

文章编号: 2096-1618(2021)01-0080-06

# 基于泊松分布的成都经济区暴雨概率特征研究

任至涵<sup>1</sup>, 倪雪<sup>2</sup>, 倪长健<sup>1</sup>, 杨萌<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 中国民航西南地区空中交通管理局, 四川 成都 610202)

**摘要:**为得到成都经济区暴雨频次概率特征,利用成都经济区个测站(成都、德阳、绵阳、眉山和资阳)1960–2018年逐日降水数据,统计出各站年暴雨频次,结合 Poisson 分布函数,得到年暴雨频次分布模型。将理论和实测数据进行对比,验证了年暴雨频次分布模型的有效性,个测站暴雨概率的分布均符合 Poisson 分布模型。研究结果表明,成都和眉山每年出现3次暴雨的概率最大,德阳、绵阳和资阳每年出现2次暴雨的概率最大;成都、绵阳、眉山和资阳暴雨频次在时间上总体呈减少趋势,德阳暴雨频次呈略微增加趋势;位于区内中部的成都暴雨频次最大,危险性相对最高,位于东南部的眉山、资阳次之,暴雨危险性相对较弱,位于北部的德阳、绵阳最小,暴雨危险性相对最低。

**关键词:**大气科学;暴雨;成都经济区;泊松分布;概率特征

**中图分类号:**P426.61

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2021.01.013

## 0 引言

近年来,受气候变化的影响,全球各地暴雨、高温和干旱等极端气候逐渐增多<sup>[1-2]</sup>,使气象灾害越来越成为人们所关注的热点问题。气象灾害主要包括亚洲热带风暴、沿海城市常见的台风、干旱、高温、冰雹和暴雨等。其中暴雨灾害包括水灾和涝灾,具有历时短、强度大、区域性等特点<sup>[3-4]</sup>,能造成水库垮坝、城乡渍涝、山洪暴发及滑坡、泥石流等地质灾害<sup>[5-7]</sup>,极大影响了受灾地区的国民经济建设和人民生命财产安全<sup>[8]</sup>。同时中国是个多暴雨的国家,暴雨灾害在某种程度上已经制约了经济可持续发展,对暴雨的研究成为大气科学重要研究课题之一<sup>[9]</sup>。

目前不少学者对暴雨进行了研究,主要包括暴雨的成因、暴雨的时空分布特征和暴雨的危险性方面。有气象工作者从暴雨的环流形势和暴雨指数等角度出发来探讨暴雨成因,如康桂红等<sup>[10]</sup>归纳分析了山东首场暴雨的影响系统及环流形势,结果表明主要影响系统有温带气旋和低涡、切边线2类。黄骏凯等<sup>[11]</sup>分析了黄山市两次暴雨天气过程,发现较强的K指数和较小的沙氏指数可以充分说明此两次暴雨天气具备强烈的不稳定条件。暴雨频次和强度是导致暴雨灾害的重要原因<sup>[12]</sup>,因此探讨研究暴雨的特征及其规律性是很有必要的。国内外对于暴雨的时空分布特征已经有很

多研究<sup>[13-17]</sup>,如彭丽英等<sup>[13]</sup>应用滑动T检验等方法研究了茂名市暴雨日数的变化特征,发现茂名各站的年暴雨日数总体呈从西南向东北减少的趋势。王佳津等<sup>[14]</sup>分析了四川省持续性暴雨的时空分布特征,发现区域持续性暴雨降水中心主要分布在盆地东北部和西部沿山一带,且暴雨频次在2001年后呈现出增加趋势。除以上方法外还有不少中外学者利用概率分布模式分析暴雨的时空分布特征<sup>[18-23]</sup>,如于新文等<sup>[12]</sup>发现泊松分布模型能很好地描述中国东部地区的暴雨频次分布特征,在此基础上吕忠东等<sup>[20]</sup>、周其龙等<sup>[21]</sup>和任照环等<sup>[22]</sup>也都采用了泊松分布来分别描述川东、黄河中下游和川东北地区暴雨频次分布特征。针对暴雨的灾害性,范擎宇等<sup>[24]</sup>同时考虑了致灾因子和孕灾环境,利用层次分析法和 ArcGIS 中的自然断点分级法从两方面指标构建出松花江流域暴雨危险性评价体系,对针对暴雨灾害的防灾减灾工作有一定指示意义。

对于给定时段来说,全面描述变量的随机性可用某种概率分布模式<sup>[25]</sup>。泊松分布是一种用来描述稀有事件频率分布的概率模式,适合于描述单位时间或空间内随机事件发生的次数。四川盆地属于亚热带季风性湿润气候,夏季常受西南低空急流、西南季风和西太平洋副热带高压的影响<sup>[20]</sup>,是中国的多雨区,且盆地内降水有较强的分布不均匀性,最大值中心在盆地西南部<sup>[26]</sup>。而成都经济区位于四川盆地西部,故常年受到暴雨的影响,同时针对成都经济区暴雨的研究并不多,因此利用泊松分布模式分析成都经济区年暴雨日数或次数的分布特征具有一定统计天气预报意义。

收稿日期:2019-12-16

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0214004、2018YFC1506006);四川省科技厅重点研发资助项目(2018SZ0287)

本文研究目的是初步建立成都经济区暴雨发生频率的 Poisson 分布模型,获得成都经济区暴雨频次概率分布特征的整体规律,进而指导成都经济区的暴雨预报。

## 1 研究区概况和资料来源

### 1.1 研究区概况

四川于 2006 年 1 月构建了成都、川南、攀西、川东北、川西北 5 大经济区。其中成都经济区包括成都、德阳、绵阳、眉山、资阳市,以高新技术产业为指导,重点发展技术含量高的先进制造业和现代服务业,旨在建成四川省最强的经济密集和人口密集区<sup>[27]</sup>。研究表明,2015 年成都经济区生产总值达到 19126.4 亿元,占全省的 63.5%,已然是全省经济发展最重要的引擎<sup>[28]</sup>。同时成都经济区位于岷江和沱江上游,常年受暴雨的影响。为了使成都经济区不断发展,规避暴雨对区内造成的经济损失和水土流失,选择用泊松分布模型对成都经济区暴雨频次进行拟合,研究区内暴雨频次分布特征。

### 1.2 资料来源

中国气象规定,日降水量  $\geq 50$  mm 的降水称为暴雨。利用成都经济区成都、德阳、绵阳、眉山和资阳个测站 1960–2018 年(59 a)的逐日降水数据资料,统计出各站每年暴雨(日降水量  $\geq 50$  mm)发生的日数及其发生频率。图 1 为成都经济区分布图。

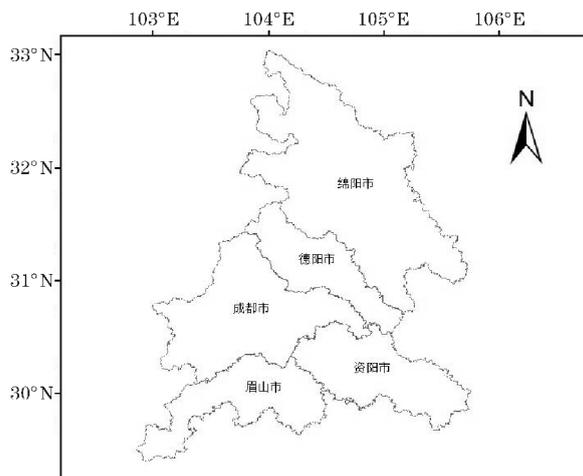


图 1 成都经济区分布图

## 2 泊松分布方法介绍

泊松分布对应于“一定范围内事件 A 发生的次数”的问题,“一定范围”指的是诸如体积、面积、长度、

重量和时间等范围,也称为区间<sup>[29]</sup>,其在管理科学、气象学等部门的应用十分广泛,是一种经典的描述稀有事件的概率模式<sup>[20]</sup>。已知在概率论的伯努利试验中,每次试验成功的概率很小而试验次数很多时,二项分布则会逼近泊松分布,以成都站 1960–2018 年逐日降水资料为例,1960–2018 年暴雨天数为 186 天而总天数很大,即  $n$ (样本量)很大但  $p$ (暴雨概率)很小,则假定成都经济区暴雨发生次数(日数)服从泊松分布。理论上来说,当  $p \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$ ,且  $np = \lambda$  成为常数时,二项分布可做如下计算:

假定某二项分布  $p \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$ ,则

$$p = \frac{\lambda}{n} \quad (1)$$

参数  $\lambda$  为正的常数,取  $n \rightarrow \infty$  的极限,可得以下结果

$$C_n^k p^k q^{n-k} \rightarrow \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (2)$$

其中  $q = 1 - p$ ,那么服从泊松分布的随机变量  $X$  的概率分布为

$$P\{X = k\} = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (3)$$

可以证明,该分布仅有一个参数  $\lambda$ (恒为正数)。而对于稀有事件  $X$  的各种取值  $X = 0, 1, 2, 3, \dots$  则有

$$P(X \geq 0) = \sum_{x=0}^{\infty} \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda} = 1 \quad (4)$$

由此可以求得在某区间(例如某一时段)中各种可能的稀有事件发生次数的概率为

$$P(X \geq r) = \sum_{x=r}^{\infty} \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda} \quad (5)$$

$$P(X \leq r) = \sum_{x=0}^r \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda} \quad (6)$$

前者为稀有事件发生次数  $\geq r$  次的概率,后者为稀有事件发生次数  $\leq r$  次的概率。

根据给出的模型,用递推法可以计算出发生  $n$  次以上稀有事件的概率,首先由递推法得

$$P(X < n) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (7)$$

由于

$$P(X \geq n) = 1 - P(X < n) \quad (8)$$

所以发生  $n$  次以上包含  $n$  次稀有事件概率为

$$P(X \geq n) = 1 - e^{-\lambda} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\lambda^k}{k!} \quad (9)$$

文中,区间为时间段 59 a,参数  $\lambda$  是单位时间(或单位面积、体积)内随机事件的平均发生率,则由各站 59 a 间暴雨发生总次数除以 59 可得各站参数  $\lambda$ ,进而由式(3)计算一年中发生  $k$  次暴雨的概率  $P\{X = k\}$ 。

那么59 a间应有  $59 \times P\{X=k\}$  个年份是每年会发生  $k$  次暴雨的,  $k$  分别取  $0, 1, 2, 3, \dots$  时, 可得各站每年分别发生  $0, 1, 2, 3, \dots$  次暴雨的理论年数。结合5个站的参数  $\lambda$  和式(3)则可以建立起适用于成都经济区的暴雨频次 Poisson 分布模型。

### 3 结果分析

#### 3.1 Poisson 分布拟合及其效果检验

在成都经济区5个主要测站中, Poisson 分布拟合通过 K-S 检验(显著性水平  $\alpha=0.05$ )的站数为100%, 而通过  $\chi^2$  检验(显著性水平  $\alpha=0.1$ )的站数也为100%。并且通过计算实测年数与理论年数的相关系

数可知, 5个测站两者的相关系数都在  $0.82 \sim 0.94$ , 相关性较好。由此可见, 成都经济区暴雨频次符合 Poisson 分布模型。表1为5站实测年数与理论年数的相关系数。

表1 5站实测年数与理论年数相关系数

站名	成都	德阳	绵阳	眉山	资阳
$r$	0.9396	0.8221	0.9185	0.9371	0.9328

#### 3.2 各站暴雨频次总体分布特征

为更好体现各站暴雨频次变化趋势与其总体特征和泊松分布拟合程度, 研究将成都、德阳、绵阳、眉山和资阳5站的实测年数与理论年数绘成直方图, 如图2所示。

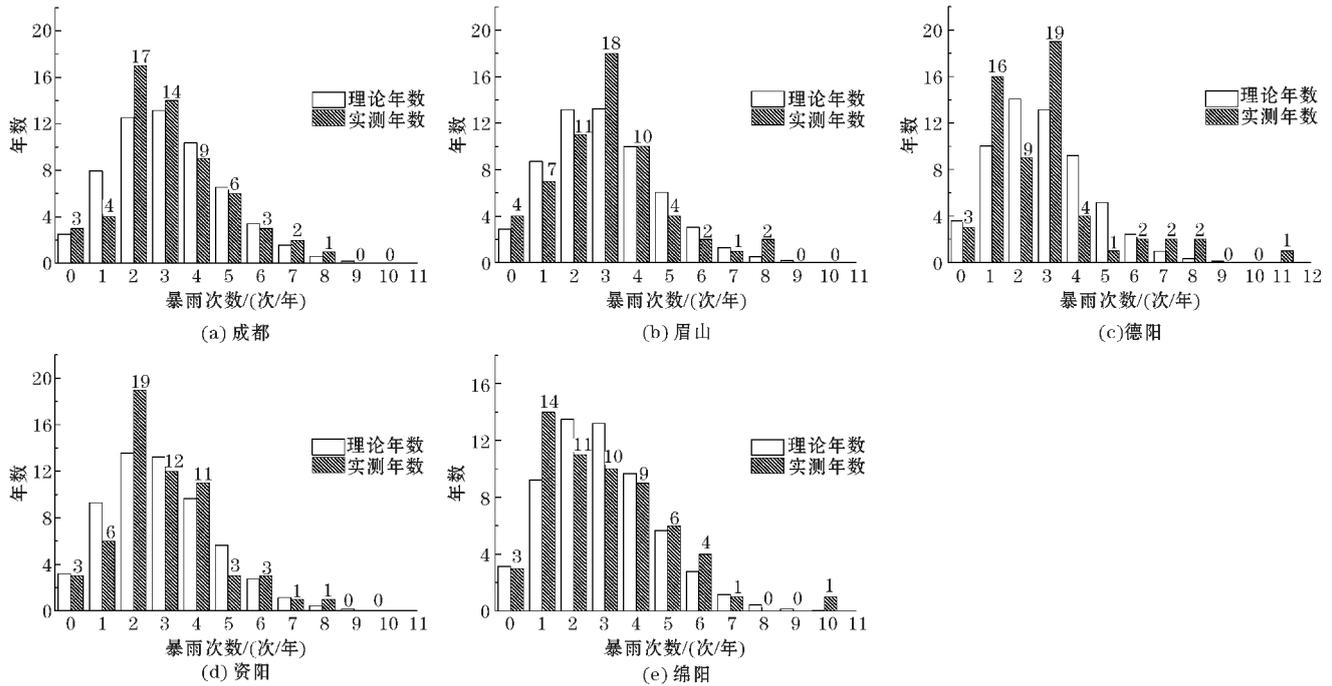


图2 5站实测年数与理论年数直方图

由图2可知, 59年间5站实测年数与理论年数随暴雨次数变化的趋势大致相同, 每年发生  $k$  次暴雨的实测年数与理论年数总体差别不大, 两者相差最大为资阳每年发生2次暴雨时, 实测比理论大了5.44年, 总体看来5站的暴雨频次分布与泊松分布的拟合程度是较高的, Poisson 分布能很好地描述成都经济区暴雨频次的分布特征。在实测年数中, 成都和资阳每年发生2次暴雨的年数最多, 实测概率分别为29% (17 a) 和32% (19 a); 德阳和眉山每年发生3次暴雨的年数最多, 实测概率分别为32% (19 a) 和31% (18 a); 绵阳站每年发生1次暴雨的年数最多, 实测概率为24% (14 a)。成都、眉山和资阳每年发生暴雨次数最高为

8次, 德阳最高次数达11次, 绵阳最高为10次。从理论计算看, 德阳、绵阳和资阳每年发生2次暴雨的概率比其他频次概率都要高, 德阳为24%, 后两者均为23%; 成都和眉山每年发生3次暴雨的概率比其他频次概率高, 均为22%。同时, 每个站每年出现暴雨次数主要集中在1~4次。在实测数据中, 成都和绵阳每年出现暴雨次数集中在1~5次, 德阳、眉山和资阳每年出现暴雨次数集中在1~4次, 与理论计算大致一致。据理论计算, 成都每年发生3次以上暴雨的概率高达61%, 眉山达到58%, 较德阳(53%)、绵阳(56%)和资阳(56%)大。综合考虑, 成都和眉山每年暴雨次数比德阳、绵阳和资阳多一些, 并且各站每年暴

雨次数为 2 次或 3 次的概率最大。

### 3.3 各站暴雨频次时间分布特征

为得到成都经济区暴雨频次随时间的变化特征,将 1960–2018 年共 59 a 分为连续的长度为 30 a 的时间段,即第一个时间段为 1960–1989 年,第二个时间段为 1961–1990 年,以此类推,最后一个时间段为 1989–2018 年。在这 30 个时间段中分别利用泊松分布对各站统计的暴雨频次进行拟合,得到各个时间段的参数  $\lambda$  后,计算各个时间段的  $P(X \geq 3)$ ,以此判断暴雨频次的时间变化。图 3 为 30 个时间段各站总频次图,图 4 为各站每年暴雨次数  $\geq 3$  次的概率图。从概率变化图来看,眉山和资阳总体变化一致,资阳  $P(X \geq 3)$  在时间上呈波动减少的趋势,眉山在第 10 个时间段到第 21 个时间段有波动增加趋势,从第 22 个时间段开始大幅度减小;成都和绵阳总体变化一致, $P(X \geq 3)$  随时间先波动减小,后有略微增加的趋势,成都从第 20 个时间段开始略微增加,绵阳从第 27 个时间段开始增加;德阳  $P(X \geq 3)$  随时间的变化趋势与其余 4 站存在差异,第 1 到第 8 个时间段波动减小,第 9 到第 26 个时间段基本保持平稳,第 27 到第 30 个时间段概率略微增加,总体变化不大。对比第一个时间段和最后一个时间段,成都、资阳、绵阳和眉山暴雨频次都呈减小的趋势,德阳暴雨频次有略微增加趋势。

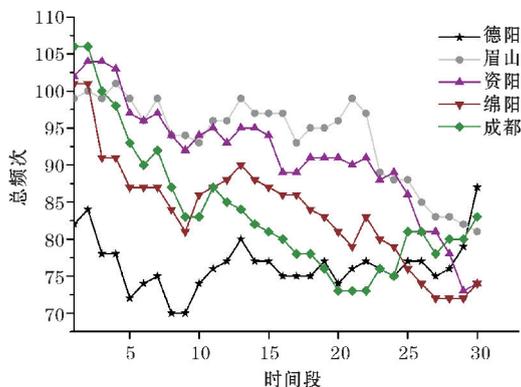


图 3 5 站各时间段总频次图

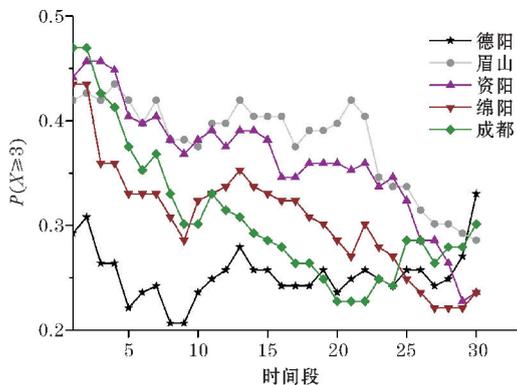


图 4 5 站各时间段概率图

### 3.4 各站暴雨频次空间分布特征

研究考虑用服从泊松分布的各站每年暴雨次数  $\geq 3$  次的理论概率来判断各地暴雨次数的大小问题,各站  $P(X \geq 3)$  见表 2。

表 2 各站理论  $P(X \geq 3)$

站名	$P(X \geq 3)$
成都	0.6096
德阳	0.5305
绵阳	0.5609
眉山	0.5813
资阳	0.5586

如表 2 所示,位于成都经济区中部的成都的概率最大,为 61%,位于成都经济区北部的德阳、绵阳的概率分别为 53% 和 56%,位于成都经济区东南部的眉山、资阳的概率分别为 58% 和 56%。总体来说,成都经济区偏南地区暴雨频次更大。

将暴雨频次随时间的变化与其空间分布结合起来,发现位于成都经济区偏南部的资阳和眉山暴雨频次都呈减小的趋势,位于中部的成都暴雨频次先减小后增加,但增加幅度不大,整体仍呈减小的趋势,北部的德阳暴雨频次先减小,经历一个波动阶段后暴雨频次再增加,增加的幅度相对较小,而同样位于北部的绵阳暴雨频次逐渐减小。即暴雨频次较大的地区如成都、绵阳、眉山和资阳,暴雨频次逐渐减小,而暴雨频次较小的地区如德阳,其暴雨频次有增加趋势,到 2018 年底成都经济区各站的暴雨频次有逐渐均匀分布的趋势。

## 4 结束语

利用 5 个测站 59 a 的日降水数据资料统计出各站年暴雨日数并对年暴雨日数分布模型进行研究后,结果表明:成都经济区 5 个主要测站的暴雨频次分布即每年发生  $k$  次暴雨的年数均通过了 Poisson 分布模式下的 K-S 检验(显著性水平  $\alpha=0.05$ )和  $\chi^2$  检验(显著性水平  $\alpha=0.1$ ),实测年数与理论年数两者的相关系数也都在 0.82~0.94, Poisson 分布模型能很好地描述成都经济区暴雨频次分布特征。

据理论计算(泊松分布拟合),各站每年出现暴雨次数主要集中在 1~4 次,其中发生 2 次或 3 次暴雨的概率最大,成都和眉山为 3 次,德阳、绵阳和资阳为 2 次。每年暴雨发生次数  $\geq 3$  次的概率以成都最大

(61%),其次是眉山(58%),而最小的是德阳(53%)。综合考虑,成都和眉山每年发生暴雨次数较德阳、资阳和绵阳大。

**时间特征:**将1960–2018年这59年分为连续的长度为30年的时间段(1960–1989年,1961–1990年,⋯,1989–2018年),统计各个时间段各站暴雨频次再对各个时间段分别进行泊松分布拟合,结果表明:成都、绵阳、眉山和资阳暴雨频次在时间上总体呈减少的趋势,德阳暴雨频次变化不大。

**空间特征:**据理论计算,1960–2018年5个测站的 $P(X \geq 3)$ 分别为,位于成都经济区中部的成都的概率最大(61%),暴雨危险性相对最高。位于区内东南部的眉山、资阳的概率分别为58%和56%,暴雨危险性相对较弱,位于区内北部的德阳、绵阳概率分别为53%和56%,暴雨危险性相对最低。总体来说,成都经济区偏南地区暴雨频次更大,暴雨危险性相对最高。结合时间特征,概率偏大的成都、绵阳、眉山和资阳暴雨频次在减少,概率最小的德阳暴雨频次在增加,各站的暴雨频次有逐渐均匀分布的趋势。

## 参考文献:

[1] 徐菲菲,孙良鑫,汪梦瑶,等.基于小波分析的宿州地区暴雨时空分布特征[J].气象科学,2018,38(4):559–564.

[2] 陈朝基.中国1951~2000年特大暴雨气候特征[J].安徽农业科学,2011,39(03):1605–1606.

[3] 周鹏康,秦金梅.云南1981~2010年雨季暴雨时空分布特征[J].云南地理环境研究,2016,28(4):63–69.

[4] 黄鹤,杨超,于雷,等.1958–2012年河北省汛期暴雨气候变化特征分析[J].气象科学,2015,31(2).

[5] 郑逢春,石燕清,张丹丹,等.近52年湘西自治州暴雨时空分布特征分析[J].安徽农业科学,2016,44(31):181–184.

[6] 谢晓丽,王洪丽,刘晓梅.呼伦贝尔市暴雨时空分布特征及类型分析[J].内蒙古农业科技,2012(4):97–99.

[7] 李玲萍,陈雷,罗小玲,等.河西走廊东部大到暴雨特征分析[J].资源科学,2013,35(6):1277–1284.

[8] 朱艳飞,哈建强.1972–2007年河北沧州大暴雨变化趋势分析[J].黄河水利职业技术学院学报,2016,28(1):21–23.

[9] 丁一汇.陶诗言先生与中国暴雨[C].东亚季风和中国暴雨——庆贺陶诗言先生八十华诞集,

1998:137–141.

[10] 康桂红,韩永清,孙兴池,等.近30a山东首场暴雨的气候特征及环流形势[J].干旱气象,2015,33(6):955–962.

[11] 黄骏凯,刘丽琴,苗蓓蓓,等.黄山市两次暴雨天气过程分析[J].南方农业,2016,10(32):87–88.

[12] 于新文,丁裕国.中国东部地区暴雨的概率特征—基于泊松分布的统计模拟[J].自然灾害学报,2006,15(4):13–18.

[13] 彭丽英,苏小山,李英,等.茂名市暴雨的气候特征[J].广东气象,2018,40(2):1–5.

[14] 王佳津,陈朝平,刘莹,等.四川省持续性暴雨定义及时空分布特征[J].气象科技,2017,(2):331–341.

[15] Thomas R. Karl, Richard W. Knight. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological society, 1998, 79(2):231–242.

[16] Groisman P Y, Knight R W, Karl T R. Heavy precipitation and high streamflow in the contiguous United States: Trends in the twentieth century [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(2):219–246.

[17] Alexander L, Zhang X, Peterson T. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Geophys Res Lett, 2006, 111.

[18] Park J S, Jung H S. Modelling Korean extreme rainfall using a Kappa distribution and maximum likelihood estimate [J]. Theoretical and Applied climatology, 2002, 72(1/2):55–64.

[19] 周浩澜,陈洋波,徐会军.基于GEV分布模型参数与历时关系的暴雨强度公式推求[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(S1):37–41.

[20] 吕忠东,邹阳,李一波.基于泊松分布的川东暴雨概率特征分析[J].成都信息工程学院学报,2010,25(5):531–535.

[21] 周其龙,梁洪运,刘敏,等.基于概率分布模型的暴雨研究[J].科技资讯,2013(9):1–3.

[22] 任照环,倪长健.基于复合极值模型的暴雨重现期研究——以川东北地区为例[J].西南师范大学学报(自然科学版),2014,39(5):131–137.

[23] Korolev V Y, Gorshenin A. The probability distribution of extreme precipitation [C]. Doklady Earth Sciences, 2017:1461–1466.

- [24] 范擎宇,何福红,马国斌,等. 基于过程降雨的暴雨灾害危险性评估——以松花江流域为例[J]. 地理与地理信息科学,2016,32(2):100-104.
- [25] 丁裕国,申红艳,江志红,等. 气候概率分布理论及其应用新进展[J]. 气象科技,2009,37(3):257-262.
- [26] 邵远坤,沈桐立,游泳,等. 四川盆地近40年来的降水特征分析[J]. 西南农业大学学报,2005,27(6):749-752.
- [27] 彭丽,胡林龙. 成都经济区环保产业发展趋势分析[J]. 中国环保产业,2015,(7):67-69.
- [28] 周路. 成都经济区先进制造业与现代物流业融合发展的研究[J]. 经济研究导刊,2018(18):44-47.
- [29] 傅军和. 二项分布和泊松分布的剖析[J]. 统计教育,2006(10):10-11.

## Study on the Probabilistic Characteristics of Heavy Precipitation of Chengdu Economic Zone based on Poisson Distribution

REN Zhihan<sup>1</sup>, NI Xue<sup>2</sup>, NI Changjian<sup>1</sup>, YANG Meng<sup>1</sup>

(1. College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmospheres and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 2. Southwest Regional Air Traffic Management Bureau of CAAC, Chengdu 610202, China)

**Abstract:** In order to draw the probabilistic characteristics of heavy rain in Chengdu economic areas, we use the daily precipitation data of Chengdu Economic Zone which are Chengdu, Deyang, Mianyang, Meishan and Ziyang respectively from 1960 to 2018 to count the annual heavy rain frequency. These are Combined with the Poisson distribution function to get the distribution model of annual heavy precipitation. The comparison of theoretical value and measured value shows the availability of the distribution model of the distribution of frequency of heavy precipitation. The distribution of heavy rain in the five stations is consist with the Poisson distribution model. The results shows that Chengdu and Meishan have the highest probability of three times heavy precipitation per year, Deyang, Mianyang and Ziyang have the highest probability of twice heavy precipitation per year among the five stations; The frequency of heavy precipitation in Chengdu, Mianyang, Meishan and Ziyang generally decreased in time, and the frequency of that in Deyang changed slightly; Chengdu, located in the middle of the region, has the highest rainstorm frequency and the highest rainstorm risk, followed by Meishan and Ziyang in the southeast, which have a relatively weak rainstorm risk, Mianyang and Deyang, located in the north, has the lowest rainstorm risk.

**Keywords:** atmospheric science; heavy precipitation; Chengdu economic zone; Poisson distribution; probabilistic characteristics