

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.003

基于降雨资料的雨量预警指标阈值求解模型

龚云柱¹,周兰庭¹,柳志坤^{2,3}

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 青岛市发展和改革委员会,山东 青岛 266000;
3. 青岛市经济发展研究院,山东 青岛 266000)

摘要:为保证雨量预警指标阈值在有效周期范围内发挥预警作用,通过分析现有雨量预警指标阈值的确定方法,提出了基于区域临界雨量法-降雨灾害同频率法-R/S分析法的雨量预警指标阈值求解模型。将该模型应用于江苏省泰兴市降雨时间序列的分析,对最大日降水量时间序列进行阈值确定、趋势分析,并用指标阈值进行预警验证。结果表明,该模型的雨量预警指标阈值确定结果相较单一模型更为准确,且具有一定的时效性,可为农村基层防汛预报预警提供参考。

关键词:雨量预警指标阈值;趋势分析;区域临界雨量法;降雨灾害同频率法;R/S分析法;泰兴市中图分类号:TV125 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2021)06-0013-07

Model for solving rainfall early-warning index threshold based on rainfall data//GONG Yunzhu¹, ZHOU Lanting¹, LIU Zhikun^{2,3} (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Qingdao Development and Reform Commission, Qingdao 266000, China; 3. Qingdao Economic Development Research Institute, Qingdao 266000, China)

Abstract: To ensure the effectiveness of the rainfall early-warning index threshold in early warning within a certain period, an analysis of existing methods for determination of the rainfall early-warning index threshold was performed, and a model for solving the rainfall early-warning index threshold was developed based on the regional critical rainfall method, the same frequency method of rainfall events and disasters, and the R/S analysis method. Then, the model was verified through its application to analysis of the rainfall time series in Taixing City, Jiangsu Province. The threshold for the maximum daily rainfall time series was determined, the its variation trend was analyzed. Results show that the threshold obtained with the model is more accurate than that of single models, and has a certain timeliness, which can provide reference for rural flood control forecast and early warning.

Key words: rainfall early-warning index threshold; trend analysis; regional critical rainfall method; same frequency method of rainfall events and disasters; R/S analysis method; Taixing City

在农村基层防汛预报预警体系建设中,临界雨量预警是一个重要环节,其指标的计算具有重要的意义。国内外学者对洪涝灾害不确定因素产生的综合影响开展了大量的研究,明确指出临界雨量是洪涝灾害预报预警的基石^[1]。临界雨量法是采用临界雨量作为预警指标进行洪灾预警的方法,一般适用于集雨面积小,洪水组成单一,区域降雨一致性较好,降雨与洪水有关联性的小流域地区^[2]。临界雨量法包括以数据统计分析为核心的统计学法和以水文学及水力学物理机制为主的水文水力学法^[3]。统计学法主要包括单站/区域临界雨量法、内插法、

比拟法和降雨灾害同频率分析法等,而水文水力学法主要包括水位流量反推法、降雨驱动指标法、动态临界雨量法、降雨径流关系曲线插值法及分布式模型法等^[4]。对于临界雨量指标的确定,王燕云等^[5]利用支持向量机回归拟合算法模型推求出河南新县的临界雨量,提高了预测精度;陈真莲等^[6]采用区域临界雨量法和水位反推法综合分析,确定了广东省连州瑶安小流域临界雨量指标值;翟晓燕等^[7]结合分布式水文模型和情景分析法得出了安徽省岳西流域的山洪灾害临界雨量集合。在降雨、地形地质、经济社会等因素影响下,山丘区山洪灾害预警研究

基金项目:国家自然科学基金(51209078)

作者简介:龚云柱(1998—),男,硕士研究生,研究方向为水利水电工程建设与管理。E-mail: gongyunzhu168@163.com

通信作者:周兰庭(1975—),女,副教授,博士,主要从事水利水电工程建设管理、大坝安全监控研究。E-mail: litzhou@hhu.edu.cn

备受学者关注,但是对于平原区洪涝灾害研究较少,使平原区洪涝灾害预警成为防汛预报预警建设的薄弱环节^[8-9]。为此,本文结合雨量预警指标阈值研究进展,基于临界雨量法和降雨时间序列的分形特性,研究雨量预警指标阈值在防洪防灾中的时效性,提出了基于区域临界雨量法-降雨灾害同频率法-重标极差(R/S)分析法的求解模型,并应用于江苏省泰兴市汛期降雨时间序列进行分析,验证了该模型在平原区洪涝灾害预警中的实用性。

1 模型建立

1.1 区域临界雨量法

对于水文站点分布松散、数量较少地区,比较适合用区域临界雨量法分析预警指标,该方法较单站临界雨量法更精确。区域临界雨量法是通过研究区各站点发生洪涝灾害场次、雨量数据计算面平均雨量,来确定预警雨量的方法。首先,根据洪涝灾害调查资料,统计研究区各雨量站的雨量资料来确定引起洪涝灾害降雨过程的起止时间(从连续3 d日降水量均不大于1 mm,第4天出现日降水量大于1 mm的时间开始到洪灾结束的时间);其次,在各次降雨过程中逐次搜寻、统计1/6 h、1/2 h、1 h、6 h、12 h、24 h最大雨量和过程总雨量,并记录起止时间,如果统计时间段跨度大于过程时间长度,则不统计其最大雨量和起止时间,但须记录其过程总雨量;最后根据以下过程确定临界雨量阈值^[4]。

a. 区域临界雨量初值的确定。假设研究区域内共有 S 个雨量站,统计出各雨量站 N 次洪涝灾害不同长时的雨量。设 R_{ij} 为第 i 个雨量站发生第 j 次洪涝灾害时长 t ($t=1/6\text{ h}, 1/2\text{ h}, 1\text{ h}, 6\text{ h}, 12\text{ h}, 24\text{ h}$)内的最大雨量,统计区域内 N 次洪涝灾害时长 t 内最大面平均雨量的最小值,即为不同灾害场次时长 t 内区域临界雨量初值:

$$R_{t\text{临界}} = \min \bar{R}_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式中 $\bar{R}_{ij}$ 为第 j 次洪涝灾害时长 t 内的最大面平均雨量。雨量面平均值可采用泰森多边形、等雨量线法、算术平均法进行计算^[10]。

b. 区域临界雨量阈值的确定。研究区内发生洪涝灾害的雨量范围介于 $\max \bar{R}_{ij}$ 和 $R_{t\text{临界}}$ 之间, $R_{t\text{临界}}$ 为研究区内发生洪涝灾害的充要条件, $\max \bar{R}_{ij}$ 为研究区内发生洪涝灾害的充分条件。 N 次洪涝灾害时长 t 内区域平均临界雨量为

$$R_t = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{R}_{ij} \quad (2)$$

降雨过程中,区域面平均雨量在 $[R_{t\text{临界}}, R_t]$ 范围内,就可能会发生洪涝灾害^[11]。 $[R_{t\text{临界}}, R_t]$ 为区

域临界雨量阈值,可作为判别区域内有无洪涝灾害发生的定量指标。

1.2 降雨灾害同频率法

降雨灾害同频率法以假设区内洪灾与降雨频率相同为前提,确定相同频率下的雨量设计值作为洪灾预警值的方法。此假设在选样时需考虑超定量的问题,依据文献^[5],结合实测资料确定的临界雨量值与区内设计雨量值对比分析可避免选样(超定量)时存在的问题,此方法对本研究适用。首先调查历史洪涝灾害事件,确定降雨资料统计年份 $[a, b]$ 期间发生洪涝灾害场次 N ,分析洪灾的致灾频率($P = N/(b - a + 1)$);其次结合降雨统计资料选定样本序列(假设样本数为 n)进行参数估计分析,确定该样本在频率 P 下的雨量设计值,临界雨量初值取与洪灾频率相同的雨量设计值^[12],对比分析周边邻近地区的临界雨量和文献^[13]中的设计雨量,选取最小值确定为临界雨量值。

在参数估计计算中,运用适线法^[14]确定相关参数。首先对由大到小排列的样本序列分别计算经验频率,并将经验频率数据点绘在频率格子图上;然后选择皮尔逊Ⅲ(P-Ⅲ)型分布曲线,用适线法进行无偏估计,确定样本均值、变差系数 C_v 初值,进一步对经验数据点拟合,得到拟合效果好的变差系数 C_v 及 C_s/C_v (C_s 为偏态系数),再由下式计算出频率为 P 时时长 t 的设计雨量 $x_{t,p}$:

$$x_{t,p} = x^* (1 + \varphi_p C_v) \quad (3)$$

式中: x^* 为样本均值; φ_p 为由P-Ⅲ型频率曲线得到频率 P 下的离均系数值。

因水文统计过程雨量时长为1 d,求解不同时长雨量需对其进行时长雨量转换。本文采用暴雨公式^[4]计算 $x_{t,p}$:

$$x_{t,p} = \begin{cases} S_p t^{1-n_1} = 24^{n_2-1} x_{24,p} t^{1-n_1} & 0\text{ h} < t \leq 1\text{ h} \\ S_p t^{1-n_2} = 24^{n_2-1} x_{24,p} t^{1-n_2} & 1\text{ h} < t \leq 24\text{ h} \end{cases} \quad (4)$$

式中: S_p 为单位历时的暴雨平均强度; $x_{24,p}$ 为频率为 P 时24 h的设计雨量; n_1 、 n_2 为暴雨递减指数,本文取 $n_1 = 0.49$, $n_2 = 0.74$ ^[15]。

对于不同研究区,计算方法有所不同。要确定研究区内发生洪涝灾害的临界雨量指标,需统计全区各雨量站获取的统计资料中逐年24 h最大雨量值,计算全区逐年24 h最大面平均雨量值,对其进行排序并计算经验频率,再进行参数估计确定不同频率下的雨量设计值,最后根据计算的致灾频率选定雨量设计值作为全区的临界雨量值。要确定研究区内各水文站分辖区发生洪涝灾害的临界雨量指

标,需统计各分辖区雨量站获取的统计资料中逐年 24 h 最大雨量值,确定各站点临界雨量值,最后用点面折算系数确定各分辖区临界雨量值。

1.3 R/S 分析法

R/S 分析法^[16]最早被英国水文学家 Hurst 用于水库与河流之间进出流量的分析,其中 Hurst 指数为时间序列的极差与标准差的比值。R/S 分析法是一种合理预测事物变化趋势的新方法,该方法研究的系统所需要的假设条件很少,被广泛应用于时间序列的分析^[17]。对于长度为 N 的样本时间序列 $\{X_j | j=1,2,\dots,N\}$,将其等间距分割成长度为 τ ($\tau \geq 2$) 的 M 个连续不重叠的子区间 Y_m ($m=1,2,\dots,M$),则有 $\tau M = N$ 。设任意子区间元素为 x_i ($i=1,2,\dots,\tau$),其极差、标准差、Hurst 指数计算公式^[18]分别为

$$R = \max_{1 \leq i \leq \tau} x'_{i,\tau} - \min_{1 \leq i \leq \tau} x'_{i,\tau} \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

$$\lg(R/S) = H \lg \tau + H \lg \alpha \quad (7)$$

其中 $x'_{i,\tau} = \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x})$ ($1 \leq t \leq \tau$)

$$\bar{x} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} x_i$$

式中: R 为极差; S 为标准差; H 为 Hurst 指数; α 为不依赖于 H 的变量,是反映自然现象固有特性的回归系数。

Hurst 指数反映事物发展过程的长记忆性程度与事物发展过去、现在和未来之间的内在联系,可确定时间序列的自相似性和长程相关性^[19]。

a. 长程相关性判断。时间序列 Hurst 指数与分形维数 D 的关系为 $D = 2 - H$ 。 H 和 D 的值有以下 4 种情况:当 $H = 0.5, D = 1.5$ 时,表示该序列要素是随机的,即过去降水的状况与未来的趋势零相关;当 $0.5 < H < 1, 1 < D < 1.5$ 时,表示未来的趋势变化与过去的趋势变化呈现正相关关系,即未来降水趋势将随过去的趋势同向发展;当 $0 < H < 0.5, 1.5 < D < 2$ 时,表示过去的趋势变化与未来的趋势变化呈现负相关关系,即未来降水趋势将随过去的趋势反向发展;当 $H = 1$ 时,表示该序列要素未来是可以完全预测的,说明该时间序列可完全确定。

b. 长记忆性判断。在分形统计方法中, V_τ 统计量定义为

$$V_\tau = \frac{R/S}{\sqrt{\tau}} \quad (8)$$

由 $\lg V_\tau - \lg \tau$ 的图形判断时间序列的长记忆性程度。当该图形处于平坦直线段,说明该时间序列为

独立的随机过程;当该图形处于向上倾斜曲线段,说明该时间序列具有长记忆性。从散点图的拐点横坐标确定临界时间 T_c ,可进一步推算该时间序列长记忆性的非周期循环长度 $T = 10^{T_c}$ 。非周期循环长度为平均意义上的周期长度的周期,当样本数据足够大时,会在未来某个时刻以不同的长度进入下一个不同的周期。若 $\lg V_\tau$ 达到峰值后就趋于平坦,说明长记忆性过程开始扩散,时间序列趋于随机过程^[18]。

1.4 求解模型建立

根据以上理论分析,雨量预警指标阈值的求解模型建模步骤(图 1)如下:

a. 对发生洪涝灾害 24 h 最大降雨时间序列进行雨量面平均处理,运用区域临界雨量法统计分析,得出初始临界雨量阈值 $[R_{\text{临界}}, R_t]$ 。

b. 采用适线法对 24 h 最大降雨时间序列进行参数估计,并运用降雨灾害同频率法确定相应频率的雨量预警指标,将 24 h 最大雨量预警指标与初始临界雨量阈值对比并更新阈值 $[R'_{\text{临界}}, R_t]$ 。

c. 采用线性倾向估计法对降雨时间序列进行趋势分析,运用 R/S 分析法预测未来降雨趋势及非周期循环长度,利用雨量预警指标阈值实现在有效周期内预警。

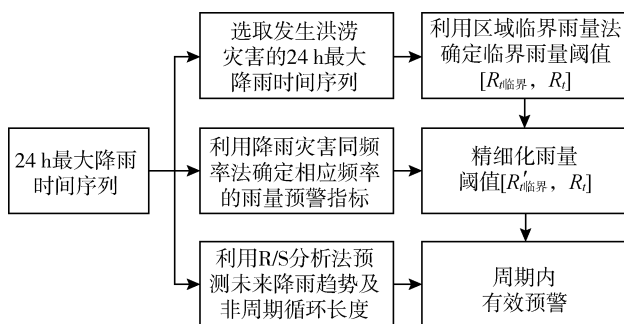


图 1 建模流程

Fig. 1 Flow chart for modeling

2 实例验证

江苏省泰兴市位于江苏省中部、长江下游北岸,以防洪区划由西向东划分为 A、B 区,如图 2 所示。气象资料显示,泰兴市年平均降水量 1 043.2 mm,最大年降水量 1 449.4 mm,最小年降水量 462.1 mm;多年最大 1 d 暴雨降水量 325.3 mm,最大降雨强度 80 mm/h,最大 3 d 降水量 436.2 mm。降雨相关数据来源于江苏省泰兴市水务局提供的 1981—2019 年汛期(5 月 1 日至 9 月 30 日)逐日降雨统计资料、中华人民共和国成立以来历史洪涝灾害资料以及《江苏省暴雨洪水图集》(1984 年)。所采用的雨量站降

雨数据具有良好的代表性、周期性和一致性^[20],可用于相应的水文计算分析及趋势变化特征预测研究。

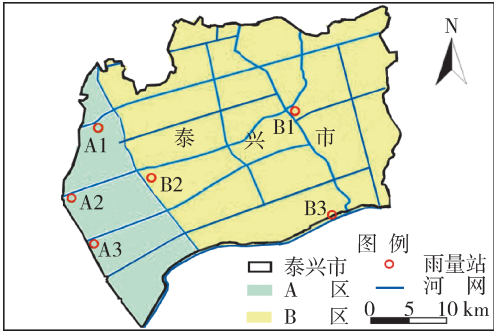


图2 泰兴市防洪区划
Fig.2 Flood control zoning of Taixing City

2.1 区域临界雨量阈值

根据泰兴市1949年以来重大洪涝灾害事件情况,结合1981—2019年主汛期(6月1日至8月30日)逐日降雨记录资料,统计雨量站A1、A2、A3、B1、B2、B3站(以下简称“六站”)发生洪涝灾害的起止时间(此处以洪号为计)、单个洪涝场次24 h最大面平均雨量及对应的过程雨量,并计算各洪涝灾害场次24 h最大面平均雨量的均值(表1)。根据表1,以区域临界雨量法确定泰兴市洪涝灾害区域临界雨量阈值为92.75~116.42 mm,区域内任一雨量站24 h最大雨量值达到92.75 mm就可能激发洪涝灾害,需组织开展防洪防汛预警工作。

表1 泰兴市1981—2019年洪涝灾害区域24 h最大面平均雨量和过程雨量
Table 1 Maximum 24 h areal mean rainfall and process rainfall for each flood disaster in Taixing City from 1981 to 2019

洪号	24 h 最大面平均雨量/mm	过程雨量/mm
910611	109.40	271.80
910701	119.97	443.08
910807	133.33	135.23
030705	153.03	239.97
100709	92.75	142.28
150625	109.67	278.35
160701	96.77	359.50
平均值	116.42	267.17

2.2 临界雨量指标

根据泰兴市分区特点,A、B区分别以A1、B1站

表2 泰兴市不同频率不同时长最大面平均雨量
Table 2 Maximum areal mean rainfall for different durations and different frequencies in Taixing City

时长/h	最大面平均雨量/mm						
	P = 50%	P = 20%	P = 17.9%	P = 10%	P = 5%	P = 2%	P = 1%
1	36.56	55.13	57.22	65.69	75.73	88.50	97.90
6	61.88	87.84	91.17	104.68	120.67	141.01	155.99
12	74.84	105.19	109.18	125.35	144.50	168.85	186.79
24	90.17	125.96	130.74	150.10	173.03	202.20	223.68

为典型代表站,对比分析A、B区及泰兴市临界雨量指标。

a. 统计泰兴市各雨量站年24 h最大雨量数据,计算年24 h最大面平均雨量,绘制、调试P-Ⅲ型曲线如图3所示,该时间序列均值为98.65 mm,用适线法拟合泰兴市年降水量经验频率点,得到最优拟合的P-Ⅲ型频率曲线,对应的 C_s/C_v 值为3.5、 C_v 值为0.39。1981—2019年泰兴市发生7次洪涝灾害,洪灾频率为17.9%,不同降雨频率下,泰兴市面平均雨量特征值如表2所示。为响应农村基层防汛预报预警体系建设,根据降雨与灾害同频率法,确定将泰兴市2年一遇洪水的临界面雨量指标作为防洪预警的依据,结合表1分析得出泰兴市临界雨量阈值为90.17~116.42 mm。

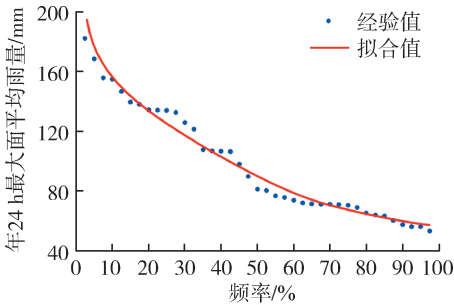


图3 泰兴市1981—2019年降雨频率曲线
Fig.3 Rainfall-frequency curve of Taixing City from 1981 to 2019

b. 统计A1、B1站的年24 h最大雨量数据,绘制、调试P-Ⅲ型曲线,该时间序列均值分别为105.39 mm(A1)、106.34 mm(B1),用适线法拟合两站年降水量经验频率点,得到最优拟合的P-Ⅲ型频率曲线,对应的 C_s/C_v 值皆为3.5, C_v 值分别为0.34(A1)、0.33(B1);根据《江苏省暴雨洪水图集》短历时暴雨点面关系曲线,1 h、6 h、12 h、24 h最大雨量点面折算系数分别为0.855、0.905、0.915、0.925,以此确定A1、B1站辖区2年一遇洪水的临界雨量指标如表3所示,结合表1分析得出泰兴市临界雨量阈值为89.92~116.42 mm。

2.3 趋势分析

2.3.1 降雨变化特征

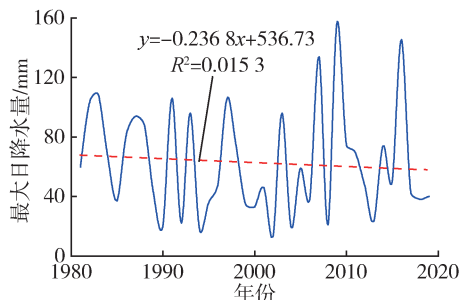
a. 月最大日降水量逐年变化趋势。以A1、B1

表3 A1、B1 站 2 年一遇洪水临界雨量指标

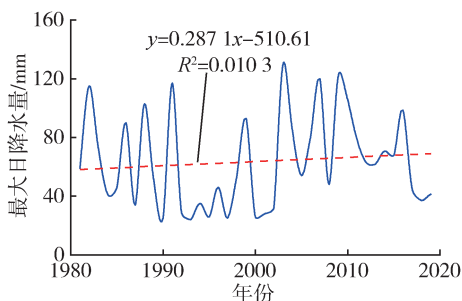
Table 3 Critical rainfall index for two-year return period flood at A1 and B1 stations

时长/h	临界点雨量/mm		临界面雨量/mm	
	A1 站	B1 站	A1 站	B1 站
1	43.09	42.55	36.84	36.38
6	68.66	67.79	62.13	61.35
12	82.21	81.18	75.23	74.28
24	98.45	97.21	91.07	89.92

站为代表雨量站,分别对 A、B 区进行降水量变化趋势分析。采用线性倾向估计法^[21-22]研究泰兴市 1981—2019 年主汛期最大日降水量统计分布,如表 4 所示,A1、B1 站 6 月最大日降水量都表现出下降趋势,下降速率分别为 0.4390 mm/a、0.7505 mm/a;8 月最大日降水量都表现出上升趋势,上升速率分别为 0.2758 mm/a、0.807 mm/a;两站 7 月最大日降水量变化趋势不同,A1 站下降速率和 B1 站上升速率分别为 0.2368 mm/a、0.2871 mm/a,其变化趋势如图 4 所示。



(a) A1 站



(b) B1 站

图4 A1、B1 站 7 月最大日降水量变化趋势

Fig.4 Variation trends of maximum daily rainfall at A1 and B1 stations in July

表4 A1、B1 站 6—8 月最大日降水量变化趋势

Table 4 Variation trends of maximum daily rainfall at A1 and B1 stations from June to August

站点	时间	上升(下降)速率/(mm·a ⁻¹)	R ²	最大日降水量均值/mm	拟合结果
A1	6 月	0.4390 **	0.0277	56.75	$y = -0.4390x + 934.69$
	7 月	0.2368 **	0.0153	63.13	$y = -0.2368x + 536.73$
	8 月	0.3177 *	0.0109	56.52	$y = 0.3177x - 578.87$
B1	6 月	0.7505 **	0.0614	60.08	$y = -0.7505x + 1561.1$
	7 月	0.2871 *	0.0103	63.56	$y = 0.2871x - 510.61$
	8 月	0.8070 *	0.0809	53.44	$y = 0.8070x - 1560.7$

注: *、** 分别表示降水量为上升和下降趋势。

b. 年最大日降水量逐年变化趋势。结合“六站”降雨资料,1981—2019 年泰兴市最大日降水量逐年变化趋势如图 5 所示,最大日降水量有逐年上升趋势,上升速率为 0.192 mm/a,确定性系数 R^2 为 0.0136、最大日降水量平均值为 98.65 mm。

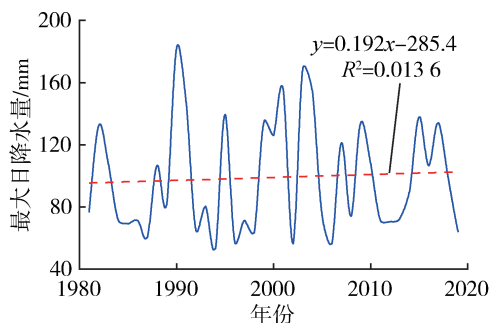


图5 泰兴市年最大日降水量变化趋势

Fig.5 Variation trend of annual maximum daily rainfall in Taixing City

2.3.2 未来降雨变化的趋势预测

统计分析泰兴市代表雨量站 A1、B1 站汛期月最大日降水量变化特征及泰兴市年最大日降水量变化特征,进一步研究最大日降水量的周期性,即研究最大日降水量是否具有规律性。利用 Matlab 软件分别对 A1、B1 站汛期月最大日降水量数据、泰兴市年最大日降水量数据进行 R/S 分析、统计量分析得到 $\lg(R/S)$ 、 $\lg V_r$ 、 $\lg \tau$ 的关系,如图 6 和图 7 所示。在 $\lg V_r$ 、 $\lg \tau$ 散点图上找到趋势开始发生变化的拐点或转折点,该点横坐标对应的时间为该时序的临界时间 T_c ,即可确定 T 值。对 $\lg(R/S)$ 、 $\lg \tau$ 关系图用式(7)进行最小二乘拟合,进一步求得 Hurst 指数、分维数、回归系数及其他统计量,如表 5 所示。

2.4 结果分析

a. 泰兴市发生洪涝灾害区域临界雨量阈值为 89.92 ~ 116.42 mm,表明降雨灾害同频率法可精细化雨量阈值,为农村基层防洪防汛提供参考。

b. 泰兴市年最大日降水量表现出上升趋势,A1 站 8 月和 B1 站 7 月、8 月最大日降水量表现出不同程度的上升趋势,A1 站 6 月、7 月和 B1 站 6 月最大日降水量表现出不同程度的下降趋势。由表 5

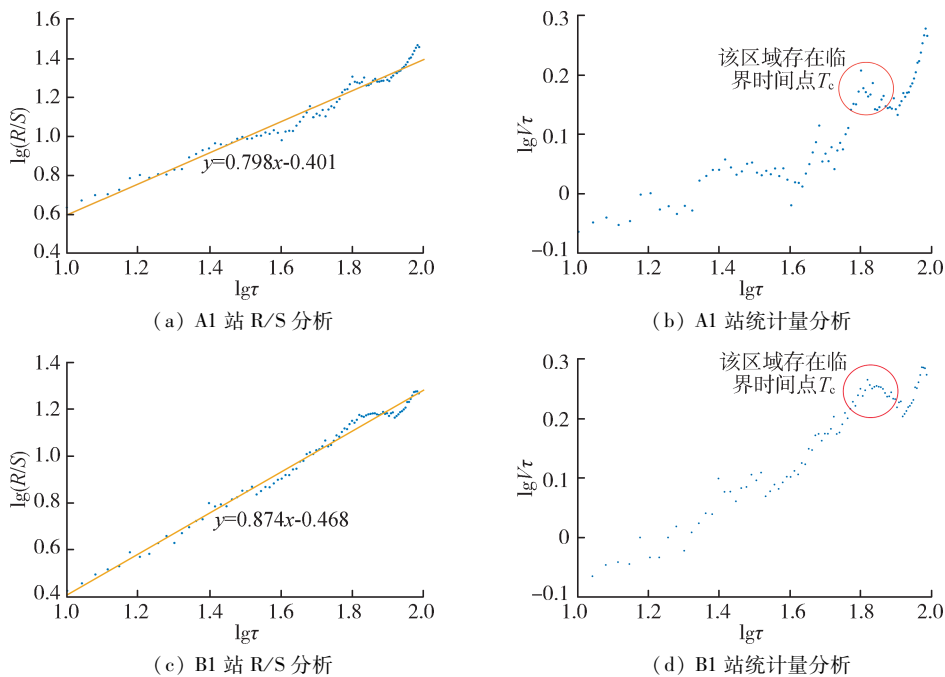


图 6 A1、B1 站汛期月最大日降水量变化趋势预测

Fig. 6 Prediction of variation trends of monthly maximum daily rainfall at A1 and B1 stations in flood season

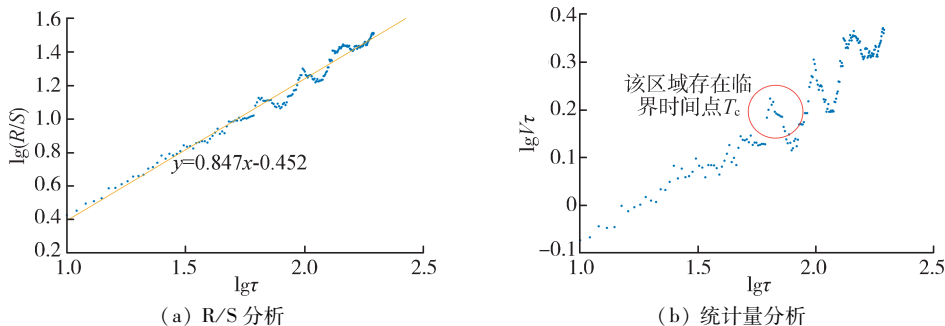


图 7 泰兴市年最大日降水量变化趋势预测

Fig. 7 Prediction of variation trend of annual maximum daily rainfall in Taixing City

表 5 泰兴市、A1 站、B1 站最大日降水量变化趋势预测统计量

Table 5 Forecast parameters of maximum daily rainfall in Taixing City and at A1 and B1 stations

区域	H	D	a	$T/\text{月}$	临界时间点			
					对应日期	$\lg\tau$	$\lg V_\tau$	$\lg(R/S)$
泰兴市	0.847	1.153	0.760	64	1993 年 8 月	1.806	0.2238	1.127
A1 站	0.798	1.202	0.314	63	1993 年 7 月	1.799	0.2070	1.107
B1 站	0.874	1.126	0.291	65	1993 年 8 月	1.810	0.2654	1.175

可知, $0.5 < H < 1$ 、 $1 < D < 1.5$, 表示此年、月最大日降水量时间序列具有较好的长程相关性, 且稳定性较好兼具随机性, 进一步表明泰兴市未来年最大日降水量将延续过去的变化趋势, 以 0.192 mm/a 的速率上升, A1、B1 站未来主汛期月最大日降水量也将延续过去的变化趋势。 $\lg V_\tau$ - $\lg\tau$ 散点图整体呈上升趋势, 即长记忆性显著, 第一个临界时间点在 1993 年主汛期, 超过这点后出现陡升或陡降的变化, 依然能够保持较好的线性趋势延续下去, 故该降雨时间序列变化趋势并不会因超过临界时间点而完全消失, 而是处于一种减弱的状态, 而后会迅速再进入新

的周期, 以此将长程相关性传递下去, 这表明已确定的临界雨量指标阈值对未来洪涝灾害发生具有明显预警作用。因此, 本文构建的求解模型提供了在周期内有效预警的雨量阈值, 可以用于研究区的洪涝预警。

3 结 语

本文以江苏省泰兴市为例, 以降雨资料时间序列分析为基础, 结合区域临界雨量法、降雨灾害同频率法、R/S 分析法等 3 种分析方法构建了雨量预警指标阈值求解模型。检验结果显示, 此模型可精细

化雨量阈值并使其在周期内有效预警,可用于研究区乃至平原区洪涝预警。求解模型可为平原区农村基层洪涝灾害的特征分析、评估和监测提供参考,且能对未来降雨变化进行预测、预警。

参考文献:

[1] 俞彦,张行南,张鹏,等. 基于 SCS 模型和新安江模型的雨量预警指标综合动态阈值对比[J]. 水资源保护, 2020,36(3):28-33. (YU Yan,ZHANG Xingnan,ZHANG Peng, et al. Comparison of comprehensive dynamic threshold of rainfall warning indicators based on SCS model and Xin'anjiang model [J]. Water Resources Protection,2020,36(3):28-33. (in Chinese))

[2] 赵然杭,王敏,陆小蕾. 山洪灾害雨量预警指标确定方法研究[J]. 水电能源科学,2011,29(9):49-53. (ZHAO Ranhang, WANG Min, LU Xiaolei. Research on determination method for rainfall warning indexes of torrential flood disaster[J]. Water Resources and Power, 2011,29(9):49-53. (in Chinese))

[3] 程卫帅. 山洪灾害临界雨量研究综述[J]. 水科学进展,2013,24(6):901-908. (CHENG Weishuai. A review of rainfall thresholds for triggering flash floods [J]. Advances in Water Science,2013,24(6):901-908. (in Chinese))

[4] 任波,李卫平,黄立志. 山洪灾害预警预报技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2018.

[5] 王燕云,原文林,龙爱华,等. 基于 SVR 的无实测资料小流域山洪灾害临界雨量预估模型及应用:以河南新县为例[J]. 水文,2020,40(2):42-47. (WANG Yanyun, YUAN Wenin, LONG Aihua, et al. Threshold rainfall prediction model for flash flood disaster in ungauged small watersheds based on SVR:a study case in Xinxian County of Henan Province[J]. Journal of China Hydrology,2020,40(2):42-47. (in Chinese))

[6] 陈真莲,黄国如,成国栋. 小流域山洪灾害临界雨量计算分析方法[J]. 中国农村水利水电,2014(6):82-85. (CHEN Zhenlian, HUANG Guoru, CHENG Guodong. Research on the calculation methods for critical rainfall of mountain torrent disasters of small watershed [J]. China Rural Water and Hydropower,2014(6):82-85.

[7] 翟晓燕,郭良,刘荣华,等. 前期土壤湿度和降雨对小流域山洪预警指标的影响评估[J]. 地理研究,2019,38(12):2957-2965. (ZHAI Xiaoyan, GUO Liang, LIU Ronghua, et al. Impact assessment of antecedent soil moisture conditions and rainfall variability on flash flood warning index at catchment scale [J]. Geographical Research,2019,38(12):2957-2965. (in Chinese))

[8] 刘淑雅,江善虎,任立良,等. 基于分布式水文模型的山洪预警临界雨量计算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):384-390. (LIU Shuya,JIANG Shanhu,

REN Liliang,et al. Calculation of critical rainfall for early-warning of mountain flood based on distributed hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45 (5): 384-390. (in Chinese))

[9] 陆剑峰. 水资源综合规划中的防洪安全校核研究[D]. 南京:河海大学,2005.

[10] 詹道江,徐向阳,陈元芳. 工程水文学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[11] 段生荣. 典型小流域山洪灾害临界雨量计算分析:以黄河流域大通河支流为例[J]. 中国农村水利水电,2008(8):63-65. (DUAN Shengrong. Calculation and analysis of critical rainfall for mountain flood disasters in typical small watershed;a study case in Datong River tributaries of the Yellow River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower,2008(8):63-65. (in Chinese))

[12] 祝武斌. 甘肃省成县山洪灾害临界雨量分析计算[J]. 水利规划与设计,2015(3):26-28. (ZHU Wubin. Analysis and calculation of critical rainfall of mountain flood disaster in Chengxian County of Gansu Province [J]. Water Resources Planning and Design,2015(3):26-28. (in Chinese))

[13] 江苏省水文总站. 江苏省暴雨洪水图集[R]. 南京:江苏省水文总站,1984.

[14] 丛树铮,谭维炎,黄守信,等. 水文频率计算中参数估计方法的统计试验研究[J]. 水利学报,1980(3):1-15. (CONG Shuzheng, TAN Weiyang, HUANG Shouxin, et al. Statistical experimental study on parameter estimation method in hydrological frequency calculation [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1980(3):1-15. (in Chinese))

[15] 吴志勤,闻余华. 江苏省暴雨统计参数规律性分析[J]. 江苏水利,2000(10):36-38. (WU Zhiqin, WEN Yuhua. Regularity analysis of statistical parameters of rainstorm in Jiangsu Province [J]. Jiangsu Water Resources,2000(10):36-38. (in Chinese))

[16] FALCONE K. 分形几何:数学基础及其应用[M]. 曾文曲,译. 北京:人民邮电出版社,2007.

[17] 杨金艳,赵超,刘光生,等. 基于 Mann-Kendall 和 R/S 法的水文序列变化趋势分析:以苏州市为例[J]. 水利水电技术,2017,48(2):27-30. (YANG Jinyan,ZHAO Chao, LIU Guangsheng, et al. Mann-Kendall and R/S methods combined-analysis on changing trend of hydrological series: a case of Suzhou [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2017,48(2):27-30. (in Chinese))

[18] 郭巧玲,韩振英,苏宁,等. R/S-GM(1,1)组合模型在径流预测中的应用[J]. 水利水电科技进展,2016,36(6):15-19. (GUO Qiaoling, HAN Zhenying, SU Ning, et al. Application of R/S-GM (1,1) model in runoff forecasting [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(6):15-19. (in Chinese))

(下转第 26 页)