

引用格式: 贾何佳, 李谢辉, 文军, 等. 黄河源区径流变化模拟及未来趋势预估[J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1292-1304. [Jia H J, Li X H, Wen J, et al. Runoff change simulation and future trend projection in the source area of the Yellow River[J]. Resources Science, 2022, 44(6): 1292-1304.] DOI: 10.18402/resci.2022.06.15

黄河源区径流变化模拟及未来趋势预估

贾何佳, 李谢辉, 文军, 陈亚玲

(成都信息工程大学大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225)

摘要: 黄河源区是黄河流域的重要组成部分, 其径流变化影响着整个流域的水资源和生态系统安全。本文利用 1976—2014 年黄河源区径流、气象、数字高程模型 DEM (Digital Elevation Model)、土地利用、土壤以及第六次国际耦合模式比较计划 CMIP6 (6th Coupled Model Inter-comparison Project) 中 8 个模式的 3 个未来情景 (SSP126、SSP245 和 SSP585) 气象数据, 基于 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 水文模型, 对黄河源区主要水文站的径流进行了模拟、未来预估和变化分析。研究表明: ① SWAT 模型对黄河源区历史径流模拟的适用性较好, 径流模拟的不确定性较小, 模拟值较接近于实测值。② 参数敏感性分析表明 27 个与水文有关的参数都对径流模拟有一定的影响。其中, 土壤蒸发补偿因子、湿润条件 II 下 SCS (Soil Conservation Service) 径流曲线数、浅层地下水径流系数的敏感性较强, 径流受陆面蒸散发、下垫面和降水影响较大。③ 降水是影响未来径流的主要因素。在 SSP126 和 SSP245 两种未来情景下, 吉迈、玛曲和唐乃亥 3 个水文站在 2021—2100 年的两个时期 (2021—2060 年和 2061—2100 年) 年均流量均呈增加趋势; 而在 SSP585 情景下, 2021—2060 年呈增加趋势, 2061—2100 年则呈减少趋势。相对于 1976—2014 年, 未来近期 (2021—2060 年) 唐乃亥和玛曲站年均流量在 SSP585 情景下增加幅度最低, SSP126 情景下增加幅度最高; 吉迈站在 SSP245 情景下增加幅度最高, SSP126 情景下增加幅度最低; 未来远期 (2061—2100 年) 3 个水文站除了吉迈站是在 SSP126 情景下增加幅度最低外, 其余均是在 SSP585 情景下增加幅度最低, SSP245 情景下增加幅度最高。研究结果可为黄河流域水资源管理、防洪蓄水和生态环境保护等提供科学依据与理论支撑。

关键词: 黄河源区; SWAT 模型; 径流模拟; 径流预估; CMIP6 模式; 未来情景

DOI: 10.18402/resci.2022.06.15

1 引言

黄河源区是黄河流域的主要产流区, 影响着整个流域的经济发展、人民生活以及生态环境安全。黄河源区径流变化及其未来趋势预估对黄河源区水资源宏观调控和生态环境保护具有重要的战略价值^[1]。目前的径流相关研究中使用较多的是美国农业部农业研究中心基于物理机制研发的 SWAT 分布式水文模型, 而诸多研究也表明 SWAT 模型在水文模拟分析中具有良好的表现^[2-5]。其在黄河源区也得到了应用, 如 Li 等^[6]的研究表明采用唐乃亥水文站逐年和逐月的实测资料对 SWAT 模拟的径

流进行验证后能得到较好的模拟效果; 王梦园等^[7]的研究也表明 SWAT 模型在黄河源区具有较好的适用性, 能够模拟出黄河源区的月径流量。但目前对黄河源区的径流变化多是基于黄河流域干流控制站唐乃亥进行, 相对较单一, 对源区内的径流变化还缺乏更深入全面的认识。

当前, 随着全球气候持续变暖, 流域生态系统安全受到了极大威胁, 而了解和认识流域未来的径流变化就显得愈发重要。CMIP6 是 CMIP 计划实施以来参与模式数量最多、设计的科学试验最为完善、所提供的模拟数据最为庞大的一次, 同时由于

收稿日期: 2021-12-27; 修订日期: 2022-03-16

资助项目: 四川省科技计划项目 (2021YJ0025); 成都信息工程大学科研项目 (KYTZ201821)。

作者简介: 贾何佳, 男, 四川达州人, 硕士研究生, 从事气象灾害遥感研究。E-mail: 714633672@qq.com

通讯作者: 李谢辉, 女, 新疆石河子人, 副教授, 主要从事气象灾害和极端气候变化研究。E-mail: lixiehui@cuit.edu.cn

2022年6月

融入了未来共享社会经济和辐射强迫路径(SSP-RCP)的组合情景,使得其预估的结果将更具合理性^[8]。已有研究表明CMIP6模式在中国具有较好的适用性,如Yang等^[9]比较评估了CMIP6中20个耦合模式对中国气温和降水的模拟能力,发现CMIP6全球气候模式能够较好地再现气温和降水的气候空间分布;王予等^[10]综合评估了CMIP6模式对中国极端降水的模拟能力,发现CMIP6相对于CMIP5的模拟能力有所提升;姜彤等^[11]将CMIP6情景模式应用到淮河流域,发现相比于CMIP5,CMIP6对气温和降水的空间分布和偏差等方面均有一定的提升。目前基于SWAT模型耦合CMIP5以往不同阶段计划下的气候模式在国内外不同流域已开展了大量研究,针对黄河源区,赵芳芳等^[12]通过集成GCMs输出数据和SWAT模型评估预测了该区未来2020s、2050s和2080s等3个时期的径流变化情况,结果发现未来气候变化对黄河源区的径流变化影响很大,未来黄河源区的径流量呈减少趋势;唐芳芳等^[13]利用CSIRO、INM和MRI3个气候模式,对未来2046—2065和2081—2100年两个时期SRES A2和SRES B1两种温室气体排放情景下的气候变化对黄河上游流域的径流影响进行了分析,认为在不同排放情景下未来流域的径流会呈现稳定或减少的趋势;王建群等^[14]结合SWAT和RegCM3模式预测了A1B情景下黄河源区2010—2098年的径流变化趋势,结果表明唐乃亥水文站在未来3个时期呈现减—增—减交替变化的趋势。但将CMIP6未来不同情景下的模

式数据与SWAT模型相结合的研究目前相对较少,特别是对黄河源区的研究更少。

基于此,本文主要利用黄河源区3个水文站的历史径流、11个相关气象站点、DEM和土地利用等数据,首先模拟和评估了SWAT模型在黄河源区的适用性以及敏感性参数,然后结合CMIP6中资料完备的8个模式数据,对3个水文站在3种情景(SSP126、SSP245、SSP585)下2021—2100年的径流变化趋势进行未来预估和径流变化分析,其研究结果能为黄河流域的水资源管理、防洪蓄水和生态环境保护等提供依据。

2 研究区概况

黄河发源于青藏高原,流经9省,全长约5464 km,流域面积79.5万km²,是中国第二大河流^[15]。本文研究区位于黄河上游,青海贵德站以上的黄河源区(图1a),涵盖青海、四川和甘肃3个省,介于95°E—104°E、32°N—37°N之间,集水面积约12.2×10⁴ km²,占黄河流域总面积的16.2%^[7]。区域内整体海拔在2145~6248 m之间,地势西高东低;流域内水系发达、水多沙少,是黄河流域主要的水源涵养区;黄河源区土地利用类型以草地、林地、水体为主,土壤类型多样,大部分为高山土^[16]。该区域大部分是高寒草原下垫面,属于典型的大陆性气候,降水量分布不均,多年平均降水量在200~800 mm之间(图1b),主要集中在夏季,分布自东南向西北减少,气温也自东南向西北降低。1956—2017年年径流量达198.2亿m³,占黄河流域年径流量的34.1%^[17]。

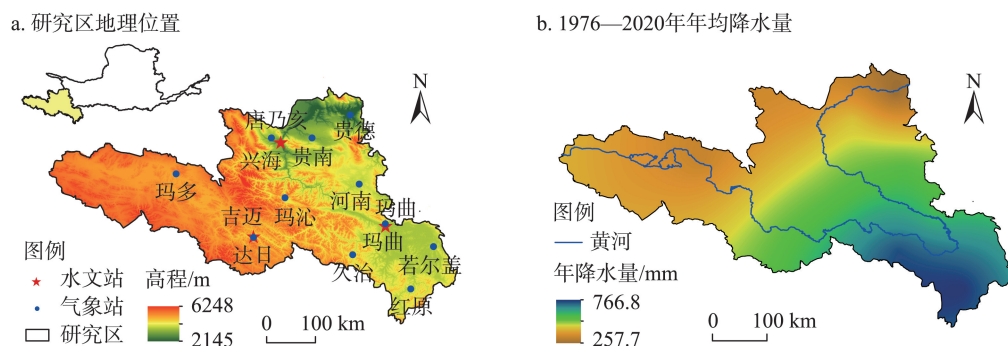


图1 研究区地理位置(a)和1976—2020年年均降水量分布图(b)

Figure 1 Geographical location of the study area (a) and average annual precipitation distribution from 1976 to 2020 (b)

注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)4345号的中国地图制作,底图无修改。

3 数据来源与模型构建

3.1 数据来源

本文所用气象数据为1976—2020年黄河源区气象站点日数据,包括降水、温度、气压、蒸发、风速、日照时数和相对湿度等,来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。DEM数据来自地理数据空间云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为30 m。土地利用和土壤类型数据来自资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/DataList1.aspx?Field-TypID=11,6>),空间分辨率为1 km。1976—2014年期间月径流数据来自水文站和相关文献。模式预估气象数据主要涉及最高气温、最低气温、风速、降水、相对湿度和辐射等,来自世界气候研究计划(World Climate Research Program, WCRP)第六次国际耦合模式比较计划CMIP6(<https://esgf-index1.ceda.ac.uk/projects/cmip6-ceda/>)。

诸多研究已表明,多模式集合的模拟效果会优于单个模式,且模拟的不确定性较小^[18,19],因此本文主要采用了CMIP6数据(2021—2100年)中资料完备的8个模式历史气候模拟试验期(Historical)和代表可持续发展、中间发展和传统化石燃料驱动发展,以及低辐射强迫、中等辐射强迫和高辐射强迫结合的3种未来情景数据(SSP126、SSP245和SSP585),模式基本信息见表1。由于各模式的分辨率不同,首先,利用双线性插值法将8个模式数据插值到 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的格网上;然后,进行多模式集合平均;最后,利用多模式集合结果对研究区未来近期(2021—2060年)和远期(2061—2100年)的径流变化进行预估和对比分析。

表1 所选8个CMIP6模式的基本信息

Table 1 Basic information of the eight selected CMIP6 models

序号	模式名称	所属国家	水平分辨率(格网)
1	CanESM5	加拿大	128×64
2	CMCC-ESM2	意大利	288×192
3	GFDL-ESM4	美国	288×180
4	IPSL-CM6A-LR	法国	144×143
5	MIROC6	日本	256×128
6	MPI-ESM1-2-LR	德国	192×96
7	MRI-ESM2-0	日本	320×160
8	NorESM2-MM	挪威	288×192

3.2 SWAT模型模拟方案构建

由于SWAT模型能将流域划分为多个子流域,并结合DEM、土地利用以及土壤类型等数据,分为多个水文响应单元HRU(Hydrological Response Unit),通过模拟流域真实的自然状态,逐个计算HRU的产流过程,并最终累加计算主河道的总径流量^[20]。同时SWAT模型包含了泥沙和水文等多个模块,能在日时间尺度上运行,并获得每月和每年时间尺度上的输出,具有较高的计算效率和长期的连续模拟能力^[21]。因此,研究主要采用SWAT模型进行径流变化的历史模拟和未来预估。即:首先,通过1976—2014年研究区内DEM、土地利用、土壤类型、水系与相关11个气象站点数据等构建SWAT模型;然后,基于3个水文站的实测月径流数据,通过进行参数率定并验证获取最优参数,继而得到最优历史模拟径流;最后,将CMIP6多模式集合未来情景数据导入,对黄河源区未来两个时期的径流进行预估和变化分析。图2为在构建SWAT模型模拟方案时主要输入的DEM、水系、土地利用和土壤类型的空间分布图。

在SWAT模型中,SUFI-2作为SWAT模型校准程序SWAT-CUP中的一种算法,可以同时率定多个参数,并且考虑了率定参数、输入数据、模型结构以及实际观测数据的不确定性,能够将参数范围通过模拟值与实测值的95%预报不确定性(95% Prediction Uncertainty)95PPU图进行可视化,以寻找最佳的参数组合,主要可用于SWAT的参数率定与分析水文模型的不确定性^[22]。Yang等^[23]的研究就表明SUFI-2算法非常灵活,允许任意的可能性度量或目标函数,能够用最少的模型运行次数来实现良好的预测不确定性范围,对数据点的合理覆盖最好。因此,本文主要使用SUFI-2算法进行参数率定和不确定性分析。敏感性分析主要采用SWAT-CUP中的全局敏感性方法进行,其对参数的敏感性强弱可由敏感值 t 和体现 t 值显著性的 p 值来表示。其中, t 值绝对值代表模型参数的敏感性,当 t 值绝对值越大,则模型参数敏感性越强; p 值代表的是 t 值的显著性,当 p 值越小, t 值显著性越大,表明该模型参数敏感的偶然性越小,参数就越重要。即 t 值绝对值越大, p 值越小,参数就越敏感^[24]。

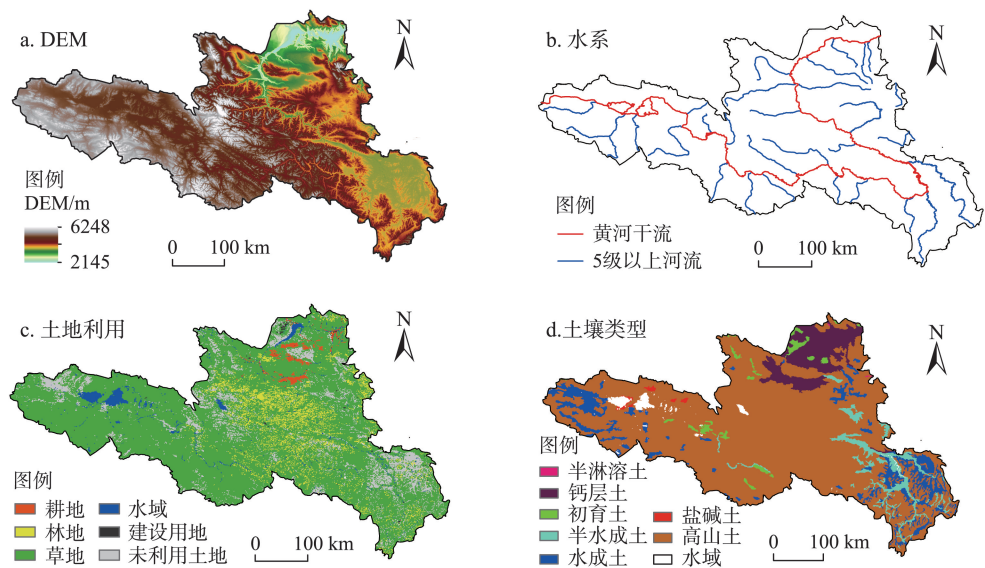


图2 SWAT模型模拟方案主要输入参数数据: DEM(a)、水系(b)、土地利用(c)、土壤类型(d)

Figure 2 Soil and water assessment tool (SWAT) model simulation scheme main input parameters: DEM (a), drainage system (b), land use (c), and soil type (d)

注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)4345号的中国地图制作,底图无修改。

3.3 模拟效果评估方法

使用决定性系数(R^2)和效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)两个指标来评估水文模型模拟的效果, R^2 越接近1,代表模拟值与实测值趋势越一致, $R^2>0.50$ 表示模型较优秀; NSE 越接近1,代表模拟值越接近实测值,偏差越小, NSE 在0~1之间表示结果性能较好。具体计算公式如下^[25]:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_{avg}^{obs})(Q_i^{sim} - Q_{avg}^{sim}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_{avg}^{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_{avg}^{sim})^2} \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_{avg}^{obs})^2} \quad (2)$$

式中: n 为数据时间序列长度, Q_i^{obs} 与 Q_i^{sim} 为时间步长 i 的径流实测值和模拟值; Q_{avg}^{obs} 与 Q_{avg}^{sim} 为时间步长 i 的径流实测平均值和模拟平均值。

4 结果与分析

4.1 参数率定和验证

使用1976—1977年两年数据作为模型预热期,降低初始条件对模型模拟结果的影响,1978—1994

年作为模型率定期,1995—2014年作为模型验证期。

表2为3个水文站在率定期和验证期月平均流量模拟结果与实测数据的统计值,图3为两个时期月平均流量模拟值与观测值的对比和时间变化趋势结果。可以看出,唐乃亥、玛曲和吉迈3个水文站月平均流量模拟值与站点观测值总体较为吻合。率定期与验证期模拟值与实测值均有 $R^2 \geq 0.72$, $NSE \geq 0.65$;3个水文站中吉迈水文站的 R^2 和 NSE 最小,率定期与验证期 R^2 均为0.72, NSE 在率定期和验证期分别为0.69和0.65;以上综合表明SWAT模型在黄河源区的径流模拟效果好,适用性强。时间变化趋势结果表明,率定期主要呈现弱的下降趋势,验证期呈现弱的增加趋势,二者的降水与流量峰值均出现在夏季;降水与径流变化趋势相同,相关关

表2 3个水文站月平均流量模拟结果与实测数据统计值

		hydrological stations					
阶段	时间段	唐乃亥		玛曲		吉迈	
		R^2	NSE	R^2	NSE	R^2	NSE
率定期	1978—1994	0.83	0.82	0.83	0.83	0.72	0.69
验证期	1995—2014	0.80	0.78	0.79	0.77	0.72	0.65

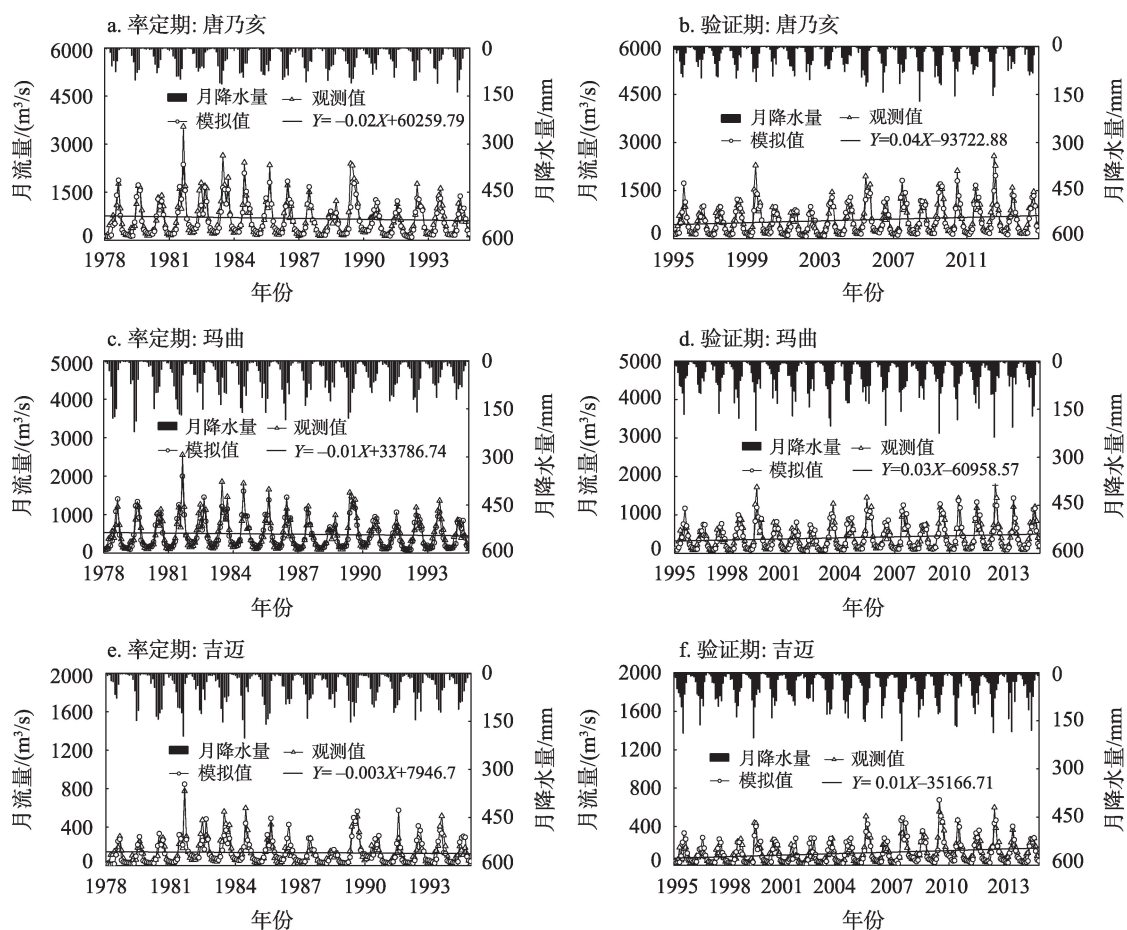


图3 3个水文站率定期与验证期月平均流量模拟值与观测值对比和变化趋势

Figure 3 Comparison and change trend of monthly average discharge simulation values and observations of three hydrological stations between calibration and validation periods

系显著(通过了0.01水平的显著性检验),表明径流受降水的影响较大。上游吉迈水文站径流与降水变化趋势较下游站点更为接近,反映出黄河源区上游径流受降水影响可能大于下游。

使用95PPU中的 p -factor与 r -factor来分析模拟结果的不确定性。 p -factor取值范围为0~1,代表实测值落入95PPU区间的比例, r -factor代表95PPU区间的平均宽度,结果如表3所示。可以看出,3个水文站 p -factor率定期与验证期均大于0.64,落入

95PPU区间的实测值较多; r -factor率定期均小于0.50,验证期最大为0.65,不确定性区间较窄。两个参数总体表明3个水文站的径流模拟不确定性较小,模拟值较接近实测值。

4.2 参数敏感性分析

选取了27个参数来进行分析^[26],通过SUFI-2算法每500次一次迭代率定得到最终最佳参数组合,参数敏感性排序见表4所示。其中,敏感性较大的是土壤蒸发补偿系数($v_ESCO.hru$),代表了土壤水

表3 3个水文站月平均流量模拟的不确定性参数统计

Table 3 Uncertainty parameter statistics for monthly average discharge simulation at three hydrological stations

阶段	时间段	唐乃亥		玛曲		吉迈	
		p -factor	r -factor	p -factor	r -factor	p -factor	r -factor
率定期	1978—1994	0.70	0.45	0.64	0.45	0.64	0.50
验证期	1995—2014	0.72	0.56	0.67	0.55	0.65	0.65

2022年6月

表4 SWAT模型参数敏感性及其率定

Table 4 Soil and water assessment tool (SWAT) model parameter sensitivity and calibration

参数	参数含义	<i>t</i> 值	<i>p</i> 值	率定结果	最终范围	
					最小值	最大值
v_ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数	6.06	0.00	0.99	0.95	1.00
r_CN2.mgt	SCS 径流曲线数	5.63	0.00	0.26	0.18	0.37
v_GWQMN.gw	浅层含水层产生基流的阈值深度	-3.80	0.00	452.37	207.27	622.00
v_GW_REVAP.gw	地下水再蒸发系数	-3.97	0.00	0.05	0.03	0.08
r_SOL_AWC(..).sol	土壤层有效水容量	-2.07	0.04	0.37	0.19	0.40
r_SOL_K(..).sol	土壤饱和水传导度	-1.82	0.07	-0.26	-0.32	-0.17
v_REVAPMN.gw	渗透到深层防水层的阈值深度	1.83	0.07	434.30	383.72	438.28
v_SMTMP.bsn	融雪基温	-1.64	0.10	-14.36	-19.69	-12.44
r_SOL_BD(..).sol	土壤饱和和容重	-1.32	0.19	-0.25	-0.37	-0.23
v_SMFMN.bsn	12月21日的融雪因子	1.21	0.23	13.15	11.58	15.91
v_RCHRG_DP.gw	深含水层渗透比	1.03	0.30	0.31	0.19	0.37
v_CH_N2.rte	主河道河床曼宁系数	1.00	0.32	0.09	0.04	0.12
v_TLAPS.sub	气温垂直减率	0.82	0.41	10.54	7.25	13.40
v_GW_DELAY.gw	地下水延迟时间	0.72	0.47	169.10	109.63	190.76
v_CH_K2.rte	主河道河床有效水力传导度	-0.68	0.50	380.21	376.67	458.91
v_SURLAG.bsn	地表径流滞后系数	0.61	0.54	14.02	9.66	16.01
v_CANMX.hru	最大冠层截流量	0.61	0.55	16.24	10.15	17.64
v_HRU_SLP.hru	平均坡度	0.57	0.57	0.97	0.91	1.00
v_PLAPS.sub	降水递减率	-0.54	0.59	291.65	187.45	462.38
v_TIMP.bsn	积雪温度滞后系数	-0.43	0.67	0.71	0.57	0.74
v_SLSUBBSN.hru	平均坡长	-0.31	0.76	96.47	80.09	101.44
r_BIOMIX.mgt	生物混合效率	0.29	0.77	-0.27	-0.33	-0.27
v_ALPHA_BF.gw	基流 alpha 因子	0.29	0.77	0.35	0.30	0.44
v_SMFMX.bsn	6月21日的融雪因子	0.20	0.84	6.18	5.32	7.30
v_EPCO.hru	植物吸收补偿因子	0.18	0.86	0.75	0.70	0.83
v_SFTMP.bsn	降雪温度	0.08	0.93	4.98	1.49	11.05
r_SOL_ALB(..).sol	湿润土壤反照率	0.02	0.98	0.11	0.07	0.21

的蒸发能力,随着该值的变大,土壤水的蒸发量减小,径流增大,该值较为敏感说明径流可能与土壤水蒸发较为相关;其次是SCS(Soil Conservation Service)径流曲线数(*r_CN2.mgt*),其是下垫面特性的综合反映,该值越大,表明下垫面的不透水性越强,径流越大;再次是浅层含水层产生基流的阈值深度(*v_GWQMN.gw*),表示任意时段内的径流总量和同时段内降水总量的比值,主要反映降水中有多少水量变成了径流,该值较为敏感,说明研究区径流量可能受到降水影响较大。敏感性较强的参数还有地下水再蒸发系数(*v_GW_REVAP.pw*)、土壤层有效水容量(*r_SOL_AWC(..).sol*)、土壤饱和水传导

度(*r_SOL_K(..).sol*)等。

4.3 CMIP6模式适用性评估

在预估前,对采用的8个模式和8个模式的集合MME(Multi-Model Ensemble)历史试验期数据与站点实测数据在黄河源区的适用性进行了评估。由于泰勒图可以基于相关系数*R*、均方根误差(Root Mean Square Error, *RMSE*)和标准差之比(Ratio of the Standard Deviation, *STDR*)3个指标,通过比较模式模拟结果与观测之间的关系来评估模式的模拟能力,因此对1976—2014年模式历史试验期与站点实测数据的月平均最高温度、月平均最低温度和月降水量绘制了对比泰勒图,具体见图4。

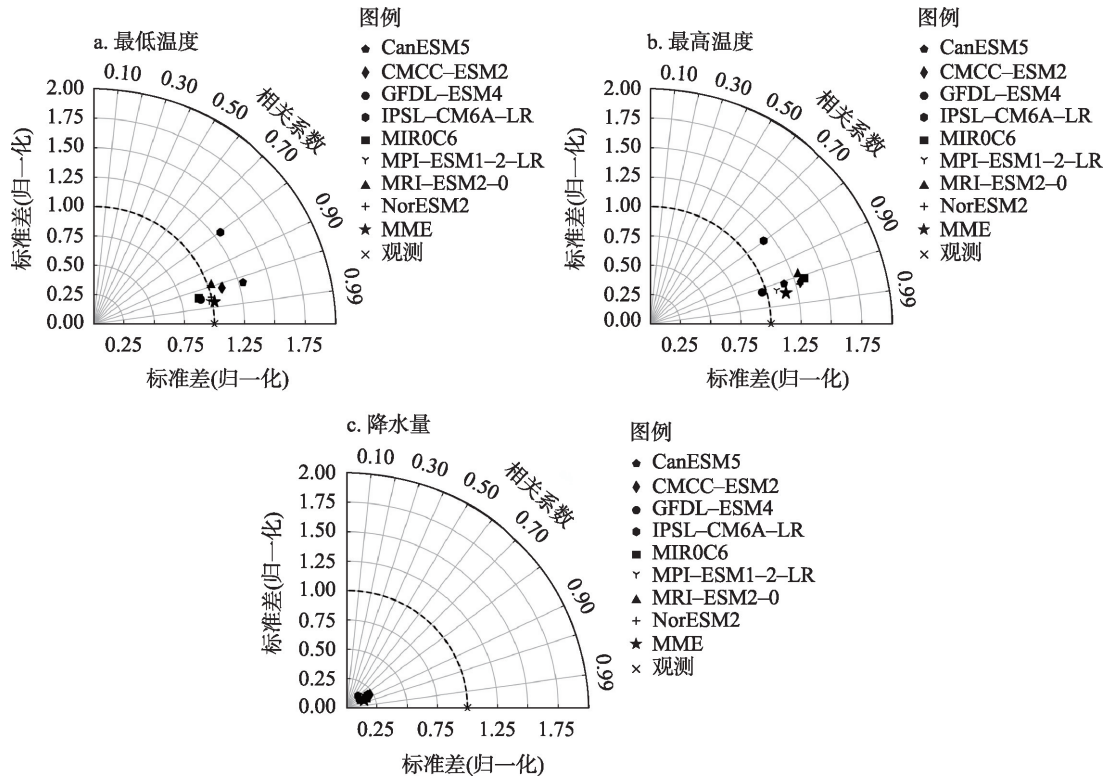


图4 1976—2014年CMIP6模式历史气象要素数据(最低温度(a)、最高温度(b)、降水量(c))与站点观测月值数据泰勒图

Figure 4 Taylor diagram of monthly data of CMIP6 model historical meteorological parameters (minimum temperature (a), maximum temperature (b), precipitation (c)) and station observations, 1976-2014

可以发现,8个CMIP6单模式中IPSL-CM6A-LR在黄河源区的适用性相对较差,其余7个单模式对3个气象要素的模拟均有较好的表现。其中,最高和最低温度的 R 均大于0.94,降水的 R 均大于0.80,相关性高;最高和最低温度的 $RMSE$ 均小于0.5,降水的 $RMSE$ 均小于1.0,模拟较为准确;最高和最低温度 $STDR$ 均小于1.25,较接近于1.0,模拟效果好,而降水的 $STDR$ 均在0.25左右,相较于温度,降水的模拟效果较差。相比8个单模式,MME对最高温度、最低温度和降水的模拟性能均有所提高, R 都超过了8个单模式, $RMSE$ 较小, $STDR$ 较接近于实测值,总体上对解析黄河源区气象要素的模拟有一定的适用性。

4.4 未来情景预估和径流变化分析

选择共享社会经济路径下的SSP126、SSP245和SSP585情景数据,分别代表了低辐射强迫、中等辐射强迫和高辐射强迫情况。其中,SSP126情景是在原RCP2.6情景基础上进行更新,有研究表明该情

景下到2100年年均地表温度比工业革命前预计升高 $2.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[27];SSP126情景下黄河上游年降水量的增幅在2041—2060年达到峰值,到2081—2100年增幅有所下降^[28]。SSP245情景是更新后的RCP4.5情景,是中等社会脆弱性与中等辐射强迫的组合^[27],此情景下,黄河上游年降水量的增幅在21世纪末期达到峰值^[28]。SSP585情景是更新后的RCP8.5情景,代表到2100年人为辐射强迫达到 8.5 W/m^2 ,张丽霞等^[27]的研究表明中国年均地表温度升高 $6.55\text{ }^{\circ}\text{C}$;赵梦霞等^[28]发现,此情景下,黄河上游年降水量的增幅也是在21世纪末期达到峰值。基于SWAT模型率定后得到的最佳参数组合,使用SSP126、SSP245和SSP585情景下的MME数据,对未来黄河源区的径流进行预估分析,得到结果如图5。

可以看出,3个水文站在2021—2100年3种情景下,相对历史时期的年均流量均呈整体增加趋势。在SSP126和SSP245两种情景下3个水文站在未来两个时期都呈增加趋势;而在SSP585情景下,

2022年6月

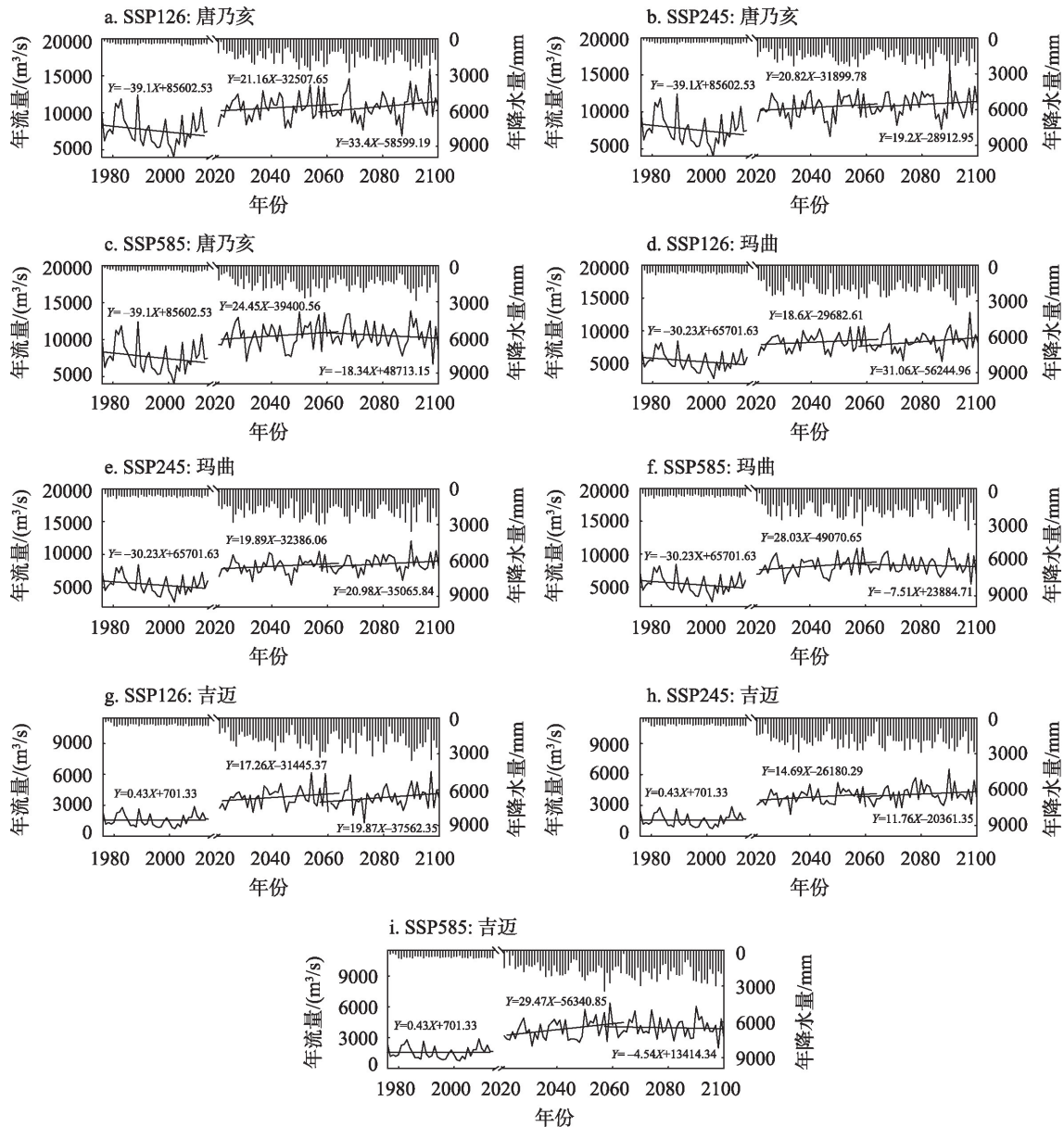


图5 3种情景下黄河源区3个水文站未来年均流量变化趋势和对比分析

Figure 5 Trends of variation and comparative analysis of future annual average discharge at three hydrological stations in the source area of the Yellow River under three scenarios

未来近期(2021—2060年)呈增加趋势,未来远期(2061—2100年)则呈相对减少趋势;其中未来近期中的2030和2045年年均流量有较大下降,而未来远期在SSP585情景下于2085年以后有所回升。与历史时期1976—2014年3个水文站的年均流量对比可以看出,历史时期的年均流量主要呈现出先下降后上升,整体表现出弱的下降趋势,其中1990—2000年为一个枯水期,从2000年后,径流主要呈现增加趋势。未来近期,3个水文站在SSP585情景下

的增加趋势最明显;未来远期,3个水文站在SSP126情景下的增加趋势比在SSP245情景下增加明显,唐乃亥站在SSP585情景下的减少趋势最明显。

同时,3种情景下2021—2100年3个水文站的降水均呈现增加趋势,峰值区均出现在夏季,变化趋势与径流变化趋势相似,各阶段相关关系均显著并通过了0.01水平的显著性检验,表明降水可能是未来情景下影响黄河源区径流量变化的重要因素之一。和历史时期数据相比发现,降水增加幅度与

径流增加幅度有所差异,在黄河源区上游吉迈站降水增加幅度与年均流量增加幅度接近,而在下游玛曲与唐乃亥站降水增加幅度大于年均流量增加幅度,这主要是由于温度上升,融雪增加,黄河源区上游的西北区域子流域产水量和深层含水量补给增加较下游的东南区域更多,同时西北区域蒸散发量却少于东南地区^[29],这与前述率定和验证期情况相同。

表5为3个水文站从1976—2100年不同时期年均流量和变化率统计结果。可以看出,从1976—2014年唐乃亥、玛曲和吉迈3个水文站的年均流量分别为7601.99、5390.27和1564.68 m³/s,3种未来情景下多年平均流量都呈增加趋势,且未来近期的年均流量均小于未来远期的年均流量。相比于1976—2014年,2021—2060年3种情景下唐乃亥站年均流量增加幅度在38.05%~40.38%之间,玛曲站年均流量增加幅度在50.9%~53.41%之间,吉迈站年均流量增加幅度在140.61%~142.02%之间。其中,唐乃亥和玛曲水文站在SSP585情景下增加幅度最低,在SSP126情景下增加幅度最高;吉迈站在

SSP245情景下增加幅度最高,SSP126情景下增加幅度最低。2061—2100年3种情景下唐乃亥站年均流量增加幅度在38.8%~45.06%之间,玛曲站增加幅度在53.17%~59.09%之间,吉迈站增加幅度在141.15%~162.47%之间,3个水文站除了吉迈站是在SSP126情景下增加幅度最低外,其余均是在SSP585情景下增加幅度最低,SSP245情景下增加幅度最高。究其原因可能是:黄河源区常年冰雪覆盖,而随着温度上升,冰雪融化,越靠近上游地区径流所受影响越大。在SSP126情景下,温度上升较缓和,降水在未来近期较多,径流增加较多;而到未来远期,随着降水增加幅度开始缓和,径流增加也有所缓和。在SSP245情景下,温度上升缓和,降水在未来近期增加较多,径流增加较大;到未来远期,随着降水增加幅度进一步加大,径流增加也有所上升。SSP585情景下,降水在未来近期较多,温度相对较高,冰雪融化使上游吉迈站径流增加较大,下游站点相对增加较小;到未来远期,随着降水增加幅度进一步加大,同时温度上升剧烈,蒸散发加剧,径流增加随之放缓。

表5 3个水文站未来不同时期不同情景下的年均流量和变化率统计

Table 5 Statistics of annual average discharge and change rate of three hydrological stations in different periods under three scenarios

情景	水文站	年均流量/(m ³ /s)			变化率/%	
		1976—2014年(历史)	2021—2060年(近期)	2061—2100年(远期)	2021—2060年(近期)	2061—2100年(远期)
SSP126	唐乃亥	7601.99	10671.94	10876.26	40.38	43.07
	玛曲	5390.27	8269.13	8378.95	53.41	55.45
	吉迈	1564.68	3764.71	3773.20	140.61	141.15
SSP245	唐乃亥	7601.99	10587.44	11027.78	39.27	45.06
	玛曲	5390.27	8195.84	8575.41	52.05	59.09
	吉迈	1564.68	3795.08	4106.89	142.55	162.47
SSP585	唐乃亥	7601.99	10494.51	10551.5	38.05	38.80
	玛曲	5390.27	8134.05	8256.12	50.90	53.17
	吉迈	1564.68	3786.90	3962.85	142.02	153.30

5 结论与讨论

5.1 结论

本文利用黄河源区3个水文站1976—2014年的月径流和相关气象站点数据等,首先通过构建SWAT模型模拟方案,基于SUFI-2算法对模型进行率定与验证,然后利用CMIP6中资料完备的8个模

式集合数据对3种情景下未来2021—2100年的径流进行了预估和变化分析,主要得到以下一些结论:

(1)唐乃亥、玛曲、吉迈3个水文站的月均流量模拟值与观测值较为吻合,率定期与验证期的 R^2 均大于0.72,NSE值均大于0.65,SWAT模型在黄河源

2022年6月

区的径流模拟效果较好,适用性较强。3个水文站 p -factor 率定期与验证期均大于 0.64, r -factor 的率定期均小于 0.50,验证期最大为 0.65,径流模拟的不确定性较小,模拟值较接近于实测值。

(2)SWAT 模型参数的敏感性分析结果表明,27 个与水文有关的参数都对径流有一定的影响,其中土壤蒸发补偿系数、SCS 径流曲线数、浅层含水层产生基流的阈值深度、地下水再蒸发系数、土壤层有效水容量、土壤饱和水传导度等敏感性较强。

(3)3 个水文站在 2021—2100 年 3 种情景下年均流量均呈整体增加趋势,其中在 SSP126 和 SSP245 两种情景下 3 个水文站在未来两个时期呈增加趋势,而在 SSP585 情景下,未来近期呈增加趋势,未来远期则呈相对减少趋势;未来近期中的 2030 和 2045 年年均流量有较大下降,而未来远期在 SSP585 情景下于 2085 年有所回升。

(4)相比于 1976—2014 年,未来近期 3 种情景下唐乃亥和玛曲站年均流量在 SSP585 情景下增加幅度最低,在 SSP126 情景下增加幅度最高;吉迈站在 SSP245 情景下增加幅度最高,SSP126 情景下增加幅度最低;未来远期 3 个水文站除了吉迈站是在 SSP126 情景下增加幅度最低外,其余均是在 SSP585 情景下增加幅度最低,SSP245 情景下增加幅度最高,未来近期的年均流量均小于未来远期。

5.2 讨论

在已有涉及对黄河源区未来径流变化预估的研究中,赵芳芳等^[12]运用统计降尺度情景模拟表明未来流量的减少趋势不可避免,Delta 情景模拟得出黄河源区的年均流量变化相对较小,与 1961—1990 年相比未来 2020s 和 2050s 将减少,而 2080s 将增加。唐芳芳等^[13]的结果表明,未来两个时期 2046—2065 和 2081—2100 年内,流域径流量呈减少趋势,且后一时期的减少幅度比前一时期大,在不同气候变化情景下,流域未来多年平均径流深上游较大,下游较小。王建群等^[14]在 A1B 情景下预估的未来径流变化趋势结果表明,唐乃亥水文站径流序列在 2010—2039、2040—2069 和 2070—2098 年 3 个时期呈现出减—增—减交替变化的趋势,其中 2010—2039 和 2040—2069 年变化趋势不显著,2070—2098

年呈现显著减少趋势。在将以上研究结果和本文的进行对比后发现,以上文献中径流的总体趋势是呈现减少或稳定态势,而本文是呈现一个增加趋势。究其原因认为,由于以上研究中对未来气候情景使用的不同(如赵芳芳等^[12]研究中的未来气候情景是通过统计降尺度方法生成,唐芳芳等^[13]采用的是 SRES A2 和 SRES B1 两种温室气体排放情景,王建群等^[14]预测的主要是 A1B 情景)、历史对比时期、未来预估时段和所用气候模式的不同,导致未来径流变化趋势的结果存在较大差异。而本文使用最新的、并从 CMIP6 模式中挑选出资料完备的 8 个模式集合平均结果,针对 3 种不同情景分别进行未来近期和远期两个时期的预估和分析,相对更能符合实际情况。

本文研究表明降水是影响黄河源区未来流量变化的主要气候因子,该结论与王磊等^[4]和保广裕等^[30]的研究结果一致。研究选取的 1976—2014 年中的 1990—2000 年是黄河源区的枯水期,同时近年来由于实施了退耕还林还草的一系列生态建设工程,使得耕地减少,林草地增加,土地利用类型发生改变,从而使黄河源区下垫面变化引起的径流增加^[31],而这个增加会具有长期的滞后效应^[32]。3 个水文站中玛曲站 2020s、2030s、2040s 的年均流量逐年增加,该结论与赵娜娜等^[33]的研究结果相一致。然而,由于本文使用的多模式集合为算术平均,已有研究表明多模式的不同权重集合可能会有更好的模拟效果,因此后续可通过采用多模式不同权重集合或超级集合模拟技术,以及偏差校正并结合动力降尺度方法等来增加未来预估的可信度和精度,减少不确定性。同时,由于黄河源区存在冰川与积雪,在全球变暖背景下,冰川与积雪的融化也会对黄河源区径流造成影响,而对不同地区的影响程度和与气象要素之间的定量关系,也需要进一步进行考究,这些都将是后续有待进一步开展和改进的工作。

参考文献(References):

- [1] 徐辉,王亿文,张宗艳,等.黄河流域水—能源—粮食耦合机理及协调发展时空演变[J].资源科学,2021,43(12):2526–2537. [Xu

- H, Wang Y W, Zhang Z Y, et al. Coupling mechanism of water-energy-food and spatiotemporal evolution of coordinated development in the Yellow River Basin[J]. *Resources Science*, 2021, 43(12): 2526-2537.]
- [2] Serrao E A O, Silva M T, Ferreira T R, et al. Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2022, 37(1): 54-69.
- [3] Bera S, Maiti R. Assessment of water availability with SWAT model: A study on Ganga River[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2021, 97(7): 781-788.
- [4] 王磊, 杜欢, 谢建治. 基于SWAT模型的张家口清水河流域径流模拟[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(4): 34-40. [Wang L, Du H, Xie J Z. SWAT based runoff simulation of Qingshui River Basin in Zhangjiakou City[J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(4): 34-40.]
- [5] 宋增芳, 曾建军, 金彦兆, 等. 基于SWAT模型和SUFI-2算法的石羊河流域月径流分布式模拟[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(5): 172-177. [Song Z F, Zeng J J, Jin Y Z, et al. Distributed simulation of monthly runoff using SWAT and SUFI-2 algorithm in Shiyang River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(5): 172-177.]
- [6] Li D F, Tian Y, Liu C M, et al. Impact of land-cover and climate changes on runoff of the source regions of the Yellow River[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2004, 14(3): 330-338.
- [7] 王梦园, 解宏伟, 赵杰, 等. 基于SWAT模型的黄河源区径流模拟[J]. *青海大学学报*, 2019, 37(1): 39-46. [Wang M Y, Xie H W, Zhao J, et al. Runoff simulation of the Yellow River source region based on SWAT model[J]. *Journal of Qinghai University*, 2019, 37(1): 39-46.]
- [8] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 445-456. [Zhou T J, Zou L W, Chen X L. Commentary on the Coupled Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6)[J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(5): 445-456.]
- [9] Yang X L, Zhou B T, Xu Y, et al. CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(5): 817-830.
- [10] 王予, 李惠心, 王会军, 等. CMIP6全球气候模式对中国极端降水模拟能力的评估及其与CMIP5的比较[J]. *气象学报*, 2021, 79(3): 369-386. [Wang Y, Li H X, Wang H J, et al. Evaluation of CMIP6 model simulations of extreme precipitation in China and comparison with CMIP5[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2021, 79(3): 369-386.]
- [11] 姜彤, 吕嫣冉, 黄金龙, 等. CMIP6模式新情景(SSP-RCP)概述及其在淮河流域的应用[J]. *气象科技进展*, 2020, 10(5): 102-109. [Jiang T, Lv Y R, Huang J L, et al. New scenarios of CMIP6 model (SSP-RCP) and its application in the Huaihe River Basin[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2020, 10(5): 102-109.]
- [12] 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. [Zhao F F, Xu Z X. Hydrological response to climate change in headwater catchment of the Yellow River Basin[J]. *Resources Science*, 2009, 31(5): 722-730.]
- [13] 唐芳芳, 徐宗学, 左德鹏. 黄河上游流域气候变化对径流的影响[J]. *资源科学*, 2012, 34(6): 1079-1088. [Tang F F, Xu Z X, Zuo D P. Response of runoff to climate change in the upper Yellow River Basin[J]. *Resources Science*, 2012, 34(6): 1079-1088.]
- [14] 王建群, 刘松平, 郝阳玲, 等. A1B情景下黄河源区径流变化趋势[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(2): 95-100. [Wang J Q, Liu S P, Hao Y L, et al. Change trend of runoff in source region of Yellow River under A1B scenario[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(2): 95-100.]
- [15] 李江苏, 孙威, 余建辉. 黄河流域三生空间的演变与区域差异: 基于资源型与非资源型城市的对比[J]. *资源科学*, 2020, 42(12): 2285-2299. [Li J S, Sun W, Yu J H. Change and regional differences of production-living-ecological space in the Yellow River Basin: Based on comparative analysis of resource-based and non-resource-based cities[J]. *Resources Science*, 2020, 42(12): 2285-2299.]
- [16] 刘壮添, 陈睿智, 王未. 气候变化和土地利用变化对黄河源区径流变化的累积影响评估[J/OL]. *人民珠江*, (2022-04-22) [2022-05-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1037.TV.20220422.1427.004.html>. [Liu Z T, Chen R Z, Wang W. Assessment of cumulative impact of climate change and land use change on runoff changes in the Yellow River source area[J]. *Pearl River*, (2022-04-22) [2022-05-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1037.TV.20220422.1427.004.html>.]
- [17] 杨泽康, 田佳, 李万源, 等. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势[J]. *生态学报*, 2021, 41(19): 7627-7636. [Yang Z K, Tian J, Li W Y, et al. Spatial-temporal pattern and evolution trend of eco-environmental quality in the Yellow River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7627-7636.]
- [18] 周文翀, 韩振宇. CMIP5全球气候模式对中国黄河流域气候模拟能力的评估[J]. *气象与环境学报*, 2018, 34(6): 42-55. [Zhou W C, Han Z Y. Assessing CMIP5 climate simulations and objective selection of models over the Yellow River Basin[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2018, 34(6): 42-55.]
- [19] 张建梅. 基于CMIP6全球气候模式的澜沧江流域气候变化初步评估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020. [Zhang J M. Preliminary Assessment of Climate Change in the Lancang River Basin Based on CMIP6 Data Set[D]. Nanjing: Nanjing University of Infor-

2022年6月

- mation Science & Technology, 2020.]
- [20] White E D, Easton Z M, Fuka D R, et al. Development and application of a physically based landscape water balance in the SWAT model[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(6): 915–925.
- [21] Osei M A, Amekudzi L K, Wemegah D D, et al. The impact of climate and land-use changes on the hydrological processes of Owabi catchment from SWAT analysis[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2019, DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100620.
- [22] Abbaspour K C, Johnson C A, Genuchten M T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure[J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3(4): 1340–1352.
- [23] Yang J, Reichert P, Abbaspour K C, et al. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China[J]. Journal of Hydrology, 2008, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.05.012.
- [24] 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 等. 基于模型研究质量评价的SWAT模型参数取值特征分析[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 2769–2777. [Rong Y, Qin C X, Du P F, et al. Characteristic analysis of SWAT model parameter values based on assessment of model research quality[J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 2769–2777.]
- [25] 曹灿, 孙瑞, 吴志祥, 等. 基于SWAT模型的南渡江上游流域径流对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 255–264. [Cao C, Sun R, Wu Z X, et al. Response of streamflow to climate change in upstream of Nanduijiang River Basin based on SWAY model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 255–264.]
- [26] 左德鹏, 徐宗学. 基于SWAT模型和SUFI-2算法的渭河流域月径流分布式模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(5): 490–496. [Zuo D P, Xu Z X. Distributed hydrological simulation using SWAT and SUFI-2 in the Wei River Basin[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, 48(5): 490–496.]
- [27] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划(Scenario MIP)概况与评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 519–525. [Zhang L X, Chen X L, Xin X G. Short commentary on CMIP6 Scenario Model Intercomparison Project (Scenario MIP) [J]. Climate Change Research, 2019, 15(5): 519–525.]
- [28] 赵梦霞, 苏布达, 姜彤, 等. CMIP6模式对黄河上游降水的模拟及预估[J]. 高原气象, 2021, 40(3): 547–558. [Zhao M X, Su B D, Jiang T, et al. Simulation and projection of precipitation in the upper Yellow River Basin by CMIP6 multi-model ensemble[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(3): 547–558.]
- [29] 李文婷, 杨肖丽, 任立良, 等. 基于SWAT模型的黄河源区蓝/绿水资源时空分布特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2021, (8): 59–66. [Li W T, Yang X L, Ren L L, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of blue and green water resources in the Yellow River source region based on SWAT model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021, (8): 59–66.]
- [30] 保广裕, 乜虹, 戴升, 等. 黄河上游河源区不同量级降水对径流变化的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 704–713. [Bao G Y, Nie H, Dai S, et al. Research on effects of different precipitation magnitudes on runoff changes in the headwater region of the upper Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 704–713.]
- [31] 孙思奥, 汤秋鸿. 黄河流域水资源利用时空演变特征及驱动要素[J]. 资源科学, 2020, 42(12): 2261–2273. [Sun S A, Tang Q H. Spatiotemporal patterns and driving factors of water resources use in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(12): 2261–2273.]
- [32] 赫晓慧, 孟军令, 郭恒亮, 等. 土地利用与气候变化对洛河流域径流的影响[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10): 31–34. [He X H, Meng J L, Guo H L, et al. Impacts of land use and climate change on runoff in Luohe River Basin[J]. Hydropower Energy Science, 2021, 39(10): 31–34.]
- [33] 赵娜娜, 王贺年, 张贝贝, 等. 若尔盖湿地流域径流变化及其对气候变化的响应[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 40–47. [Zhao N N, Wang H N, Zhang B B, et al. Runoff variation in Zoige Wetland Basin and its response to climate change[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 40–47.]

Runoff change simulation and future trend projection in the source area of the Yellow River

JIA Hejia, LI Xiehui, WEN Jun, CHEN Yaling

(Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: The source area of the Yellow River is an important part of the Yellow River Basin, and its runoff change affects the water resources and ecosystem security of the whole basin. Using the runoff data from 1976 to 2014, meteorological data, digital elevation model (DEM), land use, soil and meteorological data of three future scenarios in eight models of the 6th coupled model inter-comparison project (CMIP6) from 2021 to 2100, and based on the soil and water assessment tool (SWAT) hydrological model, this study simulated, projected, and analyzed the future runoff and variation of main hydrological stations in the source area of the Yellow River. The results show that: (1) The SWAT model has good applicability in historical runoff simulation in the source area of the Yellow River. The uncertainty of runoff simulation is small, and the simulated values are close to the measured values. (2) Parameter sensitivity analysis showed that 27 hydrological parameters have a certain impact on runoff simulation. Among them, soil evaporation compensation factor, the number of SCS (Soil Conservation Service) runoff curves under humid condition II, and shallow groundwater runoff coefficient are highly sensitive, and runoff is greatly affected by land surface evapotranspiration, underlying surface, and precipitation. (3) Precipitation is the main factor affecting future runoff. Under the two future scenarios of SSP126 and SSP245, the annual average discharge of Jimai, Maqu, and Tangnaihai hydrological stations shows an increasing trend in the two periods from 2021 to 2100, while under the SSP585 scenario, it shows an increasing trend from 2021 to 2060 and a decreasing trend from 2061 to 2100. Relative to 1976-2014, the annual average discharge at Tangnaihai and Maqu stations in the near future (2021-2060) increases the least under the SSP585 scenario and the most under the SSP126 scenario, and at Jimai station it increases the most under the SSP245 scenario and the least under the SSP126 scenario. Annual average discharge at three hydrological stations in the far future (2061-2100) increases the least under the SSP585 scenario and the most under the SSP245 scenario, except for Jimai station, which has the lowest increase in the SSP126 scenario. The research results can provide important scientific basis and theoretical support for water resources management, flood control and water storage, as well as ecological environment protection in the Yellow River Basin.

Key words: source area of the Yellow River; SWAT model; runoff simulation; runoff projection; CMIP model; future scenarios