

李宇梅,杨寅,狄靖月,等,2020.全国地质灾害气象风险精细化网格预报方法及其应用[J].气象,46(10):1310-1319. Li Y M, Yang Y, Di J Y, et al, 2020. Meteorological risk assessment method of geological disaster in China and its mesh refinement application[J]. Meteor Mon, 46(10):1310-1319(in Chinese).

全国地质灾害气象风险精细化网格 预报方法及其应用^{*}

李宇梅^{1,2} 杨 寅^{1,2} 狄靖月^{1,2} 许凤雯^{1,2} 包红军^{1,2}

1 国家气象中心,北京 100081

2 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室,北京 100081

提 要: 降水是地质灾害的主要诱因。地质灾害气象风险主要是降水诱发地质灾害导致的人员伤亡、财产破坏和经济活动中断的预期损失;地质灾害气象风险度在数值上可表达为降水因子致灾概率、孕灾环境潜在危险度和易损度三者归一后数值的乘积。分析选取有效雨量代表降水致灾因子,分区建立有效雨量致灾概率拟合方程;通过下垫面环境信息量方法评价地质灾害潜在危险度;通过简易易损度模型评价地质灾害易损度,三者共同构建地质灾害气象风险预报模型和评价方法,应用精细化定量降水网格预报产品,建立地质灾害气象风险精细化网格预报试验,以地质灾害事件对照模型试验结果,表明地质灾害气象风险模型应用效果良好。

关键词: 有效雨量,地质灾害,气象风险,潜在危险度,易损度,精细化网格

中图分类号: P456, P694

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.10.005

Meteorological Risk Assessment Method of Geological Disaster in China and Its Mesh Refinement Application

LI Yumei^{1,2} YANG Yin^{1,2} DI Jingyue^{1,2} XU Fengwen^{1,2} BAO Hongjun^{1,2}

1 National Meteorological Centre, Beijing, 100081

2 CMA-HHU Joint Laboratory for Hydrometeorological Studies, Beijing 100081

Abstract: Precipitation is the main cause of geological disasters. Geological disaster meteorological risk mainly exists in casualties, property damages and the expected loss of interrupted economic activities that are caused by geological disasters. Geological disaster meteorological risk degree can be expressed as the product of disaster probability of precipitation factor times environment potential risk degree, and further times vulnerability degree in numerical data. The effective rainfall data are selected as precipitation factor, and hereby, the geological disaster probability fitting equations of effective rainfall for nine regions are established. The potential risk of geological disaster is evaluated by the information method of the underlying surface environments and the vulnerability degree is employed to a simplified assessing model, which was related to three aspects of GDP, land-use and population. Then, the geological disaster meteorological risk forecasting model is constructed. By using the products of QPE and QPF in high resolution, the mesh refinement business test of risk model is established. Compared with geological disaster records, the results are illustrated to be reliable.

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1508102)、中国气象局气象标准项目(QX/T-2018-19)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-142)、国家自然科学基金项目(41775111)和国家气象中心水文气象预报团队项目共同资助

2019 年 4 月 24 日收稿; 2020 年 8 月 3 日收修定稿

第一作者:李宇梅,从事地质灾害及水文气象预报服务和研究. E-mail: Liyum@cma.gov.cn

Key words: effective rainfall, geological disaster, meteorological risk, potential risk, vulnerability, mesh refinement

引 言

中国滑坡、崩塌和泥石流分布范围广,每年因地质灾害造成的死亡人数,约占各类自然灾害死亡人数的四分之一,并带来巨大经济损失。据中国地质环境监测院统计,2001—2015 年滑坡、崩塌和泥石流发生数量年均约为 2.4 万起,约 94% 由自然因素引起,主要为降水、地震、冰雪冻融,每年造成死亡失踪人数约为 800 人、直接经济损失达 45 亿元左右。由于降水与滑坡、崩塌和泥石流关系非常密切,众多学者开展基于降水的地质灾害潜势或概率预报方法研究(姚学祥等,2005;徐晶等,2007),中央气象台也在 2003 年启动地质灾害气象预报预警业务,对地质灾害发生可能性进行预报,及时发布地质灾害气象预警。对于降水型地质灾害而言,降水因子选取和阈值取值非常重要,当日降水、前期降水、雨强以及降水持续时间都能引发地质灾害,暴雨是 90% 滑坡、81% 崩塌和全部泥石流的主要诱发因素(李媛等,2004),当日降水量阈值已成为预报泥石流、滑坡的主要指标(崔鹏等,2000;李慧琳等,2007;李安泰等,2012;伍宇明等,2014;狄靖月等,2015)。前期降水对地质灾害的影响也不容忽视,美国学者(Jibson,2006)对 Cleveland Corral 区域同一滑坡体的两次滑坡研究表明:深层缓慢下移和变形的滑坡由月尺度持续降水入渗引发;浅层突发滑坡发生在两周明显降水的后期。意大利学者(Del Ventisette et al,2012)对 Ruinon 区域滑坡研究发现:持续几天的小雨天气($8\sim 10\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$)对滑坡的加速作用不明显,而两三天の中雨天气($10\sim 15\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$)能引起滑坡的加速位移。韩国学者(Chae and Kim,2012)分析 2003 年的台风 Maemi,发现其强降水诱发多达 1 200 次山体滑坡,日雨量最大为 410 mm,小时雨量最大为 89.5 mm。湖南省降水型地质灾害(陈静静等,2014)致灾雨量阈值研究中,按短时(12 h)、短期(1~3 d)和中长期(4~9 d)降水分析致灾雨量阈值及其对地质灾害发生的贡献率,发现大部分地质灾害由短期降水造成。中国东南地区引发地质灾害的降水(狄靖月等,2019)可分为短临(0~1 h)、短时(0~12 h)、短期(前 1~3 d)和长历时(前

4~15 d)降水型。因此降水型地质灾害模型应重点考量当日降水和前期降水成为共识,其为地质灾害气象预警提供了主流技术支撑。

近年来随着灾害管理和防灾减灾决策服务的发展,地质灾害气象风险评价越来越得到重视,服务需求更多集中在地质灾害能造成多大风险,即发生地质灾害可能会影响多少人员和造成怎样的经济损失程度。United Nations(1992)发布自然灾害风险的定义:风险是在一定区域和给定时段内,由于特定的自然灾害而引起的人们生命财产和经济活动的期望损失值,定量表达为风险度(R)=危险度(H) $\times$ 易损度(V),是个归一化无量纲函数。目前降水型地质灾害模型主要提供地质灾害危险性预报,鲜少结合承灾体易损度进行风险综合评估,缺乏基于实时降水实况动态预估地质灾害气象风险。史培军(2002)提出灾害构成三要素“灾害=孕灾环境 $\times$ 致灾因子 $\times$ 承灾体”,认为孕灾环境和致灾因子共同构成危险度,承灾体的易损性构成易损度。对地质灾害而言,其孕灾环境往往具有地形陡峭、坡度大、地质构造复杂、岩层结构松散、易风化等共性特征,通常采用潜在危险度来衡量自然地质环境中孕灾共性特征(朱良峰等,2004);地质灾害致灾因子危险度可用降水因子致灾概率来衡量,那么地质灾害危险度可以定量表达为危险度(H)=地质灾害潜在危险度 $\times$ 降水因子致灾概率,因此地质灾害气象风险度可定量表达为风险度(R)=地质灾害潜在危险度 $\times$ 降水因子致灾概率 $\times$ 易损度。

本文按地质灾害气象风险度定量表达思路,分别对构成风险度的三大部分提出其代表性因子,建立分项量化评价方法,应用高时空精度的统计数据,在全国范围构建地质灾害气象风险评价模型,并结合精细化网格 QPE 和 QPF,建立全国地质灾害气象风险精细化网格预报试验,并对风险评价效果进行检验分析。

1 地质灾害潜在危险度评价

地质灾害发生需要有一定的重力下滑和物质条件,陡峭的坡面上岩土体相对平缓坡面而言,坡体稳定性要差一些;风化、破碎的岩石和植被碎屑,松散

的土体构成地质灾害固体物质来源。山地高程高、高差明显、坡度大、地质构造复杂、断裂褶皱发育、岩层结构松散、易风化、节理发育的地质环境都是容易产生滑坡、崩塌和泥石流的有利内在条件(马力等, 2009), 降水、气温等气象因素是引发地质灾害的有利外在条件, 因此, 在建立地质灾害与降水致灾关系拟合研究中需要综合考虑区域内不同地理地质内在条件下地质灾害发生的潜在危险度评价, 较为普遍评价方法是采用下垫面环境信息量模型方法(张国平, 2014), 将大区域划分为若干个子区域, 认为子区域内的地质、地理和气候环境背景相似, 适用于分区分析地质灾害发生和降水致灾因子的关系。

在基于当日雨量地质灾害预报模型研究中(李宇梅等, 2018), 采用下垫面环境的信息量模型方法, 提取全国高程、高差、坡度、岩石类型、断层密度和植被类型 6 个地理地质环境因子, 分别计算各影响因子的信息量值, 再计算单个评价单元的总信息量值 I_i , 据此将全国划分为九大环境相异的预警分区, 分别为西北地区、东北地区、青藏高原区、黄土高原区、秦巴山区、华北地区、云贵高原区、中南地区、东南地区(图略)。

地质灾害潜在危险度取值在 0~1, 将总信息量值 I_i 通过标准化处理来表示地质灾害潜在危险度 P_h , 表征孕灾环境的地质灾害潜在危险度, 计算公式如下:

$$P_h(i) = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (1)$$

式中: $P_h(i)$ 为评价单元的潜在危险度; I_i 为单个评价单元总信息量值; $I_{\min}$, $I_{\max}$ 分别为总信息量最小、最大值。

2 降水致灾概率拟合方程

2.1 资 料

采用 1951—2010 年地质灾害历史灾情数据、国家气象站降水历史数据(1951—2007 年 08 时至次日 08 时日雨量)及国家气象信息中心发布的 10 km 分辨率的 QPE 数据集(2008 年开始发布)。地质灾害历史灾情共有 19 144 个, 均为造成人员伤亡或经济损失以及重大影响的灾难事件。对历史地质灾害数据匹配降水数据, 筛选出降水型地质灾害, 对 1951—2007 年灾情提取灾点属地的国家气象站降

水数据作为灾点降水; 对 2008—2010 年灾情插值提取 QPE 数据作为灾点降水, 去除地震造成的灾情, 剔除人为因素影响和无雨记录的灾情, 整理形成共 18 069 条地质灾害灾情样本记录, 其灾点和气象站点空间分布见图 1。地质灾害主要集中在西南和长江以南地区, 国家气象站分布较为稠密, 雨量数据代表性较好。由于灾情中经常出现同一县域、同一天发生多起地质灾害, 导致出现不少重复降水数据, 需要除重以保证样本的均衡性, 最终整理得到 12 277 条雨量样本记录参与统计拟合。

2.2 降水致灾因子分析

当日雨量和前期降水都是地质灾害重要诱发因子, 前期降水日数的取值, 取决于各地地质条件和气候条件, 目前研究选取的日数为 3~30 d 不等(章国材, 2014)。选取地质灾害灾前 16 d 逐日雨量为因子开展分析, 其中灾害当天和前 1 d 的日平均雨量为 20~22 mm, 灾前 2~15 d 逐日平均雨量为 6~10 mm。进一步因子分析发现前 16 d 逐日雨量因子相关性差, 不适用于主成分分析方法, 而聚类分析结果显示灾前逐日雨量适合归为一类合并分析, 而有效雨量能将灾害发生前逐日降水综合起来, 因此选取有效雨量作为地质灾害降水致灾因子, 参考云南蒋家沟泥石流相关研究(田冰等, 2008)和湖南古丈滑坡降水影响因子分析(沈军等, 2017), 有效雨量经验计算公式可表达为:

$$E_r = \sum_{k=0}^n 0.8^k r_k \quad (2)$$

式中: E_r 为有效雨量(单位: mm); n 为前期降雨的日数(单位: d), 取 $n=15$; 0.8 为递减系数; r_k 为地质灾害发生前 k 天降雨量, $r_0, r_1, r_2, \dots, r_n$ 分别为地质灾害发生当天、前 1 天、前 2 天、...、前 n 天逐日降水量。

2.3 有效雨量致灾概率拟合方程

按式(2)计算出所有灾点的有效雨量序列, 按九大预警分区分分为 9 组数据集, 逐区开展有效雨量百分位排序, 得到诱发地质灾害的有效雨量发生概率(频次)样本, 对其开展二次、三次方、幂函数拟合, 选取最优拟合建立有效雨量致灾概率拟合方程。以云贵高原为例详细阐述拟合过程。

云贵高原地区共提取有效雨量样本记录 4 097 条, 雨量值为 0.20~328.94 mm, 按 0.5% 间隔进行百分位排序后进行二次、三次方、幂函数拟合, 其

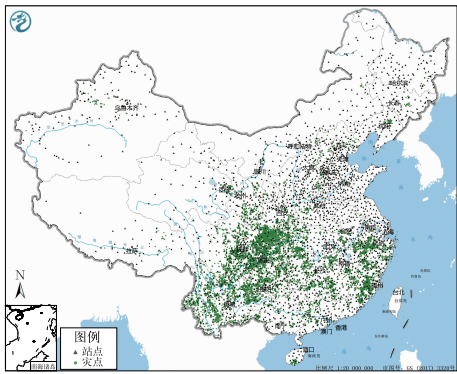


图 1 1951—2010 年地质灾害灾点和
国家气象站空间分布

Fig. 1 The distribution of geological disasters
and national weather stations in China
during 1951—2010

确定系数 R^2 分别为 0.972、0.998、0.951,三次方确定系数最大,拟合效果最好,但拟合曲线在 94%致灾概率之后出现明显波动(图 2a),与实际值偏差很大,因此选 94%为分界点进行分段拟合(分界点有效雨量值为 123.6 mm),即对 0.5%~94%、94.5%~100%序列分别进行拟合,发现前一序列二次方和三次方拟合确定系数 R^2 都为 0.999,但从拟合图 2b 上看二次方拟合在概率高值尾端拟合效果比三次方好,因此前一段拟合选二次方拟合;后一序列二次方拟合已达最佳(图 2c),拟合确定系数 R^2 为 0.927。

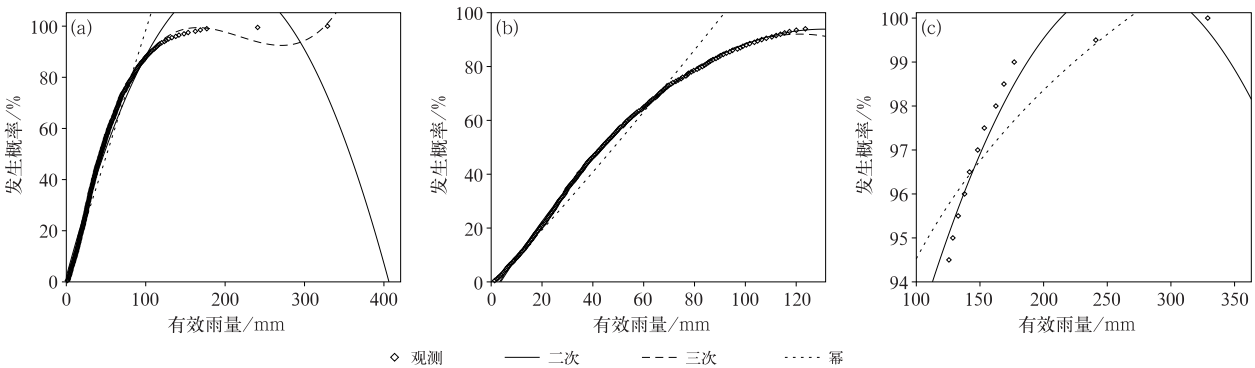


图 2 云贵高原地区有效雨量致灾概率整体曲线(a)和分段样本曲线拟合
(b)0.005~0.940,(c)0.945~1.000

Fig. 2 Three kinds of global fitting (a) and piecewise fitting (b, c) curves of disaster probability
caused by effective rainfall in Yunnan-Kweichow Plateau
(b) 0.005—0.940, (c) 0.945—1.000

因此以 16 d 有效雨量 123.6 mm 为分界值,构造云贵高原地区 2 个有效雨量致灾概率拟合方程

$$P_e = \begin{cases} -0.056 + 0.0152x - 5.797x^2 \times 10^{-5} & x \leq 123.6 \\ 0.804 + 0.0015x - 2.87x^2 \times 10^{-6} & x > 123.6 \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_e 为有效雨量诱发地质灾害的致灾概率, x 为 16 d 有效雨量(单位:mm)。

其余八大区有效雨量致灾概率分段拟合大部分是三次方拟合效果最好,其中东北地区、青藏高原地区第二部分分段二次方拟合满足最优拟合。

2.4 有效雨量致灾临界雨量

由于地质灾害潜在危险度、易损度在时空变化很小,可以作为静态的背景,而降水是逐日逐时动态变化的。因此在实际预警业务中,如果缺乏地质灾害潜在危险度和易损度,可以只考虑动态降水诱发地质灾害的可能,以有效雨量致灾概率的 20%、40%、60%、80%对应的雨量值,作为蓝、黄、橙、红色预警致灾临界雨量(表 1)。从红色预警临界雨量来看,东南地区有效雨量最大(175.7 mm),华北地区次之(138.6 mm),西北地区最小(21.7 mm),这也印证了不同地区诱发地质灾害的雨量具有明显差异性,分区进行拟合是必要的。

表 1 有效雨量诱发地质灾害的致灾临界雨量(单位:mm)

Table 1 Critical warning values of effective rainfall on geological disaster (unit: mm)

预警颜色	西北	东北	青藏高原	黄土高原	秦巴山地	华北	云贵高原	中南	东南
蓝色	1.8	10.9	11.5	5.1	18.3	10.6	19.2	16.2	23.6
黄色	4.9	25.9	19.9	12.1	40.8	26.8	34.4	34.5	54.8
橙色	11.3	47.4	30.1	20.4	73.6	57.6	53.6	66.5	99.7
红色	21.7	98.7	44.4	40.2	124.5	138.6	83.1	122.9	175.7

3 地质灾害易损度简易评价模型

区域性的易损度评价受限于资料数据的收集,往往对承灾体共性特征概化评价,难以做到单个、单类承灾体细致评价,适用对大区域建立地质灾害易损度简化评估模型(刘希林等,2011),模型应用2000年统计数据计算国内生产总值、土地利用类型和人口密度指标,采用国内生产总值表示经济易损性,土地利用类型表示环境易损性,两者共同构成财产易损性;人口密度表示生命易损性,依此构建易损度简易评价模型公式:

$$V = \sqrt{\frac{(G+L)/2+D}{2}} \quad (4)$$

式中: V 为易损度(0~1), G 为单位面积国内生产总值(单位:万元·km⁻²), L 为单位面积土地利用类型赋值, D 为人口密度(单位:人·km⁻²), G 、 L 、 D 均需归一化后取值。

本文采用2010年国内生产总值、土地利用类型和人口密度数据开展新一轮中国地质灾害易损度计算和分析。人口密度、国内生产总值和土地利用类型数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),精度为1 km×1 km 栅格。人口密度、国内生产总值数据可直接归一化处理;而土地利用类型分为城乡工矿居民用地、耕地、林地、草地、水域、未利用土地共6大类,采用赋值法实现归一化,分别赋值1.0、0.8、0.6、0.4、0.2、0.0。按式(4)计算生成全国地质灾害易损度图(图3),按0.2间隔分为5级,分别表示极低易损、低易损、较

高易损、高易损和极高易损。我国大部分区域处于低和极低易损区,主要分布在西北、青藏高原地区,占全国78.71%;在人口相对集中、主要平原种植区、经济相对较发达、社会化程度较高的区域易损度相对较高,占全国21.03%;高度易损区比例低,占全国0.256%,主要集中在人口密集、经济发达的首都经济圈、长三角和珠三角地区以及省会城市和邻近城市区;极高易损区比例极低,占全国0.003%,主要分布在东部人口稠密、富饶的沿海城市,易损度在九大分区分布比例见表2,其中西北和青藏高原地区没有极高易损区,较高和高易损比例低;华北、中南地区较高到极高的易损比例均表现突出;东北地区较高易损比例要多于低易损;东南地区高易损比例分布相对多一些,但极高易损分布比例明显低于中南地区;黄土高原地区低到高易损分布比例相当,极低和极高易损比例均很低;秦巴山地地区各级易损度分布比例相当;云贵高原地区易损度主要为低和较高易损,极高易损比例相对高一些(0.144)。

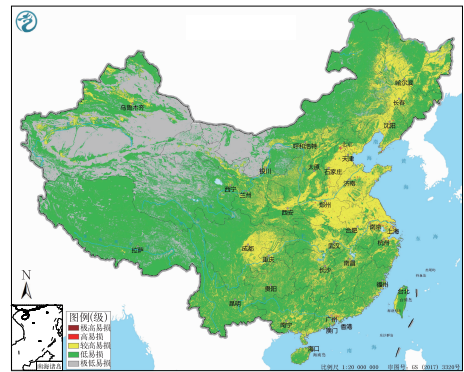


图 3 全国地质灾害易损度分布

Fig. 3 Vulnerability map of geological disaster in China

表 2 九大分区分易损度分级比例表

Table 2 The grading proportion of vulnerability degree in nine warning regions

等级	西北	东北	青藏高原	黄土高原	秦巴山地	华北	云贵高原	中南	东南
低易损	0.180	0.118	0.316	0.047	0.062	0.036	0.098	0.070	0.073
较高易损	0.079	0.182	0.006	0.084	0.115	0.248	0.073	0.136	0.078
高易损	0.040	0.086	0.001	0.055	0.088	0.318	0.034	0.192	0.185
极高易损	/	0.094	/	0.003	0.103	0.238	0.144	0.364	0.053

4 地质灾害气象风险模型和预警等级划分

综上所述,地质灾害气象风险度量化表达式可写为:

$$R = H \times V = P_e \times P_h \times V \tag{5}$$

式中: R 为地质灾害气象风险度, H 为地质灾害危险度, V 为地质灾害易损度, P_e 为有效雨量致灾概率, P_h 为地质灾害潜在危险度,均为归一化无量纲函数。

有效雨量致灾概率、地质灾害潜在危险度和地质灾害易损度均采用等间距法(0.2 间隔)分为 5 级,用 V、IV、III、II、I 级依次表示极低、低、较高、高和极高等级,则地质灾害气象风险度的分级按照三者分级的乘积值来划分,即分别表示极低、低、较高、高和很高风险。在实际地质灾害气象风险预警业务中不考虑对外发布极低地质灾害气象风险产品,结合业务习惯将地质灾害气象风险预警等级分为有一定风险(IV 级)、风险较高(III 级)、风险高(II 级)、风险很高(I 级)4 个等级,划分指标、表征颜色和含义见表 3(李宇梅等,2019)。

表 3 地质灾害气象风险预警等级划分
Table 3 Meteorological risk early warning levels of geological disaster induced by rainfall

级别	级别含义	划分指标(R)	表征颜色(RGB)
I 级	风险很高	$0.512 \leq R \leq 1$	红色(255,0,0)
II 级	风险高	$0.216 \leq R < 0.512$	橙色(255,126,0)
III 级	风险较高	$0.064 \leq R < 0.216$	黄色(255,250,0)
IV 级	有一定风险	$0.008 \leq R < 0.064$	蓝色(0,102,255)

5 地质灾害气象风险精细化网格预报试验和检验

地质灾害气象风险精细化网格预报试验构建需要为地质灾害气象风险模型匹配高分辨率的 QPE 和 QPF 产品、筛选匹配精细化网格预报点,结合高精度地质灾害潜在危险度和易损度的评价结果和业务需求开展业务试验,选取地质灾害事件检验模型能力和精细化预报效果。

5.1 高分辨率降水产品 QPE、QPF 的选取

地质灾害气象风险模型应用的 QPE 取自国家

气象信息中心研发的高分辨率多源降水观测融合产品(潘畅等,2018),该产品利用自动气象站逐时降水资料、雷达定量降水估测和卫星反演降水产品进行融合,形成中国区域 5 km 分辨率的逐时降水监测产品。地质灾害气象风险模型应用的 QPF 源于国家气象中心精细化网格主客观融合定量降水预报产品(曹勇等,2016;唐健等,2018;代刊等,2018;毕宝贵等,2016),该产品应用了多模式 QPF 集成、主客观融合降水反演、降水统计降尺度、降水时间拆分、QPF 订正和格点场后处理等技术,形成未来 7 d 逐时 5 km 分辨率的精细化网格 QPF 产品,它既能保持与预报员主观预报相同的准确率,同时降水预报的时空精细化程度明显提高。

5.2 地质灾害气象风险模型精细化网格预报点选取

地质灾害发生需要具备一定的地形地理条件,在平原地区很难发生地质灾害,沙漠、戈壁等人迹罕见的地区以及湖泊、江河等水体也不需要考虑地质灾害气象风险,因此在精细化前提下,需要按一定规则选取符合地质灾害气象风险预报特征的精细化网格预报点,达到减少模型运算和预报空报的目的。

地质灾害气象风险模型选取的 QPE、QPF 分别覆盖 $15^{\circ} \sim 55^{\circ}N$ 和 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}N$ 、经度为 $70^{\circ} \sim 140^{\circ}E$ 的区域,在中国区域内网格点位置一致。首先提取出中国区域 QPE 产品的网格点位置作为初始网格预报点,共有 417 565 个,通过 ArcGIS 去除中国边境线外的预报点,得到中国境内的网格预报点。其次,去除极不易发的网格预报点,即根据潜在危险度去除极低危险的网格预报点,最后根据土地类型去除平原旱地、平原水田、河渠、湖泊、水库坑塘、滩地、水体、沙漠、戈壁、沙地网格点,最终得到 241 534 个精细化网格预报点,较初始网格点减少近 42.2%。

5.3 模型能力和应用效果

5.3.1 模型能力

选取 2015 年全国 4—10 月共 172 个造成人员伤亡或经济损失的地质灾害案例作为检验样本开展分析,灾点在九大预警分区中都有分布,大多集中在云贵高原和中南地区,分别计算灾点有效雨量致灾概率、潜在危险度、危险度、易损度和风险度。灾点的潜在危险度为 0.2~1.0、易损度为 0.22~0.79。检验分析按只考虑有效雨量致灾概率、考虑有效雨

量和潜在危险度的危险度以及综合考虑有效雨量、潜在危险度和易损度的风险度指标三种情形,进行预警级别统计,预警效果见表 4。

检验结果表明应用地质灾害气象风险度指标预警漏报最低,只有 2 次漏报,黄色以上($\geq$ Ⅲ级)预警比例最高,达到 83.7%,预警效果最好;单一考虑有效雨量指标预警分级时,漏报次数较多,约有 11.6% 样本漏报,黄色以上($\geq$ Ⅲ级)预警比例最低(74.4%),但橙色以上($\geq$ Ⅱ级)和红色预警比例最高;综合考虑有效雨量和地质灾害潜在危险度的危

险度预警漏报比例和黄色以上($\geq$ Ⅲ级)预警比例在三者间是居中水平,因此若只考虑有效雨量发布地质灾害预警时,会导致一定程度的漏报,且橙色和红色预警次数较多,预警比例分别为 30.8%、26.2%,红色预警次数较多可能会导致防范地质灾害工作量增加,而综合考虑危险度和易损度的风险度指标发布地质灾害预警时,漏报很少,且橙色和红色预警比例分别为 36.6%、1.2%,较符合实际地质灾害防范情况,证明地质灾害气象风险模型具备良好预报能力。

表 4 2015 年 172 个地灾样本地质灾害气象风险度指标预警检验

Table 4 Verification of meteorological risk model about 172 geological disasters in 2015

名称	预警级别	无预警	蓝色 (Ⅳ级)	黄色 (Ⅲ级)	橙色 (Ⅱ级)	红色 (Ⅰ级)	蓝色以上 ($\geq$ Ⅳ级)	黄色以上 ($\geq$ Ⅲ级)	橙色以上 ($\geq$ Ⅱ级)
有效雨量 致灾概率	次数	20	24	30	53	45	152	128	98
	比例/%	11.6	14.0	17.4	30.8	26.2	88.4	74.4	57.0
危险度	次数	7	26	53	68	18	165	139	86
	比例/%	4.1	15.1	30.8	39.5	10.5	95.9	80.8	50.0
风险度	次数	2	26	79	63	2	170	144	65
	比例/%	1.2	15.1	45.9	36.6	1.2	98.8	83.7	37.8

5.3.2 精细化网格产品应用效果

为了更好验证模型精细化产品应用效果,选取时空密集的地质灾害过程来检验分析模型预报情况。2016 年 6 月 30 日 20 时至 7 月 1 日 20 时,重庆、湖北、河南、安徽、江苏等地自西向东出现强降水过程,重庆东部、湖北西南部和中东部、河南南部、安徽中部部分地区有大暴雨,局地特大暴雨。强降水导致多地地质灾害频发,7 月 1 日在上述地区共发生 317 起地质灾害。研究选取 7 月 1 日 09—10 时发生的 41 起地质灾害事件来检验地质灾害气象风险模型应用效果,其中:湖北地区共发生 38 起地质灾害,主要集中在荆门、黄冈、恩施、随州、武汉和孝感地区,余下 3 起出现在河南信阳;灾害类型主要为滑坡灾害(35 起),另外有少量崩塌(5 起)和泥石流(1 起),主要影响居民家庭财产和公路交通设施,造成 1 人死亡,直接经济损失达 355.6 万元,受灾总人数为 767 人,灾情等级均为小型地质灾害类型。

对比 2016 年 6 月 30 日 20 时起报的 24 h QPF 和 6 月 30 日 20 时至 7 月 1 日 20 时 QPE 实况发现,QPF 预报的主雨带(>100 mm 区域)与实况分布比较一致,较实况略偏北,QPF 大暴雨 TS 评分达到 0.22,远高于 EC 大暴雨 TS 评分(0.13);QPF 预报和 QPE 实况强降水中心基本一致,但 QPF 预报

范围和极值较实况明显偏小,特大暴雨预报区位于湖北孝感北部和河南信阳南部,预报最大值为 262 mm,而实况特大暴雨区位于湖北武汉北部、孝感北部、黄冈北部,河南信阳南部,安徽六安南部等地,其中孝感出现最大降水达 595 mm。

取 7 月 1 日 10 时前 16 d 的逐时 QPE 计算有效雨量,应用地质灾害气象风险模型,计算出 7 月 1 日 10 时有效雨量致灾概率、危险度和风险度产品(图 4),结果显示在有效雨量 ≥ 50 mm 的区域(图 4a),有效雨量致灾概率普遍 $\geq 60\%$ (图 4b),为Ⅱ至Ⅰ级;在有效雨量 ≥ 100 mm 的区域,有效雨量致灾概率基本 $\geq 80\%$ (Ⅰ级),危险度(图 4c)也基本为橙色(Ⅱ级),风险度(图 4d)基本为黄色(Ⅲ级),橙色区零星分布,灾点全部都在黄色或橙色风险预警区内。表 5 为灾点风险模型预警检验表,结果显示灾点有效雨量致灾概率均达到红色预警(Ⅰ级)其中致灾概率最低为 81.6%,且 78%灾点致灾概率均大于 90%;危险度均为黄色、橙色预警(Ⅲ级、Ⅱ级),其中橙色预警比例达 95.1%;风险度预警与危险度相比,黄色预警次数多,橙色预警次数少,橙色预警比例为 56.1%。对比灾点分布,致灾概率和危险度高等级预警空报较多,而风险度高等级空报较少(图 4d),能较好地降低高等级风险空报率。

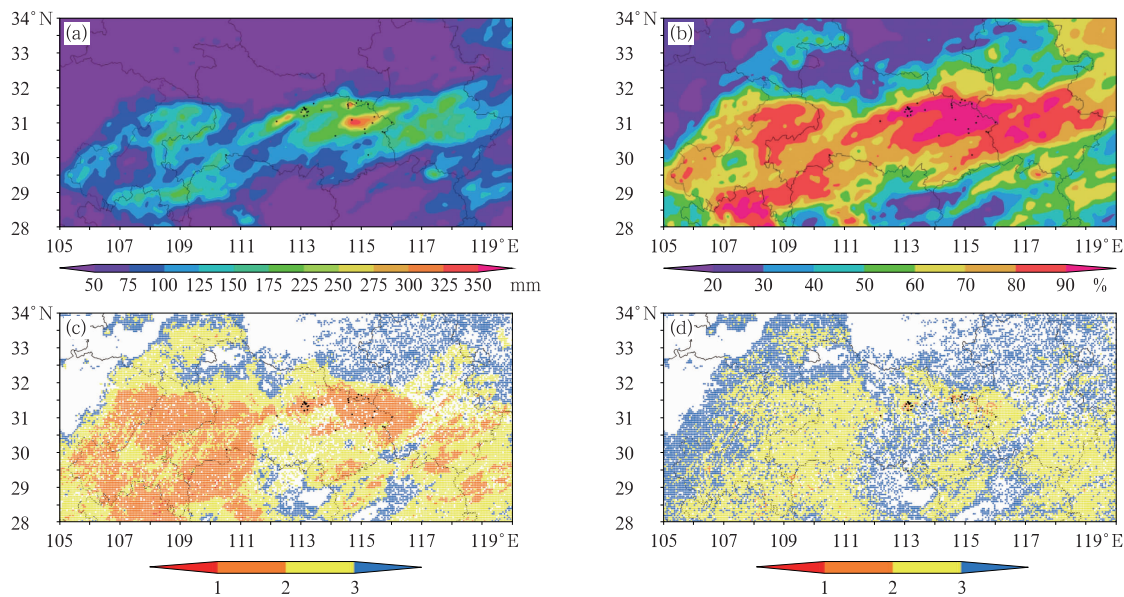


图 4 2016 年 7 月 1 日 10 时有效雨量和地质灾害气象风险产品

(黑点为灾点)

(a)有效雨量(≥ 50 mm), (b)有效雨量致灾概率, (c)地质灾害危险度, (d)地质灾害风险度

Fig. 4 Effective rainfall and the results of geological disaster meteorological risk for 10:00 BT 1 July 2016

(Black points represent geological disasters)

(a) effective rainfall (≥ 50 mm), (b) effective rainfall disaster probability,

(c) danger degree of geological disaster, (d) risk degree of geological disaster

表 5 地质灾害气象风险模型预警检验

Table 5 The verification of geological disaster meteorological risk model

名称	预警级别	黄色(Ⅲ级)	橙色(Ⅱ级)	红色(Ⅰ级)
致灾概率	次数	0	0	41
	比例/%	0.0	0.0	100.0
危险度	次数	2	39	0
	比例/%	4.9	95.1	0.0
风险度	次数	18	23	0
	比例/%	43.9	56.1	0.0

灾点均发生在地质灾害潜在危险度较高到高的地区、易损度为低易损和较高易损地区,因此很高有效雨量致灾概率最终导致产生较高至高地质灾害气象风险事件,预报 56.1 %灾点发生地质灾害气象风险高,没有红色地质灾害气象风险预警,与灾损统计情况比较贴切。

总体而言,地质灾害气象风险模型能够捕捉到较密集的地质灾害事件,有效雨量致灾概率和危险度对降水诱发的地质灾害具有很好的预判,风险度也较好地预判了高危地质灾害事件是否带来高风险影响。

6 结论和讨论

相对汛期频繁出现的区域性、连续性、灾害性暴雨天气事件而言,降水诱发的地质灾害是零散的、不连续和偶发的,高致灾概率的降水事件不一定导致地质灾害发生,即使发生地质灾害也不一定带来高经济损失和影响人员安全,即高风险地质灾害事件。本文提出地质灾害气象风险度=地质灾害潜在危险度×有效雨量致灾概率×易损度,采用信息量方法客观评价地质灾害潜在危险度;采用有效雨量作为致灾因子,用二次、三次方、幂函数分区拟合灾点有效雨量百分位分布,分段建立致灾概率拟合方程,其中大部分分区三次方拟合效果最佳,个别分区为二次方拟合;参考易损度简易评价模型,选取国内生产总值、土地利用类型和人口密度指标客观评价地质灾害易损度,最终建立地质灾害气象风险评价指标和模型。如何精细化开展地质灾害气象风险评价是现代天气风险预报服务一个重要需求,将地质灾害气象风险模型与高精度 QPE、QPF 结合起来,发挥各自优势,建立全国地质灾害气象风险精细化网格

预报试验,精细化程度和预见期大大提高,预报产品经检验分析表明,地质灾害气象风险指标划分合理、模型预报准确率高,既增加捕捉密集降水型地质灾害事件的能力,又考虑环境、经济和生命易损性,能客观评价可能发生的地质灾害事件造成的人员伤亡、财产破坏和经济活动中断的预期损失程度,较好地预判了高危地质灾害事件是否带来高风险影响,应用效果较为符合实际,可为国家地质灾害气象风险精细化预报服务提供有力支撑。

地质灾害气象风险模型中三个主要对象,即致灾因子危险性、孕灾环境潜在危险性和承灾体易损性,其评价方法和指标都存在改进的空间和多样化选择,特别是易损性评价对象概化性强,具化性弱,适用于国家级和省级区域预警,不适用于单点地质灾害事件,对此类事件易损性评价还需要增加承灾体种类,如房屋、道路、工厂、基础设施、居民、农田等,分类建立易损性评价方法,能够提供诸如地质灾害的人口伤亡风险、经济损失风险评价;致灾因子可根据区域特点选择,不仅限于有效雨量,可多因素形成综合因子分析,文中有效雨量采用固定衰变系数的统计计算公式来衡量当前和前期降水入渗土壤的情况,没有考虑不同土壤类型和壤中流的变化,未来需要结合气象水文耦合模型有效雨量研究,更准确和客观地模拟有效雨量;孕灾环境的潜在危险性以实地高精度地质调查为最佳,在缺乏实地地质调查的情况下,改进潜在危险性评价的方向集中于选取更多一些的地理地质因子和评价方法,赋予因子不同权重,改进孕灾环境危险性评价。

参考文献

- 毕宝贵,代刊,王毅,等,2016. 定量降水预报技术进展[J]. 应用气象学报,27(5):534-549. Bi B G, Dai K, Wang Y, et al, 2016. Advances in techniques of quantitative precipitation forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5):534-549(in Chinese).
- 曹勇,刘凑华,宗志平,等,2016. 国家级格点化定量降水预报系统[J]. 气象,42(12):1476-1482. Cao Y, Liu C H, Zong Z P, et al, 2016. State-level gridded quantitative precipitation forecasting system[J]. Meteor Mon, 42(12):1476-1482(in Chinese).
- 陈静静,姚蓉,文强,等,2014. 湖南省降雨型地质灾害致灾雨量阈值分析[J]. 灾害学,29(2):42-47. Chen J J, Yao R, Wen Q, et al, 2014. Hazard rainfall threshold analysis of rainfall-induced geological disasters in Hunan Province[J]. J Catastrophol, 29(2):42-47(in Chinese).
- 崔鹏,刘世建,谭万沛,2000. 中国泥石流监测预报研究现状与展望[J]. 自然灾害学报,9(2):10-15. Cui P, Liu S J, Tan W P, 2000. Progress of debris flow forecast in China[J]. J Nat Dis, 9(2):10-15(in Chinese).
- 代刊,朱跃建,毕宝贵,2018. 集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述[J]. 气象学报,76(4):493-510. Dai K, Zhu Y J, Bi B G, 2018. The review of statistical post-process technologies for quantitative precipitation forecast of ensemble prediction system[J]. Acta Meteor Sin, 76(4):493-510(in Chinese).
- 狄靖月,王志,田华,等,2015. 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,26(3):268-279. Di J Y, Wang Z, Tian H, et al, 2015. A risk forecast method for Southwest road damages based on precipitation[J]. J Appl Meteor Sci, 26(3):268-279(in Chinese).
- 狄靖月,许风雯,李宇梅,等,2019. 东南地区引发地质灾害降水分型及阈值分析[J]. 灾害学,34(1):62-67, 93. Di J Y, Xu F W, Li Y M, et al, 2019. Precipitation type and threshold analysis of geological disasters in Southeast[J]. J Catastrophol, 34(1):62-67, 93(in Chinese).
- 李安泰,何宏让,张云,2012. WRF 模式对舟曲“0808”特大泥石流暴雨的数值模拟[J]. 气象与环境学报,28(2):54-59. Li A T, He H R, Zhang Y, 2012. Numerical simulation on “0808” severe rainstorm caused by debris flow disaster based on WRF model in Zhouqu County, China[J]. J Meteor Environ, 28(2):54-59(in Chinese).
- 李慧琳,宫焕盛,韩卫东,2007. 丹东地区地质灾害气象预警系统[J]. 气象与环境学报,23(1):12-16. Li H L, Gong H S, Han W D, 2007. Research on meteorological early-warning system of geologic disaster in Dandong Area[J]. J Meteor Environ, 23(1):12-16(in Chinese).
- 李宇梅,狄靖月,许风雯,等,2018. 基于当日临界雨量的国家级地质灾害风险预警方法[J]. 气象科技进展,8(3):77-83. Li Y M, Di J Y, Xu F W, et al, 2018. A risk warning method based on the intraday critical precipitation for national geological disaster[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(3):77-83(in Chinese).
- 李宇梅,许风雯,狄靖月,等,2019. 暴雨诱发的地质灾害气象风险预警等级:QX/T 487-2019[S]. 北京:气象出版社. Li Y M, Xu F W, Di J Y, et al, 2019. Meteorological risk early warning levels of geological disaster induced by torrential rain: QX/T 487-2019[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 李媛,孟晖,董颖,等,2004. 中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,15(2):29-34. Li Y, Meng H, Dong Y, et al, 2004. Main types and characteristics of geo-hazard in China—based on the results of geo-hazard survey in 290 counties[J]. Chin J Geol Hazard Control, 15(2):29-34(in Chinese).
- 刘希林,余承君,尚志海,2011. 中国泥石流滑坡灾害风险制图与空间格局研究[J]. 应用基础与工程科学学报,19(5):721-731. Liu X L, Yu C J, Shang Z H, 2011. Risk mapping and spatial pattern of debris flow and landslide hazards in China[J]. J Basic Sci Eng, 19(5):721-731(in Chinese).
- 马力,崔鹏,周国兵,等,2009. 地质气象灾害[M]. 北京:气象出版社:29-40. Ma L, Cui P, Zhou G B, et al, 2009. Geological Disasters

- Induced by Meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press; 29-40 (in Chinese).
- 潘旸, 谷军霞, 宇婧婧, 等, 2018. 中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验[J]. 气象学报, 76(5): 755-766. Pan Y, Gu J X, Yu J J, et al, 2018. Test of merging methods for multi-source observed precipitation products at high resolution over China [J]. Acta Meteor Sin, 76(5): 755-766 (in Chinese).
- 沈军, 方琼, 吴贤云, 等, 2017. 湖南古丈山体滑坡影响因子分析[J]. 气象, 43(11): 1410-1419. Shen J, Fang Q, Wu X Y, et al, 2017. Analysis of impact factor of landslide in Guzhang County of Hunan Province [J]. Meteor Mon, 43(11): 1410-1419 (in Chinese).
- 史培军, 2002. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 11(3): 1-9. Shi P J, 2002. Theory on disaster science and disaster dynamics [J]. J Nat Dis, 11(3): 1-9 (in Chinese).
- 田冰, 王裕宜, 洪勇, 2008. 泥石流预报中前期降水量与始发日降水量的权重关系——以云南省蒋家沟为例[J]. 水土保持通报, 28(2): 71-75. Tian B, Wang Y Y, Hong Y, 2008. Weighted relation between antecedent rainfall and process precipitation in debris flow prediction—a case study of Jiangjia gully in Yunnan Province [J]. Bull Soil Water Conser, 28(2): 71-75 (in Chinese).
- 唐健, 代刊, 宗志平, 等, 2018. 主客观融合定量降水预报方法及平台实现[J]. 气象, 44(8): 1020-1032. Tang J, Dai K, Zong Z P, et al, 2018. Methods and platform realization of the national QPF master blender [J]. Meteor Mon, 44(8): 1020-1032 (in Chinese).
- 伍宇明, 兰恒星, 高星, 等, 2014. 台风暴雨型滑坡降雨阈值曲线研究——以福建地区为例[J]. 工程地质学报, 22(2): 255-262. Wu Y M, Lan H X, Gao X, et al, 2014. Rainfall threshold of storm-induced landslides in typhoon areas: a case study of Fujian Province [J]. J Eng Geol, 22(2): 255-262 (in Chinese).
- 徐晶, 张国平, 张芳华, 等, 2007. 基于 Logistic 回归的区域地质灾害综合气象预警模型[J]. 气象, 33(12): 3-8. Xu J, Zhang G P, Zhang F H, et al, 2007. Regional integrated meteorological forecasting and warning model for geological hazards based on logistic regression [J]. Meteor Mon, 33(12): 3-8 (in Chinese).
- 姚学祥, 徐晶, 薛建军, 等, 2005. 基于降水量的全国地质灾害潜势预报模式[J]. 中国地质灾害与防治学报, 16(4): 97-102, 129. Yao X X, Xu J, Xue J J, et al, 2005. A potential forecast model for geological-related disasters based on precipitation [J]. Chin J Geol Hazard Control, 16(4): 97-102, 129 (in Chinese).
- 章国材, 2014. 自然灾害风险评估与区划原理和方法[M]. 北京: 气象出版社: 56-60. Zhang G C, 2014. Principles and Methods of Natural Disaster Risk Assessment and Zoning [M]. Beijing: China Meteorological Press: 56-60 (in Chinese).
- 张国平, 2014. 有效雨量和滑坡泥石流灾害概率模型[J]. 气象, 40(7): 886-890. Zhang G P, 2014. Study on the relation between effective precipitation and landslide/debris-flow with probabilistic model [J]. Meteor Mon, 40(7): 886-890 (in Chinese).
- 朱良峰, 吴信才, 殷坤龙, 等, 2004. 基于信息量模型的中国滑坡灾害风险区划研究[J]. 地球科学与环境学报, 26(3): 52-56. Zhu L F, Wu X C, Yin K L, et al, 2004. Risk zonation of landslide in China based on information content model [J]. J Earth Sci Environ, 26(3): 52-56 (in Chinese).
- Chae B G, Kim M I, 2012. Suggestion of a method for landslide early warning using the change in the volumetric water content gradient due to rainfall infiltration [J]. Environ Earth Sci, 66(7): 1973-1986.
- Del Ventisette C, Casagli N, Fortuny-Guasch J, et al, 2012. Ruinon landslide (Valfurva, Italy) activity in relation to rainfall by means of GBInSAR monitoring [J]. Landslides, 9(4): 497-509.
- Jibson R W, 2006. The 2005 La Conchita, California, landslide [J]. Landslides, 3(1): 73-78.
- United Nations, 1992. Internationally Agreed Glossary of Basic Terms Related to Disaster Management [M]. Geneva: United Nations Department of Humanitarian Affairs.