

胡娟, 闵颖, 李华宏, 等. 云南省地质灾害精细化气象风险预警模型优化研究[J]. 灾害学, 2016, 31(4): 110–115. [HU Juan, MIN Ying, LI Huahong, et al. Improvement on the Meteorological Forewarning Index of Geologic Hazard in Yunnan Province [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(4): 110–115. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.04.019.]

云南省地质灾害精细化气象风险 预警模型优化研究^{*}

胡娟, 闵颖, 李华宏, 许迎杰, 李超, 李湘

(云南省气象台, 云南昆明 650034)

摘要:以怒江州为例, 采用区域加密自动气象站降水资料优化云南省目前业务应用的地质灾害气象风险预警模型, 并根据灾情点的地理信息对地质灾害风险区划进行了更新。研究表明, 怒江州降水型地质灾害以连续性降水导致的灾害为主, 受到短期强降水的激发, 并且地质灾害区域性分布明显。用2015年地质灾害实例对优化后的预警模型的预报效果进行检验, 发现优化后的预警模型能有效降低原预警模型中高风险预警等级的空报率, 提高风险预警的空间分辨率, 使得预警服务效果更具备针对性。

关键词: 地质灾害; 预警指标; 模型优化; 对比检验

中图分类号: X43; P694; P4; S42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2016)04-0110-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.04.019

地质灾害是多种因素相互作用的结果, 其诱发因子多且成因复杂。降水虽然不是造成地质灾害的唯一因素, 却是最重要的因素之一。全国地质灾害调查结果表明 81% 的崩塌、90% 的滑坡以及全部的泥石流都由降水引发^[1]。已有众多学者针对降水与滑坡、泥石流间的关系做过分析^[2-5], 指出地质灾害的时空分布特征与降水的空间分布及时间周期具有较高相关性。因此, 依循降水与地质灾害的密切关系, 开展地质灾害发生可能性气象预警方法研究具有可行性和科学性。近年来, 国内外对降水诱发地质灾害的物理机制、预报预警方法等进行了大量研究^[6-12], 取得了显著进展。云南省也根据本省的实际情况, 建立了地质灾害气象风险预警模型并应用于日常业务中, 取得了较好的服务效果^[13]。目前运行的预警模型使用的是全省 125 个国家级地面气象观测站的降水资料, 该资料虽然具有较高的时间分辨率, 但是空间分辨率较低, 对于云南省极为复杂的地理环境背景和天气气候特征而言, 降水指标过于粗泛、部分地区的临界雨量量级过低, 导致漏报率虽低但空报率偏高。因此本研究以怒江州为例, 采用区域加密自动气象站的数据研究精细化的气象风险预

警指标。以优化怒江州地质灾害气象风险预警模型为基础, 开展全省地质灾害气象风险预警模型改进工作, 提升云南省地质灾害气象风险预报预警服务能力。

怒江州位于云南省西北部, 地处横断山脉峡谷地带, 地势北高南低, 南北纵距远大于东西境宽, 是典型的高山峡谷区。怒江州 98% 以上的国土面积是高山峡谷, 76% 以上的国土面积是 25° 以上的坡地, 地质结构错综复杂。境内地质灾害频发, 经统计共有 762 个滑坡、泥石流点^[14]。研究表明突发性、区域性泥石流是怒江流域泥石流灾害的典型特征, 此类灾害大多由一次强降雨过程诱发^[15]。郭荣芬等^[16]针对 2014 年 5 月 10 日怒江州福贡县的泥石流进行分析, 指出此次灾害由连续性降水及短时间暴雨所引发。统计 2010–2014 年怒江州降水型地质灾害的种类和灾害级别(样本数为 42 例), 66.67% 的灾害为泥石流, 23.81% 为滑坡, 崩塌以及同时发生滑坡泥石流灾害的样本仅为 9.52%。在上述灾情中, 不区分灾害类型, 则小型灾害占比为 66.67%, 21.43% 为中型灾害, 大型及特大型灾害占 11.9%。表明怒江州降水型地质灾害以泥石流为主, 小型灾害多, 但大中型

^{*} 收稿日期: 2016-04-06 修回日期: 2016-05-20

基金项目: 云南省科技惠民计划项目“云南怒江流域精细化地质灾害气象预警系统研究及示范”(2013CA014); 中国气象局气象关键技术集成与应用面上项目“云南省山洪地质灾害精细化气象预报预警业务系统研究”(CMAGJ2014M44); 云南省气象局预报员技术开发专项项目“云南省滑坡泥石流灾害预报预警模型精细化研究”(YB201301)

第一作者简介: 胡娟(1982-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事天气预报分析、统计气象、地质灾害气象风险预警分析等工作。

E-mail: joanne8216@163.com

地质灾害也比较频繁。因此加强怒江州降水型地质灾害的机理研究和精细化气象风险预报预警指标研究, 为地质灾害防御工作提供科研支撑具有重大意义。

1 资料和方法

本研究使用怒江州 82 个区域加密自动气象站 (简称区域站) 2010 – 2014 年逐日降水资料以及 4 个国家级地面气象观测站 (简称国家站) 1961 – 2014 年逐日降水资料, 降水累积时段为前日 08:00 至当日 08:00。

根据云南省地质环境监测院提供的地质灾害报告和云南省气象台收集的滑坡、泥石流灾情, 整理出 2010 – 2014 年的怒江州地质灾害灾情样本 63 个, 剔除非降水触发的灾害个例后得到降水型地质灾害样本 46 个。

根据前期的研究成果, 本研究运用日综合雨量和最佳有效降水系数的计算公式^[17] 计算各样本的特征降水量, 并采用主成分分析方法挑选最佳降水因子。

日综合雨量:

$$R_{\text{日综}} = R_0 + R_1 + R_2 + \sum_{i=3}^n \alpha^{i-2} R_i \quad (1)$$

式中: α 的取值范围为 (0, 1); R_0 、 R_1 、 R_2 分别表示灾情发生当日、灾情发生前 1 d 和前 2 d 的逐日 24 h 累积降水量; R_i 为前 3 d 至第 n 日内的逐日降水量。

最佳有效降水系数:

$$\alpha = \min\left(\frac{\alpha}{\max(R_{\text{日综}})}\right) \quad (2)$$

式中: 根据式(1)计算某站的日综合雨量 $R_{\text{日综}}$, 该站日综合雨量的均方差用 σ 表示, 则最佳有效降水系数 α 是 σ 与 $R_{\text{日综}}$ 最大值的比值的最小值。

2 结果分析

2.1 怒江州降水与地质灾害特征分析

2.1.1 降水气候特征

将 63 个灾情点与怒江州地质灾害风险区划及地形相叠加 (图 1), 发现无论是降水触发的地质灾害还是人工影响等因素导致的灾情基本都分布在怒江流域和澜沧江流域两岸, 其次是兰坪县的金

顶镇辖区内。灾情发生地集中, 具有区域性分布特征, 并且灾情点主要分布在地质灾害高风险区 (图 1 中易发程度一级区划)。表明高山峡谷深切割的地貌是造成怒江州地质灾害多发的重要内因。

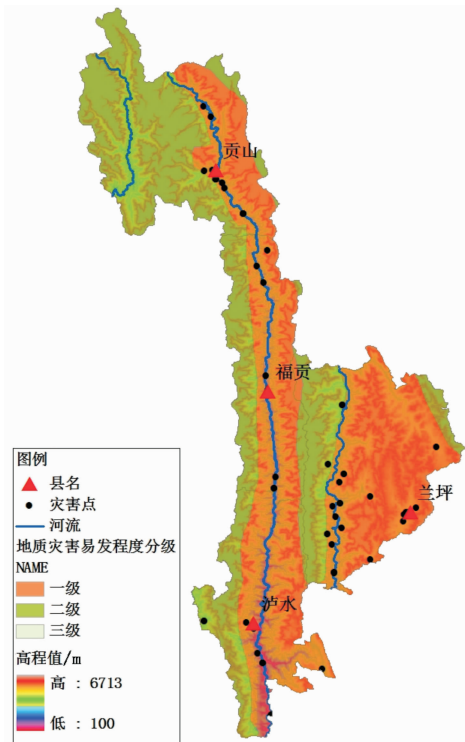


图 1 灾情点分布综合图

使用 1961 – 2014 年贡山站、福贡站、六库站、兰坪站 4 个国家站的逐日降水资料, 分析怒江州四个县降水的气候特征。降水的时间分布显示, 11 月至次年 5 月为兰坪和泸水的干季, 这一时期的月平均雨量为 31.8 mm; 6 – 10 月为雨季, 月平均降水量为 151.1 mm。11 月至次年 1 月是贡山和福贡的干季, 月平均雨量为 41.6 mm。贡山表现出显著的双雨季特征, 2 – 4 月是第一个降水波峰, 即怒江北部的“桃花汛”, 月平均雨量为 184.1 mm, 5 月雨量有所回落, 6 月为第二个降水峰值。福贡在 2 – 4 月的“桃花汛”期间, 月平均雨量为 189.7 mm, 进入 5 月, 降水量快速滑落, 但 5 – 10 月各月的多年平均降水量都维持在 100 ~ 130 mm, 因此福贡的雨季可视为从 2 月开始, 峰值出现在 3 – 4 月, 进入 11 月结束。

2.1.2 诱发地质灾害的主要降水影响因素

分别统计怒江州四个县 1 – 12 月降水型地质灾害的样本数, 结果见表 1。由表 1 可见, 贡山县

表 1 怒江州各月地质灾害次数统计表

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
贡山	0	0	1	3	2	1	2	2	0	2	0	0
福贡	0	0	0	1	1	0	3	3	0	0	0	0
兰坪	0	0	0	0	0	1	5	6	3	0	0	0
泸水	0	0	0	0	0	0	4	2	3	1	0	0

内的地质灾害主要出现在4月,福贡、兰坪、泸水的地质灾害主要出现在7~9月,尤其8月兰坪县发生地质灾害的频率最高。与四个县多年月平均降水比较分析,地质灾害频繁出现于降水丰沛、土壤湿度大的时期。如贡山在干季后,经过2月、3月的降水累积,土壤湿度条件明显改善,抗剪能力减弱、稳定度降低,而4月的降水依然较大,地质灾害发生的频率显著上升。

初步分析46个样本的降水特征,发现灾害当天降水 $R_{1d} \geq 25$ mm的个例占总样本的39.1%, $R_{1d} \geq 50$ mm的个例占13%。灾害发生当天与灾害发生前2 d累积降水 $R_{3d} \geq 50$ mm的个例占41.3%, $R_{3d} \geq 100$ mm的个例占10.9%。灾害发生当天与灾害发生前10 d的累积降水 $R_{11d} \geq 100$ mm的个例占总样本的45.7%。说明诱发怒江州地质灾害的累积降水量较大,短时期内的激发雨强较强。

笔者在前期工作中分析了诱发云南省地质灾害的有效降水天数、最佳有效降水系数^[17]。本研究采用区域站的降水资料分析怒江州降水型地质灾害的有效降水累积时段,分析方法同文献^[18],结果见图2。图2显示,在10~11 d有一个灾害样本大值中心,累积降水量在90~100 mm左右。另外,在2~3 d累积降水量在20~30 mm附近有另一样本大值区。因此,怒江州地质灾害与短期3 d内的累积降水量及0~11 d的累积降水量有密切关系。计算日综合雨量时有效降水累积时段为11 d,其中当天及前2 d的降水不进行衰减。

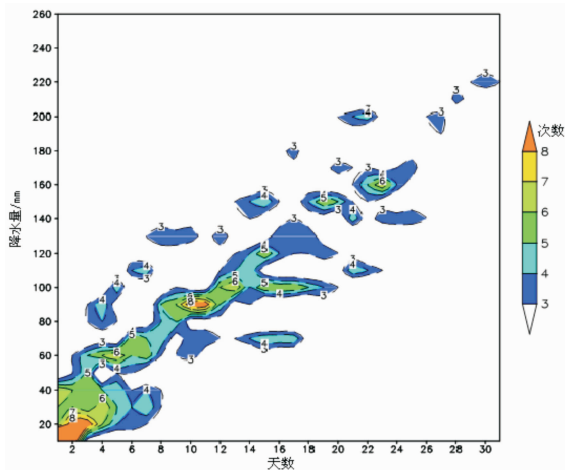


图2 怒江州地质灾害样本前期滑动累积降水量分布

通过最佳有效降水系数计算公式得到怒江州的有效降水系数 $\alpha = 0.1$,表明降水的衰减程度很大,需分析诱发地质灾害的主要降水因素在于哪些方面。本研究通过主成分分析方法挑选最佳影响因子,将诱发一次地质灾害的降水看成由以下几部分构成:当次灾害的日综合雨量、强降水日数、连续降水日数。

日综合雨量由灾害当天降水量 R_0 和前期有效

雨量 R_E 组成,前期有效雨量:

$$R_E = R_1 + R_2 + \sum_{i=3}^n \alpha^{i-2} R_i \quad (3)$$

即灾害发生日前1 d至前10 d的累积降水量,自第3 d起降水经过衰减。

本研究的强降水指日降水量 $R_{24h} \geq 25$ mm的降水。强降水日数分两种情况,一种统计灾害发生前10 d内的强降水日数,表示为 H_p (灾害发生当天出现强降水不计入统计);另一种统计灾害发生当天及前2 d内的强降水日数,表示为 H_{p3d} 。

连续降水日数的选取:分析怒江州多年逐月日平均降水量,发现3~9月的日平均降水量在4~6 mm之间,因此本研究以日降水量 $R_{24h} \geq 5$ mm为标准,从灾害发生前1 d起,统计连续出现 $R_{24h} \geq 5$ mm的天数,最后得到46个例的连续降水日数样本 C_p 。

采用主成分分析方法对 R_0 、 R_E 、 R_{3d} (灾害当天及前2 d累积降水量)、 H_p 、 H_{p3d} 、 C_p 六个因子进行讨论,判定对地质灾害有显著影响的降水因子。

经过计算发现第1和第2主成分的累计方差贡献率超过80%,在第1主成分中, H_{p3d} 的贡献率大于 H_p 的贡献率。比较各样本中 H_{p3d} 和 H_p 的分布,强降水基本都集中在灾害当天和前2天的降水过程中,因此剔除 H_p 重组矩阵再次进行主成分分析。二次计算表明,第1主成分的贡献率为65.4%,第2主成分的贡献率为21.4%,累计方差贡献率达86.8%。第1主成分各因子的特征向量显示, R_{3d} 和 H_{p3d} 对第1主成分的贡献最大,其次 R_E 也具有较大贡献。对于第2主成分, R_0 的贡献最为重要。各特征向量值见表2所示。

表2 各影响因子特征向量

影响因子	第1主成分	第2主成分
灾害当天降水量	-0.330	-0.736
前期有效降水量	-0.466	0.434
3 d累积降水量	-0.536	-0.179
连续降水天数	-0.380	0.475
3 d强降水天数	-0.492	-0.092

综上所述,怒江州的地质灾害主要由短期强降水激发。在怒江州地质灾害气象风险预警模型中,需着重考虑短期内的降水量和降水强度。

2.2 怒江州地质灾害精细化气象风险预警指标

2.2.1 临界雨量

将46个样本按灾情发生点所属县进行归类,则贡山县13个样本、福贡县8个、泸水县10个、兰坪县15个。计算得到贡山、福贡、泸水、兰坪各县的 α 都为0.9,比怒江州统一计算得到的 α 大。说明对地质灾害样本做空间精细化分区,提高空间分辨率,摒弃由于气候背景不同、地理条件不同造成的相互影响,前期降水对地质灾害的累积效应变得更加明显。分别计算四个县各样本的日综合雨量,将日综合雨量按升序排列,用

20%、40%、60%、80% 的样本概率划分日综合雨量等级^[17], 以此作为各等级的临界雨量, 结果如表 3 所示。

表 3 各等级临界雨量 mm

	Ⅳ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅰ级
贡山	65.5	74.2	104.6	143.0
福贡	41.8	51.4	67.6	113.0
泸水	44.7	59.9	76.6	122.9
兰坪	35.5	50.2	65.2	99.5

2.2.2 临界雨强

分析各样本灾害发生当天的降水强度, 发现激发雨强的差异较大, 从小雨到暴雨皆有。但是, 当日降水强度小(中雨及以下量级), 且前 2 d 的累积降水量也小($R_{2d} \leq 15$ mm)的个例仅占 21.7%, 其中有 50% 的样本都出现在兰坪。普查各样本灾害当天到前 10 d 内 $R_{24h} > 0$ 的日数, 7 d 以上有降水的样本占 87%, 而 24% 的样本在整个有效降水时段均有雨量。虽然总样本中有一个样本仅灾害当日有降水, 但是降水量为 31.4 mm, 是典型的强降水诱发的地质灾害。因此, 怒江州降水型地质灾害可分为两类, 一类是连续性降水造成的地质灾害; 另一类是短期强降水造成的地质灾害, 其中连续性降水造成的地质灾害所占比例最大。由连续性降水诱发的地质灾害又可分为临界雨强强和临界雨强弱两种。主成分分析结果表明临界雨强强若仅用当日雨强表示是不充分的, 还需考虑短期内的强降水日数。因此临界雨强依据前期雨强日数(指短期内)和临近 24 h 降水强度两方面综合定义。前期雨强日数划分为 3 个等级, 连续 3 d 均出现大雨及以上量级, 为Ⅰ级, 有 2 d 出现大雨及以上量级, 为Ⅱ级, 1 d 出现强降水, 为Ⅲ级。当天降水强度划分为 4 个临界雨强等级, 暴雨为Ⅰ级, 大雨为Ⅱ级, 中雨为Ⅲ级, 小雨为Ⅳ级。临界雨强指标如表 4 所示。

表 4 怒江州临界雨强指标

	Ⅳ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅰ级
雨强日数临界值/d	\	1	2	3
24 h 临界雨强/mm	小雨	中雨	大雨	暴雨

2.2.3 地质灾害风险区划更新

图 1 展示的地质灾害风险区划主要来源于国土部门的成果, 怒江州的风险区划分为一级和二级两个级别, 区划分辨率相对较粗, 并且在该区划方法中已考虑了气候背景的作用。本研究尝试基于地质灾害点的地理信息进行风险区划分级。

利用 2012–2014 年地质灾害样本, 定位各次灾害发生地的经纬度, 运用 Arcgis 技术, 将每个灾害点进行插值, 灾害点 2 km 范围内的区域定为地质灾害“极易发区”, 灾害点 5 km 范围内的区域为“高易发区”, 灾害点 10 km 范围内的区域为“较高

易发区”, 灾害点 20 km 范围内的区域定为“中易发区”, 20 km 范围外的区域是“不易发区”。通过定位灾害点的范围做风险区划分析, 其物理意义直观。事实上, 地质灾害是内因和外因共同作用的结果(不包含人为因素造成的地质灾害), 因此灾害点的信息中也包括了地理因子和降水因子的共同影响, 同时反映了灾害发生频率、灾害发生密集度等因素的特征, 属于综合性的区划指标。对比图 3 和图 1, 本研究绘制的风险区划, 其空间分辨率高于国土部门提供的区划结果, 体现出区域性分布特征, 并且风险等级更为细化, 实现了风险区划精细化的要求。本研究将对两种区划方法的气象风险预警效果做对比。

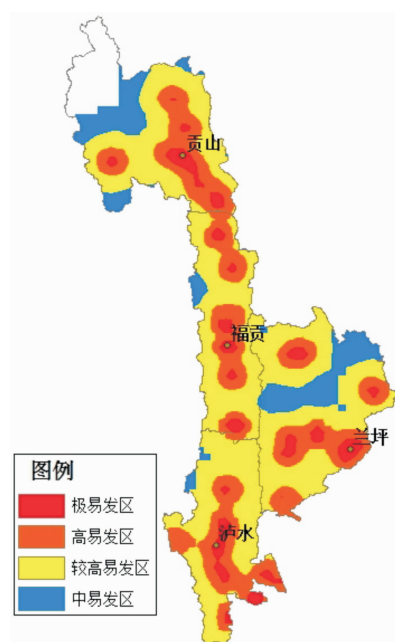


图 3 怒江州地质灾害风险区划更新图

3 个例检验

将本研究得出的各等级临界雨量、临界雨强、风险区划指标引入到目前业务运行的地质灾害气象风险预警模型中(模型构建详见文献[13]), 并对 2015 年的地质灾害个例作对比检验。下文中将目前业务运行的预警模型称为“原始模型”, 其结果称为“原始预警”; 本研究的预警模型和预报结果称为“优化模型”和“优化指标预警”。

2015 年 8 月 9 日 17:40 兰坪县兔峨乡发生小型泥石流灾害, 20:00 该县营盘镇又出现小型泥石流灾害。普查 7 月 29 日 08 时–8 月 9 日 08 时的累积降水量, 兔峨为 48.7 mm, 营盘为 60.5 mm。灾害发生当天及前 2 d 兔峨和营盘均未出现强降水, 但是在地质灾害有效降水时段内(灾害发生当天及前 10 d), 兔峨仅 2 d 没有观测到降水, 营盘

有 3 d 没有观测到降水, 因此 8 月 9 日的泥石流灾害由连续性降雨造成。根据兰坪县日综合雨量的计算公式, 兔峨 $R_{\text{日综}} = 42 \text{ mm}$, 营盘 $R_{\text{日综}} = 53.1 \text{ mm}$ 。当天降水强度兔峨为小雨, 营盘为中雨。兔峨和营盘前期中雨以上降水日数均为 2 d, 短期内大雨以上强降水日数均为 0 d。逐日降水分布见图 4, 统计时段为前日 08:00 至当日 08:00 (下文同)。

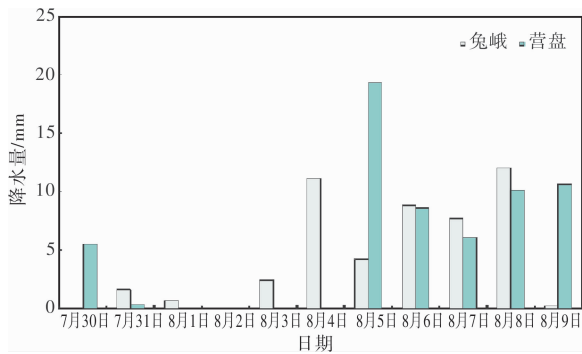


图4 逐日降水柱形图

检验此次地质灾害气象风险预警的效果, 对比原始模型与优化模型的预报情况(图5)。由图5a可见, 原始预警中整个怒江州的气象风险预警等级偏高, 尤其Ⅱ级和Ⅲ级风险区域偏大, 造成高等级风险区空报率偏高。图5b中, 全州的预警风险等级降低, 高等级风险区的范围显著缩小, 减小了高等级风险区的空报率。对比灾情点的预警情况, 图5a和图5b都报了Ⅳ级风险。表明优化模型减少了空报率同时没有发生漏报, 预警等级也没有改变, 整体预警效果较好。

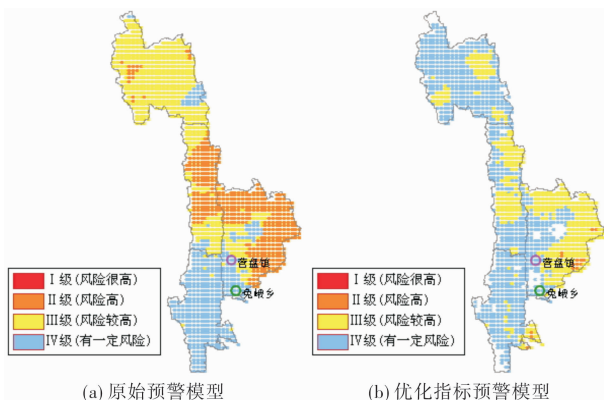


图5 “8·9”地质灾害气象风险预警等级分布
(绿色圆圈为兔峨乡灾害点, 紫色圆圈为营盘镇灾害点)

在云南省地质环境监测院提供的地质灾害信息中显示, 成功预报了2015年8月12日19:30发生于兰坪县河西乡的中型泥石流灾害, 因此本研究针对这次个例进行比较。

分析河西乡逐日降水分布(图6), 8月11日08时至8月12日08时无降水, 8月12日08时至

灾害发生前有1 mm左右的降水。灾情当天至前10 d累积降水量为94.1 mm, $R_{\text{日综}} = 71.4 \text{ mm}$, 达到Ⅲ级风险临界雨量标准。短期内大雨以上强降水日数为0 d, 灾害发生当日有小雨量级降水, 临界雨强为Ⅳ级。

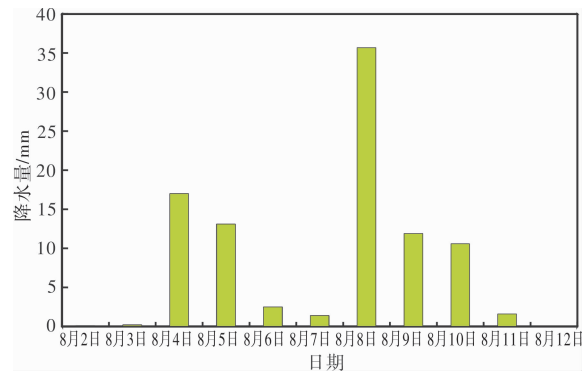


图6 河西乡逐日降水柱形图

对比图7a和图7b的风险等级分布, 优化指标预警(图7b)明显减小高等级风险区的预报范围, 并且能够预报出无风险区, 使预警更具有针对性。

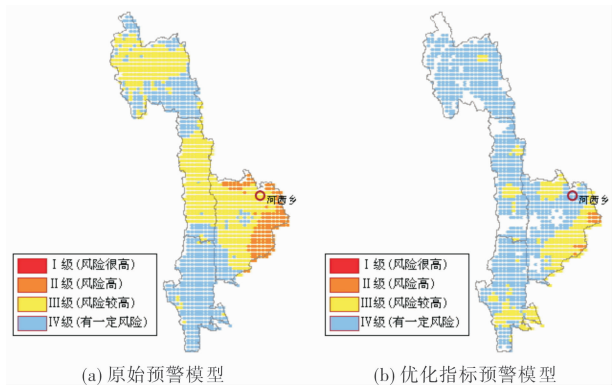


图7 河西乡地质灾害气象风险预警等级分布
(褐色圆圈为河西乡灾情点)

但是对于灾情点河西乡而言, 图7a预报了Ⅲ级风险, 图7b预报Ⅳ级风险, 风险等级下降, 预报风险高的区域偏离灾情点, 地质灾害气象风险预警的指导性变差。笔者同时对原始模型做了两种方案的调整, 一是保持降水因子的临界值不变, 模型中引入更新后的风险区划指标; 二是原始模型中的风险区划指标不变, 引入本研究的降水因子临界值。对比发现, 仅引入本研究的降水因子指标降低高等级风险区范围, 同时河西乡的预警等级不变; 仅引入更新的风险区划, 高等级风险区消空的效果更好, 但是河西乡的预警等级也随之降低。反查河西乡的风险区划等级, 由原始模型中的Ⅰ级区划降低为Ⅳ级区划。说明本研究的区划虽然提高了空间分辨率, 突出了地质灾害的区域性分布特征, 但是该方法过多依赖于历史灾害样本的收集程度, 对未收集到灾情或灾情

发生少的区域, 其风险区划等级就低, 在一定程度上影响地质灾害气象风险的综合评估效果。另一方面, 本研究的风险区划扫描半径由主观定义, 还需要在实际应用中不断研究改进, 在新数据、新技术的支撑下订正, 切实提高该方法的适用性和表征能力。

4 结论与讨论

本研究使用具有较高空间分辨率的资料, 对诱发云南省降水型地质灾害的临界雨量、临界雨强、风险区划做了优化, 各项预警指标的区域性特征更显著, 适用于怒江州复杂的地理条件和天气气候背景。对目前业务运行的风险预警模型中空报率过高、高等级风险区预报过大的问题有明显改进。通过实例检验, 本研究提出的气象风险预警指标对降低空报率, 提升预报预警的空间精细化程度有较好的作用。

在实际应用中也发现, 地质灾害气象风险预警等级高的区域并未收集到灾情报告, 预警等级偏低的地区发生了灾害。这一方面是由于灾情收集工作还不完善, 未收到灾情报告不代表一定没有出现地质灾害; 另一方面再次说明地质灾害的发生具有很大的不确定性和突发性, 要做确定性预报预警服务技术难度非常大。因此, 构建降水诱发地质灾害的可能性关系模型, 提高地质灾害气象风险概率性预报预警服务能力还需继续深入研究。在地质灾害减灾防灾工作中, 还需要形成部门联动、上下联动的体系, 搭建灾情信息数据库, 信息互通, 才能更好地发挥作用, 提升灾害风险防御能力。

参考文献:

[1] 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, 33(12): 3-8.
- [2] 陶云, 唐川, 段旭. 云南滑坡泥石流灾害及其与降水特征的关系[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 180-186.
- [3] 单九生, 刘修奋, 巍丽, 等. 诱发江西滑坡的降水特征分析[J]. 气象, 2004, 30(1): 13-15.
- [4] 郁淑华. 四川盆地泥石流、滑坡的时空分布特征及其气象成因分析[J]. 高原气象, 2003, 22(S1): 83-89.
- [5] 杜惠良, 钮学新, 殷坤龙, 等. 浙江省滑坡、泥石流气象条件分析及其预报研究[J]. 热带气象学报, 2005, 21(6): 642-650.
- [6] 王仁乔, 周月华, 王丽, 等. 大降雨型滑坡临界雨量及潜势预报模型研究[J]. 气象科技, 2005, 33(4): 311-313.
- [7] Wang Tao, Li Qiang, Hao Lingyin, et al. Study on the analysis system of meteorological and geological disaster grads early warning of WebGis[J]. Meteorological and Environment Research, 2014, 5(12): 44-48.
- [8] 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.
- [9] 单香玉, 鄂建, 黄敬军, 等. 江苏省突发地质灾害气象风险预警模型优化与应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 122-126.
- [10] 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): 127-133.
- [11] 沈玲玲, 刘连友, 杨文涛, 等. 基于 TRMM 降雨数据的四川省地质灾害降雨阈值分析[J]. 灾害学, 2015, 30(2): 220-227.
- [12] 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, 29(2): 42-47.
- [13] 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.
- [14] 李益敏, 张丽香, 王金花. 资源环境约束下的怒江州农业产业结构调整研究[J]. 生态经济, 2015, 31(2): 117-120.
- [15] 唐川. 云南怒江流域泥石流敏感性空间分析[J]. 地理研究, 2005, 24(2): 178-186.
- [16] 郭荣芬, 罗燕, 唐盛. “2014. 5. 10”云南怒江州福贡泥石流成因分析[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 102-107.
- [17] 胡娟, 闵颖, 李华宏, 等. 云南省山洪地质灾害气象预报预警方法研究[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 62-66.
- [18] 段旭, 陶云, 刘建宇, 等. 云南省不同地质地貌条件下滑坡泥石流与降水的关系[J]. 气象, 2007, 33(9): 33-39.

Improvement on the Meteorological Forewarning Index of Geologic Hazard in Yunnan Province

HU Juan, MIN Ying, LI Huahong, XU Yingjie, LI Chao and LI Xiang
(Yunnan Provincial Meteorological Observatory, Kunming 650034, China)

Abstract: In order to improve the running forewarning model used for meteorological risk warning of geologic hazard in Yunnan Province, the precipitation data from regional automatic weather stations in Nujiang were used to calculate critical indices, and the risk division of geologic hazard was updated by the disaster geographic information. According to the research, continuous precipitation was the main type of the rainfall-triggered geologic hazard, and the excitation of heavy rain in short term was very important. The geologic hazard had obviously regional distribution characteristics in Nujiang. It was found that the improved forewarning model had a better effect of application in 2015 events, and the rate of vacancy forecast for high risk warning was decreased significant. Based on the research the spatial resolution of the meteorological risk forewarning will be refined and enhanced.

Key words: geologic hazard; forewarning index; model optimization; comparative test