

龙安明, 吴教兵, 阎春恒, 等. 广西陷落地震研究及其防灾减灾对策[J]. 华南地震, 2015, 35 (4): 1-9. [LONG Anming, WU Jiaobing, YAN Chunheng, et al. Collapse Earthquake Research and Disaster Prevention and Mitigation Measures in Guangxi[J]. South china journal of seismology, 2015, 35(4): 1-9.]

广西陷落地震研究及其防灾减灾对策

龙安明¹, 吴教兵¹, 阎春恒¹, 邓诗跃²

(1. 广西壮族自治区地震局, 南宁 530022; 2. 广西壮族自治区桂林市地震局, 广西 桂林 541001)

摘要: 收集了1980年以来广西地区陷落地震资料, 在此基础上分析了陷落地震的时空分布特征以及灾害特点, 探讨了陷落地震的发震机理, 提出了陷落地震的防御和减灾对策, 供防灾减灾决策参考。

关键词: 陷落地震; 岩溶; 灾害; 对策

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2015) 04-0001-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2015.04.001

Collapse Earthquake Research and Disaster Prevention and Mitigation Measures in Guangxi

LONG Anming¹, WU Jiaobing¹, YAN Chunheng¹, DENG Shiyue²

(1. *Earthquake Administration of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, China;*

2. *Earthquake Administration of GuiLin City, the Guangxi Zhuang Autonomous Region, GuiLin 541001, China*)

Abstract: By using the collapse earthquakes data collected in Guangxi region from 1980, the paper analyzes the temporal and spatial distribution characteristics and disaster feature of collapse earthquakes, and discusses the mechanism of collapse earthquakes. On the basis, the paper proposes the countermeasures of defense and mitigation. It is available for collapse earthquake disaster prevention and reduction.

Keywords: Collapse earthquake; Karst; Disaster; Countermeasure

0 引言

广西地区岩溶地貌发育, 岩溶出露面积约占全区总面积的42%, 受高温多雨、地下水丰富等因素影响, 岩溶作用强烈, 是全国岩溶陷落地震最活跃、受灾最严重的地区之一。如1911年7月13日环江岜焚村塌陷地震导致“全村淹没, 仅余

3子”, 1980年8月25日宜山县祥贝2.0级塌陷地震使水坝遭受严重破坏。关于陷落地震与防治措施, 国内外有较多的研究, 如廖建裕列出了广西河池地区陷落地震小震级高烈度的部分震例, 统计出该地区小震级与震中烈度的关系, 并分析了该地区小震级高烈度的主要原因^[1]。覃子建对岩溶塌陷及诱发地震进行了初步探讨, 并说明塌陷及

收稿日期: 2015-05-10

基金项目: 广西科技攻关计划项目(10123009-1)和地震科技星火计划项目(XH142003Y)共同资助

作者简介: 龙安明 (1952-), 男, 高级工程师, 主要从事地球物理研究和地震科技管理。

E-mail: 2034179478@qq.com.

其地震对水利工程的危害^[2]。缪钟灵对桂林附近陷落地震的分布、形成及特征进行了分析,认为陷落地震是一类低震级高烈度的地震,在震中区造成较大的震灾^[3]等。

随着经济建设的快速发展,人类活动不断加强,城镇化进程不断加快,岩溶发育地区的资源开发和工程活动日益增强,一旦在人口密集的城区发生陷落地震,将对城市人民生命构成极大的威胁,对城市大量建(构)筑物、城市交通和地下管网等构成造成严重破坏。所以,陷落地震灾害已成为岩溶发育区经济可持续发展的一大障碍^[4]。然而目前对于陷落地震,多数描述陷落地震的震害,关于震前防御措施以及震后减灾对策方面的讨论较少。为此,本文就岩溶地区的陷落地震震害、形成机理和防灾减灾问题进行探讨,给出陷

落地震的防御和减灾对策。

1 广西陷落地震概况

广西岩溶面积约 95 000 km²,是著名的岩溶分布区(图 1)。强烈的岩溶作用,形成了奇特的岩溶地貌和美丽的自然风景,同时也导致地下暗河、洞穴广泛分布,在自然环境、重力、水系变化及人为等因素作用下,极易引发陷落地震,虽然通常震级不大,但造成的局域破坏却相当严重^[5-7]。据不完全统计,1980 年以来广西地区发生了数十次较显著的陷落地震,主要分布在百色、河池、桂林等地的岩溶地区(图 1),对震区工农业生产、城市建设及生命财产等方面造成较大影响(表 1)。

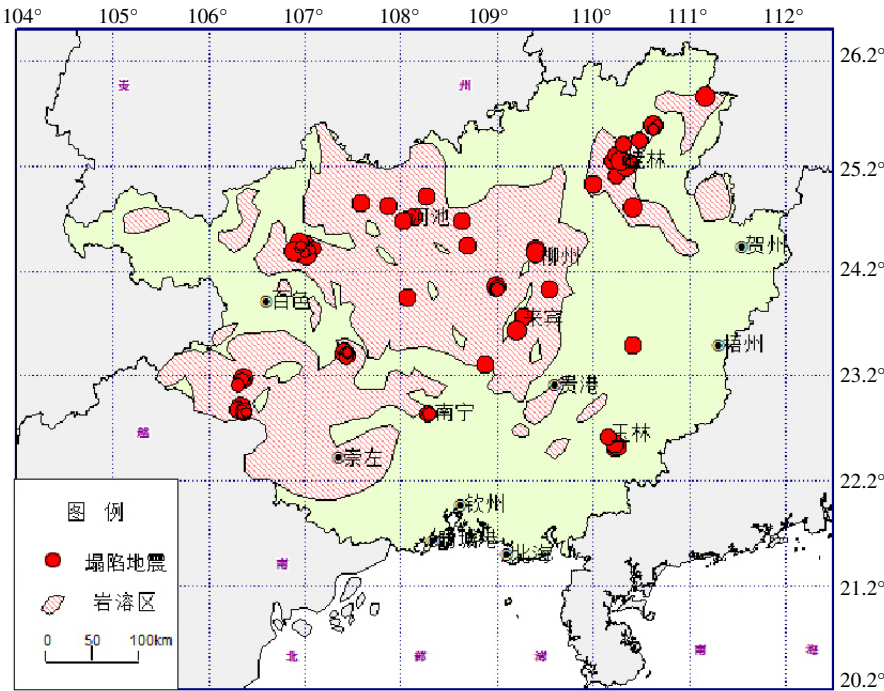


图 1 广西主要陷落地震与岩溶分布图

Fig.1 Distribution map of karst region and main collapse earthquakes in Guangxi

表 1 广西主要陷落地震震害信息表

Table 1 Seismic hazard information of main collapse earthquakes in Guangxi

序号	时间/年-月-日	震级/ M_L	参考震中位置	震害情况
1	1980-07-15	2.6	河池市都安县拉仁乡	地震时,拉仁乡 24 个自然村均感震动强烈;鸟飞羊跳,房屋摇动,屋顶掉瓦;震中烈度Ⅵ度弱。
2	1980-08-25	2.7	河池市宜山祥贝	在极震区,震时人感觉强烈,普遍听到沉闷响声。犬惊恐狂吠,房屋、门窗、床震动作响。静止的河水起波纹,木船摇晃。祥贝公社水泵站大坝遭受严重破坏,大坝破裂长 27.5 m,裂缝宽 5~27 cm,呈锯齿状被迫停止抽水、发电。震中烈度Ⅴ度强。

(转下表)

(接表 1)

序号	时间/年-月-日	震级/ M_L	参考震中位置	震害情况
3	1980-09-09	2.8	河池市拔贡乡	V 度区范围在拔贡、拉电、贡维、拉显一带,东西长 1.3 km,南北长 5.2 km,地震时普遍听到地声,房屋摇动。
4	1982-06-16	1.2	来宾县青岭乡	震中附近群众有震感。
5	1982-08-17	2.7	河池市东江乡	烈度达 VI 度,长排村雷峒屯房屋摇晃 3 间瓦房震塌。
6	1983-06-22	2.8	河池市六圩镇	烈度达 V 度,人感到震动很大,声如闷雷。伴随山石滚落,房屋掉瓦,门角掉墙泥,桌子摇动,少数地方塌陷。
7	1984-01-11	3.6	河池市区	烈度达 VI 度,金城江镇东郊市翻胎厂、糖厂、纸厂一带震感尤强。先听到似放石炮或打雷一般的沉闷响声,紧接着便感到剧烈的水平震动。
8	1984-09-13	0.9	河池市大东湾水库	有震感。
9	1987-04-14	2.2	阳朔县白沙镇	有闷雷声,大多数房屋落瓦,有山石滚落,震中烈度达 IV 度;震后一个两亩大的鱼塘中出现一个直径为 3.5 m、深度为 2.2 m 的陷坑,陷坑周围还出现有约 10 cm 宽的裂缝。水塘冒气泡,水位下降 25 cm 左右。
10	1997-11-11	2.0	桂林市雁山区	地震造成地面塌陷的受灾总面积约 10 万平方米。据查是桂林陷落地震史上受灾最严重,地面塌陷面积最大,而陷坑最多又相对集中的一次震害。
11	2006-12-24	2.2	南丹县大厂镇	矿震,有震感,房屋和地面开裂。
12	2008-06-17	2.1	忻城县安东乡	震区群众有震感。
13	2008-06	3.1	凌云-凤山交界	震群,共记录 58 次地震,震前降暴雨,震时有震感。
14	2010-03-06	2.5	靖西县新甲乡	一些群众听到爆破声,声音沉闷,感觉房子晃动并有震感。次日上午村民发现庞凌河一夜间水位明显下降,而位于庞凌河上游的凌晚屯地下河水位明显上升。
15	2010-03-09	2.4	大厂镇上山桥屯	矿震,有震感。
16	2010-05-16	2.8	河池市东江镇	地震发生时地下抖动,房屋摇晃,人惊慌、站立不稳,震中区加道村才吉屯附近山上有大量山石崩落,砖混结构房屋开裂,家中电视机被震翻倒,瓦片被震落,烈度 VI 度区范围 2 km ² 。
17	2010-06~08	3.2	凌云-凤山交界	在前期严重干旱的背景下,受局部强暴雨的触发作用,在凌云-凤山交界发生 3 级震群活动,共记录到 3 071 次地震。震中位于岩溶地区,震源浅、频次高、烈度大、灾害重,百色市凌云县逻楼镇和河池市凤山县江洲乡、平乐乡等地区受到影响,其中震区河池市凤山县江洲乡陇善村等 7 个自然屯震感强烈,受灾最严重的陇善村有 7 个水柜被震裂,9 栋砖混结构房屋有轻微裂缝,5 栋砖瓦结构的房屋受损严重,2 栋房屋受损特别严重已成危房。地震共造成 1 000 多人受灾,百色、河池两市直接经济损失 1 500 多万元,转移安置群众 3 500 余人。
18	2010-06-01	1.9	来宾市良江镇	历史罕见特大暴雨造成广西来宾市区严重内涝;来宾市良江镇吉利村发生地陷,在一座大山下形成 4 个巨坑,距离村子最近的一个大坑直径有七八十米,深度有二三十米。
19	2010-06-01	2.1		
20	2011-06	2.5	靖西县龙邦镇	震群,共记录 63 次。震前震中区普降大雨;震时有群众听到闷雷似的地声,并发现溶洞口有气体排出。

(转下表)

(接表 1)

序号	时间/年-月-日	震级/ M_L	参考震中位置	震害情况
21	2012-05	1.4	凌云-凤山交界	震群, 共记录 79 次, 地震发生时群众有感。
22	2012-07-28	2.5	崇左市江州区那隆镇	震中区部分群众被闷雷声惊醒, 动物受惊。震中周围无采石场、无采矿作业, 震前两三天连续降暴雨。
23	2012-03-22	2.5	靖西县龙临镇	地震发生时, 震中附近村屯群众均有震感。
24	2012-08-17	2.9	靖西县龙临镇	
25	2012-12-20	2.6	靖西县安宁乡	
26	2012-12-22	2.5	靖西县禄垌乡	
27	2013-08-29	2.7	靖西县	
28	2015-01-15	1.6	靖西县	
29	2015-09-08	2.4	合山市	震中附近群众有震感。
30	2015-09-09	3.1	天峨县龙滩库区	地震序列发生在库水位快速抬升过程中, 近台 P 波初动均向下、面波发育、衰减快; 现场调查结也显示, 震中区下方发育有大型溶洞, 地震发生时震中区震感强烈。

2 陷落地震特征及成因机制

2.1 基本特征

由于广西岩溶发育, 地下暗河和溶洞极为发达, 在地下水长期溶蚀的作用下, 地下溶洞不断扩大, 最终导致溶洞顶板塌陷形成陷落地震^[8]。通过分析表 1, 发现近年来广西陷落地震活动大多具有以下特征:

(1) 小震级高烈度。陷落地震的能量受陷落体的体积、重量及落差的控制, 塌陷一般以中、小

规模为主, 相对构造地震而言能量偏小, 故震级不大, 一般小于 M_L 3.5。但因其震源很浅, 在震中区产生的局部震害较同等级别的构造地震要大^[9], 通常 M_L 2.0 级左右地震就有震感, 甚至出现山石滚落、房屋和地表开裂或塌陷等灾害。如: 1982 年 8 月 17 日河池东江乡 M_L 2.7 地震的陷落地震, 震中烈度达到Ⅵ度^[10](图 2), 2010 年 5 月 16 日河池东江镇 M_L 2.8 地震导致山石滚落、房屋开裂和掉瓦、地面开裂等灾害(图 3)。

(2) 与强降雨或地下河密切相关。2008 年至

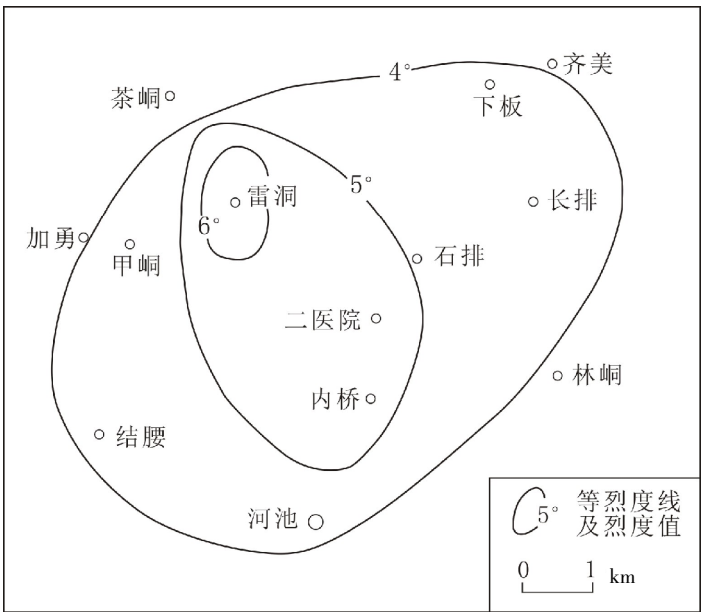


图 2 1982 年 8 月 17 日河池 M_L 2.7 级地震等烈线图
Fig.2 Seismic intensity map of Hechi M_L 2.7 earthquake on August 17th, 1982

2012 年凌云-凤山交界的 3 次震群发生前震中区均连降暴雨。最典型的是 2010 年 6 月 27 日晚凌云、凤山地区出现特大暴雨,造成水库溢洪,低洼处形成湖泊,城镇内涝。6 月 28 日 17 时开始,凌云、凤山交界地区发生密集的微震活动,29、30 日出现最高日频次 342 和 352 次,微震频次最高

值出现的时间稍滞后于最大降雨时间,研究表明特大暴雨是触发此次罕见震群活动的主要因素^[4]。现场调查及观测研究结果均表明,绝大部分为岩溶陷落地震。2008 年以来桂西地区显著有感地震多与降雨或地下暗河有关(图 4)。如 2010 年 3 月 6 日靖西县新甲乡 2.5 级陷落地震导致地下暗河堵塞。



图 3 2010 年 5 月 16 日河池 M_L 2.8 级地震灾害图

Fig.3 Seismic hazard map of Hechi M_L 2.8 earthquake on May 16th, 2010

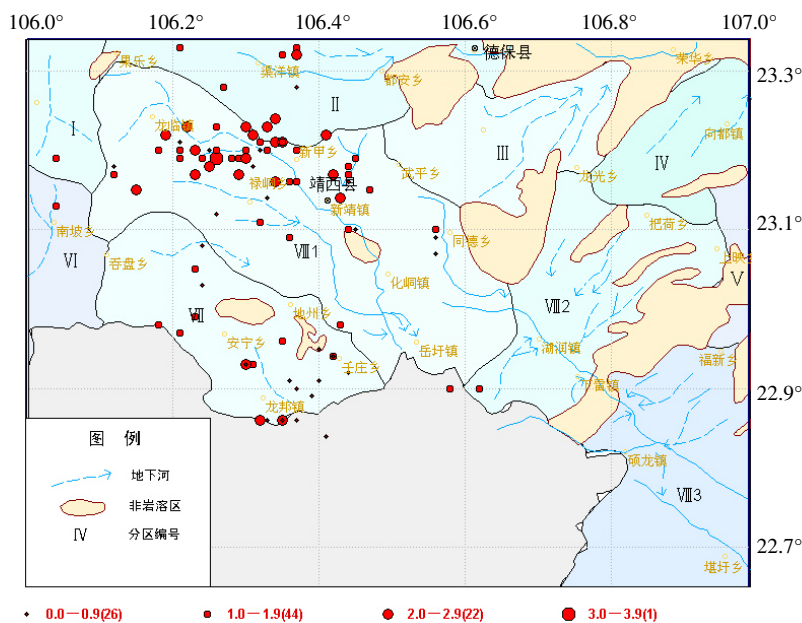


图 4 桂西地区有感地震与地下暗河及岩溶区分布

Fig.4 Distribution map of felt earthquakes, underground rivers and karst region in western Guangxi

2.2 成因机制分析

陷落地震的物质组成可分为两大类：一是发生在石灰岩中的溶洞顶板陷落，二是发生在覆盖层中的土洞顶板陷落。溶洞顶板陷落的原因，可能是由于内外部溶蚀、剥蚀使顶板变薄，或洞内发生正负水压等。土洞顶板陷落又分为两种类型：一种是粘性土土洞陷落，另一种是砂性土土洞陷落。其成因可分为自然和人为两种。

2.2.1 自然陷落地震

自然陷落地震是在暴雨、洪水、重力等因素作用下，地下水位变幅增大，水动力条件急剧变化，使上覆土层的自然状态被破坏而导致塌陷的

发生陷落地震。其形成是多种因素影响和综合作用的结果。一是岩溶发育是陷落地震产生的前提条件；二是岩性及覆盖层厚度是发生的物质基础；三是暴雨引发地下水活动是陷落地震形成的主要诱发因素。其它因素均是通过这三个必要条件起作用的。

(1) 暴雨引发陷落地震。暴雨引发的陷落地震是受地下水动态演变特征的控制，多发生在旱涝交替强烈的年份。暴雨、洪水地下水位变幅增大，水动力条件急剧变化，使上覆层的天然状态遇受破坏而导致陷落地震的发生。据统计，广西境内陷落地震事件多发生在降雨丰富的 5 月至 8 月(图 5)。

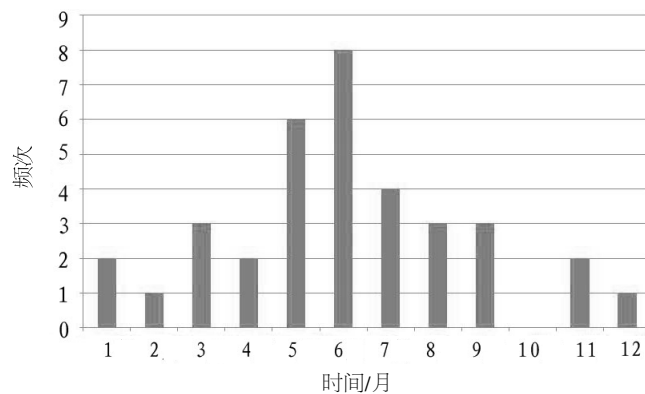


图 5 广西陷落地震活动时间统计

Fig.5 Statistics of activity time of collapse earthquakes in Guangxi region

2010 年 6 月凌云-凤山 3.2 级陷落地震群是暴雨触发陷落地震活动的一个典型例子。在前期严重干旱的背景下，2010 年 6 月 27 日晚开始，广西西北部部分县、市出现暴雨到特大暴雨，暴雨造成地下岩溶管道塌陷连续诱发陷落地震，形成陷落地震震群，共记录到 3 071 次(见图 6)。由于该次陷落地震震源浅、频次高、烈度大、灾害重，这在全国仅有、广西罕见。百色市凌云县逻楼镇和河池市凤山县江洲乡、平乐乡等地区受到影响，其中震区河池市凤山县江洲乡陇善村等 7 个自然屯震感强烈，受灾最严重的陇善村有 7 个水柜被震裂，9 栋砖混结构房屋有轻微裂缝，5 栋砖瓦结构的房屋受损严重，2 栋房屋受损特别严重已成危房。地震共造成 1 000 多人受灾，百色、河池两市直接经济损失 1 500 多万元，转移安置群众 3 500 余人。

(2) 重力触发陷落地震。陷落地震的塌陷体通常受三个力的共同作用，一是陷塌体自身的重力(G)，方向向下，二是陷塌体摩擦阻力(F)，方

向向上，三是地下水浮力(W)，方向向上。满足 $G > F + W$ 的条件就会发生陷落地震。其关系为：

$$P = G - F - W$$

$$E = 9.8 * P * \Delta h$$

$$W = \rho_{\text{水}} * 9.8 * V_{\text{排}}$$

式中， G 为塌陷体自重(kg)， F 为塌陷体边周磨阻力(kg)， E 为 能量(J)， P 为塌陷体致塌力(kg)， Δh 为塌陷体一次性下塌的落差(m)， W 为地下水浮力(kg)， $\rho_{\text{水}}$ 为地下水的密度， $V_{\text{排}}$ 为塌陷体浸没在地下水中的体积。当塌陷体位于地下水面上时，则 $W = 0$ 。

广西有很多重力触发陷落地震事件。如 2010 年 3 月 6 日靖西县 2.5 级陷落地震，该次事件是岩溶区自重塌陷形成的陷落地震，大量岩体陷落堵塞地下河，形成“地下堰塞湖”，导致地下河断流，出水口的庞凌水库干枯，下流群众无水使用和灌溉，而上流凌晚屯 3 个天窗水位迅速上涨形成内涝。上涨最高水位为 16.73 m，形成库容约 200 万 m^3 的地表地下联合水库，淹没当地居民房

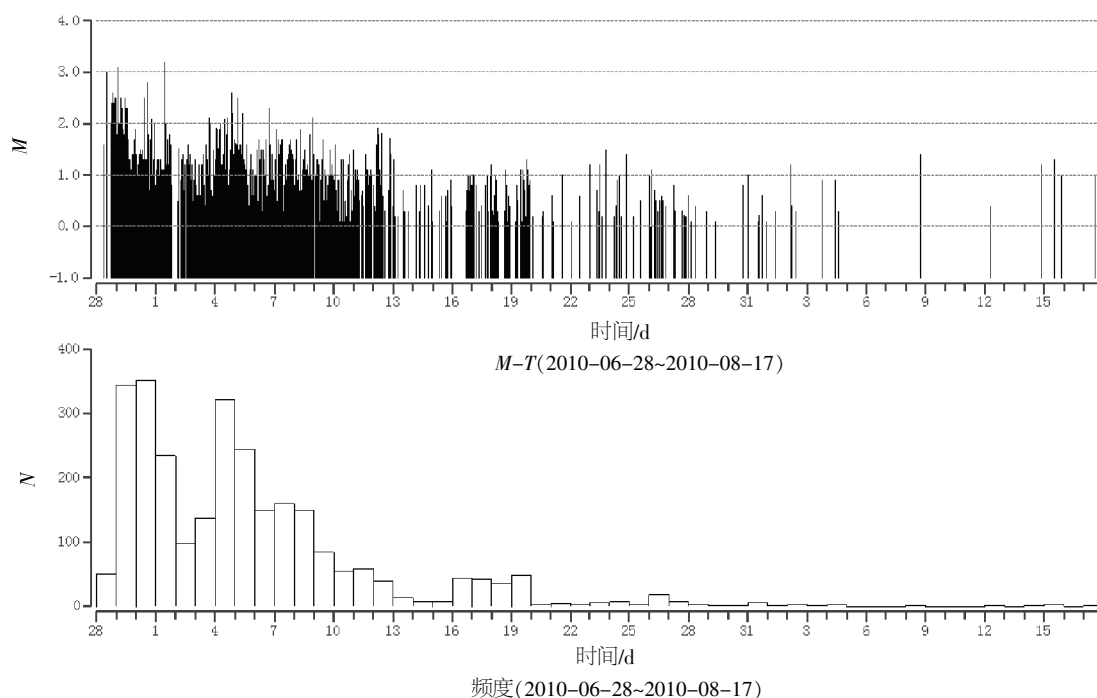


图6 2010年6至8月凌云-凤山交界 $M_L 3$ 震群 $M-T$ 图和日频次图

Fig.6 The $M-T$ and daily frequency map of the $M_L 3$ earthquake swarm from June to August, 2010, located in the junction of Linyun and Fengshan in Guangxi region

屋33户,淹没耕地281.3亩。当地政府投资1071.12万元修建庞凌河排水渠,投资955.8万元异地建地震移民新村(图7~9)。2010年6月1日,来宾市良江镇塌陷形成4个直径和深度均达数十米的大坑,导致附近村庄整体搬迁重建。

2.2.2 人为陷落地震

人为塌陷是在岩溶洞穴的基础上由于人类工程活动而引起的塌陷,按其成因又可分为以下五类:①抽取地下水引起的塌陷;②地表水或污水下渗引起的塌陷;③震动或加载引起的塌陷;④矿坑排水或突水引起的塌陷;⑤水库蓄水和渠道输水引起的塌陷。

(1) 工程引发陷落地震。在岩溶区,工程爆破也易引发陷落地震。如:1997年11月桂林漓江因疏通漓江河床河道人工爆破诱发河床内处于岩溶坝塌临界状态下的岩溶陷落诱发了1.2级陷落地震。该事件造成地面塌陷的受灾总面积约10万平方米,塌陷坑35个,长40m的地裂。由于地表塌陷造成柘木村大部分房屋受到不同程度的破坏,其中4户房屋倒塌,两户属危房,28户严重开裂或下沉。另有4个鱼塘塌陷而使塘水和鱼流失。

(2) 抽水引发陷落地震。由于抽水使水位急剧下降引起洞隙中负压力腔,负压力产生吸蚀作用,带走洞隙充填物,加速土司洞壁土体的解体

和剥蚀,同时加强渗流潜蚀,诱发陷落地震。如:80年代及90年代初,由于玉林市城市建设的迅速发展,因地下水开采量骤增等因素,该市及市郊地区诱发了许多岩溶塌陷,给城市工农业生产、经济建设及人民生命财产造成了极大的损失。

3 陷落地震的防御和减灾对策

陷落地震具有小震大灾等显著特点,引起地震学和地质学界学者的高度关注和广泛研究,然而它的预报——即发生时间、地点、震级三要素预报,却比构造地震预报的难度要大得多,主要是没有明显的应力蓄积过程,导致前兆少,加之地震台网稀疏,微陷落地震难以记录等等。当前关于陷落地震的防治主要以监测和预防为主。陷落地震(岩溶塌陷)的处治方法很多,如可采用清除填堵法、地表封闭处理、跨越法、强夯法、深基础法、灌注法、控制抽排水强度法、疏排围改综合治理法、恢复水位法和钻孔充气等具体手段,针对塌陷发育的基本要素分别进行堵截水流、强化土层和洞穴充填物、填堵岩溶通道等工程对策^[12-14]。

下面从陷落地震成因机制和诱发主要原因,从地震、地质和气象学等手段和方法提出防御和减灾对策,为防灾减灾提供科学的根据。



图 7 当地居民房屋被堰塞湖淹没

Fig.7 Local residents' houses submerged by the barrier lake



图 8 修建地表明渠

Fig.8 Construction surface drainage channel



图 9 地震移民新村

Fig.9 Seismic migrant village

3.1 开展岩溶区暴雨触发陷落地震的普查工作

根据本文的调查分析结果可以看出,绝大多数陷落地震发生在雨季。广西的岩溶区,特别是河池市凤山县、百色市靖西县及凌云县、桂林市城区和柳州市城区等地域,存在暴雨触发陷落地震的客观条件。由于在2000年以前这些区域地震监测台网的密度稀疏,受监测能力限制而大量的陷落地震未被记录。为填补其空白,建议尽快在广西岩溶区开展暴雨触发岩溶地震的普查工作。通过开展此项工作,查清陷落地震活动分布及其隐患,有效提高陷落地震的防治水平。

3.2 开展陷落地震与暴雨的相关研究

当前地震预报仍是有待解决的世界性难题,而特大暴雨预报尤其是局部地区强降雨预测预报难度亦很大,其结果也影响暴雨触发陷落地震的预报准确度,势必影响次生地质灾害的预报准确度。因此,建议相关部门在暴雨触发岩溶地震区加强气象台的建设和监测工作,保证准确、高效地收集和发布暴雨和降雨量相关信息。加强持续干旱之后瞬时暴雨的灾害性天气预报预警,即加强特大干旱之后的特大暴雨的趋势预报工作。多学科开展特大暴雨与陷落地震相关研究,以提高陷落地震预报的准确性。

3.3 建筑物、生命线工程等避震

由于广西岩溶洞穴十分发育,地下河广泛分布。在1:600万《中国岩溶塌陷分布图》的基础上,开展广西地区详细的地质灾害勘查评价工作,做好区域的岩溶塌陷分布规划,划定可能塌陷区范围,采取有效避让的措施,浅层岩溶和土洞发育地段的工程建筑点要事先勘探,尽可能避开不良地段。建筑物和交通设施等人类工程应避开塌陷区,可防止造成重大人员伤亡和经济损失。

4 结论

(1) 广西陷落地震从物质组成上分为发生在石灰岩中的溶洞顶板塌陷和发生在覆盖层中的土洞顶板塌陷。从成因上分为自然陷落地震和人为陷落地震。

(2) 广西陷落地震主要受地貌因素、地层岩性、地质构造、地下水活动和人类工程、经济活动、降雨量等因素的影响。岩溶塌陷是一种累进性的缓变地质灾害。其发展过程是不可逆的,一旦形成便难以恢复。

(3) 陷落地震的发生一般具备下面几个基本条件。岩溶发育以及“天窗”的存在是陷落地震形成的先决条件。土层是土洞形成和陷落地震发生的物质基础。地下水活动或强降雨是陷落地震形成的主要诱发因素。不合理的开采岩溶水是造成陷落地震的主要原因。岩溶水水位强烈波动形成各种作用是陷落地震产生的主要原动力。

(4) 陷落地震具有小震大灾等显著特点,引起地震学和地质学界学者的高度关注和广泛研究。加强广西陷落地震灾害的分布规律、成因机理和地质环境演变的科学研究工作,保护自然地质环境,采取系统性的防治措施,是减少陷落地震灾害的根本措施。

参考文献:

- [1] 廖建裕. 罕见的小震级高烈度的地震[J]. 华南地震, 1987, 7 (3): 25-27.
- [2] 覃子建. 中国岩溶区的地震及其震害特征[J]. 地震学刊, 2009 (4): 34-38.
- [3] 缪钟灵. 桂附近陷落地震分布、形成有特征[J]. 水文地质工程地质, 1998 (3): 38-41.
- [4] 张丽芬, 曾夏生, 姚运生, 等. 我国岩溶塌陷研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18 (3): 126-130.
- [5] 韩淑朋, 严新冻. 广西岩溶塌陷类型、影响因素、成因机制及其防治措施[J]. 资源调查与环境, 2012, 33 (2): 130-135.
- [6] 李耀寰. 广西桂林市郊发生陷落地震 [J]. 地球, 1983 (3): 7-7.
- [7] 姚宏. 1987年阳朔塌陷地震初探 [J]. 地震地磁观测与研究, 1989 (5): 5-7.
- [8] 龙安明. 广西特殊地震研究[J]. 华南地震, 1992, 12 (4): 22-31.
- [9] 曹肃朝. 构造地震和塌陷地震的特征分析[J]. 华北地震科学, 1993, 11 (1): 52-61.
- [10] 莫敬业. 广西通志·地震志 [M]. 北京: 广西人民出版社, 1990.
- [11] 蒋海昆, 杨马陵, 孙学军, 等. 暴雨触发局部地震活动的一个典型例子: 2010年6月广西凌云-凤山交界3级震群活动 [J]. 地球物理学报. 2011, 54 (10): 2606-2619.
- [12] 朱真. 广西岩溶塌陷特征及防治对策[J]. 水文地质工程地质, 2002 (3): 75-76.
- [13] 陆亿干, 王晓华. 岩溶塌陷的形成与防治措施探讨[J]. 科技创新导报, 2009 (18): 59-59.
- [14] 杨胜权. 贵州省岩溶塌陷的成因及防治对策[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5 (6): 38-42.