

文章编号: 2096-1618(2024)06-0761-06

基于泊松分布的湖南衡邵盆地暴雨概率特征分析

邓逸凡, 贺科, 肖文晓

(衡阳气象局, 湖南 衡阳 421000)

摘要:为分析湖南衡邵盆地的暴雨概率特征,利用衡邵盆地地区28个国家气象站41 a(1980–2020年)汛期(4–9月)逐日降水量数据资料,统计出各站年暴雨频次和相应频次发生概率,结合Poisson分布函数,得到基于Poisson分布的暴雨概率模型。通过将理论与实测数据对比分析,除南岳以外,衡邵盆地地区各国家气象站理论与实测数据的相关系数都在0.79~0.98,验证了基于Poisson分布暴雨概率模型的有效性。结果表明,除南岳以外,衡邵盆地地区各国家气象站汛期(4–9月)暴雨概率分布和频次分布都符合Poisson分布模型;空间分布上,暴雨日数 ≥ 3 d的理论概率分布和实测概率分布基本一致,都呈现南北部高、中部低的特征;时间分布上,暴雨总频次与暴雨日数 ≥ 3 d的理论概率的变化趋势基本一致,且都在波动中呈现出明显上升趋势。

关键词:暴雨;泊松分布;衡邵盆地;概率特征

中图分类号:P426.61

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2024.06.017

0 引言

近年来,受全球气候变暖的影响,各地极端高温、极端降水等天气、气候事件逐渐增多^[1],使各类气象灾害越来越受到关注。其中暴雨作为频繁发生且备受关注的气象灾害,具有历时短、强度大和区域性等特征,其雨量的集中性造成区域性洪涝、泥石流等次生灾害,极大地影响社会经济发展、粮食生产安全、生态环境建设等方面^[2]。1998年长江、松花江流域和嫩江流域因持续性暴雨引发特大洪涝灾害,造成3000人的伤亡,经济损失达36亿美元;2016年汛期中国暴雨洪涝灾害南北齐发,造成3282万人受灾,直接经济损失约1470亿元^[3-4]。由此可见,中国作为暴雨频发的国家,暴雨灾害一定程度上制约了地区经济的可持续发展,许多气象学者已经投入对暴雨规律性的探讨。

研究表明,长江流域近60 a暴雨强度在4–9月先增强后减弱,长江中下游在6月最强且暴雨日数有显著增加趋势^[5];湖南省降水极值呈现增长趋势,具体表现为1 d和5 d最大降水量增加趋势都非常显著^[6];衡邵盆地处于亚热带季风气候区,年际降水呈现弱增加趋势,无突变特征,年内降水集中,季节变率大,暴雨灾害频繁^[7-8]。

概率分布理论作为概率统计学方法的理论基础,对于给定的时段,能选择某种概率分布模型有效描述

变量的随机性^[9]。Poisson分布是一种经典的描述稀有事件的概率模型^[10-13],虽然其不能研究暴雨发生的复杂物理原因,但从概率特征进行分析。于新文等^[10]应用Poisson分布模型有效模拟了中国东部地区的暴雨概率分布特征,在其基础上任至涵等^[11]、吕忠东等^[12]、周其龙等^[13]也应用Poisson分布模型分别分析了成都经济区、川东地区和黄河中下游地区的暴雨频次分布特征,邹德全等^[14]应用Poisson分布模型揭示了遵义暴雨、大暴雨概率分布特征。本文旨在建立基于泊松分布的衡邵盆地暴雨概率模型,用以分析暴雨概率分布特征的总体规律及其时空分布特征,进而有效提高当地暴雨预报水平,减少暴雨对衡邵盆地社会经济建设发展和人民生命财产安全带来的损失。

1 研究区概况和资料来源

1.1 研究区概况

衡邵盆地地处湖南省中部偏南,位于雪峰山脉以南、五岭山脉以北,包括永州市北部以及娄底市、衡阳市、邵阳市全境共计33个县级行政区(图1a),是重要的粮食主产区^[7]。该区域降水时空分配不均、季节变率大,加之独特的地形地貌(图1b),使雨、洪涝灾害频发,极大制约了区域内经济的发展。规避暴雨、洪涝灾害对其造成的经济损失,基于泊松分布暴雨概率模型对区域内暴雨概率分布进行全面模拟。

收稿日期:2023-07-06

基金项目:湖南省气象局2023年创新发展专项(青年专项)资助项目(CXFZ2022-QNZX11)

1.2 资料来源

利用衡邵盆地地区 28 个国家气象站 41 a(1980–2020 年)汛期(4–9 月)逐日降水量数据资料,统计分析这 41 a 汛期各站暴雨(日降水量 ≥ 50 mm)日数及其发生概率。其中 28 个国家气象站在衡邵盆地地区的空间分布如图 1(b)所示,基本保证各个行政区都存在 1 个气象站点,使研究的数据具有代表性;28 个国家气象站的逐日降水数据集都是从气象数据云平台“天擎”上下载,并经过了严格的数据质量控制,使数据具有可靠性。

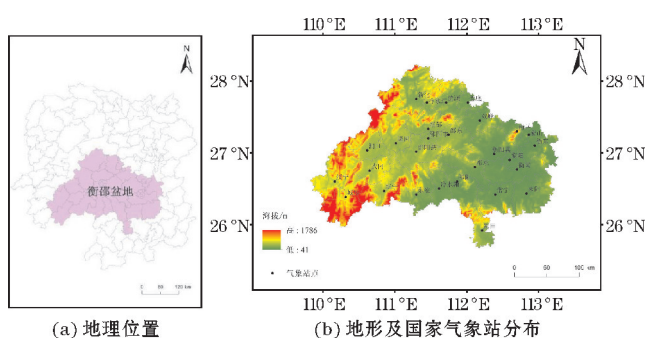


图1 衡邵盆地地理位置、地形及国家气象站分布

2 Poisson 分布方法

Poisson 概率分布在各领域的应用相当广泛,其适用于描述特定时间内随机事件发生的概率,能有效地解决管理科学、气象学等自然科学的某些问题。从理论上讲,当 $p \rightarrow 0$, $n \rightarrow \infty$, 且 $\lambda = np > 0$ 为常数时,二项式分布可转变为

$$C_n^k p^k q^{n-k} \rightarrow \frac{\lambda^k}{k!} \exp(-\lambda) \quad (1)$$

即 Poisson 可以当作二项式分布的极限形式。因此当 n 很大, p 很小时, Poisson 分布可以用来计算二项式分布。 λ 可以当作单位时间内随机事件的平均发生率,即 $\lambda = np$, 那么服从 Poisson 分布的随机变量 X 的概率分布为

$$P\{X=k\} = \frac{\lambda^k}{k!} \exp(-\lambda) \quad (2)$$

可以证明在此概率分布中有且仅有一个参数 $\lambda (>0)$ 。对于稀有事件 $X=0, 1, 2, \dots, n$, 则有:

$$P(X \geq 0) = \sum_{x=0}^{\infty} \frac{\lambda^x}{x!} \exp(-\lambda) = 1 \quad (3)$$

由此可求得在某一特定时间段内各种可能的稀有事件发生的概率为

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

$$P(X \leq r) = \sum_{x=0}^r \frac{\lambda^x}{x!} \exp(-\lambda) \quad (5)$$

式(4)、(5)分别表示稀有事件发生次数 $\geq r$ 次的概率和稀有事件发生次数 $\leq r$ 次的概率。理论上证明,式(4)、(5)的方差和数学期望都为常数 λ 。

根据式(4)、(5)可以用递推法计算出发生 n 次以上稀有事件的概率为

$$P(X \geq n) = 1 - P(X < n) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\lambda^k}{k!} \exp(-\lambda) \quad (6)$$

文中的稀有事件即所研究的暴雨发生次数(日数), λ 即为暴雨发生次数的平均发生率,则由各站这 41 a 里暴雨发生总次数除以 41 可得到各站参数 λ , 再根据式(6)即可得到汛期各站发生 n 次暴雨的概率 $P(X=n)$ 。那么这 41 a 里应有 $41 \times P(X=n)$ 个年份发生 n 次暴雨,从而可以得到各站在这 41 a 里每年发生 n 次暴雨的理论年数,最后结合各站 λ 值和式(2)即可建立适用于衡邵盆地地区的暴雨泊松分布模型。

根据 41 a 衡邵盆地 28 个国家气象站的逐日降水数据资料,基于泊松分布概率模型,拟合计算出 28 个国家气象站不同暴雨次数出现的概率以及 41 a 每年各站发生不同次数暴雨的理论年数,并在显著性检验的基础上分析了各站实测年数与理论年数的相关性。

3 结果

3.1 Poisson 分布拟合及其效果检验

在衡邵盆地 28 个国家气象站中, Poisson 分布拟合每年发生 n 次暴雨的年数通过 χ^2 检验(显著性水平 $\alpha=0.05$)的站数为 96.4%, 仅有南岳 1 站拟合效果差。除南岳以外,基于泊松分布模型算出的另外 27 个国家气象站实测年数与理论年数的相关系数都在 0.79~0.98, 相关性较好,而南岳相关系数仅为 0.2, 这可能与南岳是高山站相关,暴雨受地形增幅影响大^[15-17]。由此可见,衡邵盆地汛期暴雨日数基本上符合 Poisson 分布模型。

3.2 理论与实测结果对比

为进一步将理论与实测结果进行对比,选取具有代表性的衡阳、邵阳、娄底、冷水滩 4 个站点,分别求出每年发生 n 次暴雨的概率及这相应 41 a 里的理论年数。图 2 为这 4 个站的频数直方图。

由图 2 可知,41 a,邵阳、冷水滩和衡阳每年发生 1~2 次暴雨的年数最多,实测概率分别为 56.1% (23 a)、53.7% (22 a) 和 53.7% (22 a),与其 Poisson 分布拟合出 1~2 次暴雨频次最多相对应;同理娄底每年发生 3~4 次暴雨的年数最多,实测概率为 36.5%

(15 a),也与其 Poisson 分布拟合出 3~4 次暴雨频次最多相对应。还可以看出,41 a 4 个站理论年数与实测年数随着暴雨次数变化的趋势大致相同,理论年数大于实测年数与实测年数大于理论年数交替出现,且每年发生 n 次暴雨的理论年数与实测年数总体差异不大,两者相差最大为 6.4 a,出现在冷水滩每年发生 2 次暴雨时,这也是衡邵盆地 28 站中理论年数与实测年数最大差值。总体来看,4 个站暴雨频次分布和 Poisson 分布的拟合程度是较高的,除了南岳以外,Poisson 分布模型都能很好描述衡邵盆地另外 27 个国家气象站的暴雨频次分布特征。

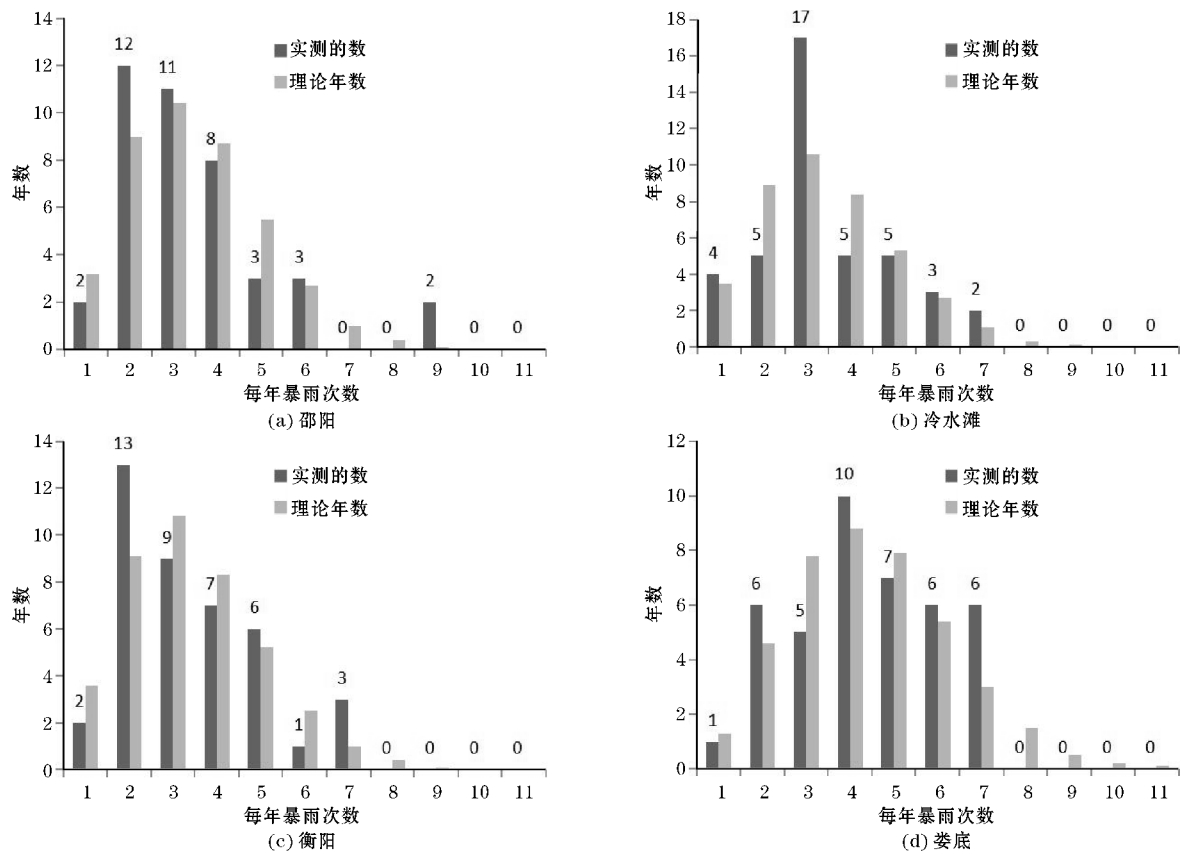


图 2 4 个代表站理论年数与实测年数频数直方图

3.3 不同暴雨日数出现的概率及其空间分布特征

为进一步分析不同暴雨日数出现的概率,同理选取 4 个代表站(衡阳、邵阳、娄底、冷水滩)进行分析。表 1 为 41 年间 4 个站点基于 Poisson 分布暴雨概率模型的理论与实测频数分布。如表 1 所示,用 Poisson 分布拟合的理论频数和实测频数分别计算出不同暴雨日数出现的概率,有以下几个分布特征:邵阳、冷水滩、衡阳 3 站理论上每年出现 2 个暴雨日数的概率最大,分

别为 25.3%、25.9%、26.3%;娄底理论上每年出现 3 个暴雨日数的概率最大,为 21.4%。而实际上邵阳、衡阳每年出现 1 个暴雨日数的概率最大,分别为 29.2% 和 31.7%,与出现 2 个暴雨日数的概率差异不大。再者,从暴雨日数的实测频数分布可以看出,4 个站中除邵阳有 2 年出现了 8 d 暴雨,其余站点每年均未出现 7 d 以上暴雨;且这 4 个站理论上每年出现 7 d 以上暴雨日数的概率也较小,分别为 1.2%、0.9%、1.2%、5.6%。

表 1 4 个站点 41 年间暴雨日数分布表

站名		年暴雨日数/d											相关系数
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	≥10	
邵阳市	实测	2	12	11	8	3	3	0	0	2	0	0	0.952
	理论	3.2	9	10.4	8.7	5.5	2.7	1.0	0.4	0.1	0	0	
冷水滩	实测	4	5	17	5	5	3	2	0	0	0	0	0.92
	理论	3.5	8.9	10.6	8.4	5.3	2.7	1.1	0.3	0.1	0	0	
衡阳市	实测	2	13	9	7	6	1	3	0	0	0	0	0.802
	理论	3.6	9.1	10.8	8.3	5.2	2.5	1.0	0.4	0.1	0	0	
娄底	实测	1	6	5	10	7	6	6	0	0	0	0	0.791
	理论	1.3	4.6	7.8	8.8	7.9	5.4	3.0	1.5	0.5	0.2	0.1	

从41 a数据统计显示,除南岳外,衡邵盆地另外 27 个国家气象站汛期平均每年的暴雨日数都在2.1 ~ 4.1 d,其分布总体呈现东北多、西南少的特征(图略)。为研究暴雨日数出现概率的空间分布特征,可以用服从 Poisson 分布的衡邵盆地 28 个国家气象站每年暴雨日数 ≥ 3 d的理论概率判断各地每年暴雨日数的出现机率^[10-11]。

如图 3 所示,衡邵盆地北部地区暴雨日数 ≥ 3 d的

理论概率和实测概率都在 60% 以上,中部地区基本在 36% ~ 50%;唯一的差别在于南部地区新田县的实测概率在 60% 以上,而理论概率在 50% ~ 60%。总得来说,衡邵盆地暴雨日数 ≥ 3 d的理论概率分布和实测概率分布基本一致,都呈现南北部高、中部低的特征。换言之,用 Poisson 分布模型获得的理论概率与实测概率相当吻合,Poisson 分布模型能很好地拟合衡邵盆地每年不同暴雨日数出现的概率。

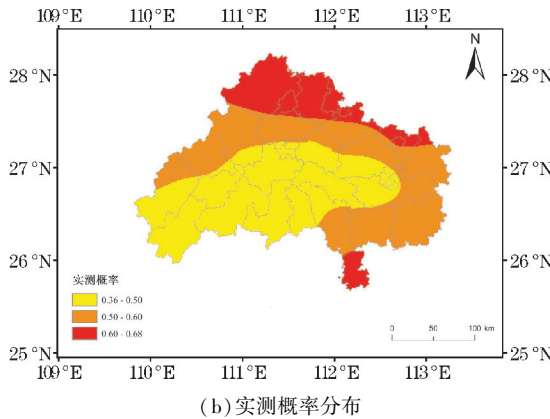
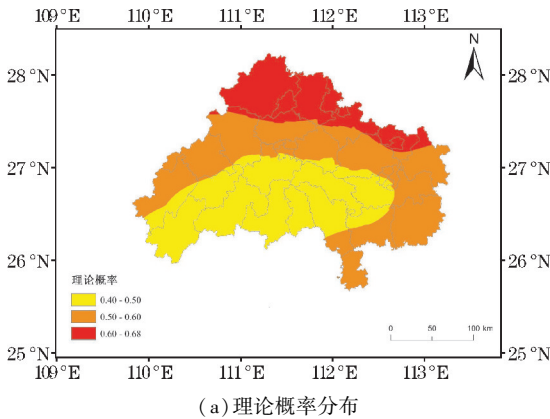


图 3 暴雨日数 ≥ 3 d的理论概率和实测概率空间分布

3.4 暴雨频次时间分布特征

为进一步研究衡邵盆地地区暴雨频次41 a随时间的变化规律,考虑通过分析滑动折线图来分析衡邵盆地暴雨频次的时间变化特征^[17]。本文以20 a为时间段,其中第 1 个时间段为 1980-1999 年,第 2 个时间段为 1981-2000 年,以此类推,最后一个时间段为 2001-2020 年,依次将 1980-2020 年这41 a分为 22 个连续长度为20 a的时间段。考虑 Poisson 分布模型能够很好地描述衡邵盆地地区暴雨频次分布特征,因此在这 22 个连续时间段中分别对衡邵盆地 28 个国家气象站统计的暴雨频次进行拟合分析,得到各站 22 个时间段的参数 λ ,依据 λ 再计算各站 22 个时间段的 $P(X\geq 3)$,将各站同一时间段算出的 $P(X\geq 3)$ 取算术平均值以求得表示衡邵盆地 28 个国家气象站总体的 $P(X\geq 3)$,以此研究分析衡邵盆地暴雨频次随时间的变化规律。如

图 4 所示,两根折线分别为 22 个时间段 28 个国家气象站暴雨实测总频次的算术平均值和泊松分布拟合暴雨日数 ≥ 3 d概率的算术平均值,用此两根折线对比分析在这 22 个时间段里暴雨实测总频次和泊松分布拟合 $P(X\geq 3)$ 的变化趋势及规律。

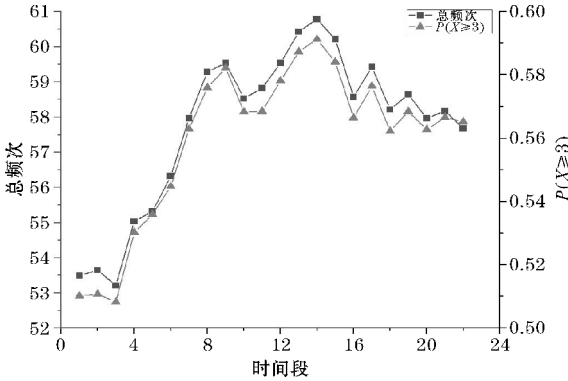


图 4 各时间段暴雨总频次和理论概率 $P(X\geq 3)$ 分布图

结果表明,衡邵盆地这22个时间段里暴雨总频次与暴雨日数 ≥ 3 d的理论概率的变化趋势基本一致。在第1至第3个时间段,暴雨总频次和暴雨日数 ≥ 3 d的理论概率都呈现略微减少趋势;从第4至第9个时间段,暴雨总频次和暴雨日数 ≥ 3 d的理论概率都呈现大幅度上升趋势;第10个时间段暴雨总频次和暴雨日数 ≥ 3 d的理论概率都有短暂减少趋势,从第11至第14个时间段,暴雨总频次和暴雨日数 ≥ 3 d的理论概率又有一定幅度上升趋势,且都在14个时间段里达到各自的最大值;从第15至第22个时间段,暴雨总频次和暴雨日数 ≥ 3 d的理论概率都表现为波动下降的趋势变化特征。总体来看,衡邵盆地地区这22个时间段里暴雨的总体频次和暴雨日数 ≥ 3 d的理论概率都在波动中呈现出明显上升趋势。

4 结论

利用衡邵盆地28个国家气象站41 a逐日降水数据资料统计出汛期(4-9月)暴雨日数,并基于泊松分布暴雨概率模型对其暴雨频次特征进行全面模拟,得到以下结论:

(1)除南岳以外,Poisson分布拟合另外27个国家气象站每年发生 n 次暴雨的年数通过 χ^2 检验(显著性水平 $\alpha=0.05$),且基于Poisson分布模型算出的另外27个国家气象站理论年数和实测年数的相关系数都在0.79~0.98,相关性较好,能用Poisson分布模型很好描述衡邵盆地地区汛期(4-9月)暴雨概率分布特征。

(2)根据Poisson分布理论计算,衡邵盆地暴雨频次分布和Poisson分布的拟合程度是较高的,除了南岳以外,Poisson分布模型都能很好描述衡邵盆地另外27个国家气象站的暴雨频次分布特征。

(3)根据Poisson分布理论计算,衡邵盆地北部地区暴雨日数 ≥ 3 d的理论概率和实测概率在60%以上,中部地区基本在36%~50%;唯一的差别在于南部地区新田县的实测概率在60%以上,而理论概率在50%~60%。总得来看,衡邵盆地暴雨日数 ≥ 3 d的理论概率分布和实测概率分布基本一致,都基本呈现南北部高、中部低的特征。

(4)时间演变分析表明暴雨总频次与暴雨日数 ≥ 3 d的理论概率的变化趋势基本一致,且都在波动中呈现出明显上升趋势。

参考文献:

- [1] Cubasch U, Wuebbles D, Chen D, et al. Introduction. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J]. Computational Geometry, 2013, 18(2): 95-123.
- [2] 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(1): 21-23.
- [3] 高涛, 谢立安. 近50年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J]. 地球科学进展, 2014, 29(5): 577-589.
- [4] 周月华, 彭涛, 史瑞琴. 我国暴雨洪涝灾害风险评估研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 494-501.
- [5] 王乐, 邢雯慧. 1960-2017年来长江流域暴雨特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(9): 14-21.
- [6] 卢希安. 湖南省极端降水的时空变化及预估研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2020.
- [7] 符静, 秦建新, 黎祖贤, 等. “衡邵干旱走廊”历史降雨量时空特征及趋势分析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 3097-3106.
- [8] Suepa T, Qi J, Lawawirojwong S, et al. Understanding spatio-temporal variation of vegetation phenology and rainfall seasonality in the monsoon Southeast Asia [J]. Environmental research, 2016, 147: 621-629.
- [9] 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.
- [10] 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(4): 13-18.
- [11] 任至涵, 倪雪, 倪长健, 等. 基于泊松分布的成都经济区暴雨概率特征研究[J]. 成都信息工程大学学报, 2021, 36(1): 80-85.
- [12] 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.
- [13] 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.

- [14] 邹德全, 邹承立, 宋鑫民, 等. 基于泊松分布的遵义市暴雨、大暴雨次数概率特征[J]. 成都信息工程大学学报, 2022, 37(6): 716–720.
- [15] 陈明, 傅抱璞, 于强. 山区地形对暴雨的影响[J]. 地理学报, 1995(3): 256–263.
- [16] 汪学军. 山地地形对九华山暴雨的影响[J]. 山地学报, 2012, 30(4): 425–430.
- [17] 陈刘凤. 广西致灾暴雨特征及地形影响分析[D]. 南宁: 广西师范学院, 2016.

Study on the Probabilistic Characteristics of Heavy Precipitation in Hunan Hengshao Basin based on Poisson Distribution

DENG Yifan, HE Ke, XIAO Wenxiao

(Hengyang Meteorological Bureau, Hengyang 421000, China)

Abstract: In order to study and analyze the probabilistic characteristics of heavy precipitation in Hengshao Basin, Hunan Province, daily precipitation data of 28 national meteorological stations in Hengshao Basin during the flood season (April–September, 1980–2020) were used to calculate the annual heavy precipitation frequency and corresponding frequency occurrence probability of each station. These are Combined with the Poisson distribution function to obtain a Statistical model of heavy precipitation based on Poisson distribution. By comparative analysis of the theoretical and measured data, except for Nanyue, the correlation coefficient between theoretical and measured data of national meteorological stations in Hengshao Basin is 0.79–0.98, which shows the validity of rainstorm probability model based on Poisson distribution. The research results show that except for Nanyue, the probability distribution and frequency distribution of rainstorms in flood season (April–September) of national meteorological stations in the Hengshao basin area conform to the Poisson distribution model; In terms of spatial distribution, the theoretical probability distribution of rainstorm days (3 d) is consistent with the measured probability distribution, which is high in the north and south and low in the middle; In terms of time distribution, the total frequency of heavy precipitation is consistent with the change trend of the theoretical probability of the number of days of rainstorm for 3 days, and both show an obvious upward trend in the fluctuation.

Keywords: heavy precipitation; Poisson distribution; Hengshao basin; probabilistic characteristics