

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. 应用气象学报, 2015, 26(3): 268-279.  
doi:10.11898/1001-7313.20150302

# 降水引发的西南地区公路损毁风险预报方法

狄靖月<sup>1)2)</sup> 王志<sup>2)\*</sup> 田华<sup>2)</sup> 谢凯<sup>2)</sup> 杨晓丹<sup>2)</sup> 陈辉<sup>2)</sup> 许凤雯<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup>(国家气象中心, 北京 100081)

<sup>2)</sup>(中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

## 摘 要

降水引发公路沿线滑坡、泥石流及其他灾害频繁发生, 已成为引发公路损毁的最重要因子之一。该文利用 2007 年 1 月—2013 年 7 月区域(云、贵、川、渝 4 个地区)公路损毁灾害数据、基础地理信息数据及国家气象中心降水量历史资料, 通过对灾害发生频次、降水量等资料的统计分析, 初步探讨降水与公路损毁灾害的关系, 并重点针对公路损毁的降水影响因子(即前期有效降水和损毁灾害发生当日降水), 开发具有普适性的公路损毁概率密度函数及其概率拟合方程, 建立公路损毁灾害概率预报模型; 综合公路损毁灾害风险区划信息(即灾害危险性等级)与降水的等级临界阈值(即降水危险性等级), 建立区域公路损毁的危险性分级预警方案, 得出综合的西南地区公路损毁风险预报模型, 以 1~5 级划分, 分别为灾害发生可能性极小、灾害发生可能性较小、灾害发生可能性中等(注意)、灾害发生可能性较大(预警)、灾害发生可能性极大(警报)。该预报方法结合降水危险性等级及公路损毁灾害危险性等级, 明显优于仅考虑阈值降水量的判别方法。

**关键词:** 公路损毁; 风险预报; 概率预报

## 引 言

在全球变暖的大背景下, 极端天气事件频发, 台风、暴雨、洪涝等气象灾害及其引发的山体滑坡、泥石流等次生灾害对公路交通的影响日趋严重。其中, 由降雨引发的公路沿线滑坡、泥石流及其他灾害更是频繁发生, 已成为引发公路损毁的最重要因子之一。

2005 年中国气象局与交通运输部联合开展了公路交通气象预报服务。但到目前为止, 降水引发的公路损毁预报方法方面还是空白, 而且公路交通气象服务对公路的运行和养护有十分显著的影响, 并一直受到气象部门和公路部门的关注。

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, 以此带来的公路损毁

发生概率大大增加。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、泥石流等地质灾害导致公路损毁。因此, 许多灾害预报模型不仅包含临近数小时的降水因子, 也包含前期降水因子<sup>[1-2]</sup>。

过去众多滑坡、泥石流等地质灾害预报的研究, 通常是将地质灾害预报简化为降水量与滑坡、泥石流等地质灾害发生(如阈值雨量)的简单判别关系, 便于运作和实施预报分析<sup>[3-8]</sup>。在理论和方法上, 国内外学者已对公路自然区划、地质灾害风险及预报、公路灾害监测与评估等开展很多工作。但降水引起的公路损毁研究是一个多学科交叉的新应用科学流域, 特别是降水引起的公路损毁预测技术研究目前鲜见报道。如何针对降水引起的公路损毁的特殊性, 将强降水、地质环境、公路有效结合, 研究降水引起的公路损毁灾害的科学内涵和预报方法, 仍是尚未解决的难题。

2014-10-13 收到, 2015-01-23 收到再改稿。

资助项目: 中国气象局气候变化专项(CCSF201328), 气象关键技术集成与应用(面上)项目(CAMGJ2012M73), 中国气象局公共气象服务中心业务服务专项基金项目(M2014007)

\* 通信作者, email: wzhi@cma.gov.cn

本文通过对降水量(当日、前2 d、前3 d、前4 d、前5 d、前6 d、前7 d、前15 d等降水)与各类公路损毁灾害发生关系的研究,确立公路损毁降水特征的影响因子,依据公路损毁风险区划、主观降水预报、数值天气预报、前期实况降水等,建立公路损毁概率预报的模型。最后,基于公路损毁灾害风险区划信息,建立预警区危险性等级预报系统。

## 1 研究区域和资料

本文选取易发生公路损毁的云、贵、川、渝4个地区为研究区域。

灾害资料来自全国公路损毁灾害数据及基础地理信息数据,2007年1月—2013年7月云、贵、川、渝公路损毁信息。2007年1月—2013年7月国家气象中心降水量资料,即每日全国08:00(北京时,下同)和20:00的24 h加密日降水量资料和全国6 h降水量资料;2012年和2013年国家气象中心未来24 h降水落区预报资料和数值天气预报。

## 2 研究方法

### 2.1 降水影响因子选取

前期有效降水和当日降水等因子是引发滑坡、泥石流等带来的公路损毁灾害的关键因子。在降水与各类公路损毁发生的关系初步分析基础上,选取以下8个降水量作为降水影响因子<sup>[9-11]</sup>:

①影响因子1,灾情发生当日24 h降水量。实际预报中采用中央气象台24 h降水量实况。若灾害发生在当日夜晚,取当日20:00的24 h降水量实况;若灾害发生在当日白天,取当日08:00的24 h降水量实况;若灾害发生信息有明确时次,则以最接近灾害发生的前6 h的降水量资料累加获取24 h降水量。

②影响因子2,灾情发生前2 d累积降水量。考虑到公路损毁有一定的夜发性,24 h以前的降水量非常重要。需要特别指出的是,考虑到实际应用,公路损毁预报一般下午开始制作,当时只能获得14:00以前的降水量实况,因此,在计算24 h降水量时,当日14:00—20:00的6 h降水量采用国家气象中心全球数值天气预报模式降水量预报代替。

③影响因子3、影响因子4、影响因子5、影响因子6与影响因子7分别为前3 d、前4 d、前5 d、前

6 d、前7 d的累积降水量。

④影响因子8,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(1)中, $R_A$ 表示有效降水量, $R_i$ 表示从灾害发生时次的当日算起(灾害发生当日, $i=0$ ;灾害发生前1 d, $i=1$ ;前2 d, $i=2$ )的降水量, $K$ 为递减系数,本研究取 $K=0.8$ 。在选取的8个影响因子中,前15 d有效降水量影响因子作为一个反映总降水量的物理量,能很好表征灾害发生前期降水量是否充分,因此,将该影响因子作为必选因子,其他影响因子作为备选因子,进行相关性分析。

针对选取的这些影响因子,进行Kendall相关系数分析。Kendall相关系数是一个用来测量两个随机变量相关性的统计值(以Maurice Kendall命名)。Kendall检验是一个无参数假设检验,采用计算所得相关系数检验两个随机变量的统计依赖性。Kendall相关系数 $\tau$ 的取值范围为 $-1 \sim 1$ ,当 $\tau=1$ 时,表示两组随机变量拥有一致的等级相关性;当 $\tau=-1$ 时,表示两组随机变量拥有完全相反的等级相关性;当 $\tau=0$ 时,表示两组随机变量是相互独立的。当 $0.3 < |\tau| < 0.5$ 时,表示两组随机变量低度相关;当 $0.5 < |\tau| < 0.8$ 时,表示两组随机变量显著相关;当 $0.8 < |\tau| < 1$ 时,表示两组变量高度相关,存在近似线性关系。

预报因子之间存在近似线性关系时,说明因子间存在复共线性,由于回归分析中,自变量因子的复共线性状态会使回归方程处于“病态”,这种“病态”的后果是回归系数估计变得十分不稳定,甚至不合理,因此,为避免预报因子之间存在复共线性,应选取相关系数低的预报因子进入模型,因子1~7与因子8的Kendall相关系数分别为0.600,0.733,0.794,0.826,0.832,0.763,0.693,达到0.01显著性水平。其中,相关系数最低的是影响因子1,即灾情发生当日(24 h)降水量,这在一定程度上表征了临近损毁发生前的降水特征。其他影响因子与影响因子8的相关性普遍较高,需予以剔除。本文最终选取灾害当日降水和前15 d有效降水参与建模。

### 2.2 降水数据正态化处理

由于均一性检验、统计理论等都建立于固有假设的基础上,均要求进行分析计算的数据服从正态

分布,而对于一般降水数据而言,具有明显非正态分布性质,因此,数据变为正态化(或者准正态化)成为非常重要的问题。目前主要用到的数据变换为对降水量序列进行开平方、开立方处理,对数变换,Box-Cox变换和Johnson变换等,以提高降水量序列的正态性,本文参考文献[12-16]的方法,将前15 d有效降水和损毁灾害发生当日降水进行开立方处理,使降水数据较为集中并提高降水序列的正态性。公式如下:

$$R_X = \sqrt[3]{R_B/C}. \quad (2)$$

式(2)中, $R_B$ 为有效降水量或当日降水量(单位: mm), $C=1$  mm, $R_X$ 为经正态化的降水因子(以下简称降水因子)。

### 2.3 公路损毁灾害发生频次拟合

以公路损毁的前15 d有效降水因子序列为例,降水因子序列的最大值 $R_{X_{max}}$ 和最小值0,将降水序列分成50份,每一份的降水间隔 $X=R_{X_{max}}/50$ ,计算每个降水段内公路损毁发生频次占总的公路损毁发生频次的概率密度 $Y$ 。根据降水因子及损毁灾害发生的频次分布散点信息,分别进行高斯拟合、傅里叶拟合和多项式拟合<sup>[17-18]</sup>。

从3组拟合曲线(图1)的拟合参数发现,高斯曲线拟合的相关度从确定系数指标上看,均优于其他两种拟合方法,而从两项误差评价上,明显小于其他两种拟合方法(表1)。

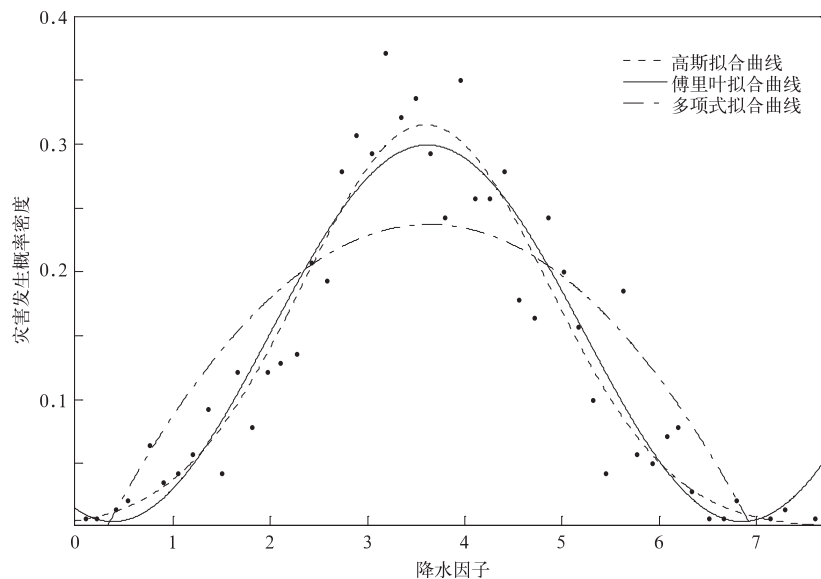


图1 降水因子与公路损毁灾害发生频次的关系

Fig. 1 Illustration of precipitation factor and frequency distribution of road damages

表1 3种拟合曲线评价

Table 1 Evaluation of three kinds of fitting

拟合类型	误差平方和	确定系数	调节确定系数	均方根误差
高斯拟合	0.05506	0.9144	0.9108	0.03423
傅里叶拟合	0.06493	0.8991	0.8925	0.03757
多项式拟合	0.18060	0.7193	0.7073	0.06199

因此,使用高斯函数对数据点集进行函数逼近拟合,采用的拟合高斯分布曲线公式见式(3),同时,对式(3)进行积分处理得到概率预报公式(4)。

$$Y = ae^{-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2}, \quad (3)$$

$$Y = \int_0^x ae^{-\left(\frac{t-b}{c}\right)^2} dt. \quad (4)$$

其中,  $a, b, c$  均为参数,  $a = 1/(\sigma\sqrt{2\pi})$ ,  $b$  为统计样本平均值,  $c = \sqrt{2} \times \sigma$ ,  $\sigma$  为样本序列的标准差, 具体数值根据降水因子与公路损毁灾害发生频次的散点分布情况而定。

对已选取的两个降水因子序列(前 15 d 有效降水因子和损毁灾害发生当日降水因子)和对应的公路损毁灾害发生频次分布情况分别进行高斯拟合, 依据拟合确定性系数, 两个降水因子进行不等权平均, 获取一个综合的降水因子。在这 3 个降水因子的基础上, 分别建立概率密度方程, 发现前 15 d 有效降水因子与公路损毁灾害发生频次的拟合度最高, 综合降水因子的拟合度次之, 前 24 h 降水因子与公路损毁灾害发生频次的拟合度最差。

### 3 区域公路损毁概率预报模型建立

假设在研究区域内, 发生地质灾害公路损毁的其他潜在条件都相似, 降水量是决定公路损毁发生的唯一因素, 这样可以根据各区内的降水量与地质灾害发生之间的统计关系建立分区预报方程<sup>[18-19]</sup>。

选取不同的降水因子, 构建各降水因子及综合降水因子的概率密度函数, 根据对历史资料的统计, 得出当前降水因子导致的损毁灾害发生概率, 并分别针对某一预警区域建立降水引发损毁的概率预报模型。

我国的地质灾害具有广域性和地域差异性, 由此带来的公路损毁灾害也与地质条件密不可分。无论从灾害点分布密度, 还是灾害发生频次上看, 我国南部都重于北部, 尤其是西南地区几乎每年雨季均有多次滑坡、泥石流灾害出现, 同时, 西南地区交通是我国第二阶梯, 海拔高, 多高原山地, 道路艰险且曲折, 整体的交通还是以山路公路为主。滑坡、泥石流等公路损毁灾害严重, 因此, 本文建立了云、贵、川、渝地区的区域公路损毁概率预报模型。

#### 3.1 基于前 15 d 有效降水因子的预报模型

基于前 15 d 有效降水因子及损毁灾害发生频次分布的高斯拟合曲线(图 2), 得到区域公路损毁概率预报模型公式如下:

$$Y = \int_0^x 0.3151e^{-\left(\frac{x-3.597}{1.78}\right)^2} \quad (5)$$

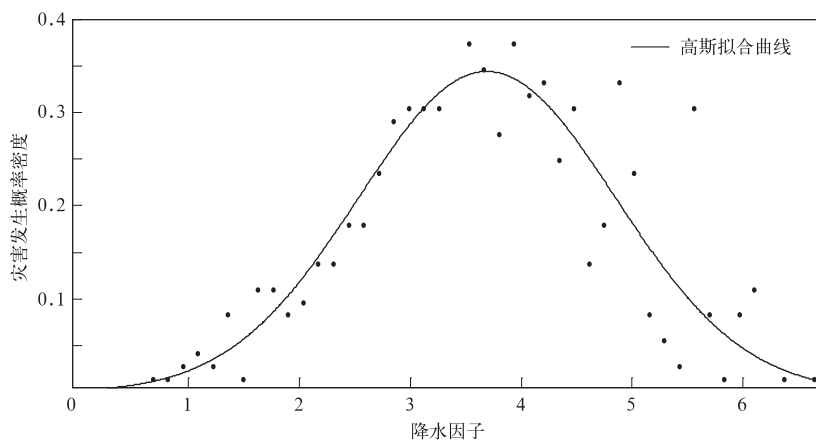


图 2 有效降水因子与区域公路损毁灾害发生频次

Fig. 2 Illustration of effective precipitation factor and frequency distribution of regional road damages

#### 3.2 基于综合降水因子的预报模型

基于综合降水因子及损毁灾害发生频次分布的高斯拟合曲线(图 3), 得到区域公路损毁概率预报模型公式如下:

$$Y = \int_0^x 0.2908e^{-\left(\frac{x-3.066}{2.016}\right)^2} \quad (6)$$

#### 3.3 基于当日降水因子的预报模型

基于当日降水因子及损毁灾害发生频次分布的高斯拟合曲线(图 4), 得到区域公路损毁概率预报模型公式如下:

$$Y = \int_0^x 0.2722e^{-\left(\frac{x-2.812}{2.196}\right)^2} \quad (7)$$

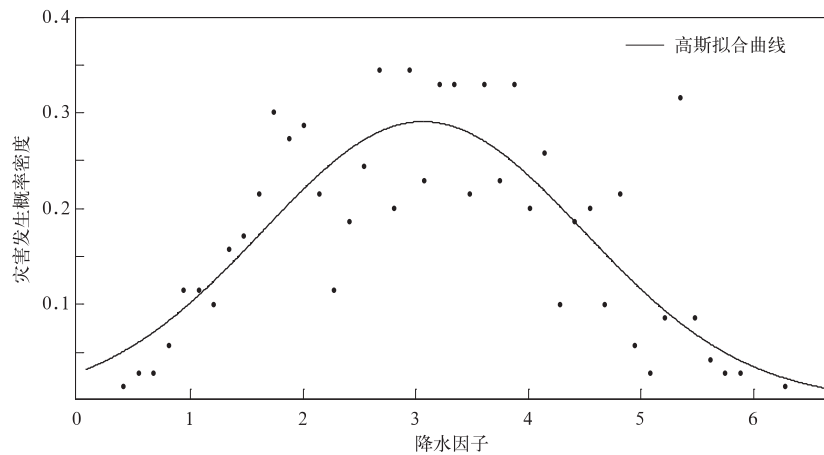


图 3 综合降水因子与区域公路损毁灾害发生频次的关系

Fig. 3 Illustration of composite precipitation factor and frequency distribution of regional road damages

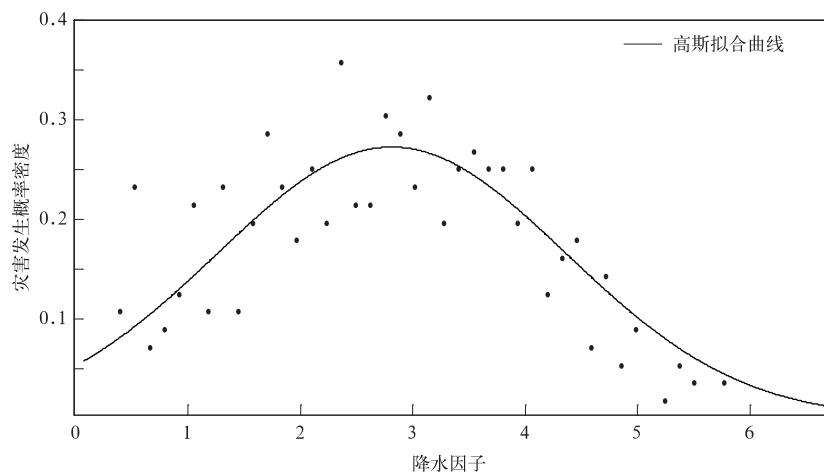


图 4 当日降水因子与区域公路损毁灾害发生频次的关系

Fig. 4 Illustration of current precipitation factor and frequency distribution of regional road damages

综合评价基于有效降水因子、综合降水因子及当日降水因子 3 种降水因子的概率预报模型,从 3 种模型的参数看,参数  $a$  和  $b$  逐渐增大,参数  $c$  逐渐减小,说明降水因子的平均值呈增大趋势,降水因子的方差呈减小趋势。当降水因子为某值时(在本文中,该值为区域内所有灾害点有效降水的平均值),发生损毁灾害的频率非常大,本文 3 种降水因子的平均值逐渐变大,说明 3 种模型中,引发损毁灾害的降水因子在逐渐增大;同时, $\sigma$  越小,说明灾害分布越集中在平均值附近, $\sigma$  越大,分布越分散。对 3 种降水因子的概率预测模型分别进行评价(表 2)。根

据 3 种模型的误差平方和、均方根误差、确定系数及调节确定系数,同时依据前人引用有效降水建立模型,本文选取基于有效降水的模型作为区域公路损毁概率预报模型之一(以下简称模型 I),另考虑滑坡、泥石流等地质灾害与发生前的临近降水量有重要关系,因此,增加选取基于综合降水的模型作为公路损毁概率预报模型之一(以下简称模型 II),以强调灾害发生前 24 h 降水量的重要性,最终建立两个区域公路损毁灾害概率预报曲线(图 5),共建立两套预报模型,分别表征某一降水因子对应的公路损毁灾害概率预报值。

表2 3种模型评价

Table 2 Evaluation of three models

降水因子	误差平方和	确定系数	调节确定系数	均方根误差
有效降水因子	0.1339	0.8398	0.8333	0.05338
综合降水因子	0.1876	0.7175	0.7055	0.06318
当日降水因子	0.2292	0.6282	0.6124	0.06983

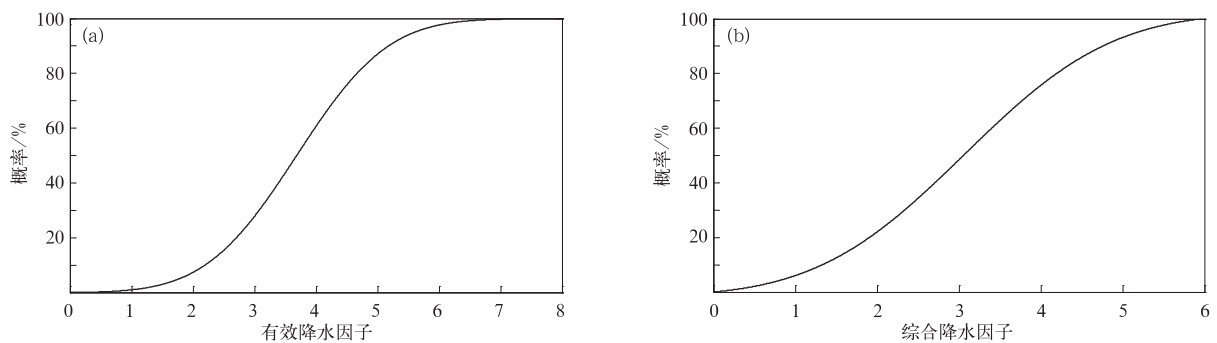


图5 基于有效降水因子和综合降水因子的区域公路损毁概率预报曲线

(a)基于有效降水因子,(b)基于综合降水因子

Fig. 5 Probabilistic forecast curve of regional road damages based on effective precipitation factor(a) and composite precipitation factor(b)

#### 4 公路损毁风险预报方法

在之前的假设中,认为研究区域内,发生地质灾害公路损毁的其他潜在条件相似,降水量是决定公路损毁发生的唯一因素。而实际发生地质灾害的地理、地质条件不同,灾害发生的地理、地质因素也很重要,仅考虑降水导致灾害预报的可靠性和准确性大大降低。而将灾害危险性预测信息和降水量信息相结合,确定灾害的空间预警区划指标和等级,这种以区域地质-气象信息耦合的灾害预警预报模式,使预测结果具有时间和空间上的统一,是进行灾害预警预报的一种行之有效的方法。

由于公路损毁的概率预报模型,国内做得较少,本文根据前人分析方法,在建立模型时,将灾害发生概率为10%,25%,50%,75%和95%分别定义为可能性极小、可能性较小、可能性中等、可能性较大、可能性极大的临界概率。这里的灾害发生可能性仅表示降水量危险性等级。与这些概率值对应的因子取值作为灾害发生该概率时的临界值。降水量危险性

等级分类如下:公路损毁灾害发生概率 $Y$ ,当 $Y < 10\%$ 时,危险性为1,即降水量极低危险性等级;当 $10\% \leq Y < 25\%$ 时,危险性为2,即降水量低危险性等级;当 $25\% \leq Y < 50\%$ 时,危险性为3,即降水量中危险性等级;当 $50\% \leq Y < 75\%$ 时,危险性为4,即降水量高危险性等级;当 $75\% \leq Y < 95\%$ 时,危险性为5,即降水量极高危险性等级;当 $Y \geq 95\%$ 时,灾害几乎必然发生,直接取为5。

由于各地的地理、地质条件如高程、坡度、最大高程差、工程岩性、断层密度、植被覆盖等有巨大差异,同样的降水量危险性分级方案不能适用于各个地方,因此,基于这些因子的公路损毁风险分区的建立尤为重要,本文参考殷坤龙等<sup>[20]</sup>的预警区等级初步划分方案,即最终的公路损毁预警等级由降水量危险性等级和公路损毁灾害危险性等级两个指标共同决定(表3),公路损毁灾害危险性等级,以1~5级划分,分别表示不同的预警级别。表4给出了不同预警等级含义、对应的灾害发生可能性及相应的防御措施<sup>[21]</sup>。

表3 预警区等级初步划分表

Table 3 Warning classification

公路损毁灾害 危险性等级	降水量危险性等级				
	极低危险性	低危险性	中危险性	高危险性	极高危险性
极高危险区	3级预警区	4级预警区	5级预警区	5级预警区	5级预警区
高危险区	2级预警区	3级预警区	4级预警区	5级预警区	5级预警区
中危险区	1级预警区	2级预警区	3级预警区	4级预警区	5级预警区
低危险区	1级预警区	1级预警区	2级预警区	3级预警区	4级预警区
不危险区	1级预警区	1级预警区	1级预警区	2级预警区	3级预警区

表4 预警等级含义、对应的灾害发生可能性及其防御措施

Table 4 Meaning of warning classification, the possibility of disaster and defensive measures

预警等级	灾害发生情况(24 h内)	防御措施
1级预警区	灾害发生可能性极小	不采取措施
2级预警区	灾害发生可能性较小	启动重要灾害隐患点的群测群防工作
3级预警区	灾害发生可能性中等(注意)	注意对灾害点的监测、采取防御措施,提醒危险区内的人员注意灾害动态
4级预警区	灾害发生可能性较大(预警)	应加强对灾害点的监测,对灾害危险区应开展预防应急措施
5级预警区	灾害发生可能性极大(警报)	应全天候对灾害点进行监测,建立防御措施和救灾体系,组织紧急疏散通道等

针对云、贵、川、渝的公路损毁概率预报模型的建立,本文认为这4个地区整体的损毁灾害危险性等级处于中危险区,其风险等级较为一致,因此,统一采用区域公路损毁概率预报模型,将西南地区公路损毁风险预报分为1~5级(表3):降水量危险性等级为极低危险性时,为1级预警区,即发生灾害可能性极小;降水量危险性等级为低危险性时,为2级预警区,即灾害发生可能性较小;降水量危险性等级为中危险性时,为3级预警区,即灾害发生可能性中等;降水量危险性等级为高危险性时,为4级预警区,即灾害发生可能性较大;降水量危险性等级为

极高危险性时,为5级预警区,即灾害发生可能性极大。

## 5 风险预报方法检验

选取2012年7月—2013年7月的107个公路损毁灾害样本,研究在107个实际灾害点上的模型预报情况,检验模型I和模型II对于灾害发生的预报情况(表5)。模型I预报3级及以上预警次数为88次,占总发生次数的81%,模型II预报3级及以上预警次数为94次,占总发生次数的87%,两个模

表5 2012—2013年公路损毁灾害模型I和模型II的预报次数

Table 5 Predictions of two models from 2012 to 2013

预报模型	1级预警	2级预警	3级预警	4级预警	5级预警
模型I	1	18	47	27	14
模型II	0	13	53	27	14

型预报4级及以上预警的次数均为41次,占总次数的38%。由此可见,两种模型对于预报的命中率很高,在预报员预报过程中都有较强的参考意义,相比

较而言,模型II比模型I预报的有效次数略多一些,在汛期及灾害多发期,模型II有较强的指示作用<sup>[22-24]</sup>。

同时,为了验证公路损毁预报模型的应用效果,

选取 2012 年 8 月底四川省的 1 次降水过程对模型预报效果进行了个例检验。

### 5.1 天气和公路损毁灾情

2012 年 8 月 30 日—9 月 1 日,四川省部分地区降了暴雨和大暴雨。8 月 30 日 08:00—31 日 08:00 自贡市富顺县龙万乡降水量为 192.6 mm。8 月 31 日 08:00—9 月 1 日 08:00 泸州市纳溪县渠坝、巴中市南江县的新民和大坝特大暴雨,降水量为 261~279.5 mm。

受此次降水过程影响,8 月 31 日—9 月 1 日四

川省富顺、雷波、巴中、泸定、南江、冕宁市境内的 S207, S307, S101, S215, G318 等公路发生多处崩塌、泥石流、滑坡地质灾害,公路损毁严重。图 6 是预报员针对 8 月 30 日—9 月 1 日降水过程预报的逐日 24 h 降水。由图 6 可见,8 月 30 日 08:00—31 日 08:00,预报的强降水主要位于四川盆地北部和中部,预报降水强度为大雨或暴雨。8 月 31 日 08:00—9 月 1 日 08:00,预报的强降水落区东移且范围增大,预报的强降水主要位于四川盆地东部和北部,其中,四川盆地北部局地为大暴雨(100~140 mm)<sup>[25-26]</sup>。

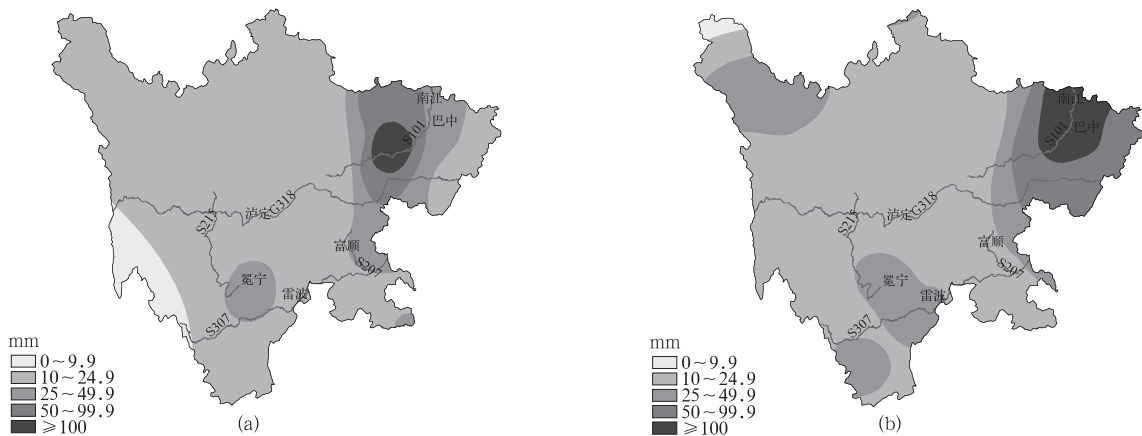


图 6 未来 24 h 主观降水预报图

(a) 2012 年 8 月 30 日 08:00—31 日 08:00, (b) 2012 年 8 月 31 日 08:00—9 月 1 日 08:00

Fig. 6 Illustration of 24 h subjective forecast

(a) from 0800 BT 30 Aug to 0800 BT 31 Aug in 2012, (b) from 0800 BT 31 Aug to 0800 BT 1 Sep in 2012

### 5.2 公路损毁模型预报效果检验

以预报员主观预报降水作为模型降水输入因子,模型 I 计算得出四川省 2012 年 8 月 30 日、8 月

31 日、9 月 1 日公路损毁发生概率(图 7),模型 II 计算得出四川省 8 月 30 日、8 月 31 日、9 月 1 日公路损毁发生概率(图 8)。

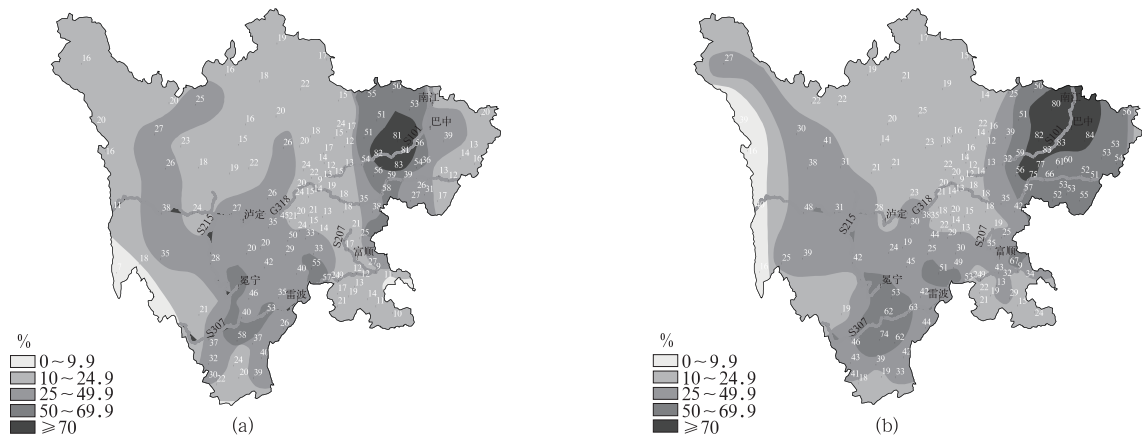
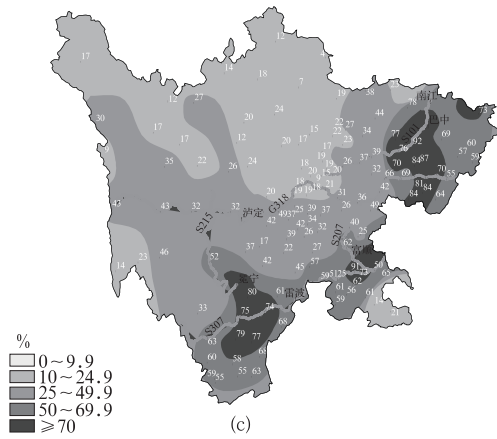


图 7 模型 I 公路损毁预报 (a) 2012 年 8 月 30 日, (b) 2012 年 8 月 31 日, (c) 2012 年 9 月 1 日

Fig. 7 Illustration of road damage forecast based on Model I (a) 30 Aug 2012, (b) 31 Aug 2012, (c) 1 Sep 2012





续图 7

由图 7 可知, 8 月 30 日模型预报的公路损毁发生可能性较大的区域主要位于四川省东北部和南部局部地区, 可能性极大的区域主要位于四川省东北部的部分地区。8 月 31 日随着降水东移和范围增大, 可能性较大和极大的范围也随之增大, 覆盖四川省东北部和南部大部地区。9 月 1 日模型预报的公路损毁可能性较大的范围覆盖四川省东部和南部大部地区, 可能性极大的区域范围和强度较前 2 d 明显增大, 四川东北部和东南部的部分地区概率高值可达 90% 以上, 即灾害几乎必然发生。

由图 8 可见, 两种模型总体预报的趋势和强度非常一致, 模型 II 预报 8 月 30 日—9 月 1 日也是一个

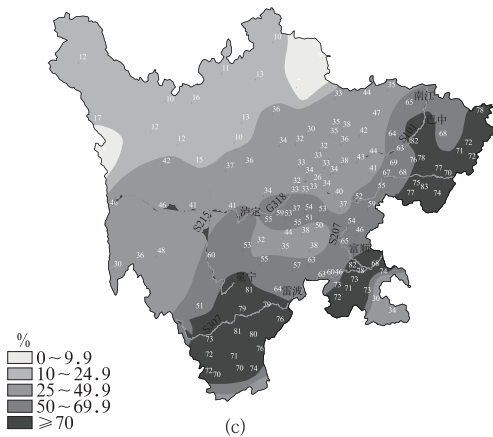
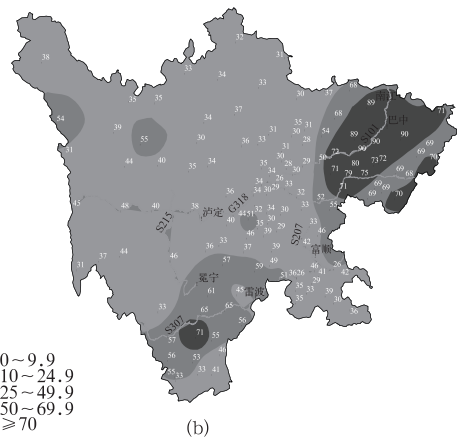
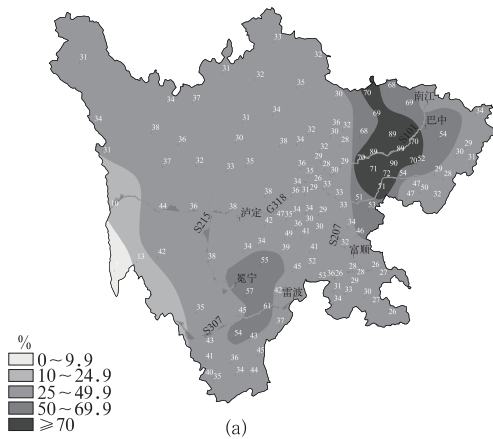


图 8 模型 II 公路损毁预报  
(a)2012 年 8 月 30 日, (b)2012 年 8 月 31 日, (c)2012 年 9 月 1 日  
Fig. 8 Illustration of road damage forecast based on Model II (a)30 Aug 2012, (b)31 Aug 2012, (c)1 Sep 2012

发生损毁概率逐渐增大的过程, 从范围和强度上, 模型 II 预报范围更大, 概率值更高一些。

表 6 为损毁灾害所在县、市预报的公路损毁发生概率。由表 6 可知, 8 月 31 日—9 月 1 日发生灾害地区的公路损毁概率在 50% 以上。对于模型 I

和模型 II, 8 月 30 日公路损毁发生概率大部地区低于 50%。8 月 31 日—9 月 1 日发生概率均逐渐增大, 除泸定和雷波外, 其他地区都高于 60%, 其中, 巴中、南江、冕宁、富顺公路损毁概率达 70% 以上。降水是损毁预报模型的关键影响因子, 由于预报的

泸定降水强度较实况降水明显偏小,所以模型预报该市的公路损毁发生概率也小。对于这次过程,巴中和南江,预报与实况降水相当,两种模型的概率预报的数值相当;在四川东南部降水预报偏小,四川东

南部的富顺,模型Ⅱ计算得出的损毁概率预报值明显比模型Ⅰ损毁概率预报值小,预报员主观预报降水在模型Ⅱ的预报中有一定指示作用。

表6 公路损毁发生概率预报(单位:%)

Table 6 Probabilistic forecasts of road damages(unit:%)

预报日期	巴中		南江		冕宁		泸定		富顺		雷波	
	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅰ	模型Ⅱ
2012-08-30	32	50	14	30	62	65	23	36	38	44	17	34
2012-08-31	81	89	81	89	66	67	23	36	93	83	39	55
2012-09-01	74	71	64	66	74	71	36	52	95	86	45	62

## 6 结论和讨论

本文利用2007年1月—2013年7月区域(云、贵、川、渝4个地区)公路损毁灾害数据、地理信息数据及相应的降水量数据,建立西南地区公路损毁概率预报模型及公路损毁风险预报方法并进行检验,得到以下主要结论:

1) 对于建模因子选取,前15 d有效降水量影响因子作为一个反映总降水量的物理量,能很好地表征灾害发生前期降水量是否充分,而当日降水量影响因子在一定程度上表征了临近损毁发生前的降水特征,且与前15 d有效降水量影响因子的 Kendall 相关系数最低,即两者间的相关性较弱,因此,可共同参与模型建立。

2) 针对降水因子及损毁灾害发生的频次分布进行的高斯拟合、傅里叶拟合和多项式拟合结果表明:降水因子与公路损毁灾害发生的频次之间服从高斯分布,可以利用高斯拟合曲线计算某一降水因子条件下的损毁灾害发生概率。

3) 基于有效降水因子、综合降水因子及当日降水因子的3种概率预报模型参数对比:降水因子的平均值呈增大趋势而降水因子的方差呈减小趋势,表明引发公路损毁的降水因子在逐渐增大而灾害分布集中在平均值附近。3种模型的误差平方和、确定系数、调节确定系数及均方根误差显示基于有效降水及综合降水的预报模型效果更佳。

4) 基于有效降水因子和综合降水因子的公路损毁概率预报模型的检验结果表明:两种模型总体预报的趋势和强度非常一致,基于综合降水因子的预报结果对预报员主观预报的敏感性更强。

今后将进一步分析高程、坡度、最大高程差、工程岩性、断层密度、植被覆盖及降水量等条件对公路损毁可能造成的影响,基于主成分分析及信息量法进行全国公路损毁危险性评价,根据评价结果,结合自然地理分区、地质环境特征等对全国进行公路损毁危险性区划划分。

## 参考文献

- [1] 殷坤龙,陈丽霞,张桂荣,等.区域滑坡灾害预测预警与风险评估.地学前缘,2007,14(6):85-97.
- [2] 文科军,王礼先,谢宝元,等.暴雨泥石流实时预报的研究.北京林业大学学报,1998,20(6):59-64.
- [3] 高速,周平根,董颖,等.泥石流预测、预报技术方法的研究现状浅析.工程地质学报,2002,10(3):279-283.
- [4] 邱骋,王纯祥,江崎哲郎,等.基于边坡单元的公路眼线滑坡危险度概率分析.岩土力学,2005,26(11):1731-1736.
- [5] 谭炳炎,段爱英.山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究.自然灾害学报,1995,4(2):43-52.
- [6] 谭万沛,韩庆玉.四川省泥石流预报的区域临界雨量指标研究.灾害学,1992,7(2):37-42.
- [7] 姚令侃.用泥石流发生频率及暴雨频率推求临界雨量的探讨.水土保持学报,1988,2(4):72-77.
- [8] 魏永明,谢又予.降雨型泥石流(水石流)预报模型研究.自然灾害学报,1997,6(4):48-54.
- [9] 姚学祥,徐晶,薛建军,等.基于降水量的全国地质灾害潜势预报模式.中国地质灾害与防治学报,2005,16(4):97-102.
- [10] 刘罗曼.用主成分回归分析解决回归模型中复共线性问题.沈阳师范大学学报:自然科学版,2008,26(1):42-44.
- [11] 黄嘉佑,黄茂怡.主分量逐步筛选因子典型相关分析及其预报试验.应用气象学报,2000,11(1):72-78.
- [12] 陶云,段旭.云南降水正态分布特征的初探.气象科学,2003,23(2):161-167.
- [13] 胡文东,陈晓光,李艳春,等.宁夏月、季、年降水量正态性分析.中国沙漠,2006,26(6):963-968.
- [14] 方建刚,毛明策,程肖侠.陕西降水的正态分布特征分析.西北

- 大学学报:自然科学版,2009,39(1):131-136.
- [15] 王纪军,任国玉,匡晓燕,等. 河南省月和年降水量正态性分析. 气候与环境研究,2010,15(4):522-528.
- [16] 陈学君,苏仲岳,李仲龙,等. 年降水量数据的正态变换方法对比分析. 干旱气象,2012,30(3):459-464.
- [17] 张国平. 有效雨量和滑坡泥石流灾害概率模型. 气象,2014,40(7):886-890.
- [18] 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. 气象,2007,33(12):3-8.
- [19] 刘春,张春辉,郭萨萨. 基于能量模型的水稻生长模型. 应用气象学报,2013,24(2):240-247.
- [20] 殷坤龙,张桂荣,龚日祥,等. 浙江省突发性地质灾害预警预报. 武汉:中国地质大学出版社,2005.
- [21] 刘传正. 中国地质灾害气象预警方法与应用. 岩土工程界,2004,7(7):17-18.
- [22] 梁莉,赵琳娜,齐丹,等. 基于贝叶斯原理降水订正的水文概率预报试验. 应用气象学报,2013,24(4):416-424.
- [23] 王晨稀. 短期集合降水概率预报试验. 应用气象学报,2005,16(1):78-87.
- [24] 林明智,毕宝贵,乔林. 中央气象台短期降雨预报水平初步分析. 应用气象学报,1995,6(4):392-399.
- [25] 邓雪娇,胡胜,闫敬华. 主客观天气预报质量对比分析. 应用气象学报,2003,14(6):730-738.
- [26] 郑卫江,吴焕萍,罗兵,等. GIS 技术在台风预报服务产品制作系统中的应用. 应用气象学报,2010,21(2):250-255.

## A Risk Forecast Method for Southwest Road Damages Based on Precipitation

Di Jingyue<sup>1)2)</sup> Wang Zhi<sup>2)</sup> Tian Hua<sup>2)</sup> Xie Kai<sup>2)</sup> Yang Xiaodan<sup>2)</sup> Chen Hui<sup>2)</sup> Xu Fengwen<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> (National Meteorological Center, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (Public Meteorological Service Center of CMA, Beijing 100081)

### Abstract

Landslides, debris-flows and other disasters along roads caused by precipitation occur frequently, becoming one of the most important factors of roads damages. Yunnan, Guizhou, Sichuan and Chongqing are especially prone to road damages. Based on the information of road damages, the corresponding precipitation data from January 2007 to July 2013 and 24 h precipitation forecast data from July 2012 to July 2013, probability forecast models are adopted to describe probabilistic relations between precipitation and road damages. First, precipitation factors of the day and over the past two, three, four, five, six, seven days and effective precipitation over the past 15 days are analyzed by the method of Kendall correlation, and precipitation of the day and the past effective precipitation are identified because of small correlation. Second, after the normality process to two factors, polynomial fitting, Fourier fitting and Gaussian fitting are applied to the frequency distribution of the disaster and two kinds of precipitation factor. According to the analysis of fitting correlation and the fitting error, Gaussian fitting method is selected to apply to the scattering distribution of precipitation and road damages. Finally, universal probability forecast models of road damages based on effective precipitation (Model I) and comprehensive of the day and effective precipitation (Model II) are established, and the fitting adjustable coefficients are 0.9108 and 0.8333, respectively. According to critical precipitation thresholds of two models, combining the grade of hazards risk and precipitation risk to road damages, two kinds of warning classification scheme based on precipitation are proposed. Two risk forecast models for road damages are developed. Risks of road damages are divided into five levels by probability of damage occurrence: Very small, small, medium, large and very large. Two risk forecast methods are tested, showing they are both applicable to describe the relation between precipitation and road damages, and have a high forecasting accuracy and strong reference value in disaster forecast. In comparison, two models have the same trend and results of Model II are generally greater than Model I in number. In the flood season and disaster-prone period, Model II is more sensitive to subjective forecasts than Model I. The risk forecasting systems of road damages are created for Southwest China based on two methods, and used in risk operation since the end of 2012 achieving good effects.

**Key words:** road damages; risk forecast; probabilistic forecast