

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.01.006

气候变化对鄱阳湖流域径流的影响

邓 鹏,孙善磊,黄鹏年

(南京信息工程大学水文与水资源工程学院,江苏 南京 210044)

摘要:为研究未来气候变化对鄱阳湖流域径流的影响,构建了 0.1°分辨率 VIC 水文模型,采用均匀设计法率定参数。应用 CMIP5 多模式气象数据结果驱动 VIC 模型,对 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的鄱阳湖流域径流变化进行评估。结果表明,在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下未来期(2026—2040 年)较基准期(2006—2020 年)径流呈增加趋势,在 RCP8.5 情景下径流呈减少趋势。各种模式都在汛期径流有增加趋势,枯季径流有减小趋势,发生水文极端事件的态势更加明显。

关键词:气候变化;鄱阳湖;径流;水文模型;VIC 模型;气候模式

中图分类号:P339 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2020)01-0039-07

Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin

DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian

(School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information
Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to study the influence of future climate change on runoff in the Poyang Lake Basin, the VIC hydrological model with 0.1° resolution was constructed and the parameters were calibrated by the uniform design method. The CMIP5 multi-model meteorological dataset were used to drive the VIC model to evaluate the runoff changes in the Poyang Lake Basin under the RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios. The results show that under the scenarios of RCP2.6 and RCP4.5, the runoff during the future period (2026—2040) is higher than that during the baseline period (2006—2020), and the runoff under the RCP8.5 scenario is decreasing. The runoff of all models has an increasing trend in the flood season, while it has a decreasing trend in the dry season, which indicated that the occurrence of hydrological extreme events is even more obvious.

Key words: climate change; Poyang Lake; runoff; hydrologic model; VIC model; climate model

根据 IPCC(intergovernmental panel on climate change)第 5 次评估报告,在过去的百年里全球平均增温 0.74℃±0.18℃,并预测 21 世纪末全球地表气温将可能升高 0.3~4.8℃^[1]。气候变化会对自然生态环境产生严重影响,并增加水文极端事件发生概率,使防洪抗旱的任务更加艰巨。因此,气候变化对水资源及水文过程的影响已成为全世界的研究热点^[2-4]。随着水文及气候数值模拟技术的快速发展,许多学者采用气候模式与陆地水文模型结合的方法研究气候变化对水资源的影响^[5-10]。气候变化引起的效应对地区及国家的可持续发展具有举足轻重的重要性^[11-12]。

鄱阳湖位于江西省北部,是我国最大的淡水湖,湖区面积约 3960 km²。鄱阳湖流域水量对饮用水、灌溉、工农业都有重要影响^[13-15]。近年来湖区及流域内水旱灾害频繁,使湖区生态环境及整个流域的水资源管理得到更多关注^[16-17]。虽然已有学者展开气候变化对鄱阳湖流域径流影响的研究^[18-20],但这些研究主要是使用历史气象数据间的计算对比,而对于未来气候变化情景对鄱阳湖流域径流的影响研究甚少。因此,本研究

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20150922)

作者简介:邓鹏(1983—),男,副教授,博士,主要从事水文气象学研究。E-mail: dp@nuist.edu.cn

引用本文:邓鹏,孙善磊,黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):39-45.

DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(1):39-45.

对多模式下不同 RCP(repetitive concentration pathways)情景的鄱阳湖流域径流变化情况进行分析,旨在为未来气候变化对鄱阳湖流域径流影响评估提供科学依据。

1 研究区域及数据

1.1 流域概况

采用 SRTM 的 90 m 分辨率 DEM^[21] 生成鄱阳湖流域水系及边界(图 1)。鄱阳湖流域面积为 $1.65\times10^5\text{ km}^2$,地处北纬 $24^{\circ}29'\sim30^{\circ}04'$ 、东经 $113^{\circ}34'\sim118^{\circ}28'$ 之间。收集了流域内 79 个气象站的气象资料,包括每日降水、平均风速、最高和最低气温。为了率定模型参数,搜集了流域上游峡山、梅港、赛塘、高沙这 4 个站的每日流量资料,它们的集水面积分别为 $1.60\times10^4\text{ km}^2$ 、 $1.52\times10^4\text{ km}^2$ 、 $3.15\times10^3\text{ km}^2$ 、 $5.30\times10^3\text{ km}^2$ 。这些气象和流量资料时间都是 1990—2003 年。

1.2 未来气候数据

采用 CMIP5 的模式数据^[22] 作为未来气候变化的研究数据。CMIP 计划的第 5 个阶段收集了世界各地领先的 23 个模式组约 50 多个模式及其模拟试验结果^[23]。本研究采用 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 这 3 种气候变化情景下的 GFDL-ESM2M、HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR、NorESM1-M 这 4 种气候模式数据集进行计算。这里以 2006—2020 年为基准期,2026—2040 年为未来期,基准期和未来期都是 15 a。由于不同模式间存在系统误差,所以用各模式的基准期和未来期结果进行比较来分析气候变化的影响。采用每种模式不同情景下的每日降水、最高和最低气温、平均风速数据模拟径流变化情况。

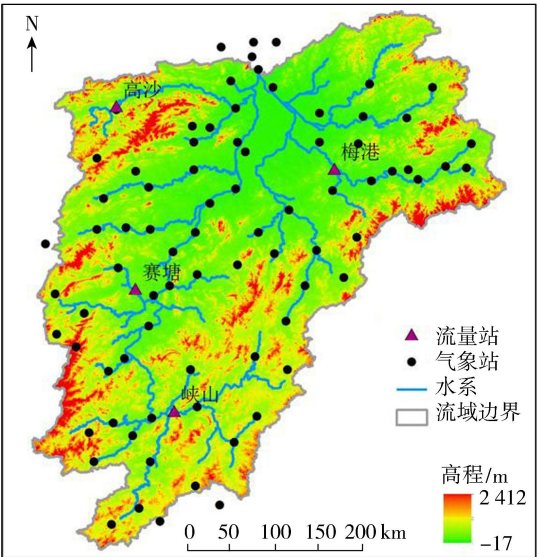


图 1 鄱阳湖流域水系及资料站点分布

Fig.1 River network and gauge stations of the Poyang Lake Basin

2 研究方法

2.1 VIC 模型

VIC(variable infiltration capacity)模型是一种求解水量和能量平衡的大尺度水文模型^[24]。该模型被广泛应用于径流模拟、气候变化、陆气耦合等研究中。模型计算中每个网格独立计算产流,然后采用 Lohmann 等^[25]提出的模型计算汇流,其中坡地汇流采用单位线法,河网汇流采用线性圣维南方程^[26]。本研究以 0.1°分辨率网格建立模型,鄱阳湖流域共覆盖 1620 个计算网格。

2.2 模型输入

VIC 模型的输入包括气象数据、高程数据和一系列与土壤类型和土地覆盖有关的参数。本研究中采用的数据和参数如下:(a)气象数据:气象数据的输入为每日降水、最高和最低气温、平均风速。采用反距离权重法将 79 个气象站数据以及气候模式数据插值到每个计算网格点。(b)高程数据:由于计算网格较大,采用 SRTM 的 1 km 分辨率 DEM 重采样到每个计算网格点。(c)土壤类型:采用联合国粮农组织提供的 10 km 分辨率土壤类型数据^[27]。根据一些研究论文^[28-29]数据设置与土壤类型有关的参数,包括土壤密度、饱和导水率、凋萎含水量、田间持水量、Campbell 方程指数。(d)土地覆盖:采用马里兰大学提供的 1 km 分辨率土地覆盖数据^[30]。参考陆地数据同化系统^[31]成果设置植被覆盖参数,包括叶面积指数、短波反照率、植被糙率、产生植物散发的最小短波辐射量、辐射衰减系数等。(e)其他确定性参数:采用 Nijssen 等^[32]开发的 0.5°分辨率全球数据集重采样到每个计算网格点,设定基流曲线方程指数、土壤水扩散系数、土粒密度、裸地及雪地的地面糙率等参数。(f)率定参数:模型设置土壤分为 3 层,顶层土壤厚度设为 0.1 m,那么模型有 6 个参数需要率定。6 个参数分别为可变下渗曲线形状参数 B 、深层土壤可产生的最大地下径流 D_m 、非线性地下径流产生时地下径流占 D_m 的比例 D_s 、非线性地下径流产生时深层土壤含水量占最大土壤含水量的比例 W_s 、下层土壤厚度 d_2 、深层土壤厚度 d_3 ,它们相应的取值范围分别为 $0\sim0.4$ 、 $0\sim30\text{ mm/d}$ 、 $0\sim1.0$ 、 $0.5\sim1.0$ 、 $0.1\sim1.5\text{ m}$ 、 $0.1\sim1.5\text{ m}$ 。

2.3 参数率定

采用均匀设计法进行参数率定^[33]。该方法主要是采用均匀设计理论在参数的取值范围区间内进行重构,确定最优组合。与其他参数率定方法相比,均匀设计法在保证模拟效果的同时可以极大地减少工作量。这里采用洪量相对误差 R_e 、相关系数 C_o 和 Nash 效率系数^[34] N_s 作为模型参数率定的目标函数。

3 结果分析

3.1 模型参数率定

采用观测站点资料率定 VIC 模型参数,以 1990—2000 年为率定期、2001—2003 年为检验期。根据需要率定的参数,转化为 6 因素 10 水平的均匀性设计,从而得到 10 种参数方案如表 1 所示。采用率定期资料,计算每种参数方案的月径流结果目标函数值(图 2)。从图 2 可以看出,参数方案 8 的流域平均 R_e 、 C_o 、 N_s 分别达到-4.12%、0.96 和 0.90,其中峡山、梅港、赛塘和高沙的 N_s 分别达到 0.94、0.94、0.86 和 0.87,所以选择方案 8 的参数作为率定的模型参数。采用方案 8 的参数计算率定期及检验期的月径流结果,如图 3 所示。在检验期,峡山、梅港、赛塘和高沙的 R_e 分别为-5.35%、-7.55%、-1.55% 和 8.91%, N_s 分别为 0.86、0.88、0.91 和 0.81。均匀设计方法简单、易实现,同时也能得到比较好的结果。VIC 模型对鄱阳湖流域月径流模拟效果较好,作为分析气候变化的工具有很好的适用性,采用均匀设计方法率定 VIC 模型参数能满足计算要求。

表 1 均匀性设计参数方案

Table 1 Parameters schemes of the uniform design method

方案	B	$D_m/(mm \cdot d^{-1})$	D_s	W_s	d_2/m	d_3/m	方案	B	$D_m/(mm \cdot d^{-1})$	D_s	W_s	d_2/m	d_3/m
1	0.04	6	0.3	0.75	1.05	1.50	6	0.24	3	0.7	0.90	1.35	0.75
2	0.08	12	0.6	1.00	0.45	1.35	7	0.28	9	1.0	0.60	0.75	0.6
3	0.12	18	0.9	0.70	1.50	1.20	8	0.32	15	0.2	0.85	0.15	0.45
4	0.16	24	0.1	0.95	0.90	1.05	9	0.36	21	0.5	0.55	1.20	0.3
5	0.20	30	0.4	0.65	0.30	0.90	10	0.40	27	0.8	0.80	0.60	0.15

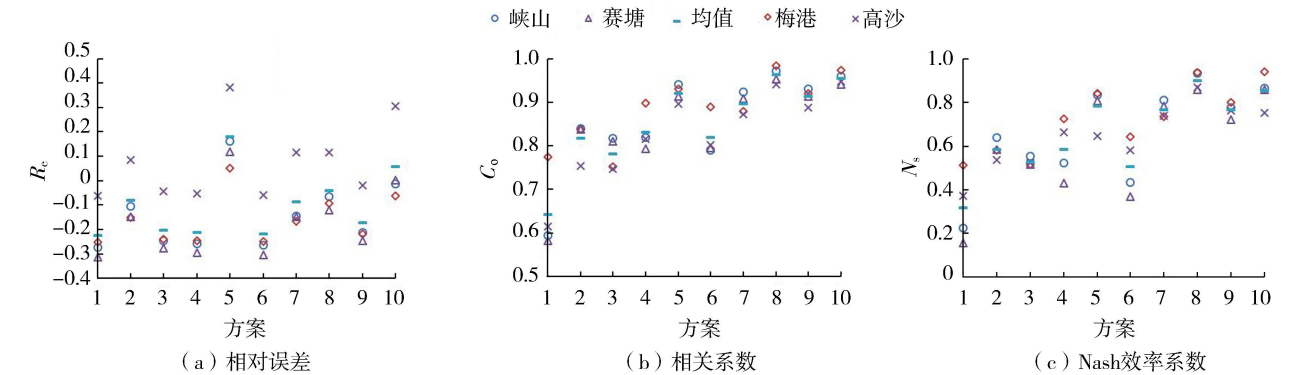


图 2 率定期 1990—2000 年各参数方案月径流结果目标函数值

Fig.2 Objective function values of monthly flow during the calibration period 1990—2000

3.2 气候变化对径流空间分布影响

用基准期和未来期各种模式情景的气象数据运行率定好的 VIC 模型,模拟得到未来气候变化下多年平均径流深变化的空间分布,如图 4 所示。在 RCP2.6 情景下,GFDL-ESM2M、HadGEM2-ES 和 IPSL-CM5A-LR 模式呈现流域东南部径流有明显增加趋势;GFDL-ESM2M 模式下流域西北、HadGEM2-ES 模式下流域西部和 IPSL-CM5A-LR 模式下流域北部径流有明显减少趋势;NorESM1-M 模式呈现北部径流增加、中部径流减少趋势。总的来看,在 RCP2.6 情景下,除了 NorESM1-M 模式,其他模式大体呈现流域东南径流增加、西北径流减少趋势。在 RCP4.5 情景下,各种模式下流域径流都普遍增加,其中 GFDL-ESM2M 模式呈现流域南部增加趋势最大,其他模式呈现流域中部地区径流增加最大。在 RCP8.5 情景下,各种模式变化趋势的空间分布形式有较大区别,但是各种模式下径流都呈普遍减小趋势。可以发现,虽然不同模式情景下径流变化的分布情况有一定差别,但总的来说各种模式都是在 RCP4.5 情景下径流增大最多、在 RCP8.5 情景下径流减少最多。

这里也计算了各种模式情景下流域多年面平均径流及变化率,如表 2 所示。在 RCP2.6 情景下,流域多

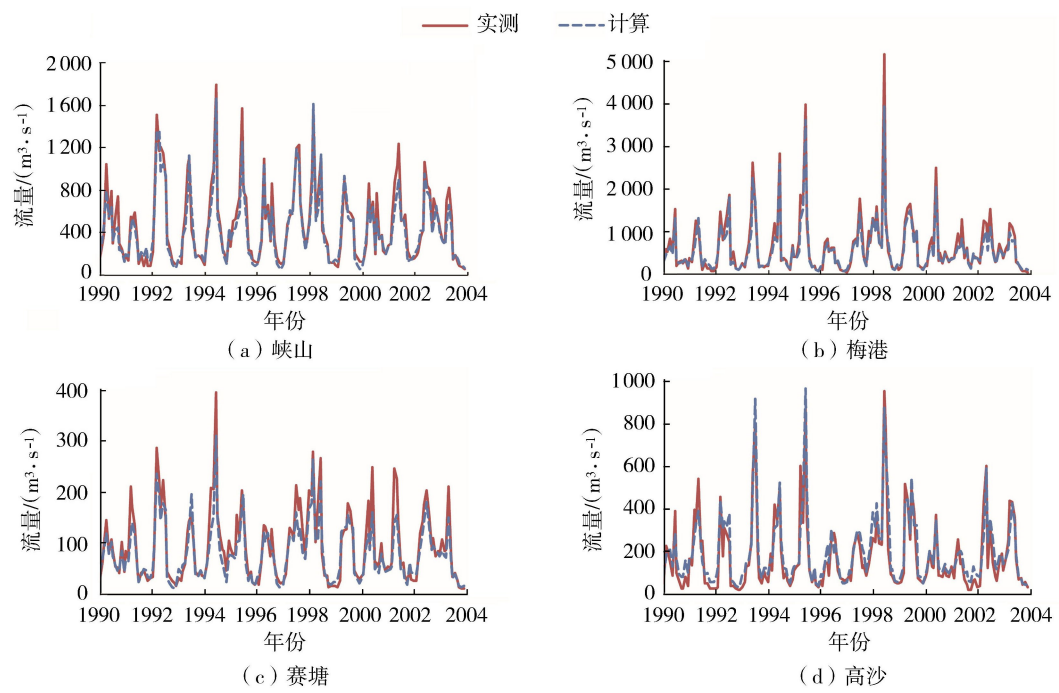
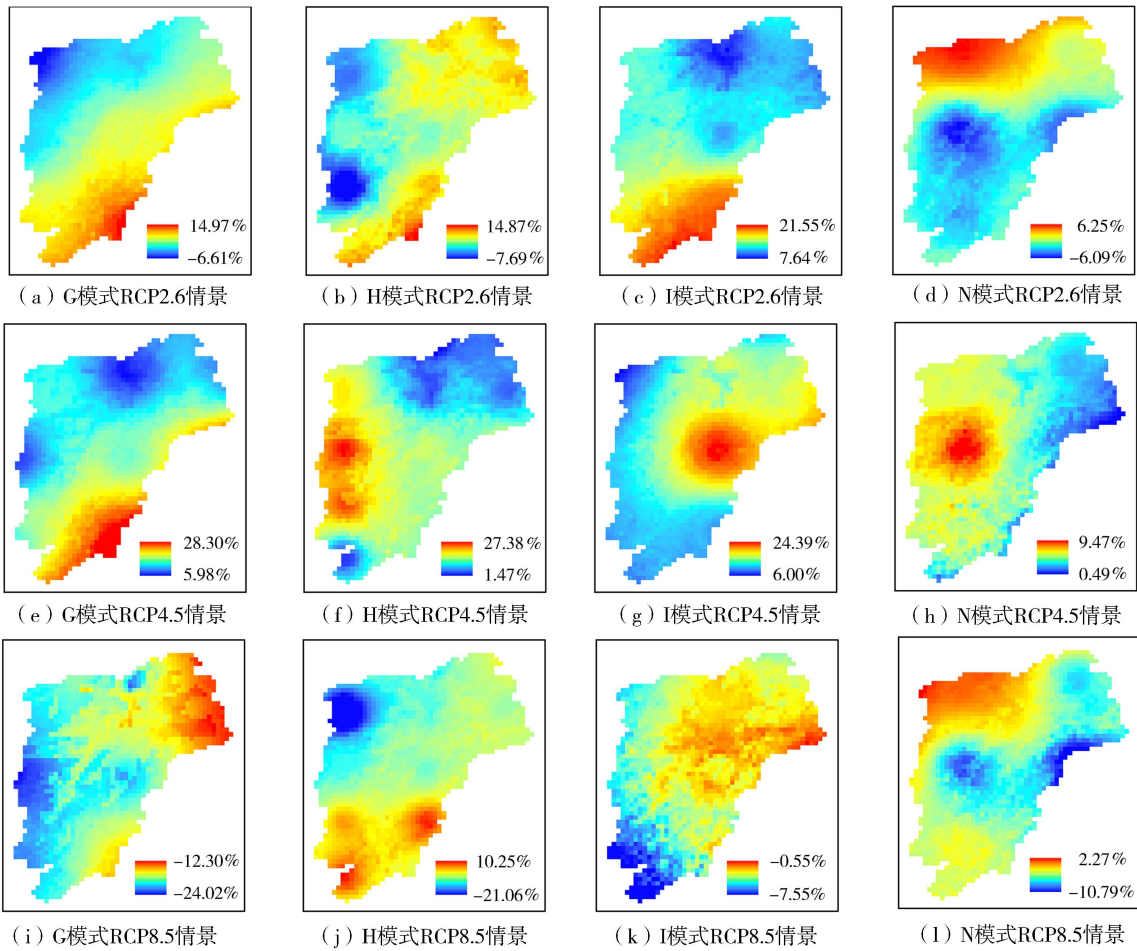


图3 率定期和检验期月径流实测与计算结果对比

Fig.3 Comparison of observed and calculated monthly flow between the calibration and validation periods



G:GFDL-ESM2M H:HadGEM2-ES I:IPSL-CM5A-LR N:NorESM1-M

图4 各种模式情景下多年平均径流变化率空间分布

Fig.4 Distribution of relative changes in annual mean runoff under each scenario

表 2 各模式情景下流域多年平均径流及变化率

Table 2 Annual mean runoff and relative changes of the basin area under each scenario

气候模式	RCP2.6 情景			RCP4.5 情景			RCP8.5 情景		
	基准期 径流/mm	未来期 径流/mm	变化率/%	基准期 径流/mm	未来期 径流/mm	变化率/%	基准期 径流/mm	未来期 径流/mm	变化率/%
GFDL-ESM2M	125.25	130.28	4.02	121.01	137.44	13.58	133.37	108.84	-18.39
HadGEM2-ES	226.76	237.39	4.68	198.08	224.01	13.09	216.48	212.28	-1.94
IPSL-CM5A-LR	73.99	83.52	12.88	65.61	75.31	14.78	73.98	71.88	-2.84
NorESM1-M	120.45	120.71	0.22	100.69	105.92	5.19	99.45	95.61	-3.86

年平均径流增大幅度在 0.22% ~ 12.88% 范围。在 RCP4.5 情景下,除了 NorESM1-M 模式外,其他模式径流增大幅度在 13.09% ~ 14.78% 范围。在 RCP8.5 情景下,各种模式综合来看,径流减大幅度在 1.94% ~ 18.39% 范围。各种模式在各种情景下的增减趋势相一致,并且未来都是在 RCP4.5 情景下径流最大,在 RCP8.5 情景下径流最小。

3.3 月径流变化分析

为了分析径流的年内变化情况,统计各种模式情景下月平均径流变化率(图 5),并进行综合对比分析。在 RCP2.6 情景下,各种模式的总径流量增加趋势大于减小趋势,其中 IPSL-CM5A-LR 模式、HadGEM2-ES 模式结果的变化幅度较大。在 RCP4.5 情景下,各种模式在 3—7 月径流呈现较大的递增趋势。在 RCP8.5 情景下,各种模式在 3—7 月径流呈增加趋势,而后呈减小趋势。总的来看,各种模式在汛期径流都有增加趋势,而在枯水期径流都有减少趋势。该结果说明在未来气候变化情景下,发生水文极端事件的态势更加明显。在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下,总径流增加趋势更明显。在 RCP8.5 情景下,总径流减小的趋势更明显。

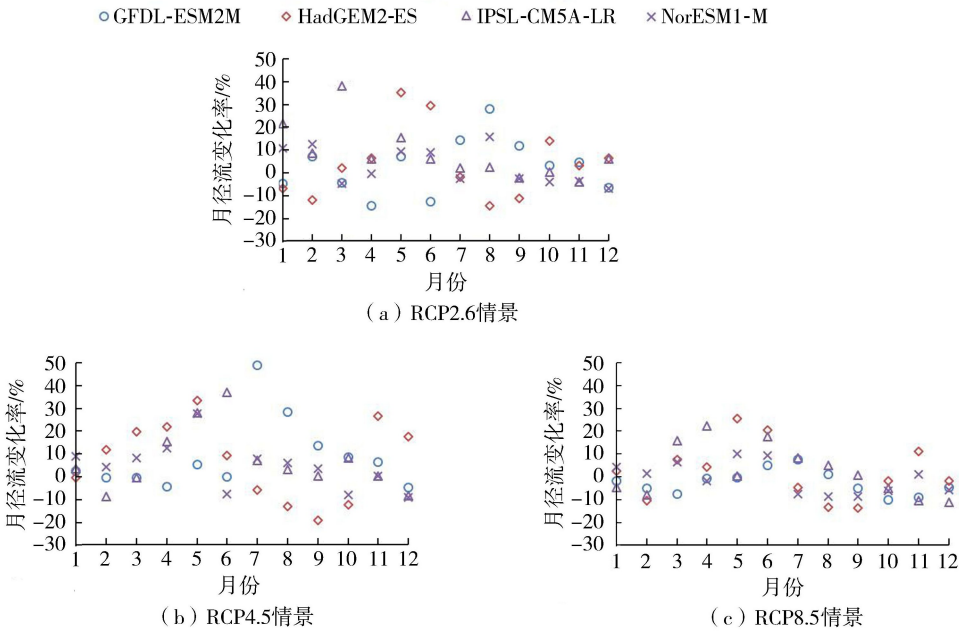


图 5 各模式情景下月径流变化率
Fig. 5 Relative changes in monthly runoff under each scenario

4 结 论

- a. 均匀设计法大幅度提高了 VIC 模型参数率定效率,VIC 模型对鄱阳湖流域月径流有较好的模拟结果,在该地区有较好的适用性。
- b. 各种模式都是在 RCP2.6 情景下径流增大,在 RCP4.5 情景下径流增加幅度最大,在 RCP8.5 情景下径流减小。
- c. 各种模式都在汛期径流有增加趋势,在枯水期径流有减小趋势,发生水文极端事件的态势更加明显。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis: contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 徐宗学, 刘浏. 气候变化影响下的流域水循环: 以长江和黄河典型流域为例[J]. 气象科技进展, 2016, 6(3): 123-133. (XU Zongxue, LIU Liu. Impact of climate change on hydrological cycle: case studies in the Yangtze River and Yellow River Basins [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6(3): 123-133. (in Chinese))
- [3] 吴丽, 张爱静. 气候变化和人类活动对大凌河上游流域径流的影响[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2): 10-15. (WU Li, ZHANG Aijing. Effects of climate change and human activities on runoff in upper Daling River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 10-15. (in Chinese))
- [4] AL-SAFI H I J, SARUKKALIGE P R. Assessment of future climate change impacts on hydrological behavior of Richmond River Catchment [J]. Water Science and Engineering, 2017, 10(3): 197-208.
- [5] 黄亚, 肖伟华, 陈立华, 等. 基于 VIC 模型的气候变化对红水河上游流域径流影响研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(1): 406-415. (HUANG Ya, XIAO Weihua, CHEN Lihua, et al. Impacts of climate change on runoff in upper reaches of Hongshui River Watershed based on VIC model [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2018, 43(1): 406-415. (in Chinese))
- [6] WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, XU Yueping, et al. Estimation of future water resources of Xiangjiang River Basin with VIC model under multiple climate scenarios [J]. Water Science and Engineering, 2017, 10(2): 87-96.
- [7] 夏伟, 周维博, 何庆龙, 等. 气候变化和人类活动对灞河流域输沙量影响的定量评估[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(4): 51-56. (XIA Wei, ZHOU Weibo, HE Qinglong, et al. Quantitative evaluation on impact of climate change and human activities on sediment discharge in Bahe River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(4): 51-56. (in Chinese))
- [8] 李洋洋, 白洁芳, 周维博, 等. 灞河流域气候因子对水沙变化的影响[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 98-105. (LI Yangyang, BAI Jiefang, ZHOU Weibo, et al. Impact of climate factors on variations of water and sediment in Bahe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 98-105. (in Chinese))
- [9] 王卫光, 陆文君, 邢万秋, 等. 黄河流域 Budyko 方程参数 n 演变规律及其归因研究[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 7-13. (WANG Weiguang, LU Wenjun, XING Wanqiu, et al. Analysis of change and attribution of Budyko equation parameter n in Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 7-13. (in Chinese))
- [10] CHIN D A. On the relationship between curve numbers and phi indices [J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(3): 187-195.
- [11] 刘璐瑶, 胡兴球, 康凯. 区域经济一体化与区域层面水资源合作开发机制研究[J]. 水利经济, 2019, 37(5): 31-34. (LIU Luyao, HU Xingqiu, KANG Kai. Economic integration and cooperation and development mechanism of water resources at regional level [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(5): 31-34. (in Chinese))
- [12] 金君良, 何健, 贺瑞敏, 等. 气候变化对淮河流域水资源及极端洪水事件的影响[J]. 地理科学, 2017, 37(8): 1226-1233. (JIN Junliang, HE Jian, HE Ruimin, et al. Impacts of climate change to water resources and extreme hydrological event in the Huaihe River Basin [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(8): 1226-1233. (in Chinese))
- [13] 欧阳千林, 王婧, 司武卫, 等. 鄱阳湖入江水道冲淤变化特征[J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 60-64. (OUYANG Qianlin, WANG Jing, SI Wuwei, et al. Characteristics of scouring and deposit change in waterway of Poyang Lake to Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 60-64. (in Chinese))
- [14] 周建军, 张曼. 长江鄱阳湖问题的原因及湖口建闸的影响[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 1-12. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man. Eco-problem of Poyang Lake in Yangtze River and effect of sluice gate construction at Lake's outlet [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 1-12. (in Chinese))
- [15] 高冰, 任依清. 鄱阳湖流域 1961—2010 年极端降水变化分析[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(1): 31-35. (GAO Bing, REN Yiqing. Changes of extreme precipitation events in Poyang Lake Basin from 1961 to 2010 [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(1): 31-35. (in Chinese))
- [16] 王建平, 李发鹏, 孙嘉. 关于河湖生态流量保障的认识与思考[J]. 水利经济, 2019, 37(4): 9-12. (WANG Jianping, LI Fapeng, SUN Jia. Understanding and thoughts of ensuring ecological flow of rivers and lakes [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(4): 9-12. (in Chinese))
- [17] 张海滨, 尹鑫, 李伟. 我国河湖生态流量保障对策体系研究[J]. 水利经济, 2019, 37(4): 13-16. (ZHANG Haibin, YIN

- Xin, LI Wei. System of ecological flow safeguard measures for rivers and lakes in China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(4): 13-16. (in Chinese))
- [18] 刘剑宇, 张强, 邓晓宇, 等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流过程影响的定量分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(2): 432-443. (LIU Jianyu, ZHANG Qiang, DENG Xiaoyu, et al. Quantitative analysis the influences of climate change and human activities on hydrological processes in Poyang Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(2): 432-443. (in Chinese))
- [19] 叶许春, 刘健, 李相虎, 等. 气候和人类活动对赣江径流变化的作用分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 196-203. (YE Xuchun, LIU Jian, LI Xianghu, et al. Effects of climate variability and human activities on runoff variation of Ganjiang River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(3): 196-203. (in Chinese))
- [20] 刘贵花, 齐述华, 朱婧瑄, 等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域赣江径流影响的定量分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 682-690. (LIU Guihua, QI Shuhua, ZHU Jingxuan, et al. Quantitative estimation of runoff changes in Ganjiang River, Lake Poyang Basin under climate change and anthropogenic impacts [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(3): 682-690. (in Chinese))
- [21] Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). SRTM 90m DEM digital elevation database [EB/OL]. (2018-05-08)[2018-01-01] <http://srtm.csi.cgiar.org/>.
- [22] Program for Climate Model Diagnosis & Intercomparison. Coupled model intercomparison project phase 5 (CMIP5) [EB/OL]. (2018-05-08)[2018-01-01] <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/>.
- [23] 黄国如, 武传号, 刘志雨, 等. 气候变化情景下北江飞来峡水库极端入库洪水预估[J]. 水科学进展, 2015, 26(1): 10-19. (HUANG Guoru, WU Chuanhao, LIU Zhiyu, et al. Prediction of extreme floods of the Feilaixia reservoir in the Beijiang River Basin under climate change [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(1): 10-19. (in Chinese))
- [24] LIANG X, LETTENMAIER D P, WOOD E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for GSMs [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(D7): 14415-14428.
- [25] LOHMANN D, RASCHKE E, NIJSSEN B N, et al. Regional scale hydrology: I. formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model [J]. Hydrological Sciences Journal, 1998, 43(1): 131-141.
- [26] LOHMANN D, NOLTE-HOLUBE R, RASCHKE E. A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes [J]. Tellus, 1996, 48(A): 708-721.
- [27] Food and Agriculture Organization (FAO). Land and water database [EB/OL]. (2018-05-08)[2018-01-01] <http://www.fao.org/land-water/>.
- [28] 宋星原, 余海艳, 张利平, 等. VIC 陆面水文模型在白莲河流域径流模拟中的应用[J]. 水文, 2007, 27(2): 40-44. (SONG Xingyuan, YU Haiyan, ZHANG Liping, et al. Application of VIC land surface hydrological model in flow simulation of Bailian River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2007, 27(2): 40-44. (in Chinese))
- [29] 吕栋, 吕海深, 朱永华, 等. 基于 VIC 的中小尺度黄泥庄流域径流模拟[J]. 人民黄河, 2014, 36(11): 22-25. (LYU Dong, LYU Haishen, ZHU Yonghua, et al. Simulation of runoff in Huangnizhuang mesoscale or smaller-scale river basin using VIC model [J]. Yellow River, 2014, 36(11): 22-25. (in Chinese))
- [30] University of Maryland (UMD). Global land cover database [EB/OL]. (2018-05-08)[2015-01-01] <http://glcf.umd.edu/data/lc/index.shtml>.
- [31] National Aeronautics and Space Administration (NASA). Land data assimilation system (LDAS) [EB/OL]. (2018-05-08)[2018-01-01] <https://ldas.gsfc.nasa.gov/>.
- [32] NIJSSEN B N, O'DONNELL G M, LETTENMAIER D P, et al. Predicting the discharge of global rivers [J]. Journal of Climate, 2001, 14(15): 3307-3323.
- [33] 朱悦璐, 畅建霞. 基于均匀设计法的 VIC 模型参数率定[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(12): 217-224. (ZHU Yuelu, CHANG Jianxia. Calibration of parameters for VIC model based on uniform design method [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2015, 43(12): 217-224. (in Chinese))
- [34] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models Part I: a discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.