城市化条件下的秦淮河流域径流多时间尺度变化特征及影响因素

李闰洁[1], 李升峰[1], 吴森垚[1,2]

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 中国人民解放军 61175 部队, 江苏 南京 210049)

摘　要: [目的] 探究城市化条件下的秦淮河流域径流多时间尺度变化特征及其内在联系,为定量分析气候变化和人类活动对流域水文循环演变研究提供科学依据。[方法] 以秦淮河流域为研究区,基于 1986—2015 年水文气象资料和不透水面数据,采用 Mann-Kendall 趋势检验和 Pettitt 突变检验方法,分析秦淮河流域多时间尺度降雨和径流的变化特征,并通过建立广义可加模型 GAMLSS,分析降雨和流域不透水面变化对不同时间尺度径流变化的影响。[结果] ①秦淮河流域不透水面在 30 a 间扩展迅速,从 1988 年的 3.09%扩展至 2015 年的 24.01%,增长了近 8 倍。②不同时间尺度下径流序列变化特征不同,其中年径流序列增加趋势显著,并在 2001 年发生突变。③不透水面对小洪水的影响较大。对于相同的时间尺度,一般情况下,流量小的径流序列受不透水面影响较大;对不同时间尺度,不透水面具有累积效应,随着时间尺度增大,不透水面对径流的影响增强。[结论] 秦淮河流域城市化进程不断加快,不透水面扩张对不同时间尺度径流影响程度不同。

关键词: 城市化; 径流变化; 多尺度分析; GAMLSS 模型; 秦淮河流域

文献标识码: A　　**文章编号**: 1000-288X(2020)04-0100-08　　**中图分类号**: P333.1, P95

文献参数: 李闰洁, 李升峰, 吴森垚. 城市化条件下的秦淮河流域径流多时间尺度变化特征及影响因素[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 100-107. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20200630.001; Li Runjie, Li Shengfeng, Wu Senyao. Multi-scale and impacting factors of runoff variation in urbanized Qinhuai River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 100-107.

Multi-scale and Impacting Factors of Runoff Variation in Urbanized Qinhuai River Basin

Li Runjie[1], Li Shengfeng[1], Wu Senyao[1,2]

(1. *School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu* 210023, *China*; 2. 61175 *People's Liberation Army of China Troops, Nanjing, Jiangsu* 210049, *China*)

Abstract: [Objective] The characteristics and internal relations for multiple time scale runoff in urbanized Qinhuai River basin were explored in order to provide scientific basis for quantitatively evaluating the impact of climate change and anthropogenic activities on the process of water cycle. [Methods] Based on the long-term hydro-meteorological and impervious surface data during 1986—2015 in Qinhuai River basin, the Mann-Kendall trend test and Pettitt change-point test were combined to identify the trends and abrupt change points of the precipitation and runoff series. The influence of rainfall and impevious coverage on runoff changes at different time scales was analyzed by using established generalized additive models for location, scale and shape (GAMLSS) framework. [Results] ① The impervious surface had expanded rapidly in 30 years, with the impervious rate increased from 3.09% in 1988 to 24.01% in 2015. ② The characteristics of runoff series at different time scales were various, and the annual runoff series showed a significantly upward trend with an obvious abrupt change point at 2001. ③ The impervious surface expansion had a more significant impact on

收稿日期: 2020-03-06　　**修回日期**: 2020-05-12

资助项目: 国家自然科学基金项目"城镇群扩展下流域水循环要素多时空尺度演变规律及驱动机制"(41771029)

第一作者: 李闰洁(1995—),女(汉族),江苏省南京市人,硕士研究生,研究方向为城市水文。Email: Lirunjie1023@hotmail.com。

通讯作者: 李升峰(1964—),男(汉族),江苏省南京市人,博士,副教授,主要从事生态环境规划与评价研究。Email: lisf@nju.edu.cn。

small intensity flood, for the same time scale, normally, the impervious surface had a greater impact on small runoff series than on high runoff series. Further, the imperviousness has cumulative effect with the increase of time scale. [Conclusion] The urbanization process of Qinhuai River basin is accelerating, and the effects of impervious surface expansion on multiple time scale runoff are various.

Keywords: urbanization; runoff variation; multi-scale analysis; GAMLSS model; Qinhuai River basin

径流作为流域水循环的重要环节,受到气候变化和人类活动的影响[1-2]。气候变化通过改变降水、气温、风速等气象要素对流域水循环过程产生影响[3-4]。人类活动一方面通过改变流域下垫面特征直接影响产汇流过程;另一方面通过水库修建、取用水等行为间接干扰流域径流的自然变异特征[5-6]。综合考虑气候变化和人类活动的影响,径流系列会出现渐变和突变等非平稳特征,并且在不同时间尺度表现有所差异[7]。水文序列非平稳分析中的重要内容包括趋势分析和突变检验[8],水文序列趋势分析常用方法主要有:滑动平均法[9]、Mann-Kendall(M-K)趋势检验法[10]、R/S 分析法[11]等。突变点检测方法有 Pettitt 检验法[12]、双累积曲线法[13]、有序聚类法[14]等。这些方法已在实践中得到广泛的应用。例如,陈立华等[15]采用 M-K 趋势检验法、R/S 法、有序聚类法等方法分析西江干流径流年际及年内变化规律。陈玫君[16]采用 M-K 趋势检验、双累积曲线、Pettitt 突变检验法等方法研究黄河三个典型流域的径流变化特征。以上研究表明 M-K 趋势检验法和 Pettitt 检验法原理简单,可操作性强,定量化程度高,表征效果好[17]。水文序列变异影响因素分析主要采用统计模型和水文模型法[18],对自然因素和人为因素进行定性或定量的区分[19-20]。统计模型通过分析水文序列变异点与其变异形式的相关性,从而确定引起序列变化的关键因素。水文模型法通过模拟预测不同情景下流域径流的响应,从物理过程的角度更好地揭示径流的变化规律[21]。由于水文模型结构复杂,参数众多,并且尚未能完全表征人类活动对不同水文过程的影响机制,其应用受到一定的限制,尤其是受到强人类活动影响的流域水文研究[22-23]。近来广义可加模型(GAMLSS)得到了较为广泛的应用[24],由于该模型计算简洁,可以较为容易的获得自变量和因变量的关系,不仅可预测未来径流的变化趋势,还可以进行归因分析。有学者采用 GAMLSS 模型建立多种分布下的回归模型来研究复杂环境下的水文要素变化过程。例如,张冬冬等[25]采用 GAMLSS 模型分析出大渡河流域年最大日降水序列呈现不显著变化趋势,且气候变化对流域极端降水的影响较强。李凌琪等[26]采用 GAMLSS 建立影响因素降水、气温、ATD 指数(累积气温亏损值)与长江上游巴塘站年径流量之间的关系,结果表明 ATD 指数对径流变化的影响更显著。城市化进程中,随着林地、耕地、湿地等不断转化为建筑用地、工业用地或商业用地,不透水表面(如屋顶、水泥道路、停车场等人工建筑物)不断增加,并通过直接改变降雨入渗过程,对流域产汇流产生影响。目前,城市化水文效应研究集中在短期水文效应(如洪水)或长期水文效应(如年径流)。短期水文效应表现为城市化对暴雨洪水的影响。例如,牛胜利[27]基于 HEC-HMS 模型分析出城市化导致武汉符河流域洪水径流增加。长期水文效应表现在城市化对年际尺度径流的影响,例如,余琪[28]利用长期水文影响模型分析不透水面扩张对年径流量的影响。林立清[29]基于 L-THIA 模型分析出上海地区快速城市化导致径流量不断增加。研究城市扩张对水文影响的程度及范围是城市水文研究的热点与难点。现阶段研究针对单一径流指标,对不同时间尺度径流影响程度的研究还较为匮乏,且各时间尺度之间的效应分析也相对较少。多时间尺度分析可以帮助全面认识城市化对水文循环的影响,更准确揭示流域水循环演变机理及内在联系,从而科学指导不同目的的生产实践如防洪除涝、水生态环境治理、水资源管理等。

秦淮河位于中国经济发达、城市化发展迅速的长江三角洲地区,也是江苏省省会南京市的母亲河。随着城市建设用地的不断扩张,秦淮河流域不透水面迅速增加,给流域的水文循环过程带来深刻影响,显著增加南京城市的洪涝风险,严重制约社会经济发展和威胁城市居民的生命财产安全。分析城市化驱动下的秦淮河流域的径流变化特征对流域防洪减灾、土地可持续利用、水资源保护具有重要意义,同时也可为长三角地区其他城市化流域的水文循环变异研究提供参考。本文以秦淮河流域为研究区,基于 30 a(1986—2015 年)的水文序列,分析流域多时间尺度径流系列非平稳演变特征(渐变和突变)。进一步借助广义可加模型 GAMLSS,分析非平稳径流序列的影响因素及其在不同时间尺度的内在联系[30],旨在为后续定量分析气候变化和人类活动对流域水文循环演变研究提供科学依据。

1　研究区概况

秦淮河流域地处长江下游地区,位于江苏省西南

部，整个流域为闭合流域，流域面积为 2 631 km^2，形状近似呈方形，流域范围位于 118°39′—119°19′E，31°34′—32°10′N。流域地形为完整的构造盆地，地势平坦。地貌类型由高到低依次为丘陵、岗地和平原，四周为丘陵山地，流域内部的平原分布在中央地势低洼地区，主要沿河流两侧分布，岗地多出于流域内低山和丘陵的中部地带。秦淮河流域属亚热带半湿润季风气候区，具有四季分明、夏热冬冷的特点，多年平均气温为 15.4 ℃，最高气温为 43 ℃，最低气温为－14 ℃，温差较大。年平均降水量为 1 119 mm，降雨比较充沛。流域上游支流众多，且多分布在山区，汇流速度快，流量涨幅大；中下游地区地形平坦，洪、涝水相互交织。随着城市化进程加快，1988—2015 年秦淮河流域不透水面的增长极其显著，不透水率(定义为流域中不透水面积占流域总面积的比例)从 1988 年的 3.09%扩展至 2015 年的 24.01%，扩大了近 8 倍[31]。2001 年之前不透水率的年均净增为 0.34%，而之后则为 1.16%。流域中下游洪涝灾害风险日益加剧。

2 数据和方法

2.1 数据来源

1986—2015 年是秦淮河流域城市化高速发展，流域下垫面变化显著的阶段。1988 年秦淮河流域年末总人口数为 72.27 万人，2015 年年末总人口数为 99.36 万人，增长率为 37.48%。人口数据来源于南京市统计局(http://tjj.nanjing.gov.cn/)的《南京统计年鉴(1987—2018 年)》和镇江市统计局(http://tjj.zhenjiang.gov.cn/)的《镇江统计年鉴(2018 版)》。本文选用秦淮河流域 1986—2015 年的降水、径流及不透水面数据。降水数据来源于流域内 7 个雨量站 1986—2015 年逐日观测资料。通过计算各站点多年平均雨量，发现各站点之间的差异较小(变差系数为 0.0～0.02)，表明研究流域降雨空间一致性较好。因此，本文采用泰森多边形插值得到流域面降雨量数据，用于后续分析。径流数据源于水文年鉴，经过水文部门的整编和核对，具有较好的一致性和可靠性。将流域出口秦淮河新闸和武定门闸的日径流数据之和作为秦淮河流域总径流，用于后续分析。秦淮河流域年降雨量和年径流深关系在研究时段内未发生明显变化，降雨量和径流深存在较好的一致性，降雨径流相关系数达到 0.78。不透水面数据基于 Landsat 卫星遥感影像，采用半自动决策树分类模型获取[31]。

2.2 研究方法

2.2.1 M-K 检验法 M-K 非参数检验方法被广泛应用于分析降水、径流和气温等要素时间序列的变化趋势[32]，该方法假设序列中的样本无需遵从一定的分布，避免少数异常值的干扰。M-K 趋势检验法中的统计变量 Z 值可用来对水文序列进行显著性检验。在 M-K 检验中，原假设 H_0 为时间序列数据 x_1，x_2，x_3，…x_n 是 n 个随机且独立分布的样本；备选假设 H_1 是双边检验，对于所有的 k，$j\leqslant n$，且 $k\neq j$，x_k 和 x_j 的分布不同，检验的统计变量 S 计算公式为：

$$s=\sum_{k=1}^{n-1}\sum_{j=k+1}^{n}\mathrm{sgn}(x_j-x_k) \tag{1}$$

S 为正态分布，其均值为 0。方差 $\mathrm{var}(S)=n(n-1)(2n+5)/18$。当 $n>10$ 时，标准的正态统计变量通过下式计算：

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}} & (S>0)\\ 0 & (S=0)\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}} & (S<0)\end{cases} \tag{2}$$

在给定的 α 置信水平上，如果 $|Z|\geqslant Z_{1-\alpha/2}$，表明时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。对于统计变量 Z，大于 0 为上升趋势，小于 0 为下降趋势。本文给定显著性水平分别为 0.01，0.05 时，对应的统计量临界检验值分别为±2.58 和±1.96。

2.2.2 Pettitt 突变点检验法 Pettitt 突变点检验法用于检测时间序列是否存在突变点，该方法是一种基于秩的非参数统计检验方法，基本原理是假设将随机变量序列 x_1，x_2，…x_n 任意分割为 x_1，x_2，…x_i 和 x_{i+1}，x_{i+2}，…x_n 两个均值相等的子序列后，如果前后两部分中随机变量的分布函数是 $F_{1(x)}$ 和 $F_{2(x)}$，且 $F_{1(x)}\neq F_{2(x)}$，则认为变点发生在 i 处。统计量定义如下：

$$U_{t,n}=U_{t-1,n}+\sum_{i=1}^{n}\mathrm{sgn}(x_j-x_i)\quad(j=1,2,3,\cdots,n) \tag{3}$$

$$\mathrm{sgn}(x_k-x_i)=\begin{cases}1 & (x_k-x_i>0)\\ 0 & (x_k-x_i=0)\\ -1 & (x_k-x_i<0)\end{cases} \tag{4}$$

构造统计量 K 和 P：

$$K=\max|U_{t,n}|\qquad(t=1,2,\cdots,n) \tag{5}$$

$$P\cong 2\exp\left(-\frac{6K^2}{n^3+n^2}\right) \tag{6}$$

与 K 对应的年份为时间序列最有可能突变的地方，当 $P\leqslant 0.05$ 时，认为发生突变；否则突变不显著。

2.2.3 广义可加模型 GAMLSS GAMLSS 模型是半参数回归模型，用于描述随机变量序列的任何统计

参数与解释变量之间的线性或非线性关系[33]。模型定义如下:假设同一时间序列 $y_i(i=1,2,\cdots,n)$ 相互独立并且服从分布函数 $F=(y_i\mid\theta^i)$,$\theta_i=(\theta_1,\theta_2,\cdots\theta_p)$ 表示 P 个参数(包括位置、尺度和形状参数)形成的向量。记 $g_k(\theta_k)$ 表示反应参数向量 θ_k 与解释变量 X_k 和随机效应项之间的单调连接函数,连接函数的统一表达式为:

$$g_k(\theta_k)=\eta_k=X_k\beta_k+\sum_{j=1}^{J_k}Z_{jk}\gamma_{jk} \tag{7}$$

式中:η_k,θ_k 是长度为 n 的向量;$\boldsymbol{X_k}$ 是维度为 $n\times J_k$ 的解释变量矩阵;$\beta_k=\{\beta_{1k},\beta_{2k},\cdots,\beta_{J_kk}\}$ 是长度为 J_k 的参数向量;$\boldsymbol{Z_{jk}}$ 是已知的 $n\times q_{jk}$ 固定设计矩阵;γ_{jk} 是正态分布随机变量。

当解释变量为时间 t 时,解释变量矩阵 $\boldsymbol{X_k}$ 可以表示为:

$$\boldsymbol{X_k}=\begin{bmatrix}1 & t & \cdots & t^{I_k-1}\\ 1 & t & \cdots & t^{I_k-1}\\ 1 & t & \cdots & t^{I_k-1}\\ 1 & t & \cdots & t^{I_k-1}\end{bmatrix}_{n\times I_k} \tag{8}$$

本文采用 GAMLSS 模型探讨降水和不透水率对不同时间尺度径流的影响。选用 Gamma(GA),Gumbel(GUM),Weibull(WEI),Logistic(LO)这 4 种两参数分布函数类型[34],根据赤池信息量准则 AIC(akaike information criterion)值选择最优拟合分布。

3　结果与分析

3.1　不同时间尺度径流特征分析

本文按照日、月、季度、干季、湿季和年分别建立秦淮河流域不同时间尺度的径流和降雨序列。日时间序列为一年内日流量(以及日降雨)从大到小排列,统计出最大值(R_1)以及 5 个百分位数,分别为 5%(R_5),25%(R_{25}),50%(R_{50}),75%(R_{75})和 95%(R_{95}),分别构建降雨和径流序列;月时间序列为 1—12 月的降雨和径流序列;季时间序列按 1—3 月、4—6 月、7—9 月、10—12 月划分为四季,分别建立季节降雨和径流序列;干季时间序列为一年内枯水期的降雨和径流序列,为每年的 11 月到翌年的 4 月;湿季时间序列为一年内丰水期的降雨和径流序列,为每年的5—10 月;年时间序列为每年总降雨和径流序列。秦淮河流域不同时间尺度径流量变化特征如图 1 所示。

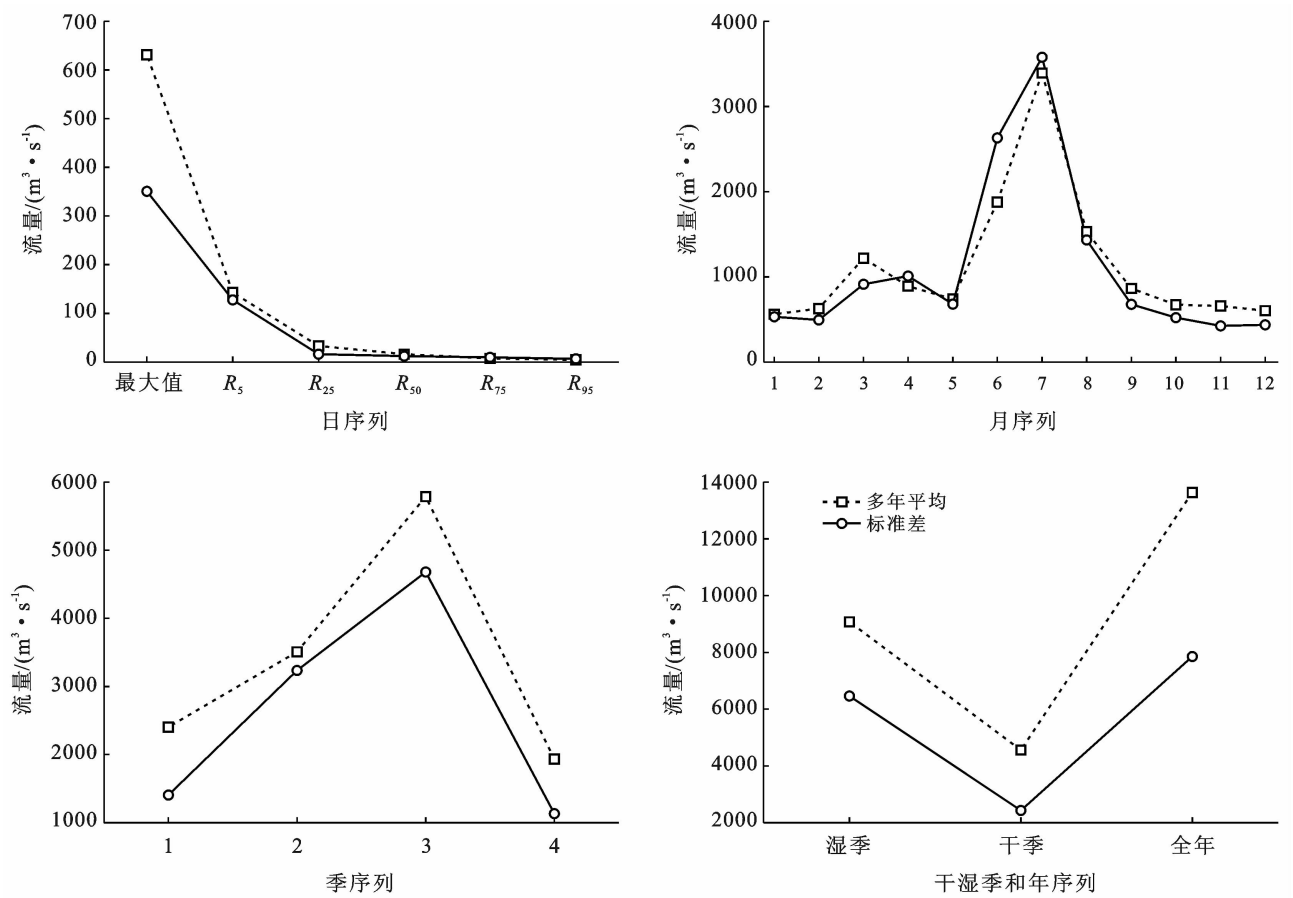


图 1　秦淮河流域不同时间尺度径流统计特征

根据图 1 可知，径流年内变化特征表现出较大的差异性。从日尺度看，日最大径流量和前 5 百分位流量与 25 百分位以下径流量差距明显；从月尺度看，秦淮河流域流量的年内分布很不均匀且流域径流有春、夏两个汛期，年径流过程线呈双峰，春汛集中在 3 月份，占全年径流量的比例为 9%，夏汛主要集中在 6—8 月份，占全年径流量的比例约为 50%，最小流量出现在 12 月到翌年 2 月；从季尺度看，第 2，3 季度的径流量明显高于第 1，4 季度，第 2，3 季度的径流量占总径流量的 68%，超过全年径流量的 1/2；受季风气候影响，流域全年径流相对集中，出现显著的干、湿两季。径流年际变化特征通过变差系数和年际极值比来表征[35]，计算可得秦淮河流域变差系数(C_v)为 0.58，年际极值比(ω)为 14.78。径流变差系数和年际极值比的数值比较大，说明秦淮河流域年径流序列离散程度较大，年际丰枯变化剧烈。

3.2 不同时间尺度径流趋势分析和突变检验

对不同时间尺度的径流序列分别进行 M-K 趋势分析及 Pettitt 突变检验。从图 2 可以看出，各个时间尺度的径流都表现出增加趋势。日序列第 25 百分位以下径流，月序列 1 月，2 月，9 月，10 月和 12 月，季序列的第 4 季度，年序列径流增加趋势非常显著，达到了 1%的显著性水平。月序列 4 月，5 月和 8 月，季序列的第 3 季度，干湿季径流增加趋势显著，达到了 5%的显著性水平。而日系列的最大值和第 5 百分位，月序列的 3 月，6 月，7 月和 11 月，季序列的第 1，2 季度的变化趋势都不显著。通过对比不同尺度下径流变化趋势的显著性，并结合径流特征发现：①从相同时间尺度来看，一般情况下，流量大的序列变化趋势不显著，而流量小的序列增加趋势显著。如日尺度径流序列，前 5 百分位径流增加趋势不显著，而 25 百分位以下径流增加显著；月尺度径流序列，3 月，6 月，7 月增加趋势不显著，而 1 月，2 月，4 月，5 月，9 月，10 月和 12 月增加趋势显著。8 月和 11 月例外，8 月实际径流变化显著，而 11 月实际径流离散程度低，趋势不显著。季尺度径流序列，第 1，2 季度变化趋势不显著，第 4 季度变化趋势显著，第 3 季度例外；②从不同时间尺度来看，径流增加趋势不显著或显著的序列，随着时间尺度增大，径流变化趋势会由不显著到显著再到非常显著或由显著到非常显著。例如，第 1，2 季度变化趋势不显著，到干湿季尺度变为显著，再到年尺度变为非常显著；第 3 季度是显著增加趋势，到干湿季仍为显著增加趋势，再到年尺度变为非常显著。

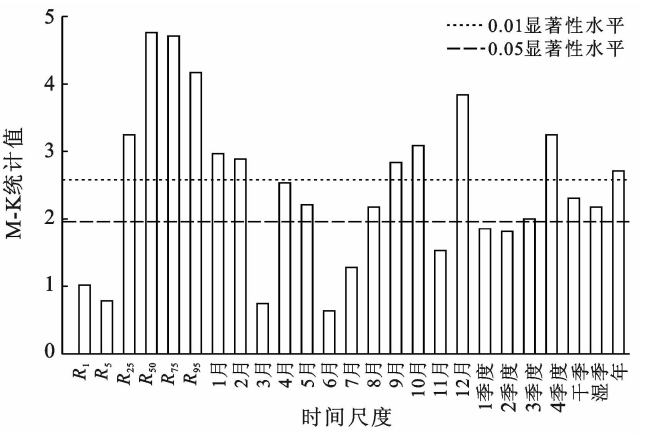


图 2 秦淮河流域不同时间尺度径流 M-K 检验结果

径流显著突变序列如图 3 所示，结果表明日径流序列的突变点集中在 2001—2005 年，月径流序列的突变点集中在 1997—2005 年，季径流序列的突变点为 1998 年，湿季径流序列的突变点为 2001 年，年径流序列的突变点为 2001 年。

不同时间尺度径流突变结果表明，年、湿季、月、日序列径流均存在 2001 年左右的突变点，径流突变点表现出统一性。通过对不同降雨时间序列趋势和突变检验发现，各时间尺度下降雨都无显著变化趋势和突变(与径流序列一致，分别采用 M-K 趋势检验和 Pettitt 突变检验方法)。因此，初步判定 1986—2015 年径流的变化特征显著受到了城市扩张引起的下垫面变化的影响。

3.3 基于 GAMLSS 模型的不透水率对径流的影响分析

对秦淮河流域不同时间尺度径流序列建立以时间为协变量的非平稳性模型，根据 AIC 值确定各个序列下的最优拟合分布函数。结果表明，日、月径流序列的最佳拟合分布函数以 Logistic 分布为主，而 Weibull 是季、干湿季、年径流序列的最佳拟合函数。尽管各时间尺度径流的最优拟合函数不一致，发现各时间尺度径流序列都可通过 Logistic 拟合，且 AIC 平均值最低，表明对多时间尺度的径流系列 Logistic 是最优拟合分布函数。

为了进一步研究不透水率对径流产生显著影响，以径流量作为常量，对应时间尺度的降水量和不透水率作为解释变量，以 Logistic 分布构建 GAMLSS 模型，经过 AIC 模型对解释变量的筛选。结果表明，日径流的最大值和第 5 百分位以非线性降水量作为最佳解释变量，25，50，75 和 95 百分位都以不透水率作为最佳解释变量。月序列(7 月除外)、季序列、干湿季序列及年序列径流都不能单纯用降水量或不透水率作为解释变量，而是受到气候变化和人类活动共同影响(见图 4)。

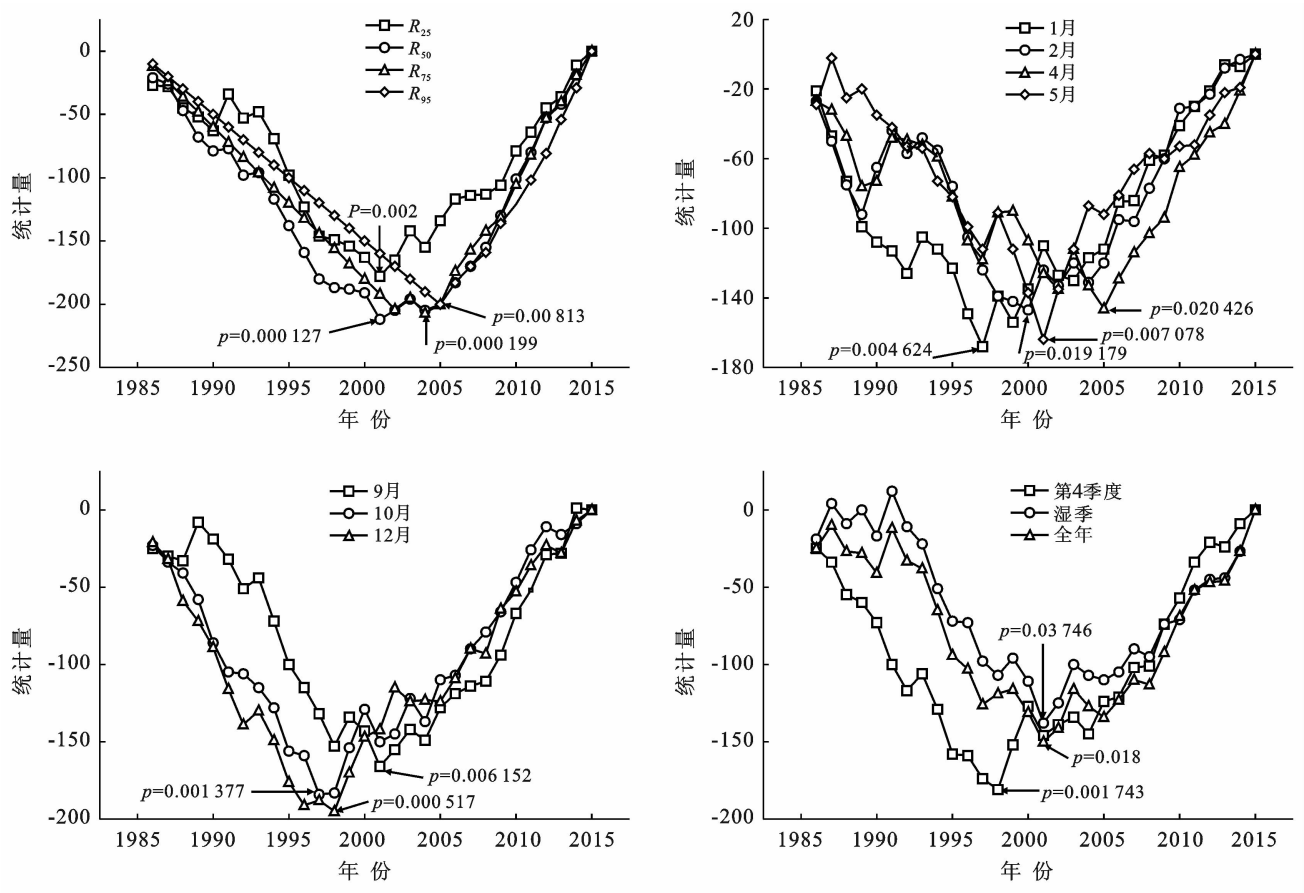


图 3　秦淮河流域 1986—2015 年径流显著突变序列

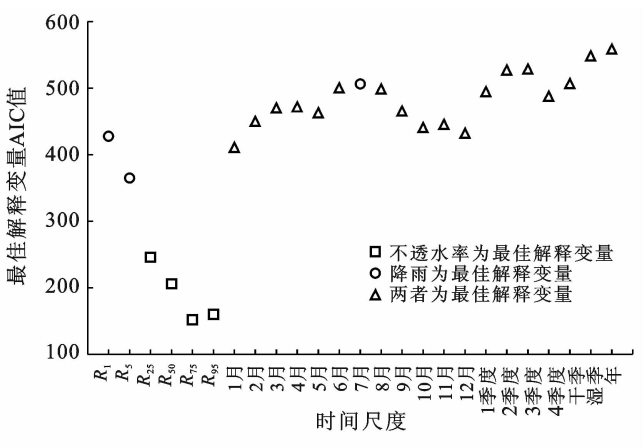


图 4　Logistic 分布下不同时间尺度各解释变量 AIC 值

从日尺度来看,根据 GAMLSS 模型的分析结果,前 5 百分位径流,降雨是唯一解释变量,说明降雨对前 5 百分位的日径流起主要作用;而 25 百分位以下径流,不透水率是唯一解释变量,说明日中小径流主要受不透水率的影响。分析其原因,在中小雨情景,降雨流经透水地表时,经土壤下渗、地面填洼、植物蒸散等作用后,径流量会大幅减少。而流经不透水地表时,由于阻隔作用,导致降雨无法下渗,地下径流减少,地表径流迅速增加;在暴雨情景,由于雨量大且雨速快,透水地表的削弱作用也不如小雨情景时强烈。因此,不透水率的变化对最大日流量和第 5 百分位径流的影响较小,而对中小径流过程产生较大影响。除了日尺度,对于其他同一时间尺度,GAMLSS 模型的分析结果表明,降水和不透水率是共同的解释变量。由于降水在任何尺度上都无明显的增加趋势,不透水率是主要的解释变量。在这些尺度上,一般是流量大的序列受到不透水率的影响较小,而流量小的序列受到不透水率的影响较大。如在月尺度径流序列,流量大的序列如 3 月和 6 月受不透水率的影响较小,流量最大值 7 月的月流量约占总径流量的 25%,结果显示降雨是唯一解释变量。而流量小的序列如 1 月,2 月,4 月,5 月,9 月,10 月,12 月受不透水率的影响较大。如在季尺度序列,流量大的第 1,2 季度受不透水率的影响较小,而流量小的第 4 季度受不透水率的影响较大。秦淮河流域降水季节分配差异明显,径流年内分布差异性较大。在枯水期,受不透水面的影响,蒸发和土壤下渗减少,地面径流增加,地下水补给减少;在汛期,不透水面增加的径流量相对降雨的产流量要少的多,此外水利工程措施的调控也会对汛期的径流产生影响。因此,不透水面对流量大的序列影响较小。从不同时间尺度来看,通常情况下随着时间尺度增大,不透水面的影响增强。例如,第 1,2 季度受

到不透水率的影响小，干湿季受到不透水率的影响变大，年尺度径流受到不透水率的影响最大。证明不透水面对径流的影响有累积效应[36]。通过比较不同时间尺度的径流变化，对于完整揭示城市化下的径流变化规律，及阐述不同时间尺度下流域水循环演变机理具有重要意义。

3.4 讨 论

流域内不透水面的扩张使得地表径流增加，地下径流减少，地表与地下水量交换减少，深刻改变地表径流的水循环过程和时空特征，主要表现在城市暴雨洪涝风险增大，枯季径流减少。城市化对水文过程的影响已基本取得一致认识，然而对于更精细尺度的水文机理研究则相对缺乏。本文首先分析了不同时间尺度水文时间序列的变化趋势，其次结合统计模型分析城市化对不同时间尺度径流的影响。研究结果表明城市化对径流的影响程度不应一概而论。从影响的程度来看，不透水面扩张对小洪水的影响最为突出。从相同时间尺度来看，一般是流量小的序列受到不透水面的影响更为突出。对于不同时间尺度，不透水面具有累积效应，随着时间尺度增大，不透水面的影响效应增强。分析城市化对不同时间尺度径流的影响，目的在于更加深入地把握其内在规律，从而为揭示城市化发展对水文过程的影响提供参考价值。代晓颖等[37]对秦淮河流域径流变化归因分析的研究结果表明，城市不透水面扩张对径流增加的贡献率为 115.5%，是影响年径流变化的主导因素。刘珍环等[38]以深圳市为研究区，应用 SCS 降雨曲线模型，分析城市不透水面扩展对流域径流量的长期影响。结果表明不透水表面扩展对小雨情景的影响大于暴雨情景，枯水年受不透水表面的影响大于丰水年。占红[39]利用长期水文影响评价模型，分析了不透水面的年际变化对流域径流量的影响，结果表明不透水面扩张对小雨情景时的日径流和枯水年有显著影响。李倩[40]基于 HEC-HMS 模型，探讨了 1986—2009 年秦淮河流域城市化及其空间格局的演变导致的长期水文效应。结果表明随着流域不透水率的增加，枯水年的径流深变化最为显著。上述学者采用概念性模型或物理性模型分析了不透水面变化对流域径流的影响。然而，水文模型结构复杂，尚未能较好表征人类活动对不同水文过程的影响机制，例如人类生活取用水以及洪水管理等在模型中的表达。因此，将水文模型应用于研究城市化流域的水文响应仍存在较多问题需要解决。本文以分析径流系列为出发点，基于统计模型初步揭示了径流变化在不同时间尺度的特征，对基于水文模型的研究有较好的参考价值，可以用于评价强人类活动影响下水文模拟的精度，帮助全面准确地理解城市化水循环演变机理。

4 结 论

(1) 秦淮河流域城市化进程不断加快，不透水率从 1988 年的 3.09%扩展至 2015 年的 24.01%。

(2) 流域径流在不同时间尺度变化特征不同，年径流序列呈显著增加趋势，在 2001 年发生突变。

(3) 不透水面扩张对小洪水的影响较大；对于相同的时间尺度，一般情况下，流量小的序列受不透水面影响较大，而流量大的序列受到影响较小；对不同时间尺度，不透水面具有累积效应，随着时间尺度增大，不透水面的影响增强。未来研究将基于水文模型方法，定量评估气候变化和人类活动对秦淮河流域不同时间尺度径流变化的影响。

[参 考 文 献]

[1] 綦昕瑶，刘贵花，贺志明，等. 东江源寻乌水流域径流变化特征及其原因分析[J]. 江西师范大学学报(自然科学版)，2020，44(1)：89-94.

[2] Miller J D, Kim H, Kjeldsen T R, et al. Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover [J]. Journal of Hydrology, 2014, 515: 59-70.

[3] Delmonte O K, Tomasella J, Del'Arco Sanches L. Spatial-temporal analysis of the climatic and anthropogenic influences on runoff in the Jucu River Basin, Southeastern Brazil [J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(17): 2073-2087.

[4] Piniewski M, Voss F, Bärlund I, et al. Effect of modelling scale on the assessment of climate change impact on river runoff [J]. Hydrological Sciences Journal, 2013, 58(4): 737-754.

[5] 尚星星. 气候与土地利用变化对地表径流的影响研究[D]. 陕西 西安：西北大学，2019.

[6] Xianbang W, Kangning H, Ying L, et al. Estimation of the effects of climate change and human activities on runoff in different time scales in the Beichuan River Basin, China [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2020, 26(1): 103-119.

[7] 周旭. 变化环境下秃尾河流域径流演变规律研究[D]. 陕西 杨凌：西北农林科技大学，2012.

[8] Xie Ping, Wu Ziyi, Sang Yanfang, et al. Evaluation of the significance of abrupt changes in precipitation and runoff process in China [J]. Journal of Hydrology, 2018, 560: 451-460.

[9] 肉孜买买提·阿不来提，穆振侠. 新疆伊犁地区巩乃斯河流域 1972—2015 年气温及降水时间序列的变化特征

及趋势分析[J]. 地下水,2018,40(6):162-165.

[10] 王念,田庆春. 基于 Mann-Kendall 方法的 1954—2015 年临汾市气候变化特征分析[J]. 现代农业科技,2019(13):175-178.

[11] 黄涛,于照玉. 甘肃省兰州市近 40 年降雨特征分析及预测[J]. 环境工程,2017(35):655-659,611.

[12] 李艺珍,岳春芳. 金沟河流域径流极值时间序列平稳性检验[J]. 水电能源科学. 2019,37(10):21-24.

[13] 管晓祥,张建云,鞠琴,等. 多种方法在水文关键要素一致性检验中的比较[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(2):51-56.

[14] 孔波,樊晶晶,黄强. 北洛河流域分期径流变异诊断及成因分析[J]. 水资源保护,2019,35(6):52-57.

[15] 陈立华,刘为福,冷刚,等. 西江干流径流年际及年内变化趋势分析[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(4):74-81.

[16] 陈玫君. 基于 Budyko 假设下的黄土高原典型流域径流变化原因辨析[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2019.

[17] Wang Xiujie, Bernard Engel, Yuan Ximin, et al. Variation analysis of streamflows from 1956 to 2016 along the Yellow River, China [J]. Water, 2018,10(9):1231.

[18] 顾海挺,谢平,雷旭. 东江流域枯水径流变异根本原因分析[J]. 水力发电学报,2016,35(6):20-29.

[19] Hung C J, James L A, Carbone G J, et al. Impacts of combined land-use and climate change on streamflow in two nested catchments in the Southeastern United States [J]. Ecological Engineering, 2020,143:105665.

[20] Lu Jiqiang, Mo Shuhong, Luo Pingping, et al. A quantitative assessment of hydrological responses to climate change and human activities at spatiotemporal within a typical catchment on the Loess Plateau, China [J]. Quaternary International, 2019,527:1-11.

[21] Zhang Yu, Zhong Pingan, Chen Juan, et al. Impacts of climate change and human activities on the Three Gorges reservoir inflow [J]. Water, 2017,9(12):957.

[22] 魏晓婷,黄生志,黄强,等. 定量分解气候变化与人类活动对季节径流变异的贡献率[J]. 水土保持学报,2019,33(6):182-189.

[23] 王少丽,臧敏,王亚娟,等. 降水和下垫面对流域径流量影响的定量研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(6):1-5.

[24] Medeiros E S, Lima R R, Olinda R A, et al. Space-time Kriging of precipitation: Modeling the large-scale variation with model GAMLSS [J]. Water, 2019,11(11):2368.

[25] 张冬冬,鲁帆,周翔南,等. 基于 GAMLSS 模型的大渡河流域极值降水非一致性分析[J]. 水利水电技术,2016,47(5):12-15.

[26] 李凌琪,熊立华,江聪,等. 气温对长江上游巴塘站年径流的影响分析[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(7):1142-1149.

[27] 牛胜利. 城市化空间格局对流域水文的影响分析[D]. 河南 郑州:河南农业大学,2019.

[28] 余琪. 广州市不透水面扩张对地表径流的影响研究[D]. 广东 广州:广州大学,2018.

[29] 林立清. 近 50 年来上海地区不透水面变化的水文效应及水环境阈值效应研究[D]. 上海:上海大学,2014.

[30] 苏贤保. 黄河上游径流复杂性多尺度特征及其驱动机制研究[D]. 甘肃 兰州:兰州大学,2019.

[31] 宋明明,都金康,郑文龙,等. 秦淮河流域近 30 a 不透水面景观格局时空演变研究[J]. 地球信息科学学报,2017,19(2):238-247.

[32] 徐宗学,张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. 地理研究,2006,25(1):27-34.

[33] 孙玉燕. 淮河中上游地表径流时空演变规律及非平稳性诊断研究[D]. 安徽 芜湖:安徽师范大学,2019.

[34] 高洁. 基于 GAMLSS 模型的水文系列非平稳性研究[J]. 水力发电,2019,45(7):1-6.

[35] 张静,陈爽. 近 40 年来蒲河流域径流变化及影响因素分析[J]. 人民珠江,2019,40(4):65-69.

[36] Silva C M, Silva G B L. Cumulative effect of the disconnection of impervious areas within residential lots on runoff generation and temporal patterns in a small urban area [J]. Journal of Environmental Management, 2020,253:109719.

[37] 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[J]. 水土保持研究,2019,26(4):68-73.

[38] 刘珍环,曾祥坤. 深圳市不透水表面扩展对径流量的影响[J]. 水资源保护,2013(4):44-50.

[39] 占红. 城市不透水面的扩张对地表径流量的影响[D]. 黑龙江 哈尔滨:哈尔滨师范大学,2016.

[40] 李倩. 秦淮河流域城市化空间格局变化及其水文效应[D]. 江苏 南京:南京大学,2012.