

狄靖月, 许凤雯, 李宇梅, 等. 东南地区引发地质灾害降水分型及阈值分析[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 62-67, 93. [DI Jingyue, XU Fengwen, LI Yumei, et al. Precipitation type and threshold analysis of geological disasters in southeast [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 62-67, 93. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.013.]

东南地区引发地质灾害降水分型及阈值分析*

狄靖月, 许凤雯, 李宇梅, 杨寅, 徐成鹏

(国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 降水是引发地质灾害的最重要因素。该文综合利用2013-2016年东南地区(浙、闽、粤三省)地质灾害数据、国家气象中心逐小时降水量资料, 通过对灾害特征和降水量等资料的统计, 初步分析了降水因子与地质灾害的关系, 并重点针对地质灾害的降水影响因子进行灾害降水的分型, 根据降水分型(短临降水型、短时降水型、短期降水型、长历时降水型), 基于最小临界雨量法, 建立了各类型降水在东南地区的引发地质灾害的降水阈值分布。利用该降水阈值的分布特征, 检验了2017年的各分类降水引发地质灾害的降水量, 发现阈值雨量的判别方法较为科学, 具有较强的参考价值。

关键词: 地质灾害; 降水类型; 灾害降水阈值; 东南地区

中图分类号: X43; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)01-0062-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.013

引发地质灾害的因素很多, 对滑坡而言主要有降水、土壤岩性、植被覆盖、人类工程活动、地形坡度、地形切割、地表水和地下水、地质构造等; 对泥石流而言, 主要有降水、土壤岩性、植被、水土流失、沟口堆积扇、抬升幅度、物源条件、沟道密度等。其中, 降水是引发地质灾害的最重要因素。一般来说, 在有较为充分的前期降水条件下, 如果出现突发性暴雨, 则爆发滑坡、泥石流等地质灾害及其他灾害的可能性非常大。若前期降水非常充沛, 下垫面含水量已达一定程度, 则即使较小的降水也极有可能激发滑坡、泥石流等地质灾害。这给地质灾害预报带来很大的难度。

1990年代初以来, 全球变暖的趋势加剧, 降水事件特别是极端降水事件在某些地区有增加趋势, 使得降水引发的地质灾害越来越频繁。应对防灾减灾的服务需求也越来越迫切, 且极具挑战性。而过去十几年中, 针对降水引发的地质灾害降水特征的分析及灾害过程的总结比较薄弱, 近年来, 随着定量降水预报的发展和小时加密自动观测降水资料的完善, 基于阈值的地质灾害风险预警业务逐步开展, 精细化的降水资料与地质灾害的结合更为紧密, 除了地质灾害的日降水特征分析外, 为短时和短临降水引发的地质灾害过程总结提供便利条件。

根据自然资源部统计, 2013-2016年全国共发生地质灾害44 244起, 造成1 429人死亡、332人失踪、直接经济损失256.79亿元。汛期, 西南、中南部和东南沿海地区以及西北部分地区是地质灾害发生和危害的重点地区。西南地区的易发性风险高, 针对西南地区的地质灾害研究已广泛开展, 而我国东部、南部及沿海地区, 尤其是台风期, 经济发达、人口稠密、城市化水平高, 一旦发生地质灾害则损失严重。因此对东南地区降水引发的地质灾害等的研究还需进一步深入。

1990年代初开始, 国内学者对降雨强度、降雨持续时间、降雨量或累计降雨量等^[1-5]与地质灾害发生的关系进行研究, 建立了基于临界雨量的地质灾害模型^[6-9], 逐步开展了地质灾害预警预报方法研究等^[10-12]。近年来, 国内以降水为主要指标开展了相应的地质灾害气象预警研究。刘传正等^[13]开展了中国地质灾害气象预警研究, 先后建立了地质灾害隐式和显式预报两代模型; 宋光齐等^[14]通过对地质灾害发生与气象因素的耦合关系研究, 建立了基于地质灾害危险性和降水发生概率的地质灾害气象预报预警模型; 周玉才、张铁军、唐红梅等^[15-17], 通过滑坡、山洪等与降水关系研究建立了基于强降水、持续性降水、日综合雨量的预测模型; 陈平等^[18]结合地质灾害发生和

* 收稿日期: 2018-06-19 修回日期: 2018-08-18

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1508102; 2016YFC0402702; 2017YFC1502501); 国家自然科学基金项目(51509043; 41775111); 中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2017-087)

第一作者简介: 狄靖月(1982-), 女, 江苏溧阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事应用气象预报服务工作。

E-mail: dijy@cma.gov.cn

通讯作者: 许凤雯(1977-), 女, 云南昭通人, 硕士, 高级工程师, 主要从事应用气象预报服务工作. E-mail: xufw@cma.gov.cn

小时雨量形成了湖南省地质灾害气象预警方法; 高华喜等^[19]通过对降雨与滑坡灾害的分析, 建立了滑坡预警预报阈值; 陈静静等^[20]结合致灾雨量阈值给出不同类型降雨对地质灾害发生的贡献率, 显示了分县致灾临界雨量及不同降雨型地质灾害的易发区。因此, 基于降水与地质灾害关系分析基础上的地质灾害气象阈值分析是可行的^[21]。

本文即在此研究基础上, 基于小时雨量对引发地质灾害的降水类型及阈值进行研究。

1 资料及方法

本文使用地质灾害灾情信息由自然资源部中国地质环境监测院提供的 2016 年东南地区地质灾害灾情信息共 569 条; 由中国气象局提供的 2017 年 5-9 月东南地区地质灾害灾情信息 62 条。

本文降水实况资料来源于国家气象中心国家区域自动站的小时降水资料, 统计的自动站有 53 652 个, 时间为 2013-2017 年。

本文以国家气象中心现有的地质灾害气象预报业务和科研成果为基础, 以提升地质灾害预报经验为目的, 开展我国代表性区域(东南地区)的降水引发的地质灾害的时间空间分布、类型、规模等分析; 依据降水与地质灾害的关系, 确立地质灾害的降水特征影响因子, 分析东南地区的地质灾害灾情、前期降水、当前降水等的关系及其引发地质灾害的共性, 总结不同类型地质灾害的降水阈值等; 目前, 国家级的地质灾害气象风险预警业务主要是在统计模型基础上建立, 本文根据降水特征, 对地质灾害进行分类, 在分类基础上用最小临界雨量法确定出各站点降雨造成地质灾害的降雨量阈值, 为东南地区地质灾害气象预报提供阈值参考。同时本文选取典型个例进行地质灾害预报过程总结, 通过总结, 加强预报员在地质灾害预报业务中的敏感度和把握度。

2 2016 年 1-9 月东南地区地质灾害特征

2.1 东南地区地质灾害总体灾情特征

2016 年 1-9 月用于统计分析的东南地区地质灾害共 559 起, 造成 92 人死亡、23 人失踪、33 人受伤, 直接经济损失 1.45 亿元。其中特大型 2 起,

大型 3 起, 中型 22 起, 小型 532 起, 小型地质灾害占到总数的 96%。且主要以滑坡、崩塌和泥石流为主, 占灾害总数的 99%, 其中泥石流为 62 起, 占总数 11%, 占比高于全国平均水平。

2.2 东南地区地质灾害空间分布特征

从东南地区地质灾害发生的省市分布来看(图 1), 浙江发生次数最多, 为 234 次, 是发生次数最少的福建(125 次)的 1.8 倍。在发生的市一级分布可以看出, 发生次数最高的温州, 为 132 次, 是排名第二的肇庆(65 次)的两倍, 发生次数超过 20 次有 9 个市, 占比 26%。

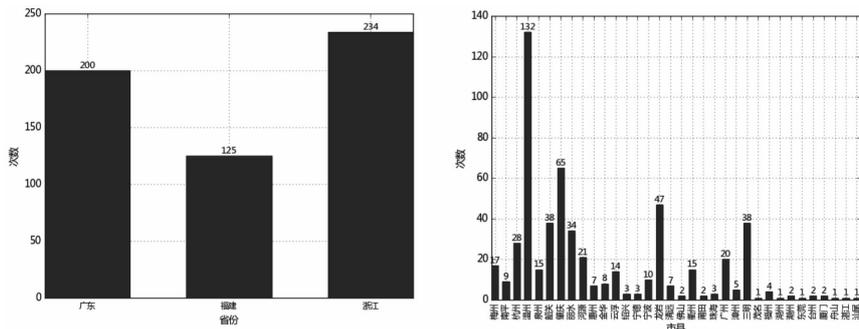
对灾害发生的规模进行分析(图略), 发现温州中型以上规模的地质灾害次数最多, 其次是韶关和杭州, 大型规模地质灾害分布来看韶关两起、温州 1 起, 三明泰宁和丽水遂昌出现特大型灾害。

浙江虽然是发生地质灾害次数最多的省份, 但从死亡失踪人数来看(图略), 福建是因灾死亡和失踪人数最多的省份, 达 55 人, 这主要是由于福建三明泰宁 2016 年 5 月 8 日发生特大型泥石流, 因灾死亡失踪 36 人, 占比福建省致灾死亡失踪人数的 66%。浙江省死亡失踪人数为 39 人, 其中丽水 28 人, 占总数的 70%, 这其中由于丽水发生了一起特大滑坡灾害, 2016 年 9 月 28 日 17 时 35 分, 浙江省丽水市遂昌县苏村(距离遂昌县城 37 公里)发生一起山体滑坡灾害, 约 20 幢居民楼被泥石流冲毁, 造成 5 人死亡, 22 人失踪。

而从损失程度来看(图略), 浙江损失最重, 为 8 000 万元, 是广东的 2 倍, 福建的近 3 倍。而经济损失最重的市为温州, 为 3 541 万元, 这与温州灾害次数最多有关, 韶关和丽水的损失分别为 2 894、2 705 万元, 分列二、三位, 这与两市大中型以上灾害占比较重有关。除三明、龙岩、杭州损失超过 500 万元外, 其余市的损失均在 500 万元以下。

2.3 东南地区地质灾害时间分布特征

地质灾害发生时间是预报的关键, 这里将灾情发生的时间做详细的分析。从灾害发生的时间段分布来看, 8~15 h 是地质灾害发生频次最高的时段, 发生数占总数的近一半, 特别是 9~12h, 地质灾害发生数最多。另一次高发时段为 2~3 h, 相对于全国地质灾害相对易发于夜间到早上的特点, 东南地区更易发于白天上午之前。另外, 东南地区有明显的低发时段, 主要分布于 18~20 h(图 2)。



(a) 2016年1-9月东南地区地质灾害次数分省统计图 (b) 2016年1-9月东南地区地质灾害次数市县统计图

图 1 2016 年 1-9 月东南地区地质灾害发生次数各省、市、县分布图

表1 有效雨量衰减系数表

前 <i>i</i> 天	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
衰减系数	1.0	0.8	0.64	0.512	0.410	0.328	0.262	0.210	0.168	0.134	0.107	0.086	0.069	0.055	0.044

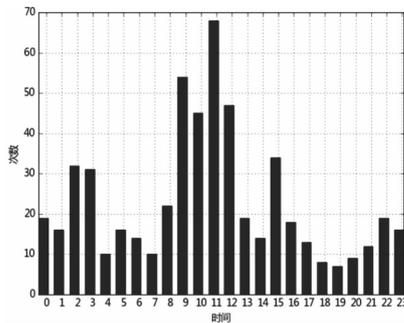


图2 2016年1-9月东南地区地质灾害发生次数各时段分布图(单位:次)

而从东南地区地质灾害发生时间的空间分布来看(图略),夜间发生的地质灾害多发生于东南地区的北部和西部,即浙江和广东境内较多,而福建则白天发生灾害较多。

总之,从2016年东南地区地质灾害灾情数据分析来看,浙江温州发生灾害发生最多,损失也最重,但造成死亡失踪人数的地质灾害主要在福建,这主要是由于福建三明泰宁2016年5月8日发生特大型泥石流,温州中型以上规模的地质灾害次数最多,其次是韶关和杭州。从灾害发生的时间段分布来看,8~15 h是地质灾害发生最高的时段,发生数占总数的近一般,特别是9~12 h,地质灾害发生数最多。浙江和广东境内夜间地质灾害发生较多,福建则白天发生灾害较多。

3 地质灾害的降水特征分类及降水阈值分析

3.1 地质灾害的降水特征分析

根据研究表明,对地质灾害的发生影响最大的降雨一般在地质灾害发生前3 d,而10 d内降雨对灾害发生影响也很大^[22-24],结合国家级业务应用经验,前15 d有效降雨对地质灾害的产生也有一定影响^[25-26],因此结合实际预警时效,规定短临降雨为0~1 h、短时降雨为0~12 h、短期降雨为1~3 d、中期为4~6 d、长期为7~15 d^[27-28],本文使用国家气象中心区域自动站资料的小时降水资料,统计的自动站有53 652个,时间为2016年1-12月每日24 h。根据灾害发生时次,计算提取灾害发生时次前1~15 d的逐日降雨及前3d的逐时降雨。

前15 d有效降水量,其计算公式如下:

$$R_A = \sum_{i=0}^{14} K^i R_i \quad (1)$$

式中: R_A 表示有效雨量, R_i 表示从灾害发生时次的当天算起(灾害发生当日*i*=0,灾害发生前1 d,*i*=1,前2 d,*i*=2)的雨量, K 为递减系数。国内一些研究取递减系数为0.8,本研究取 $K=0.8$ 。因此得到1~15 d的有效雨量衰减系数表(表1)。

根据公式(1),可计算获取1~3 d的有效降雨

量 R_{1-3} ,任意*i-j*天的有效雨量为 R_{i-j} 。根据文献表明,当 $R_{1-15} \geq 50.0$ mm,则判定该条地质灾害信息为降雨型地质灾害;当 $R_{1-15} < 50$ mm,但 R_{1-3} , R_{4-6} , R_{7-15} 中任一项 > 25.0 mm,则也判定该条记录为降雨型地质灾害;除上述情况以外,都判定为非降雨型地质灾害。基于上述方法从559条地质灾害信息中筛选得到384条降雨型地质灾害信息。

对造成地质灾害的降雨型进行判别,确定其形成的主要降雨特征,引入判别系数 D ^[20]来确定各降雨型地质灾害的致灾降雨类型:

$$D = \frac{\sum_{i=0}^2 K^i}{\sum_{i=0}^{14} K^i} \quad (2)$$

当 P_{1-3} 为短期降雨量对造成地质灾害的贡献率,当 $P_{1-3} = R_{1-3}/R_{1-15} > D$ 时,认为该次地质灾害主要由短期降雨造成;当 $P_{1-3} \leq D$ 时,认为该次地质灾害由长历时降雨造成。由此得出384条降雨型地质灾害中,339次降雨型地质灾害由短期降雨造成,占88.3%。在由短期降雨造成的地质灾害中,部分地质灾害是由短时强降雨引发的灾害。灾害发生当天12 h降雨与 R_{1-3} 的比值 > 0.8 时,则认为该次降雨型地质灾害是由短时强降雨造成^[20]。根据以上算法,339次短期降雨造成的地质灾害中,29次灾害是由短时强降雨造成(其中26次短时强降水分布在灾害发生前12 h,3次分布在灾害发生前12~24 h)。样本中,大部分灾害是由短期降雨引起,其中,浙江南部、福建西部、广东北部受此类型的降雨影响引发灾害较多;短时降雨引起的灾害分布在浙江西部、福建南部、广东东部;长历时降水引起的灾害主要分布在浙江西部、福建南部、广东北部;短时临近降水引起的地质灾害占比较少(图3)。

3.2 不同降水引发地质灾害的阈值分析

3.2.1 短时及短临降水引发地质灾害阈值分析

结合实际业务中的 > 20.0 mm/h为短时强降雨,29次短时降雨引起的灾害样本中,均发生10 mm/h以上的强降水,25次发生20 mm/h以上的短时强降雨,15次发生大于30 mm/h的短时强降雨,8次发生大于40 mm/h短时强降雨,强降雨主要发生在灾前9 h,其中最多发生强降雨时次的是前5~6 h时间段和临近灾害发生时段(图4),且灾害前的降雨峰值最多也是出现在1~3 h时间段。

根据降水分布时段的大小关系确定出贡献率较大的降雨时段以及该时段对应的有效雨量。用最小临界雨量法确定出各站点短时降雨造成地质灾害的降雨量阈值,29次样本中,当12 h短时降水大于32.4 mm,则灾害可能发生。同时,根据本次样本情况,2016年东南地区的12 h短时强降雨影响地质灾害的雨强临界阈值为10 mm/h,所有地质灾害样本的雨强都大于10 mm/h;85%的灾害,雨强大于20 mm/h,即雨强大于10 mm/h时,地质灾害才有可能发生。由短时降雨引发地质灾害的雨量分布图(图5)可以看出,广

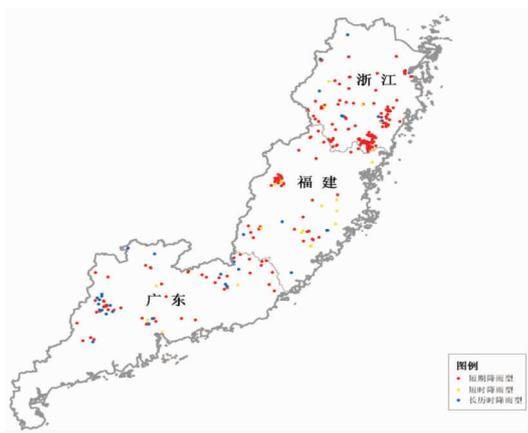


图3 各类降水引发地质灾害分布

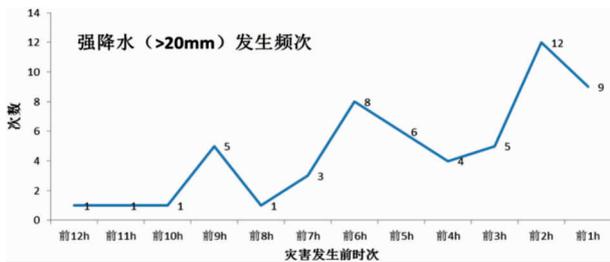


图4 引发地质灾害短时强降水 (>20 mm 的降雨) 发生频次

东北部梅州等地、福建东部莆田等地、浙江中北部丽水等地 12 h 有效降雨阈值达到 30 ~ 40 mm 有可能引发地质灾害, 广东南部、福建大部、浙江南部部分地区 12 h 有效降雨阈值超过 100 mm 才可能引发地质灾害。

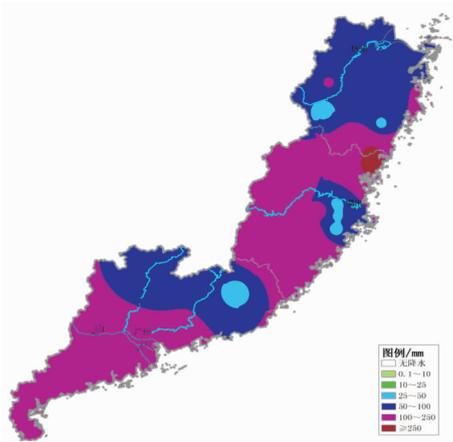


图5 短时强降水引发地质灾害的雨量阈值

当短时强降水(前 0 ~ 12 h)降水的 80% 以上发生在灾害前 0 ~ 2 h 内, 则认为是由短临降水引发的地质灾害, 在本次样本集中仅搜集到 4 次, 针对 4 次的 2 h 降水最小值为 34.1 mm, 初步认为, 当短临降水达到 34.1 mm 时, 地质灾害易发。

3.2.2 短期降水引发地质灾害阈值分析

同样, 用最小临界雨量法确定出各站点短期降雨造成地质灾害的降雨量阈值, 339 次样本中, 当前 1 ~ 3 d 短期降水大于 26.2 mm, 则灾害可能发生。从图 6 可以看出, 3 d 有效降雨阈值在东南

地区大部均超过 50 mm, 其中浙江东部、福建西部、广东中部局部地区短期有效降雨超过 100 mm 可能引发地质灾害, 浙江东部沿海短期有效降雨超过 250 mm 才可能引发地质灾害。

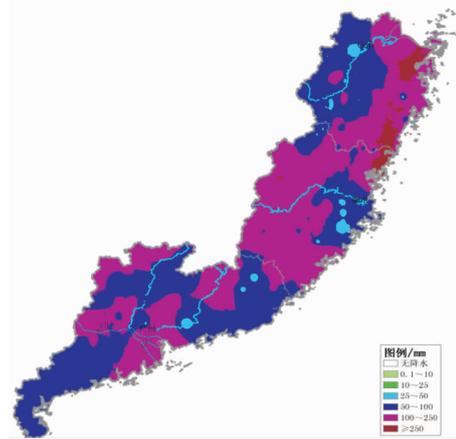


图6 短期降雨引发地质灾害的雨量阈值

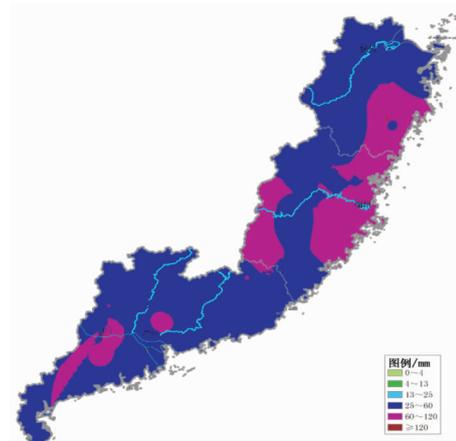


图7 长历时降雨引发地质灾害的雨量阈值

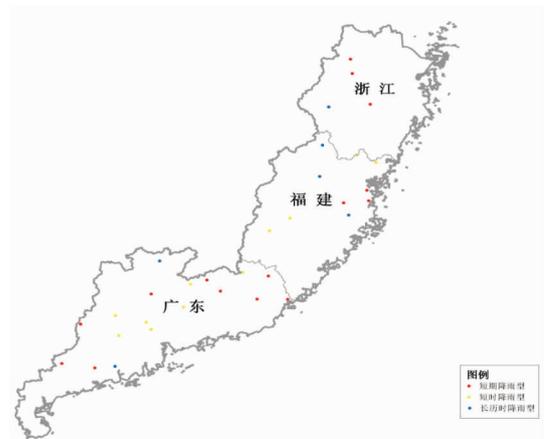


图8 2017年各类降水引发地质灾害分布

3.2.3 长历时降水引发地质灾害阈值分析

同样, 长历时(前 4 ~ 15 d)造成地质灾害的降雨量阈值, 45 次样本中, 当 4 ~ 15 d 长历时降水大于 27.4 mm, 则灾害可能发生。

从图 7 可以看出, 长历时有效降雨(前 4 ~ 15

d) 阈值在东南地区大部分地区均达到 25 mm 以上, 其中广东西部、福建西部和东部沿海、浙江东南部局部地区短期有效降雨超过 60 mm 才可能引发地质灾害。这一结论在实际应用中具有一定的参考意义, 但由于东南地区的雨水丰富, 长历时降雨达到 60 mm 的情况较多, 因此对灾害的预报性指示意义较小, 因此考虑长历时降雨不大时, 引起的地质灾害个例需更多的与发生灾害的下垫面地理地质条件相结合, 以利于进一步的分析。

4 典型地质灾害过程总结及阈值检验

4.1 阈值检验

根据中国气象局提供的 2017 年 5-9 月东南地区地质灾害灾情信息 63 条, 其中, 降雨型灾害 50 条, 短期降雨型灾害 42 条, 长历时降雨型灾害 8 条, 在短期降雨类型中, 17 次灾害是由短时强降雨造成(其中 12 次短时强降雨分布在灾害发生前 12 h, 5 次分布在灾害发生前 12~24 h)。短时强降雨引发的灾害中, 短临降雨型灾害仅 1 条。根据上文分析的东南地区各种类型的降雨类型相应阈值, 在短时降雨型地质灾害样本中, 59% 的灾害降雨达到了阈值, 在短期降雨型地质灾害样本中, 76% 的灾害降雨达到阈值, 长历时降雨的所有样本均达到相应降雨阈值, 由此可见, 上文的阈值分析较为科学合理, 可对基于阈值的地质灾害预警提供一定参考依据。2017 年的样本较少, 站点较为稀疏, 但大部分灾害也是由短期降雨引起(图 8)。

4.2 广东梅州市滑坡过程检验^[29-32]

2017 年 6 月 12-18 日, 受台风“苗柏”影响, 华南大部、江南东部和南部等地的部分地区累计降水量在 100 mm 以上, 其中, 福建南部、广东东部沿海和东北部等地的部分地区累计降水量超过 250

mm, 局地超过 500 mm。本次降水过程中, 累计雨量极大值为 826 mm, 出现在广东东部沿海地区。12-18 日期间, 广东梅州地区累计降水最大值为 414 mm, 降水过程主要时段是 13 日和 15-18 日。13 日 08 时至 14 日 08 时, 梅州西部和中北部地区出现暴雨, 其中北部地区出现大暴雨, 累计降水最大值为 196.4 mm; 15-18 日, 广东梅州东部地区自北向南有一次暴雨过程, 单日 24 h 累计雨量最大值为 106.2 mm(17 日 08 时至 18 日 08 时)。

据气象部门灾情系统, 整个过程引发了广东梅州、潮州、河源和深圳等地多地质灾害。至 6 月 15 日 14 时止, 广东省梅州市大埔县共发生山体滑坡 179 处, 房屋崩塌 54 处, 房屋倒塌 14 间、房屋受损 18 间, 转移危险区(山洪灾害、工棚、在建工程、依山建房、危房)群众 234 人。其中 2017 年 6 月 15 日 07:30, 大埔县茶阳镇因发生滑坡, 灾害造成 2 人伤亡。以大埔县自动降水(图 9)为例, 整个降水过程累计雨量 352.7 mm, 包含两个主阶段: ①从 13 日 02 时开始, 14 日 16 时结束, 持续时间为 39 h, 累计雨量 198.0 mm; ②从 15 日 12 时起, 至 18 日 04 时, 累计雨量 152.1 mm。根据上文分析, 首先判断此次地质灾害过程属于短期降雨造成, 对应短期降雨阈值(图 6), 广东大埔县附近 3 d 有效降雨超过 100 mm 可能引发地质灾害。这次灾害过程雨大, 3 d 有效降雨 171.9 mm, 有效降雨远超过了相应阈值。

同时, 也以大埔站附近雨量较大的自动站 715123 站为例(图 10), 降水从 13 日 03 时开始, 15 日 07 时结束, 持续时间为 52 h。明显降水时段分两个, 第一个时段为 13 日 14 时至 19 时, 持续时间 6 h, 时段累计降水量为 96.5 mm, 最大小时降水量为 20.8 mm/h, 第二个降水时段为 14 日 00 时至 04 时, 持续时间 5 h, 时段累计降水量为 86.5 mm, 最大小时降水量为 28.9 mm/h。该站 3 d 有效降雨也超过了相应阈值。

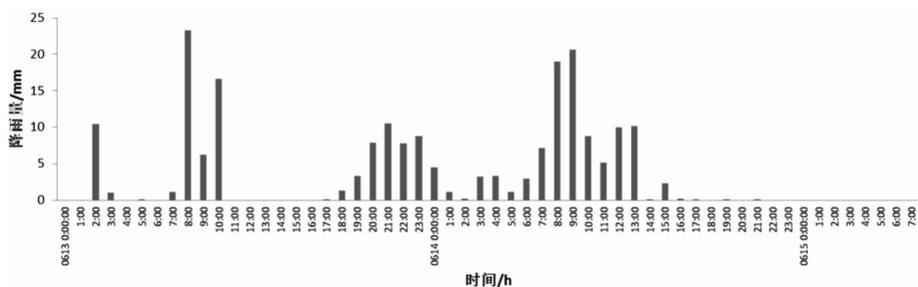


图9 大埔县自动站逐小时降水

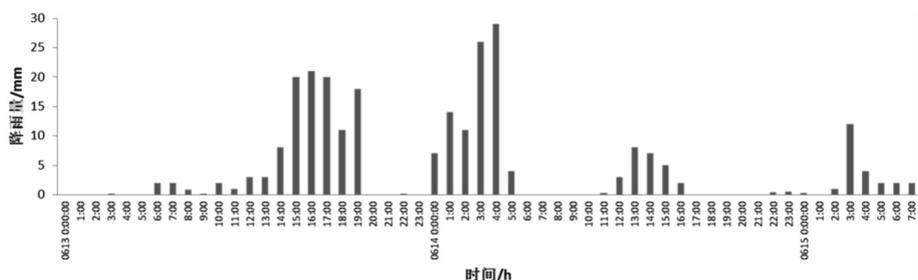


图10 715123站2017年6月13日00时至15日07时降水逐小时分布

5 结果与讨论

本文在 2016 年地质灾害时空分布特征的基础上, 分析了 2016 年地质灾害与长历时降水、短期降水的关系, 在短期降水分析基础上, 进一步研究了短时降水与短临降水对地质灾害的影响, 并对典型的群发性地质灾害的降雨过程进行总结。

2016 年 1-9 月东南地区地质灾害主要以滑坡、崩塌和泥石流为主, 占灾害总数的 99%, 其中泥石流为 62 起, 占总数 11%, 占比高于全国平均水平。8~15 h 是地质灾害发生频次最高的时段, 发生数占总数的近一半, 特别是 9~12 h, 地质灾害发生数最多。而从地质灾害发生时间的空间分布看, 夜间发生的地质灾害多发生于东南地区的北部和西部。2016 年东南地区 1-9 月的 559 条地质灾害, 384 条属于降雨型地质灾害, 339 次降雨型地质灾害由短期降雨造成, 占 88.3%。339 次短期降雨造成的地质灾害中, 29 次灾害是由短时强降雨造成(其中 26 次短时强降水分布在灾害发生前 12 h, 3 次分布在灾害发生前 12~24 h), 45 次灾害是长历时降雨造成。用最小临界雨量法确定各站点降雨造成地质灾害的降雨量阈值: 对短临降水引发的地质灾害, 当 2 h 降水大于 34.1 mm, 则灾害可能发生; 对短时降水引发的地质灾害, 当 12 h 短时降水大于 32.4 mm, 则灾害可能发生; 对短期降水引发的地质灾害, 当 3 d 有效降水大于 26.2 mm, 则灾害可能发生; 对长历时降水引发的地质灾害, 当有效降水大于 27.4 mm, 则灾害可能发生。本文总结了 2017 年降水引发的地质灾害过程, 其中广东省梅州市大埔县滑坡过程主要是 0~3 d 短期强降水超过该站降水阈值导致。

根据相关文献, 本文初步确定了降雨引发地质灾害的类型。分类方法大多采用经验分析法, 在类型分析方法上还有待进一步的客观性的、科学的分析及检验, 以寻求最佳方案。在分析区域性的地质灾害与降水关系中, 区域所处的地质地理条件严重影响着地质灾害的发生, 即使是同一东南区域, 沿海和内地、山区和浅丘等的地质地理条件仍存在很大差异, 因此在研究中, 下一步还需对下垫面的易发性进行精细化格点化处理, 结合降水因子, 全面总结地质灾害过程。2016 年的东南地区的地质灾害降水特征及灾害过程总结已初步完成, 针对我国如西南地区地质灾害易发区, 及全国其他地质灾害易发区域的分区研究工作也在进行, 各区域之间的差异比较也有待进一步梳理, 但由于灾情资料有限, 对其他年份的历史长序列的分析存在困难, 依靠现有有限的灾情资料, 对短时及短临降水引发的地质灾害关系研究及预报方法的总结是下一步的工作。

参考文献:

[1] 闵颖, 胡娟, 李超, 等. 云南省滑坡泥石流灾害预报预警模型研究[J]. 灾害学, 2013, 28(4): 216-220.
[2] 钟荫乾. 滑坡与降雨关系及其预报[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(4): 81-86.

[3] 林孝松, 郭跃. 滑坡与降雨的耦合关系研究[J]. 灾害学, 2001, 16(2): 87-92.
[4] 李德心, 何思明, 朱兴华, 等. 前期有效降雨对滑坡启动影响分析[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 41-45.
[5] 马超, 胡凯衡, 赵晋恒, 等. 震后泥石流的激发雨量特征——以汶川地震和集集地震后泥石流为例[J]. 灾害学, 2013, 28(4): 89-94.
[6] 铁永波, 周洪福, 倪化勇. 西南山区短时强降雨诱发型低频泥石流成因机制分析——以四川省宝兴县冷木沟泥石流为例[J]. 灾害学, 2013, 28(4): 110-113.
[7] 文科军, 王礼先, 谢宝元. 暴雨泥石流实时预报的研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 59-64.
[8] 谭万沛. 泥石流扇的类型与土地利用模式[J]. 地理学与国土研究, 2000, 16(1): 71-74.
[9] 吴树仁, 金逸民, 石菊松, 等. 滑坡预警判据初步研究——以三峡库区为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(4): 596-600.
[10] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1055-1060.
[11] 吴跃东, 向钊, 马玲. 安徽省地质灾害气象预警预报研究[J]. 灾害学, 2008, 23(4): 26-29.
[12] 张雅斌, 杜继稳, 蔡蕊, 等. 陕西省精细化地质灾害气象预报预警研究[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 28-34.
[13] 刘传正, 温铭生, 唐灿, 等. 地质灾害防治理论与实践[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
[14] 宋光齐, 李云贵, 钟沛林, 等. 地质灾害气象预报预警方法探讨——以四川省地质灾害气象预报预警为例[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(2): 33-36.
[15] 周玉才, 雷万荣, 余广文, 等. 江西省地质灾害一气象预警预报系统研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 69-75.
[16] 张铁军, 王锡稳, 魏文娟, 等. 甘肃省山洪地质灾害气象等级预报预警技术研究[J]. 甘肃科技, 2008, 24(16): 58-60.
[17] 唐红梅, 魏来, 唐云辉, 等. 重庆市降雨型滑坡相关分析及预报模型[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 19(4): 18-22.
[18] 陈平, 丛威青. GIS 支持下的湖南省地质灾害气象预警系统建设探讨[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, 33(5): 533-535.
[19] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1055-1060.
[20] 陈静静, 姚蓉, 文强, 等. 湖南省降雨型地质灾害致灾雨量阈值分析[J]. 灾害学, 2014, 19(4): 42-47.
[21] 郭富赞, 宋晓玲, 谢煜, 等. 甘肃地质灾害气象预警技术方法探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 128-133.
[22] GONG Qinghua, HUANG Guangqing, GUO Min, et al. Present status of research and its developmental tendency on prediction and early warning of geologic hazards[J]. World Geology, 2006, 25(3): 296-302.
[23] 蒋宗孝, 江彩英, 王加义. 闽北地质灾害与降水关系分析[J]. 世界地质, 2009, 28(1): 127-133.
[24] 李明, 杜继稳, 高维英. 陕北黄土高原区地质灾害与降水关系[J]. 干旱区研究, 2009, 26(4): 599-606.
[25] 张国平. 有效雨量和滑坡泥石流灾害概率模型[J]. 气象, 2014, 40(7): 886-890.
[26] 狄靖月, 王志, 田华, 等. 降水引发的西南地区公路损毁风险预报方法[J]. 应用气象学报, 2015, 26(3): 268-279.
[27] 中国气象局. 全国短时、临近预报业务规定(气科函 2010(21)号)[z]. 北京: 中国气象局, 2010.
[28] 矫海燕. 地质灾害气象风险预警业务服务技术指南[M]. 北京: 气象出版社, 2017: 46-47.
[29] 王一鸣, 殷坤龙, 龚新法, 等. 浙东南山区泥石流分布规律[J]. 地质灾害与环境保护, 2012, 2(23): 11-16.
[30] 中国气象局. 暴雨诱发地质灾害气象风险预警业务规范(气减函 2016(65)号)[z]. 北京: 中国气象局, 2016.
[31] 吴翠红, 张萍萍, 龙利民, 等. 峡谷地形对两次大暴雨过程的增幅作用对比分析[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(1): 38-45.
[32] 徐晶, 张国平, 张芳华, 等. 基于 Logistic 回归的区域地质灾害综合气象预警模型[J], 气象, 2007, 12(33): 3-8.