

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2023. 02. 019

郑州市雨岛效应多方法集成评估及量化研究

胡彩虹,刘成帅,李 想,孙 悦,邬 强,余其鹰

(郑州大学黄河实验室,河南 郑州 450001)

摘要:为研究城市化发展带来的雨岛效应问题,选用郑州市 1978—2018 年社会经济资料和 1960—2020 年逐日降雨资料,在利用六阶段论和“S”形曲线法分析郑州城市化发展水平的基础上,多方法并举构建雨岛效应评估方法体系;基于年降水量、年汛期降水量对郑州市雨岛效应进行趋势和周期变化分析,并引入标准化距离法量化评估雨岛效应。结果表明:郑州市中心城区雨岛效应在 1997 年和 2004 年有明显突变增强趋势;年降水量、年汛期降水量雨岛效应增强趋势分别持续 4 a 和 10 a,且分别具有 8~10 a、15~20 a 的第一主周期和 17~20 a、6~10 a 的第二主周期;标准化距离法计算的年降水量、汛期降水量增雨系数标准化显化值分别为 0.261 和 0.643,说明郑州市雨岛效应集中于汛期。

关键词:雨岛效应;增雨系数;城市化;评估方法体系;标准化距离法;郑州市

中图分类号:TV125 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0152-08

Multi-method integrated evaluation and quantitative study of rain island effect in Zhengzhou City // HU Caihong, LIU Chengshai, LI Xiang, SUN Yue, WU Qiang, YU Qiyang (Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to study rain island effect caused by urbanization development, the six-stage theory and the S-shaped curve method were used to analyze the level of urbanization development in Zhengzhou by means of the socio-economic data of Zhengzhou from 1978 to 2018 and daily rainfall data from 1960 to 2020, and evaluation method system of rain island effect was constructed by integrating multiple methods. Based on annual precipitation and annual flood season precipitation, the trend and periodic change analysis of rain island effect in Zhengzhou was carried out, and the normalized distance method was introduced to quantitatively evaluate the rain island effect. The results showed that the rain island effect in central urban area of Zhengzhou had an obvious trend of abrupt increase in 1997 and 2004; the increasing trend of rain island effect of annual precipitation and annual flood season precipitation lasted for 4 years and 10 years, respectively, with the first main period of 8 to 10 years and 15 to 20 years and the second main period of 17 to 20 years and 6 to 10 years, respectively; the explicit values of annual precipitation enhancement coefficient and annual flood season precipitation enhancement coefficient calculated by the standardized distance method were 0.261 and 0.643, respectively, indicating that the rain island effect in Zhengzhou was concentrated in flood season.

Key words: rain island effect; precipitation enhancement coefficient; urbanization; evaluation method system; normalized distance method; Zhengzhou City

城市中林立的高楼大厦被比喻为“钢筋水泥的森林”,而随着“森林”密度不断增加,尤其在盛夏,建筑物、空调、汽车尾气加大了热量的超常排放,使城市热岛效应明显。城市热岛环流引起气流辐合上升,加上城市上空凝结核比郊区多,最终导致城市上空及下风方向降雨比郊区多,这种效应被称之为雨

岛效应^[1-2]。对雨岛效应的研究,其实质是对城市地区降雨时空变化规律的研究^[3-4]。降雨时空变化规律是全球气候变化和水文科学研究的重要课题^[5]。基于此,国内外对雨岛效应进行了大量研究。赵彦军等^[6]综合分析了 1979—2017 年深圳市城市化对气温和降雨的影响;李鹏等^[7]结合济南市

基金项目:国家自然科学基金(51739009,51979250);河南省科技攻关项目(222102320455)

作者简介:胡彩虹(1968—),女,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:hucaihong@zzu.edu.cn

通信作者:刘成帅(1996—),男,博士研究生,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:liucs@gs.zzu.edu.cn

24 个降雨站点 1972—2016 年逐日降雨时间序列,探究城市化进程与降雨间的关系;Zhang 等^[8]研究发现城市化加剧了休斯敦地区风暴带来的总降水量;Jauregui 等^[9]分析墨西哥城 45 a 汛期降雨数据发现存在城市化诱发降雨的现象,其规模随着城市化的发展而增强。这些研究大多选用若干种世界气象组织提出的极端气候指数,并探究其时空变化规律,依此解释雨岛效应。空间变化规律方面,下垫面条件的剧烈变化和人类的频繁活动使大气边界层特征发生变化,暴雨中心向城市中心转移,导致城市降水量增加^[10-11]。时间变化规律方面,多基于长序列降雨资料从趋势变化和周期变化两方面解释雨岛效应^[12-13]。用于趋势变化分析的方法主要有线性趋势法^[14-15]、Manner-Kendall (M-K) 突变检验法^[16-17]、Mann-Whitney-Pettitt (MWP) 检验法^[18]、重标极差分析法^[17];用于周期变化的分析方法主要有小波分析^[17]、傅立叶变换分析^[19]、经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD)^[19-20]、集合经验模态分解 (ensemble empirical mode decomposition, EEMD)^[21-22] 等方法。

目前大多研究针对主城区进行,选用的极端气候指数种类繁多,没有统一标准,缺乏城郊空间对比和城市发展阶段化对比;在研究方法上,单一方法不足以系统解释雨岛效应,缺乏统一量化。因此,亟须多方法并举,结合城市化发展阶段,构建雨岛效应评估方法体系,综合量化评估城市雨岛效应。

本文在分析城市化发展水平的基础上,利用增雨系数法^[12]对城市、郊区降水量进行对比计算,得到长时间序列增雨系数值,以解释雨岛效应的空间变化;文中集成了 6 种分析方法基于年降水量和年汛期降水量对郑州市雨岛效应进行趋势和周期变化分析,并引入标准化距离法对雨岛效应进行量化评估,旨在为未来城市应对雨岛效应提供科学依据。

1 雨岛效应评估方法

1.1 六阶段论和“S”形曲线

雨岛效应体现在中心城区降水量时空特点明显区别于周边地区,因此,以人口、建成区面积、GDP 等社会经济数据为基础,利用城市经济学中的六阶段论^[23]和“S”形曲线法^[24]分析郑州城市化发展水平。对于城市化发展阶段划分,目前并没有统一标准,六阶段论是最为常用的方法之一,该方法根据城镇人口比例将城市化发展阶段划分为史前、起步、加速发展、基本实现、高度发达、自我完善 6 个阶段^[23],对应城镇人口比例分别为 0 ~ 10%、10% ~ 20%、20% ~ 50%、50% ~ 60%、60% ~ 80%、

80% ~ 100%。

“S”形曲线法将城市化发展过程表示为一条被拉平的“S”形曲线,其方程^[24]为

$$y = \frac{1}{1 + 5.730e^{-0.01729t}} \quad (1)$$

式中: y 为城市化水平; t 为时间。该方程以部分国家 1800—1982 年城市化发展水平为历史数据样本,能准确描述城市化发展过程。

1.2 增雨系数法

增雨系数法^[12]是一种从空间上对城市中心城区和郊区降水量进行对比分析的评估方法,是雨岛效应研究中常用的分析方法,其表达式为

$$\theta = P_U / P_S \quad (2)$$

式中: θ 为增雨系数, $\theta > 1$ 表示具有雨岛效应特征, $\theta < 1$ 表示不具有雨岛效应特征^[10]; P_U 为中心城区实测降水量, mm; P_S 为郊区实测降水量, mm。

1.3 标准化距离法

标准化距离法^[25]用于量化两组同类散点之间的差异程度。本文根据增雨系数逐年散点特征,利用标准化距离法量化评估由城市化发展带来的雨岛效应,计算城市化快速发展阶段、缓慢发展阶段中心城区相对于郊区的增雨效应标准化显化值:

$$W' = \frac{W - W_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}} \quad (3)$$

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_{ri} - \theta_{si}|}{n}$$

其中

式中: W 为中心城区气象站相对于郊区气象站的增雨效应显化值; W' 为中心城区气象站相对于郊区气象站的增雨效应标准化显化值, W' 值越大,雨岛效应越严重; $W_{\min}$ 、 $W_{\max}$ 分别为最小显化值和最大显化值; θ_{ri} 、 θ_{si} 分别为快速发展、缓慢发展阶段第 i 年的增雨系数值; n 为计算总年数。

2 研究区概况和数据来源

2.1 研究区概况

郑州市区域图如图 1 所示,郑州市位于 112°42'E ~ 114°14'E、36°16'N ~ 34°58'N,总面积 7 446.2 km²,是我国 15 个国家级中心城市之一。郑州市处于河南省东部黄淮平原向西部山地丘陵区过渡地带,西依嵩山,北傍黄河,市区大部分以平原为主。自 2006 年以来,平均每年因暴雨内涝灾害造成的经济损失就高达 2 亿元^[26]。

2.2 数据来源

选用郑州市《统计年鉴》中 1978—2018 年逐年总人口、城镇人口、建成区面积、GDP、GDP 增长率以及

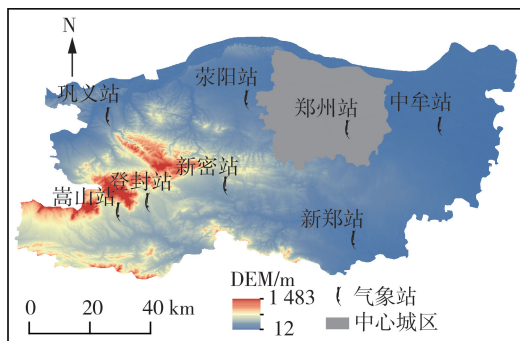


图1 郑州市区域图和气象站分布

Fig.1 Sketch of Zhengzhou City and distribution of weather stations

第一产业、第二产业和第三产业产值等社会经济数据分析城市化发展;选用郑州市8个气象站(郑州站、登封站、巩义站、嵩山站、新密站、新郑站、荥阳站、中牟站)1960—2020年逐日降雨资料评估郑州市雨岛效应变化趋势。以郑州站代表郑州市中心城区,其余7站代表郊区(图1),使用增雨系数法分别基于年降水量、年汛期降水量得到增雨系数年际时间序列数据。

3 结果与分析

3.1 郑州市城市化进程

城市化最明显的特征是城市人口的增加和城市面积的扩张^[27]。郑州市总人口由1978年的437.9万人增加到2018年的1013.6万人,平均每年净增14.39万人;城镇人口由1978年的125.6万人增加到2018年的522.5万人,城镇人口占比从1978年的28.68%上升到2018年的51.55%(图2(a))。建成区面积由1981年的65.0 km²增加到2018年的543.9 km²,平均每年增加12.6 km²(图2(b))。GDP

由1978年的20.3亿元增加到2018年的10143.3亿元,第一产业产值由1978年的4.1亿元增加到2018年的147.1亿元,第二产业产值由1978年的12.9亿元增加到2018年的4450.7亿元,第三产业产值从1978年的3.3亿元增加到2018年的5545.5亿元,社会经济发展总体呈现平稳增长态势(图2(c)(d))。郑州市GDP增长趋势与北京、上海、广州等城市基本持平(图2(e))。

郑州市1978—2018年城镇人口占比为28.68%~51.55%,根据城市化发展六阶段论,基本属于加速发展阶段;“S”形曲线(图3)说明1978年以来郑州市处于加速发展阶段,城市化规模持续快速扩大。Wang等^[28]研究发现郑州市自1998年起发展更为迅速,根据雨岛效应量化评估研究需要,本文以1998年为界,将1978—2018年郑州市城市化加速发展阶段进一步划分为缓慢加速发展阶段和快速加速发展阶段,研究城市化进程中的雨岛效应问题。

3.2 雨岛效应趋势分析

3.2.1 线性趋势法分析结果

使用线性趋势法统计郑州市不同发展阶段、不同降水量尺度的年际雨岛特征(图4)。在年降水量统计中,郑州市城市化缓慢加速发展阶段具有雨岛效应特征的年份占45.86%,城市化快速加速发展阶段具有雨岛效应特征的年份占61.49%,增长15.63%;在汛期降水量统计中,郑州市城市化缓慢加速发展阶段具有雨岛效应特征的年份占40.6%,城市化快速加速发展阶段具有雨岛效应特征的年份占66.46%,增长25.86%。从图4(a)(b)可以看出,在城市化缓慢加速发展阶段,年降水量增雨系数 θ_{s-year} 、年汛期降水量增雨系数 $\theta_{s-flood}$ 值逐年

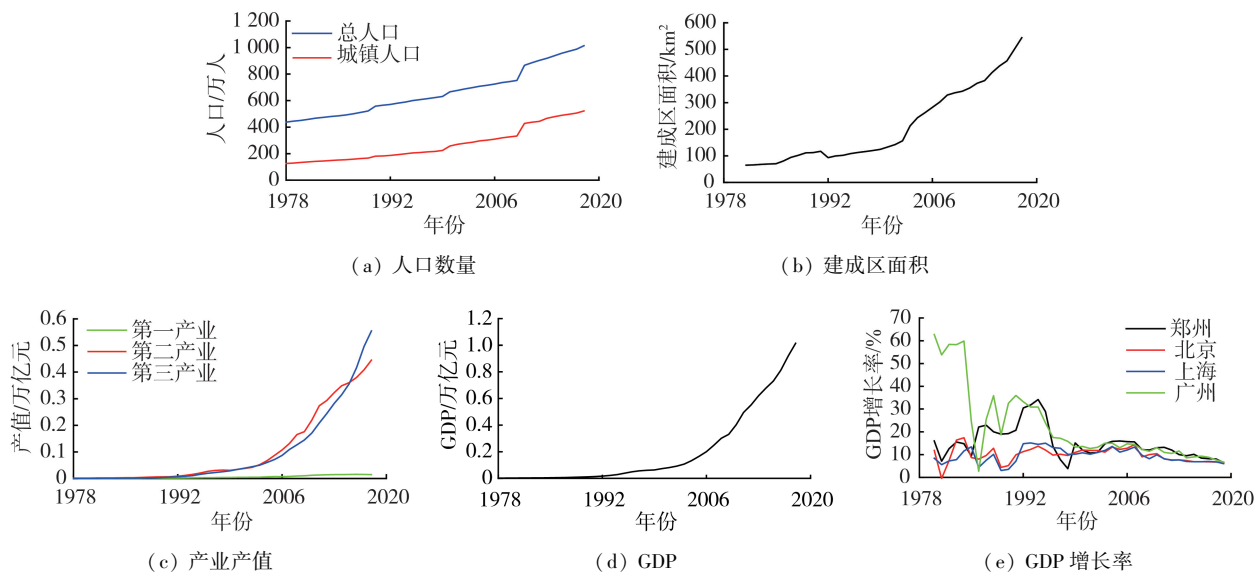


图2 郑州市城市化发展

Fig.2 Urbanization development in Zhengzhou City

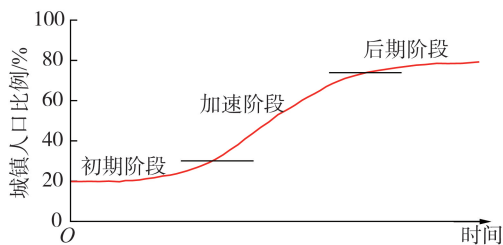
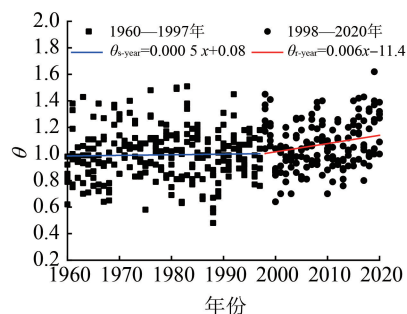


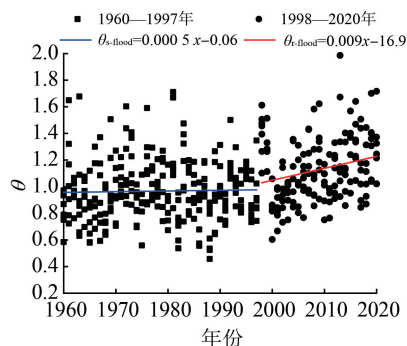
图3 郑州市城市化发展水平的“S”形曲线

Fig.3 S-shaped curve of urbanization development level in Zhengzhou City

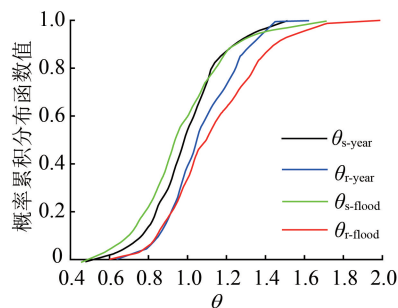
增长率均为 0.000 5;在城市化快速加速发展阶段,年降水量增雨系数 θ_{r-year} 、年汛期降水量增雨系数 $\theta_{r-flood}$ 值逐年增长率分别为 0.006 和 0.009。故认为随着城市化进程快速发展,城市中心降水量与郊区降水量相比增长趋势明显,年汛期降水量较年降水量增雨趋势更加明显。



(a) 年降水量增雨系数



(b) 年汛期降水量增雨系数



(c) 概率累积分布函数

图4 增雨系数在不同发展阶段年际变化和一致性分析

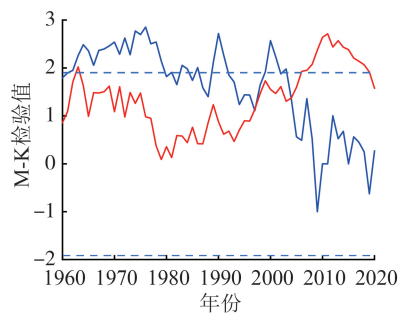
Fig.4 Interannual variation and consistency analysis of precipitation enhancement coefficient at different development stages

图4(c)是4种情况下散点的概率累积分布函数。在城市化缓慢加速发展阶段, θ_{s-year} 与 $\theta_{s-flood}$ 的分布函数一致性差异较小,表明这一时期雨岛效应特征并不明显;在城市化快速加速发展阶段, θ_{r-year} 与 $\theta_{r-flood}$ 分布函数一致性差异较大,表明年汛期降水量雨岛效应在城市化快速发展期最为明显。由图4(c)可以看出,4种情况下增雨系数的概率分布不一致,说明增雨系数的一致性条件发生了变化。这种变化是由气候变化和人类活动共同造成的^[29],直接影响水文频率计算的准确性,因此变化环境下水文频率的一致性计算问题值得进一步研究。

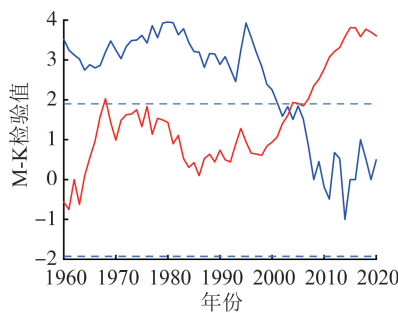
3.2.2 M-K 突变检验结果

图5为1960—2020年郑州市年降水量增雨系数 θ_{year} 、年汛期降水量增雨系数 θ_{flood} 在99%置信度水平的M-K突变检验结果。如果UF和UB统计量曲线出现交点,且交点在置信水平 ± 1.96 临界线之间,交点对应的时刻就是突变开始的时刻^[16-17]。图5(a)中,UF统计量大于0,说明年降水量雨岛效应呈逐年增加趋势;UF和UB统计量曲线分别在1997年和2004年相交,交点在置信水平 ± 1.96 临界线之间,表明1997和2004年是增长突变年份。在图5(b)中,1965年后UF统计量大于0,年汛期降水量雨岛效应同样呈逐年增加趋势;UF统计量

— UB统计量 — UF统计量 - - - 置信水平 ± 1.96 临界线



(a) θ_{year}



(b) θ_{flood}

图5 增雨系数的M-K突变检验结果

Fig.5 M-K mutation test results of precipitation enhancement coefficient

曲线在 2007 年后超过置信水平 ± 1.96 范围值,说明年汛期降水量雨岛效应逐年增强趋势更加明显;UF 和 UB 统计量曲线在 2004 年相交,交点在置信水平 ± 1.96 临界线之间,表明 2004 年是增长突变年份。

3.2.3 MWP 检定分析结果

1960—2020 年郑州市 θ_{year} 和 θ_{flood} 的 MWP 检定分析结果如图 6 所示。统计量 K_T 取最大值时,置信度大于 0.95 表示突变趋势明显,且置信度越接近于 1 突变概率越大。由图 6 可见, θ_{year} 和 θ_{flood} 的 K_T 值分别在 1997 年和 2004 年最大,且相应置信度大于 0.95。MWP 检定分析结果表明 1997 年和 2004 年是 θ_{year} 和 θ_{flood} 的变异年份,这与 M-K 突变检验结果一致。其中,第一个突变年份与城市化快速发展阶段的起点年份基本一致,说明降雨变化与城市化发展紧密相关。由图 6 还可以看出,年汛期降水量增雨系数的 K_T 值均大于年降水量增雨系数的 K_T 值,说明随着城市化发展,降雨变化主要表现为年汛期降水量增多,且年汛期降水量雨岛效应更加突出。

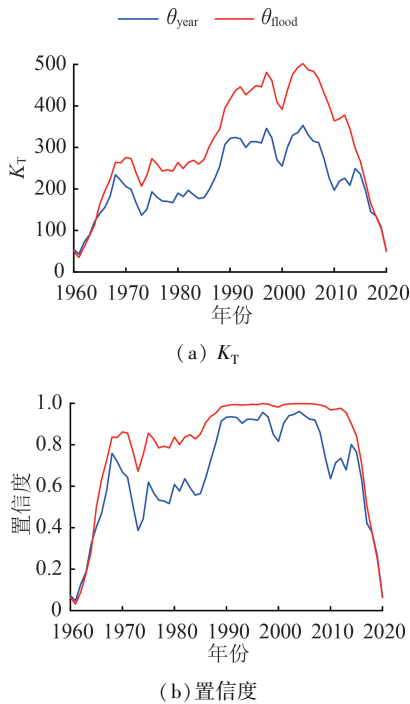


图 6 增雨系数的 MWP 检定分析结果
Fig. 6 MWP test analysis results of precipitation enhancement coefficient

3.2.4 基于 Hurst 指数的分析结果

基于 Hurst 指数 (H) 对 1960—2020 年郑州市 θ_{year} 和 θ_{flood} 的分析结果如图 7 所示,图中 R 、 S 分别为数据序列的极差和标准差, N 为计算数据的序列长度,这里指年份。图 7 (a) 线性函数的斜率即为 H ,当 $0.5 < H \leq 1$ 时,表明原始序列未来发展趋势

与过去的变化趋势一致,且 H 越接近 1,持续性越强;当 $0 \leq H < 0.5$ 时,表明原始序列未来发展趋势与过去的变化趋势相反,且 H 越接近 0,反持续性越强; $H = 0.5$ 时,表明原始序列未来发展趋势与已经发生的事件没有关系^[22]。由图 7 (a) 可看出, θ_{year} 和 θ_{flood} 的 Hurst 指数值分别为 0.53 和 0.62,均大于 0.5,说明在未来一段时间 θ_{year} 和 θ_{flood} 与过去的变化趋势一致。结合 M-K 检验分析结果, θ_{year} 和 θ_{flood} 未来将继续增长。由图 7 (b) 可以看出, θ_{year} 和 θ_{flood} 的 V 统计量^[22] 分别在 $\ln N = 1.39$ 和 $\ln N = 2.30$ 处首次出现明显波动,对应的 N 值分别为 4 和 10,表示郑州市在未来 4 a 内中心城区年降水量雨岛效应会继续保持增强趋势,而年汛期降水量雨岛效应在未来 10 a 会继续保持增强趋势,这给城市防汛期增加了压力。

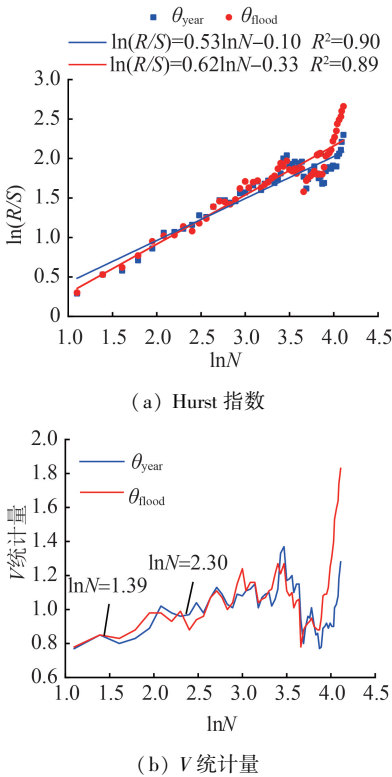


图 7 增雨系数的 R/S 分析结果
Fig. 7 R/S analysis results of precipitation enhancement coefficient

综上,郑州市年降水量、年汛期降水量雨岛效应呈逐年增加趋势,增雨系数在 1997 年和 2004 年发生了突变,增长得更快。分析结果表明随着城市化发展,雨岛效应更加明显,且主要集中在年汛期降雨,未来 10 a 内郑州市年汛期降雨增加的影响将继续增强。这里的雨岛效应增强表示郑州市中心城区降雨相对郊区增多,并不是郑州市降水量逐年增多,与张金萍等^[13]的郑州市年降水量

无明显变化趋势的研究结果并不矛盾。本文通过多种方法得到的雨岛效应规律比单一方法更加可靠。

3.3 雨岛效应周期变化分析

图 8(a)(b)反映了 θ_{year} 和 θ_{flood} 的周期交替特征,深紫色线代表正相位,表示实部大于等于 0;浅绿色线代表负相位,表示实部小于 0。图 8(c)显示 θ_{year} 和 θ_{flood} 的小波方差在 10 a 和 17 a 附近分别具有最大值 0.016 1 和 0.040 4。结合图 8(a)(b)的相位变化得到 θ_{year} 、 θ_{flood} 的第一主周期分别为 8~10 a 和 17~20 a。同理得, θ_{year} 、 θ_{flood} 的第二主周期分别为 15~20 a 和 6~10 a。由图 8(c)可知, θ_{flood} 比 θ_{year} 的小波方差值大,进一步说明年汛期降水量雨岛效应更为明显。

使用 EEMD 对 θ_{year} 和 θ_{flood} 进行周期分解,选择 0.2 倍信噪比,分解 100 次,分解后得到 4 个固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)分量和趋势项 r ,分解结果见图 9。各分量反映了序列中固有的不同时间特征尺度的振荡变化,从高频到低

频相同时段内的变化频率各不相同, θ_{year} 和 θ_{flood} 的变化及其 IMF1、IMF2 和 IMF3 分量在 20 世纪 90 年代末和 21 世纪初振幅最大,这一时期正是城市化缓慢发展向快速发展的过渡阶段,说明雨岛效应与城市化发展密切相关; θ_{flood} 的 IMF1、IMF2 和 IMF3 分量振幅大于 θ_{year} 同期各模态函数分量的振幅,表明城市化对雨岛效应的影响主要集中在汛期。对趋势项 r 分析表明 θ_{year} 和 θ_{flood} 随年际的增加呈不断增加的变化特征, θ_{flood} 的趋势项 r 增加趋势更加明显,未来汛期雨岛效应将更加明显。由表 1 可以看出, θ_{year} 和 θ_{flood} 的 IMF1 分量贡献率最大,占比分别为 67.06% 和 70.64%,对应最大周期分别为 8.10 a 和 19.72 a; θ_{year} 和 θ_{flood} 的 IMF1、IMF2 分量周期均在小波分析第一、二主周期范围内,因此认为 θ_{year} 和 θ_{flood} 分别具有 8~10 a、7~20 a 的第一主周期和 15~20 a、6~10 a 的第二主周期;对应于 IMF3、IMF4 分量, θ_{year} 和 θ_{flood} 分别有 3~5 a、1~3 a 的第三、四主周期,年汛期降水量雨岛效应波动更加明显。

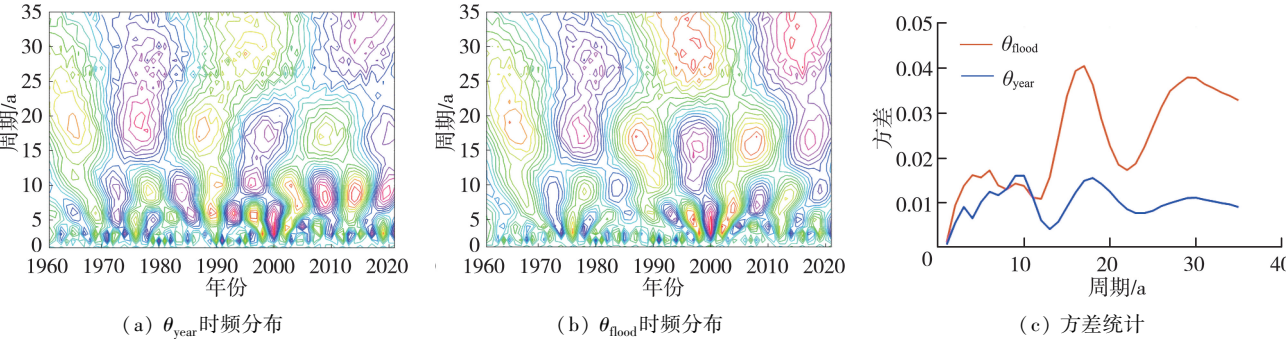


图 8 小波实部的时频分布和小波方差统计

Fig. 8 Time-frequency distribution of real part of wavelet and wavelet variance statistics

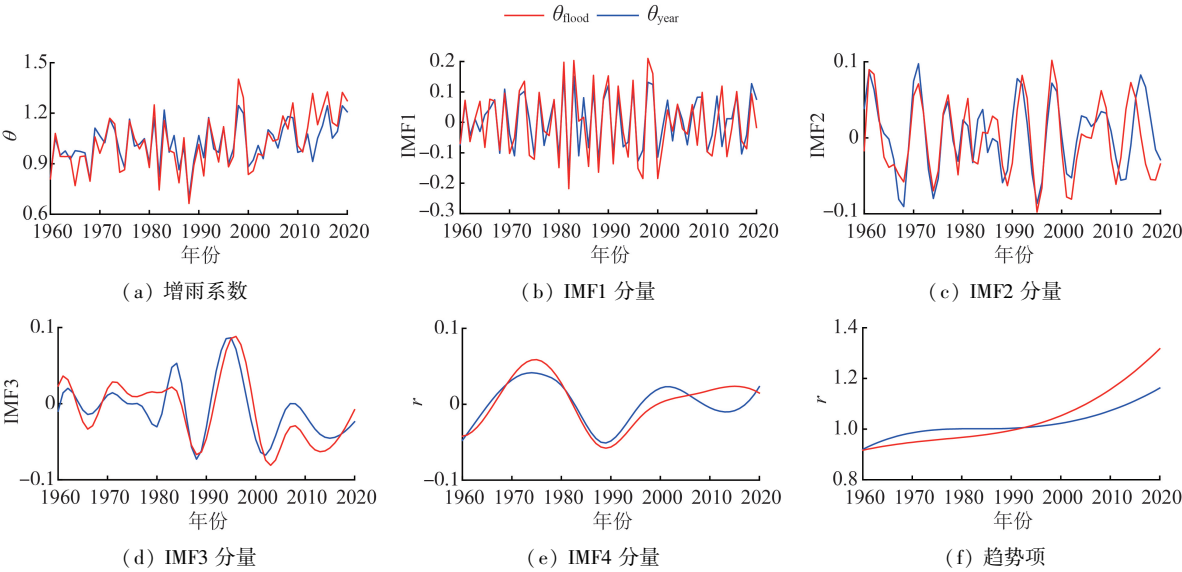


图 9 θ_{year} 和 θ_{flood} 的 EEMD 分解

Fig. 9 EEMD decomposition of θ_{year} and θ_{flood}

表1 θ_{year} 和 θ_{flood} 的 IMF 分解周期及其贡献率
Table 1 IMF decomposition periods of θ_{year} and θ_{flood} and their contribution rates

IMF 分量	周期/a		贡献率/%	
	θ_{year}	θ_{flood}	θ_{year}	θ_{flood}
IMF 1	8.10	19.72	67.06	70.64
IMF 2	16.23	5.37	17.25	14.46
IMF 3	3.34	3.12	10.43	9.35
IMF 4	4.60	1.23	5.46	5.55

表2 为采用标准化距离法对郑州市雨岛效应的量化评估结果。可以看出,郑州站相对于各郊区站的年降水量增雨系数标准化显化值 $W'_{\theta_{year}}$ 范围为 0.222~0.800,年汛期降水量增雨系数标准化显化值 $W'_{\theta_{flood}}$ 范围为 0.429~0.999,均大于 0,且 $W'_{\theta_{flood}} > W'_{\theta_{year}}$ 。对各气象站控制面积加权计算^[30]得到 $W'_{\theta_{year}}$ 、 $W'_{\theta_{flood}}$ 的加权平均值分别为 0.261 和 0.643,表明 1960—2020 年郑州市中心城区年降水量、年汛期降水量与郊区相比整体有增加趋势,且年汛期降水量增加更明显,夏季雨岛效应更加明显。

表2 雨岛效应量化评估结果
Table 2 Quantitative assessment results of rain island effect

气象站	$W'_{\theta_{year}}$	$W'_{\theta_{flood}}$
登封站	0.472	0.714
巩义站	0.800	0.999
嵩山站	0.560	0.714
新密站	0.689	0.714
新郑站	0.356	0.429
荥阳站	0.222	0.571
中牟站	0.222	0.786
加权平均值	0.261	0.643

4 结 论

- a. 郑州市中心城区雨岛效应在 1960—2020 年呈年际增强趋势,城市化快速发展阶段增强趋势明显,年汛期降水量雨岛效应比年降水量雨岛效应增强趋势更明显;年降水量、年汛期降水量雨岛效应在 1997、2004 年前后显著增强,增强趋势分别持续至未来 4 a 和 10 a。城市化缓慢发展阶段,雨岛效应增强趋势不明显,年汛期降水量雨岛效应增强趋势在相应发展阶段中相对明显。
- b. 年降水量、年汛期降水量雨岛效应分别具有 8~10 a、15~20 a 的第一主周期和 17~20 a、6~10 a 的第二主周期,同时具有相同的 3~5 a、1~3 a 的第三、四主周期,年汛期降水量雨岛效应波动更加明显。
- c. 标准化距离法得到的郑州市年降水量、年汛期降水量增雨系数标准化显化值分别为 0.261 和 0.643,年汛期降水量雨岛效应更加明显,城市应以

- 汛期防洪为主。
- 参考文献:
- [1] 何萍,江艳萍,李矜霄,等.城市化对云南高原楚雄市近年来雨岛效应的影响研究[J].干旱区地理,2017,40(5):933-941. (HE Ping, JIANG Yanping, LI Jinxiao, et al. Influence of urbanization on urban rain island effect of Chuxiong City on Yunnan Plateau in recent years[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5):933-941. (in Chinese))
- [2] ZHAO Yanjun, XIA Jun, XU Zongxue, et al. Impact of urban expansion on rain island effect in Jinan City, North China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(15):2989-2989.
- [3] 胡庆芳,张建云,王银堂,等.城市化对降水影响的研究综述[J].水科学进展,2018,29(1):138-150. (HU Qingfang, ZHANG Jianyun, WANG Yintang, et al. A review of urbanization impact on precipitation [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(1):138-150. (in Chinese))
- [4] 皋云,李琼芳,周正模,等.镇江市降雨场次划分与暴雨特性分析[J].水资源保护,2021,37(3):43-49. (GAO Yun, LI Qiongfang, ZHOU Zhengmo, et al. Division of rainfall events and analysis of rainstorm characteristics in Zhenjiang City [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3):43-49. (in Chinese))
- [5] 宋晓猛,张建云,孔凡哲,等.北京地区降水极值时空演变特征[J].水科学进展,2017,28(2):161-173. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, KONG Fanzhe, et al. Spatio-temporal variation characteristics of precipitation extremes in Beijing [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2):161-173. (in Chinese))
- [6] 赵彦军,夏军,徐宗学,等.深圳市雨岛效应分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(6):768-775. (ZHAO Yanjun, XIA Jun, XU Zongxue, et al. Rain island effect in Shenzhen City [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(6):768-775. (in Chinese))
- [7] 李鹏,徐宗学,张瑞,等.济南市极端降水特性与雨岛效应分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(6):822-830. (LI Peng, XU Zongxue, ZHANG Rui, et al. Extreme precipitation and rainfall island effect in Jinan City [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(6):822-830. (in Chinese))
- [8] ZHANG Wei, VILLARINI G, VECCHI G A, et al. Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston [J]. Nature, 2018, 563(7731):384-388.
- [9] JAUREGUI E, ROMALES E. Urban effects on convective precipitation in Mexico City [J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(20):3383-3389.
- [10] 苏爱芳,施东雷,葛旭阳.下垫面对郑州城市强降水的

- 影响:城市化及地形影响的数值模拟研究[J]. 大气科学学报, 2019, 42 (3): 434-446. (SU Aifang, SHI Donglei, GE Xuyang. Numerical simulation of the influence from urbanization and topography on a severe rainfall event in Zhengzhou[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2019, 42(3): 434-446. (in Chinese))
- [11] 苗世光, 蒋维楣, 梁萍, 等. 城市气象研究进展[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 477-499. (MIAO Shiguang, JIANG Weimei, LIANG Ping, et al. Advances in urban meteorology in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 477-499. (in Chinese))
- [12] 殷健, 梁珊珊. 城市化对上海市区域降水的影响[J]. 水文, 2010, 30(2): 66-72. (YIN Jian, LIANG Shanshan. Influence of urbanization on regional precipitation in Shanghai City[J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(2): 66-72. (in Chinese))
- [13] 张金萍, 王宇昊. 郑州市降雨-径流关系不确定性分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 1-6. (ZHANG Jinping, WANG Yuhao. Uncertainty analysis of rainfall-runoff relationship in Zhengzhou City[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 1-6. (in Chinese))
- [14] 陈申鹏. 深圳多年降水变化规律和雨岛效应分析[J]. 气象科技进展, 2019, 9(3): 166-170. (CHEN Shenpeng. Multi-year variation of precipitation and rain island effect in Shenzhen[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2019, 9(3): 166-170. (in Chinese))
- [15] 李淼, 夏军, 陈社明, 等. 北京地区近 300 年降水变化的小波分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(6): 1001-1011. (LI Miao, XIA Jun, CHEN Sheming, et al. Wavelet analysis on annual precipitation around 300 years in Beijing Area[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(6): 1001-1011. (in Chinese))
- [16] 王好芳, 刘阳. 济南城市化发展对降水时空演变的影响[J]. 水电能源科学, 2017, 35(7): 6-9. (WANG Haofang, LIU Yang. Impact of Jinan urbanization on precipitation evolution in spatial and temporal distribution[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(7): 6-9. (in Chinese))
- [17] 许钦, 叶鸣, 蔡晶, 等. 1956—2018 年太湖流域降水统计特征分析及演变趋势[J]. 水资源保护, 2022, 39(1): 127-132. (XU Qin, YE Ming, CAI Jing, et al. Precipitation statistical characteristics and evolution trend in Taihu Lake Basin from 1956 to 2018[J]. Water Resources Protection, 2022, 39(1): 127-132. (in Chinese))
- [18] 高世丰, 叶一隆, 邹伟. 高屏溪流域区域降雨特性分析[J]. 水利学报, 2012, 43(11): 1341-1348. (GAO Shifeng, YE Yilong, ZOU Yi. Regional rainfall characteristic analysis for the Kaoping River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(11): 1341-1348. (in Chinese))
- [19] 陈国鼎, 荆海晓, 李小宝, 等. 基于经验模态分解与传统水文分析法的降雨序列研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(11): 8-14. (CHEN Guoding, JING Haixiao, LI Xiaobao, et al. Study on rainfall time series based on empirical mode decomposition and traditional hydrological methods[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(11): 8-14. (in Chinese))
- [20] WU Zhaohua, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [21] AMARNATH M, KRISHNAIR P. Detection and diagnosis of surface wear failure in a spur geared system using EEMD based vibration signal analysis[J]. Tribology International, 2013, 61: 224-234.
- [22] 余其鹰, 白云岗, 张江辉, 等. 玉龙喀什河 62 年极端日流量变化特征[J]. 水电能源科学, 2021, 39(5): 29-32. (YU Qiyang, BAI Yungang, ZHANG Jianghui, et al. Characteristics of extreme daily flow in 62-years of Yulongkashi River[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(5): 29-32. (in Chinese))
- [23] 马凤鸣. 论城市发展阶段与城市化水平[J]. 长春师范大学学报, 2015, 34(10): 178-183. (MA Fengming. The discussion of the stage of urban development and the level of urbanization[J]. Journal of Changchun Normal University, 2015, 34(10): 178-183. (in Chinese))
- [24] 谢文蕙, 邓卫. 城市经济学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2008: 40-41.
- [25] MA Bingyan, WU Zening, HU Caihong, et al. Process-oriented SWMM real-time correction and urban flood dynamic simulation[J]. Journal of Hydrology, 2022, 605: 127269.
- [26] 杜纤. 基于 SWMM 模型的城市暴雨洪涝精细化模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [27] HU Caihong, LIU Chengshuai, YAO Yichen, et al. Evaluation of the impact of rainfall inputs on urban rainfall models: a systematic review[J]. Water, 2020, 12(9): 2484.
- [28] WANG Jingyi, HU Caihong, MA Bingya, et al. Rapid urbanization impact on the hydrological processes in Zhengzhou, China[J]. Water, 2020, 12(7): 1870.
- [29] 于赢东. 强人类活动区降水演变规律剖析及影响因子识别[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [30] 黄志珍, 楼峰青, 丁伯良, 等. 浙江省降水特征及其参数空间变化分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 117-123. (HUANG Zhizhen, LOU Fengqing, DING Bolang, et al. Spatial variation analysis of precipitation characteristics and statistical parameters in Zhejiang Province[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 117-123. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-03-05 编辑: 施业)