

云南地区区域地震灾害特征^{*}

张方浩, 卢永坤, 邓树荣, 杜浩国, 和仕芳

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 对1992—2018年云南地区发生的72次破坏性地震事件的震害资料进行空间化处理和数理统计, 选取地震烈度、人员伤亡数量、直接经济损失这3个重要的灾害损失指标进行特征分析和研究。结果表明: 云南地区的震害具有明显的分区特征, 区域差异显著。在同等级别的地震破坏下, 滇东北地区震害最重, 滇西—滇西北地区震害次之, 滇南—滇西南地区震害最轻。通过统计分析分别给出了3个特征分区震级与烈度、人员伤亡、直接经济损失之间的关系。

关键词: 地震灾害; 区域特征; 地震烈度; 直接经济损失; 人员伤亡

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2020)01-0134-10

0 引言

破坏性地震造成的人员死亡和经济损失的现场调查和评估结果是政府实施抗震救灾和恢复重建决策的重要依据。然而, 详细的灾情调查和科学的评估工作都至少需要数天的时间, 不能满足应急救援的指挥决策需要(晏凤桐, 2003)。因此, 地震发生之后, 在没有开展地震现场调查之前, 迅速对地震造成的人员伤亡、直接经济损失等进行评估, 对地震应急救援决策非常重要(王晓青等, 2009; 曹彦波等, 2015)。通常的做法是根据针对本地区事先计算拟合所得到的地震衰减关系确定地震的影响范围, 然后根据已有的易损性分析结果估计破坏状态, 包括灾区面积、人员伤亡、经济损失等情况。2008年汶川8.0级、2010年玉树7.1级地震之后, 社会各界对地震灾害高度关注, 中国地震局对地震灾害快速评估、遥感技术应用、应急基础数据库等多个研究领域进行了工作部署。尤其在地震灾害快速评估或初评估工作中产出的成果, 如人员伤亡、经济损失等会直接影响破坏性地震应急响应级别、救援队伍需求、救灾人员及物资需求等的确

定, 在近年得到更多的关注。

云南省是我国大陆地震活动性最强的地区之一, 多年的地震现场灾害工作积累了丰富的震害经验, 许多学者已经对云南地区地震灾害做了大量研究: 如周光全等(2003)以1992—2001年云南地区破坏性地震的灾害损失评估资料为基础, 研究了震级与人员死亡、受灾人口、灾区面积、经济损失等震害指标的关系; 李永强(2012)采用1900年以来云南地震人员伤亡数据开展了震亡人员的系统性研究; 白仙富等(2013)对昭通地区的地震灾害特征进行了细致的研究和分析; 张彦琪等(2017)、侯建盛等(2015)对云南不同区域的强震灾害特征和致灾因素进行了对比分析研究; 卢永坤等(2007, 2014)、代博洋等(2011)、周桂华等(2013)等都针对具体地震事件的震害特征进行了分析研究。

上述研究成果在近年来云南历次地震灾害预评估中发挥了重要的作用, 但这些研究基本上是基于较大范围的震害资料经验统计得出适用于全国或云南本省的一些模型。实际上, 由于经济发展水平不同步、自然环境与地质环境的差异性等因素影响, 云南省不同区域遭受相同震级档的地震时, 人员伤亡、烈度分布、建构物破坏程度

^{*} 收稿日期: 2019-03-22.

基金项目: 地震科技星火计划专项(XH17032)和云南省地震局青年基金自立课题(2019ZL04)联合资助.

及诱发的地震地质灾害等都大相径庭,使得震后快速估计地震灾情、及时提供相对准确和有效的对策建议较为困难。本文采用相对科学合理的灾害区域划分方法,对云南地区不同区域承灾体、致灾因子以及灾害特征开展精细化研究,给出各区域震级与烈度、人员伤亡、直接经济损失之间的关系。

1 资料来源

本文采用的数据资料主要来自于《云南省地震资料汇编》(云南省地震局,1988)、《云南地震灾害损失评估及研究:1992—2010》(云南省地震灾害损失评定委员会,2012)、《云南地震人员伤亡研究》(李永强,2012)、2011—2018年地震灾害直接经济损失评估报告(云南灾区)^①及《云南统计年鉴》(云南省统计局,2018)。由于1900年以来地震烈度数据记录较好,资料可信度较高,1992年云南正式开始地震灾害损失评定工作,因此,本文选取1900—2018年的烈度数据,1992—2018年的地震人员伤亡信息和经济损失数据,1991—2017年社会经济数据进行研究。为方便计算,基于GIS平台对历史地震的烈度面积、人员伤亡、经济损失进行空间化处理和统计。

2 数据处理

人员伤亡分为死亡、重伤和轻伤3种情况。死亡人员指因地震直接或间接死亡,以及在评估期间死亡的伤员;重伤人员指需要住院治疗的伤员;轻伤人员指无需住院治疗的伤员。随着社会经济的不断发展,地区生产总值和物价水平不断增高,历史地震的直接经济损失不能用当时的价格数据去衡量,为科学合理的进行统计比较,本文将历史地震的直接经济损失按可比价格进行计算(张方浩等,2018)。GDP增长率是衡量一个地区经济发展速度的宏观经济指标,也是一个地区过去与今日经济发展水平纵向比较的重要参照指标(和仕芳等,2018)。因此本文采用1992—2017年县级

别的GDP增长率将各年份的直接经济损失统一换算为2017年可比价(统计数据是2017年,故折算为2017年可比价),以2017年可比价格对地震直接经济损失做相关统计分析,以下为相关计算公式。

2017年可比价格直接经济损失为:

$$L_{2017-i} = L_i \times C_{2017-i} \quad (1)$$

式中: L_{2017-i} 为2017年相对于第*i*年的直接经济损失; L_i 为第*i*年的直接经济损失; C_{2017-i} 为2017年相对于第*i*年的生产总值增长率。

地震能量为:

$$E = 10^{4.8} \times 10^{1.5M} \quad (2)$$

式中: M 为震级。为了数据表示的方便,通常以 10^{12} J 为单位来表示地震能量。

单位能量直接经济损失为:

$$L_E = \frac{L_{2017-i}}{E} \quad (3)$$

式中: L_E 单位为万元/ 10^{12} J。

人均直接经济损失为:

$$L_P = \frac{L_{2017-i}}{P} \quad (4)$$

式中: P 为受灾人口; L_P 为受灾人口的人均直接损失,单位为万元/人。

单位能量人员死亡人数为:

$$D_E = \frac{D}{E} \quad (5)$$

式中: D_E 单位为人/ 10^{12} J; D 为死亡人数。

单位能量人员受伤人数为:

$$I_E = \frac{I}{E} \quad (6)$$

式中: I_E 单位为人/ 10^{12} J; I 为受伤人数(包含重伤和轻伤人数)。

按照上述原则和公式收集整理1992—2018年云南地区历史地震灾害信息,见表1。

^① 云南省地震局,2011—2018年地震灾害直接经济损失评估报告(云南灾区)。

表 1 1992—2018 年云南地区历史地震灾害信息
Tab. 1 Earthquake - damage data in Yunnan from 1992 to 2008

发震日期	地点	震级	震中位置		震中 烈度	受灾 人数	地震 能量/ 10 ¹² J	死亡 人数	重伤 人数	轻伤 人数	直接经 济损失/ 万元	2017 年价格计 的直接经济 损失/万元	单位能量 死亡人数/ (人/10 ¹² J)	单位能量 受伤人数/ (人/10 ¹² J)	2017 年价格计的单位 能量直接经济损失/ (万元/10 ¹² J)
			$\varphi_N/$ (°)	$\lambda_E/$ (°)											
1992-12-18	永胜	5.4	26.4	100.6	VI	28 000	7.94	1	0	102	1 292	33 660	0.16	12.97	4 238
1993-01-27	宁洱	6.3	22.9	101.1	VIII	79 311	177.83	0	24	130	6 930	142 607	0	0.87	802
1993-02-01	大姚	5.3	25.9	101.4	VI	106 894	5.62	0	0	4	1 150	23 665	0	0.71	4 208
1993-06-04	景谷—临沧	5.0	23.4	100.1	VI	51 797	2.00	0	3	10	1 192	24 529	0	6.52	12 294
1993-07-17	中甸	5.6	27.9	99.6	VI	49 528	15.85	1	1	13	2 080	42 803	0.08	0.95	2 701
1993-08-14	姚安	5.6	25.5	101.3	VII	146 030	15.85	0	9	143	3 055	62 867	0	9.59	3 967
1994-09-19	景谷	5.2	23.6	100.3	VI	21 708	3.98	0	1	10	1 520	24 899	0	2.76	6 254
1995-02-18	沧源—澜沧	5.1	22.9	99.7	VI	17 256	2.82	0	0	0	731	9 635	0	0	3 419
1995-04-25	金平	5.6	22.8	102.7	VII	9 800	15.85	0	3	17	1 100	14 507	0	1.26	915
1995-10-24	武定	6.5	25.8	102.3	IX	945 748	354.81	52	808	13 007	74 383	981 003	0.18	39.08	2 765
1996-02-03	丽江	7.0	27.3	100.2	IX	1 075 263	1 995.26	309	4 070	12 987	304 924	3 238 389	0.18	8.70	1 623
1996-07-02	丽江	5.2	26.9	100.1	VI	23 227	3.98	2	6	51	2 182	23 174	0.6	14.82	5 821
1996-09-25	丽江	5.7	27.2	100.3	VII	39 455	22.39	1	1	140	3 080	32 711	0.05	6.34	1 461
1997-01-25	勐腊—景洪	5.1	21.9	101.1	VI	21 483	2.82	0	0	00	1 560	15 001	0	0	5 323
1997-01-30	景洪—江城	5.5	22.4	101.4	VII	37 332	11.22	0	0	2	5 304	51 004	0	0.18	4 546
1997-10-23	丽江	5.3	26.9	100.3	VI	37 017	5.62	0	6	9	2 675	25 723	0	2.67	4 574
1998-10-2	宁蒗	5.3	27.3	101.1	VII	59 337	5.62	0	9	23	9 468	83 332	0	5.69	14 819
1998-11-19	宁蒗	6.2	27.3	100.9	VIII	127 870	125.89	5	208	1 385	44 114	388 267	0.05	12.69	3 084
1998-12-01	宣威	5.1	26.3	104.1	VII	453 641	2.82	0	5	79	10 490	92 327	0	29.80	32 759
1999-11-25	澄江	5.2	24.6	102.9	VI	57 633	3.98	1	1	11	7 557	64 115	0.29	3.27	16 105
2000-01-15	姚安	6.5	25.6	101.1	VIII	963 904	354.81	7	99	2 429	101 621	814 424	0.02	7.15	2 295
2000-01-27	丘北—弥勒	5.5	24.2	103.6	VII	260 165	11.22	0	4	65	9 924	79 534	0	6.15	7 088
2000-08-21	武定	5.1	25.8	102.2	VI	73 415	2.82	2	1	219	7 756	62 159	0.8	78.77	22 055
2001-03-12	澜沧	5	22.3	99.8	VI	45 449	2.00	0	0	6	5 575	42 022	0	3.01	21 061

续表 1

发震日期	地点	震级	震中位置		震中 烈度	受灾 人数	地震 能量/ 10 ¹² J	死亡 人数	重伤 人数	轻伤 人数	直接经 济损失/ 万元	2017 年价格计 的直接经济 损失/万元	单位能量 死亡人数/ (人/10 ¹² J)	单位能量 受伤人数/ (人/10 ¹² J)	2017 年价格计的单位 能量直接经济损失/ (万元/10 ¹² J)
			φ_N / (°)	λ_E / (°)											
2001-04-12	施甸	5.9	24.8	99.0	VIII	669 648	44.67	3	34	201	50 490	380 588	0.08	5.33	8 520
2001-05-24	盐源—宁蒗	5.8	27.6	100.9	VII	49 822	31.62	0	0	32	5 660	42 664	0	1.01	1 349
2001-06-08	施甸	5.3	24.8	99.1	VI	10 618	5.62	1	0	15	3 660	27 589	0.20	2.85	4 906
2001-07-10	楚雄	5.3	24.9	101.4	VI	6 814	5.62	0	0	1	1 930	14 548	0	0.18	2 587
2001-07-15	江川	5.1	24.3	102.6	VI	61 750	2.82	0	0	4	3 770	28 418	0	1.42	10 083
2001-09-04	景谷	5.0	23.4	100.3	VI	50 115	2.00	0	2	7	3 760	28 342	0	4.51	14 205
2001-10-27	永胜	6.0	26.2	100.6	VII	344 916	63.10	1	3	217	41 050	309 430	0.02	3.50	4 904
2003-07-21	大姚	6.2	25.9	101.2	VIII	323 962	125.89	16	72	515	59 190	373 254	0.14	4.79	2 965
2003-10-16	大姚	6.1	25.9	101.3	VIII	283 169	89.13	3	15	42	41 560	262 079	0.04	0.67	2 941
2003-11-15	鲁甸	5.1	27.2	103.6	VII	236 652	2.82	4	24	70	19 190	121 013	1.55	34.77	42 937
2003-11-26	鲁甸	5	27.3	103.6	VII	246 732	2.00	0	2	22	9 300	58 646	0	12.03	29 393
2004-08-10	鲁甸	5.6	27.2	103.6	VIII	313 556	15.85	4	191	406	31 990	167 307	0.27	37.92	10 556
2004-10-19	隆阳	5.0	25.1	99.1	VI	298 327	2.00	0	2	13	21 720	113 595	0	7.52	56 933
2004-12-26	双柏	5.0	24.7	99.5	VI	35 715	2.00	1	1	19	4 070	21 286	0.54	10.53	10 668
2005-01-26	思茅	5.0	23.6	101.7	VI	39 987	2.00	0	0	5	5 340	24 857	0	2.51	12 458
2005-08-05	会泽—会东	5.3	26.6	103.1	VI	198 747	5.62	0	0	19	10 440	48 596	0	3.38	8 642
2005-08-13	文山	5.3	23.6	104.1	VI	127 624	5.62	0	2	27	9 220	42 917	0	5.16	7 632
2006-01-12	墨江	5.0	23.3	101.6	VI	60 273	2.00	0	1	11	11 060	44 700	0	0.50	22 403
2006-07-22	盐津	5.1	28	104.1	VI	151 168	2.82	22	13	101	23 900	96 594	8.31	48.26	34 273
2006-08-29	盐津	5.1	28.1	104.1	VII	262 538	2.82	2	15	52	20 270	81 923	0.76	24.48	29 067
2007-06-03	宁洱	6.4	23	101.1	VIII	403 128	251.19	3	28	391	189 860	641 219	0.01	1.68	2 553
2008-03-21	盈江	5.0	24.5	97.6	VI	66 824	2.00	0	0	0	6 480	18 349	0	0	9 196
2008-08-21	盈江	5.9	25.1	97.9	VIII	355 395	44.67	1	2	49	130 800	370 386	0.02	1.16	8 292
2008-12-26	瑞丽	4.9	24.01	97.87	VI	109 426	1.41	0	4	18	17 960	50 857	0	15.58	36 004

续表 1

发震日期	地点	震级	震中位置		震中 烈度	受灾 人数	地震 能量/ 10 ¹² J	死亡 人数	重伤 人数	轻伤 人数	直接经 济损失/ 万元	2017 年价格计 的直接经济 损失/万元	单位能量 死亡人数/ (人/10 ¹² J)	单位能量 受伤人数/ (人/10 ¹² J)	2017 年价格计的单位 能量直接经济损失/ (万元/10 ¹² J)
			φ _N / (°)	λ _E / (°)											
2009-07-09	姚安	6.0	25.6	101.1	VIII	214 339	63.10	1	31	341	215 210	562 232	0.02	5.91	8 911
2009-11-02	宾川	5.0	26.0	100.7	VI	110 736	2.00	0	2	29	24 530	64 084	0	15.54	32 118
2010-02-25	禄丰—元谋	5.1	25.4	101.9	VI	164 521	2.82	0	3	32	35 420	79 028	0	12.42	28 040
2011-02-01	盈江	4.8	24.7	97.96	VI	82 250	1.00	0	0	1	6 160	11 165	0	1.00	11 165
2011-03-10	盈江	5.8	24.7	97.9	VIII	353 435	31.62	25	134	180	238 480	432 233	0.82	10.72	13 668
2011-06-20	腾冲	5.2	25.1	98.7	VI	162 720	3.98	0	3	3	27 840	50 459	0	1.51	12 675
2011-08-09	腾冲	5.2	25.0	98.7	VI	184 612	3.98	0	2	4	14 990	27 169	0	1.51	6 824
2012-06-24	宁蒗—盐源	5.7	27.7	100.7	VII	60 286	22.39	3	25	369	50 730	79 314	0.14	17.73	3 543
2012-09-07	彝良	5.7	27.5	104.0	VIII	715 713	22.39	81	0	832	430 390	672 893	3.71	40.78	30 057
2013-03-03	洱源	5.5	25.9	99.7	VII	141 588	11.22	0	1	29	70 800	96 446	0	2.67	8 596
2013-04-17	洱源—漾濞	5.0	25.9	99.8	VII	167 468	2.00	0	0	14	20 878	28 441	0	7.02	14 254
2013-08-31	香格里拉	5.9	28.22	99.35	VIII	114 051	44.67	3	7	42	145 500	198 205	0.07	1.16	4 437
2014-04-05	永善	5.3	28.1	103.6	VI	134 285	5.62	0	5	27	44 510	55 985	0	5.69	9 956
2014-05-30	盈江	6.1	25.0	97.8	VIII	274 419	89.13	0	13	47	180 060	226 482	0	0.67	2 541
2014-08-03	鲁甸	6.5	27.1	103.3	IX	1 800 507	354.81	617	0	3 143	2 357 810	2 965 682	1.76	10.6	8 358
2014-08-17	永善	5.0	28.1	103.5	VI	113 998	2.00	0	0	20	30 250	38 049	0	10.02	19 070
2014-10-07	景谷	6.6	23.4	100.5	VIII	575 633	501.19	1	0	331	511 020	642 767	0	0.66	1 282
2014-12-6	景谷	5.9	23.3	100.5	VIII	575 633	44.67	1	0	22	237 660	298 932	0.02	0.52	6 692
2015-03-01	沧源	5.5	23.5	98.9	VII	150 827	11.22	0	8	42	83 760	99 130	0	4.46	8 835
2015-10-30	昌宁	5.1	25.1	99.5	VI	56 773	2.82	0	0	0	24 200	28 641	0	0	10 162
2016-05-18	云龙	5.0	26.1	99.58	VI	34 590	2.00	0	0	2	15 760	17 257	0	1.00	8 649
2017-03-27	漾濞	5.1	25.87	99.83	VI	47 211	2.82	0	0	1	17 200	17 200	0	0.36	4 238
2018-08-13	通海	5.0	24.19	102.71	VI	387 158	2.00	0	0	31	49 440	44 990	0	15.54	802
2018-09-08	墨江	5.9	23.28	101.53	VIII	351 643	44.67	0	0	28	129 200	117 572	0	0.63	4 208

3 云南地区地震灾害特征分析

3.1 人员伤亡特征分析

从表1可以看出,1992—2018年云南地区有烈度评估的地震共72次,大多是中强地震,震中烈度不高,从Ⅵ度到Ⅸ度不等。中强地震频度高,震亡小;强震频度低,但震亡比例大;部分震例没有死亡和重伤情况,在历次地震现场中调查发现,中强地震造成死亡和重伤的偶然性很大。按照不同震中烈度统计地震数量和震亡数量(表2),发现云南地区低烈度地震数量多,震亡数量比例低;高烈度地震比低,震亡总数比高,不同震中烈度地震数量比与震亡数量比呈负相关关系。

表2 云南不同震中烈度地震及震亡特征

Tab. 2 Earthquake and earthquake-caused death toll in terms of epicentral intensity

震中 烈度	地震 数量	地震数量比 (%)	震亡 人数	震亡数量比 (%)
Ⅵ	36	50	31	3
Ⅶ	16	22	11	1
Ⅷ	17	24	154	13
Ⅸ	3	4	978	83

为研究1992—2018年人员伤亡的空间分布特征,将地震震级换算为能量,利用ArcGis软件,通过空间叠加分析,采用自然间断点分级法,给出每次地震单位能量死亡和受伤人数,如图1所示。

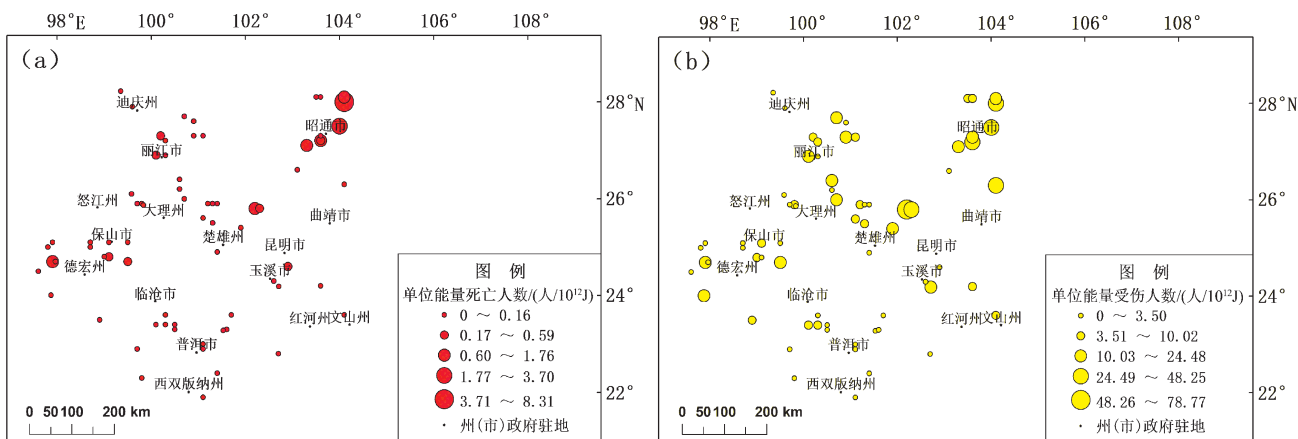


图1 1992—2018年云南地区地震单位能量死亡(a)和受伤(b)人数分布图

Fig. 1 Distribution of the earthquake-caused death (a) and injuries (b) in terms of unit energy in Yunnan from 1992 to 2018

云南地震人员死亡和受伤人数具有明显的区域差异性,图1a显示,单位能量造成的死亡人数滇东北地区最高,滇西—滇西北地区次之,滇南—滇西南地区相对较低。图1b显示,单位能量造成的伤亡人数滇东北地区最高,滇西—滇西北地区次之,滇南—滇西南地区相对较低。因此可得出,同一能量级的地震发生在不同的地区,造成的人员伤亡依次为滇东北地区>滇西—滇西北地区>滇南—滇西南地区。

3.2 直接经济损失特征分析

为研究1992—2018年地震直接经济损失的空间分布特征,采用自然间断点分级法,得出每次地震单位能量直接经济损失和人均直接经济损失,如图2所示。

从图2a可见,单位能量造成的直接经济损失滇东北地区最高,滇西—滇西北地区次之,滇南—滇西南地区相对较低。这一特征与人员伤亡的相似,可知云南地区地震单位能量直接经济损失也具有区域差异性。由图2b可见,1992—2018年云南地区地震人均直接经济损失也具有区域差异性。滇西北香格里拉—丽江地区人均直接经济损失较为严重,主要由该地区区域人口密度小、人均房屋建筑面积较高、房屋建筑单方造价高、容易诱发地震地质灾害等因素引起。滇东北地区单位能量直接经济损失较高,但由于该地区人口密度大,一定程度上拉低了人均直接经济损失;滇南地区的人均直接经济损失相对较低,这与该地区的单位能量直接经济损失较低有直接关系。

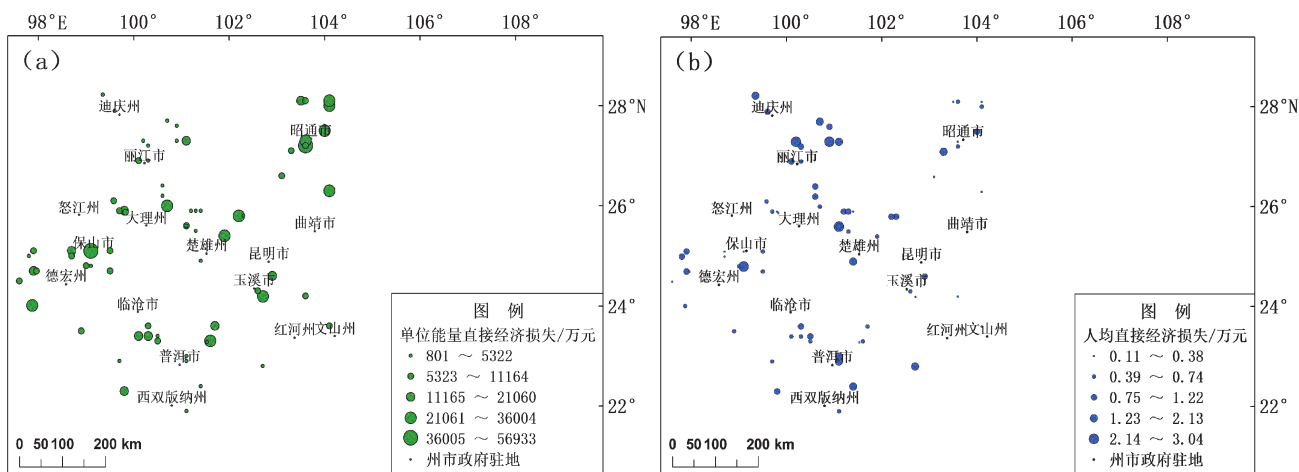


图2 1992—2018年云南地区地震单位能量直接经济损失(a)和人均直接经济损失(b)分布图

Fig. 2 Distribution of the direct economic losses (a) and the per capita economic losses (b) in terms of unit energy caused by earthquakes in Yunnan from 1992 to 2018

4 云南地震灾害特征区域划分

4.1 地震灾害特征分区因子

划分地震灾害损失严重程度的指标包括地震烈度范围、人员伤亡、经济损失、房屋破坏面积等(尹之潜等, 1991; 张方浩等, 2016)。上述指标中烈度是分级描述的, 不同烈度之间没有一个明确的数量转换关系, 无法进行数理计算; 地震直接经济损失不仅反映社会环境破坏和经济损失, 也间接地反映房屋破坏面积。因此, 本文选取地震人员死亡(受伤分布图和

死亡分布图比较相近, 故此处只考虑人员死亡)和直接经济损失这2项最具代表性的灾害指标进行分析。

在所有的影响灾害轻重程度的致灾因子中, 震级大小、灾区人口数量、灾区房屋抗震性能及地震诱发地质灾害情况是最主要的几个因素(胡伟华等, 2010), 而震级大小及灾区人口数量是比较容易获得定量表达的因子, 因此本文进行数理统计分析时主要考虑这2个因子的影响。

笔者对1992—2018年云南地区历史地震单位能量人员死亡和直接经济损失进行聚类分析(图3), 以此作为云南地震灾害特征分区的主要依据。

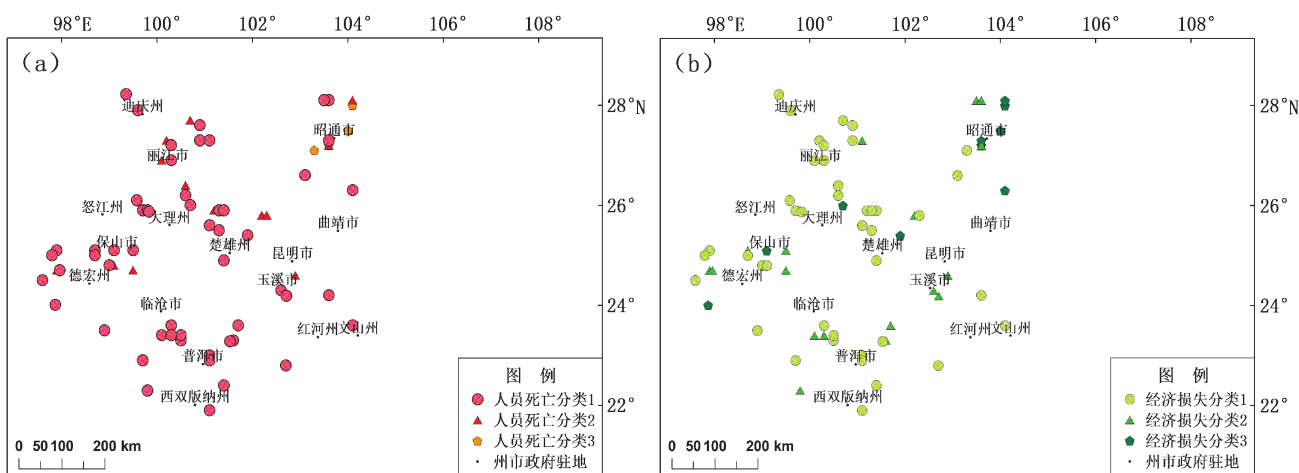


图3 1992—2018年云南地区地震单位能量人员死亡(a)和直接经济损失(b)聚类结果

Fig. 3 Aggregation of the earthquake-caused death (a) and direct economic losses (b) in terms of unit energy caused by earthquake in Yunnan from 1992 to 2018.

从单位能量人员死亡指标（图3a）来看，滇东北地区死亡较重，滇西—滇西北地区死亡次之，滇南—滇西南地区相对较轻，故这3个地区的聚集性较为明显。从单位能量直接经济损失指标（图3b）来看，滇东北地区指标较高，具有较高的聚集性，滇西—滇西北地区也有一定的聚集性，滇南—滇西南地区大部分震例单位能量直接经济损失指标相对较低，也具有一定的聚集性。

4.2 地震灾害特征分区建立

因影响震害的因素较多，从不同地震断块地震活动特点、人员死亡与经济损失等不同灾害指标、房屋抗震性能来看，均能显示出一定的区域特征，但采用不同因子划分的区域又不尽相同（或重叠）。因此，本文主要根据云南地区历史地震人员伤亡与经济损失分布情况，结合各类建筑物分布及抗震性能情况，将云南地区分为滇东北（昭通市各县区、寻甸县、会泽县）、滇南—滇西南（临沧市、普洱市、西双版纳州、楚雄州、昆明市、曲靖市、玉溪市、红河州、文山州）、滇西—滇西北（大理州、丽江市、保山市、迪庆州、怒江州、德宏州各县区）3个特征分区，分别统计整理各分区各类震害资料，进而总结震害特征。基于上述原因，本文给出的特征分区并不代表对各区域内影响震害的各因素的绝对排序。

5 云南灾害特征分区震级与烈度、人员伤亡、直接经济损失关系

5.1 烈度衰减关系

根据3个分区内的烈度数据用最小二乘法拟合出烈度衰减公式，各分区的长、短轴衰减关系见式（7~9）。

（1）滇东北地区

$$\text{长轴: } I_a = 4.902\ 4 + 1.348\ 5M - 3.973\ 8\lg(R_a + 13) \quad \sigma = 0.432\ 9 \quad (7a)$$

$$\text{短轴: } I_b = 4.351\ 7 + 1.219\ 2M - 3.742\ 9\lg(R_b + 6) \quad \sigma = 0.413\ 5 \quad (7b)$$

（2）滇南—滇西南地区

$$\text{长轴: } I_a = 7.503\ 1 + 1.316\ 2M - 5.072\ 8\lg(R_a$$

$$+ 26) \quad \sigma = 0.496\ 3 \quad (8a)$$

$$\text{短轴: } I_b = 5.247\ 1 + 1.232\ 4M - 4.163\ 7\lg(R_b + 11) \quad \sigma = 0.475\ 2 \quad (8b)$$

（3）滇西—滇西北地区

$$\text{长轴: } I_a = 6.805\ 3 + 1.306\ 7M - 4.795\ 2\lg(R_a + 22) \quad \sigma = 0.562\ 1 \quad (9a)$$

$$\text{短轴: } I_b = 5.331\ 5 + 1.1762M - 4.082\ 9\lg(R_b + 10) \quad \sigma = 0.478\ 6 \quad (9b)$$

式中： R_a 和 R_b 分别为烈度 I 的椭圆等震线的长半轴和短半轴长度； σ 为标准差，其值越大代表相关性越好。

5.2 震级—人员伤亡关系

震级—人员死亡关系，采用幂函数模型，通过数据拟合，得到如下3个分区的震级—人员死亡函数关系式和拟合曲线图（图4a）。

$$\text{滇东北地区: } f(x) = 2.997 \times 10^{-7} x^{11.41} \quad (R^2 = 0.926\ 8) \quad (10a)$$

$$\text{滇南—滇西南地区: } f(x) = 1.555 \times 10^{-8} x^{10.96} \quad (R^2 = 0.255\ 6) \quad (10b)$$

$$\text{滇西—滇西北地区: } f(x) = 1.408 \times 10^{-7} x^{10.92} \quad (R^2 = 0.777\ 0) \quad (10c)$$

式中： x 为震级； $f(x)$ 为人员死亡数； R^2 为决定系数。

震级—人员受伤关系采用幂函数模型，通过数据拟合，得到如下3个分区的震级—人员受伤函数关系式和拟合曲线图（图4b）：

$$\text{滇东北地区: } f(x) = 6.221 \times 10^{-27} x^{36.54} \quad (R^2 = 0.880\ 4) \quad (11a)$$

$$\text{滇南—滇西南地区: } f(x) = 2.907 \times 10^{-10} x^{16.08} \quad (R^2 = 0.262\ 8) \quad (11b)$$

$$\text{滇西—滇西北地区: } f(x) = 3.62 \times 10^{-10} x^{16.16} \quad (R^2 = 0.966\ 9) \quad (11c)$$

式中： x 为震级； $f(x)$ 为人员受伤数； R^2 为决定系数。

5.3 震级 - 直接经济损失关系

在 3 个分区内分别构建震级 - 直接经济损失关系。滇东北采用幂函数模型, 滇南—滇西南、滇西—滇西北采用多项式函数模型, 通过数据拟合, 得到如下的震级 - 直接经济损失函数关系式和拟合曲线图 (图 4c)。

$$\text{滇东北地区: } f(x) = 4.099 \times 10^{-10} x^{19.47} \quad (R^2 = 0.9713) \quad (12a)$$

$$\begin{aligned} \text{滇南—滇西南地区: } f(x) &= 7.135 \times 10^4 x^3 - 8.604 \times 10^5 x^2 + 3.182 \times 10^6 x - 3.282 \times 10^6 \\ (R^2 &= 0.8236) \end{aligned} \quad (12b)$$

$$\begin{aligned} \text{滇西—滇西北地区: } f(x) &= 5.772 \times 10^5 x^3 - 9.167 \times 10^6 x^2 + 4.853 \times 10^7 x - 8.561 \times 10^7 \\ (R^2 &= 0.977) \end{aligned} \quad (12c)$$

式中: x 为震级; $f(x)$ 为直接经济损失; R^2 为决定系数。

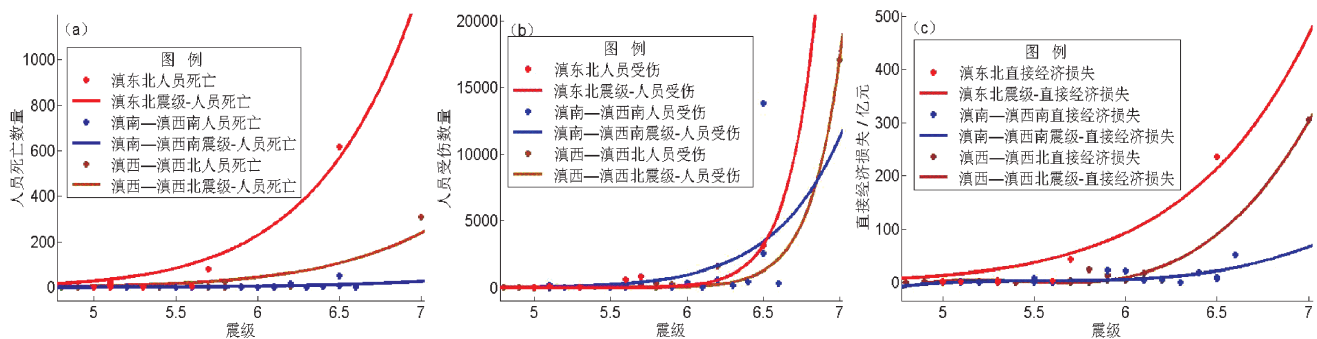


图 4 3 个分区震级 - 人员死亡 (a)、震级 - 人员受伤 (b)、震级 - 直接经济损失 (c) 拟合关系图

Fig. 4 Fitted curves of magnitude - death (a), magnitude - injury (b), and magnitude - direct economic losses (c) in the three zones

6 结论

本文通过对 1992—2018 年云南地区发生的 72 次破坏性地震事件的震害资料进行空间化处理和数理统计, 对影响灾害轻重程度的几个重要指标进行了特征研究和分析, 按照灾害特征划分为 3 个分区开展震级与灾害损失关系研究, 得出以下结论和认识:

(1) 云南地区的震害具有明显的分区特征, 区域差异显著。总体来看, 同等级别的地震, 滇东北地区震害最重, 滇西—滇西北地区震害次之, 滇南—滇西南地区震害最轻。

(2) 地震造成灾害的轻重程度受地震自身属性 (震级、深度、震源特性、持续时间等) 和承灾体 (人口分布、社会经济状况、建筑物抗震性能、自然地理环境等) 的共同影响。针对云南地震灾害显著的地域差异, 采用小尺度的灾害损失关系, 在预评估中相比云南省域尺度的结果更具有合理性。

云南省从 1992 年正式开始地震灾害损失评定, 早期地震事件的经济损失无从考证, 震害资料的局限性致使本文研究样本数量较少, 导致建立的各种灾害损失关系的系统性偏差较大, 未来有待引用更多的震害资料参与回归降低系统性偏差, 或采用更精细的本地化修正方法提高评估结果的准确度。

参考文献:

- 白仙富, 戴雨茨, 戴靖, 等. 2013. 昭通地区地震灾害区域性特征分析 [J]. 地震研究, 36(4): 514 - 524.
- 曹彦波, 李兆隆, 李永强, 等. 2015. 云南地震应急快速评估模型本地化集成研究 [J]. 地震研究, 38(1): 148 - 154.
- 代博洋, 卢永坤, 周光全, 等. 2011. 盈江 5.8 级地震震害特点分析及讨论 [J]. 震灾防御技术, 6(3): 300 - 310.
- 和仕芳, 张方浩, 余庆坤, 等. 2018. 云南地区中强地震经济损失快速预评估方法研究 [J]. 地震研究, 41(4): 622 - 629.
- 侯建盛, 李洋, 宋立军, 等. 2015. 2014 年云南景谷 6.6 级地震与云南鲁甸 6.5 级地震致灾因素分析 [J]. 灾害学, 30(2): 100 - 101.
- 胡伟华, 宋立军, 苗崇刚, 等. 2010. 地震灾区分级和灾害程度排序方法研究——以汶川 8.0 级地震为例 [J]. 灾害学, 25(2): 30

- 35.
- 李永强. 2012. 云南地震人员死亡研究[M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 卢永坤, 曾应青, 周光全, 等. 2007. 2007年宁洱6.4级地震震害综述[J]. 地震研究, 30(4): 364-372.
- 卢永坤, 张建国, 宋立军, 等. 2014. 2014年云南鲁甸6.5级地震烈度分布与房屋震害特征[J]. 地震研究, 37(4): 549-557.
- 王晓青, 丁香, 王龙, 等. 2009. 四川汶川8级大地震灾害损失快速评估研究[J]. 地震学报, 31(2): 205-211.
- 晏凤桐. 2003. 地震灾情的快速评估[J]. 地震研究, 26(4): 382-387.
- 尹之潜, 李树楨, 赵直, 等. 1991. 地震灾害预测与地震灾害等级[J]. 中国地震, 7(1): 9-19.
- 云南省地震局. 1988. 云南省地震资料汇编[M]. 北京: 地震出版社.
- 云南省地震灾害损失评定委员会. 2012. 云南地震灾害损失评估及研究: 1992—2010[M]. 昆明: 云南科技出版社, 121-552.
- 张方浩, 邓树荣, 杜浩国, 等. 2018. 基于熵权法的云南县域历史地震灾害等级评价[J]. 地震研究, 41(2): 319-327.
- 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[J]. 中国地震, 32(3): 511-521.
- 张彦琪, 陈维锋, 卢永坤, 等. 2017. 2014年云南3次 $M>6$ 地震灾害特征对比分析[J]. 地震研究, 40(1): 144-152.
- 周光全, 施卫华, 毛燕. 2003. 云南地区地震灾害损失的基本特征[J]. 自然灾害学报, 12(3): 81-86.
- 周桂华, 非明伦, 张彦琪, 等. 2013. 彝良5.7、5.6级地震烈度分布及烈度异常区震害特征初步分析[J]. 地震研究, 36(3): 364-371.
- 云南省统计局. 2018. 云南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社.

Regional Characteristics of the Earthquake Disasters in Yunnan Area

ZHANG Fanghao, LU Yongkun, DENG Shurong, DU Haoguo, HE Shifang
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

In this paper we firstly spatialize the earthquake - damage data from 72 destructive events which occurred in Yunnan from 1992 to 2018. Then we select three main indicators of disaster losses-intensity area, number of casualties, and direct economic losses for feature analysis. We find that the earthquake disasters in Yunnan are marked with apparent regional characteristics: caused by the earthquakes with the same magnitude, earthquake damages in north - east Yunnan are severest; earthquake damages in west and north - west Yunnan are severe; the ones in south and south - west Yunnan are less severe. Finally, by mathematical statistics we deduce the relations between magnitude and intensity, the relations between magnitude and casualty, and the relations between magnitude and economic losses in three zones of Yunnan.

Keywords: earthquake disaster; regional characteristics; intensity; direct economic loss; casualties