DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2022. 04. 004

中国洪涝灾害农业致灾性时空分布规律

管新建,刘　源,孟　钰,臧亚文,吕　鸿

(郑州大学水利科学与工程学院,河南 郑州　450001)

摘要:利用 1950—2018 年历史洪涝灾情数据,选取农业受灾、成灾面积 2 个指标结合九点二次平滑法、时间序列分析法及空间聚类技术分析了对中国洪涝灾害农业致灾性时空分布规律。结果表明:在时间尺度上,1950—2018 年中国洪涝灾害对农业的影响整体有增加趋势,但是不同区域差异明显,洪涝灾害对农业发展影响较大且未来几年这种情况可能会持续下去;在空间尺度上,华南地区、东北部分地区和临海城市农业受灾情况较其他地区更为严重。

关键词:洪涝灾害;农业致灾性;九点二次平滑法;时间序列分析法;空间聚类;中国

中图分类号:TV93;S03　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1004 - 6933(2022)04 - 0021 - 05

Analysis on spatiotemporal distribution of agricultural disaster caused by floods and waterlogging in China//GUAN Xinjian, LIU Yuan, MENG Yu, ZANG Yawen, LYU Hong (*School of Water Conservancy Engineering*, *Zhengzhou University*, *Zhengzhou* 450001, *China*)

Abstract: Based on the historical flood disaster data from 1950 to 2018, the spatiotemporal distribution of agricultural disasters caused by floods and waterlogging in China was studied by two selected indexes, the agricultural disaster area and disaster affected area, combined with the nine point quadratic smoothing, time series analysis and spatial clustering methods. The results show that on the time scale, the impact of floods and waterlogging on agriculture in China has an overall increasing trend from 1950 to 2018, but there are obvious differences in different regions. Flood and waterlogging disasters have a great impact on agricultural development, and this situation may continue in the next few years. On the spatial scale, the agricultural disaster in South China, some parts of Northeast China and coastal cities is more serious than that in other regions.

Key words: flood disaster; agricultural disaster; nine point quadratic smoothing method; time series analysis; spatial clustering; China

中国是农业生产大国,创造了以不足世界 9% 的耕地养活世界近 21% 人口的奇迹,研究洪涝灾害农业致灾性时空变化规律是保障农业生产和社会稳定的重要环节。洪涝灾害具有多重属性,对于其致灾性研究是通过其自然属性角度,即从洪涝灾害的致灾后果和致灾因子来评价。洪涝通常会造成房屋倒塌、经济损失、人员伤亡、农田淹没等灾害,而农业洪涝灾害是由于洪涝过程中的大量积水使得农作物生长发育受限、减产等的气象灾害。对农业致灾性影响研究从“凡有过度即为致灾”角度考虑,具体体现为对农作物受灾、成灾面积的影响。目前,国内外学者们已经提出了一些较为成熟的农业洪涝灾害研究方法,在时间尺度上常用方法包括累积距平百分率分析法、帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)分析法、Mann-Kendall 法、Z 指数法、气象洪涝指标法等[1-4];在空间尺度上,研究多基于 GIS 分析技术对相关指标进行空间插值与展布,通过目视解译或聚类寻找规律性特征[5-7]。无论是时间或空间规律分析,都是基于洪涝灾害表征指标序列值的描述性分析[8-10],因此如何深入挖掘灾害指标联系,对反映时空规律分析的准确性至关重要。

综上,针对中国农业整体大空间范围、长时间尺度相结合的时空序列分析较少,且目前研究多集中在历史时间序列特征分析,对于灾害未来趋势预测

基金项目:国家自然科学基金(51739009,51879241)

作者简介:管新建(1973—),男,教授,博士,主要从事水资源配置与管理研究。E-mail: gxj1016@ zzu. edu. cn

通信作者:孟钰(1988—),女,副教授,博士,主要从事生态水文学研究。E-mail: mengyu8@ zzu. edu. cn

的研究较少。本文利用历史洪涝灾情农业受灾、成灾面积数据,采用了九点二次平滑法、时间序列分析法和空间聚类对1950—2018年中国洪涝灾害农业致灾性时空分布进行研究,通过对洪涝灾害农业致灾性时空分布规律及其致灾因子的分析,揭示国内洪涝灾害对农业致灾性的影响和发展规律,以期为提高农业水灾害防治管理水平、保障国家粮食安全提供科学依据和决策参考。

1 研究区概况与数据来源

中国地处亚洲东部,东临太平洋,地势西高东低。中东部季风区土壤肥沃气候适宜,科技水平高,农业耕地面积达全国60%以上的,其中北方热量低积云少地势开阔,以旱地为主,南方热量高降水充沛多丘陵和山地,以水稻田为主。根据《中国水旱灾害公报(2016)》的统计显示,2016年中国农业用地面积为528万km^2,占全国土地面积的56.21%,占世界土地面积的10.85%。中国年降水充沛但时空分布极不均匀,加上城市化进程的加快、气候骤变等原因使得洪涝灾害频发,对中国农业生产和发展造成严重影响。

本研究所用数据来源于《中国水旱灾害公报》和洪涝灾害统计资料。1950—2018年全国及各省(自治区、直辖市)农业洪涝灾害受灾、成灾面积数据、农业洪涝灾情资料来源于中国种植业信息网的灾情数据库。澳门、香港特别行政区及台湾地区指标数据不完整,故没有进行统计分析。

2 研究方法

选取农业洪涝灾害受灾、成灾面积2个指标表征农业致灾程度,受灾面积指因洪涝造成在田农作物产量损失10%及以上的播种面积,成灾面积指因洪涝造成在田农作物产量损失30%及以上的播种面积,两者在农业致灾变化研究中具有一定的代表性。在时间尺度上,采用九点二次平滑法进行受灾情况的趋势分析并建立ARIMA预测模型对农业洪涝灾害受灾、成灾面积集成预测,提高预测结果的可靠性;在空间尺度上,根据目标函数下的聚类算法进行空间聚类分析,得到农业洪涝灾害受灾、成灾面积的空间变化。

2.1 九点二次平滑法

九点二次平滑法基于最小二乘法原理,可以对时间序列进行趋势分析。数据x的拟合公式为

$$\hat{x} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \tag{1}$$

式中:$\hat{x}$为数据估计值;a_0、a_1、a_2为根据最小二乘法原理确定的系数。九点二次平滑公式为

$$\hat{x}_{i-4} = \frac{1}{231}(-21x_{i-4} + 14x_{i-3} + 39x_{i-2} + 54x_{i-1} + 59x_i + 54x_{i+1} + 39x_{i+2} + 14x_{i+3} - 21x_{i+4}) \tag{2}$$

式中x_i为第i个数据。

2.2 时间序列分析法

对于上述时间序列$\{x_i\}$,建立ARIMA模型对样本数据进行相对完整的描述与预测。以下为ARIMA模型具体的实现步骤:

步骤1 提取趋势信息。通过随机时序方法[4]提取确定性信息,利用差分法提取趋势信息:

$$\nabla x_t = x_t - x_{t-1} \tag{3}$$

式中:x_t为t时刻的时间序列样本;∇x_t为一阶差分值。

步骤2 差分计算。若x_t有曲线趋势,使用低阶差分就能够显示出线性趋势,计算中常采用的是步长为12周期的差分计算:

$$\nabla x_{12} \nabla x_t = \nabla x_t - \nabla x_{t-12} \tag{4}$$

步骤3 白噪声检验。若序列$\{X_t\}$满足式(5)条件,则该序列为为白噪声序列。

$$\begin{cases} E(X_t) = \mu & (\forall t \in T) \\ \gamma(t,s) = \sigma^2 & (t = s, \forall t \in T, \forall s \in T) \\ \gamma(t,s) = 0 & (t \neq s, \forall t \in T, \forall s \in T) \end{cases} \tag{5}$$

式中:T为时间序列;t、s为两个任意时间;γ为协方差函数。

步骤4 随机性分析。使用Barlett定理构造检验统计量来检验序列的纯随机性。首先,给出原假设H_0(式(6))与备择假设H_1(式(7))。

$$\rho_1 = \rho_2 = \cdots = \rho_m = 0 \quad (\forall m \geqslant 1) \tag{6}$$

$$\exists \rho_k \neq 0 \quad (\forall m \geqslant 1, k \leqslant m) \tag{7}$$

式中:ρ为相关系数;m为指定延迟期数;k为延迟阶数。其次,围绕上述假设,使用LB统计量S_{LB}判断序列是否为随机序列:

$$S_{LB} = n(n+2)\sum_{k=1}^{m} \frac{\hat{\rho}_k^2}{n-k} \sim \chi^2(m) \tag{8}$$

式中:n为样本个数;$\chi^2(m)$为自由度为m的卡方分布。上式表明LB服从自由度为m的卡方分布,若S_{LB}值小于准测值时,可拒绝原假设H_0,认为序列非随机。

步骤5 根据自相关系数(autocorrelation coefficient, ACF)和偏自相关系数(partical autocorrelation coefficient, PACF)图确定ARIMA模型取值范围[11-13],采用赤池信息量(Akaike information criterion, AIC)最小原则,进行最优模型选择:

$$S_{AIC} = n\ln\hat{\sigma}_\varepsilon^2 + 2(e + q + 1) \tag{9}$$

式中:S_{AIC}为AIC值;$\hat{\sigma}_\varepsilon^2$为方差;$e$、$q$为阶数。得到预测模型:

$$Y_t = \nabla\nabla^w \ln X_t \tag{10}$$

式中：w 为步长；∇为梯度算符。

2.3 空间聚类

在模糊聚类算法中，基于目标函数的均值聚类(fuzzy C-means，FCM)分析应用较为广泛。FCM 算法中，假设 $\boldsymbol{X} = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 为目标整理数据，数据可划分为 h 个区域，$\boldsymbol{V} = (v_1, v_2 \cdots, v_h)$ 和 $\boldsymbol{U} = (u_{ij})$ 分别为聚类中心和隶属度矩阵：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{h} u_{ij} = 1 & \left(0 < \sum_{i=1}^{n} u_{ij} < n\right) \\ u_{ij} \in [0,1] & (\forall j \in [1,n], \forall i \in [1,h]) \end{cases} \tag{11}$$

通过对样本 x_i 与每个聚类中心的距离用其隶属度平方加权，求得目标函数 J 的最小值：

$$\min J(\boldsymbol{U}, \boldsymbol{V}) = \min \sum_{i=1}^{h} \sum_{j=1}^{n} u_{ij}^{g} \parallel x_j - v_i \parallel^2 \tag{12}$$

式中 g 为模糊指数。通过引入迭代优化方法对式(9)求解，以拉格朗日乘数法为基础，可得到：

$$u_{ij} = \left[\sum_{k=1}^{h} (d_{ij}/d_{kj})^{2/(g-1)} \right]^{-1} \tag{13}$$

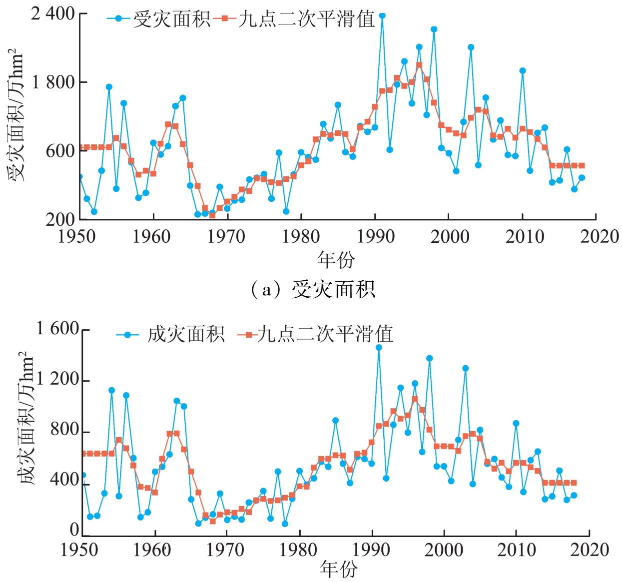
$$v_i = \sum_{j=1}^{n} u_{ij}^{g} x_j \Big/ \sum_{j=1}^{n} u_{ij}^{g} \tag{14}$$

当满足设置的迭代条件后，数据聚类过程结束。

3 结果与分析

3.1 时间变化特征

图 1 为中国 1950—2018 年洪涝灾害农业受灾、成灾面积九点二次平滑结果。由图 1 可见，20 世纪 50—90 年代中末期农业受灾、成灾面积呈现持续上升状态，有 9 个省份农作物受灾面积超过了年度农作物播种面积的 10%，是受灾面积最小年份 1966 年的近 10 倍，是多年受灾面积平均值的 2.6 倍；近 7 个省份成灾面积超过农作物播种面积的 15%，是多年成灾面积平均值的 2.3 倍。20 世纪 90 年代农业受灾情况表现较为显著增加，年均受灾面积为 1 086 万 hm^2，年均成灾面积 906 万 hm^2，受灾、成灾面积最大值均出现在 1991 年，20 世纪 90 年代暴雨频发，特别是 1991 年的江淮流域和 1998 年长江流域发生持续性特大暴雨，给中国农业带来了严重影响[14-16]。进入 21 世纪后中国水利工程配套率随经济发展而逐步提高，防灾的工程措施与灾害保险、灾害预报预警等非工程措施进一步结合，从图 1 可以看出农业受灾、成灾严重程度呈现下降的趋势。但随着暴雨等极端天气发生频次趋多、强度趋强，洪灾对农业的胁迫效应不容忽视，应加强灾害预警和灾害防治风险管理水平。



(a) 受灾面积

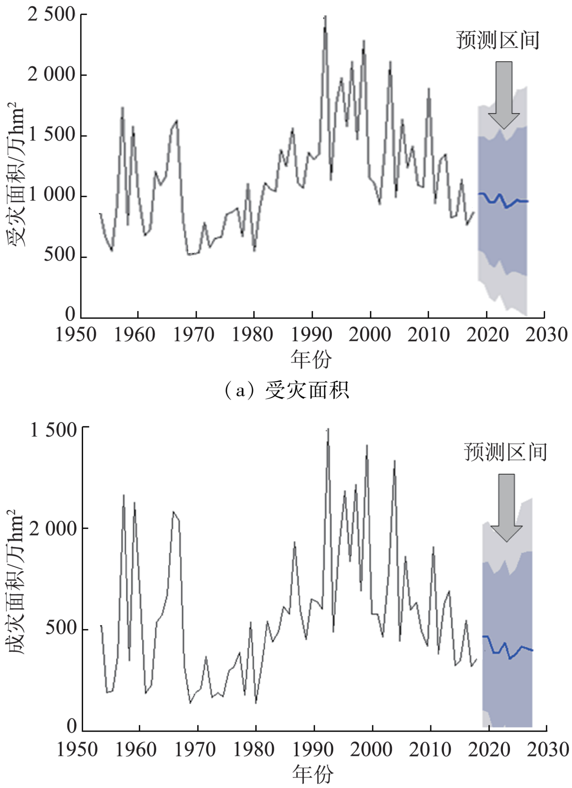
(b) 成灾面积

图 1 九点二次平滑结果

Fig. 1 Results of nine point quadratic smoothing method

3.2 洪涝灾害趋势分析

图 2 为 ARIMA 模型运行结果，对数据进行差分处理直至通过平稳性检验和白噪声检验，通过从小滞后阶数中进行尝试，确定相关系数，对 3 组数据进行建模。经过比较 AIC 值，最终选定的模型分别为 ARIMA(6,1,1)，ARIMA(7,1,1)。最后在此环境下安装预测包，完成对农业致灾危害性的预测。



(a) 受灾面积

(b) 成灾面积

图 2 ARIMA 模型运行结果

Fig. 2 Running results of ARIMA model

由图 2 可见,在 20 世纪 80 年代,中国农作物平均受灾面积为 0.688 亿 hm^2,平均成灾面积 498 万 hm^2,90 年代中国洪涝受灾及成灾面积数值出现了 3 次高峰值,结合当年资料和观测数据发现全国出现较大范围的暴雨天气。特别是 1998 年受太阳黑子活动和超强厄尔尼诺现象影响,中国长江流域发生特大洪水,对下游城市居民和生态环境造成了巨大影响[17]。进入 21 世纪以来暴雨天气频次减少,水利工程相关设施更加完善,自 2000 年以来农业平均受灾、成灾面积为 102 万 hm^2、54 万 hm^2,大幅度低于 20 世纪 90 年代。未来防灾减灾工作不仅要关注暴雨洪涝灾害影响的区域差异和灾害本身的发生特点,也要关注区域农业的工程配套设施、社会经济发展水平及生态环境等方面的变化,因地制宜地制定防灾减灾对策。

3.3 空间变化特征

选取 1988 年、1998 年、2008 年、2018 年作为典型年对各省份农业洪涝灾害受灾面积进行空间聚类。在聚类分析之前,计算霍普金斯统计量验证数据可以分析聚类的合理性,1988 年、1998 年、2008 年、2018 年的计算结果分别为 0.577 9、0.544 2、0.522 1 和 0.511 9,满足聚类前提。在 R 语言中利用拐点法确定了聚类簇数为 5 类,代表不同典型年下获取的空间受灾面积程度的分类,结果见表 1。

由表 1 可见,中国西部内陆地区青海、甘肃、宁夏、西藏、新疆和华北山西受洪涝胁迫影响较小,处于洪灾低风险区;北方地区内蒙古、河北,东北地区吉林、辽宁,华南地区安徽、江西是洪灾中风险区;濒海地区如广西、福建,华南地区及西南地区四川等因降雨多、人口密集等原因,受洪涝灾害影响较大,是洪涝灾害致灾的高危风险区。农作物年均受灾面积占到全国总受灾面积 10% 以上的省份有黑龙江、江苏、安徽、江西、山东、河南、福建、广东 8 个省,受灾面积总和接近全国 50%。据统计,农作物受灾、成灾面积均达到 50 万 hm^2 的有黑龙江、湖北、湖南、广东、广西、四川及江淮地区;年均洪涝灾害农作物受灾、成灾面积大于 150 万 hm^2 的省份主要有湖南、湖北两省,这两省年均受灾成灾面积接近种植面积的 1/5。从农作物受灾率(受灾面积占耕种面积的比例)来看,黄河流域、松辽流域、西南地区,以及华北地区的北京、天津、河南和西北内流区甘肃、宁夏、青海等受灾率小于 5%。江淮地区长江中下游和两广沿海地区农作物洪涝灾害受灾面积、受灾率偏高,如海南、浙江年均洪涝灾害受灾率均在 15% 以上。洪涝灾害的防治与当地经济发展水平及产业分布息息相关,高危地区应加强人为干预,建立洪涝灾害预警响应机制,针对降雨多发区和多发季节,农业、交通业以及城市防洪办应出台多项预防及应对措施,以“洪水管理”理念取代传统的“洪水控制”技术。

4 结 语

本文从中国洪涝灾害农业受灾、成灾面积出发,运用 ARIMA 模型时间序列方法进行趋势分析。在时间尺度上,20 世纪 60—80 年代前期洪灾对农业影响较小,变化幅度小;20 世纪 80 年代后期,指标年际变化剧烈且致灾性影响较大,总的来说,1950—2018 年洪涝对农业致灾性影响整体呈增加的趋势。空间聚类结果表明,洪涝灾害对农业的致灾性区域主要位于长江流域中下游、东北地区、华中华南地区等区域,地形和强暴雨天气对洪涝农业致灾性的强

表 1 典型年聚类结果

Table 1 Clustering results of typical years

典型年	第一类	第二类	第三类	第四类	第五类
1988 年	重庆、四川、陕西、山西、内蒙古、江西、吉林、湖北、河北、广东	浙江、山东、辽宁、江苏、河南、广西、甘肃、福建、安徽	云南、新疆、西藏、天津、上海、青海、宁夏、海南、贵州、北京	湖南	黑龙江
1998 年	黑龙江、湖南、安徽、江西、湖北	河南、四川、内蒙古、吉林	云南、浙江、山东、广西、重庆、陕西、河北、广东、	新疆、西藏、天津、上海、青海、宁夏、海南、贵州、北京、辽宁、甘肃、山西	福建、江苏
2008 年	黑龙江、四川、云南、浙江、山东、陕西、贵州、辽宁	安徽、内蒙古、广东	河南、吉林、江苏、福建、重庆、河北、新疆、西藏、天津、上海、青海、宁夏、海南、北京、甘肃、山西	湖北	湖南、江西、广西
2018 年	浙江、山东、贵州、辽宁、吉林、江苏、重庆、新疆、西藏、天津、上海、青海、宁夏、海南、北京、湖南、广西	黑龙江、内蒙古	四川、河南、甘肃	云南、陕西、安徽、广东、河北、山西、湖北、江西	福建

度和频率影响较大,地区经济发展水平高和水利工程设施较为完善的区域农业脆弱性低、抗灾害胁迫能力强。

参考文献:

[1] 张旭明. 安徽省水旱灾害的时空特征研究[D]. 合肥:安徽师范大学,2010.

[2] 邢伟,张兆康,张辰光,等. 公元前 221 年—公元 2000 年河南省气象灾害时空分布特征[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版),2020,33(4):579-585. (XING Wei, ZHANG Zhaokang, ZHANG Chenguang, et al. Spatial-temporal characteristics of the meteorological disasters in Henan Province from BC 221 to AD 2000[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition),2020, 33(4):579-585. (in Chinese))

[3] 牛晨. 关中地区极端降水时空变化规律及频率分布研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.

[4] 郝炜. 甘肃水旱灾害防御和减灾管理研究[D]. 兰州:兰州大学,2011.

[5] 陈永娟. 自回归随机水文模型在梨园河年径流模拟和预报中的应用[J]. 水利规划与设计,2020,33(1):49-52. (CHEN Yongjuan. Application of autoregressive stochastic hydrological model in Liyuan River annual runoff simulation and forecast[J]. Water Planning and Design,2020,33(1):49-52. (in Chinese))

[6] 刘琳. 我国农业洪涝灾害损失时空特征分析[J]. 中国水利,2016(7):23-25. (LIU Lin. Examination on spatial-temporal characteristics of losses caused by flood and waterlogging disasters in China[J]. China Water Resources,2016(7):23-25. (in Chinese))

[7] ZHOU Q,ZHAO Q, et al. Spatiotemporal characteristics of droughts and floods in northeastern China and their impacts on agriculture[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2018, 32(10):2913-2931.

[8] 张存杰,王宝灵,刘德祥,等. 西北地区旱涝指标的研究[J]. 高原气象,1998,7(4):3-5. (ZHANG Cunjie, WANG Baoling, LIU Dexiang,et al. Research on drought and flood index in northwest China[J]. Plateau Weather, 1998,7(4):3-5. (in Chinese))

[9] 赵阿兴,马宗晋. 自然灾害损失评估指标体系的研究[J]. 自然灾害学报,1993(3):1-7. (ZHAO Axing, MA Zongjin. Research on the index system of natural disaster loss evaluation[J]. Journal of Natural Disasters, 1993(3):1-7. (in Chinese))

[10] 叶敏,钱忠华,吴永萍. 中国旱涝时空分布特征分析[J]. 物理学报,2013,62(13):573-585. (YE Min, QIAN Zhonghua,WU Yongping. Analysis on the temporal and spatial distribution of drought and flood in China[J]. Journal of Physics, 2013, 62(13):573-585. (in Chinese))

[11] 刘高峰,李娜. 城市洪水灾害损失评估指标体系的构建[J]. 现代农业科技,2008(22):267-269. (LIU Gaofeng, LI Na. Construction of the index system of urban flood disaster loss evaluation[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2008(22):267-269. (in Chinese))

[12] 平珊珊. 预测回归模型截距项的一致性检验方法研究[D]. 南昌:江西财经大学,2019.

[13] 刘薇. 时间序列分析在吉林省 GDP 预测中的应用[D]. 长春:东北师范大学,2008.

[14] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护,2020,36(6):1-6. (HUANG Guoru,LUO Haiwan,LU Xinxiang,et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster[J]. Water Resources Protection,2020,36(6):1-6. (in Chinese))

[15] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护,2021,37(1):28-35. (ZHANG Ke, NIU Jiefan, LI Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi-humid regions[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):28-35. (in Chinese))

[16] 郝晓丽,穆杰,喻海军,等. 城市洪涝试验研究进展[J]. 水利水电科技进展,2021,41(1):80-86. (HAO Xiaoli, MU Jie, YU Haijun, et al. Advances in experimental research of urban flooding[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1):80-86. (in Chinese))

[17] 宋家喜. 1997/98 年强厄尔尼诺现象及其对热带大气环流和我国重大气象、气候年际变化的影响[C]//中国减灾与新世纪发展战略:首届“中国 21 世纪安全减灾与可持续发展战略高级研讨会”论文集. 北京:中国灾害防御协会,1998:154-157.

(收稿日期:2021-03-02　编辑:王芳)