

基于 SWAT 模型的秦淮河流域 气候变化水文响应研究

王怀志, 高玉琴, 袁玉, 郭玉雪
(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210000)

摘要: 为了解气候变化对水文水资源的影响机理,以秦淮河流域为研究区构建 SWAT 模型,使用 SWAT-CUP 对模型进行参数敏感性分析、率定及验证,并采用任意假设法设计未来气候情景,分析温度及降雨变化对流域径流及实际蒸散发量的影响。结果表明:模型在月径流模拟中具有较高的精度,适用于秦淮河流域气候变化下的水文响应研究;气温降低或降雨量上升都会引起流域径流量增加,反之则减少;实际蒸散发量与降雨量正相关,而实际蒸散发量对气温变化的响应不明显;平水年径流量对降雨量变化的响应较强,枯水年径流量对温度变化的响应较强;枯水年实际蒸散发量对降雨量变化的响应较强。

关键词: 气候变化; 降雨; SWAT 模型; 径流模拟; 水文响应; 秦淮河流域

中图分类号: P333 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)01-0081-07

Hydrological responses to climate change in Qinhuai river basin based on SWAT model

WANG Huaizhi, GAO Yuqin, YUAN Yu, GUO Yuxue

(College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to understand the impacts of climate change on hydrology and water resources, the established SWAT model in the Qinhuai River basin was used, the SWAT-CUP was used for the sensitivity analysis, calibration and validations of model parameters; runoff and actual evapotranspiration change in response to rainfall and temperature change were analyzed with assuming method to design future climate scenarios. The results indicated that: the SWAT model had high precision in monthly runoff simulation, and it can be used for researching hydrological response of the Qinhuai River basin under climate change; the declined temperature or increased precipitation would lead to increased runoff in the basin, on the contrary the runoff decreased; the actual evapotranspiration and precipitation were positively correlated, while the response of actual evapotranspiration to the change of temperature was not obvious; the runoff response to rainfall change was more stronger in the normal year, the runoff response to temperature change was more stronger in the dry year; and the actual evapotranspiration response to the rainfall change was more stronger in the dry year.

Key words: climate change; rainfall; SWAT model; runoff simulation; hydrological response; Qinhuai river basin

当今全球正经历着以变暖为主要特征的气候变化,对水文水资源产生了深刻而长远的影响,为了给未来水资源规划和管理提供科学依据,关于气候变化下流域水资源的时空分布变化研究逐渐引起人们关

注^[1-2]。气候变化影响水循环的过程复杂,表现为动态和非线性等特征^[3]。目前,气候变化研究基本遵循“未来气候情景设计-水文模型-影响评估”的模式,主要研究方法包括统计分析、情景假设、降尺度、模型

收稿日期:2016-06-09; 修回日期:2016-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51309076); 中央高校业务费科技前瞻性研究专项(2014B05814)

作者简介:王怀志(1990-),男,安徽太和人,在读硕士研究生,研究方向为水利水电工程。

通讯作者:高玉琴(1978-),女,四川成都人,副教授,硕士生导师,研究方向为水利规划与水利经济、洪水控制。

模拟、多模型耦合等^[4-6]。王蕊等^[7](2015)采用小波分析、相关分析及多元线性回归等方法,定量分析雅鲁藏布江中游地区气候要素变化及径流的响应。Leng Guoyong 等^[8](2015)以 RCP8.5 排放情景下 5 种 GCMs 为驱动,结合水文模型研究气候变化对中国气象、农业、水文干旱的影响。贺瑞敏等^[9](2015)采用任意假设法设计未来气候变化情景,研究海河流域径流对气候变化的响应机理。

SWAT 模型是具有很强物理机制的长时段流域分布式水文模型,能够模拟流域多种不同的水文物理过程^[10]。朱利等^[11](2005)应用 SWAT 模型研究汉江上游区水资源对气候变化响应,指出汉江流域降水的变化对水资源的影响要大于温度变化的影响。Somura 等^[12](2009)将 SWAT 模型应用到日本岛根县东部流域,通过设置气候情景模式,研究气候变化对希夷路流域实际蒸散发量、雪水当量、径流量以及真嗣湖盐度的影响。赵芳芳等^[13](2009)在气候-陆面单向连接系统中集成 GCMs 输出数据、降尺度模型以及 SWAT 模型,研究黄河源区未来不同时期的径流深的空间分布及响应。张利平等^[14](2011)根据 AR4 多模式 GCMs 输出资料,利用 SWAT 模型分析研究了 IPCCSRES - A2、A1B、B1 气候变化情景下降水、气温、径流和蒸发的年响应过程。郭军庭等^[15](2014)采用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化下径流的响应,提出在气候变化下应进一步优化土地利用的结构和方式。

秦淮河是江苏省省会南京市境内的主要河流,秦淮河流域的水资源管理对南京市水资源利用、防洪安全等意义显著,研究秦淮河流域气候变化下的流域水文响应,对加强南京市水资源的预测、规划和管理具有重要意义。目前,针对秦淮河流域气候变化的研究还较少。钱虹等^[16](2015)采用小波分析和 Mann - Kendall 非参数检验方法分别对 1961 - 2013 年秦淮河流域汛期气温和降水序列的趋势和周期变化特征以及 2000 - 2013 年流域汛期气温、降水和径流的变化趋势进行了分析。通过对历史数据趋势分析,对汛期气候变化对径流变化的影响进行研究,而没有考虑流域水循环过程以及未来的气候变化特征,不能很好地反应气候变化对水文水资源的影响过程。本文以秦淮河流域为研究区建立 SWAT 模型,对模型在流域月径流模拟中的效果进行评估,并采用任意假设法设计未来气候情景,研究流域在未来可能的 48 种降雨量和气温变化组合下的径流量和实际蒸散发量的响应规律以及丰、平、枯

典型年之间的响应强度差异。

1 流域概况及模型构建

1.1 流域概况

秦淮河流域位于长江下游江苏省境内,流域地形呈蒲扇形,四周为丘陵山地,腹部为平原区,流域总面积 2 631 km²(图 1)。流域南部水源为句容市宝华山的句容河,北源为南京市东庐山的溧水河。句容河和溧水河在江宁区西北村汇合成秦淮河干流,在江宁东山镇分为两支河流,分别从流域西北角的武定门闸和秦淮新河闸流出,汇入长江。流域属于亚热带湿润、半湿润季风气候区。流域多年平均降雨量 1 047.8 mm,多年平均气温 15.4℃,多年平均蒸发量 1 000 mm 左右,多年平均径流量 6.95 × 10⁸ m³。秦淮河流域土地利用主要有水田、旱地、城镇用地等。

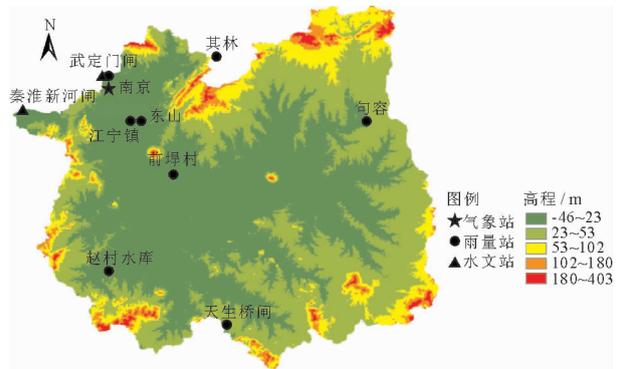


图 1 秦淮河流域水文气象站点分布

1.2 基础数据

建立秦淮河流域 SWAT 模型,需要的基础数据主要包括 DEM、土壤、土地利用、气象水文等数据。DEM 数据采用 SRTM 的地形高程数据(分辨率 90 m);土壤数据来源为 HWSO 土壤数据库(2008,比例尺 1: 100 万);土地利用数据来源为 WESTDC 数据产品(2000,比例尺 1: 10 万);气象数据为来源于南京气象站 1978 - 2007 年共 30 年的气象资料;降雨量数据采用流域内部及周边其林、天生桥、句容等 8 个雨量站 1986 - 2006 年的逐日观测成果;水文数据采用秦淮河流域出口秦淮新河闸和武定门闸 1986 - 2006 年间的观测径流量系列。秦淮河流域气象站、雨量站以及水文站分布如图 1 所示。

1.3 模型构建

基于 GIS 的 ArcSWAT 模型构建主要包括以下 4 个过程:

(1)流域划分:考虑秦淮河流域城市化水平高,下垫面条件受人类活动影响变化较为剧烈,采用

GoogleEarth 上描绘的实际水系作为 SWAT 生成水系的参考。设定集水面积阈值 4 000 hm²,并定义秦淮新河闸下游附近某点为流域总出口,流域最终被划分为 41 个子流域。

(2) 水文响应单元 (HRU) 分析:输入重分类后的土地利用数据、土壤数据以及坡度,设定阈值分别为 10%、10% 和 15%,流域生成 239HRUs。土地利用数据处理根据 SWAT 模型土地利用分类标准,对研究区土地利用数据进行重分类,并建立对应关系。土壤数据处理主要采用美国华盛顿州立大学开发的 SPAW 软件的 SWC 模块进行土壤相关参数计算,并建立土壤数据库。

(3) 输入数据:利用 SwatWeather 计算好天气发生器参数,并按要求导入 SWAT 输入数据库。气象站、降雨、温度数据采用实测数据,相对湿度、太阳辐射、风速等数据采用气象生成器模拟生成。

(4) SWAT 输入文件编辑:秦淮河流域包含水

库,需要对水库进行编辑。对秦淮河流域内的水库采用设置参数法模拟水库状态。

模型地表径流的计算采用 SCS 法,河道演算采用 Muskinggum 方法,潜在蒸散发量计算选择 Penman - Monteith 公式。

2 径流模拟

2.1 参数敏感性分析

SWAT 模型的参数敏感性分析以及率定和验证采用瑞士联邦水生科学与技术研究院开发的 SWAT - CUP 内嵌的 SUFI2 算法^[17]。它以 t - Stat 和 p - Value 参数为标准分析各参数的敏感性。其中,t - Stat 绝对值越大参数越敏感;p - Value 值决定了参数敏感性的重要程度,p - Value 值越接近于 0,参数越重要。选择 20 个径流相关参数进行敏感性分析,确定敏感性较高的 15 个参数进行下阶段的模型率定与验证。敏感性分析结果如表 1 所示。

表 1 参数敏感性分析结果

模型参数	物理意义	t - Stat	p - Value	初始值范围	最佳值
r_CN2. mgt	SCS 径流曲线数	29.79	0.00	[-0.2,0.2]	0.11
v_SLSUBBSN. hru	平均坡长度	-11.42	0.00	[10,150]	63.66
r_ESCO. hru	土壤蒸发补偿系数	9.25	0.00	[-0.5,0.5]	0.18
v_HRU_SLP. hru	平均坡度	8.43	0.00	[0,1]	0.00
v_GW_REVAP. gw	地下水蒸发系数	-7.73	0.00	[0,0.2]	0.02
r_SOL_K(1). sol	土壤饱和导水率	5.96	0.00	[-0.8,0.8]	0.80
r_SOL_BD(1). sol	水分体积密度	5.36	0.00	[-0.5,0.6]	0.59
v_GW_DELAY. gw	地下水延迟系数	-2.54	0.01	[30,450]	30.20
r_SOL_AWC(1). sol	土壤有效含水量	-2.08	0.04	[-0.2,0.4]	-0.02
r_USLE_K(1). sol	USLE 土壤侵蚀因子	1.82	0.07	[-0.2,0.2]	0.25
v_SMTMP. bsn	融雪最低气温	-1.48	0.14	[-20,20]	-17.22
r_CH_S2. rte	主河道平均坡度	1.47	0.14	[-0.2,0.2]	0.01
r_ALPHA_BNK. rte	河岸存储系数	1.39	0.17	[-0.5,0.5]	0.38
v_SMFMX. bsn	6 月 21 日最大雪融度	-1.22	0.22	[0,20]	11.80
v_ALPHA_BF. gw	基流系数	1.06	0.29	[0,1]	0.74

2.2 参数率定和验证

选取不确定系数 Nash - Suttcliffe 系数 (E_{ns}) 和相关系数 (R^2) 两个指标来评价模型的适用性,其表达式分别如下:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_{o,avg})^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{s,avg})(Q_{o,i} - Q_{o,avg})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{s,avg})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{o,avg})^2} \quad (2)$$

式中: Q_o 、 $Q_{o,i}$ 为实测值,m³/s; Q_s 、 $Q_{s,i}$ 为模拟值,m³/s; $Q_{o,avg}$ 为实测平均值,m³/s; $Q_{s,avg}$ 为模拟平均值,m³/s; n 为数据个数。

以秦淮新河闸和武定门闸 1986 - 2006 年月径流量系列为依据,对秦淮河流域 SWAT 模型进行率定与验证。模型参数率定的初始值范围和最佳值如表 1 所示。率定期和验证期月实测径流与模拟径流对比图如图 2 所示。

模型在率定期月模拟径流模拟值基本拟合了实际径流过程, R^2 达到 0.92, E_{ns} 达到 0.91,可见模拟精

度较高。对应验证期模型模拟的 R^2 和 E_{ns} 均为0.83, 模拟曲线与实测曲线基本吻合, 径流洪峰过程一致。

综上所述, SWAT 模型能够比较真实地模拟流域的径流过程, 可用于气候变化下的水文响应研究。

3 气候变化情景下的水文响应分析

3.1 气候变化情景设计

采用任意假设法设计未来气候变化情景, 用于研究气候变化下的水文响应, 即假设气候要素(主要是降雨和气温)增加或减少一定程度, 分析流域水文要素的变化趋势。根据全球和中国的气候模式的预估结果, 预计到2020年全国年平均气温将上升

1.3℃~2.1℃, 年平均降雨将增加2%~3%; 到2050年全国年平均气温上升2.3℃~3.3℃, 年平均降雨增加5%~7%; 到2100年全国年平均气温上升3.9℃~6.0℃, 年平均降水量增加11%~17%^[18]。

为了更好地模拟气候变化情景下的水文响应, 假设年降雨量在原基础上变化0、±2%、±4%、±8%、+14%, 最高和最低温度分别在原基础上变化0℃、±1℃、±2℃、+5℃, 利用秦淮河流域 SWAT 模型模拟48种气候变化情景下的水文过程。基于 SWAT 模型的秦淮河流域气候变化水文响应分析流程图如图3所示。

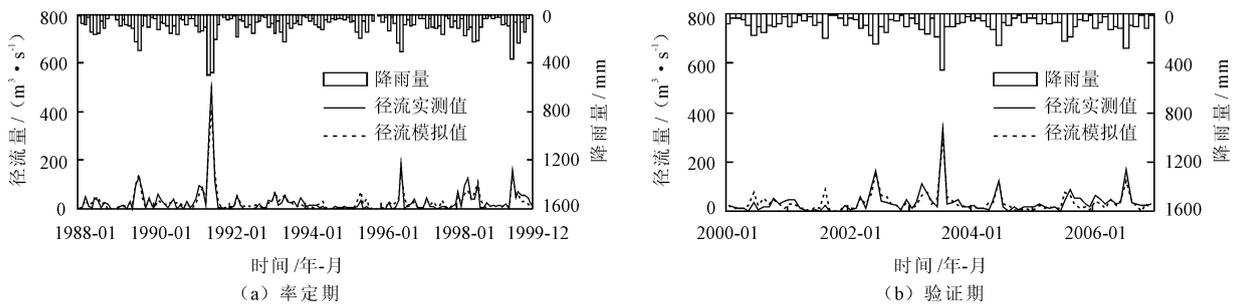


图2 率定期、验证期月实测径流与模拟径流对比图

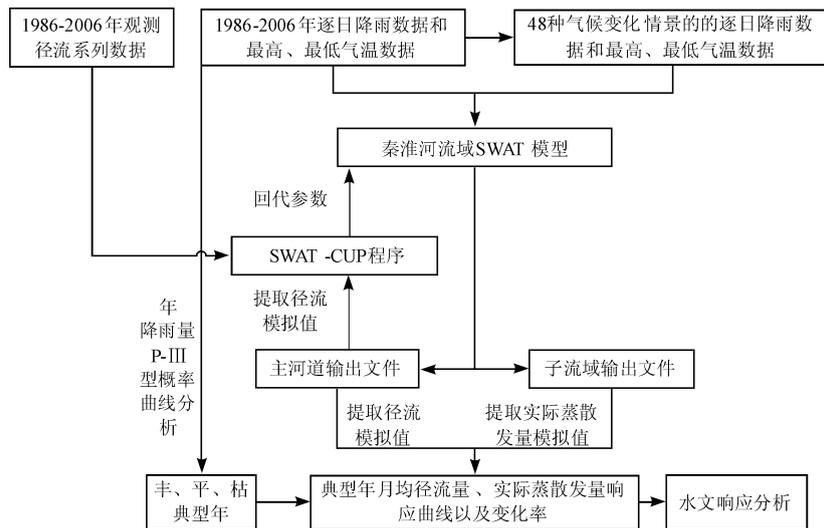


图3 基于 SWAT 模型秦淮河流域的气候变化水文响应分析流程图

3.2 水文响应分析

通过对流域1986-2006年间的年降雨量进行P-III型概率曲线分析, 取降雨量频率分别为20%、50%和80%, 确定流域降雨的丰、平、枯典型年, 用于气候变化下不同降雨典型年的水文响应分析。

(1) 径流响应分析。降雨量和气温是气候变化下影响径流量变化的主要因素, 不同典型年对于温度降低或降雨量增加, 流域径流量都增加, 反之则减

少。与保持不变气候情景模拟结果对比可知, 丰水年温度每上升1℃, 径流量约减少1.6%, 降雨每增加1%, 径流量约增加2.4%; 平水年温度每上升1℃, 径流量约减少2.4%, 降雨每增加1%, 径流量约增加3.9%; 枯水年温度每上升1℃, 径流量约减少3.8%, 降雨每增加1%, 径流量约增加3.1%。由此可见, 径流量响应对降雨变化比温度变化更为敏感, 而且不同典型年存在差异, 平水年对降雨变化

的响应较强,枯水年对温度变化响应较强。丰、平、典型年下径流量变化率统计如表 2 所示。枯水年气候变化的径流响应曲线如图 4 所示,不同

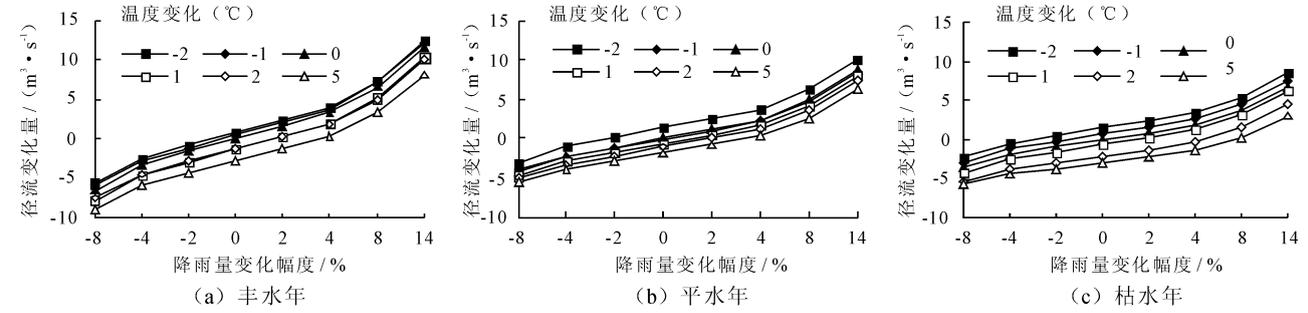


图 4 丰、平、枯水年气候变化对径流响应曲线

表 2 气候变化情景下径流量变化率

典型年	气温变化量		降雨量变化率 / %						
	$\Delta T / ^\circ\text{C}$		-8	-4	-2	0	2	4	8
丰水年	-2	-16	-7	-2	2	7	11	21	36
	-1	-17	-8	-3	1	6	11	20	35
	0	-19	-9	-5	0	5	9	19	33
	1	-22	-13	-08	-4	1	6	15	29
	2	-22	-13	-8	-4	1	5	14	29
	5	-26	-17	-13	-8	-4	1	1	23
枯水年	-2	-14	-2	4	1	16	22	35	55
	-1	-18	-7	-1	4	1	16	29	48
	0	-23	-12	-6	0	6	12	24	43
	1	-27	-16	-10	-4	2	8	21	40
	2	-33	-24	-19	-14	-8	-2	10	29
	5	-36	-28	-24	-19	-14	-9	2	20
平水年	-2	-19	-6	1	9	16	24	39	64
	-1	-25	-14	-7	-1	6	14	29	53
	0	-26	-14	-7	0	7	15	31	55
	1	-29	-18	-11	-4	3	11	26	51
	2	-31	-21	-14	-7	0	8	23	47
	5	-35	-25	-18	-12	-5	2	17	40

在降雨增加 14%, 温度减少 2°C 气候变化情景下径流量增加最多, 丰、平、枯水年分别相对于保持不变气候情景下径流模拟结果增加 36%、55%、64%; 在降雨减少 8%, 温度增加 5°C 气候变化情景下径流量减少最多, 丰、平、枯水年分别相应减少 26%、36%、35%。按照全球和中国气候模式的预估, 在 2020 年全国年平均气温近似增加 1°C 和年平均降雨量增加 2% 气候变化情景下, 丰、平、枯径流量相对于目前保持不变气候情景下径流模拟结果对应增加 1%、2%、3%; 在 2050 年全国年平均气温近似增加 2°C 和年平均降雨量增加 4% 气候变化情景下, 丰、平、枯径流量对应增加 5%、-2%、8%; 在 2100 年平均气温近似增加 5°C 和平均降雨量增加

14% 气候变化情景下, 丰、平、枯径流量对应增加 23%、20%、40%。可见不同气候情景下, 径流量变化差异是十分明显的, 加强未来气候变化特征的研究和提高气候变化预测的准确性对流域水资源评价、规划和管理是很有必要的。

由降雨量 - 径流量相关性系数 (见表 3) 可知, R^2 均不低于 0.99, 降雨径流关系密切。其中, 丰水年降雨量与径流量相关性最大, 枯水年次之, 平水年最小。

表 3 降雨量 - 径流量线性相关性系数

典型年	温度变化 $\Delta T / ^\circ\text{C}$					
	-2	-1	0	1	2	5
丰水年	0.9997	0.9998	0.9999	0.9999	0.9998	0.9999
枯水年	0.9993	0.9990	0.9994	0.9992	0.9959	0.9930
平水年	0.9986	0.9953	0.9972	0.9956	0.9955	0.9942

(2)实际蒸散发量响应分析。降雨是影响流域实际蒸散发量的主要因素,随着降雨增加,实际蒸散发量增加,反之则减少。与保持不变气候情景下实际蒸散发量模拟结果相比,降雨每增加1%,丰水年、平水年、枯水年实际蒸散发量约增加0.29%、0.29%和0.43%,可见枯水年对降雨量的变化响应较强。而在不同气温变化下,与保持不变气候情景下的模拟结果对

比,实际蒸散发量变化规律不明显。这与实际蒸散发对气候要素的敏感性有关,由于风速、太阳辐射以及相对湿度数据由天气发生器模拟生成,而风速等条件的变化都会引起实际蒸散发量的变化,除温度外其他因素的不可控性对研究产生了一定的影响。气候变化的实际蒸散发量响应曲线如图5所示。气候变化情景下实际蒸散发量变化率如表4所示。

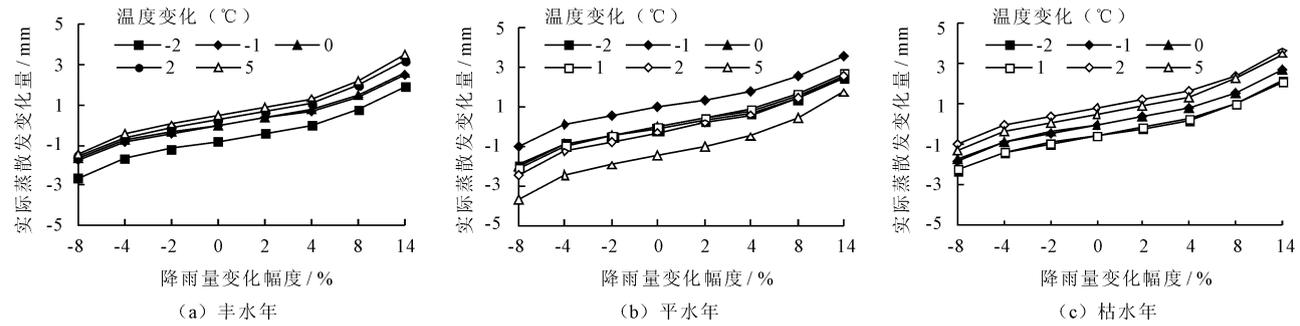


图5 丰、平、枯气候变化的实际蒸散发量响应曲线

表4 气候变化情景下实际蒸散发量变化率

典型年	气温变化量		降雨量变化率 / %						
	$\Delta T / ^\circ\text{C}$		-8	-4	-2	0	2	4	8
丰水年	-2	-4	-3	-2	-1	-1	0	1	3
	-1	-3	-1	-1	0	1	1	2	4
	0	-3	-1	-1	0	1	1	2	4
	1	-1	0	1	1	2	2	4	6
	2	-3	-1	0	0	1	2	3	5
	5	-2	-1	0	1	1	2	3	6
枯水年	-2	-5	-3	-2	-1	0	0	2	4
	-1	-4	-2	-1	0	1	2	3	6
	0	-4	-2	-1	0	1	2	3	6
	1	-5	-3	-2	-1	0	1	2	4
	2	-2	0	1	2	2	3	5	7
	5	-3	-1	0	1	2	3	5	7
平水年	-2	-3	-2	-1	0	0	1	2	4
	-1	-2	0	1	2	2	3	4	6
	0	-3	-1	-1	0	1	1	3	4
	1	-3	-2	-1	0	1	1	3	4
	2	-4	-2	-1	0	0	1	2	4
	5	-6	-4	-3	-2	-2	-1	1	3

与径流响应相比,实际蒸散发量对气候变化的响应较弱。相对于保持不变气候情景的实际蒸散发量模拟结果,在温度增加2℃或5℃和降雨量增加14%的气候情景下枯水年实际蒸蒸发量增加最多,为7%;在温度增加5℃和降雨量减少8%的气候情景下平水年实际蒸蒸发量减少最多,也仅为6%。降雨量-实际蒸散发量相关性系数 R^2 均不低于0.99(见表5),表明两者相关

性较高。其中,枯水年降雨量和实际蒸散发量相关性最大,丰水年次之,平水年最小。

表5 降雨量-实际蒸散发量线性相关性系数

典型年	温度变化 $\Delta T / ^\circ\text{C}$					
	-2	-1	0	1	2	5
丰水年	0.9974	0.9967	0.9986	0.9985	0.9988	0.9993
枯水年	0.9992	0.9981	0.9988	0.9991	0.9991	0.9997
平水年	0.9943	0.9918	0.9913	0.9900	0.9913	0.9965

4 结论与讨论

(1)本研究以秦淮河流域为研究区构建 SWAT 模型,率定期模型月径流模拟的相关性系数 R^2 和不确定系数 E_{ns} 都在 0.91 以上,验证期 R^2 和 E_{ns} 均为 0.83,表明所建水文模型在秦淮河流域具有较好的适用性,可用于流域不同气候情景下的流域水文过程模拟。

(2)秦淮河流域降雨量增加或气温降低都会引起径流量增加,且径流对降雨量变化的响应更为强烈;不同典型年差异体现在平水年降雨变化的径流响应较强,枯水年气温变化的径流响应较强。流域实际蒸散发量随着降雨量增加而增加,反之则减少,以枯水年的响应较为强烈;而温度变化下实际蒸散发量响应不明显。不同气候情景下流域径流量变化最大相差约 99%,实际蒸散发量变化相差约 13%,可见流域水文要素对气候变化的响应存在明显差异。

(3)在 21 世纪气温持续升高和年降雨量增加的气候变化情景下,研究结果表明秦淮河流域径流量和实际蒸散发量会出现不同程度的增加,流域未来水资源整体呈增加趋势,需要采取相应的措施以应对气候变化下水资源变化带来的影响。

(4)受时间和资料等客观条件的限制,本研究只采用任意假定法设计未来气候情景,考虑了有限的降雨和温度变化可能的组合,对未来气候变化的预测与实际存在偏差。此外,由于秦淮河流域位于长江三角洲地区,城市化进程发展较快,人类活动也是影响流域水文循环过程的不可忽略的因素,未来还需要将人类活动和气候变化两种因素结合起来,以准确预估流域未来气候变化对水文水资源的影响。

参考文献:

[1] 王国庆,张建云,刘九夫,等. 气候变化对水文水资源影响研究综述[J]. 中国水利,2008(2):47-51.

[2] 张建云,王国庆,刘九夫,等. 国内外关于气候变化对水的影响的研究进展[J]. 人民长江,2009,40(8):39-41.

[3] 屈吉鸿,石红旺,李志岩. 基于 SWAT 模型的青龙河流域气候变化径流响应研究[J]. 水力发电学报,2015,34(4):8-15.

[4] 徐宗学,程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报,2010,41(9):1009-1017.

[5] 顾万龙,竹磊磊,许红梅,等. SWAT 模型在气候变化对水资源影响研究中的应用[J]. 生态学杂志,2010,29(2):395-400.

[6] 何霄嘉,王国庆,鲍振鑫. 气候、植被变化与水文循环响应研究进展及展望[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):1-5.

[7] 王蕊,姚治君,刘兆飞,等. 雅鲁藏布江中游地区气候要素变化及径流的响应[J]. 资源科学,2015,37(3):619-628.

[8] Leng Guoyong, Tang QiuHong, Scott Rayburg. Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China[J]. Global and Planetary Change 2015(126):23-34.

[9] 贺瑞敏,张建云,鲍振鑫,等. 海河流域河川径流对气候变化的响应机理[J]. 水科学进展,2015,26(1):1-9.

[10] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005 [R]. Temple, Texas: Grssland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2005.

[11] 朱利,张万昌. 基于径流模拟的汉江上游区水资源对气候变化响应的研究[J]. 资源科学,2005,27(2):16-22.

[12] Somura H, Arnold J, Hoffman D, et al. Impact of climate change on the Hii River basin and salinity in Lake Shinji: a case study using the SWAT model and a regression curve [J]. Hydrological Processes,2009(23):1888-900.

[13] 赵芳芳,徐宗学. 黄河源区未来气候变化的水文响应[J]. 资源科学,2009,31(5):722-730.

[14] 张利平,曾思栋,王任超,等. 气候变化对滦河流域水文循环的影响及模拟[J]. 资源科学,2011,33(5):966-974.

[15] 郭军庭,张志强,王盛萍,等. 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[J]. 生态学报,2014,34(6):1559-1567.

[16] 钱虹,栾承梅,吴炳娟. 秦淮河流域汛期气候变化及其对径流的潜在影响[J]. 科学技术与工程,2015,15(5):5-10.

[17] Abbaspour K C. SWAT - CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Programs [M]. Duebendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag,2007:95.

[18] 秦大河,丁一汇,苏纪兰等. 中国气候与环境变化及未来趋势[J]. 气候变化研究进展,2005,1(1):4-9.