

DOI: 10.5846/stxb201609281957

杨满根, 陈星. 气候变化对淮河流域中上游汛期极端流量影响的 SWAT 模拟. 生态学报, 2017, 37(23): 8107-8116.

Yang M G, Chen X. Effects of climate change on extreme streamflow in flood season in the upper and middle basin of the Huaihe River by SWAT simulation. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 8107-8116.

气候变化对淮河流域中上游汛期极端流量影响的 SWAT 模拟

杨满根^{1,3}, 陈 星^{2,3,*}

1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

2 中国气象局-南京大学气候预测研究联合实验室, 南京 210023

3 南京大学大气科学学院, 南京 210023

摘要: 致洪暴雨主要是 3 天以上连续强降水, 是淮河流域洪涝的直接原因。构建淮河流域中上游 SWAT 模型, 用 RegCM3 在 SRES A2 排放情景下的模拟结果 (2071—2100 年) 驱动 SWAT 模型, 研究气候变化对淮河流域中上游汛期极端流量的影响。结果表明: (1) 在 SRES A2 排放情景下, 淮河流域中上游未来 (2071—2100 年) 气温升高, 降水量增加, 降水的空间差异增大; 颖河流域中游年降水量有较大幅度的减少, 呈现暖干化的趋势; 汛期极端过程降水增加, 汛期最大 9 d 降水量平均增幅都在 10% 以上。(2) 在 SRES A2 排放情景下的气候变化将导致淮河流域中上游汛期极端流量大幅度增加, 干流 5 个水文站汛期最大 9 d 平均流量的增幅都在 20% 以上。(3) 淮河流域中上游极端流量的概率分布更加集中, 更大的极端流量出现的频率更高, 研究流域下游更容易出现较大的极端流量。(4) 研究流域下游极端流量概率对极端流量变化更敏感, 下游也面临着更大的洪涝风险。

关键词: 气候变化; 淮河流域; 汛期极端流量; SWAT 模型

Effects of climate change on extreme streamflow in flood season in the upper and middle basin of the Huaihe River by SWAT simulation

YANG Mangen^{1,3}, CHEN Xing^{2,3,*}

1 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 China Meteorological Administration & Nanjing University Joint Laboratory for Climate Prediction Studies, Nanjing 210023, China

3 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: Consecutive rainstorm events are a main flash-flood-producing phenomenon on a basin scale, and an extreme consecutive rainstorm is more likely to cause catastrophic floods in the Huaihe River Basin. We constructed a SWAT model for the upper and middle basin of the Huaihe River and the drove model using the RegCM3 outputs under SRES A2 Greenhouse Gas Emission Scenarios, during the period from January 1, 2071 to December 31, 2100, to investigate the extreme streamflow response to the climate change during the flood seasons. First, we analyzed the relationship between the maximum 3—13 day precipitation amount and the maximum 3—13 day mean streamflow and determined the maximum 9 day precipitation amount as an indicator of the extreme consecutive rainstorm and the maximum 9-day mean streamflow as an indicator of the extreme streamflow in the flood season. Second, we constructed a SWAT model for the upper and middle basin of the Huaihe River to simulate the maximum 9-day mean streamflow in the flood season. Thirdly, we drove the model using the RegCM3 outputs and simulated the maximum 9-day mean streamflow during the period from January 1, 2071 to

基金项目: 国家自然科学基金 (41475062); 国家重大基础研究计划 (2010CB428506); 水利部公益性行业科研项目 (200901042, 200901024); 福建省教育厅 B 类项目 (JB12016) 水利部公益性行业科研项目 (200901042, 200901024)

收稿日期: 2016-09-28; 修订日期: 2017-03-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xchen@nju.edu.cn

December 31, 2100, under SRES A2 Greenhouse Gas Emission Scenarios and the period from January 1, 1961 to December 31, 1990 (reference period) respectively. Finally, we compared the results of the maximum 9-day mean streamflow in the flood season under two climate scenarios, and investigated the response of the extreme flow to climate change from the perspective of the probability characteristics. The SWAT model constructed for the upper and middle basin of the Huaihe River simulated monthly streamflow accurately based on the observational data during the period from 1958 to 2009. Simultaneously, the simulation results also reproduced the prominent characteristics of the maximum 9-day mean streamflow in the flood season. The results indicated that, under SRES A2 Scenarios, during the period from January 1, 2071 to December 31, 2100: (1) RegCM3 predicted that annual mean temperature will rise, annual precipitation amount will increase, and the spatial contrast of precipitation will increase in the upper and middle basin of the Huaihe River. However, the annual precipitation amount decreased in the middle basin of the Yinghe River and showed a warming and drying trend. Simultaneously, extreme consecutive precipitation in the flood season increased, especially in the southern basin of the lower reaches. (2) The extreme streamflow in the flood season increased more remarkably, and the maximum 9-day mean streamflow in the flood season increased more than 20% on average in five hydrological gauges. (3) The probability distribution of extreme streamflow was more concentrated and the frequency of the extreme streamflow was much higher, with much higher flood risk in the middle and lower basin. (4) The probability of extreme streamflow in the lower basin responded more sensitively to the extreme streamflow changes, which means flood risks increase owing to climate change. These conclusions have practical significance for flood risk management and control in the Huaihe River Basin under the climate change scenario.

Key Words: climate change; Huaihe River Basin; extreme streamflow in flood season; SWAT model

江河洪水是极端流量变化的具体表现,各种气候过程,如强降水和/或持续降水、融雪等,都影响着洪水过程。洪涝灾害的形成不仅与某日降水量有关,而且与连续性或间隔时间较短的多次强降水过程的累积降水量关系更为密切,连续性过程降水的极值是形成流域洪涝的主要原因^[1-2]。不少学者都强调需要加强气候变化对极端水文事件影响的研究^[3]。IPCC 技术报告《气候变化和水》在关于未来工作的建议中指出,需要进一步开展针对当前水文变化的检测和归因工作,特别是水资源的变化和极端事件发生概率的变化^[4]。

淮河流域是中国东部洪涝灾害最为严重的区域,3 天以上连续强降水是淮河流域主要的致洪暴雨^[5]。淮河流域极端降水,特别是夏季或汛期极端降水的增加趋势显著。20 世纪 90 年代末以来,淮河流域夏季极端强降水事件的概率显著增加^[6]。1961—2008 年淮河流域主汛期(6—8 月)极端降水事件总体上有增加趋势,特别是流域中西部地区线性增加趋势显著^[7]。1961—2010 年,淮河流域汛期雨日出现频率有下降的趋势,但暴雨日比重和暴雨日平均降水量均有升高的趋势。淮河流域汛期暴雨日出现频率以及各类型雨日的平均降水量均有上升的趋势,强降水时空变化呈现局地性和频发性^[8]。

未来气候变化情景下,淮河流域发生极端洪水的可能性增大。郝振纯等利用 IPCC 第 4 次评估公开发布的 22 个全球气候模式在 SRES-A1B、A2 和 B1 等典型排放情景下的未来气温和降水预测结果,结合新安江模型,对未来 90 年(2010—2099 年)气候变化下淮河流域的极端洪水进行预估。结果表明,淮河流域未来可能发生极端洪水年份的密集程度从大到小依次为 A2 情景、A1B 情景、B1 情景。其中,A2 情景在 2035—2065 年以及 2085 年以后是极端洪水发生较为集中的时期^[9]。因此,研究气候变化情景下淮河流域汛期极端流量的响应,对流域未来防汛减灾、调水调沙、水量统一调度等都具有重要意义。

本文构建了淮河流域中上游的 SWAT 模型,以汛期最大 9 天降水量和最大 9 天流量作为极端过程降水和极端流量的指标,用 RegCM3 在 SRES A2 排放情景下的模拟结果驱动 SWAT 模型,从极端事件概率的角度研究气候变化对淮河流域中上游汛期极端流量的影响。

1 研究区域、数据和方法

1.1 研究区域

以蚌埠水文站以上的淮河流域中上游为研究区域。蚌埠(吴家渡)水文站是淮河干流中游主要的控制站,是测验精度一类的基本闸坝站,单断面。研究流域集水面积约为 $1.2 \times 10^5 \text{ km}^2$, 经纬度范围大致为 $115^\circ\text{--}118.5^\circ\text{E}$ 、 $30.5^\circ\text{--}35.5^\circ\text{N}$ 。主要地貌类型有低山、丘陵、平原、洼地和河湖等,其中平原面积约占研究流域面积的 $2/3$ 。高程变化范围为海拔 $24\text{--}1684 \text{ m}$,但流域面积的 90% 高程低于 300 m 。淮河最长的两条支流——涡河和颍河,都蜿蜒在淮北平原。研究流域是整个淮河流域的主要产流区,水系形式为典型的扇状水系,大部分支流均在蚌埠站与润河集站之间较短的河段内汇入淮河干流(图 1),加上蚌埠以下的淮河水系为典型的平原水系,排水不畅,极易在淮河流域中上游形成“关门淹”。

研究流域年降水量在 600 mm 与 1400 mm 之间,年降水量为 883 mm 。降水主要受夏季风系统控制,暴雨降水主要出现在 $5\text{--}9$ 月的汛期,降水的年际变率大。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 历史气候观测数据

历史气候观测数据包括日降水量、日最高气温、日最低气温和日平均气温等 4 个要素,来自于研究区域经纬度范围内 45 个国家基准气候站 1958—2009 年的逐日气候观测数据,主要用于率定和验证 SWAT 模型。Karl 的研究表明,缺失的日值假定为零或用月平均替代,可能引起降水趋势分析的误差^[10]。因此,当某个气候要素的序列中日数据缺失总量超过 5 年时,该测站被排除使用。上述在 45 个基准气候站中,选择时间序列最长、缺失数据最少的 28 个基准气候站的逐日气候观测数据来分析淮河流域中上游气候变化的主要特征,以及驱动 SWAT 模型。主要气象站点位置如图 1。

1.2.2 RegCM3 气候模拟数据

国家气候中心研究人员在 NCAR/NASA 的全球环流模式 FvGCM/CCM3 内嵌套 RegCM3 区域气候模式,进行了 1961 年 1 月 1 日—1990 年 12 月 31 日的模拟试验(简称 RF 气候情景),以及 21 世纪后期(2071 年 1 月 1 日—2100 年 12 月 31 日)在 IPCC SRES A2 排放情景下的模拟试验(简称 SA 气候情景)。区域模式试验输出结果的分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ^[11]。为了与基于台站的历史气候观测资料对比,将区域模式试验的输出结果插值到台站。采用数字图像处理技术中常用的双线性插值方法将基于 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 格点的气温或降水模拟数据插值到 28 个基准气候站。双线性插值方法是气候数据从格点到台站的转换过程中应用较多的方法,徐影等使用双向线性插值方法将 7 个气候模式的格点值插值到长江中下游地区 23 个代表站,构建了该区域未来 50—100 年的气候变化情景^[12]。

为了预估未来全球和区域的气候变化,必须事先提供未来温室气体和硫酸盐气溶胶的排放情况,即排放情景(Emissions Scenarios)。IPCC 于 2000 年提出 SRES 排放情景,其中 A2 框架和情景系列描述了一个发展极不均衡的世界^[13]。考虑到本研究侧重于极端过程降水变化对汛期极端流量的影响,所以选用了相对极端的高排放情景,即 SRES A2 排放情景。

1.2.3 流量数据

以河川流量作为径流指标,河川流量实测数据来自于淮河干流 5 个水文站的逐日流量观测记录,从上游

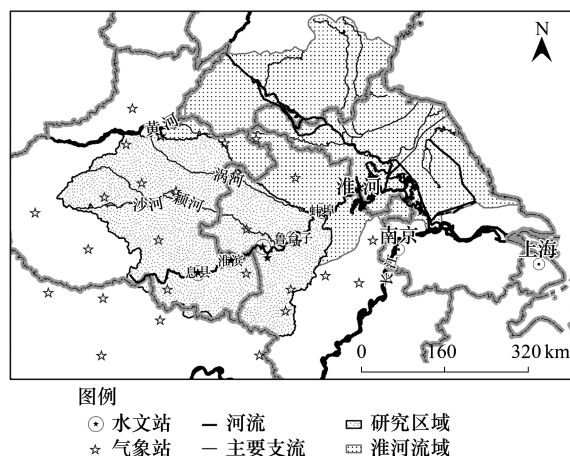


图 1 研究区域与气象、水文测站

Fig.1 The study area, meteorological stations and hydrological gauges

而下依次为息县、淮滨、润河集、鲁台子和蚌埠,其中蚌埠站是研究流域的出口站(图1)。实测河川流量数据包括了淮河流域水库等水利工程的影响,将水库等水利工程包含到流域的自然地理条件中,研究现实自然地理状态下淮河流域中上游气候变化对径流的影响。河川流量实测数据用于率定和验证 SWAT 模型。

1.2.4 土壤数据

土壤空间分布图是两种来源的空间数据叠加的结果,一是中国科学院南京土壤研究所的 1:100 万土壤空间数据库,二是 FAO 的全球土壤数据库。每一个斑块对应的土壤名称主要依据中国科学院南京土壤研究所的 1:100 万土壤空间数据库确定。土壤属性数据来自中国科学院南京土壤研究所的 1:100 万土壤空间数据库。

1.2.5 土地利用/覆被数据

土地利用/覆被数据解译于多分辨率无缝影像数据库(Multiresolution seamless image database, MrSID) 2000 年的影像。为了使得遥感影像的解译更具有针对性,直接从 MrSID 影像解译出 SWAT 水文模型中的土地利用/覆被类型。不同土地利用/覆被类型的斑块大小差异极大,解译过程中,依据土地利用/覆被类型的不同设定解译比例尺。解译完研究区域全部土地利用/覆被类型后,经过建立拓扑关系、合并碎小斑块等处理,得到淮河流域中上游 2000 年土地利用现状图。

1.2.6 DEM 及其他基础地理数据

DEM (Digital Elevation Model) 数据,各级水系、各级城市以及政区边界等数据也来自于国家基础地理信息中心。

1.3 研究方法

1.3.1 SWAT 模型

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是 Arnold J. C. 博士等为美国农业部下属的农业研究局开发的大、中尺度的长时段流域环境模拟模型^[14-15]。模型由站点的气象资料驱动,以水文响应单元为最小水文模拟单元进行流域水文过程模拟,在水文响应单元上利用水量平衡理论描述陆相水文循环过程,计算得到模拟单元内每一天的产流,然后利用改进的推理方法计算单元产流对主河道的水量贡献;在河道内采用变动储水系数模型或者马斯京根法计算河道的汇流,扣除水面蒸发、传输损失以及流域内人、畜用水,得到河道出口的逐日断面流量^[15]。

SWAT 模型在气候变化水文响应的研究中应用较多。Jha 等应用 SWAT 模型,研究了密西西比河上游流域河川流量对气候变化的敏感性^[16]。Franczyk 等应用 SWAT 模型模拟了一个小的 Oregon 流域气候变化情景下径流深度的变化^[17]。Mikołaj 等比较了全球尺度的水文模型 (WaterGAP) 和 SWAT 模型在模拟气候变化对河川径流影响时的效果,结果发现,在流域尺度上,做更复杂的气候变化水文影响评价,特别是要考虑月径流量的平均值和极端值的变化时,流域尺度的水文模型更有优势^[18]。

SWAT 模型在国内各流域的应用也较多。林炳青等应用 SWAT 模型研究了晋江流域景观格局变化对洪枯径流的影响^[19]。郭军庭等应用 SWAT 模型研究了潮河流域土地利用和气候变化对流域径流变化的影响^[20]。宋艳华等以陇西黄土高原华家岭南河流域为例,应用 SWAT 模型模拟了不同生态恢复情景下流域径流和蒸散发的响应情况^[21]。王军德等以西北干旱区祁连山系杂木河流域为研究区,应用 SWAT 模型研究了流域尺度和微地形尺度 7 种不同植被组合模式下流域水文响应的特征^[22]。刘昌明等应用 SWAT 模型模拟了黄河河源区不同气候和土地覆被条件下地表径流的变化^[23]。Chen 等用 SWAT 模型模拟了中国梭梭河流域过去 40 年气候变化和土地覆被变化对径流的影响^[24]。史鹏等应用 SWAT 模型研究了气候变化和土地利用/覆被变化对淮河流域上游息县流域水文状况的影响^[25]。总之,SWAT 模型在国内各流域的应用偏重于流域平均水文状况对气候变化或土地利用/覆被变化的响应,对流域汛期极端流量对气候变化的响应关注不够。

1.3.2 极端流量的计算

致洪暴雨主要是 3 d 以上连续强降水,是淮河流域严重洪涝的直接原因。首先计算了研究流域内各个气

象站汛期最大 3—13 d 降水量和淮河干流 5 个水文站汛期最大 3—13 d 平均流量;然后根据各水文站控制流域内所有气象站的汛期最大 3—13 d 降水量,采用简单算术平均方法计算每个水文站控制区域的平均汛期最大 3—13 d 降水量;计算了 5 个水文站汛期最大 3—13 d 平均流量与区域平均的汛期最大 3—13 d 降水量之间的相关系数,结果如表 1。

表 1 流域平均的汛期最大 3—13 d 降水量和最大 3—13 d 平均流量之间的相关系数(1958—2009)

Table 1 Correlation coefficient between maximum 3—13 day precipitation amount and maximum 3—13 day mean streamflow in flood season during the period 1958—2009

滑动天数 Moving days/d	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
蚌埠	0.81	0.84	0.87	0.89	0.89	0.89	0.90 *	0.89	0.89	0.88	0.88
鲁台子	0.73	0.77	0.80	0.83	0.83	0.82	0.83 *	0.83	0.82	0.82	0.82
润河集	0.69	0.72	0.74	0.78	0.79	0.78	0.79 *	0.78	0.77	0.77	0.77
淮滨	0.64	0.68	0.69	0.71	0.70	0.70	0.71 *	0.68	0.68	0.70	0.70
息县	0.63	0.68	0.70	0.72	0.71	0.71	0.72 *	0.70	0.71	0.71	0.72

* 相关系数最大

由表 1 可以看出,对每个水文站控制流域而言,区域平均的汛期最大 9 d 降水量和汛期最大 9 d 平均流量相关系数最高。因此,以汛期最大 9 d 降水量为研究流域汛期极端过程降水的指标,以汛期最大 9 d 平均流量作为各水文站汛期极端流量的指标,研究气候变化对淮河流域中上游汛期极端流量的影响。

1.3.3 概率分布拟合

对于水文或气象要素的极值,常用的概率分布函数有对数正态分布、Weibull 分布、Gumbel 分布、Frechet 分布、广义帕累托分布和皮尔逊Ⅲ型分布等,其中 Weibull 分布、Frechet 分布和 Gumbel 分布是广义极值分布(GEV)的 3 种形态。本文直接用广义极值分布(GEV)拟合淮河流域汛期极端流量序列,用 Kolmogorov-Smirnov 分布拟合检验概率分布拟合效果。

2 淮河流域 SWAT 模型的构建

2.1 SWAT 模型参数库的建立

本文为 SWAT 模型建立了气象参数库和土壤参数库,土地利用/覆被参数库采用 SWAT 模型的默认值。

2.2 SWAT 运行过程及相关参数的设置

在 SWAT 流域描述过程中,嵌入真实的数字化河网,将淮河干流 5 个水文站作为河网节点手动添加。选择蚌埠站作为游流域的主出口,得到蚌埠以上的淮河中上游流域,作为本文的研究流域。选择 SCS 曲线法进行地表径流的模拟;降雨量模拟选择了偏正态分布方法;潜在蒸发模拟选择 Penman-Monteith 方法;河道演算选择变动存储系数模型。

以 1958—2009 年的气候观测资料驱动 SWAT 水文模型,其中 1958—1965 年共 8 年作为模型的 spin-up 期,模拟结果不参与率定或验证效果的评价。1966—1987 年共 22 年作为模型的率定期,1988—2009 年共 22 年作为模型的验证期,保证模型有足够长的 spin-up 期,能经历较多的气候状况;另一方面,率定期与验证期时长相同,便于比较两个时段的模型模拟效果。

2.3 淮河流域 SWAT 模型的率定和验证

采用手动试错法率定 SWAT 模型。对敏感性排序最靠前的 12 个参数进行调整,实现 SWAT 率定。选择 Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)来评价淮河流域 SWAT 模型流量模拟的效果^[26]。淮河流域 SWAT 模拟逐月流量的评价指标见表 2。率定期所有水文站的 NSE 都在 0.7 以上。验证期模拟效果略微变差,但除蚌埠站外,区域水文站的 NSE 也都在 0.70 以上。因此,构建的淮河中上游流域 SWAT 模型比较真实地模拟了逐月流量过程。

表 2 淮河流域 SWAT 月流量模拟结果评价

Table 2 The assessment of the simulated monthly streamflow during calibrated period and validated period in 5 hydrological gauges

指标 Indicator	息县		淮滨		润河集		鲁台子		蚌埠	
	率定期 Calibrated period	验证期 Validated period	率定期 Calibrated period	验证期 Validated period	率定期 Calibrated period	验证期 Validated period	率定期 Calibrated period	验证期 Validated period	率定期 Calibrated period	验证期 Validated period
样本数 Sample size	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264
NSE	0.73	0.78	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.76	0.72	0.67

NSE, Nash-Sutcliffe 效率系数, Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient

SWAT 模拟淮河流域汛期最大 9 d 平均流量的评价结果见表 3。与月流量的模拟结果评价指标相比较, SWAT 模拟淮河流域汛期最大 9 d 平均流量的结果相对较差,这与 SWAT 模拟逐日流量的能力较差有关。除润河集站外,其余各站率定期的 NSE 都在 0.60 以上;除息县站外,其余各站验证期的 NSE 也都在 0.60 以上。因此,构建的淮河中上游流域 SWAT 模型比较合理地重现了汛期最大 9 d 平均流量的特征。

表 3 淮河流域 SWAT 模型汛期最大 9 d 平均流量模拟结果评价

Table 3 Assessment of the simulated maximum 9-day mean streamflow in flood season during calibrated period and validated period

指标 Indicator	息县		淮滨		润河集		鲁台子		蚌埠	
	率定期 Calibrated period	验证期 Validated period	率定期 Calibrated period	验证期 Validated period	率定期 Calibrated period	验证期 Validated period	率定期 Calibrated period	验证期 Validated period	率定期 Calibrated period	验证期 Validated period
样本数 Sample size	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
NSE	0.63	0.48	0.75	0.68	0.38	0.76	0.65	0.79	0.68	0.61

NSE, Nash-Sutcliffe 效率系数, Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient

3 气候变化对淮河流域汛期极端流量的影响

3.1 SRES A2 排放情景下淮河流域气候变化的主要特征

RegCM3 气候模拟结果存在一定的偏差^[27-28]。本研究也发现,RF 期 RegCM3 气候模拟与同时期(1961—1990 年)的观测气候结果存在偏差。因此,本文直接比较 RF 气候情景(1961—1990 年)和 SA 气候情景(2071—2100 年),评价 SRES A2 排放情景下淮河流域中上游平均气候变化的主要特征;以汛期最大 9 d 降水量为极端过程降水指标,评价 SRES A2 排放情景下淮河流域中上游汛期极端过程降水的主要特征。

3.1.1 SRES A2 排放情景下淮河流域气候变化的主要特征

与 RF 气候情景比较,SA 气候情景的气温在全部 28 个台站一致升高,颖河流域中游增温幅度较大,流域上游和南部增温幅度相对较小。SA 气候情景的年降水量增加。28 个台站中,21 个台站的年降水量增加,但在颖河和涡河流域中游,SA 气候情景下年降水量有较大幅度减少,以沙河汇入颖河处为中心的区域、以蚌埠水文站为中心的区域和流域南部的上游,年降水量有较大的幅度增加(图 2)。因此,在 SRES A2 下,未来(2071—2100 年)气温升高,降水量增加,降水的空间差异增大,颖河流域中游年降水量有较大幅度的减少,呈现暖干化的趋势。

3.1.2 SRES A2 排放情景下淮河流域极端过程降水的变化

与 RF 气候情景比较,SA 气候情景下,淮河流域中上游汛期最大 9 d 降水量也明显增大。与年降水量变化的空间格局相似,流域北部颖河中下游和涡河下游汛期最大 9 d 降水量有较大幅度的下降;研究流域上游和下游南部汛期最大 9 d 降水量的增幅较大(图 2)。

两种气候情景下,淮河干流 5 个水文站控制区域的区域平均汛期最大 9 d 降水量的多年平均值见表 4。SA 气候情景的汛期最大 9 d 降水量增大,平均增幅都在 10% 以上,其中润河集站汛期最大 9 d 降水量的增幅最大,达到 13.90%。

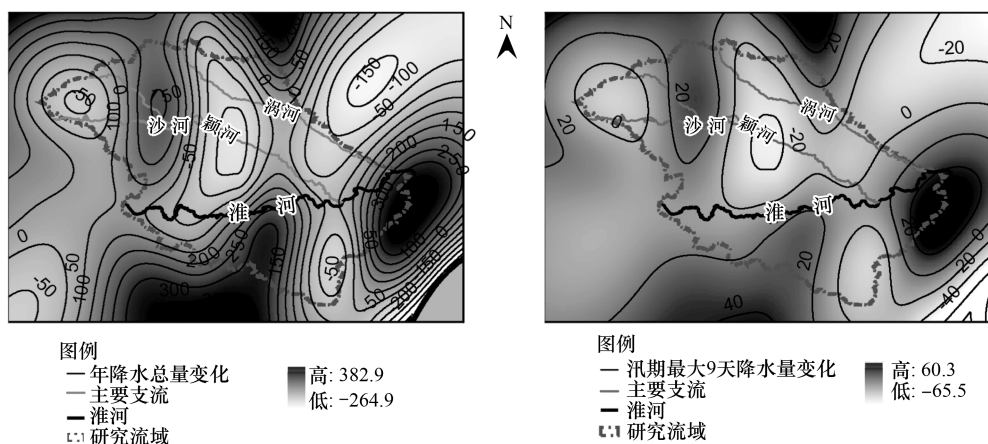


图2 SA 气候情景下淮河流域中上游年降水总量和汛期最大 9 d 降水量变化的空间差异/mm

Fig.2 Spatial pattern of the variation amplitude in annual precipitation total and maximum 9-day precipitation amount in flood season under SA climate scenarios

A 年降水量变化 annual precipitation total change; B 汛期最大 9 d 降水量变化 maximum 9-day precipitation amount in flood season

表 4 淮河干流 5 个水文站区域平均的汛期最大 9 d 降水量的多年平均值/mm

Table 4 The perennial average value of maximum 9-day precipitation amount in flood season under three climate scenarios

气候情景 Climate scenarios	息县	淮滨	润河集	鲁台子	蚌埠
RF	103.57	93.98	94.79	94.70	198.57
SA	114.10	106.77	107.97	104.88	111.46

RF, RF 气候情景(RF climate scenario), 区域气候模式 RegCM3 在参考期(1961 年 1 月 1 日—1990 年 12 月 31 日)的气候模拟结果; SA, SA 气候情景(SA climate scenario), 在 IPCC SRES A2 排放情景下, 区域气候模式 RegCM3 在情景期(2071 年 1 月 1 日—2100 年 12 月 31 日)的气候模拟结果

SA, SA 气候情景(SA climate scenario), 在 SRES A2 排放情景下, 区域气候模式 RegCM3 在情景期(2071 年 1 月 1 日—2100 年 12 月 31 日)的气候模拟结果。

总之, SRES A2 排放情景下, 未来(2071—2100 年)年平均气温升高, 年降水量增加; 汛期极端过程降水增加, 汛期最大 9 d 降水量增大, 平均增幅都在 10% 以上。

3.2 气候变化对淮河流域汛期极端流量的影响

比较 RF 气候情景和 SA 气候情景驱动的 SWAT 流量模拟结果, 分析极端排放情景下淮河流域气候变化影响。

3.2.1 汛期极端流量的变化

与 RF 气候情景下汛期最大 9 d 平均流量的模拟结果比较(表 5), SA 气候情景下汛期最大 9 d 平均流量明显增大, 干流 5 个水文站汛期最大 9 d 平均流量的增幅都在 20% 以上, 其中润河集站增幅最大, 这与 SA 气候情景下润河集站控制流域的汛期最大 9 d 降水量增幅最大一致。

表 5 两种气候情景下 SWAT 模型多年平均汛期最大 9 d 平均流量模拟结果比较/(m³/s)

Table 5 The comparisons of the simulated maximum 9-day mean streamflow in flood season under RF and SA climate scenarios

气候情景 Climate scenarios	息县	淮滨	润河集	鲁台子	蚌埠
RF	198.65	214.17	480.41	826.52	1355.75
SA	241.40	305.11	708.52	1027.00	1632.35

3.2.2 汛期最大 9 d 平均流量概率分布特征的变化

Kolmogorov-Smirnov 分布拟合检验表明, GEV 分布拟合淮河干流 5 个水文站汛期最大 9 d 流量是合适的,

因此用 GEV 分布拟合 RF 和 SA 两种气候情景下 SWAT 模拟的汛期最大 9 d 流量。淮河干流 5 个水文站 RF 和 SA 两种气候情景下 SWAT 模拟的汛期最大 9 d 平均流量的分布参数(偏度和峰度)如表 6。气候变化对各站汛期最大 9 d 平均流量的分布参数影响不同。就概率分布的偏度而言,RF 气候情景下,研究流域下游两个水文站(鲁台子和蚌埠)的偏度值为负值,分布右偏。SA 气候情景下,只有蚌埠站最大 9 d 平均流量概率分布的偏度为负值,分布右偏,但负偏度相对减小。这表明研究流域的下游出现频率更高的汛期最大 9 d 平均流量的值相对较大,即研究流域下游更容易出现较大的极端流量,这与研究流域扇形水系以及流域地形等自然地理特征有关。

概率分布的峰度大于 3,表示汛期最大 9 d 平均流量的概率分布比正态分布陡峭。RF 气候情景下,除润河集站和蚌埠站的峰度小于 3 外,其余各站的峰度都大于 3。SA 气候情景下,淮河干流 5 个水文站的峰度都大于 3,而且峰度都大于 RF 气候情景。这表明 SA 气候情景下,研究流域汛期最大 9 d 平均流量的分布更加陡峭,极端流量的概率分布更加集中。因此,极端排放情景下的气候变化将导致极端流量的概率分布更加集中,更大的极端流量出现的频率更高。

表 6 两种气候情景下汛期最大 9 d 平均流量分布参数比较
Table 6 Skewness and kurtosis of the simulated maximum 9-day mean streamflow in flood season under RF and SA climate scenarios

指标 Indicator	气候情景 Climate scenarios	息县	淮滨	润河集	鲁台子	蚌埠
偏度 Skewness	RF	1.43	1.38	0.63	-0.28	-0.44
	SA	1.53	1.14	0.70	0.24	-0.20
峰度 Kurtosis	RF	5.74	5.01	2.81	3.10	2.21
	SA	6.47	4.10	3.51	3.96	3.57

3.2.3 汛期最大 9 d 平均流量重现期重现水平比较

用 GEV 分布拟合 RF 和 SA 两种气候情景下 SWAT 模拟的汛期最大 9 d 平均流量,并计算了重现期及相应重现水平(图 3)。给定重现期时,SA 气候情景下汛期最大 9 d 平均流量的重现水平远大于 RF 气候情景。在 SA 气候情景下,20 年一遇的极端流量,在 RF 气候情景下可能达到 50 年一遇甚至更高,这意味着极端排放情景下的气候变化将导致研究流域更大的洪涝风险。

随重现期的增大,两种气候情景下汛期最大 9 d 平均流量相应的重现水平都增大,但增大的幅度并不一致,SA 气候情景下汛期最大 9 d 平均流量相应的重现水平增幅更大。对于更高的重现期,SA 气候情景下极端流量重现水平的增幅也更大。因此,极端排放情景下的气候变化将导致淮河流域极端洪涝的风险大大增加。随重现期的增大,两种气候情景下 SWAT 模拟的汛期最大 9 d 平均流量相应的重现水平都增大,但越往下游,汛期最大 9 d 平均流量的重现水平增幅减小。因此,极端排放情景下的气候变化将导致研究流域下游极端流量概率对极端流量变化更敏感,下游洪涝压力更大。

总之,极端排放情景下的气候变化将导致淮河流域中上游极端洪涝的风险大大增加,研究流域下游极端流量概率对极端流量变化更敏感,下游也面临着更大的洪涝风险。

4 结论与讨论

构建了淮河流域中上游 SWAT 模型,用 RegCM3 在 IPCC SRES A2 温室气体排放情景(高排放情景)下的模拟结果(2071 年 1 月 1 日—2100 年 12 月 31 日)驱动 SWAT 模型,研究气候变化对淮河流域中上游汛期极端流量的影响,主要结论有:

- (1)构建的淮河中上游流域 SWAT 模型比较真实地模拟了淮河中上游流域逐月流量过程,也比较合理地重现了淮河中上游流域汛期最大 9 d 平均流量的特征。
- (2)在 SRES A2 气候变化情景下,淮河流域中上游未来(2071—2100 年)气温升高,降水量增加,降水变

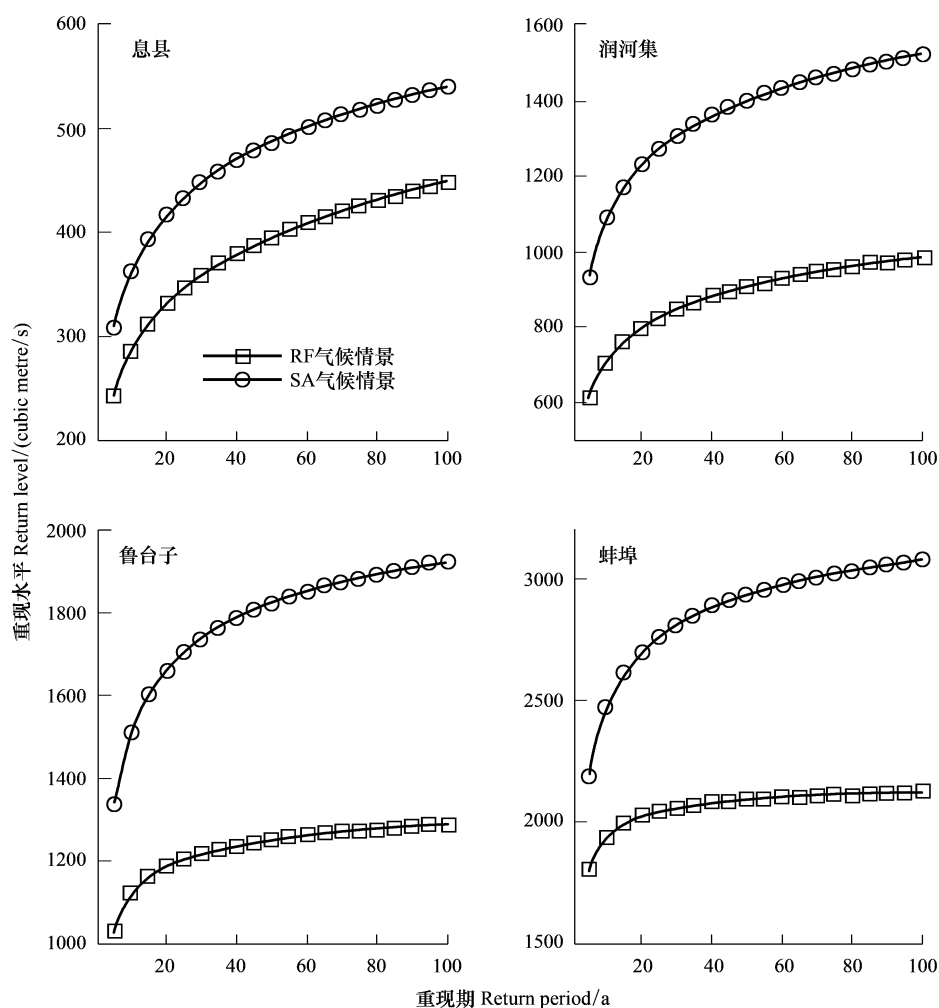


图3 两种气候情景下淮河干流主要水文站汛期最大9 d平均流量的重现期及重现水平的比较

Fig.3 Return periods and corresponded return level of the simulated maximum 9-day mean streamflow under RF and SA climate scenarios

率减小,降水的空间差异增大,颖河流域中游年降水量有较大幅度的减少,呈现暖干化的趋势。淮河流域中上游汛期最大9 d降水量增加,研究流域下游南部的极端过程降水及其概率都将有明显增大。

(3)在SRES A2排放情景下的气候变化将导致淮河流域中上游汛期极端流量大幅度增加,淮河中上游干流5个水文站汛期最大9 d平均流量的增幅都在20%以上。

(4)在SRES A2气候变化情景下,淮河流域中上游极端流量的概率分布更加集中,更大的极端流量出现的频率更高,研究流域下游更容易出现较大的极端流量。另一方面,研究流域下游极端流量概率对极端流量变化更敏感,也面临着更大的洪涝风险。

降水的空间格局、流域扇形水系以及流域地形等自然地理特征是淮河中上游流域形成“关门淹”的重要原因,但定量描述这些因素对淮河流域极端流量及洪涝的影响还需深入研究。

致谢:感谢江苏省气候变化协同创新中心和南京大学气候与全球变化研究院对该研究的支持。

参考文献 (References):

- [1] 汤克清, 杨贤为, 姚佩珍, 张强. 黄河中游致洪暴雨的特征分析. 灾害学, 1995, 10(3): 44-50.
- [2] 张增信, 栾以玲, 姜彤, 张强, 曾燕. 长江三角洲极端降水趋势及未来情景预估. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(3): 5-8.
- [3] 张建云, 王国庆, 刘九夫, 贺瑞敏. 国内外关于气候变化对水的影响的研究进展. 人民长江, 2009, 40(8): 39-40.

- [4] Bates B C, Kundzewicz Z W, Wu S, Palutikof J P. 气候变化与水. 政府间气候变化专门委员会的技术报告, 日内瓦: IPCC 秘书处, 2008.
- [5] 张爱民, 谢重阳. 淮河流域致洪暴雨特征及预警指标分析. 灾害学, 2005, 20(1): 50-52.
- [6] 魏凤英, 张婷. 淮河流域夏季降水的振荡特征及其与气候背景的联系. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(10): 1360-1374.
- [7] 王胜, 田红, 徐敏, 谢五三, 陶寅. 1961-2008 年淮河流域主汛期极端降水事件分析. 气象科技, 2012, 40(1): 87-91.
- [8] 叶金印, 黄勇, 张春莉, 李致家. 近 50a 淮河流域汛期降水日数和强度的分布与变化特征. 湖泊科学, 2013, 25(4): 583-592.
- [9] 郝振纯, 鞠琴, 王璐, 王慧敏, 江微娟. 气候变化下淮河流域极端洪水情景预估. 水科学进展, 2011, 22(5): 605-614.
- [10] Karl T R, Knight R W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(2): 231-241.
- [11] Gao X J, Shi Y, Song R Y, Giorgi F, Wang Y G, Zhang D F. Reduction of future monsoon precipitation over China: comparison between a high resolution RCM simulation and the driving GCM. Meteorology and Atmospheric Physics, 2008, 100(1-4): 73-86.
- [12] 徐影. 人类活动对气候变化影响的数值模拟研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2002.
- [13] Nakicenovic N, Swart R. Emission Scenarios IPCC Special Report on Emission Scenarios. 2000, 559(2): 612.
- [14] Arnold J G, Williams J R, Maidment D R. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(2): 171-183.
- [15] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406, Texas: Texas Water Resources Institute, 2011.
- [16] Jha M, Arnold J G, Gassman P W, Giorgi F, Gu R R. Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi River basin streamflows using SWAT. Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(4): 997-1015.
- [17] Franczyk J, Chang H J. 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.
- [18] Piniewski M, Voss F, Bärlund I, Okruszko T, Kundzewicz Z W. Effect of modelling scale on the assessment of climate change impact on river runoff. Hydrological Sciences Journal, 2013, 58(4): 737-754.
- [19] 林炳青, 陈兴伟, 陈莹, 刘梅冰. 流域景观格局变化对洪枯径流影响的 SWAT 模型模拟分析. 生态学报, 2014, 34(7): 1772-1780.
- [20] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, Peter S, 姚安坤. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响. 生态学报, 2014, 34(6): 1559-1567.
- [21] 宋艳华, 马金辉. SWAT 模型辅助下的生态恢复水文响应——以陇西黄土高原华家岭南河流域为例. 生态学报, 2008, 28(2): 636-644.
- [22] 王军德, 李元红, 李赞堂, 高菁, 金彦兆, 胡想全, 黄津辉. 基于 SWAT 模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究——以石羊河上游杂木河流域为例. 生态学报, 2010, 30(21): 5875-5885.
- [23] 刘昌明, 李道峰, 田英, 郝芳华, 杨桂莲. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究. 地理科学进展, 2003, 22(5): 437-445.
- [24] Chen J F, Li X B, Zhang M. Simulating the impacts of climate variation and land-cover changes on basin hydrology: A case study of the Suomo Basin. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 48(9): 1501-1509.
- [25] Shi P, Hou Y B, Xie Y Y, Chen C, Chen X, Li Q F, Qu S M, Fang X Q, Srinivasan R. Application of a SWAT model for hydrological modeling in the Xixian Watershed, China. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(11): 1522-1529.
- [26] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
- [27] 徐集云, 石英, 高学杰, Giorgi F. RegCM3 对中国 21 世纪极端气候事件变化的高分辨率模拟. 科学通报, 2013, 58(8): 724-733.
- [28] 张冬峰, 石英. 区域气候模式 RegCM3 对华北地区未来气候变化的数值模拟. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2854-2866.