滑活动断层为主,兼 NW 向右旋走滑活动断层和 NWW 向逆冲活动断层,历史地震资料丰富。目前,对青海省地震烈度衰减关系模型的研究工作开展较少。地震灾害发生之后,快速估计地震成灾范围、人员伤亡和经济损失等,统称为地震灾害快速评估工作。“地震灾害快速评估系统”是地震应急决策辅助建议的重要基础和科学依据,可提高地震灾害快速评估结果的精度,对提高政府地震应急处置能力,特别是震后响应启动及初期应急指

[收稿日期] 2020-04-27; [修定日期] 2020-06-12

[项目类别] 2020 年地震应急青年基金(CEAEDM202026)、2020 年中国地震台网中心青年基金(QNJ202012)共同资助

[作者简介] 任静,女,1987 年生,工程师,主要从事地震应急与衰减规律研究工作。E-mail: renjing19870824@163.com

挥决策具有重要的意义。目前“地震灾害快速评估系统”中地震影响场的烈度衰减关系采用的是大范围的中国西部烈度衰减关系分区中的川藏区研究成果(肖亮等,2011),研究中采用的震例资料涉及四川、西藏、甘肃、青海和宁夏,范围较大,而实际地震烈度衰减关系受地震孕育和发生的构造背景、构造应力场、传播介质和场地条件等不同的影响存在较强的地区性差异,因此“地震灾害快速评估系统”中计算出的地震影响场分布、震害损失结果和实际情况有一定的偏差,直接影响了地震应急辅助决策和救援方案的合理性。因此,亟需研究适合青海本省的地震衰减关系模型,合理的区域性衰减规律可以全面提高“地震快速评估系统”和震害预测结果的精准性,也可以广泛应用于青藏高原北部地震区划和地震安全性评价等工程设防领域。

## 1 研究资料的选取

青海省位于新生代以来地壳运动强烈的青藏高原中北部及东北缘,区内地震构造规模大、活动性强,主要分布阿尔金断裂带、祁连山-河西走廊活动断裂带、昆仑山断裂带、巴颜喀拉断裂带和唐古拉山断裂带,是中国大陆地震多发区之一,地震具有频次高、强度大、分布广的特点(马玉虎,2005;马玉虎,2018)。

研究数据的选取依据以下原则:①可靠的震例数据来源:本文所选地震烈度数据主要来自中国地震局有关资料汇编、官方网站及相关文献等(中国地震局震害防御司,1999;中国地震局震灾应急救援司,2010;中国地震局监测预报司,2001;中国地震局震灾应急救援司,2015a、2015b);②搜集的震例有清晰的等震线分布图;③震例等震线图中要有较充分的参考点,可准确地对其进行地理坐标配准和数字化。基于以上3个原则,共选择1947年以来的青海省5.0级以上的震例33个,震例分布见图1。

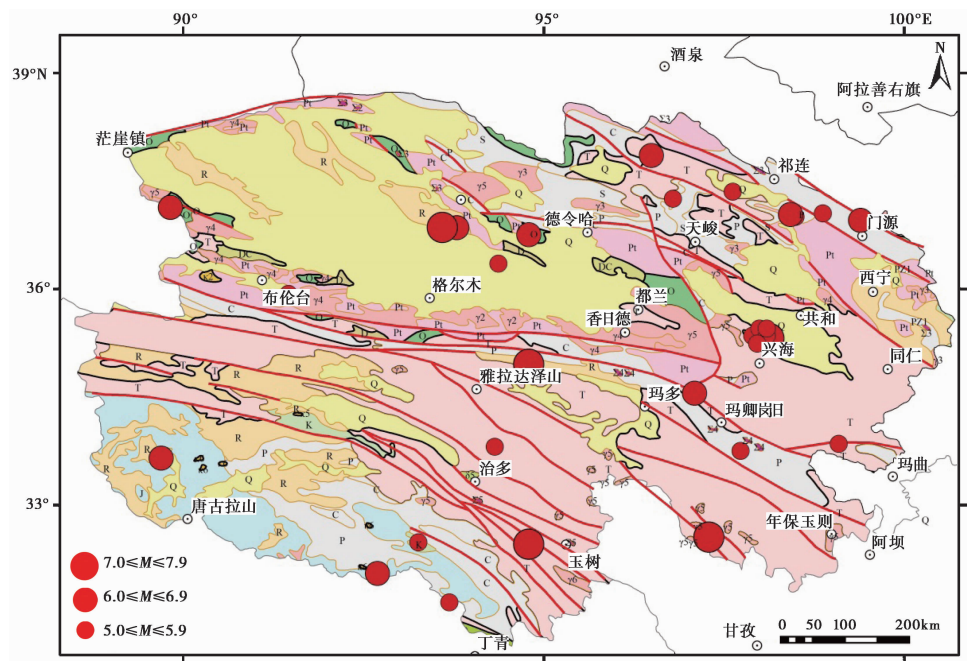


图1 青海地区所用震例的震中分布

## 2 样本数据的处理分析

### 2.1 数字化量取半径

根据《中国地震烈度区划图(1990)概论》(国家地震局,1996),在地震烈度衰减关系的统计中,采用长轴不转向与长轴可转向数据的拟合结果差异不大。因此,本研究采用了长轴可转向的方法量取等震线长、短轴数据,即以每条等震线最长方向的半径为长轴半径,与之相垂直的方向为短轴半径。受发震构造、地形和场地条件的影响,很多地震的烈度等震线不规则,数字化等震线时,将每个地震烈度分布图、发震断层图和地形图叠加在一起,依据原始等震线,参考发震断层走向和地形条件,提取不同烈度区长、短轴半径,对于原始数据中等震线部分残缺的,按照椭圆形形状补全,量取不同烈度区长、短轴半径(张苏平等,2015)。本文所选震例的长短轴数据如表 1。

### 2.2 近、远场补点

通常情况下,烈度等震线圈勾画的是各个烈度等级的外包线(丁娟等,2015)。为了使衰减曲线达到同极震区一样的要求,即烈度在极震内是达到饱和的,该范围内任一点均具有同一震中烈度值,在极震区内适当增补一些数据点,称为近场补点(仅在震中烈度Ⅶ度以上和最内圈等震线半径 $>5\text{km}$  情况下进行)(汪素云等,1993);另外,为了体现远场区发震构造影响消失、等震线形状趋于圆形的特点,在有感范围的半径距离以有感烈度值进行远场补点(肖亮等,2011),本研究选取有感烈度值Ⅳ度作为远场补点。

### 2.3 震级、烈度与长、短轴长度关系

图 2 为本文所选震例的震级与长、短半轴长度关系图,图 3 为烈度、震级与长、短半径长度关系图,其中  $M_s$  为面波震级, $R$  分别为长、短轴半轴长度。从图中可以看出  $M_s$ - $R$  和  $M_s$ - $R$ - $I$  数据分布情况,将其进行回归分析,数据回归后所得的青海省地震衰减关系适用范围为震级  $5.0 \leq M_s \leq 8.0$ ,震中距范围为  $0 \leq R \leq 250\text{km}$ 。

## 3 烈度衰减关系的模型确定及拟合结果

### 3.1 椭圆烈度衰减模型

目前最常用的衰减模型包括点源模型、椭圆模型和断层破裂模型(杨彦明等,2016)。本文收集的青海省地震等震线分布基本多呈椭圆形,因此本文选取椭圆模型进行回归分析。椭圆烈度衰减关系模型的表达式为(陈达生等,1989;翟洪涛等,2003;王继等,2008;孙继浩等,2011;杨彦明等,2016)

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

式中, $I$  为地震烈度; $M$  为地震震级; $R_0$  为近场饱和因子;系数  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为回归常数; $\varepsilon$  为随机变量,通常假定为正态分布,均值为 0,标准差为  $\sigma$ 。

为了考虑烈度沿不同方向衰减规律的差异,在地震烈度衰减关系数据拟合时,本文采用沿长轴方向和短轴向分别统计烈度衰减规律的地震烈度椭圆衰减关系模型(陈达生等,1989),即

表 1		青海省烈度衰减数据						
序号	时间 (年-月-日)	地点	北纬 /(°)	东经 /(°)	$M_s$	烈度	长轴 /km	短轴 /km
1	1947-03-17	青海达日	33.3	99.5	7.7	X	45.00	1.50
						IX	62.50	7.51
						VIII	85.01	10.15
2	1963-04-19	青海阿兰湖	35.7	97.0	7.0	VIII	11.70	6.97
						VII	37.84	29.76
						VI	71.15	45.83
3	1980-04-18	青海天峻	37.86	99.13	5.2	V	14.00	6.00
4	1984-02-17	青海祁连	37.74	100.74	5.3	VI	8.25	4.00
5	1986-08-26	青海门源	37.70	101.60	6.5	VIII	12.75	3.30
						VII	24.70	13.00
						VI	42.50	26.00
6	1986-12-21	青海格尔木	36.68	93.67	5.3	VI	33.75	11.25
						V	61.50	22.50
7	1988-11-05	青海唐古拉山	34.40	91.90	6.8	IX	6.00	3.00
						VIII	20.00	9.00
						VII	55.00	21.00
						VI	113.00	53.00
						V	220.00	110.00
8	1990-01-14	青海茫崖	37.88	92.03	6.6	VIII	22.50	6.50
						VII	51.50	23.50
						VI	95.00	43.50
9	1990-04-26	青海共和	36.06	100.33	7.0	IX	5.75	2.50
						VIII	14.25	7.50
						VII	32.00	15.50
						VI	54.00	37.75
10	1991-01-02	青海祁连	38.20	99.90	5.1	VI	8.00	3.00
						V	23.50	9.50
						IV	42.50	18.50
11	1991-09-20	青海塘格木	36.00	100.17	5.3	VI	30.00	15.00
12	1991-10-01	青海门源	37.80	101.08	5.2	VII	11.00	3.00
						VI	35.00	15.00
13	1992-05-17	青海共和	36.07	100.22	5.0	VI		3.25
						V		10.0
14	1992-12-21	青海诺木洪	37.10	96.58	5.2	V	35.00	21.25
15	1993-09-05	青海杂多	32.81	94.93	5.1	VI	17.00	8.70
						V	62.50	26.00
16	1993-10-26	青海祁连	38.60	98.70	6.1	V	28.00	
						IV	45.00	28.00



续表 1

序号	时间 (年-月-日)	地点	北纬 /(°)	东经 /(°)	$M_s$	烈度	长轴 /km	短轴 /km
17	1994-01-03	青海共和	36.10	100.10	6.0	VIII	26.00	7.00
						VII	40.50	16.00
						VI	67.00	33.50
18	1994-02-16	青海共和	36.20	100.20	5.8	VII		3.00
						VI		9.00
19	1994-09-04	青海共和	36.10	100.30	5.3	VI	2.60	1.00
						V	6.00	
20	1994-09-24	青海共和	36.20	100.30	5.5	VII	3.00	1.25
						VI	7.00	
						V	10.75	
21	1995-07-09	青海共和	35.99	100.17	5.3	VI	8.00	3.25
						V	17.50	3.25
22	1999-09-27	青海河南	34.60	101.30	5.1	VI	2.00	1.10
						V	7.70	5.60
23	1999-11-26	青海玛沁	34.50	99.94	5.0	VI	18.50	7.00
24	2000-04-15	青海杂多	33.23	95.47	5.3	VII	9.00	5.00
						VI	20.00	15.00
						V	30.00	17.50
25	2000-09-12	青海兴海	35.30	99.30	6.6	VIII	10.00	5.00
						VII	21.25	12.75
						VI	43.75	26.50
						V	82.50	57.50
26	2003-04-17	青海德令哈	37.50	97.00	6.6	VIII	8.70	6.65
						VII	38.15	15.25
						VI	67.35	25.35
27	2008-11-10	青海海西	37.60	96.00	6.3	VII	24.71	14.28
						VI	73.07	40.90
28	2009-08-28	青海海西	37.60	95.80	7.0	VII	44.00	31.00
						VI	110.30	73.60
29	2010-04-14	青海玉树	33.20	97.00	7.1	IX	35.20	5.90
						VIII	79.40	25.50
						VII	136.20	58.00
						VI	242.00	135.00
30	2011-06-26	青海囊谦	32.40	95.90	5.2	VI	12.00	6.00
31	2016-01-21	青海门源	37.70	101.60	6.4	VIII	12.19	7.06
						VII	37.03	24.42
						VI	82.49	61.21
32	2016-10-17	青海杂多	32.80	94.90	6.2	VII	10.92	5.37
						VI	41.19	28.19
33	2018-05-06	青海称多	34.56	96.53	5.3	VI	16.04	10.61
						V	74.48	47.63

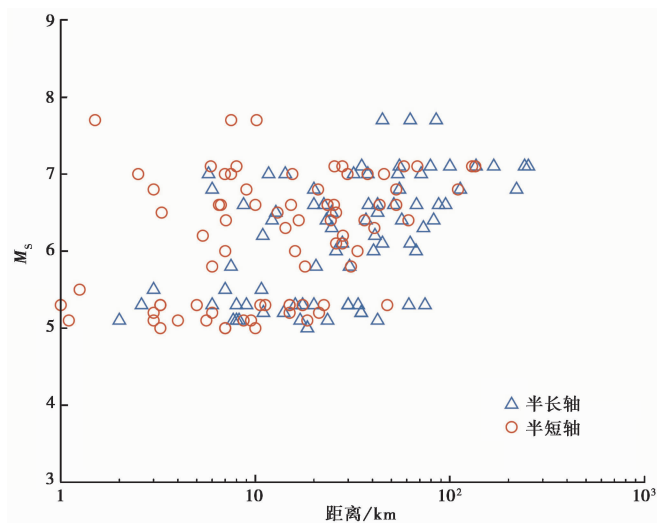


图 2 青海地区等震线资料-距离关系

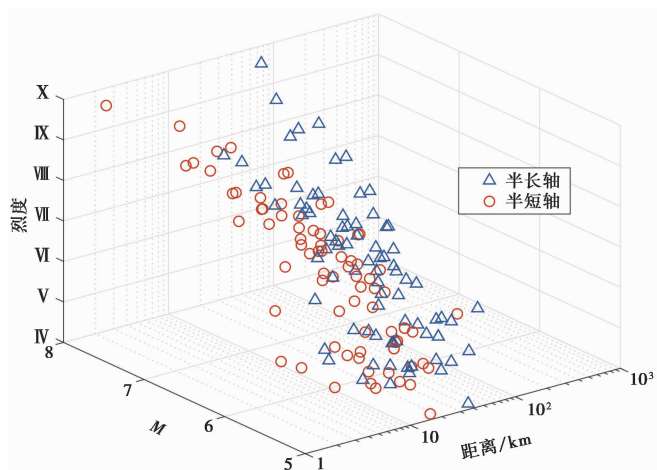


图 3 青海地区等震线资料烈度-震级-距离关系

沿长轴方向

$$I_a = A_1 + B_1 M + C_1 \ln(R_a + R_{0a}) + \varepsilon_a \quad (2)$$

沿短轴方向

$$I_b = A_2 + B_2 M + C_2 \ln(R_b + R_{0b}) + \varepsilon_b \quad (3)$$

式中,  $R_{0a}$ 、 $R_{0b}$  分别表示长轴、短轴方向近场饱和因子。

### 3.2 地震烈度衰减关系模型系数的确定

应用表 1 给出的等震线资料, 根据公式 (2) 和 (3) 采用最小二乘法进行回归分析,  $R_{0a}$ 、 $R_{0b}$  的选取是通过回归搜索过程中使衰减公式中的标准差  $\sigma$  达到最小原则而确定的 (Yang et al, 2018)。基于以上原则, 得到青海省地震烈度衰减关系公式, 系数拟合结果如表 2 所示。

由地震烈度数据拟合所得到的青海省地震烈度沿长轴方向和短轴方向的衰减曲线如



表 2 青海省地震烈度衰减关系系数拟合结果

	A	B	C	R	标准差 $\sigma$
长轴	1.9118	1.5091	-1.1936	14.8952	0.7002
短轴	1.5760	1.3621	-1.1169	5.7139	0.5911

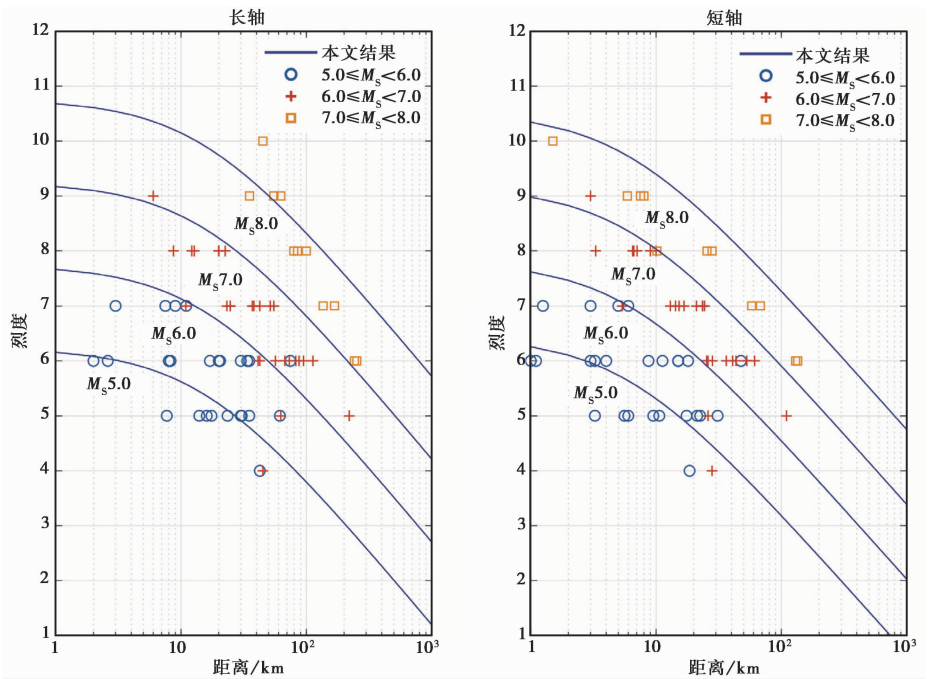


图 4 青海省地震烈度衰减关系与用于验证的烈度数据点

图 4 所示。虽然图 4 长、短轴数据点相对较为离散,但  $M_s = 5.0$ 、 $M_s = 6.0$ 、 $M_s = 7.0$  时的曲线能够较明显地区分  $5.0 \leq M_s < 6.0$ 、 $6.0 \leq M_s < 7.0$  及  $M_s > 7.0$  的数据点,结果显示所得衰减关系曲线与实际资料数据吻合较好,说明该模型结果比较合理。

4 对比分析

4.1 与西部、川藏地区衰减关系研究成果的对比

中国西部地区幅员辽阔,地震活动性强,地震烈度资料丰富,很多学者对该地区烈度衰减关系进行了研究(汪素云等,2000;肖亮等,2011;张苏平等,2015)。汪素云等(2000)沿用中国地震烈度区划图的做法,采用椭圆长、短轴的联合衰减模型,选用包括云四川、西藏、甘肃、青海、宁夏、新疆在内的西部地区 190 个震例,统计得出了新的中国西部地区的烈度衰减关系;肖亮等(2011)采用长、短轴椭圆模型,选用新疆区和川藏区 2 个统计单元内的 1991 年之后中国西部地区 71 个地震的烈度等震线资料,并以此对 1918~1989 年间 176 次地震的烈度资料进行了补充,重新拟合了西部地区的分区地震烈度衰减关系。相关结果见表 3。

图 5 为本文结果与表 3 的结果在长轴、短轴方向的曲线图。通过对比可知,在近场范围内(小于 10km),本文的烈度值与汪素云等(2000)和肖亮等(2011)的结果基本一致。在近

表 3 中国西部地区已有的衰减关系研究成果

成果文献	研究区域	长、短轴	A	B	C	R
汪素云等(2000)	西部地区	长轴	5.253	1.398	-4.164	26
		短轴	2.019	1.398	-2.943	8
肖亮等(2011)	川藏地区	长轴	6.458	1.2746	-4.4709	25
		短轴	3.3682	1.2746	-3.3119	9

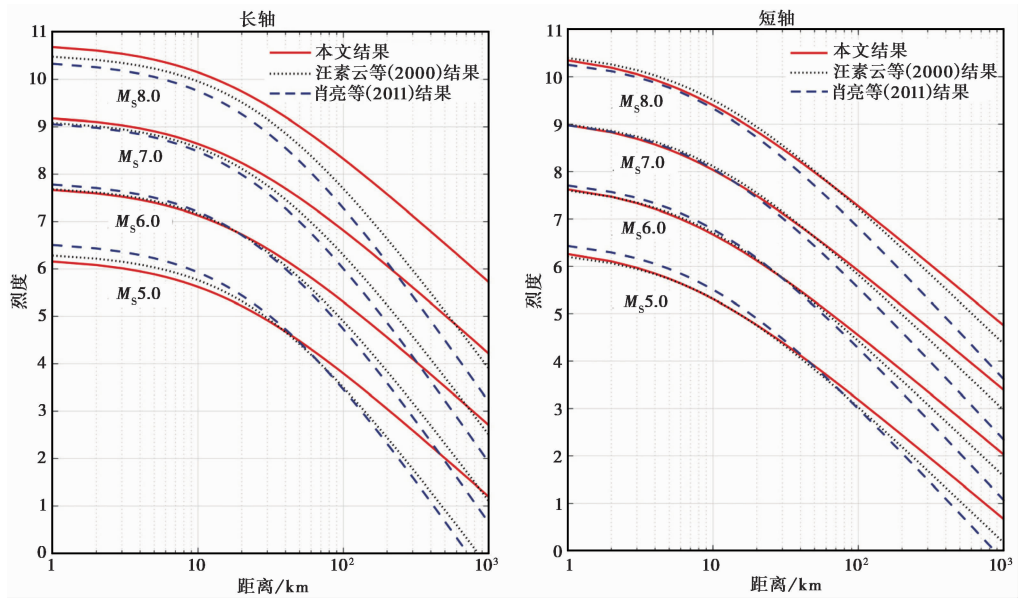


图 5 西部地区不同烈度衰减关系对比

场范围 $\leq 55\text{km}$ 时,本文给出的烈度值对 7.0~8.0 级地震的烈度值相对偏高,对 5.0~6.0 级地震烈度值相对偏低。除此之外,在 100km 以内,本文结果稍高于其他结果,超过 100km 差别逐渐明显。需要说明的是其他 2 种研究衰减关系成果在拟合时所用的数据包含了新疆、甘肃、青海、宁夏、云南、四川、西藏部分的地震数据资料,因此不可忽视特殊地形等对结果的影响。本文所用震例资料均为青海省境内地震事件,其发震地区地形大部分相对平坦,又因青海地区的覆盖层不同于其他地区,烈度衰减曲线结果相对较缓,因此认为本文研究结果给出的地震烈度衰减关系模型结果符合青海省的实际情况。

4.2 地震等震线长、短轴半径对比

为了验证本文分析结果的可行性,基于本研究得到的烈度衰减系数结果,将其带入现有地震快速评估模型中(表 4 中的新参数项数据),重新模拟触发历史真实的地震,统计所生成的烈度圈等震线的长、短轴半径,并与表 4 中的真实地震项进行对比分析,结果见表 4。

由表 4 中等震线长、短轴半径数值对比可知,由本研究得到的参数取表中 3 个震例的计算结果相较现有评估模型中的参数计算结果,前者与实际更为接近。

从近年来的实际地震等震线来看(尤其是Ⅶ度以上区域),不考虑震源破裂方式(方向)的点源模型、椭圆模型以及断层破裂模型(线源模型),本文给出的模型对  $5.0 \leq M_s < 8.0$  地





表 4 历史地震等震线长短轴半径对比

地点	震级	烈度			长轴半径/km			短轴半径/km		
		真实地震	西部参数	新参数	真实地震	西部参数	新参数	真实地震	西部参数	新参数
杂多	5.3	VII			18.0			10.0		
		VI	VI	VI	40.0	31.5	33.1	30.0	17.9	33.1
玉树	7.1	IX	IX	IX	35.2	8.1	11.1	5.9	4.5	4.6
		VIII	VIII	VIII	79.4	47.6	66.7	25.3	27.8	25.5
		VII	VII	VII	136.2	113.5	124.0	58.0	73.8	68.7
杂多	6.2	VIII	VIII	VIII		3.2			1.7	
		VII	VII	VII	21.9	38.9	18.76	10.7	22.6	10.4
		VI	VI	VI	82.4	99.2	88.62	56.4	63.9	60.8

注:西部参数指本文所用评估软件中的西部模型参数,新参数指本研究得到的参数结果,真实地震相关数值指地震真实烈度圈测量的实际数据。

震的烈度预测效果最佳。

5 结语

本文选取了 1947~2019 年间青海省主震震级  $M_s \geq 5.0$  的地震 33 个,采用椭圆衰减模型建立了青海省地震烈度衰减关系模型,并给出了其适用范围。通过与实际震例资料的对比可知,本文回归分析所得的青海省地震烈度衰减关系在该省是适用的,数据回归后青海省地震衰减关系适用范围为震级  $5.0 \leq M_s \leq 8.0$ ,震中距范围  $0 \leq R \leq 250\text{km}$ 。

通过与近年来的实际地震等震线(尤其是Ⅶ度以上区域)对比可知,不考虑震源破裂方式(方向)的点源模型、椭圆模型以及断层破裂模型(线源模型),本文给出的模型对 5.0 级、6.0 级、7.0 级以上地震的烈度预测效果最佳。随着未来青海地区地震烈度资料的继续积累,还可对本文给出的地震烈度衰减规律进行深入的研究。

参考文献

陈达生,刘汉兴,1989. 地震烈度椭圆衰减关系. 华北地震科学,7(3):31~42.

丁娟,何琳,叶峰,等,2015. 安徽及近邻区地震烈度衰减特征研究. 地震地磁观测与研究,36(3):43~48.

国家地震局. 1996. 中国地震烈度区划图(1990)概论. 北京:地震出版社.

马玉虎,2005. 关于对青海地区强震综合预报的思考. 高原地震,17(3):8~17.

马玉虎,马震,王培玲,等,2018. 2008~2016 年青海地区  $M_s \geq 5.0$  显著地震短临跟踪. 地震地磁观测与研究,39(1):18~25.

苗庆杰,许萍,2008. 山东及近邻区地震烈度衰减关系探讨. 西北地震学报,30(3):282~287.

秦娟,蔡辉腾,王赞军,2014. 重庆及其邻区地震烈度衰减关系的进一步研究. 地震工程与工程振动,34(1):54~61.

孙继浩,帅向华,2011. 川滇及其邻区中强地震烈度衰减关系适用性研究. 地震工程与工程振动,31(1):11~18.

谭明,李帅,孙静,等,2011. 新疆地震烈度衰减关系模型参数拟合. 内陆地震,25(1):29~35.

王继,俞言祥,2008. 华中、华南中强地震区地震烈度衰减关系研究. 震灾防御技术,3(1):20~26.

汪素云,时振梁,1993. 有感半径与震级的关系及其应用. 见: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.

汪素云,俞言祥,高阿甲,等,2000. 中国分区地震动衰减关系的确定. 中国地震,16(2):99~106.

肖亮,俞言祥,2011. 中国西部地区地震烈度衰减关系. 震灾防御技术,6(4):358~371.

- 杨彦明,戴勇,张国清,等,2016. 内蒙古中西部地区地震烈度衰减关系. 地震地磁观测与研究, **37**(1):30~37.
- 翟洪涛,刘欣,刘庆忠,等,2003. 江淮地区地震烈度衰减关系的研究. 华北地震科学, **21**(4):30~34.
- 张方浩,蒋飞蕊,李永强,等,2016. 云南地区地震烈度评估模型研究. 中国地震, **32**(3):511~521.
- 张苏平,陈文凯,周中红,等,2015. 中国西部地区大地震( $M_s \geq 7$ )烈度衰减关系改进. 自然灾害学报, **24**(1):104~113.
- 张维佳,姜立新,李东平,2015. 浙江及邻区地震烈度衰减关系研究. 震灾防御技术, **10**(4):902~912.
- 中国地震局监测预报司,2001. 中国大陆地震灾害损失评估汇编(1996~2000). 北京:地震出版社.
- 中国地震局震害防御司,1999. 中国近代地震目录(公元1912年~1990年  $M_s \geq 4.7$ ). 北京:地震出版社.
- 中国地震局震灾应急救援司,2010. 2001~2005年中国大陆地震灾害损失评估汇编. 北京:地震出版社.
- 中国地震局震灾应急救援司,2015a. 1966~1989年中国大陆地震灾害损失评估汇编. 北京:地震出版社.
- 中国地震局震灾应急救援司,2015b. 2006~2010年中国大陆地震灾害损失评估汇编. 北京:地震出版社.
- 周中红,何少林,陈文凯,2010. 甘肃省地震烈度衰减关系研究. 西北地震学报, **32**(1):72~75.
- Yang Y M, Jiang L X, Wang Z X, 2018. Application of the levenberg-marquardt method in improving technology of the seismic influence field. Earthq Res China, **32**(3):400~411.

## Study on Attenuation Relationship of Seismic Intensity in Qinghai Province

Ren Jing Li Zhiqiang Xu Zhishuang

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

**Abstract** In this paper we selected 33 earthquakes with magnitude  $M_s \geq 5.0$  between 1947 and 2019 in Qinghai Province. After regression analysis and comparison analysis with other related research results on the intensity of the western intensity attenuation, seismic disaster assessment system software and seismic intensity distribution data, we proposed a seismic intensity attenuation relationship model suitable for the characteristics of Qinghai Province. After the regression, the range of seismic attenuation relationship in Qinghai Province was  $5.0 \leq M_s \leq 8.0$ , and the epicenter range was  $0 \leq R \leq 250\text{km}$ .

**Keywords:** Earthquake intensity; Attenuation relation; Qinghai Province