

# 长江下游秦淮河流域径流变化及影响因素分析

代晓颖, 许有鹏, 林芷欣, 王强, 徐羽, 高斌

(南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023)

**摘要:**为定量分析气候变化和人类活动对流域径流变化的影响,以我国经济高度发展的长江下游秦淮河流域为例,应用累积距平、线性趋势分析等方法,分析了其1987—2015年的水文气象变化趋势;基于水热耦合平衡方程,计算了流域年径流变化的气候弹性系数和下垫面弹性系数,对径流变化进行了定量的归因分析。结果显示:(1)1987—2015年流域年径流呈增加趋势,并在2001年左右发生明显转变,由此将研究期划分为1987—2000年与2001—2015年两个阶段。(2)年降水量多年变化趋势并不明显,年潜在蒸散发总体呈上升趋势。与转变发生前相比,2001—2015年期间年均降水量增加2.42%,年均潜在蒸散发量增加6.24%,二者变化幅度不大,而下垫面参数变化幅度较大。(3)径流对于降水、潜在蒸散发以及下垫面的弹性系数分别为0.69, -0.92, -0.64,气候与下垫面变化对径流增加的贡献率分别为-9.6%, 115.5%,可见人类活动对径流影响更大,同时也存在其他因素对径流变化产生较小影响。

**关键词:**径流变化; 气候与下垫面变化; 水热耦合平衡方程; 贡献率; 秦淮河流域

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0068-06

## Analysis on Variation and Influencing Factors of Runoff in Qinhuaihe River Basin in the Lower Reaches of the Yangtze River

DAI Xiaoying, XU Youpeng, LIN Zhixin, WANG Qiang, XU Yu, GAO Bin

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The Qinhuaihe River Basin is located in the lower reaches of the Yangtze River which is highly developed area in China. In order to quantitatively evaluate the impacts of climate change and human activities on runoff and their contribution rates to runoff, the hydrological and meteorological trends in the Qinhuaihe River Basin from 1987 to 2015 were analyzed by employing the accumulative anomaly and linear trend analysis method. The coupled energy-water balance equation based on the Budyko hypothesis was employed to estimate climate elasticity and landscape elasticity of runoff, which were then used for attribution analysis of runoff change in Qinhuaihe River Basin. The main results were showed as follows: (1) An increasing trend of annual runoff was revealed during the period 1987—2015 in Qinhuaihe River Basin. An abrupt change was identified around the year 2001, the entire period was divided into two parts. (2) The trend of annual precipitation was not obvious, but the annual potential evapotranspiration showed the increasing trend. Compared with the period before the abrupt change, the annual average precipitation increased by 2.42%, the potential evapotranspiration increased by 6.24%, and the landscape parameter decreased by 49.77% during the period 2001—2015. (3) The runoff elasticity to the precipitation, potential evapotranspiration and landscape were 0.69, -0.92 and -0.64, respectively. The contribution rates of the climate change and landscape change were -9.6% and 115.5%, respectively, and the human activities was the main factor that led to the runoff increase. There were other factors that led to the runoff change in Qinhuaihe River Basin.

**Keywords:** runoff change; climate and landscape change; coupled energy-water balance equation; contribution ratio; Qinhuaihe River Basin

在全球变化的大背景下,我国水安全与水资源供应问题越来越突出<sup>[1]</sup>。流域径流变化与日益严峻的旱涝灾害关系密切,认清径流变化的特征与机制对于保证区域水安全具有重要意义。气候变化与人类活动作为影响地表径流的两个重要因素,受到了国内外相关学者的广泛关注<sup>[2-4]</sup>。气候变化通过影响降水、蒸散发等要素,进而改变流域的径流量<sup>[5-6]</sup>。人类活动通过改变土地利用方式、修建水利设施等,对流域径流产生直接或间接的影响<sup>[7-8]</sup>。对流域径流变化进行定量的归因分析将有利于正确认识变化环境下的水文变化特征,并为进一步制定区域洪涝防控政策提供依据。近年来,国内外学者对于分离气候变化与人类活动对径流变化的贡献率展开了许多研究,主要包括水文模型模拟分析以及水文统计分析两大类<sup>[9-12]</sup>。通过 SWAT 等水文模型进行贡献率分析的研究方法对于研究区数据要求较高,双累积曲线、降雨—径流多元线性经验方程等水文统计研究方法赋权过程存在不确定性。

基于水热耦合平衡方程的径流变化归因分析,以降水、潜在蒸散发以及下垫面变化为主要分析对象,从水量平衡与热量平衡的角度,将三者对流域径流变化的贡献率进行定量分离<sup>[13]</sup>。相关学者运用该方法在加拿大、中国等地区流域的径流变化归因分析中已取得较好的研究结果<sup>[14-15]</sup>。秦淮河流域位于我国城市化发展迅速的长江下游三角洲地区,是江苏省南京市母亲河,其径流变化对南京防洪减灾、水生态环境保护具有重要意义。基于此,本文采用基于水热耦合平衡方程的方法,对秦淮河流域 1987—2015 年的径流变化进行归因分析,以期为该流域水资源可持续利用及洪涝防控提供科学依据。

## 1 研究区概况

秦淮河流域地处长江下游江苏省西南部,包括南京市市区的一部分及江宁区、溧水区和句容市的大部分。秦淮河有溧水河、句容河两源,两源在江宁区西北村汇合为秦淮河干流,从东水关流入南京城。秦淮河下游与南京护城河合一,自东向西横贯市区南部至西水关流出汇入长江。秦淮河干流长约 34 km,流域集水面积约 2 631 km<sup>2</sup>。秦淮河流域是一典型山间盆地,沿河两岸是低洼圩区,地面高程 6~8 m,圩区后部是丘陵山区,地面高程 300 m 以下。秦淮河中下游地区由于地势平坦,平原区洪涝水相互交织,外江洪水顶托、内涝难排,共同导致该平原区洪涝灾害风险高、防汛压力大。随着近年来城市化进程加快,流域中下游的洪涝灾害风险显著增大,严重威胁人民生命和财产安全。

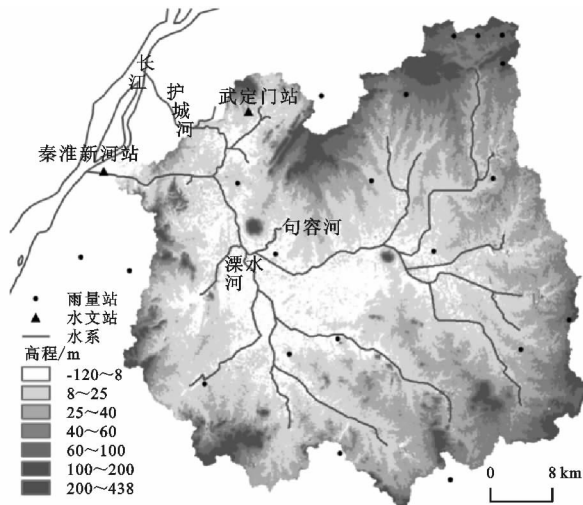


图1 秦淮河流域位置、地形、水系及站点分布

## 2 数据和方法

### 2.1 数据来源

本文选用了秦淮河流域内 1987—2015 年期间的降水数据、径流数据、潜在蒸散发数据、下垫面数据以及社会经济人口数据。降水数据来源于研究区内 22 个雨量站的实测资料,通过泰森多边形法求得面降水量数据。径流数据取自水文年鉴中流域出口武定门站、秦淮新河站的日径流数据,潜在蒸散发数据来源于南京国家气象站相关气象数据(平均风速、日照时数、平均本站气压、平均气温、日最高气温、日最低气温、平均相对湿度),通过采用联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 公式<sup>[16]</sup>求得。土地利用数据来源于 Landsat 卫星遥感影像解译结果,植被覆盖数据采用 NDVI 指数表示,选取代表年份植被生长季的 Landsat 卫星遥感影像,在 Erdas Imagine 2014 软件中处理计算所得。江苏省经济及人口数据来源于 2016 年《江苏统计年鉴》。

### 2.2 研究方法

2.2.1 水文气象分析 采用累积距平法对径流深进行初步分析<sup>[17]</sup>,累积距平法可以通过观察径流序列差积曲线的变化来判断数据点的离散程度和变化趋势,并找到径流序列的转变年份。同时,采取线性趋势分析等方法对各项水文气象要素变化趋势进行分析。

2.2.2 径流变化归因分析 Budyko<sup>[18]</sup>认为流域内长期年均实际蒸散发量可用于描述其多年能量状况,年均降水量可用于衡量其多年水分状况,因此二者的比值( $E/P$ )主要由流域内长期的水热耦合平衡所决定,而该比值可由流域内长期年均降水量、年均潜在蒸散发量来表示。该公式后来被相关学者不断发展为 Choudhury-Yang 公式<sup>[19-21]</sup>,表达式如下:

$$E = \frac{PE_0}{(P^n + E_0^n)^{\frac{1}{n}}} \quad (1)$$

式中:  $E$  为年平均实际蒸散发量;  $P$  为年平均降水量;  $E_0$  为年平均潜在蒸散发量;  $n$  为反映流域下垫面特征的参数(简称下垫面参数), 流域下垫面特征包括地形、土壤和植被等, 采用流域多年平均的蒸散发( $E = P - R$ ), 潜在蒸散发( $E_0$ )和降水( $P$ ), 由公式(1)可以反算出下垫面参数  $n$ 。

公式(1)中  $P, E_0, n$  是相互独立的变量, 结合流域长期平均的水量平衡方程( $P = E + R$ )以及 Schaaake 对弹性系数的定义<sup>[22]</sup>, 年径流深  $R$  的变化可以表示为以下全微分形式:

$$\frac{dR}{R} = \epsilon_P \frac{dP}{P} + \epsilon_{E_0} \frac{dE_0}{E_0} + \epsilon_n \frac{dn}{n} \quad (2)$$

依据水热耦合平衡方程的微分形式, 可以求出径流的降水弹性系数( $\epsilon_P$ )、径流的潜在蒸散发弹性系数( $\epsilon_{E_0}$ )以及径流的下垫面弹性系数( $\epsilon_n$ ), 令  $\varphi = E_0/P$ , 计算公式如下<sup>[23]</sup>:

$$\epsilon_P = \frac{1 - (\frac{\varphi^n}{1 + \varphi^n})^{\frac{1}{n+1}}}{1 - (\frac{\varphi^n}{1 + \varphi^n})^{\frac{1}{n}}} \quad (3)$$

$$\epsilon_{E_0} = \frac{1}{1 + \varphi^n} \times \frac{1}{1 - (\frac{1 + \varphi^n}{\varphi^n})^{\frac{1}{n}}} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_n &= \frac{A - B}{[1 + (P/E_0)^n]^{\frac{1}{n}} - 1} \\ A &= \frac{P^n \ln P + E_0^n \ln E_0}{P^n + E_0^n} \\ B &= \frac{\ln(P + E_0^n)}{n} \end{aligned} \quad (5)$$

根据转变年份将研究时间划分为两个阶段, 从阶段 1 到阶段 2 年径流的变化可以用两个阶段的多年平均径流深之差( $\Delta R$ )来表示。径流深的变化由气候变化( $\Delta R_C$ )及流域下垫面变化( $\Delta R_n$ )两方面因素导致, 其中气候变化的影响包括降水变化引起的径流变化( $\Delta R_P$ )和潜在蒸散发变化引起的径流变化( $\Delta R_{E_0}$ )两部分。

根据径流的气候弹性系数( $\epsilon_P$ 和 $\epsilon_{E_0}$ )和下垫面系数( $\epsilon_n$ ), 可以分别估算出降水、潜在蒸散发和下垫面变化引起的径流变化, 公式如下:

$$\begin{aligned} \Delta R_P &= \epsilon_P \frac{R}{P} \Delta P \\ \Delta R_{E_0} &= \epsilon_{E_0} \frac{R}{E_0} \Delta E_0 \\ \Delta R_n &= \epsilon_n \frac{R}{n} \Delta n \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\Delta P, \Delta E_0, \Delta n$  分别表示两个阶段的多年平均降水量、潜在蒸散发量和下垫面参数的差值。阶段 1 和阶段 2 的流域下垫面条件, 可以分别基于两个阶段的

多年平均  $P, E_0$  和  $E$  由公式(1)反算得到。

由降水、潜在蒸散发和下垫面(参数  $n$ )变化引起的径流变化可计算出三者对于流域径流变化的贡献率, 公式如下:

$$\begin{aligned} \eta_P &= \frac{\Delta R_P}{\Delta R} \times 100\% \\ \eta_{E_0} &= \frac{\Delta R_{E_0}}{\Delta R} \times 100\% \\ \eta_n &= \frac{\Delta R_n}{\Delta R} \times 100\% \end{aligned} \quad (7)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 径流深变化趋势及转变年份检验

从年径流深累积距平变化曲线(图 2A)可以看出, 1987—2000 年径流深累积距平总体呈现较为剧烈的波动下降趋势, 2001—2015 年距平呈现相对平稳的波动上升趋势, 因此可以判断流域径流在 2001 年左右发生明显转变。根据转变年份, 将研究的时间序列划分为两个阶段, 1987—2000 年为阶段 1, 2001—2015 年为阶段 2。

如图 2B 所示, 秦淮河流域年径流深曲线与其 5 年滑动平均曲线均显示, 流域的年径流变化并不稳定, 总体呈上升的趋势, 并伴随一定幅度的震荡, 1991 年年径流深最大。在 1987—2015 年期间, 年径流深以 113.82 mm/10 a 的速率递增。与 2001 年前相比, 转变发生后年均径流深增加 52.21%, 可见秦淮河流域的径流深产生了较为显著的增加, 区域洪涝安全的潜在威胁日益加剧。

### 3.2 降水及潜在蒸散发变化趋势分析

气候变化对水循环过程产生直接影响, 是改变流域径流的主要因素之一。一般来说, 径流量随着降水量的增加而增加, 随着蒸发量的增加而减少。由图 3A 可知, 秦淮河流域降水量在 1987—1996 年波动幅度明显, 在 1997—2015 年波动较为平稳, 而线性趋势分析显示其多年间变化并不明显。年降水量在 1991 年达到峰值, 与径流深峰值相对应。1987—2000 年降水呈减少趋势, 与累积距平的变化特征相一致。潜在蒸散发变化曲线及其 5 年滑动平均曲线显示(图 3B), 潜在蒸散发在 1987—2005 年变化幅度较小, 较为平稳, 而 2006 年后增加幅度显著。在 1987—2015 年期间, 潜在蒸散发总体呈现上升趋势。与 2001 年前相比, 转变发生后年均降水增加 2.42%, 潜在蒸散发增加 6.24%。

### 3.3 径流变化的归因结果

根据计算, 1987—2015 年秦淮河流域降水、潜在蒸散发以及下垫面的弹性系数见表 1。当年降水量

增加 1% 时, 秦淮河流域的年径流深增加幅度为 0.69%; 当年潜在蒸散发量增加 1% 时, 流域的年径流深将减小 0.92%; 当流域下垫面参数增加 1% 时,

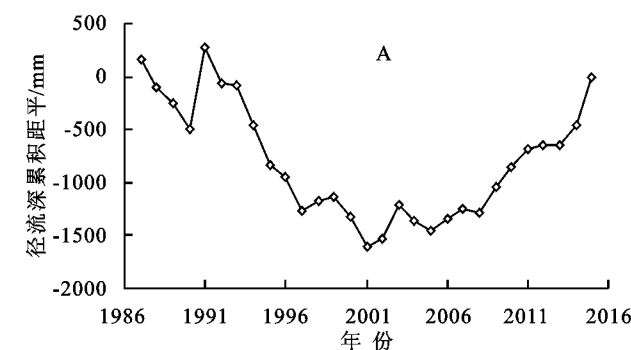


图 2 秦淮河流域径流深累积距平及年际变化

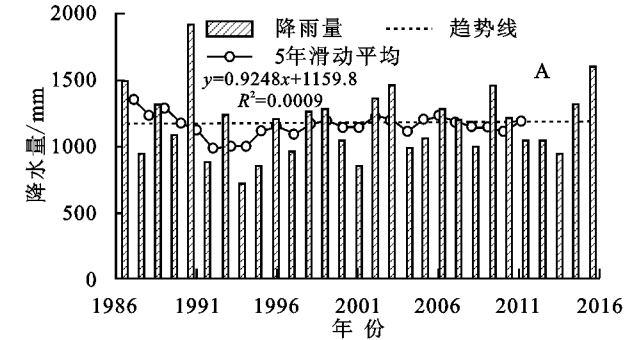


图 3 秦淮河流域降雨及潜在蒸散发年际变化

表 1 秦淮河流域降水、潜在蒸散发、 下垫面弹性系数及其对径流变化贡献率			
变化要素	降水	潜在蒸散发	下垫面
弹性系数	0.69	-0.92	-0.64
径流变化贡献率/%	4.00	-13.60	115.50

由表 1 可知, 降水减少、潜在蒸散发增大以及下垫面变化对径流增加的贡献率分别为 4.0%, -13.6%, 115.5%。尽管秦淮河流域径流对降水及潜在蒸散发变化更为敏感, 但较之 2001 年前, 转变发生后时段内二者的变化幅度较小, 根据计算公式(6), 由降水及潜在蒸散发变化引起的径流减少量较少, 因此气候变化总体对径流变化的贡献率较低。而 2001 年后下垫面参数  $n$  变化幅度达 -49.77%, 其对流域径流变化贡献率高达 115.5%。总体而言, 气候变化与下垫面变化对于径流减少的贡献率分别为 -9.6%, 115.5%, 下垫面变化对径流变化的影响大于气候变化, 这与 Bian 等<sup>[24]</sup>的研究结果一致。

## 4 讨论

### 4.1 气候变化对径流变化的影响

1987—2015 年期间秦淮河流域降水与径流年际变化基本呈现相同的规律, 流域径流对于降水响应较好。研究区径流发生明显转变后, 年均降水增加 28.09 mm, 增加幅度较小, 对于流域径流增加影响为正。

流域年径流深将减小 0.64%。可见在秦淮河流域, 径流变化对于潜在蒸散发最为敏感, 对降水敏感度其次, 下垫面最低。

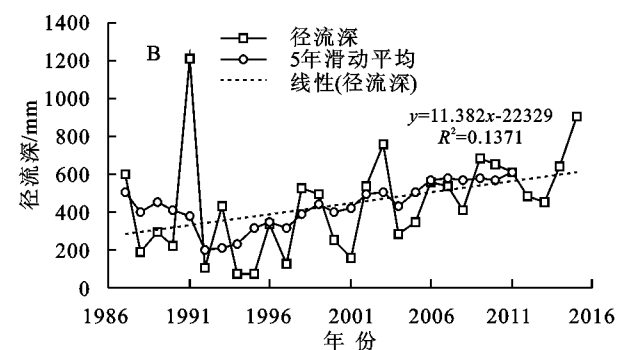


图 2 秦淮河流域径流深累积距平及年际变化

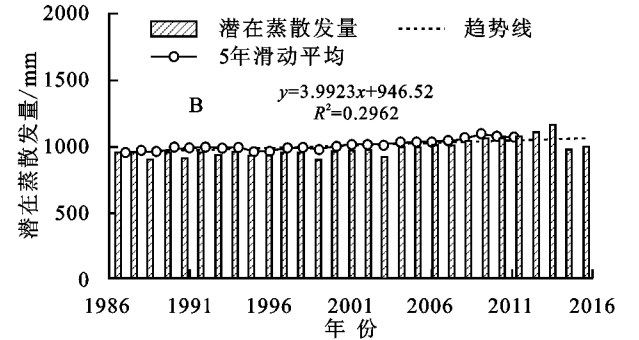


图 3 秦淮河流域降雨及潜在蒸散发年际变化

潜在蒸散发由气温、日照、相对湿度等多个气象要素所决定, 反映流域综合的气候特征。2001 年后流域内年均潜在蒸散发量增加 60.85 mm, 变化幅度较为明显, 对于径流增加产生反向影响。

秦淮河流域与太湖流域在近 30 年间的降水量与径流量变化基本一致, 呈一定程度的上升<sup>[25]</sup>。流域降水变化直接影响径流, 因此降水与径流年际变化往往呈现一致的变化特征, 流域径流对降水变化较为敏感<sup>[26]</sup>。尽管目前有“蒸发悖论”现象的存在, 但许多研究认为流域内潜在蒸散发的增加具有减流的作用<sup>[27-28]</sup>, 使得其对流域径流增加的贡献率为负。1987—2015 年秦淮河流域径流变化对气候变化更为敏感, 但其本身变化幅度较小, 因此总体对径流变化的影响并不大, 在太湖上游西苕溪流域<sup>[29]</sup>的相关研究中有类似结论。

### 4.2 下垫面变化对径流变化的影响

通常认为流域下垫面条件中的地形、地质和土壤条件相对稳定, 因此下垫面参数  $n$  的变化主要由土地利用变化/植被覆盖变化导致。一般认为  $n$  值的增加是由流域内植被覆盖的提高导致的<sup>[30]</sup>, 秦淮河流域  $n$  值在 2001 年后下降了 49.77%, 可以认为这主要是因为流域内植被覆盖降低。秦淮河流域所处的江苏省南京市以及句容市, 位于中国东部城市化高速发展

地区。江苏省 2015 年国民经济占全国的 10.4%，是我国第二大经济强省，全省城镇人口占总人口 66.4%，城市化率较高。近年来伴随着经济的高速发展，区域内下垫面变化显著。

南京市近 30 年来，建成区面积扩大了 6 倍多，2000 年之后各时段耕地和城市建设用地年均总变化量远远高于 2000 年之前<sup>[31]</sup>，这与本文所判断的径流转变年份相接近。如图 4 所示，1987—2013 年期间，流域内建设用地面积增幅较大，增加了 345.88%；耕地面积持续下降，降幅为 14.94%。流域内林地面积经历先增多后减小过程，总体呈下降趋势，水域与裸地面积所占比重一直较小。流域内自然下垫面被不透水面取代，使得降水后流域地表自然的截留、入渗、填注等功能减弱，从而导致地表径流量增大，汇流时间缩短，洪水发生频率增多，洪涝风险增大<sup>[32-33]</sup>。

植被的冠层、根系以及其枯枝落叶能通过截留、增大土壤蓄渗能力、减缓坡面漫流等而起到减少径流

的作用。良好的植被覆盖度将有利于减少流域的产流量<sup>[34]</sup>，从而降低流域的洪涝风险。由图 5 可知，伴随着城市化进程的发展，建设用地规模的不断扩张，秦淮河流域植被覆盖度在近 30 年来明显降低，尤其是流域下游地区，处于南京市市辖区，下垫面变化显著。秦淮河流域内植被对于径流的调节功能降低，使得其径流增加，从而导致洪涝风险的加剧。

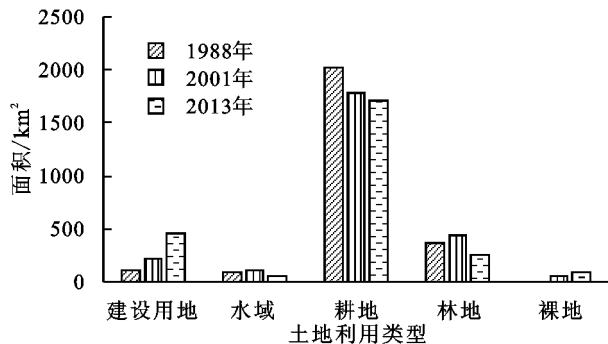


图 4 秦淮河流域土地利用类型变化

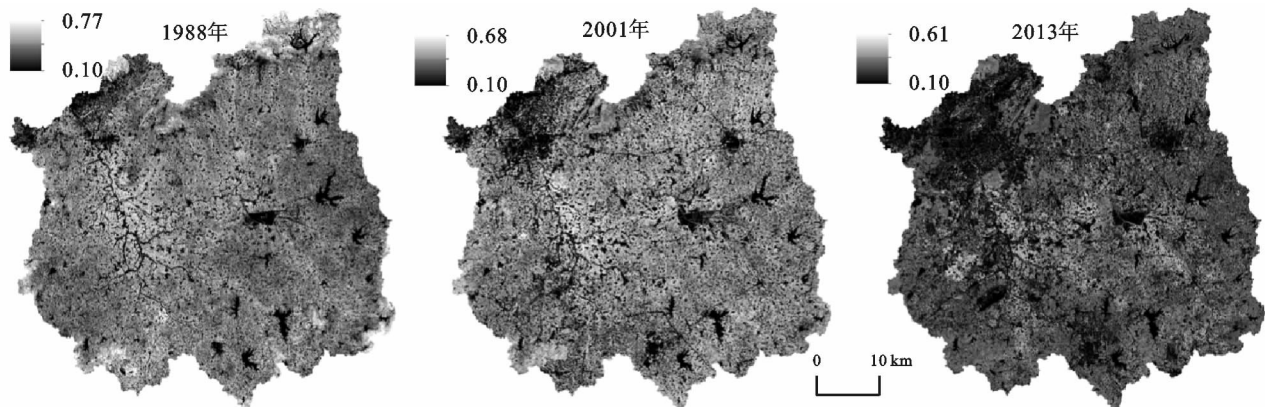


图 5 秦淮河流域植被覆盖变化

## 5 结论

(1) 1987—2015 年流域年径流总体呈上升的趋势，并伴随一定幅度的震荡。径流深在 2001 年左右发生明显转变，以此将时间序列划分为两个阶段，2001 年后，流域年均径流深增加约 52.21%。秦淮河流域的径流深产生了较为显著的增加，对于区域洪涝安全的威胁日益加剧。

(2) 年降水量多年间变化趋势并不明显，年潜在蒸散发量总体呈现上升趋势。与转变发生前相比，2001 年后年平均降水增加 2.42%，潜在蒸散发增加 6.24%，下垫面参数减小 49.77%。总体上，1987—2015 年秦淮河流域气候变化幅度小于下垫面变化幅度。

(3) 径流深对于降水、潜在蒸散发以及下垫面的弹性系数分别为 0.69，-0.92，-0.64，径流变化对于气候变化更加敏感。气候变化与下垫面变化对径流深增加的贡献率分别为 -9.6%，115.5%，城市化等人类活动导致的下垫面变化为影响径流变化的主

要因素。建议城市发展采取低影响开发模式。

基于水热耦合平衡方程的径流归因方法，仅考虑了降水、潜在蒸散发以及下垫面变化这 3 个主要因素对流域径流量的变化，而实际中还存在其他影响较小的因素，包括流域内人民生活取用水的变化等。因此，三者的贡献率之和并不等于 100%，在海河流域的径流变化分析中也有类似结论<sup>[22]</sup>。对于其他因素对流域径流变化的影响，在今后的研究中还有待进一步分析。

### 参考文献：

- [1] 夏军, 石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 292-301.
- [2] 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[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790.
- [3] 李峰平, 章光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. 地理科学, 2013, 33(4): 457-464.
- [4] Guzha A C, Rufino M C, Okoth S, et al. Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and

- low flows: Evidence from East Africa[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2018,15:49-67.
- [5] 王国庆,张建云,刘九夫,等. 中国不同气候区河川径流对气候变化的敏感性[J]. *水科学进展*, 2011,22(3):307-314.
- [6] 李云良,张奇,李相虎,等. 鄱阳湖流域水文效应对气候变化的响应[J]. *长江流域资源与环境*, 2013,22(10):1339-1347.
- [7] 郝振纯,苏振宽. 土地利用变化对海河流域典型区域的径流影响[J]. *水科学进展*, 2015,26(4):491-499.
- [8] 张正浩,张强,邓晓宇,等. 东江流域水利工程对流域地表水文过程影响模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2015,30(4):684-695.
- [9] 夏智宏,刘敏,王苗,等. 1990s 以来气候变化和人类活动对洪湖流域径流影响的定量辨识[J]. *湖泊科学*, 2014,26(4):515-521.
- [10] Legesse D, Vallet-Coulomb C, Gasse F. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: case study South Central Ethiopia[J]. *Journal of Hydrology*, 2003,275(1/2):67-85.
- [11] 代稳,吕殿青,李景保,等. 气候变化和人类活动对长江中游径流量变化影响分析[J]. *冰川冻土*, 2016,38(2):488-497.
- [12] 李志,刘文兆,郑粉莉,等. 黄土塬区气候变化和人类活动对径流的影响[J]. *生态学报*, 2009,30(9):2379-2386.
- [13] Ning T, Li Z, Liu W. Separating the impacts of climate change and land surface alteration on runoff reduction in the Jing River catchment of China[J]. *Catena*, 2016,147:80-86.
- [14] Tan X, Gan T Y. Contribution of human and climate change impacts to changes in streamflow of Canada[J]. *Scientific Reports*, 2015,5:DOI:10.1038/srep17767.
- [15] 张树磊,杨大文,杨汉波,等. 1960—2010 年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. *水科学进展*, 2015,26(5):605-613.
- [16] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome: Fao Irrigation and Drainage Paper, 1998.
- [17] Ran L S, Wang S J, Fan X L. Channel change at Toudaoguai station and its responses to the operation of upstream reservoirs in the upper Yellow River[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010,20(2):231-247.
- [18] Budyko M I. *Climate and Life*[M]. San Diego, USA: Academic Press, 1974.
- [19] Choudhury B J. Evaluation of an equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. *Journal of Hydrology*, 1999,216(1/2):99-110.
- [20] Pike J G. The estimation of annual runoff from meteorological data in atropical climate[J]. *Journal of Hydrology*, 1964,2(2):116-123.
- [21] Yang H B, Yang D W, Lei Z D, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation[J]. *Water Resource Research*, 2008,44(3):893-897.
- [22] Schaake J C. From Climate to Flow, in *Climate Change and US Water Resources*[M]. New York: John Wiley, 1990.
- [23] Xu X, Yang D, Yang H, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,510:530-540.
- [24] Bian G, Du J, Song M, et al. A procedure for quantifying runoff response to spatial and temporal changes of impervious surface in Qinhuai River basin of southeastern China[J]. *Catena*, 2017,157:268-278.
- [25] 刘兆飞,王翊晨,姚治君,等. 太湖流域降水、气温与径流变化趋势及周期分析[J]. *自然资源学报*, 2011,26(9):1575-1584.
- [26] 胡珊珊,郑红星,刘昌明,等. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J]. *地理学报*, 2012,67(1):62-70.
- [27] 程俊翔,徐力刚,姜加虎,等. 洞庭湖流域径流量对气候变化和人类活动的响应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016,35(11):2146-2153.
- [28] 张喜凤. 黑河上游气候变化对出山口径流的驱动分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2014,23(4):542-548.
- [29] 代晓颖,许有鹏,林芷欣,等. 太湖西苕溪流域径流变化归因分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2018,27(6):1279-1286.
- [30] Yang D W, Shao W W, Yeh P J F, et al. Impact of vegetation coverage on regional water balance in the nonhumid regions of China [J]. *Water Resources Research*, 2009,45(7):450-455.
- [31] 乔伟峰,毛广雄,王亚华,等. 近 32 年来南京城市扩展与土地利用演变研究[J]. *地球信息科学学报*, 2016,18(2):200-209.
- [32] Hawley R J, Bledsoe B P. How do flow peaks and durations change in suburbanizing semi-arid watersheds: A southern California case study[J]. *Journal of Hydrology*, 2011,405(1/2):69-82.
- [33] 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.
- [34] Kim H W, Kim J H, Li W, et al. Exploring the impact of green space health on runoff reduction using NDVI[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017,28:81-87.