

## 城市化背景下年最大日径流演变及影响因素研究 ——以长江下游秦淮河流域为例\*

罗爽<sup>1</sup>, 许有鹏<sup>1\*\*</sup>, 王强<sup>1</sup>, 于志慧<sup>1</sup>, 林芷欣<sup>1</sup>, 唐仁<sup>2</sup>, 江如春<sup>2</sup>

(1: 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023)

(2: 江苏省水旱灾害防御调度指挥中心, 南京 210029)

**摘要:** 随着气候变化和人类活动的加剧, 城市化地区水文过程受到较大影响, 极端水文事件发生频率显著加大, 探究城市化地区洪水演变和驱动机理对于防洪减灾具有重大意义。本文以长江下游快速城市化地区的秦淮河流域为例, 分析了 1987—2018 年期间该流域年最大日径流的演变特征, 构建多元线性回归模型和广义可加 GAMLSS 模型识别了关键驱动因子并量化其贡献作用。结果表明: (1) 城市化背景下秦淮河流域年最大日径流呈现显著上升趋势, 平均增长速率为  $14.77 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{a})$ , 并于 2001 年发生显著突变。(2) 汛期降水量和不透水面率是年最大日径流变化的关键驱动因素, 最优模型显示前者贡献率超过了 70%, 表明了降水改变的决定性作用, 而不透水面率贡献率超过 20% 则表明了下垫面的改变对年最大日径流演变存在显著影响。(3) 不透水面的增加对年最大日径流和汛期降水量响应关系的影响程度从突变前的 6.7% 增加到突变后的 10.4%, 快速城市化已显著改变了流域降水-径流响应过程。研究表明, 随着城市发展秦淮河流域的年最大日径流受到人类活动显著影响, 洪涝威胁日趋增大, 研究结果可为城市化地区防洪减灾提供一定参考。

**关键词:** 城市化; 年最大日径流; 影响因素; GAMLSS; 秦淮河流域

## The evolution of annual maximum daily runoff and its influencing factors under the background of urbanization: An example of Qinhuai River Basin in the lower reaches of the Yangtze River\*

Luo Shuang<sup>1</sup>, Xu Youpeng<sup>1\*\*</sup>, Wang Qiang<sup>1</sup>, Yu Zhihui<sup>1</sup>, Lin Zhixin<sup>1</sup>, Tang Ren<sup>2</sup> & Jiang Ruchun<sup>2</sup>

(1: *School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, P.R.China*)

(2: *Flood and Drought Disaster Prevention and Control Center of Jiangsu Province, Nanjing 210029, P.R.China*)

**Abstract:** With the intensification of climate change and human activities, the hydrological process in urbanized areas has been greatly affected, the frequency of extreme hydrological events has increased significantly, and the flood disaster has become more and more serious. It is of great significance to explore the role of flood evolution and quantitative driving factors in urbanized areas for urban flood control. Taking the Qinhuai River Basin, a rapidly urbanized area in the lower reaches of the Yangtze River, as an example, this paper analyzed the evolution characteristics of its annual maximum daily runoff from 1987 to 2018, used multiple linear regression method and generalized additive model GAMLSS to identify the impact of potential driving factors on the evolution of annual maximum daily runoff, and quantifies the factors' contribution. The results showed that: (1) Under the background of urbanization, the annual maximum daily runoff of Qinhuai River Basin showed a significant upward trend from 1987 to 2018, with an average growth rate of  $14.77 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{a})$  and a significant mutation occurred in 2001. (2) the optimal model showed that precipitation in flood season and impervious surface ratio are the key driving factors of annual maximum daily runoff change. The former contributed more than 70%, indicating the decisive role of precipitation change; The contribution rate of impervious surface ratio exceeded 20%, also indicated that the change of underlying surface had a significant impact on the evolution of annual maximum daily runoff. (3) The impact of the rise of impervious surface ratio on the relationship between annual maximum daily runoff and flood

\* 2022-11-02 收稿; 2023-04-19 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (U2240203, 42101020) 和江苏水利科技项目 (2021010) 联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: xuy305@163.com。

season precipitation had increased from 6.7% pre-shift to 10.4% post-shift. Rapid urbanization had significantly changed the relationship between runoff and precipitation in this region. Flood control and disaster prevention will be an important task. This study showed that the evolution of annual maximum daily runoff in the Qinhuai River basin was greatly affected by human activities with urbanization and then the flood risk had increased. The research results can provide some reference for flood control and disaster reduction in urbanized areas.

**Keywords:** Urbanization; annual maximum daily runoff; influencing factors; GAMLSS; Qinhuai River Basin

随着全球性的气候变化加剧以及区域性的人类活动增强,极端水文事件日趋频繁<sup>[1]</sup>,城市化地区洪涝问题日益严重<sup>[2-3]</sup>,这严重威胁到了社会生产、人类生活以及生态环境的安全与稳定,因此城市发展与水安全成为了研究关注的焦点。与此同时,变化环境下水文事件存在的非一致性已成为共识<sup>[4]</sup>,检测水文事件的变化特征并量化不同驱动因素的作用对于区域洪涝灾害防御具有重要意义<sup>[5]</sup>。城市化地区的水文过程发生较大改变。一方面,自然条件下的降水、蒸散发和产汇流等水循环过程受到了显著影响<sup>[3]</sup>,城市地区产生“热岛”与“雨岛”效应<sup>[6]</sup>,径流出现明显变化<sup>[7-8]</sup>;另一方面,土地利用类型变化使得下垫面特征发生转变,进而影响了自然条件下的产汇流,而城市河道渠化及排水系统管网化使洪峰提前,并降低了天然河道的调蓄能力,不断增长的不透水面成为加剧城市化地区洪涝问题的新的重要因素<sup>[9]</sup>,因此亟待开展城市化背景下洪水变化及驱动机制的研究。

随着暴雨洪水问题的加剧,极端径流变化规律越来越受到关注<sup>[10]</sup>,而在统计意义上具有代表年际极端洪水量级变化特征的年最大日径流是探究极端径流演变的重要途径<sup>[11]</sup>。相关研究发现了不同地区年最大日径流存在的增减趋势以及突变情况<sup>[12-14]</sup>,但是变化机制较为复杂<sup>[15]</sup>。在城市化地区,虽然年最大日径流的演变对降水量变化的响应较强,但日益加剧的人类活动使得两者之间的关联性降低<sup>[16]</sup>。已有研究表明,年最大日径流对温度<sup>[17]</sup>、气候指数<sup>[18]</sup>和用地类型<sup>[19]</sup>等因素变化的响应加强,甚至人口可作为解释变量来反映人类活动强度变化对年最大日径流的潜在影响<sup>[20]</sup>。非一致条件下,对于极端径流演变的驱动机制分析仍然存在较大挑战,而对年最大日径流变化进行归因分析的研究同样欠缺。除此之外,在识别年最大日径流变化影响因子的方法上,基于明确物理过程的水文模型法应用较多<sup>[21]</sup>,但由于模型结构、参数校正和尺度问题的影响,研究结果可能存在一定偏差。一般的统计方法如多元线性回归法、累积双曲线法等则由于原理较为简单而仅适合描述较长时间尺度的平均变化特征,导致在分析年最大日径流变化机制的应用上也有所不足。广义可加模型(generalized additive model for location scale shape, GAMLSS)是包含位置、尺度和形状的广义参数可加模型,它可以根据解释变量的值允许不同因变量的分布式,从而灵活描述统计量与解释变量之间的线性或非线性关系<sup>[22]</sup>。如 L'opez 等应用 GAMLSS 模型对西班牙内陆河流的年最大日径流进行了非一致分析,并选择 4 项气候因素和 1 项人类活动因素将它们与分布参数建立非线性关系<sup>[23]</sup>;任梅芳等应用 GAMLSS 模型分析了北京温榆河流域夏季洪水的演变机制,发现降水和不透水面是关键驱动因素<sup>[24]</sup>。因此,通过运用该方法选择不同因变量构建水文事件统计模型,可以较好地揭示不同驱动因素对水文过程的影响。

长江下游地带是我国重要的经济活动地区,而随着近年来城市化快速发展,自然河道受到强烈的人为干扰,区域面临严峻的洪涝风险。以往关于城市化地区极端径流演变机制的研究通常以气候变化和人类活动两个角度进行概括性归因分析,缺乏对关键驱动因子的探讨,而极端径流对驱动因素的响应也存在较大不确定性。鉴于此,本文以我国长江下游典型城市化地区的秦淮河流域为例,探讨城市化背景下年最大日径流变化趋势和非一致性特征,选取不同的潜在驱动因素并借助多元线性回归和 GAMLSS 方法对影响因素建立年最大日径流演变模型,综合判别关键驱动因子并量化其贡献作用,以便为长三角区域防洪减灾和城市水资源环境管理提供一定参考。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

图 1 为研究区的地理位置、地形地貌、水文站点分布及不透水面现状示意图。秦淮河流域地处江苏省西南部长江的东岸,主体为南京市,流域总面积约 2631 km<sup>2</sup>。由于该流域上游位于丘陵区且支流众多,中下游流经城镇地区地势平坦,汇流速度较快,因此洪涝威胁较大。已有研究主要通过水文模型对秦淮河流域

不同气候和下垫面条件下典型洪水事件的变化进行模拟<sup>[25-26]</sup>,结果表明降水和不透水面的改变强烈影响了区域水文特性,但针对该区洪水非一致性特征的研究较为缺乏,尤其是年最大日径流的时序演变及归因分析。该流域在 20 世纪 80 年代后期大规模城市化而区域不透水面在 2000 年后扩张显著<sup>[9]</sup>,因此本文将 1987—2018 年作为研究的时间段以揭示城市发展对洪水变化的潜在影响。

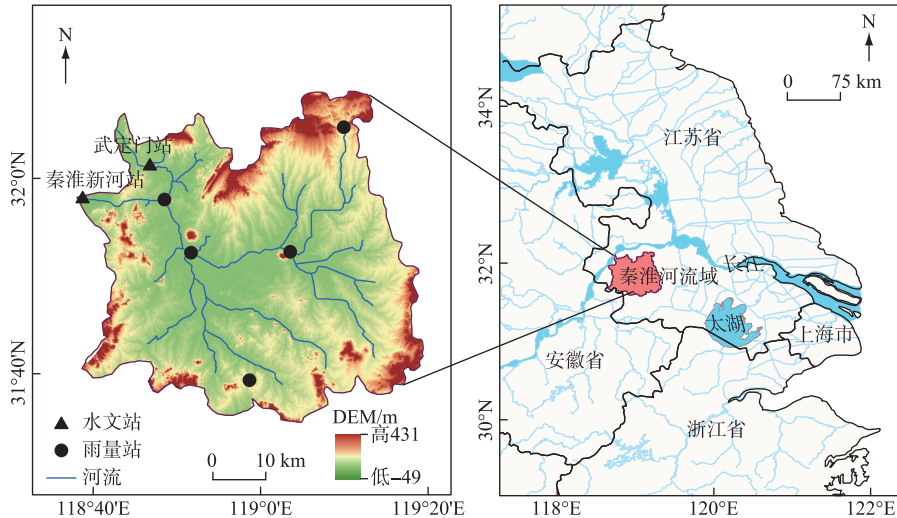


图 1 研究区示意

Fig.1 The location of study area

## 1.2 数据来源

本研究中的年最大日径流为全年日平均流量的最大值,使用的水文数据主要包括径流资料和降水资料,其中径流资料为秦淮河流域出口武定门站和秦淮新河站的逐日径流数据,降水数据为研究区内 7 个雨量站的逐日实测资料,均来源于长江流域水文年鉴。土壤湿度和气温数据来源于 ERA Interim 数据集,下载网址为 <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily>,获取到 1987—2018 年的近地表(2 m)气温和土壤湿度数据,时间分辨率均为 12 h,空间分辨率均为  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ ,由于土壤湿度数据包含 3 个层位则取平均值代表该地区的土壤湿度。不透水面数据来源于全球不透水面(global artificial impervious area, GAIA)数据集<sup>[27]</sup>(<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/gaia.html>)。

## 2 研究方法

### 2.1 趋势及突变分析方法

本研究综合采用了线性回归趋势方法、Mann-Kendall 趋势及突变分析(以下简称 M-K 方法)、Pettitt 突变检验等方法,检测年最大日径流的长序列趋势性和突变性特征。M-K 方法和 Pettitt 突变检验是广泛应用于气象学和水文学领域的趋势和突变分析方法,结合两种方法共同确定突变分析的结果,详细介绍及具体原理见参考文献<sup>[28-29]</sup>。

### 2.2 驱动因素选取

参考国内外洪水演变和归因分析的相关研究,针对常见驱动因素和表征形式进行归纳得到表 1。首先,降水和气温是反映气候变化的两个重要指标<sup>[19]</sup>。对于研究区而言,全年的降水集中于汛期因而汛期降水量级对于流域的防洪排涝等实际工作有着直接的影响,因此选取汛期降水量可以充分反映流域的降水结构变化对年最大日径流的作用。与此同时,流域气温因素的年际变化可以通过汛期近地表平均气温进行表征。其次,土壤水分对于流域的产流存在一定作用,因而降雨过程发生前无雨日的平均土壤湿度(前期土壤湿度)选为一项背景因子。此外,土地利用方式和人口规模等在统计上存在较大的不确定性,而城市化地区的

不透水地表变化是人类活动对流域下垫面影响的典型体现且其变化特征稳定<sup>[9,24]</sup>。综合考虑了气候变化和研究区近年来下垫面的改变等实际情况,同时为减少模型冗余带来的不确定性,本文选定了汛期降水量、汛期均温、前期土壤湿度和不透水面率 4 类指标作为年最大日径流变化分析的潜在驱动因素。

表 1 洪水变化分析中常见驱动因素及表征形式

Tab.1 The common driving factors and their representations in flood change analysis

类别	驱动因素	表征形式
气候变化	降水 <sup>[6,17,24]</sup>	年降水量、汛期降水量、场次降水量等
	气温 <sup>[2,17]</sup>	年均温、季节均温等
	土壤水 <sup>[1,24]</sup>	不同层位土壤水分、地下水埋深等
	气候指数 <sup>[23]</sup>	大气环流指数等
人类活动	土地利用方式 <sup>[19,21]</sup>	土地利用类型面积、农业用地占比等
	不透水面 <sup>[9,24]</sup>	不透水面率
	人口 <sup>[20]</sup>	人口数量

表 2 模型表达式\*

Tab.2 The expression of different models

类别	序号	模型设置
一	1	$\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4$
二	2	$\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3$
	3	$\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_4 x_4$
	4	$\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4$
三	5	$\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2$
	6	$\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_3 x_3$
	7	$\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_4 x_4$
四	8	$\alpha_0 + \alpha_1 x_1$

\*  $x_i (i = 1, 2, 3, 4)$  分别为归一化的汛期降水量、前期土壤湿度、汛期均温和不透水面率归一化序列值; $\alpha_0$ 为常量, $\alpha_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为各因素的系数。

### 2.3 多元线性回归方法

多元线性回归法是一种较为常用的多因子拟合方法,可使用该方法分析水文事件对不同因素存在的线性变化响应和各因素作用程度。首先将所有潜在驱动因素序列值采用归一化处理,使得所有因素的数据序列在相同范围,消除量纲差异以满足可比性,之后通过因素的组合作建立如表 2 所示的多元线性回归方程。其中,一类模型是为了描述所有因子共同对径流量级变化的作用,二类模型是描述降水和其他任意 2 个因子组合的作用,三类模型是描述降水和其他任意 1 个因子组合的作用,四类模型是描述降水作为单一因子的作用。最终,根据  $R^2$  与校正  $R^2$  (adjusted  $R^2$ ) 的值选取出最优模型。参考相关研究<sup>[30]</sup>,通过计算最优模型中各因子回归系数的权重即可量化各因素对因变量作用的相对贡献率。

### 2.4 GAMLSS 模型

多元线性回归方法虽然可以对年最大日径流序列的变化进行模型拟合,但是无法拟合变量的非线性变化响应且因素权重赋值不够客观,导致确定性有所欠缺<sup>[31]</sup>,因此本研究引入 GAMLSS 方法,通过结果的比较验证,进一步明确不同潜在驱动因素对年最大日径流事件的作用。

GAMLSS 模型假设随机观测值  $y_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ,服从分布函数  $F(y | \theta_i)$ ,  $\theta_i = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p)$  表示具有  $p$  个参数(位置、尺度和形状参数)的相邻。 $f_k(\theta_k)$ 表示解释变量  $\theta_k$ 与随机响应变量  $X_k$ 之间的函数关系式:

$$f_k(\theta_k) = \eta_k = X_k \beta_k + \sum_{j=1}^{J_k} h_{jk}(x_{jk}) \tag{1}$$

式中, $\eta_k$ 和  $\theta_k$ 是长度为  $n$  的向量; $X_k$ 是一个  $n \times J_k$  的解释变量矩阵; $\beta_k$ 是长度为  $J_k$  的回归参数向量; $h_{jk}$ 表示分布参数和解释变量  $x_{jk}$ 之间的联系函数,本研究为三次样条函数(cubic spline, CS)。

先将所有潜在驱动因素序列值采用归一化处理,之后在 R 软件里使用“gamlss”程序包对年最大日径流序列建立 GAMLSS 模型。根据前人研究结果<sup>[18]</sup>,本研究选用 5 类分布函数,包括 Gamma(GA)、Generalized Gamma(GG)、Gumbel(GU)、Lognormal(LOGNO)以及 Weibull(WEI)来拟合因变量对不同因素的响应,5 种分布函数的密度函数和连接方式见参考文献<sup>[22]</sup>。由于 GAMLSS 模型为广义的回归形式,而模型中的  $\mu$  参数是表征预测指标量级变化的参数<sup>[19]</sup>,因此该参数中的协变量系数可充分反映自变量对因变量的作用。本研究设置 GAMLSS 模型时首先将  $\mu$  参数里各因素按表 2 进行组合,5 类分布函数每类对应 8 个,总计得到 40

个模型。之后,基于拟合的 AIC(akaike information criterion)值最小的原则选择最优模型。最后,提取最优模型  $\mu$  参数中的协变量系数,计算其权重得到因素作用的相对贡献率。

此外,多因素的综合作用具有边缘效应<sup>[32]</sup>,对于本研究而言,年最大日径流对汛期降水量因素的响应可能也会随着不透水面率的变化而发生一定改变。为了更清楚得到不同阶段年最大日径流对降水的响应以及不透水面变化的具体作用,确立最优 GAMLSS 模型后,通过设立汛期降水量和不透水面率的相互作用项( $x_1 \cdot x_4$ )来代替表 1 中单独设置的不透水面率因子( $x_4$ ),之后可通过下式来计算边缘效应<sup>[32]</sup>。

$$\Delta D = \frac{\alpha_4 x_4(t_1) - \alpha_4 x_4(t_2)}{(\sum_{i=1}^j \alpha_i) + \alpha_4 x_4(t_2)} \quad (2)$$

式中,  $\Delta D$  为边缘效应; $\alpha_i(i=1,2,3,4)$  分别为各因素和相互作用项在  $\mu$  参数中的协变量系数, $j$  为最优模型中除相互作用项外的因素个数; $t_1$  和  $t_2$  为年最大日径流序列起止或发生特征性变化的时间节点,根据实际情况确定。

### 3 结果分析

#### 3.1 年最大日径流演变规律

秦淮河 1987—2018 年最大日径流序列如图 2 所示,使用 M-K 和 Pettitt 检验分析方法所得的结果如图 3 所示。综合两种突变检验方法的结果可知,秦淮河流域年最大日径流序列在 2001 年发生显著突变,其演变趋势上存在非一致性。秦淮河流域年最大日径流在突变前为减少趋势( $-9.62 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ ),而后为增加趋势( $23.41 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ ),但均不显著。突变前平均值为  $573.28 \text{ m}^3/\text{s}$ ,而突变后为  $820.47 \text{ m}^3/\text{s}$ ,且对于不同阶段中的低值来说,突变后明显高于突变前,说明年最大日径流有明显增大趋势。序列整体线性变化速率为  $14.77 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$  ( $P < 0.05$ ),因此可知秦淮河流域 1987—2018 年的年最大日径流呈显著增加趋势。

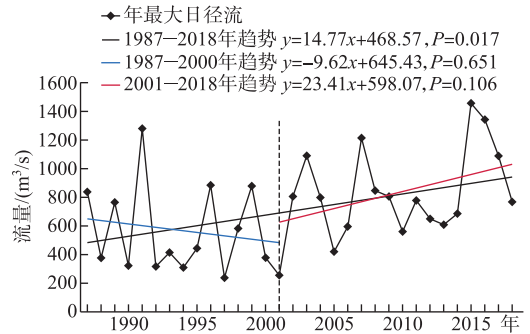


图 2 秦淮河流域 1987—2018 年最大日径流序列  
Fig.2 Trend of annual maximum daily runoff in Qinhuai River Basin from 1987 to 2018

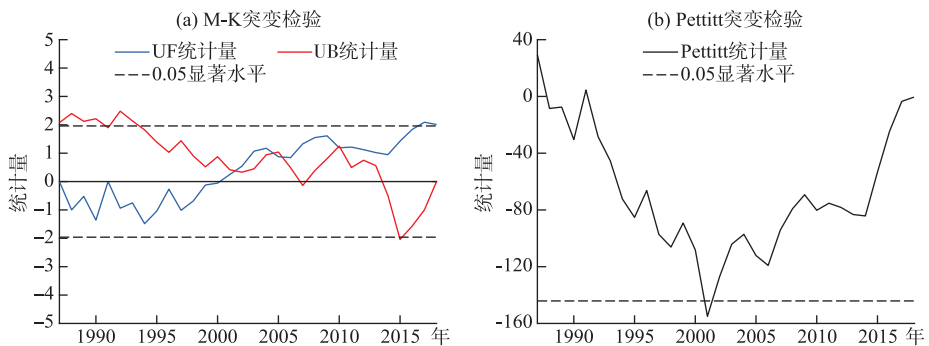


图 3 年最大日径流序列突变检验结果

Fig.3 Mutation test results of annual maximum daily runoff series

#### 3.2 年最大日径流变化的潜在驱动因素分析

为了准确识别年最大日径流变化的关键驱动因素,探究不同环境变量对其演变的影响,本研究对潜在驱动因素(汛期降水量、前期土壤湿度、汛期均温和不透水面率)的变化特征进行分析。表 3 为各驱动因素的线性变化趋势斜率,以及使用皮尔逊相关性分析得到的各因素与年最大日径流之间的相关性系数。由表

3 可知,在与年最大日径流的相关性上,汛期降水量相关系数最大,其次为不透水面率,且两者均呈现显著的相关性,汛期均温的相关系数最小。汛期降水量呈现不显著的增加趋势,汛期均温和不透水面率均呈现显著的增加趋势,前期土壤湿度为不显著的减少趋势。根据不透水面的时空变化(图 4)可知,2000 年后流域地表硬化加剧,总体不透水面率呈增加趋势并从 1987 年的 2.5% 增到了 2018 年的 24.1%。

表 3 潜在驱动因素变化趋势及与年最大日径流相关性

Tab.3 Trend of potential driving factors and its correlation with annual maximum daily runoff

	潜在驱动因素			
	汛期降水量	前期土壤湿度	汛期均温	不透水面率
线性斜率	5.60 mm/a	-0.06%/a	0.04°C/a **	0.50%/a **
相关系数	0.84 **	0.30 *	0.11	0.33 *

\*\* 表示  $P < 0.01$ , \* 表示  $P < 0.05$ , 无标记表示  $P > 0.05$ 。

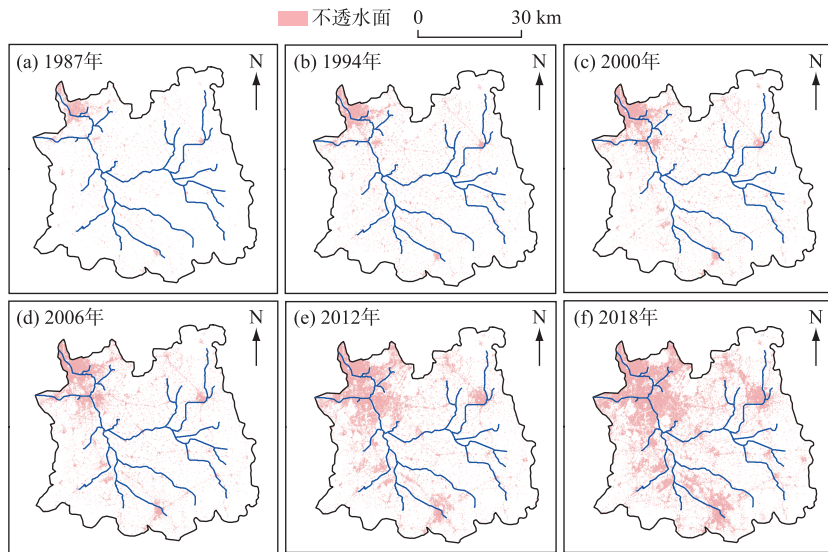


图 4 秦淮河流域不透水面时空变化

Fig.4 Temporal and spatial variation of impervious surface in Qinhuai River basin

### 3.3 年最大日径流变化的驱动机制

根据建立的多元线性回归方程,提取能反映不同类别模型稳定性和可靠性的  $R^2$  和 adjusted  $R^2$  (表 4)。由表 4 可知,模型 1 的  $R^2$  最接近 1,7 号模型的 adjusted  $R^2$  最接近 1 而其  $R^2$  与 1 号模型相差无几。因此,综合来看汛期降水量和不透水面率两者的组合为最优模型,这也表明加入不透水面率变化的影响比仅考虑降水量变化的影响(模型 8)对于模型的拟合效果有明显的提升。

表 4 多元线性回归模型拟合结果

Tab.4 Fitting parameters of the multiple linear regression model

模型序号	1	2	3	4	5	6	7	8
$R^2$	0.7826	0.7539	0.7802	0.7755	0.7187	0.7464	0.7823	0.7186
adjusted $R^2$	0.7504	0.7276	0.7589	0.7515	0.6993	0.7289	0.7651	0.7092

根据 GAMLSS 模型拟合的实际情况,提取其 AIC 值绘制得到图 5。遵照 AIC 最低为最优拟合原则,可知

秦淮河流域年最大日径流变化的最优 GAMLSS 模型为使用 LOGNO 分布函数的模型 7。该结果与多元线性回归模型结果相印证,表明包含不透水面率与汛期降水量变化的模型是较优的选择,由此可知秦淮河流域年最大日径流变化的关键驱动因素是汛期降水量和不透水面率。由于 GAMLSS 模型可对预测变量的概率分布进行拟合,即 GAMLSS 模型拟合的不是一个单一值而是全概率分布<sup>[24]</sup>,因此根据所选定的最优模型绘制拟合分位数图(图 6)。由拟合分位数序列可知,绝大多数观测流量点据位于模拟值范围内,说明优选模型能够较好地拟合出不同概率下的年最大日径流,准确地反映其变化和分布特征。

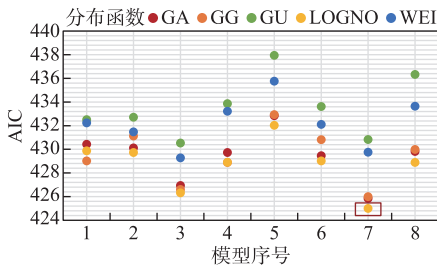


图 5 GAMLSS 模型 AIC 值

Fig.5 AIC value of different GAMLSS models

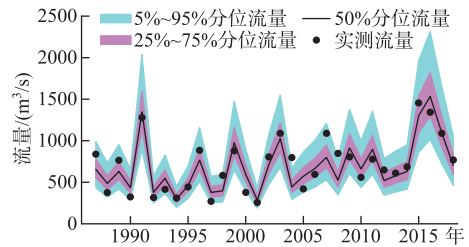


图 6 最优 GAMLSS 模型拟合序列分位数

Fig.6 Quantile diagram of the optimal GAMLSS model fitting sequence

依照所建立的最优多元回归模型提取关键驱动因素和回归系数,而最优 GAMLSS 模型提取  $\mu$  参数中的协变量系数并计算因素的相对贡献率,结果如表 5 所示。由表 5 可知,经两种方法最优模型拟合的汛期降水量和不透水面率的系数均通过了  $P < 0.05$  水平的显著性检验,表明两者产生的变化对于年最大日径流演变的影响是显著的。对于秦淮河流域 1987—2018 年的年最大日径流演变过程,多元线性回归方法所得的汛期降水量贡献率(77.1%)大于 GAMLSS 所得结果(73.7%),相应的不透水面率的贡献率(22.9%)则低于后者(26.3%)。由此可知,选用不同的统计拟合模型对于结果产生了影响,但是两者相差并不大,说明结果得到了相互验证,同时这也指示了降水和不透水面的增加可能会导致年最大日径流增长,它们的共同影响起着重要的驱动作用。

表 5 最优模型中驱动因素的系数及贡献率

Tab.5 Coefficients and contribution of the drivers in the optimal model

因素	多元线性回归模型		GAMLSS 模型	
	回归系数	贡献率/%	协变量系数	贡献率/%
汛期降水量	1179.17 **	77.1	1.65 **	73.7
不透水面率	349.28 *	22.9	0.59 **	26.3

\*\* 表示  $P < 0.01$ , \* 表示  $P < 0.05$ 。

此外,一般在分析径流变化响应时往往将各因素视为相互独立的变量,而本研究为了进一步探究不透水面率的变化在年最大日径流对汛期降水量变化响应中的影响,将降水和不透水面率的共同作用视为交互作用项来代替单独的不透水面率因素,之后提取最优 GAMLSS 模型协变量系数。同时,考虑到秦淮河流域年最大日径流在 2001 年发生显著突变,故将(2)式中的  $t_1$  和  $t_2$  分别设为研究起止时间和突变发生时间,得各阶段边缘效应。年最大日径流发生突变前(1987—2000 年)、发生突变后(2001—2018 年)以及整个阶段(1987—2018 年)期间边缘效应  $\Delta D$  分别为 0.067、0.104 和 0.164,这指示着不透水面率的增加改变了年最大日径流和汛期降水量的一致性与相关性,而上述 3 个阶段中影响程度分别为 6.7%、10.4% 和 16.4%。与此同时,突变发生后的边缘效应(10.4%)大于突变发生前的(6.7%),表明年最大日径流对降水因素的响应在秦淮河流域不透水面大规模扩张后出现较大改变,地区水文事件的非一致性有所增大。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

相关研究指出,近几十年来秦淮河流域径流显著改变,径流深在 2001 年左右突变且 21 世纪以来年均径流深相较于 1987—2000 年增长了 50% 以上<sup>[33]</sup>,洪水洪峰流量呈现逐年增加的趋势<sup>[9]</sup>。本文在此基础上发现,1987—2018 年期间秦淮河流域年最大日径流呈现显著上升趋势,而且在 2001 年左右发生显著改变,表明年最大日径流的演变存在明显的非一致性特征,充分证实区域面临的洪水威胁增大。

在环境变量影响的分析方法上,以往研究多侧重于驱动因素的选取,如 Li 等<sup>[19]</sup>、López 等<sup>[23]</sup>、任梅芳等<sup>[24]</sup>、夏露等<sup>[34]</sup>通过构建多种因素的多元线性回归或广义可加模型进行径流变化归因分析。但是仅考虑相关关系建立起的多因素统计模型具有局限性,尤其是回归变量存在共线性以及系数难以精确的问题<sup>[35]</sup>。因此本文在前人研究基础上做出一定改进,包括采用了多元线性回归和 GAMLSS 模型两种方法综合分析以减少方法选择对结果造成的不确定性,也相应地对不同因素进行了组合并对模型进行了优选。结果表明,不同因子的组合对模型解释力产生了影响,建立适宜的多因子模型可较好地进行分析。

本文所得结果与目前有关城市化地区年最大日径流演化的研究结论一致,证实了降水和不透水面率是重要的影响因素。首先,年最大日径流演变受到降水变化的决定性作用,如林娴等通过 HIMS 模型计算得到气候变化对广东珠江流域年最大日径流增加的贡献率为 94%<sup>[21]</sup>。本研究当中,得到汛期降水量改变对秦淮河 1987—2018 年期间年最大日径流变化的贡献超过 70%,由于较大空间尺度下降水的增多尤其是汛期降水增多导致了流域产流量增加,进而引起年最大日径流的量级显著变化。其次,大量研究指出不透水面率同样是城市化地区洪水变化分析中不容忽视的要素。Shao 等<sup>[36]</sup>通过对武汉市设置多级流域径流监测模型发现,区域不透水面率达 20% 时的流量是 4% 时的两倍以上;孙延伟等<sup>[9]</sup>运用水文模型分析了秦淮河流域不透水面扩张对于洪水的影响,发现大小洪水的洪峰均随不透水面率的增加而显著增加。由于城市化地区剧烈的人类活动,大量天然下垫面被人造的不透水面取代,这阻碍了地表水下渗,切断了城市区域地表水与地下水之间的水文联系<sup>[3]</sup>,致使降雨过后地面汇流速度变快,这对洪峰流量起到增强效应。本文通过最优拟合模型揭示了秦淮河流域洪水演变的重要特征,计算表明不透水面率贡献超过了 20%,证实了该地区不透水面的增加与年最大日径流存在的显著关联,它对年最大日径流的增加趋势存在重要影响。此外,值得注意的是,研究区前期土壤湿度的变化并不显著,因此它对于年最大日径流增加的作用可能也会受到不透水面变化的间接影响,如下渗减少和土壤退化压实等现象都导致了秦淮河流域土壤水动态响应规律发生改变<sup>[37]</sup>,进一步影响了该地区的产流过程。还有研究指出,21 世纪以来秦淮河流域雨洪一致性关系显著改变<sup>[38]</sup>,本文中前后阶段边缘效应(1987—2000 年,6.7%;2001—2018 年,10.4%)的差异则证实了该结论,表明不透水面的作用在增大,这也反映了气候变化和人类活动的耦合作用进一步深化。城市化改变了原有的降水-径流响应关系,城市建筑用地的增加可能导致流域的气温、降水以及蒸散发量等气象因素改变进而影响了水循环过程<sup>[3]</sup>。

### 4.2 结论与展望

城市化背景下,人类活动和下垫面条件的变化深刻影响了水文事件和水文过程。本文针对秦淮河流域 1987—2018 年的年最大日径流的演变过程,基于多元线性回归和 GAMLSS 模型综合识别了关键驱动因素并量化其贡献作用。主要结论如下:

- 1) 秦淮河流域 1987—2018 年期间年最大日径流呈现显著的增长趋势,平均线性增长速率为  $14.77 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{a})$ ;年最大日径流在 2001 年发生显著突变,突变前呈现减少趋势,突变后呈现增加趋势,且突变后的流量平均值远大于突变前,表明近年来区域洪水威胁加剧。

- 2) 以汛期降水量、前期土壤湿度、汛期均温与不透水面率为潜在驱动因素,使用多元线性回归和 GAMLSS 方法构建了多种年最大日径流演变分析模型,通过因素的组合和模型的优选最终确定了汛期降水量和不透水面率为关键驱动因素,两者与年最大日径流的相关系数分别为 0.84 和 0.33 ( $P < 0.05$ )。

- 3) 根据所构建的最优模型计算得汛期降水量贡献率超过 70%,不透水面率贡献率低于 30%,表明了降水的增加决定了年最大日径流的上升趋势而城镇建设用地的扩张对年最大日径流的增长有重要作用。



2000年之后不透水面率因素对年最大日径流与汛期降水量因素的一致性关系的影响加大,表明了近年来快速城市化过程对区域的雨洪响应关系造成了显著改变。

本文揭示了长江下游典型快速城市地区秦淮河流域的年最大日径流的演变趋势,基于两种方法定性且定量分析了非一致条件下影响其变化的关键驱动因素,有助于城市地区洪水演变及驱动机制相关研究的开展。但是,由于径流响应的复杂性,如何更好地通过构建多因子变量模型厘清不同因素对水文事件的影响是需要进一步考虑的问题。此外,在城市化背景下如何更全面准确地分析人类活动的特征和作用还有待进一步深入的研究来进行揭示。

## 5 参考文献

- [1] Dey P, Mishra A. Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: A review of methodologies and critical assumptions. *Journal of Hydrology*, 2017, **548**: 278-290. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.03.014.
- [2] Zhang JY, Wang YT, He RM *et al.* Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China. *Advances in Water Science*, 2016, **27**(4): 485-491. [张建云, 王银堂, 贺瑞敏等. 中国城市洪涝问题及成因分析. 水科学进展, 2016, **27**(4): 485-491.]
- [3] Zhang JY, Song XM, Wang GQ *et al.* Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: Hydrological response to urbanization. *Advances in Water Science*, 2014, **25**(4): 594-605. [张建云, 宋晓猛, 王国庆等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I.城市水文效应. 水科学进展, 2014, **25**(4): 594-605.]
- [4] Milly PCD, Betancourt J, Falkenmark M *et al.* Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 2008, **319**(5863): 573-574. DOI: 10.1126/science.1151915.
- [5] Song XM, Zhang JY, Zhan CS *et al.* Review for impacts of climate change and human activities on water cycle. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(7): 779-790. [宋晓猛, 张建云, 占车生等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展. 水利学报, 2013, **44**(7): 779-790.]
- [6] Dong LH, Xiong LH, Yu KX *et al.* Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology. *Advances in Water Science*, 2012, **23**(2): 278-285. [董磊华, 熊立华, 于坤霞等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展. 水科学进展, 2012, **23**(2): 278-285.]
- [7] Ju XH, Gao X, Li WF *et al.* Effects of land use change on surface runoff in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(4): 1413-1423. DOI: 10.5846/stxb201812262819. [巨鑫慧, 高肖, 李伟峰等. 京津冀城市群土地利用变化对地表径流的影响. 生态学报, 2020, **40**(4): 1413-1423.]
- [8] Zhang JY, Wang GQ, Jin JL *et al.* Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956-2018. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(2): 153-161. [张建云, 王国庆, 金君良等. 1956—2018年中国江河径流演变及其变化特征. 水科学进展, 2020, **31**(2): 153-161.]
- [9] Sun YW, Xu YP, Gao B *et al.* Influence of impervious surface expansion on flood peak under urbanization—A case study of Qinhuai River in Nanjing. *J Lake Sci*, 2021, **33**(5): 1574-1583. DOI: 10.18307/2021.0515. [孙延伟, 许有鹏, 高斌等. 城镇化下流域不透水面扩张对洪峰的影响——以南京秦淮河为例. 湖泊科学, 2021, **33**(5): 1574-1583.]
- [10] Zhang LP, Du H, Xia J *et al.* Progress in the study of extreme hydrologic events under climate change. *Progress in Geography*, 2011, **30**(11): 1370-1379. [张利平, 杜鸿, 夏军等. 气候变化下极端水文事件的研究进展. 地理科学进展, 2011, **30**(11): 1370-1379.]
- [11] Du H, Xia J, Zeng SD *et al.* Temporal and spatial variations and statistical models of extreme runoff in Huaihe River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(3): 398-409. [杜鸿, 夏军, 曾思栋等. 淮河流域极端径流的时空变化规律及统计模拟. 地理学报, 2012, **67**(3): 398-409.]
- [12] Liu BJ, Qiu KH, Liao YY *et al.* Non-stationary flood frequency analysis of North River and West River Delta with time-varying moments. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2016, **55**(4): 130-135. [刘丙军, 邱凯华, 廖叶颖等. 基于TVM的西北江三角洲地区非一致性洪水频率分析. 中山大学学报(自然科学版), 2016, **55**(4): 130-135.]
- [13] Yao MT, Gao C, Lu M *et al.* The intensity and frequency characteristics of extreme runoff over the Huaihe River Basin during 1959-2008. *Geographical Research*, 2015, **34**(8): 1535-1546. DOI: 10.11821/dlyj201508011. [姚梦婷, 高超, 陆苗等. 1959—2008年淮河流域极端径流的强度和频率特征. 地理研究, 2015, **34**(8): 1535-1546.]
- [14] Guo M, Yang ZY, Zhou ZH *et al.* Analysis of hydrological frequency in upper reaches of Jialing River under inconsistent environment. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power*, 2018, **39**(1): 42-47. [郭明, 杨志勇, 周政辉等. 非一致性条件下嘉陵江上游水文频率分析. 华北水利水电大学学报:自然科学版, 2018, **39**(1): 42-47.]
- [15] Merz B, Vorogushyn S, Uhlemann S *et al.* HESS Opinions “More efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, **16**(5): 1379-1387. DOI: 10.5194/hess-16-1379-2012.
- [16] Wu CH, Huang GR. Changes in heavy precipitation and floods in the upstream of the Beijiang River Basin, South China. *International Journal of Climatology*, 2015, **35**(10): 2978-2992. DOI: 10.1002/joc.4187.
- [17] Li JX, Xu CC, Wang X *et al.* Extreme hydrological events and its response to climate change in the kaidu river basin. *Research of Soil and*

- Water Conservation*, 2014, **21**(5): 285-291, 297. [李佳秀, 徐长春, 王晓等. 开都河流域极端水文事件变化及其对气候的响应. 水土保持研究, 2014, **21**(5): 285-291, 297.]
- [18] Zhang Q, Gu XH, Singh P V *et al.* Evaluation of flood frequency under non-stationarity resulting from climate indices and reservoir indices in the East River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 2015, **527**: 565-575. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.05.029.
- [19] Li HZ, Zhang Q, Singh PV *et al.* Hydrological effects of cropland and climatic changes in arid and semi-arid river basins: A case study from the Yellow River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 2017, **549**: 547-557. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.04.024.
- [20] Yan L, Xiong LH, Guo SL *et al.* Comparison of four nonstationary hydrologic design methods for changing environment. *Journal of Hydrology*, 2017, **551**: 132-150. DOI:10.1016/j.jhydrol.2017.06.001.
- [21] Lin X, Chen XH, He YH *et al.* Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on annual and maximum daily runoff in the Wujiang River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33**(5): 828-839. DOI: 10.11849/zrzyxb.20170514. [林娴, 陈晓宏, 何艳虎等. 气候变化和人类活动对武江流域年径流及最大日流量影响的定量分析. 自然资源学报, 2018, **33**(5): 828-839.]
- [22] Stasinopoulos DM, Rigby RA. Generalized additive models for location scale and shape (GAMLSS) in R. *Journal of Statistical Software*, 2007, **23**(7). DOI: 10.18637/jss.v023.i07.
- [23] López J, Francés F. Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish Rivers, using climate and reservoir indices as external covariates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, **17**(8): 3189-3203. DOI: 10.5194/hess-17-3189-2013.
- [24] Ren MF, Xu ZX, Pang B. Driving mechanisms of urban floods under the changing environment: Case study in the Wenyu River Basin. *Advances in Water Science*, 2021, **32**(3): 345-355. [任梅芳, 徐宗学, 庞博. 变化环境下城市洪水演变驱动机理——以北京市温榆河为例. 水科学进展, 2021, **32**(3): 345-355.]
- [25] Wang HZ, Gao YQ, Yuan Y *et al.* Hydrological responses to climate change in Qinhuai River Basin based on SWAT model. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, **28**(1): 81-87. [王怀志, 高玉琴, 袁玉等. 基于 SWAT 模型的秦淮河流域气候变化水文响应研究. 水资源与水工程学报, 2017, **28**(1): 81-87.]
- [26] Gao YQ, Yuan Y, Wang HZ *et al.* Examining the effects of urban agglomeration polders on flood events in Qinhuai River Basin, China with HEC-HMS model. *Water Science and Technology*, 2017, **75**(9): 2130-2138. DOI: 10.2166/wst.2017.023.
- [27] Gong P, Li XC, Wang J *et al.* Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **236**: 111510. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111510.
- [28] Qin NX, Jiang T, Xu CY. Trends and abrupt analysis on the discharge in the Yangtze Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14**(5): 589-594. [秦年秀, 姜彤, 许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(5): 589-594.]
- [29] Wijngaard JB, Klein Tank AMG, Können GP. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *International Journal of Climatology*, 2003, **23**(6): 679-692. DOI: 10.1002/joc.906.
- [30] Tan XJ, Liu BJ, Tan XZ. Global changes in baseflow under the impacts of changing climate and vegetation. *Water Resources Research*, 2020, **56**(9): e2020WR027349. DOI: 10.1029/2020WR027349.
- [31] Wang SJ, Yan YX, Yan M *et al.* Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the huangfuchuan drainage basin: Application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(3): 388-397. DOI: 10.1007/s11442-010-0231-9. [王随继, 闫云霞, 颜明等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析——累积量斜率变化率比较方法的提出及应用. 地理学报, 2012, **67**(3): 388-397.]
- [32] Villarini G, Strong A. Roles of climate and agricultural practices in discharge changes in an agricultural watershed in Iowa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **188**: 204-211. DOI: 10.1016/j.agee.2014.02.036.
- [33] Dai XY, Xu YP, Lin ZX *et al.* Analysis of runoff change and its influencing factors in Qinhuai River Basin in the lower reaches of Yangtze River. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, **26**(4): 68-73. DOI: 10.11654/jaes.2016-0554. [代晓颖, 许有鹏, 林芷欣等. 长江下游秦淮河流域径流变化及影响因素分析. 水土保持研究, 2019, **26**(4): 68-73.]
- [34] Xia L, Bi RT, Song XY *et al.* Variation law and driving factors of river base flow in Yanwachuan Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(21): 8430-8442. DOI: 10.5846/stxb202104010845. [夏露, 毕如田, 宋孝玉等. 砚瓦川流域河川基流变化规律及其驱动因素. 生态学报, 2021, **41**(21): 8430-8442.]
- [35] Huang BB, Hao CY, Li RN *et al.* Research progress on the contribution rate of climate change and human activities to surface runoff change and its quantitative methods. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33**(5): 899-910. DOI: 10.11849/zrzyxb.20170261. [黄斌斌, 郝成元, 李若男等. 气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展. 自然资源学报, 2018, **33**(5): 899-910.]
- [36] Shao ZF, Fu HY, Li DR *et al.* Remote sensing monitoring of multi-scale watersheds impermeability for urban hydrological evaluation. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **232**: 111338. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111338.
- [37] Wang Q, Xu YP, Yu ZH *et al.* Multi-scale hydrological experimental observations and responding mechanisms of storm floods in rapid urbanization areas. *Advances in Water Science*, 2022, **33**(5): 743-753. [王强, 许有鹏, 于志慧等. 快速城市化地区多尺度水文观测试验与暴雨洪水响应机理分析. 水科学进展, 2022, **33**(5): 743-753.]
- [38] Bian GD, Du JK, Song MM *et al.* Detection and attribution of flood responses to precipitation change and urbanization: A case study in Qinhuai River Basin, Southeast China. *Hydrology Research*, 2020, **51**(2): 351-365. DOI: 10.2166/nh.2020.063.