

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.

# 长江中下游沿江地区暴雨过程 综合评估模型及应用<sup>\*1</sup>

袁慧敏<sup>1</sup> 王秀荣<sup>2</sup> 范广洲<sup>3</sup> 李泽椿<sup>2</sup>

1 内蒙古气象台,呼和浩特 010051

2 国家气象中心,北京 100081

3 成都信息工程学院大气科学学院,高原大气与环境四川省重点实验室,成都 610225

**提 要:** 选取长江中下游沿江地区 87 个站点,利用 1957—2007 年中国高密度台站地面日降水资料,对长江中下游沿江地区暴雨过程的历史资料进行统计分析,建立长江中下游沿江地区暴雨过程综合评估模型。首先选取平均降水量、降水强度、覆盖范围和持续时间 4 个指标,并对每个指标进行了正态化转化或  $\Gamma$  分布拟合,然后利用相应的分布概率密度函数的反函数确定数年一遇的概率等级作为等级标准,将长江中下游沿江地区的暴雨过程划分为 5 个等级,最终运用权重分析法建立了暴雨过程综合评估模型。应用此模型对 1999 年 6—8 月的 5 次暴雨过程进行了试评估,结果表明,该模型评估效果较好,可以在实际业务中应用。

**关键词:** 暴雨评估,  $\gamma$  ( $\Gamma$ ) 分布, 重现期, 评估模型

## Rainstorm Process Composite Assessment Model and Application Along the Middle and Lower Reaches of Changjiang River

YUAN Huimin<sup>1</sup> WANG Xiurong<sup>2</sup> FAN Guangzhou<sup>3</sup> LI Zechun<sup>2</sup>

1 Inner Mongolia Meteorological Observatory, Hohhot 010051

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

3 Center for Plateau Atmospheric Environmental Research, Atmospheric Sciences Institute, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

**Abstract:** Based on the 87 stations selected along middle and lower reaches of the Changjiang River, and high-density surface meteorological precipitation daily data during 1957—2007, the statistical methods are used to analyze the rainstorm process, and establish a rainstorm process impact assessment model. First select average rainfall, rainfall intensity, coverage and duration as four indicators, each indicator uses the normal transformation or gamma distribution to fit, then uses the appropriate distribution's inverse function of probability density function to determine the theoretical values of return period as the grade level standards, which can be divided into five levels. Finally, a composite assessment model of rainstorm process is set up. In this paper the model is applied to assessment of five rainstorm processes from the end of June to August in 1999, and the results show that the effect is good, and can be put into operation.

**Key words:** rainstorm assessment, gamma ( $\Gamma$ ) distribution, return period, assessment model

\* 质检公益性行业科研专项(200810588)和国家科技支撑计划项目(2008BAC44B03)共同资助  
2011年9月25日收稿; 2012年8月8日收修定稿  
第一作者: 袁慧敏,主要从事气象灾害评估. Email:124862314@qq.com

## 引言

我国是气象灾害多发、频发国家之一,其中暴雨引发的灾害占气象灾害中很大的比重,针对暴雨灾害风险所开展的评估与区划研究工作日益受到相关科技工作者和政府部门的重视。目前,国内不少学者或专业人员在暴雨灾害风险评估方面进行了尝试,并取得大量的成果,如国家气象中心应用模糊综合评价法建立了登陆台风暴雨灾害影响评估模型,通过对隶属函数的选取,来定量描述台风暴雨灾害及其次生灾害发生的程度<sup>[1]</sup>;广东利用层次分析法建立了广东省热带气旋影响评估模式和系统,同时利用主成分分析方法建立了暴雨灾害评估模型,并开展了应用服务<sup>[2]</sup>;上海利用 AQ 指数(统计分析)法建立台风暴雨灾情评估标准及预评估系统<sup>[3]</sup>;辽宁利用统计分析法建立暴雨定量评估模型<sup>[4]</sup>。

长江中下游沿江地区是我国暴雨灾害频发地区,同时又是经济最发达的地区之一,人口众多,城市密集,做好该地区暴雨评估或预评估工作,可以更好地为防灾减灾服务。分析近年来暴雨致灾的案例<sup>[5-6]</sup>,得出致灾降雨类型主要有:区域性持续性降雨、局地短时强降雨、间歇性强降雨。可见,暴雨类气象灾害与降雨量、降雨强度、覆盖范围和持续时间密切相关,因此本文选取定义了这 4 个指标,通过统计方法建立了长江中下游沿江地区的暴雨过程综合等级评估模型,以期通过该模型对历史暴雨过程进行评估或互相比对,或者运用该模型并结合预报产品对未来可能发生的暴雨过程综合等级进行预评估。

## 1 资料选取与标准建立

本文利用国家气象信息中心提供的 1957—2007 年中国高密度台站地面基本气象数据集(基本基准站)中的日降水资料,选取长江中下游沿江地区南北 0.5 个纬度范围内 87 个站点进行研究<sup>[7]</sup>。暴雨过程的挑选标准为:(1)选取范围内至少有 10 个站点 24 小时降水量  $\geq 50.0$  mm;(2)将选取范围内满足条件(1)的前后日内至少 5 个站的 24 小时降水量  $\geq 25.0$  mm 作为其持续时间的累加标准。按照以上标准,选取出 1957—2007 年共 372 次暴雨过程。

## 2 暴雨过程评估指标的确立

考虑长江中下游地区暴雨特点,选择如下 4 个指标作为要建立的评估模型指标<sup>[8]</sup>。

### 2.1 平均降水量 ( $I_{\text{pre}}$ )

$$I_{\text{pre}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (1)$$

式中, $n$  为评估区域内降水量达到暴雨标准的观测站点个数, $P_j$  为其中第  $j$  个观测站点在被评估事件中的总降水量(单位:mm)。

### 2.2 降水强度极值 ( $I_{\text{pin}}$ )

$$I_{\text{pin}} = \max(P_{24j}), \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

式中, $\max(\cdot)$  为取最大值函数, $P_{24j}$  为第  $j$  个观测站点在暴雨过程中最大的 24 h 观测降水量(单位:mm)。

### 2.3 覆盖范围指标 ( $I_{\text{cov}}$ )

$$I_{\text{cov}} = \frac{n}{N} \quad (3)$$

式中, $N$  为评估区域内观测站点总数(单位:个)。

### 2.4 持续时间 ( $I_{\text{dat}}$ )

$$I_{\text{dat}} = m \quad (4)$$

式中, $m$  为区域性暴雨过程的持续时间(单位:d)。

## 3 确定给定重现期对应理论值的方法

暴雨所引发的自然灾害是较常见的,对于一些重现期很长,如百年一遇的特大暴雨,虽然发生的几率小,但若出现则可能造成毁灭性的灾害,因此暴雨等级的确立需依据给定重现期的降水极值。 $\Gamma$  分布(Pearson-III, 3-parameter gamma)<sup>[9]</sup> 型概率分布曲线能较好地拟合许多地区的暴雨频数分布,本文主要使用该方法计算长江中下游沿江地区年最大日雨量分布,并通过求对应分布函数的反函数确定给定重现期的对应理论值(正态分布方法类似,故省略)。

$\Gamma$  分布(Pearson-III 分布)具有广泛的概括和模拟能力,在气象上常用来拟合年、月的最大风速和最大日降水量等极值分布<sup>[10]</sup>。其概率密度函数和保证率分布函数分别为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)}(x - x_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-x_0)} \quad \alpha \geq 0, x \geq x_0 \quad (5)$$

$$P(x \geq x_p) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{x_p}^{\infty} (x - x_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-x_0)} dx \quad (6)$$

式中,参数  $x_0$  为随机变量  $x$  所能取的最小值, $\alpha$  称为形状参数, $\beta$  为尺度参数, $\Gamma(\alpha)$  是  $\alpha$  的伽玛函数。用矩法可得 3 个参数的表达式:

$$\alpha = 4/c_s^2 \quad (7)$$

$$\beta = 2/\sigma c_s \quad (8)$$

$$x_0 = m \left( 1 - \frac{2c_v}{c_s} \right) \quad (9)$$

式中, $m$  为数学期望, $\sigma$  为均方差, $c_s$  为偏态系数, $c_v$  为变差系数。利用  $\Gamma$  分布的两个函数,通过求其反函数  $x, x = \text{GAMMAINV}(1 - P, \alpha, 1/\beta) + x_0$ , 用

于求某一概率  $P$  相对应的  $x$  的理论值。

## 4 资料处理

### 4.1 暴雨过程平均降水量指标 ( $I_{pre}$ )

#### 4.1.1 暴雨过程平均降水量指标的概率分布

通过统计分析历史中 372 次暴雨过程,可得暴雨过程平均降水量数据集的平均值为 87.34 mm, 标准差为 29.4630 mm,其数据集的基本描述如表 1 所示。其频率分布及概率纸检验结果如图 1 所示。从图中可以看出数据集的数值呈正偏态分布,需要进行某种正态化的变换。

表 1 暴雨过程平均降水量 ( $I_{pre}$ ) 数据特征

Table 1 The characteristics of average rainfall data

名称	暴雨过程 $N$ /次	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 $k$
值	372	87.3391	29.4630	79.19	54.98	320.01	2.94456	14.1672

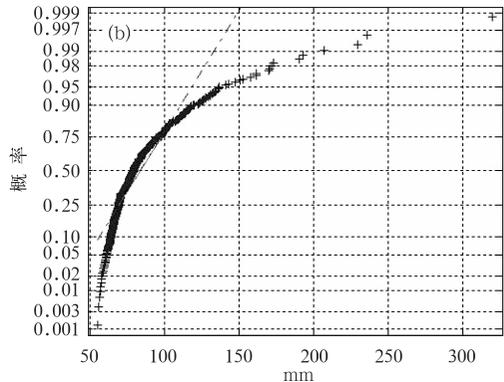
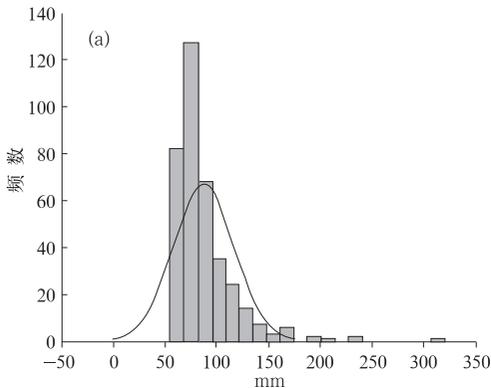


图 1 暴雨过程平均降水量指标频数分布(a)和概率纸检验结果(b)

Fig. 1 Frequency distribution of average rainfall index (a) and the probability paper test results (b)

基于 Minitab 的拟合优度检验结果显示(图略),Johnson 变换的概率远远大于其他,因此选择 Johnson 转换。Johnson 变换函数是从 Johnson 系统中三种类型函数中选择一个最优函数,它们可以轻松地变换为标准正态分布。

Johnson 转换体系,以随机变量  $x$  代表任一暴雨过程指标,则 Johnson 转换体系由以下三种转换形式组成:

(1)有界转换  $S_B$

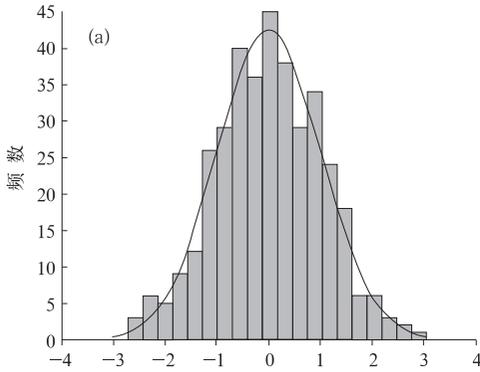
$$Z = \gamma + \eta \ln \left( \frac{X - \epsilon}{\lambda + \epsilon - X} \right) \begin{cases} \eta, \lambda > 0 \\ -\infty < \gamma < \infty \\ -\infty < \epsilon < \infty \end{cases} \quad \epsilon < X < \epsilon + \lambda \quad (10)$$

(2)对数正态转换  $S_L$

$$Z = \gamma + \eta \ln(X - \epsilon) \begin{cases} \eta > 0 \\ -\infty < \gamma < \infty \\ -\infty < \epsilon < \infty \end{cases} \quad X > \epsilon \quad (11)$$

(3) 无界转换  $S_U$

$$Z = \gamma + \eta \sin \ln^{-1} \left( \frac{X - \epsilon}{\lambda} \right) \begin{cases} \eta, \lambda > 0 \\ -\infty < \gamma < \infty \\ -\infty < \epsilon < \infty \end{cases} \\ -\infty < X < \infty \quad (12)$$



式中,  $\epsilon$  和  $\gamma$  为位置控制参数,  $\lambda$  和  $\eta$  为标度参数(一般为正)。

Johnson 变换后暴雨过程的平均降水量指标频数分布及概率纸检验如图 2 所示。

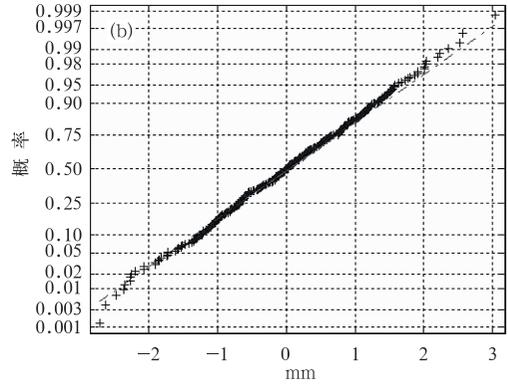


图 2 Johnson 变换后平均降水量指标的频数分布(a)以及概率纸检验图(b)

Fig. 2 Frequency distribution of average rainfall index (a) and the probability paper test results (b) after Johnson transformation

4.1.2 计算给定重现期的平均降水量指标的理论值

因为上述数据通过变换符合正态分布。因此在确定对应重现期的理论值时要考虑 Johnson 变换, Johnson 变换后数据的平均值  $m = -0.005$ 、标准差  $\sigma = 1.011$ , 通过计算给定均值与标准差下正态分布的反函数确定对应给定重现期的理论值, 其语法为:  $x = \text{NORMINV}(1 - p, m, \sigma)$ , 输入各种概率  $P$ , 即可算出对应的年最大暴雨过程平均降水量 ( $I_{pre}$ ) 的理论值  $x$  的 Johnson 变换值, 转换为对应的实际数据, 由此可确定 100、10、5、2 和 1 年一遇的暴雨过程平均降水量的理论值分别为 206.2299、122.5288、100.1875、75.8150 和 67.2488 (单位: mm)。

4.2 暴雨过程降水强度指标 ( $I_{pin}$ )

4.2.1 暴雨过程降水强度指标的概率分布

由于大多数的天气气候极值(或极端事件)往往出现于非正态时间序列(如各种短时间尺度降水量、降水日数、旱涝指数或暴雨、冰雹、大风等)中, 仅仅用正态序列的极值诊断公式来估计其特征量, 可能产生较大误差, 因此为了避免用偏离实际天气气候状态的指标来分析天气气候极值变化规律, 近来国外开始采用  $\Gamma$  分布百分位数指标来描述降水量的变化<sup>[11-13]</sup>。

基于 Minitab 的拟合优度检验结果显示, 暴雨过程降水强度指标的三参数  $\Gamma$  分布拟合最佳, 基于 Matlab 使用极大似然法估计出的参数值分别为:  $\alpha = 6.7758, \beta = 20.7760$ , 95% 的置信区间分别为: (5.6915, 17.8971), (7.8601, 23.6549), 置信水平为 0.05。

4.2.2 计算给定重现期对应的降水强度指标理论值

暴雨过程降水强度指标 ( $I_{pin}$ ) 符合  $\Gamma$  分布(图 3),

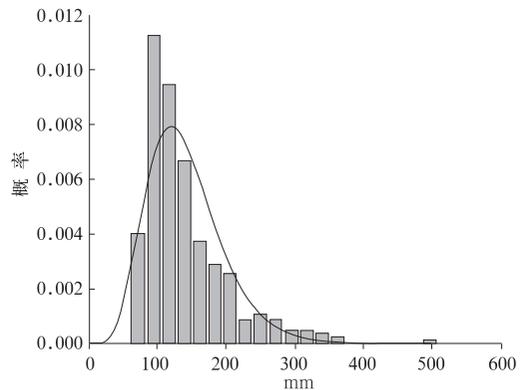


图 3 暴雨过程降水强度指标对应的  $\Gamma$  分布拟合图

Fig. 3 Rainfall intensity corresponding to the gamma distribution fitting

$\Gamma$  分布给定重现期求对应理论值的方法见 3.1, 计算可得  $m=140.7745, \sigma=60.9294, c_v=0.4328, c_s=1.7778, \alpha=1.2656, \beta=0.0185, x_0=72.2323$ , 由此可确定 100、10、5、2 和 1 年一遇的降水强度指标的理论值分别为 353.2573、221.1476、180.1998、123.8055 和 72.2323(单位:mm)。

### 4.3 暴雨过程覆盖范围指标 ( $I_{cov}$ )

#### 4.3.1 暴雨过程覆盖范围指标的概率分布

同理, Minitab 的拟合优度检验结果显示, 暴雨过程覆盖范围指标 ( $I_{cov}$ ) 的三参数  $\Gamma$  拟合更优(图 4), 使用极大似然法估计出的参数值分别为:  $\alpha=4.2137, \beta=0.0647, 95\%$  的置信区间分别为: (3.3990, 0.0529), (5.0284, 0.0764), 置信水平为 0.05。

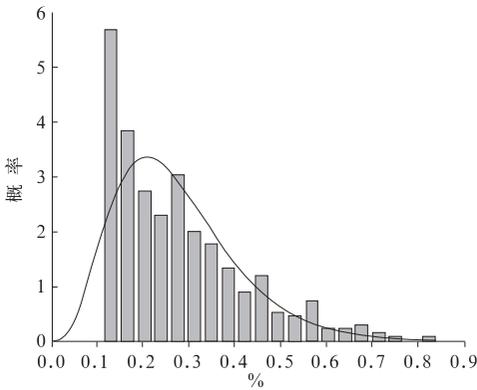


图 4 暴雨过程覆盖范围指标  
对应  $\Gamma$  分布拟合图

Fig. 4 Coverage index corresponding  
to the gamma distribution fitting

#### 4.3.2 计算给定重现期对应的覆盖范围理论值

方法同上, 计算可得  $m=0.2724, \sigma=0.1422, c_v=0.5220, c_s=1.1481, \alpha=3.0345, \beta=12.2481, x_0=0.0247$ , 由此可确定 100、10、5、2 和 1 年一遇的暴雨过程覆盖范围指标 ( $I_{cov}$ ) 的理论值分别为 0.7154、0.4629、0.3774、0.2457 和 0.0247(单位: 100%)。

### 4.4 暴雨过程持续时间指标 ( $I_{dat}$ )

#### 4.4.1 暴雨过程持续时间指标的概率分布

同样, 暴雨过程持续时间指标 ( $I_{dat}$ ) 的拟合优度检验结果显示三参数  $\Gamma$  分布拟合方法最优(图 5), 使用极大似然法估计出的参数值分别为:

$\alpha=3.9470, \beta=0.4577, 95\%$  的置信区间分别为: (3.2513, 0.3891), (4.6428, 0.5262), 置信水平为 0.05。

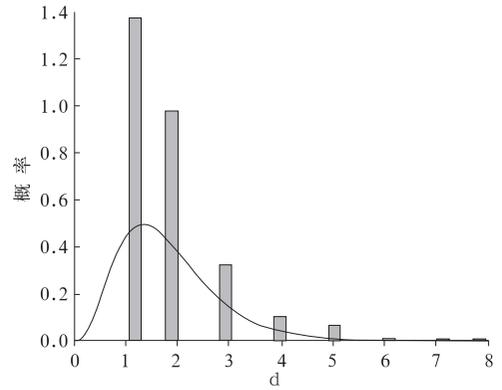


图 5 暴雨过程持续时间指标 ( $I_{dat}$ )  
对应  $\Gamma$  分布拟合图

Fig. 5 Duration index corresponding  
to the gamma distribution fitting

#### 4.4.2 计算给定指标 ( $I_{dat}$ ) 重现期的对应理论值

重现期计算方法同上, 计算可得均值  $m=2$ , 均方差  $\sigma=1.0488, c_v=0.5806, c_s=1.9365, \alpha=1.0667, \beta=0.9848, x_0=0.7233$ , 由此可确定 100、10、5、2 和 1 年一遇的暴雨过程持续时间指标 ( $I_{dat}$ ) 的理论值分别为 5.55、3.18、2.46、1.49 和 0.72(单位:d)。

### 4.5 权重系数的确定

通过以上分析, 可确定暴雨过程单项指标评估标准如表 2 所示。

建立无量纲化的等级标准矩阵  $A^* = (a_{kt}^*) (k=1, 2, 3; t=1, 2, 3, 4)$ , 其中  $a_{kt}^*$  为第  $k$  个指标第  $t$  级的标准与一级标准的比值:

$$A^* = \begin{pmatrix} 0.3261 & 0.3676 & 0.4858 & 0.5941 & 1 \\ 0.2045 & 0.3505 & 0.5101 & 0.6260 & 1 \\ 0.0345 & 0.3434 & 0.5275 & 0.6471 & 1 \\ 0.1297 & 0.2685 & 0.4432 & 0.5730 & 1 \end{pmatrix}$$

计算矩阵  $A^*$  的各行向量的标准差  $s_i^*$  与均值  $\mu_i^*$ , 然后计算变异系数  $w_i^*$

$$w_i^* = s_i^* / \mu_i^* \quad (i=1, 2, 3) \quad (13)$$

变异系数可代表个指标的权重<sup>[14]</sup>。归一化后各指标的权向量为

$$w = [0.1991 \quad 0.2306 \quad 0.2869 \quad 0.2834]$$

这说明应用初步标准进行评估时, 各指标所占

表 2 暴雨过程单项指标评估初步标准  
Table 2 Single indicator assessment standards of rainstorm process

评估指标/年	1	2	5	10	100
平均降水量/mm	67.2488	75.8150	100.1875	122.5288	206.2299
降水强度/mm	72.2323	123.8055	180.1998	221.1476	353.2573
覆盖范围/100%	0.0247	0.2457	0.3774	0.4629	0.7154
持续时间/d	0.72	1.49	2.46	3.18	5.55

权重相差不大,暴雨过程平均降水量指标的权重最小,暴雨过程覆盖范围指标的权重相对最大。

#### 4.6 暴雨过程的综合评估指标计算方法及评估标准

$A^*$  中各列向量对应各级标准,可以认为是在三维空间中的 5 个固定向量,当出现一次暴雨过程时,得到 4 个评估指标, $p$ :暴雨过程平均降水量, $I$ :暴雨过程降水日强度, $c$ :暴雨过程覆盖范围, $t$ :暴雨过程持续时间。

$$\begin{cases} x_1 = p/206.2299 \\ x_2 = I/353.2573 \\ x_3 = c/0.7154 \\ x_4 = t/5.55 \end{cases} \quad (14)$$

组成被评估向量  $\mathbf{X}=(x_1, x_2, x_3, x_4)$ ,暴雨过程的综合评估指标为:

$$I_{\text{hra}} = (x_1 \times 0.1991 + x_2 \times 0.2306 + x_3 \times 0.2869 + x_4 \times 0.2834) \quad (15)$$

参照中国气象局对气象灾情等级划分的界定<sup>[15]</sup>,结合暴雨灾害损失特征,本文将大于 10 年一遇的暴雨过程等级定义为 I 级,属于很严重级别;间于 5~

10 年一遇的为 II 级,为严重级别,以此类推,暴雨过程的评估等级如表 3 所示。

表 3 暴雨过程综合等级评估标准  
Table 3 The composite assessment standards of rainstorm process

等级	严重程度	暴雨过程的综合评估指标 $I_{\text{hra}}$
I 级	很严重	$0.6107 \leq I_{\text{hra}} < 1$
II 级	严重	$0.4913 \leq I_{\text{hra}} < 0.6107$
III 级	较严重	$0.3286 \leq I_{\text{hra}} < 0.4913$
IV 级	一般	$0.1587 \leq I_{\text{hra}} < 0.3286$

## 5 试评估分析

继 1998 年之后,1999 年我国长江流域又出现了持续性的强降水过程,导致长江流域暴雨成灾,不少县市成为水乡泽国,交通、通讯中断,无数房屋倒塌,成千上万亩庄稼被淹没,给国民经济造成了巨大损失,本文就 1999 年 6—8 月的 5 次暴雨过程进行试评估,其评估结果如表 4。

表 4 1999 年 6—8 月长江中下游 5 次暴雨过程评估结果

Table 4 Assessment results of five rainstorm processes from the end of June to August in 1999

暴雨过程	$p$	$I$	$c$	$t$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$I_{\text{hra}}$
1999.06.23	102.97	113.30	0.33	3	0.5332	0.3207	0.4613	0.5405	0.4656
1999.06.26—30	192.79	166.4	0.41	5	0.9348	0.4710	0.5731	0.9009	0.7145
1999.07.16—18	76.01	119.60	0.38	3	0.3686	0.3386	0.5312	0.5405	0.4570
1999.08.22—23	92.65	100.90	0.26	2	0.4493	0.2856	0.3634	0.3604	0.3617
1999.08.29—30	98.60	172.50	0.46	2	0.4781	0.4883	0.6430	0.3604	0.4944

结果表明,1999 年 6 月 26—30 日的暴雨过程综合等级为 I 级最强,8 月 29—30 日暴雨过程的综合等级为 II 级,强,其余 3 次过程均为 III 级,较强,基本上与实际情况一致,试评估效果较好。

## 6 结论与讨论

(1) 本文对长江中下游沿江地区 1957—2007 年

的 372 次暴雨过程进行统计分析,选取平均降水量、降水强度、覆盖范围和持续时间 4 个指标作为要建立的评估模型指标。

(2) 对 4 个指标进行了正态化转换以及  $\Gamma$  分布拟合,通过求对应正态分布及  $\Gamma$  分布(Pearson-III, 3-parameter gamma)的反函数来确定长江中下游沿江地区各指标给定重现期的对应理论值。

(3) 对平均降水量、降水强度、覆盖范围和持续

时间 4 个指标确定权重系数,建立了暴雨过程综合评估模型,将暴雨过程级别分为 5 个等级。

(4)运用该模型对长江中下游沿江地区 1999 年 6—8 月的 5 次暴雨过程进行了试评估,评估结果基本符合实际情况。

本文仅通过气象资料对长江中下游沿江地区的暴雨过程进行了评估,通过实际检验,具有良好的应用价值。在有效利用有关暴雨预报资料的基础上,该模型也能够对该地区暴雨综合等级进行预评估,实际应用价值较高。但是,一般而言,自然灾害风险是致灾因子(危险性)、承灾体(易损性)和孕灾环境(脆弱性)相互作用的结果,防灾减灾能力也是影响自然灾害风险度大小的因素之一,因此在区域自然灾害风险形成过程中,危险性、易损性、脆弱性以及防灾减灾能力是缺一不可的,是四者综合作用的结果。本文由于灾害资料获取难度较大等众多因素,仅从致灾因子一个方面选取指标,考虑因子还不是很全面,以后应当致力于对致灾因子(危险性)、承灾体(易损性)和孕灾环境(脆弱性)三者的综合考虑分析,尽量全面客观地对暴雨灾害等级进行综合划分和评估。

## 参考文献

[1] 马青云,李佳英,王秀荣,等.基于模糊综合评价法的登陆台风

灾害影响评估模型[J].气象,2008,34(5):20-25.

- [2] 李春梅.广东省气象评估工作进展[R].2008.
- [3] 上海台风研究所.台风灾情评估标准及预评估系统简介[R].2008.
- [4] 袁子鹏.流域暴雨事件等级评估方法[R].2008.
- [5] 司东,柳艳菊,马丽娟,等.2011 年初夏我国长江中下游降水的气候特征及成因[J].气象,2012,38(5):601-607.
- [6] 周慧,崔应杰,胡江凯,等.T639 模式对 2008 年长江流域重大灾害性降水天气过程预报性能的检验分析[J].气象,2010,36(9):60-67.
- [7] 中国气象局预测减灾司.中国气象地理区划手册[M].北京:气象出版社,2006:4-5.
- [8] 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.
- [9] GB/T 8055-2009.数据的统计处理和解释  $\Gamma$  分布(皮尔逊 III 型分布)的参数估计[S].2009.
- [10] 高绍凤,陈万隆,朱超群.应用气候学[M].北京:气象出版社,2001:121-127.
- [11] 黄嘉佑.一种用于旱涝分析的降水概率指标-Gamma 分布概率指标[J].气象,1990,16(9):8-12.
- [12] 程炳岩,丁裕国,汪方.非正态分布的天气气候序列极值[J].大气科学,2003,27(5):920-928.
- [13] 丁裕国.降水量 gamma 分布的普适性研究[J].大气科学,1994,18(5):552-560.
- [14] 胡守信,李柏年.基于 MATLAB 的数学实验[M].北京:科学出版社,2004:81-83.
- [15] 王秀荣,王维国,马清云.台风灾害综合等级评估模型及应用[J].气象,2010,36(1):66-71.