

新安江上游流域径流变化特征与归因分析

黄蓉^{1,2}, 张建梅^{1,2}, 林依雪^{1,2}, 卜添荟^{1,2}, 王鑫^{1,2}, 薛紫月^{1,2},
李艳忠^{1,2}, 马燮钊², 于志国², 白鹏³

(1. 南京信息工程大学大气科学与环境气象国家级实验教学示范中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院, 南京 210044; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 开展变化环境下新安江上游流域径流变化及其归因的研究, 有助于理解湿润区水循环过程对气候变化和人类活动的响应机制。利用实测径流、气象资料和遥感植被指数(NDVI)数据, 基于布迪克假设框架的弹性系数法, 分析了新安江上游降水、潜在蒸散发(ET_0)和植被变化对径流的影响。结果表明: (1) 实测径流序列转折点发生在1999年左右。2000-2015年径流深较1983-1999年下降了281 mm, 相对变化率为20.8%, 且21世纪初期径流下降尤为显著。(2) 2000-2015年下垫面参数 n 较1983-1999年增加了52.5%, 植被变化对径流影响显著增强。径流对气候变化更加敏感, 且对降水敏感性超过潜在蒸散发。(3) 气候变化是径流变化的主导因素, 其次为植被变化。气候变化和植被变化分别导致径流深下降了145.37 mm和140.96 mm, 贡献率分别为50.77%和49.23%。NDVI在2000年后增加显著($P < 0.001$), 植被变化的水文效应超过了降水和潜在蒸散发, 未来长期的植被生态水文效应研究仍需进一步加强。

关键词: 径流; 植被变化; 气候变化; 弹性系数; 布迪克理论; 新安江上游

受气候变化和人类活动强烈影响的变化环境, 可直接作用于陆表过程^[1-2], 改变流域产汇流机制, 并深刻地影响水循环过程^[3-4]。径流变化作为水循环研究的核心内容之一^[5], 对气候变化和人类活动尤其敏感^[6-7]。其中, 气候变化通过降水、温度、风速、辐射等气象要素来改变水文过程, 进而影响河川径流量^[8]。人类干扰主要通过水库兴建^[9]、农业灌溉^[6]、城市扩张^[10]和生态恢复(下垫面变化)^[11]等方式影响水文过程。分析径流变化规律, 并定量区分人类活动干扰和气候变异对径流的影响, 对深刻理解水循环过程和产流机制, 以及改善流域水资源管理措施具有理论和实践意义。

定量区分气候和人类活动对径流影响的方法较多^[12], 如水文模型法^[13], 弹性系数法^[14], 流域对比分析法^[15]等。其中, 基于布迪克假设框架的弹性系数法可有效地区分人类活动和气候变化对径流的敏感性和贡献量, 并已广泛应用于径流序列变异以及归因分析的研究中^[14-17]。Zheng等^[18]通过弹性系数法在高寒区(黄河源)分析了径流变异性, 发现土地利用和气候对径流变化的贡献率分别为70%和30%; Li等^[19]利用基于Choudhury-Yang公式和弹性系数法, 分析了半干旱区(黄河中游)的12个流域的径流变化, 发现植被变化成为径流下降的主导因素。Liu等^[20]利用6种布迪克假设的公式和弹性系数, 分析了半湿润区(汉江上游)入库流量变化, 发现气候变化为导致入库流量下降的主要因

收稿日期: 2018-11-17; 修订日期: 2019-05-05

基金项目: 南京信息工程大学地球科学野外科学考察项目(YWKC2018A09); 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目; 国家自然科学基金项目(41701019); 南京信息工程大学人才启动项目(2017r069); 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室开放基金项目(2017A004)

作者简介: 黄蓉(1997-), 女, 四川成都人, 硕士, 主要从事水文气象研究。E-mail: 1403880031@qq.com

通讯作者: 李艳忠(1984-), 男, 山东菏泽人, 讲师, 主要从事植被变化对水热平衡研究。E-mail: liyz_egi@163.com

素,贡献率为84.1%~90.1%。然而,在变化环境下,典型湿润区径流的变化及其驱动因素研究有待进一步加强。

新安江上游流域多年降水量达到1800 mm左右^[21],属于典型湿润区。自上世纪70年代开始,该区域山区林地实施分包到农户,造成林地大面积被砍伐,森林覆盖率下降^[22]。2000年以来,随着经济快速发展和城市化进程的不断推进^[23],农村大部分青壮年劳动力转移到了城市,农田弃耕后转为草地或灌丛。此外,农村生活方式的改变,如农村能源从薪柴转变为煤炭、电力等,曾经的薪柴砍伐和坡地耕种等人类活动显著减少,人类活动对植被的干扰减弱,植被得到了显著恢复^[24],使得林地面积得以逐渐增加。针对植被的生态水文效应,学者在高寒区、半干旱区和半湿润区进行了诸多报道^[18-20]。然而,在典型湿润区,径流对植被变化的响应研究报道较少。近些年,该流域径流对植被变化的敏感性是否发生变化?植被对径流变化的贡献率有多少?这些问题亟待回答。此外,据政府间气候变化专门委员会第五次评估报告(IPCC5)指出,1983-2012年可能是过去1400年中全球最暖的30年^[25]。中国气候也发生显著变化,近20年是20世纪以来最暖的时期^[26],其中2007年、2015年和2017年是1951年以来温度最高的三年^[27]。2000-2010年中国降水量总体偏少,2012年后则持续增加^[26]。那么,在这种气候急剧变化的情况下,新安江上游的径流如何响应?造成径流变化的主要驱动因素是什么?贡献率多少?这些问题的揭示将有助于理解植被和气候变化水文效应的地理分异性。此外,新安江上游作为千岛湖生态保护区的主要水源区^[21],研究其径流变化与归因分析对下游的水资源可持续开发和利用具有重要现实意义。

基于此,本文选择新安江上游为研究区,(1)分析1983-2015年径流序列的变化规律,检测突变点发生的时间;(2)阐明径流对植被和气候变化的敏感性响应差异;(3)揭示控制径流变化的主要因素,以及量化各要素对径流变化的贡献。该研究可作为人类活动和气候变化径流响应的地理分异性的案例,并为新安江流域水资源保护、规划和管理工作提供科学指导和支撑。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

新安江上游流域集水区面积约2670 km²,包括率水和横江两大支流(图1)。其中,率水为新安江的主源,发源于休宁县股尖,流域面积约为1522 km²,占研究区的57%。横江发源于黟县的白顶山,流域面积约为997 km²,占研究区的37%^[28-29]。该流域地势由西南和西北向东倾斜,海拔范围在115~1619 m之间。研究区属于亚热带湿润季风气候,多年平均年气温约16.2℃,多年平均降水量约1830 mm,且主要集中在6、7月份。

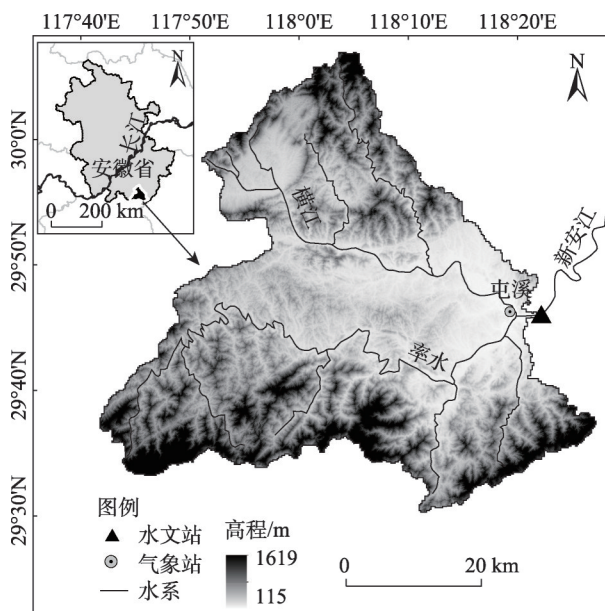


图1 研究区示意

Fig. 1 Location of the study area (upper Xin'an River Basin)

1.2 数据来源

径流数据选自国家水文年鉴整编逐月径流量资料,根据流域集水面积计算出年径流深。全国常规逐日气象数据来源于中国气象局国家气象信息中心 (<http://data.cma.cn/>),包括降水、温度、风速和水汽压等要素。归一化植被指数数据(NDVI)来自马里兰大学数据共享中心 (<http://www.landcover.org/data/>),所有数据的时间跨度选取1983-2015年。30 m分辨率的DEM数据来自地理数据云共享网 (<http://www.gscloud.cn/>),用于提供研究区地形空间分布信息(图1)。

1.3 研究方法

1.3.1 潜在蒸散发

潜在蒸散发(ET_0)采用FAO参考作物蒸散发^[30]计算方法获取:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 VPD}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 为日潜在蒸散发($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); Δ 为温度—饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n 为地表净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); γ 为干湿球常数($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); T_a 为2 m高度平均日气温($^\circ\text{C}$); u_2 为2 m高度风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); VPD 为水汽压差(kPa)。气象站点年潜在蒸散发通过日值累计获取。

1.3.2 统计方法

新安江上游径流序列的突变点通过非参数Mann-Kendall检测^[31],由于该方法对非正态分布的数据检测性能良好,已广泛应用到水文气象序列的变化检测中^[32-33]。变化趋势检验通过Mann-Kendal的Z统计量表征,Z为 ± 1.64 、 ± 2.58 和 ± 3.29 对应显著性水平 $P=0.1$ 、 0.01 和 0.001 ^[19,34]。借助ArcGIS 12.2的空间插值工具,对全国756个气象站降水、潜在蒸散发进行空间插值,并统计出流域均值。

1.3.3 弹性系数与贡献率计算

弹性系数指因变量变化率与自变量变化率的比值,作为因变量对自变量的敏感性程度^[19-20]。径流量对其他因素的弹性可以表达为:

$$E_x = \lim_{\Delta x/x} \left[\frac{\Delta Q/Q}{\Delta x/x} \right] = \frac{\partial Q}{\partial x} \times \frac{x}{Q} \quad (2)$$

式中: E_x 为弹性系数; Q 为径流量(mm); x 为特定的因素,如降水、潜在蒸散发和植被等。当 $E_x > 0$ 时,表明径流 Q 随自变量 x 增加而增加,反之亦然。 E_x 的绝对值越大,说明敏感性越强。

对于一个闭合流域而言,实际蒸散发 ET_a 可以通过水量平衡方程进行估算:

$$ET_a = P - Q - \Delta S \quad (3)$$

式中: ET_a 为实际蒸散发(mm); P 为降水量(mm); ΔS 为土壤水储量变化(mm)。较长时间尺度(10年以上)而言,其土壤水储量变化认为不变(即 $\Delta S \approx 0$),式(3)可简化为:

$$ET_a = P - Q \quad (4)$$

此外,根据布迪克理论假设,在一定的气候和植被条件下,流域长期的水文气候特征是符合水分和能量平衡原理,长时间尺度实际蒸散发可通过布迪克模型估算,其中较为广泛使用的模型为Choudhury-Yang^[19,35]:

$$ET_a = \frac{P \cdot ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \quad (5)$$

式中： n 为反映流域下垫面特征的参数，包括地貌、土壤和植被。2018年7月笔者对流域综合考察，了解到该流域的地貌、土壤等要素在研究时段并未发生明显变化，且无跨流域调水和大规模取用水活动。位于横江支流上游的东方红水库于1970年建成蓄水，主要用于防洪和发电，且库容不大，对年际径流变化影响很小。故而，流域下垫面参数 n 的变化可认为由植被变化所引起，参数 n 可由式（4）、式（5）联合求得。 n 值越大，表明植被对径流的影响程度越大。

由式（4）、式（5）联立可推出：

$$Q = P - \frac{P \cdot ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \quad (6)$$

式中：变量 P 、 ET_0 和 n 假定是相互独立，结合式（2），年径流变化 ΔQ 可看做三个变量贡献之和，全微分形式表达：

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \frac{\partial f}{\partial P} dP + \frac{\partial f}{\partial ET_0} dET_0 + \frac{\partial f}{\partial n} dn \\ &= \left[\frac{\partial Q}{\partial P} \frac{P}{Q} \right] \frac{\Delta P}{P} Q + \left[\frac{\partial Q}{\partial ET_0} \frac{ET_0}{Q} \right] \frac{\Delta ET_0}{ET_0} Q + \left[\frac{\partial Q}{\partial n} \frac{n}{Q} \right] \frac{\Delta n}{n} Q + \delta \\ &= \varepsilon_P \frac{\Delta P}{P} Q + \varepsilon_{ET_0} \frac{\Delta ET_0}{ET_0} Q + \varepsilon_n \frac{\Delta n}{n} Q + \delta \\ &= Cr_P + Cr_{ET_0} + Cr_n + \delta \end{aligned} \quad (7)$$

式中： δ 为误差项； Cr_P 、 Cr_{ET_0} 和 Cr_n 分别代表 P 、 ET_0 和 n 变化对 Q 变化的贡献量； ε_P 、 ε_{ET_0} 、 ε_n 分别为 Q 对 P 、 ET_0 和 n 的弹性系数，可由三个变量的偏微分（表1）以及式（2）进行计算。

2 结果分析

表1 径流对三个变量的偏微分形式

Table 1 Detailed formulation of the partial differential items for the three factors

2.1 水文气象要素特征

1983-2015年新安江上游的径流深变化如图2a所示。最大径流出现在1998年，达到1844 mm；最小径流出现在2005年，仅有548 mm。Mann-Kendall突变点检测发现，径流的突变点发生在1999年左右（图2b）。1983-1999

偏微分项	公式
$\frac{\partial Q}{\partial P}$	$\frac{ET_0 \cdot P \cdot P^{n-1}}{(ET_0^n + P^n)^{\frac{1}{n}+1}} - \frac{ET_0}{(ET_0^n + P^n)^{\frac{1}{n}}} + 1$
$\frac{\partial Q}{\partial ET_0}$	$\frac{ET_0 \cdot ET_0^{n-1} \cdot P}{(ET_0^n + P^n)^{\frac{1}{n}+1}} - \frac{P}{(ET_0^n + P^n)^{\frac{1}{n}}}$
$\frac{\partial Q}{\partial n}$	$-ET_0 \cdot P \cdot \left[\frac{\log(ET_0^n + P^n)}{n^2 (ET_0^n + P^n)^{\frac{1}{n}}} - \frac{ET_0^n \cdot \log(ET_0) + P^n \cdot \log(P)}{n (ET_0^n + P^n)^{\frac{1}{n}+1}} \right]$

年平均径流深约为1351 mm，2000-2015年径流深为1070 mm，平均年径流下降了281 mm（表2），相对变化率达到了-20.8%。特别是在21世纪初期（2000-2007年），平均径流深下降到了879 mm，较2000年前下降了35%。图2c、图2d展示了1983-2015年降水和潜在蒸散发变化过程。其中，降水量由突变点前的1936 mm，下降到突变点后的1801 mm，下降了135 mm，相对变化率为-6.9%。潜在蒸散发由846 mm增加到890 mm，相对变化了5.2%。

2.2 径流对气候和下垫面的弹性

不同时期径流深对降水、潜在蒸散发和下垫面特征的弹性系数如表2所示。对整个

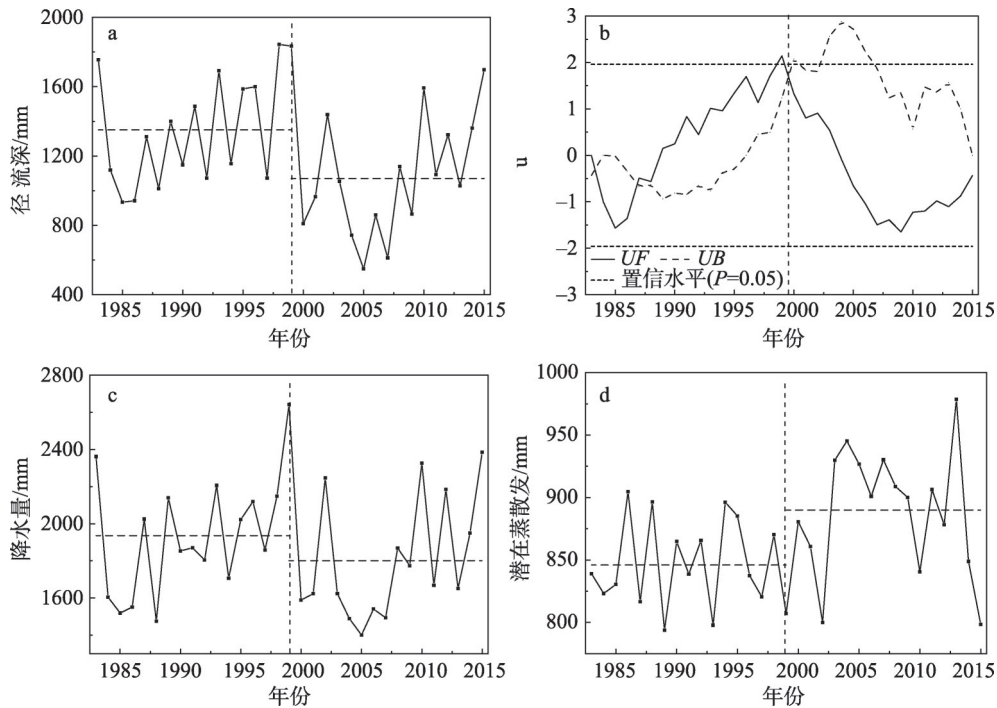


图2 1983-2015年新安江上游水文气象变化特征

Fig. 2 Characteristics of streamflow, precipitation and potential evapotranspiration in Xin'an River Basin during 1983-2015

表2 径流突变点前后时间段水文要素及其弹性系数

Table 2 Hydrological factors and their elasticity for the two periods

时段/年	Q/mm	P/mm	ET_0/mm	n	ε_P	ε_{ET_0}	ε_n
1983-2015	1215	1871	867	1.2	1.39	-0.39	-0.27
1983-1999	1351	1936	846	0.99	1.3	-0.3	-0.27
2000-2015	1070	1801	890	1.51	1.51	-0.51	-0.26
突变点前后变化	-281	-135	44	0.52			

注： Q 代表径流深， P 为降水， ET_0 为潜在蒸散发， n 为下垫面参数， ε_P 、 ε_{ET_0} 和 ε_n 分别代表径流对 P 、 ET_0 和 n 的弹性。

研究时段（1983-2015年）而言，径流对降水的弹性系数为1.39，表示降水量每增加10%时，径流深将增加13.9%，反之亦然。径流对潜在蒸散发的弹性系数为-0.39，表明潜在蒸散发每增加10%时，径流深将减少3.9%。径流深对表征植被变化的下垫面参数 n 的弹性为-0.27，表明植被覆盖度每增加10%时，径流深将下降2.7%。

从转折点前后的两个时段对比而言，流域下垫面参数 n 由1983-1999年的0.99，增加到2000-2015年的1.51，相对增加了52.5%。Li等^[19]发现黄河中游12个流域参数 n 变化率与叶面积指数具有较好的相关性，参数 n 可有效地反映流域植被对径流的影响。Zhang等^[36]通过植被光合有效辐射建立了下垫面参数 n 估算模型，植被变化可以直接估算参数 n 。由此 n 值变化可知，新安江上游在2000-2015年植被状况发生了显著变化，并且对径流产生了深刻的影响。径流对降水的弹性系数由1.30增加到1.51，说明同样降水增加10%，2000年前会使径流增加13%，则会使2000年后的径流增加15.1%，表明降水变化对径流

的影响程度进一步加强。潜在蒸散发弹性则由-0.30下降到-0.51，说明潜在蒸散发增加10%时，会使2000年前的径流下降3%，而使2000年后下降5.1%。整体而言，2000-2015年新安江上游径流对降水和潜在蒸散发的敏感性增加，对降水的敏感性约为潜在蒸散发的三倍，而对植被的敏感性变化不大。

2.3 径流变化归因

表3列出了降水、潜在蒸散发和下垫面条件对径流变化的贡献。系统误差为1.9%，表明该方法区分各因素的贡献可行性较好。2000-2015年降水量的减少（图2a）导致径流下降了121.54 mm，为1983-1999年多年平均径流的9%，对径流下降的贡献率达42.45%。潜在蒸散发的增加（图2d）导致径流下降了23.83 mm，贡献率为8.32%，低于降水的影响程度。气候变化（ P , ET_0 ）引起的径流变化量为-145.37 mm，对径流的整体贡献率为50.77%，成为控制流域径流变化的主导因素。植被变化引起径流变化量为-140.96 mm，占1983-1999年多年平均径流量的10.43%，对径流下降的贡献率为49.23%，大于降水和潜在蒸散发的独立贡献。这表明，近年来植被的快速恢复对径流变化的影响日趋显著。

植被覆盖度的增加可导致冠层的截留蒸发增加，直接增加流域实际蒸散发。植被还可通过改变产流过程中的填洼、下渗和土壤蓄水能力，汇流过程中的地表糙率、地表蓄水量、河道汇水路径等水文过程，延长产汇流的时间，进而增加土壤蒸发^[37]。散发作为地表最主要的水分通量，大约占实际蒸散发的80%~90%^[38]，流域植被覆盖的增加会增加冠层的散发量，并最终导致观测径流发生变化。降水作为流域水量平衡的重要输入项，对观测径流的变化起着重要作用。研究流域降水对径流的贡献仅次于植被，如果未来植被状况保持稳定不变，那么其对径流的影响也将进一步减弱，未来较长时期内流域径流的变异将主要决定于降水的变化。有学者对新安江上游流域未来气候和径流模拟发现，径流与降水的相关性较高（ $R^2=0.83$ ）。随着近30年全国气温上升，特别是2013-2017年尤为明显^[26]，潜在蒸散发也将随着温度增加^[30]。但本研究发现潜在蒸散发对径流变化的贡献率仅为8.32%，而且径流对降水的敏感性是潜在蒸散发的三倍（表2）。所以未来潜在蒸散发的变化对径流影响有限，流域未来径流将随降水量变化而波动^[39]。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文利用实测径流、气象要素以及植被指数数据，基于布迪克假设框架的弹性系数法，分析了新安江上游流域1983-2015年径流的变化趋势，并定量分析了降水、潜在蒸散发和下垫面参数对径流变化的贡献，结果表明：（1）径流突变点发生在1999年左右，2000-2015年平均径流深较1983-1999年下降了281 mm。2000年初期（2000-2007年）的径流，较2000前下降了35%。（2）植被恢复导致下垫面发生了显著变化，使得下垫面参数 n 由1983-1999年的0.99，增加到2000-2015年的1.51，相对增加了52.5%。径流对气候

表3 径流变化的贡献率

Table 3 Contribution of hydrological factors to streamflow

	Cr_P	Cr_{ET_0}	Cr_n	误差/%
贡献量/mm	-121.54	-23.83	-140.96	1.90
贡献率/%	42.45	8.32	49.23	

注： Cr_P 、 Cr_{ET_0} 和 Cr_n 分别表示降水、潜在蒸散发和植被对径流的贡献。

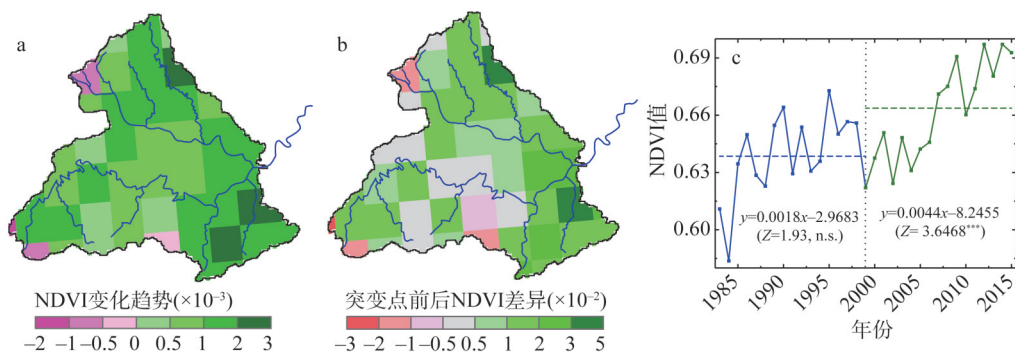
变化的敏感性增强,对降水的敏感性由1.30增加到1.51,对潜在蒸散发的敏感性绝对值由0.30增加到0.51。(3)气候因素是造成径流下降的主导因素,其次为植被变化。气候变化使得径流量变化了-145.37 mm,贡献率为50.77%,其中降水的贡献率为42.45%,潜在蒸散发为8.32%。流域植被指数NDVI增加趋势达到显著性水平($P<0.001$),植被变化使得径流量变化了-140.96 mm,贡献率为49.23%,超过了降水和潜在蒸散发的影响,成为流域径流变化日趋重要的因素,但径流对植被恢复的长期效应有待进一步加强研究。本研究将有助于理解变化环境下径流变异特征与区域响应差异性,也可为流域水资源开发利用措施的制定提供参考依据。

3.2 讨论

3.2.1 植被变化的生态水文效应

近些年,针对植被变化及其生态水文效应,诸多学者开展了一系列研究工作。全球20%~50%区域的植被呈显著变绿趋势^[40],并改变了全球地表水循环的过程^[2]。2000年以来,随着气候变化^[41]和人类活动^[42]的影响,我国植被覆盖也发生了显著变化^[24],并深刻地改变了生态水文效应。在黄土高原地区,植被恢复工程已减少泥沙含量(约90%)和观测径流^[3],有学者建议减缓植被恢复的措施,否则将会造成区域粮食短缺、水资源锐减等问题^[11]。植被的快速恢复降低了黄河中游的径流系数^[43],并改变了土壤属性^[44]。在高寒地区,植被变化已经成为决定地表散发变异的主要因素^[45],并且对黄河源区径流变化的贡献率达到82%^[46]。

虽然新安江上游区域并未实施大规模退耕还林/还草的政策,但随着近年来城市化进程加快^[23],农村青壮年劳动力转移到城市,更多的农田被闲置并转为灌丛或林地(流域综合考察发现,交通不便利的源头区域尤为明显),植被状况得到了极大地恢复。为了更进一步验证研究区植被变化状况,图3展示了新安江上游归一化植被指数(NDVI)的时空变化情况。空间分布而言,1983-2015年间,除两条支流的上游边界区域,NDVI在整个流域整体呈增加趋势,尤其以横江上游和两个支流的下游区明显(图3a),增加趋势达到极显著水平($P<0.001$)。对比径流突变前后NDVI的变化,发现除横江源头、率水中游区域在突变点后植被退化外,其余大部分区域植被较突变点前明显改善(图3b)。时



注: a为1983-2015年NDVI变化趋势空间分布, b、c分别为突变点前后NDVI变化的空间分布和年序列变化情况。

图3 1983-2015年新安江上游生长季植被指数变化情况。

Fig. 3 Spatial and temporal changes in the vegetation index in upper Xin'an River Basin during 1983-2015

间序列上, 在 1983-1999 年 NDVI 均值为 0.63, 增加趋势不显著 ($P>0.05$), 而 2000-2015 年 NDVI 增加达到极显著水平 ($P<0.001$, $Z=3.6468$), 表明该流域植被呈显著“变绿”的变化趋势, 并已成为控制流域径流变化的重要因素 (表 3)。

为了进一步了解 2000 年来植被的生态水文效应, 对径流突变的 2000 年后的 3 个时段 NDVI 和下垫面参数 n 进行对比, 发现前两个时段 (2000-2005 年和 2006-2010 年), 随着 NDVI 的增加, 下垫面参数 n 随之增加 (表 4), 植被对径流的影响增强。但尽管 2011-2015 年的 NDVI 较前两个时期增加, 但下垫面参数 n 则变小, 对径流的影响减弱。这表明植被恢复初期对径流影响较大, 但随着植被恢复达到稳定期后, 其对径流的影响也将趋于缓和。

表 4 2000-2015 年新安江上游各时段植被指数与
下垫面参数 n 变化

Table 4 Change of vegetation index and landscape parameter n
in upper Xin'an River Basin during 2000-2015

时段/年	NDVI	n
2000-2005	0.64	1.62
2006-2010	0.67	1.87
2011-2015	0.69	1.18

3.2.2 不确定性与展望

本文虽然深入分析了新安江上游径流变化对气候和下垫面的敏感性, 并量化了各因素对径流变化的贡献率, 但仍然存在一些不确定性。首先, 径流变化的归因分析方法的不确定性。本文中对径流变化的驱动因素分析时, 假定降水、潜在蒸散发和下垫面参数三个变量是相互独立的。然而, 实际上三者是相互关联的, 气候变化会影响到植被的生长状况^[40]; 反过来, 下垫面的变化也会对大气运动产生反馈作用, 并影响区域乃至全球气候变化。式 (7) 中, 变量 δ 为不确定性因素, 本文 δ 为 1.9%, 表明误差影响有限。其次, 数据处理过程导致不确定性。由于流域气象站点较少, 代表性稍差。为了减少该不确定性, 利用全国气象数据, 通过空间插值的方法获取本流域的气象要素特征, 但仍存在不确定性。

深刻理解径流对变化环境的响应机理, 需要借助可反映植被变化信息的水热耦合模型^[37], 以及基于二元水循环的分布式水文模型^[47], 精确地模拟气候变化、植被恢复和水库调度等因素影响水量平衡和能量收支, 并揭示影响径流量变化的水文过程。笔者于 2018 年 7 月中旬对新安江上游进行了水文气象综合考察, 了解到新安江主源支流 (率水) 正在修建大型水库一月潭水库, 那么将来水库运行、调度对径流产生哪些影响? 对径流洪水的拦蓄、滞留作用如何? 这些问题均需要持续关注, 并加强科学研究。

致谢: 感谢黄山市水文水资源局专家章彩霞局长, 对近些年新安江上游植被变化的分析和解答, 以及对论文方法的指导。感谢黄山歙县水文测量队的陈志军队长, 协助完成了新安江上游各支流的野外考察工作, 感谢两位匿名审稿人对本文提出的宝贵意见, 使得本文得以完善。

参考文献(References):

[1] PIAO S L, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.

[2] STERLING S M, DUCHARNE A, POLCHER J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 385-390.

[3] WANG S L, FU B J, PIAO S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Na-*

- ture Geoscience, 2016, 9(1): 38-41.
- [4] 雷晓辉, 王浩, 廖卫红, 等. 变化环境下气象水文预报研究进展. 水利学报, 2018, 49(1): 9-18. [LEI X H, WANG H, LIAO W H, et al. Advances in hydro-meteorological forecast under changing environment. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 9-18.]
- [5] MILLY P C D, BETANCOURT J, FALKENMARK M, et al. Stationarity is dead: Whither water management?. Science, 2008, 319(5863): 573-574.
- [6] JARAMILLO F, DESTOUNI G. Local flow regulation and irrigation raise global human water consumption and footprint. Science, 2015, 350(6265): 1248-1251.
- [7] 许炯心. 黄河中游径流可再生性对于人类活动和气候变化的响应. 自然资源学报, 2015, 30(3): 423-432. [XU J X. Runoff renewability in the Middle Yellow River in response to human activity and climate change. Journal of Natural Resources, 2015, 30(3): 423-432.]
- [8] LIU X M, LUO Y Z, YANG T T, et al. Investigation of the probability of concurrent drought events between the water source and destination regions of China's water diversion project. Geophysical Research Letters, 2015, 42(20): 8424-8431.
- [9] ADAM J C, HADDELAND I, SU F, et al. Simulation of reservoir influences on annual and seasonal streamflow changes for the Lena, Yenisei, and Ob' rivers. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(D24): 1-22.
- [10] FRANCZYK J, CHANG H. The effects of climate change and urbanization on the runoff of the Rock Creek basin in the Portland metropolitan area, Oregon, USA. Hydrological Processes, 2009, 23(6): 805-815.
- [11] CHEN Y P, WANG K B, LIN Y S, et al. Balancing green and grain trade. Nature Geoscience, 2015, 8(10): 739-741.
- [12] JIANG C, XIONG L H, WANG D B, et al. Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying parameters. Journal of Hydrology, 2015, 522(1): 326-338.
- [13] CHANG J X, WANG Y M, ISTANBULLUOGLU E, et al. Impact of climate change and human activities on runoff in the Weihe River Basin, China. Quaternary International, 2015, 380(1): 169-179.
- [14] WANG D B, HEJAZI M. Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States. Water Resources Research, 2011, 47(10): 1-16.
- [15] BROWN A E, ZHANG L, MCMAHON T A, et al. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. Journal of hydrology, 2005, 310(1): 28-61.
- [16] SCHAAKE J C, WAGGONER P. From Climate to Flow, in Climate Change and U.S. Water Resources. New York: John Wiley, 1990.
- [17] LIU M X, XU X L, WANG D B, et al. Karst catchments exhibited higher degradation stress from climate change than the non-karst catchments in Southwest China: An ecohydrological perspective. Journal of Hydrology, 2016, 535(1): 173-180.
- [18] ZHENG H X, ZHANG L, ZHU R, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin. Water Resources Research, 2009, 45(7): 641-648.
- [19] LI Y Z, LIU C M, ZHANG D, et al. Reduced runoff due to anthropogenic intervention in the Loess Plateau, China. Water, 2016, 8(458): 1-16.
- [20] LIU X M, LIU C M, LUO Y Z, et al. Dramatic decrease in streamflow from the headwater source in the central route of China's water diversion project: Climatic variation or human influence?. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D6): 1-10.
- [21] 刘艳, 曹碧波, 李川, 等. QUAL2Kw-GWLF 模型联用在新安江干流黄山段的应用研究. 水资源与水工程学报, 2014, (6): 163-168. [LIU Y, CAO B B, LI C, et al. Application of QUAL2Kw and GWLF model in Huangshan segment of Xin'an River main stream. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2014, (6): 163-168.]
- [22] 赵来, 崔淑卿, 吕成文. 黄山市土地利用变化的生态环境效应研究. 水土保持研究, 2006, 13(3): 215-217. [ZHAO L, CUI S Q, LYU C W. Study on the effect of land use change on the eco-environment of Huangshan. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(3): 215-217.]
- [23] 方恺, 吴次芳, 董亮. 城市化进程中的土地自然资本利用动态分析. 自然资源学报, 2018, 33(1): 1-13. [FANG K, WU C F, DONG L. The use of land natural capital in the context of urbanization. Journal of Natural Resources, 2018, 33(1): 1-13.]
- [24] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14. [LIU J Y, KUAGN W H, ZHANG Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use

- changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [25] IPCC. Summary for Policymakers: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change. 2013.
- [26] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书. 2018. [Center on Climate Change, China Meteorological Administration. China Blue Book on Climate Change. 2018.]
- [27] 冯爱青, 曾红玲, 尹宜舟, 等. 2017年中国气候主要特征及主要天气气候事件. 气象, 2018, 44(4): 548-555. [FENG A Q, ZENG H L, YIN Y Z, et al. Climatic characteristic and major meteorological events over China in 2017. *Meteorological Monthly*, 2018, 44(4): 548-555.]
- [28] 肖志强, 兰佳, 李慧赟, 等. 气候与下垫面变化对新安江上游(屯溪站)径流变化贡献率的定量分析. 云南大学学报: 自然科学版, 2018, 40(3): 474-482. [XIAO Z Q, LAN J, LI H Y, et al. Quantitative evaluation of contributions of climate change and underlying surface change to the runoff at the upper catchment of Xin'an jiang (Tunxi Hydrological Station). *Journal of Yunnan University*, 2018, 40(3): 474-482.]
- [29] 程琼, 方增强. 新安江干流屯溪以上洪水地区组成分析. 江淮水利科技, 2014, (5): 16-18. [CHENG Q, FANG Z Q. Analysis of composition of flood areas above the main stream of Xin'an River. *Jianghuai Water Resources Technology*, 2014, (5): 16-18.]
- [30] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements: FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, 1998.
- [31] KENDALL M G. Rank Correlation Methods, *Biometrika*. London: Charles Griffin, 1948.
- [32] LIANG K, LIU C M, LIU X M, et al. Impacts of climate variability and human activity on streamflow decrease in a sediment concentrated region in the Middle Yellow River. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2013, 27(7): 1741-1749.
- [33] MODARRES R, SARHADI A. Rainfall trends analysis of Iran in the last half of the twentieth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D3): 1-9.
- [34] LIU X M, LUO Y Z, ZHANG D, et al. Recent changes in pan-evaporation dynamics in China. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(13): 1-4.
- [35] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(10): 1024-1034. [YANG D W, ZHANG S L, XU X Y. Attribution analysis for runoff decline in Yellow River Basin during past fifty years based on Budyko hypothesis. *Science China Technological Sciences*, 2015, 45(10): 1024-1034.]
- [36] ZHANG S L, YANG H B, YANG D W, et al. Quantifying the effect of vegetation change on the regional water balance within the Budyko Framework. *Geophysical Research Letters*, 2015, 43(3): 1140-1148.
- [37] 刘昌明, 李艳忠, 刘小莽, 等. 黄河中游植被变化对水量转化的影响分析. 人民黄河, 2016, 38(10): 7-12. [LIU C M, LI Y Z, LIU X M, et al. Impact of vegetation change on water transformation in the Middle Yellow River. *Yellow River*, 2016, 38(10): 7-12.]
- [38] JASECHKO S, SHARP Z D, GIBSON J J, et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature*, 2013, 496(1): 347-350.
- [39] 郑艳妮, 闻昕, 方国华. 新安江流域气候变化及径流响应研究. 水资源与水工程学报, 2015, (1): 106-110. [ZHENG Y N, WEN X, FANG G H. Research on climate change and runoff response in Xin'an River Basin. *Journal of Water resources & Water Engineering*, 2015, (1): 106-110.]
- [40] ZHU Z C, PIAO S L, MYNENI R B, et al. Greening of the earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 791-795.
- [41] IMMERZEEL W W, VAN BEEK L P, BIERKENS M F. Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [42] ZHANG P C, SHAO G F, ZHAO G, et al. China's forest policy for the 21st century. *Science*, 2000, 288(5474): 2135-2136.
- [43] 李艳忠, 刘昌明, 刘小莽, 等. 植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响. 自然资源学报, 2016, 31(12): 2005-2020. [LI Y Z, LIU C M, LIU X M, et al. Impact of the grain for green project on the land use/cover change in the Middle Yellow River. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(12): 2005-2020.]
- [44] 周德成, 赵淑清, 朱超. 退耕还林工程对黄土高原土地利用/覆被变化的影响: 以陕西省安塞县为例. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1866-1878. [ZHOU D C, ZHAO S Q, ZHU C. Impacts of the sloping land conversion program on the land use/cover change in the Loess Plateau: A case study in Ansai county of Shaanxi province, China. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(11): 1866-1878.]
- [45] WANG W G, LI J X, YU Z B, et al. Satellite retrieval of actual evapotranspiration in the Tibetan Plateau: Components

- partitioning, multidecadal trends and dominated factors identifying. *Journal of Hydrology*, 2018, 559(1): 471-485.
- [46] FENG A Q, LI Y Z, GAO J B, et al. The determinants of streamflow variability and variation in Three-River Source of China: Climate change or ecological restoration?. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(696): 1-10.
- [47] 贾仰文, 王浩, 王建华, 等. 黄河流域分布式水文模型开发和验证. *自然资源学报*, 2005, 20(2): 300-308. [JIA Y W, WANG H, WANG J H, et al. Development and verification of a distributed hydrologic model for the Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(2): 300-308.]

Variation of streamflow and its drivers in Xin'an River Basin

HUANG Rong^{1,2}, ZHANG Jian-mei^{1,2}, LIN Yi-xue^{1,2}, BU Tian-hui^{1,2}, WANG Xin^{1,2},
XUE Zi-yue^{1,2}, LI Yan-zhong^{1,2}, MA Xie-yao², YU Zhi-guo², BAI Peng³

(1. National Demonstration Center for Experimental Atmospheric Science and Environmental Meteorology Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Investigation to the variation of streamflow and its drivers in Xin'an River Basin under changing environment will be beneficial for understanding the geographical heterogeneity of water cycle processes in response to climate change and human activities. Using observed discharge at hydrological stations, meteorological data and remote sensing vegetation index (NDVI), the impact of precipitation, potential evapotranspiration (ET_0) and vegetation change on runoff in the upper reaches of Xin'an River were analyzed. Results show that: (1) The changing point of streamflow occurred in 1999. From 2000 to 2015, the runoff depth decreased by 281 mm compared with 1983-1999, and the relative change rate was 20.8%, especially significant in the early 21st century. (2) After the changing point, the parameter n increased by 52.5%, and the influence of vegetation change on runoff was significantly enhanced. Streamflow is also more sensitive to precipitation than to ET_0 . (3) Climate change is the dominant factor for the decrease of runoff, followed by vegetation change. The change of climate and vegetation led to a decrease of runoff by -145.37 and 140.96 mm, respectively, with contribution rates of 50.77% and 49.23%, respectively. After 2000, The NDVI increasing trend reached a very significant level ($P < 0.001$), and the contribution of vegetation change to runoff exceeded precipitation and ET_0 individually. However, the long-term research on eco-hydrology effects of vegetation change needs to be further strengthened.

Keywords: streamflow; vegetation change; climate change; elasticity coefficient; Budyko framework; upper Xin'an River Basin