

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0148

GAN Weiwei, FAN Jianglin, XIAO Tianguai, et al. Research and establishment of a comprehensive evaluation model of rainstorm process in Sichuan Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(6): 1336–1344. [甘薇薇, 范江琳, 肖天贵, 等. 四川省暴雨过程综合评估模型的研究及建立[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6): 1336–1344.]

# 四川省暴雨过程综合评估模型的研究及建立

甘薇薇<sup>1,3</sup>, 范江琳<sup>2</sup>, 肖天贵<sup>4</sup>, 敬枫蓉<sup>4</sup>, 詹兆渝<sup>3</sup>, 汪 丽<sup>2</sup>

(1. 中国气象局 成都高原气象研究所 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610071; 2. 四川省气象台, 四川 成都 610071; 3. 四川省气候中心, 四川 成都 610071; 4. 成都信息工程大学 大气科学学院, 四川 成都 610225)

**摘 要:** 利用 1961–2013 年四川省 156 个国家级气象观测站的逐日降水资料, 按照暴雨过程的识别标准, 统计得到 851 次暴雨过程。选取了 4 项适用于四川省天气气候特征的暴雨过程评价指标, 依据历史重现期划分出各指标的等级标准, 并利用欧氏距离函数建立了暴雨过程等级评估模型。为能全面反映整个暴雨过程的强度, 构建了一个物理意义清晰的暴雨过程综合强度评估模型。该模型客观地考虑了 4 项指标的权重及其自身变率, 对暴雨过程的描述更加科学。通过对历史暴雨过程进行评估分析, 发现评估结果与历史灾害事件的记载在时间和强度上具有较好的一致性, 评估效果理想, 可满足四川省暴雨天气过程定量评估业务的需求。

**关键词:** 暴雨过程; 历史重现期; 综合强度; 评估模型; 四川

**中图分类号:** P458.1<sup>+</sup>21.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-0240(2017)06-1336-09

## 0 引言

近年来, 在全球气候变化的背景下, 极端降水事件频发, 气象灾害的危险性增强。四川省位于我国西南部, 东西地形地貌迥然不同, 受其复杂地形与大气环流的影响, 全省气象灾害种类繁多, 尤其是以强降水诱发的暴雨洪涝、城乡渍涝、山洪泥石流等最为突出<sup>[1–6]</sup>。2008 年汶川地震后, 地震频发, 地质结构遭到破坏, 地震灾区先后经历了 2008-09-24 北川暴雨泥石流、2010-08-13 汶川–都江堰–绵竹暴雨泥石流、2012-08-17 彭州暴雨泥石流、2013-07-10 汶川特大山洪泥石流等灾害事件, 造成重大人员伤亡和财产损失。灾害发生频率之高、损失之重, 历史罕见。暴雨灾害严重威胁着人民生命财产安全, 制约着经济社会的可持续发展。进行暴雨过程定量评估对于提高应急服务能力及制定抢险救灾决策具有重要意义。

目前, 暴雨过程综合评估方面的工作越来越受

到重视, 气象工作者进行了大量研究<sup>[7–17]</sup>, 并取得了一定的成果, 在暴雨事件评估中常用的方法有统计分析法和主成分分析法<sup>[18–19]</sup>。李春梅等<sup>[20]</sup>利用主成分分析方法确定了广东省暴雨综合影响指标, 并开展了业务应用。马青云等<sup>[21]</sup>应用模糊综合评价法建立了登陆台风暴雨灾害评估模型。郑国等<sup>[22]</sup>采用统计分析方法建立了淮河流域上游的暴雨事件评估模型。袁慧敏等<sup>[23]</sup>通过分析近年来长江中下游沿江地区暴雨致灾的案例, 建立了长江中下游暴雨过程综合评估模型。王博等<sup>[24]</sup>在综合 20 年来国内外气象灾害风险评估方面的相关成果和文献资料的基础上, 对模糊综合评判方法、信息量模型、灰色系统理论和人工神经网络 4 种对暴雨灾害风险评估有借鉴意义的数学评价模型进行了适用性分析。总体来讲, 上述研究在暴雨事件评估方面具有重要的指导作用, 但这些模型均是以当地天气气候背景为基础, 很多指标和方法在四川省特殊的地理气候特征下适用性受到了限制, 而且所选因子较

收稿日期: 2016-10-27; 修订日期: 2017-12-18

基金项目: 中国气象局西南区域气象中心重大科研项目(西南区域 2014-5); 国家自然科学基金项目(91337215; 41575066); 国家科技支撑计划项目(2015BAC03B05); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406015)资助

作者简介: 甘薇薇(1986–), 女, 贵州贵阳人, 工程师, 2011 年在云南大学获硕士学位, 从事短期气候诊断及预测研究。  
E-mail: gww007@126.com.

通信作者: 肖天贵, E-mail: xiaotianguai@cuit.edu.cn.

多,资料获取难度较大。

2015年起,四川省逐步开展了暴雨天气过程的监测与评估业务。由于这项业务较发达地区开展较晚,研究基础也较薄弱,特别是区域性灾害天气过程的量化评估方法的缺乏,制约了该项业务的发展,这也在一定程度上影响了地方政府防灾减灾管理工作。本文正是基于这种业务现状,通过对历史降水资料进行统计分析,建立了一种既客观量化,又方便合理的四川区域性暴雨过程识别方法和综合评估方法,为及时提供防灾减灾服务所需的暴雨洪涝灾前、灾中和灾后监测评估产品提供技术支撑。

1 资料来源及暴雨过程的识别

本文采用四川省气象探测数据中心提供的1961–2013年四川省156个国家级气象观测站的逐日(08:00–08:00)降水数据集,经过了严格的质量控制和错误值订正。暴雨过程的识别标准为:全省范围内,盆地各市和攀西地区(攀枝花市、凉山州)日降水量 $\geq 50\text{ mm}$ ,川西高原(甘孜州、阿坝州)日降水量 $\geq 25\text{ mm}$ ,且相邻成片,认为是一次区域性暴雨过程。上述规定遵循的原则包括:①所选气象观测站中,盆地为104站,川西高原为31站,攀西地区为21站。②相邻条件满足盆地和攀西地区任意两个测站之间经纬间距 $\leq 100\text{ km}$ ,川西高原任意两个测站之间经纬间距 $\leq 150\text{ km}$ 。③全省范围内至少有5个测站满足相邻条件。依据上述标准统计得到,1961–2013年四川省共出现了851次暴雨过程,平均每年出现16次。从业务服务情况来

看,这与历年来四川省气象台发布预警、预警信号及气象信息快报等服务的重大天气过程是比较一致的。

2 暴雨过程等级评估模型

2.1 四川省暴雨过程气候特征

根据四川省暴雨过程识别标准,统计了1961–2013年暴雨过程次数距平的逐年时间序列(图1)。可以看出,暴雨过程存在明显的年代际变化。从19世纪60年代到21世纪,暴雨过程次数存在“偏少–偏多–偏少”的循环变化,年际波动较大,且不存在明显的趋势特征。若以1个标准差为基准来确定异常偏多/偏少年份,研究时段内有6年(1963、1983、1984、1991、1992和1999年)为暴雨过程异常偏多的年份,其中1983年发生了23次暴雨过程,为历史统计之最;有10年(1965、1968、1972、1975、1976、1982、1994、1996、1997、2011年)为异常偏少的年份,其中1996年发生次数最少,仅有10次暴雨过程。从逐月的分布情况(表略)来看,四川省暴雨过程主要出现在4–11月,集中在7–8月。其中,7月251次,占总次数的29%;8月240次,占总次数的28%。开始于1993年7月29日的暴雨过程是日降水量最大的暴雨过程,峨眉山市站日降水量达524.7 mm。从暴雨过程的覆盖范围来看,1973年6月29日至7月1日的暴雨过程覆盖面积最广,全省共有92个站次达到暴雨标准,占总站次的59%。尽管持续性暴雨出现的几率相对较小,但其致灾严重性却不容忽视。2013年6–7月,四川盆地连续出现了3次突破气象历史纪录的暴雨过程,受到了社会各界的广泛关

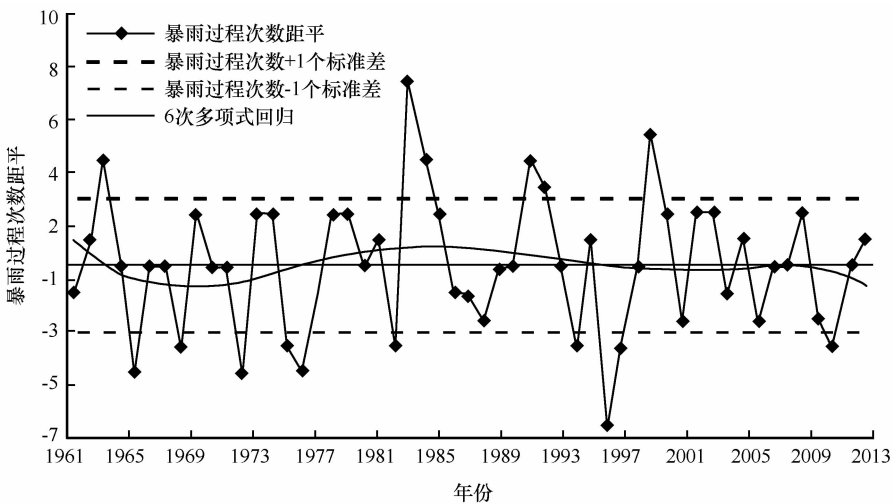


图1 1961–2013年四川省暴雨过程次数距平的年际变化

Fig. 1 Annual variation of occurring times of the rainstorm process in Sichuan Province during 1961–2013

注。这 3 次区域性暴雨过程均具有持续时间长的特点,导致汶川、芦山地震灾区出现了严重的洪涝、滑坡和泥石流,造成了重大的人员伤亡。1998 年 7 月上旬,四川省发生了 1961 年以来持续时间最长的暴雨过程,受冷空气活动和副高的影响,锋面雨带长期徘徊于长江流域,整个暴雨过程持续了 7 天(1998 年 7 月 4 日至 10 日)之久,致使四川盆地暴雨成灾。由此可见,持续时间的长短对灾情有着严重影响,有必要将持续时间这一指标纳入到四川省暴雨过程评估模型之中。

2.2 暴雨过程评估指标的确定

每年由大范围的持续性暴雨导致的洪涝、渍涝、崩塌、滑坡、泥石流和水土流失等灾害已成为四川省经济社会可持续发展的重要制约因素。因此,必须综合考虑四川省暴雨过程的致灾降雨类型<sup>[25-26]</sup>,掌握暴雨过程的强度、范围、持续时间等有效信息,才能增强评估模型的客观性和合理性。笔者选取平均降水量、降水强度、暴雨范围和持续时间作为建立评估模型的 4 项指标,以此衡量暴雨过程的影响程度。

(1) 平均降水量指标  $I_{ave}$

$$I_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{1}$$

式中:  $n$  为达到四川省暴雨过程标准的观测站点总个数;  $P_i$  为第  $i$  个观测站点在暴雨过程中的总降水量(mm)。

(2) 降水强度(最大日降水量)指标  $I_{max}$

$$I_{max} = \max(P_{24i}) \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{2}$$

式中:  $\max()$  为一组值中的最大值;  $P_{24i}$  为第  $i$  个观测站点在暴雨过程中 24 小时的观测降水总量(mm)。

(3) 暴雨范围指标  $I_{cov}$

$$I_{cov} = \frac{n}{N} \tag{3}$$

式中:  $N$  为四川省观测站点总个数;  $n$  为发生暴雨过程不重复(即一次过程多次发生暴雨的站点记为一次)站点总数。

(4) 持续时间  $I_{tim}$

$$I_{tim} = t \tag{4}$$

式中:  $t$  为暴雨过程从开始日至结束日的总持续

天数。

2.3 暴雨过程等级标准评估矩阵的建立

暴雨致灾的影响极为突出,各级政府不仅关心暴雨过程的量值大小,还比较关心其可能性。对于一些重现期较长的暴雨过程,虽然发生几率较小,但是一旦出现就可能造成毁灭性的灾害。因此,对暴雨过程进行异常气候重现期评估是十分必要的,评估结果也具有较强的历史可比性,对灾害管理具有重要的意义<sup>[27]</sup>。

以四川省 851 次暴雨过程的 4 个指标为样本序列,利用历史重现期来划分暴雨过程等级,并进行相应的统计分析。对指标  $I_{ave}$ 、 $I_{max}$ 、 $I_{cov}$  的分析步骤如下: ①将各指标序列设定为  $x_1, x_2, \cdots, x_n$ , 分别对其进行升序排列。②以重现期对每一个指标序列  $x_i$  进行等级划分,则可计算出各级的概率值  $P\{X > x_i\}$  和对应的累积概率值  $F(x) = P\{X \leq x_i\} = 1 - P\{X > x_i\} = i/n$ 。③根据概率分布图的显示,倘若图上正好存在累积概率值  $F(x)$ ,则可直接找到对应的分位点  $x_i$ 。倘若不存在,则要在这个点的前、后各取 4 个点进行拟合,得到相应的拟合公式,从而计算出  $F(x)$  对应的分位点  $x_i$ 。这样的操作是为了保证拟合结果具有较高的精度。

以平均降水量指标序列  $I_{ave}$  为例进行等级划分。统计得到  $I_{ave}$  的平均值为 74.7 mm, 标准差为 13.9 mm, 其指标序列的基本描述如表 1 所示。整个样本年限为 53 年,按照 5 年 1 遇、1 年 1 遇、1 年 2 遇、1 年 5 遇、1 年 10 遇依次将平均降水量指标数据集划分为一级、二级、三级、四级、五级评估等级。所对应的概率值分别为  $P\{X > x_1\} = 0.012$ 、 $P\{X > x_2\} = 0.062$ 、 $P\{X > x_3\} = 0.125$ 、 $P\{X > x_4\} = 0.311$ 、 $P\{X > x_5\} = 0.623$ , 累积概率分别为  $F(x) = P\{X \leq x_1\} = 1 - 0.012 = 0.988$ 、 $F(x) = P\{X \leq x_2\} = 1 - 0.062 = 0.938$ 、 $F(x) = P\{X \leq x_3\} = 1 - 0.125 = 0.875$ 、 $F(x) = P\{X \leq x_4\} = 1 - 0.311 = 0.689$ 、 $F(x) = P\{X \leq x_5\} = 1 - 0.623 = 0.377$ 。对 53 年来所有历史暴雨过程的  $[x, F(x)]$  做拟合,便可得到样本序列  $I_{ave}$  的概率分布[图 2(a)], 根据图中显示,平均降水量指标的 5 个等级分位点分别为 109.6 mm、95.5 mm、90.1 mm、80.2 mm、70.1 mm。

表 1 暴雨过程平均降水量的统计数据  
Table 1 Statistical data of the average precipitation of rainstorm events

暴雨过程次数	平均值/mm	标准差/mm	中位数/mm	最小值/mm	最大值/mm	偏度 $s$	峰度 $k$
851	74.7	13.9	73.9	28.8	144.2	0.3	1.9

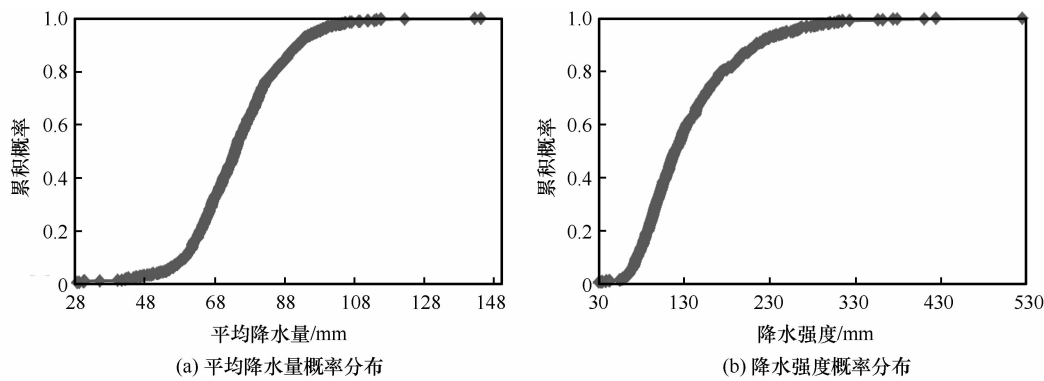


图2 暴雨过程平均降水量(a)与降水强度(b)的概率分布

Fig. 2 Frequency distributions of averaged daily precipitation (a) and maximum daily precipitation (b) of rainstorm events

同上，对降水强度样本序列 $I_{\max}$ 进行统计分析，计算其累积概率，并根据其概率分布[图2(b)]得到5个等级所对应的降水强度分位点，分别为314.7 mm、241.1 mm、206.5 mm、150.2 mm、106.1 mm。

对覆盖范围样本序列 $I_{\text{cov}}$ 进行统计分析，结果如图3(a)所示。通过计算得到5个等级所对应的覆盖范围分位点分别为0.38、0.26、0.21、0.12、0.06。

对于持续时间样本序列 $I_{\text{tim}}$ ，按照2.2节中定义的暴雨事件标准，持续时间为7天、6天、5天、4天、3天、2天、1天的概率分别为0.001、0.001、

0.006、0.028、0.061、0.220、0.683[图3(b)]。按照5个等级对应的概率值为0.012、0.062、0.125、0.311、0.623，可推算出持续时间对应的分位点分别为4、3、2、2、1 d。通过上述一系列的分析，可确定出暴雨过程各单项指标分级标准，如表2所示。

依据表2可以建立四川省暴雨过程等级标准评估矩阵。首先计算表中各评估指标等级范围的中点，将其作为新的分位点来建立矩阵 $P_1$ 。然后分别用矩阵 $P_1$ 中的各分位点除以行向量中最大的分位点便得到矩阵 $P_2$ ，这相当于对矩阵 $P_1$ 中各指标的分位点进行了归一化处理。

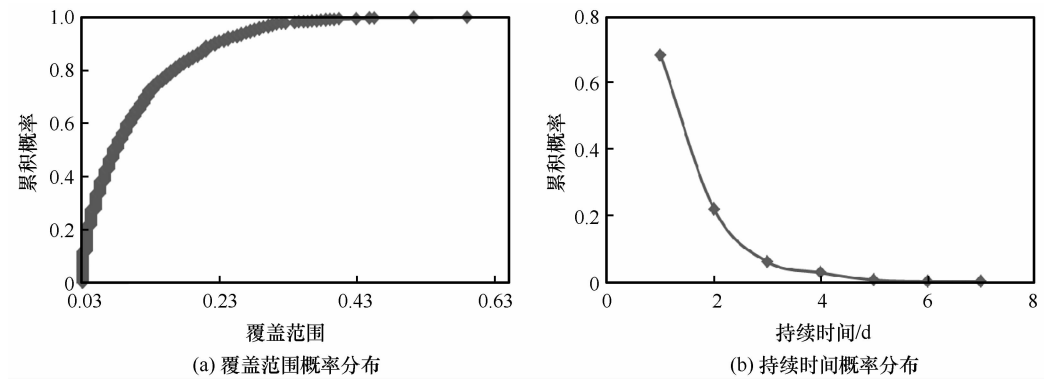


图3 暴雨过程覆盖范围(a)与持续时间(b)的概率分布

Fig. 3 Frequency distributions of coverage range (a) and duration (b) of rainstorm events

表2 各评估指标分级标准						
Table 2 The grading standards of various evaluation indexes						
指标	最小值	五级	四级	三级	二级	一级
平均降水量/mm	28.8	70.1	80.2	90.1	95.5	109.6
降水强度/mm	31.4	106.1	150.2	206.5	241.1	314.7
覆盖范围	0.03	0.06	0.12	0.21	0.26	0.38
持续时间/d	1	1	2	2	3	4

$$P_1 = \begin{pmatrix} 49.43 & 75.14 & 85.14 & 92.81 & 102.55 \\ 68.75 & 128.15 & 178.35 & 223.80 & 277.90 \\ 0.04 & 0.09 & 0.17 & 0.24 & 0.32 \\ 1.05 & 1.40 & 2.09 & 2.79 & 3.79 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$P_2 = \begin{pmatrix} 0.48 & 0.73 & 0.83 & 0.90 & 1.00 \\ 0.25 & 0.46 & 0.64 & 0.81 & 1.00 \\ 0.14 & 0.28 & 0.52 & 0.74 & 1.00 \\ 0.28 & 0.37 & 0.55 & 0.74 & 1.00 \end{pmatrix} \quad (6)$$

2.4 暴雨过程评估等级的确定

四川省暴雨过程等级确定的具体步骤为：①当出现一次暴雨过程时，首先通过 2.2 节公式分别计算出此次暴雨过程的 4 项评估指标，即平均降水量  $I_{ave}$ 、降水强度  $I_{max}$ 、覆盖范围  $I_{cov}$ 、持续时间  $I_{tim}$ ，形如  $I = (I_{ave}, I_{max}, I_{cov}, I_{tim})$ 。②对  $I$  进行归一化处理，即用这 4 个指标分别除以评估矩阵  $P_1$  中的最大分位点使其无量纲化，由此便组成了被评估的无量纲向量  $R = (R_{ave}, R_{max}, R_{cov}, R_{tim})$ ，即

$$\begin{cases} R_{ave} = I_{ave}/102.55 \\ R_{max} = I_{max}/277.9 \\ R_{cov} = I_{cov}/0.32 \\ R_{tim} = I_{tim}/3.79 \end{cases} \quad (7)$$

③将等级标准评估矩阵  $P_2$  中的 5 个等级分别视为 5 个固定列向量，通过计算暴雨过程 4 个指标向量  $R$  到等级标准评估矩阵  $P_2$  中各列向量的欧式距离来确定暴雨过程的等级，即

$$d_j = \sqrt{\sum_{i=1}^4 (R_i - P_{2ij})^2} \quad (j = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (8)$$

若  $d_m = \min_{1 \leq j \leq 5} \{d_j\}$ ，表示被评估的暴雨过程指标向量  $R$  距离等级标准评估矩阵  $P_2$  中的第  $j$  个列向量最近，说明此次暴雨过程距离等级  $j$  最近，可将其划归到等级  $j$ 。

3 暴雨过程综合强度评估模型

对降雨过程的综合强度大小进行快速定量的评估，可为历史降雨过程的案例入库、影响程度排序、演变特征研究等提供科学依据<sup>[28-29]</sup>。通常各项指标的强度越大，暴雨过程越明显，致灾危险性也越大。然而，单用某一指标只能反映暴雨过程的一个侧面，不能全面反映整个暴雨过程的强度。因此，在建立暴雨过程综合强度评估模型时，应考虑不同强度的指标在致灾过程中的综合作用，于是笔者利用 2.2 节中的暴雨过程评估指标定义了一个能够全面反映暴雨过程的综合评估指数  $I_{com}$ 。首先采用吕晓男等<sup>[30]</sup>的研究结果确定出 4 个评估指标的权重系数，即某一指标序列与其余 3 个指标序列分

别计算相关系数，取其平均值后再除以所有指标间两两相关系数平均值的总和，即可得到该指标序列的权重系数。经统计分析，四川省平均降水量、降水强度、暴雨范围和持续时间 4 个指标的权重系数  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  分别为 0.4、0.2、0.3、0.1。可见，在运用综合强度评估模型进行评估时，各指标权重是有所区别的，平均降水量指标的权重相对最大。综上所述分析，四川省暴雨过程综合强度评估模型为

$$I_{com} = A \times R_{ave} + B \times R_{max} + C \times R_{cov} + D \times R_{tim} \quad (9)$$

式中： $I_{com}$  为四川省暴雨过程综合强度指数； $R_{ave}$ 、 $R_{max}$ 、 $R_{cov}$ 、 $R_{tim}$  分别为归一化处理后的平均降水量、降水强度、暴雨范围和持续时间指标值； $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为权重系数。

4 历史暴雨过程评估分析

采用本文所建立的四川省暴雨过程综合评估模型对 1961–2013 年发生的历史暴雨过程进行评估分析，结果如图 4 所示。851 次暴雨过程中，一级 19 次，二级 87 次，三级 130 次，四级 409 次，五级 206 次。不同等级之间暴雨过程频数差异比较明显，有良好的指示意义。其中，48% 以上的暴雨过程集中表现为四级过程，一级过程发生的频数仅占 2%，然而正是这种罕见的持续性暴雨过程造成了非常严重的社会影响。

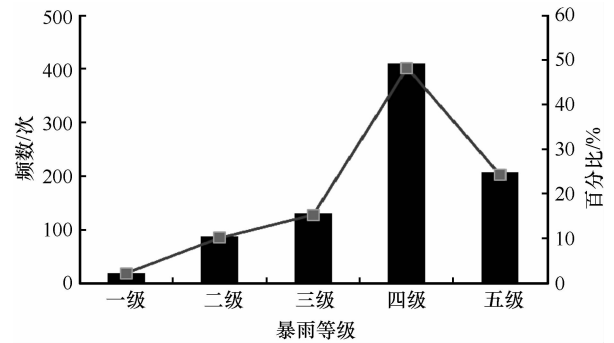


图 4 1961–2013 年四川省暴雨各级频数及其占暴雨过程总次数的百分比  
Fig. 4 The frequency of rainstorm events at all levels (bar) and the percentage in total number of rainstorm events at all levels (line) during 1961–2013

表 3 列举了 1961–2013 年四川省一级暴雨过程的 4 项评估指标和综合强度，并根据综合强度指数由小到大进行了排序。参照四川省政府网站 (<http://www.sc.gov.cn/>)、四川省气象局历史灾害事件的记载以及《中国气象灾害大典·四川卷》<sup>[31]</sup>，表中所列举的 19 次一级暴雨过程中，有历史记录的全省重大暴雨过程事件就达 17 次之多，

表3 1961 – 2013 年四川省一级暴雨过程信息

Table 3 Information of rainstorm processes with composite intensity up to Class I in Sichuan Province during 1961 – 2013					
暴雨起始日期	平均降水量/mm	降水强度/mm	覆盖范围	持续时间/d	综合强度指数
1985-09-12 *	81.5	194.2	0.29	4	0.84
1981-08-16 *	80.6	189.5	0.31	5	0.88
2013-07-16 *	86.4	229.9	0.28	5	0.90
1975-09-03 *	91.4	255.2	0.31	3	0.91
1972-07-08 *	94.8	214.0	0.30	4	0.91
1968-08-02	93.4	222.9	0.34	4	0.95
1992-07-12 *	75.6	206.5	0.45	4	0.97
1983-07-28 *	90.3	218.5	0.38	4	0.97
1987-07-17 *	87.9	207.3	0.40	4	0.97
1983-08-17	87.9	314.7	0.35	3	0.97
2010-07-15 *	95.2	257.6	0.35	4	0.99
2013-07-08 *	100.5	423.8	0.24	3	1.00
1993-07-29 *	102.8	524.7	0.28	2	1.04
1987-06-24 *	97.2	286.6	0.40	4	1.07
1961-06-24 *	91.3	306.0	0.38	6	1.10
1973-06-29 *	84.8	202.0	0.59	3	1.11
2010-08-19 *	92.5	292.5	0.46	5	1.13
1998-07-04 *	81.7	356.6	0.45	7	1.18
1981-07-10 *	103.8	299.6	0.51	5	1.23

注：\* 表示与四川省政府网站、《中国气象灾害大典·四川卷》和四川省气象局历史灾害事件记载相吻合的暴雨过程。

占到一级统计次数的 89%。这说明表中的结果与历史重大暴雨过程在时间和强度上具有较好的一致性，尤其是表中排在后 5 位的暴雨均是造成国民经济和人民生命财产巨大损失的持续性暴雨或大暴雨过程。其中，1981 年 7 月 10 日至 14 日的暴雨过程是综合强度最强的一次过程，据相关记载<sup>[31]</sup>，该时段内四川省出现了自 1949 年以来最大的暴雨天气过程，不论其降雨范围、强度、洪水的大小以及危害程度均是历史上罕见的。根据所建立的评估指标，此次暴雨过程中全省共出现了 80 个站次的暴雨，日最大降水量达 299.6 mm，覆盖范围达 51% 的站点，持续时间长达 5 天之多，对农业、经济社会和人民生命财产均造成了巨大的影响。2013 年夏季，四川暴雨灾害频发，其中发生在 7 月 8 日至 10 日的持续强降水过程备受社会关注。运用本文的研究成果识别出此次暴雨过程为 1 次一级暴雨过程，其综合强度指数高达 1.0。据省民政厅统计，这次暴雨共造成 15 个市州的 96 个县不同程度受灾，受灾人口达 344.4 万人，农作物受灾面积为

15.65 万公顷，农房倒塌 13 114 间，直接经济损失 200.8 亿元。可见，模型在实际业务中运行效果理想。这进一步显示出本文所研制的建模方法和等级划分合理，可以满足四川省暴雨天气过程快速、及时评估等气象服务的需求。

### 5 结论

本文旨在单纯采用气象数据对四川省暴雨过程进行综合评估，通过实际检验，评估效果良好。结果表明：

- (1) 按本文确立的暴雨过程挑选标准，1961 – 2013 年四川省共出现了 851 次暴雨过程，且主要集中在 7 – 8 月；通过对暴雨致灾案例的分析，暴雨过程中持续时间的长短对灾情有着重要的影响。
- (2) 对 851 次暴雨过程进行统计分析，选取了平均降水量、降水强度、覆盖范围和持续时间 4 个指标，按概率分布划分出 4 个指标的各等级标准，建立了无量纲化的暴雨过程等级标准评估矩阵，最后利用欧氏距离函数确定了暴雨过程的评估等级。

(3) 构建了四川省暴雨过程的综合强度评估模型。模型客观地考虑了 4 个指标的权重及其自身变率,对暴雨过程的描述更加全面。

(4) 通过对历史重大暴雨过程验证表明,本研究采用的建模方法和评估等级划分合理。

本文所建立的暴雨过程综合评估模型主要是对暴雨事件本身进行评估,而对暴雨灾害影响评估的研究,由于成灾机制复杂、涉及因素众多,有待于在今后的工作中陆续探讨。

**致谢:** 本文部分内容来源于第 32 届中国气象学会年会论文《四川省暴雨过程评估方法研究》,对论文撰写过程中提供帮助的老师和同学表示衷心的感谢。

## 参考文献 (References):

- [1] Zhang Shunqian, Ma Zhenfeng. Change tendency and cyclicity analysis of extreme precipitation over Sichuan Province during 1961–2009[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(11): 1918–1929. [张顺谦, 马振峰. 1961–2009 年四川计算强降水变化趋势与周期性分析[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(11): 1918–1929.]
- [2] Yu Shuhua. Analysis on spatial-temporal characteristics of mud-rock flow and landslide in Sichuan Basin and its meteorological cause[J]. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(Suppl 1): 83–89. [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(增刊1): 83–89.]
- [3] Chen Chaoping, Feng Hanzhong, Chen Jing. Application of Sichuan heavy rainfall ensemble prediction probability products based on Bayesian method[J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(5): 32–39. [陈朝平, 冯汉中, 陈静. 基于贝叶斯方法的四川暴雨集合概率预报产品释用[J]. *气象*, 2010, 36(5): 32–39.]
- [4] Shi Rui, Chen Yongren, Xiao Hongru. Comparative analysis of continuous rainstorm in Sichuan Basin in 2013[J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2014, 34(4): 11–15. [师锐, 陈永仁, 肖红茹. 2013 年四川盆地持续性特大暴雨过程对比分析[J]. *高原山地气象研究*, 2014, 34(4): 11–15.]
- [5] Wang Min, Sun Shujun. Analysis on the meteorological causes of the “July 23” extreme mudflow in Ganzi, Sichuan Province and countermeasures[J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2009, 29(4): 77–80. [王敏, 孙树峻. 甘孜州“7.23”特大泥石流灾害气象成因分析及防御对策研究[J]. *高原山地气象研究*, 2009, 29(4): 77–80.]
- [6] Qing Qingtao, Chen Wenxiu, Zhan Zhaoyu. Characteristics of spatial and temporal distribution of losses caused by flood damage[J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2013, 33(1): 47–51. [卿清涛, 陈文秀, 詹兆渝. 四川省暴雨洪涝灾害损失时空演变特征分析[J]. *高原山地气象研究*, 2013, 33(1): 47–51.]
- [7] Wan Jun, Zhou Yuehua, Wang Yingying, et al. Flood disaster and risk evaluation approach based on the GIS in Hubei Province[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2007, 26(4): 328–333. [万君, 周月华, 王迎迎, 等. 基于 GIS 的湖北省区域洪涝灾害风险评估方法研究[J]. *暴雨灾害*, 2007, 26(4): 328–333.]
- [8] Xi Zhuxiang, Zhang Chenchen, Lü Zhong, et al. The risk pre-estimation of the flood casualty loss caused by heavy rainstorm in Jilin Province[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(2): 395–401. [袭祝香, 张晨琛, 吕忠, 等. 吉林省重大暴雨过程灾害损失风险预评估[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(2): 395–401.]
- [9] Liu Weidong, Hu Haibo, Cheng Conglan, et al. Application of grey correlation degree to disaster loss evaluation of strong wind and heavy rainfall[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2007, 35(4): 563–566. [刘伟东, 扈海波, 程丛兰. 灰色关联度方法在大风和暴雨灾害损失评估中的应用[J]. *气象科技*, 2007, 35(4): 563–566.]
- [10] Zhang Yongheng, Fan Guangzhou, Ma Qingyun, et al. The evaluation model of typhoon disaster influence on Zhejiang Province[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(6): 772–776. [张永恒, 范广洲, 马清云, 等. 浙江省台风灾害影响评估模型[J]. *应用气象学报*, 2009, 20(6): 772–776.]
- [11] Ren Yu, Li Mingcai, Guo Jun, et al. The estimation and application of design rainstorm intensity in Tianjin area[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2012, 23(3): 364–368. [任雨, 李明财, 郭军, 等. 天津地区设计暴雨强度的推算与适用[J]. *应用气象学报*, 2012, 23(3): 364–368.]
- [12] Zhu Jian, Huang Yuying. An analysis of flood characteristics and discharge peak modulus on “August 29” catastrophic flood event in the Juntanghu River basin on the north slope of the Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(3): 811–817. [朱健, 黄玉英. 新疆天山北坡军塘湖河流域“8·29”特大洪水特征与洪峰模数分析[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(3): 811–817.]
- [13] Tu Nini, Duan Wei. The heavy rainfall event over Sichuan Basin during 4–5 September 2006[J]. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(7): 51–60. [屠妮妮, 段玮. 2006 年 9 月 4–5 日四川暴雨过程分析[J]. *气象*, 2008, 34(7): 51–60.]
- [14] Yang Jinhui, Li Yaohui, Wang Pengxiang. Analysis on intra-annual inhomogeneity characteristic of extreme strong precipitation events in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(4): 623–633. [杨金虎, 李耀辉, 王鹏祥. 中国极端强降水事件年内非均匀性特征分析[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(4): 623–633.]
- [15] Chen Yanqiu, Yuan Zipeng, Sheng Yong, et al. An assessment method of torrential rain event in Liaoning Province[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2007, 27(6): 626–632. [陈艳秋, 袁子鹏, 盛永, 等. 辽宁暴雨事件影响的预评估和灾后速评估[J]. *气象科学*, 2007, 27(6): 626–632.]
- [16] Mao Shujun, Li Dongliang. Comprehensive assessment of low temperature, snow and freezing weather in southern China based on meteorological elements[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 14–26. [毛淑君, 李栋梁. 基于气象要素的我国南方低温雨雪冰冻综合评估[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 14–26.]
- [17] Xi Zhuxiang. Evaluation methods of heavy rainfall events in Jilin Province[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2008, 36(1): 78–81. [袭祝香. 吉林省重大暴雨过程评估方法研究[J]. *气象科技*, 2008, 36(1): 78–81.]
- [18] Huang Jiayou. Meteorological statistical analysis and forecast method[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2000: 121–142. [黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 121–142.]

- [19] Shi Neng. Multivariate analysis methods in meteorological research and forecast[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995: 41–43. [施能. 气象科研与预报中的多元分析方法[M]. 北京: 气象出版社, 1995: 41–43.]
- [20] Li Chunmei, Liu Jinlun, Pan Weijuan. Integrated index for rainstorm impact and its application in disaster assessment[J]. Guangdong Meteorology, 2008, 30(4): 1–4. [李春梅, 刘锦奎, 潘蔚娟. 暴雨综合影响指标及其在灾情评估中的应用[J]. 广东气象, 2008, 30(4): 1–4.]
- [21] Ma Qingyun, Li Jiaying, Wang Xiurong, et al. A fuzzy synthetic evaluation model for typhoon disaster[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(5): 20–25. [马青云, 李佳英, 王秀荣, 等. 基于模糊综合评价法的登陆台风暴雨灾害影响评估模型[J]. 气象, 2008, 34(5): 20–25.]
- [22] Zheng Guo, Xue Jianjun, Fan Guangzhou, et al. Torrential rain events assessment model for the upstream of the Huaihe River basin[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(6): 753–759. [郑国, 薛建军, 范广洲, 等. 淮河上游暴雨事件评估模型[J]. 应用气象学报, 2011, 22(6): 753–759.]
- [23] Yuan Huimin, Wang Xiurong, Fan Guangzhou, et al. Rainstorm process composite assessment model and application along the middle and lower reaches of Changjiang River[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(10): 1189–1195. [袁慧敏, 王秀荣, 范广洲, 等. 长江中下游沿江地区暴雨过程综合评估模型及应用[J]. 气象, 2012, 38(10): 1189–1195.]
- [24] Wang Bo, Cui Chunguang, Peng Tao, et al. Advance and the status of the research on rainstorm disaster assessment and regionalization[J]. Torrential Rain and Disasters, 2007, 26(3): 281–286. [王博, 崔春光, 彭涛, 等. 暴雨灾害风险评估与区划的研究现状与进展[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(3): 281–286.]
- [25] Chen Bei, Gao Wenliang. The heavy rainstorm climate characteristic analysis in southwest Sichuan[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2014, 34(2): 39–43. [陈贝, 高文良. 川西南地区大暴雨气候特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2014, 34(2): 39–43.]
- [26] Zhang Han, Guo Xiang, Wang Ruiting, et al. Research on rainstorm and flood disaster risk zoning in Sichuan Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(26): 165–171. [张涵, 郭翔, 王锐婷, 等. 四川省暴雨洪涝灾害风险区划研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(26): 165–171.]
- [27] Ma Jingjin, Li Shuyan, Wang Ji. Study on the regionalization and recurrence period of heavy rainfall in Beijing City[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(5): 569–576. [马京津, 李书严, 王冀. 北京市强降雨分区及重现期研究[J]. 气象, 2012, 38(5): 569–576.]
- [28] Wang Liping, Wang Xiurong, Wang Weiguo. Research and application of comprehensive strength assessment method for regional precipitation process in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(2): 186–194. [王莉萍, 王秀荣, 王维国. 中国区域降水过程综合强度评估方法研究及应用[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(2): 186–194.]
- [29] Yu Li, Li Kerang, Tao Bo. Assessment on ecosystem vulnerability to extreme precipitation in the upper and middle Yangtze valley[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(1): 82–89. [於琨, 李克让, 陶波. 长江中下游区域生态系统对极端降水的脆弱性评估研究[J]. 自然资源学报, 2012, 27(1): 82–89.]
- [30] Lü Xiaonan, Lu Yunfu. Preliminary studies on the integrated evaluation of soil nutrient fertility[J]. Journal of Zhejiang University, 1999, 25(4): 378–382. [吕晓男, 陆允甫. 土壤肥力综合评价初步研究[J]. 浙江大学学报, 1999, 25(4): 378–382.]
- [31] Zhan Zhaoyu. Encyclopedia of meteorological disasters in China: Sichuan[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006. [詹兆渝. 中国气象灾害大典: 四川卷[M]. 北京: 气象出版社, 2006.]



Research and establishment of a comprehensive evaluation model  
of rainstorm process in Sichuan Province

GAN Weiwei<sup>1,3</sup>, FAN Jianglin<sup>2</sup>, XIAO Tiangui<sup>4</sup>, JING Fengrong<sup>4</sup>,  
ZHAN Zhaoyu<sup>3</sup>, WANG Li<sup>2</sup>

( 1. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin, Key Laboratory of Sichuan Province, Institute of Plateau Meteorology of  
China Meteorological Administration, Chengdu 610071, China; 2. Sichuan Provincial Meteorological Observatory,  
Chengdu 610071, China; 3. Sichuan Climate Center, Chengdu 610071, China; 4. College of Atmospheric  
Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China )

**Abstract:** According to a selection criteria of rainstorm process, there were 851 precipitation processes counted as rainstorm events by using the national meteorological observation from 156 stations in Sichuan Province during 1961 – 2013. Four indications, which were suitable for weather climate characteristics of the province, were selected to describe the torrential rain events. According to the historical return period and using the method of the Euclidean distance function, the rainstorm event evaluation model in Sichuan Province was established. A comprehensive evaluation model of the rainstorm process with clear physical significance was built to fully reflect the intensity of rainstorm process. The model has objectively considered the weight of the four indicators and their own changing rate, able to describe the process of rainstorm more scientifically. Through the evaluation and analysis of the historical rainstorm events, it is found that the evaluation result is consistent with the records of historical disasters in time and intensity. The evaluation effect is satisfactory, which can meet the demand of quantitative evaluation of rainstorm weather process in the province.

**Key words:** rainstorm process; historical return period; composite intensity; evaluation model; Sichuan

( 本文编辑：武俊杰 )