汉江上游流域水资源对未来气候变化的响应

聂晓,丁玲玲 (湖北文理学院汉江研究院,湖北襄阳 441053)

摘要 采用 SWAT 分布式水文模型,结合汉江上游流域1961—1990 年实测气象数据和 CMIP5 多模式 RCP 2.6、RCP 4.5 和 RCP 8.5 情 景下的输出数据集,在对汉江上游流域径流模拟检验的基础上,分析未来气候变化对汉江上游流域水资源的响应。结果表明,SWAT 模型能较好地模拟汉江上游流域径流变化。2011—2100 年不同气候变化情景下,汉江上游流域多年平均降水、径流与基准期(1961—1990 年)相比均呈增加趋势,增加幅度从大到小依次为 RCP 8.5、RCP 4.5、RCP 2.6,且降水量的增幅大于径流的增幅。3 种情景下的多年平 均月降水、月径流总体呈增加趋势,且在冬季(12 月至次年2 月)枯水期增加幅度较为明显。 关键词 降水;径流; RCP 气候情景; SWAT 模型;汉江上游流域 中图分类号 X16 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)04-0058-03

Response of Future Water Resources to Climate Change in the Upper Reaches of the Hanjiang Basin

NIE Xiao, DING Ling-ling (Institute of the Han River, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang, Hubei 441053)

Abstract Based on the the measured meteorological data from 1961 to 1990 and the output data set under RCP scenarios (RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5) from the phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5), the verified SWAT distributed hydrological model was used to analyze the impact of future climate change on the water resources of the upper reaches of the Hanjiang Basin. The results show that the SWAT model can well simulate the runoff variation of the upper reaches of the Hanjiang Basin. Compared with the baseline period (1961 – 1990), the average annual precipitation and runoff during 2011 – 2100 under different climate change scenarios all increase with the increase range of RCP 8.5 > RCP 4.5 > RCP 2.6, but the increment amplitude of precipitation will be more than that of runoff. The mean monthly precipitation and runoff all show an increasing tendency under three RCP scenarios, and the increase range is obvious in winter which is the dry period of the upper reaches of the Hanjiang Basin.

Key words Precipitation; Runoff; RCP scenarios; SWAT model; The upper reaches of the Hanjiang Basin

近年来,关于未来气候变化对流域水资源影响的研究较 多,且大多采用气候情景驱动水文模型的方法^[1-3]。气候情 景的定义主要采用2种方法:一种是假定不同的降雨量和气 温变化情景或组合,如假定年降水量变化±5%、±10%、 ±15%等,年平均气温变化±1、±2、±3℃等,以及将假定的 不同降水量和气温变化进行组合^[4-5];另一种是基于全球气 候模式(GCM)或区域气候模式(REGCM)在各种温室气体排 放情景下的气候数据^[6-9],将其输入水文模型中,进行气候 变化影响的模拟量化。

CMIP5 成果是联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC)第五次评估报告的重要基础,参与试验的全球多种气 候模型有了改进和发展,并且形成了最新一代排放情景,为 国际耦合模式的评估和后续发展提供了重要的平台^[10]。汉 江上游流域为南水北调中线工程水源区,未来水源区的水资 源变化是流域水资源调配及跨流域调水可靠性的重要依 据^[11]。鉴于此,笔者以汉江上游流域为研究对象,采用最新 的 CMIP5 RCP 情景下的气候数据驱动 SWAT 分布式水文模 型,模拟分析未来气候变化对汉江上游流域水资源的影响, 以期为流域水资源管理及跨流域调水提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况 汉江属于长江最大的支流,该研究流域 为汉江丹江口水库以上的上游流域,位于106°15′~114° 20′E、30°10′~34°20′N,长约925 km,占汉江总长的59%,

作者简介 聂晓(1984—),女,山东临沂人,讲师,博士,从事水文水资 源研究。 收稿日期 2016-12-09 集水面积为95 200 km²。汉江上游河段位于秦岭、大巴山之间,流域呈羽叶状,干流走向为东西方向。汉江上游属于北亚热带季风气候,多年平均气温 14.6 ℃,多年平均降水量904 mm,降水年内分布不均,多集中在 7—9 月,多年平均径流量是 367.8 亿 m³。水面蒸发变化在 700 ~1 000 mm,其分布特点是西南少,东北多。

1.2 数据资料 流域水文气象数据来自流域站点的观测数据。其中,气象数据来自研究流域9个气象站点1961—1990年(基准期)的逐日气温、降水量数据,降水量数据还来自流域内195个雨量站的逐日观测数据。黄家港水文站是汉江上游的水文控制站,因此该研究历史期水文数据采用黄家港水文控制站1981—1990年实测的逐月天然径流量序列。

流域 DEM 资料来自美国的 USGS 网站,分辨率为 500 m×500 m。土壤数据来源于中国科学院南京土壤研究 所土壤数据库,该土壤数据在输入模型前,需参照模型标准 进行土壤类型的重新划分,并赋予模型适用的代码。土地利 用/覆盖数据来自国家测绘总局提供的 30 m 国家土地覆盖 分幅 TIF 图,采用 1990 年汉江上游流域的土地利用数据,并 根据 SWAT 模型中土地利用/覆盖分类标准,将其分为12 类。

汉江上游流域基准期(1961—1990年)和未来时期(2011—2100年)RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 8.5(RCP:典型浓度路径)情景下的逐日平均温度和降水量数据序列来源于北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院的CMIP5多模式统计降尺度集合数据集。采用 Delta 方法^[12]对获得的数据序列进行校正,以便消除气候模式模拟的系统偏差。

1.3 研究方法 在我国的流域水文水资源模拟中,SWAT 模型被证实能较好地模拟流域降水、径流、蒸散发等水文过程^[12-13],因此笔者选用 SWAT 模型研究汉江上游流域水资

基金项目 湖北文理学院教师科研能力培育基金项目(2016ZK011)。

59

源对未来气候变化的响应。模拟过程中,选择 SCS 径流曲线 数法演算流域径流过程,选择 Penman – Monteith 公式计算流 域潜在蒸散发,采用变动存储系数法演算河道的汇流过程。 采用自动优选与手工优选相结合的方法对参数进行率定。 参数的率定将基于先调整上游再调整下游、先调整总水量和 蒸发、地表径流、地下径流等各部分水量平衡再调整过程的 原则^[13]。

笔者采用试错法,基于模型的反复调试,生成的集水面 积约93215.6 km²,模型最终将汉江上游流域划分为42个子 流域。根据优势土地利用类型/土壤类型方法生成水文响应 单元(HRU),将占子流域面积5%以上的土地利用及占该类 土地利用20%以上的土壤类型生成HRU,即设定5/20的阈 值,按该阈值,将汉江上游流域划分为241个HRU。

2 基于 SWAT 模型的流域径流模拟

2.1 模型参数的校准与验证 选用 Nash – Sutcliffe 模拟效 率系数(*Ens*)和决定系数(*R*²)2个指标评估模型的模拟效 果,进而评价模型在汉江上游流域的适用性。*Ens*的计算公 式为:

$$Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_{Ei} - Q_{Oi})^2}{\sum_{i=1}^{n} (Q_{Oi} - \overline{Q_{Oi}})^2}$$
(1)

式中, Q_{oi} 为实测径流, Q_{Ei} 为模拟径流, Q_{oi} 为实测径流的平均 值,n 为模拟的时段数。通常取 *Ens* >0.5 作为模型在流域适 用的评价标准^[14]。

利用 SWAT2005 自动敏感性分析工具确定敏感性等级 最高的 6 个参数:SCS 径流曲线系数(CN2)、土壤有效含水量 (SOL_AWC)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)、地下水再蒸发系 数(GW_REVAP)、浅层地下水再蒸发或下渗的阈值深度 (REVAPMN)、浅层地下水回归流阈值深度(GWQMN)。因 此,在参数率定中主要利用黄家港控制站实测径流对以上 6 个参数进行调整。其中,选取 1981—1987 年的实测逐月径 流数据对参数进行率定,校准模型;采用率定后的参数,选取 1988—1990 年的实测逐月径流数据对模型进行验证。

2.2 校准与验证结果 校准期(1981—1987年)和检验期(1988—1990年)模型评价结果分别见图1、2。结果显示,校准期和检验期汉江上游流域径流实测值与模拟值的变化趋势一致,径流过程吻合较好。在校准期决定系数是0.92,模型的模拟效果较好,表征模型效率的Ens达0.90。对模型的相关参数进行校准后,对模型进行检验,结果表明,检验期决定系数为0.85,表征模型效率的Ens达0.87,模型对径流过程的模拟较好。模型的校准与验证结果表明,在汉江上游流域的地理环境下,笔者构建的分布式水文模型SWAT能较准确地模拟流域的径流过程,运用该模型开展汉江上游流域水资源对未来气候变化的响应研究是可行的。

3 汉江上游流域未来水资源变化

3.1 未来降水变化 图 3 显示,未来时期(2011—2100年),汉江上游流域除春季月份(3—5月)外,其他月份在 3 种情景下的多年平均月降水量相对于基准期均呈增加趋势,



图 1 校准期(1981—1987年)汉江上游流域月径流模拟与实测比较 Fig. 1 Comparison of simulated and measured monthly runoff

in calibration period(1981-1987)



图 2 检验期(1988—1990 年)汉江上游流域月径流模拟与实测比较 Fig. 2 Comparison of simulated and measured monthly runoff in inspection period(1988-1990)

其中,在冬季(12月至次年2月)枯水期增加幅度尤为明显, RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 8.5 情景下平均增加幅度分别为 16.36%、22.78%、28.18%。



图 3 未来时期(2011—2100 年)汉江上游流域多年平均月降水 变化

Fig. 3 Variation of mean monthly precipitation in the upper reaches of the Hanjiang Basin in 2011 – 2100

由表1可知,其中,未来时期(2011—2100年)RCP 2.6、 RCP 4.5、RCP 8.5 情景下的多年平均降水量分别较基准期 增加 4.88%、7.74%、12.73%。短期(2020s)除 RCP 2.6 情 景下降水量较基准期略有减少外,其他2个情景下的降水量 均呈增加趋势,其中 RCP 8.5 的增幅偏大;中期(2050s)和长 期(2080s)3个情景下的降水量相对基准期均为增加,增幅从 大到小依次为 RCP 8.5、RCP 4.5、RCP 2.6。

3.2 未来径流变化 图 4 显示,未来时期(2011—2100 年)

Table 1	The change of mean precipitation and	runoff under RCP scenarios in the future peri	ods relative to the baseline period
1	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5

表1 RCP 情景下未来不同时期降水量和径流量相对基准期的变化

	RCP 2.6		RUP 4.5		KCP 8.5	
时期 Period	降水量 Precipitation	径流量 Runoff	隆水量 Precipitation	径流量 Runoff	降水量 Precipitation	径流量 Runoff
2011—2100 年	4.88	2.35	7.74	4.74	12.73	9.04
2020s	-0.36	-3.12	1.01	-1.23	3.71	2.06
2050s	6.86	3.91	9.12	5.03	12.67	7.98
2080s	8.15	6.27	13.09	10.41	21.82	17.09

多年平均月径流量相对于基准期总体呈增加趋势,但不同月份之间的增加幅度不同。在 RCP 2.6 情景下,除了 3、5、7 月的月径流量呈减小趋势外,其他月份的月径流量均呈增加趋势,特别是在冬季(12 月至次年 2 月)枯水期增幅较大。在 RCP 4.5 情景下,除了 3—4、10 月的月径流量呈减小趋势外,其他月份的月径流量呈均呈增加趋势,特别是在冬季(12 月至次年 2 月)枯水期和 8 月的增幅较大。在 RCP 8.5 情景下,全年月径流量均呈增加趋势,特别是在 11 月至次年 2 月和7、9 月增幅较大。

由表1可知,未来时期(2011—2100年)RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 8.5 情景下的多年平均径流量分别较基准期增加 2.35%、4.74%、9.04%。短期(2020s)除 RCP 8.5 情景下径 流量较基准期略有增加外,其他2个情景下的径流量均呈减 小趋势,但减幅均不大。中期(2050s)和长期(2080s)3个情 景下的径流量相对基准期均为增加,增幅从大到小依次为 RCP 8.5、RCP 4.5、RCP 2.6,且径流量增幅小于降水量的增 幅,这可能与气候变暖导致蒸发量增大有关。



图 4 未来时期(2011—2100 年)汉江上游流域多年平均月径流变化 Fig. 4 Variation of mean monthly runoff in the upper reaches of the Hanjiang Basin in 2011 – 2100

4 结论

该研究基于 CMIP5 多模式气象输出数据集,结合分布式 水文模型 SWAT,分析了 3 种气候变化情景下未来时期 (2011—2100年)汉江上游流域水资源相对基准期(1961— 1990年)的变化,得出以下结论:

(1) 水文模型的模拟结果表明,SWAT 分布式水文模型 对汉江上游流域的水资源模拟有较好地适用性。运用该模 型开展未来水资源对气候变化的响应研究是可行的。

(2)未来时期(2011—2100年)RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 8.5 情景下的多年平均降水量均呈增加趋势,增幅依次为 RCP 8.5、RCP 4.5、RCP 2.6,并且中期(2050s)和长期 (2080s)的增加幅度较为明显。未来时期,多年平均月降水 量在冬季(12月至次2月)枯水期增加幅度最为显著。

(3)未来时期(2011—2100年)RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 8.5 情 景下的多年平均径流量均呈增加趋势,增幅依次为 RCP 8.5、RCP 4.5、RCP2.6,但其增幅小于降水量的增幅。长期(2080s)径流量 相对基准期的增加幅度较为显著。并且,未来时期(2011— 2100年),3种情景下的多年平均月径流量在冬季(12月至次 年2月)枯水期增幅较大,在洪水期增幅相对较小。

参考文献

- CHRISTENSEN N S, WOOD A W, VOISIN N, et al. The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River basin
 [J]. Climatic change, 2004, 62(1):337 – 363.
- [2] 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.
- [3]张建云,王国庆.气候变化对水文水资源影响研究[M].北京:科学出版 社,2007.
- [4] 贾仰文,高辉,牛存稳,等. 气候变化对黄河源区径流过程的影响[J]. 水利学报,2008,39(1):52-58.
- [5] 夏智宏,周月华,许红梅.基于 SWAT 模型的汉江流域水资源对气候变化的响应[J].长江流域资源与环境,2010,19(2):158-163.
- [6] HORTON P, SCHAEFLI B, MEZCHANI A, et al. Assessment of climate change impacts on Alpine discharge regimes with climate model uncertainty [J]. Hydrol Process, 2006, 20(10):2091-2109.
- [7] CHIEW F H S,VAZE J, VINEY N R, et al. Estimation of runoff and the impact of climate change and development on runoff across the Murray – Darling Basin[C]//Proceedings of the water down under 2008. Adelaide, Australia:[s. n],2008;1957 – 1968.
- [8] ZHANG Z X, CHEN X, XU C Y, et al. Evaluating the non-stationary relationship between precipitation and streamflow in nine major basins of China during the past 50 years [J]. Journal of hydrology, 2011, 409 (1/2): 81 – 93.
- [9] 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.
- [10] 成爱芳,冯起,张健恺,等.未来气候情景下气候变化响应过程研究综述[J]. 地理科学,2015,35(1):84-90.
- [11] 张利平,秦琳琳,胡志芳,等.南水北调中线工程水源区水文循环过程 对气候变化的响应[J].水利学报,2010,41(11):1261-1271.
- [12] 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.
- [13] 孙瑞,张雪琴.基于 SWAT 模型的流域径流模拟研究进展[J].水文, 2010,30(3):28-32,47.
- [14] 张利平,胡志芳,秦琳琳,等.2050 年前南水北调中线工程水源区地表 径流的变化趋势[J]. 气候变化研究进展,2010,6(6):391-397.