

文章编号: 1006-4710(2015)04-0400-09

基于气候模式与水文模型结合的渭河径流预测

朱悦璐¹, 畅建霞^{1,2}

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘要: 为预测渭河流域未来时段的径流变化规律, 提出了 CanESM2 气候模式下 RCP4.5、RCP8.5 两种情景与半分布式水文模型 VIC 相对接的研究方案。采用气候模式输出的降水、气温等资料作为 VIC 模型的输入数据, 分析未来 2020s、2030s、2040s、2050s 四个时期渭河流域径流变化规律。计算结果表明: 由于未来气温变化幅度较小, 故影响水文模型预测值的主导因素为降水变化; 两种情景下, 未来径流与降水变化规律相同, 整体上呈现减少趋势, 在四个时期内呈现先减少后增加的趋势。

关键词: 气候模式; VIC 模型; 渭河流域; 径流预测

中图分类号: P333.9 **文献标志码:** A

Prediction of Weihe River runoff based on combination of climate model with hydrological model

ZHU Yuelu¹, CHANG Jianxia^{1,2}

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to forecast the runoff variation law in the Weihe River valley in the future time section, this paper suggests the research scheme of RCP4.5, RCP8.5 scenarios of two kinds under CanESM2 climate model and the semi-distributed hydrological VIC model docking. The output rainfall and temperature data by the climate model are used as the input data for VIC model to analyze the runoff variation laws in the Weihe River valley in the future 4 periods of 2020s, 2030s, 2040s, 2050s. The calculation results indicate that owing to small variation margin in the future temperature, the dominant factor affecting the hydrological model forecast values will be the precipitation variation, and that in the case of two scenarios, the variation laws of future runoff and precipitation will be the same, where by indicating a decreasing trend as a whole and appearing to have a trend toward decreasing first and increasing afterwards in the 4 periods.

Key words: climate model; VIC model; Weihe River Basin; runoff forecast

水文计算、水文分析、水库调度以及流域水资源规划等工作的重要前提是径流预测, 若无法预测未来时期某一流域的径流变化规律, 则上述工作的可信度会大大降低, 因此径流预测研究有重要的意义^[1-4]。如今进行径流预测的主要手段之一是将气候模式与水文模型耦合^[5], 气候预测的方法, 一种为发展高分辨率的 GCM(Global Climate Model)模

式^[6], 另一种是降尺度法^[7], 不论哪种方法, 其思想皆为各种模式嵌套假设不同情景, 将气候模式的输出作为水文模型的输入, 驱动水文模型得到不同情景下径流变化的情况。其中, 气候因素在假设的条件下经过排列组合, 构成了水文过程的“上边界条件”; 而地质地貌、植被以及人为建筑、径流系数、下渗条件、下垫面的空间分布构成了水文过程的“下边

收稿日期: 2015-04-08

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(51190093); 国家自然科学基金资助项目(51179148, 51179149); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金资助项目(2012490511)。

作者简介: 朱悦璐, 男, 博士生, 研究方向为水文水资源及边坡稳定。E-mail: yuelu_zhu@163.com。

通讯作者: 畅建霞, 女, 教授, 博导, 博士, 研究方向为水文水资源。E-mail: chxiang@xaut.edu.cn。

界条件”。对于水文模型的输出产品来说,产流、汇流这些要素是受上边界条件(气候模式)和下边界条件(LUCC类型)等不确定因素影响的。

因此,根据研究流域选合理的未来气候情景以及下垫面类型,是应用水文模型径流预测的关键。基于以上认识,本文选用CMIP5^[8]中精度较高的CanESM2模式(加拿大模式)下的RCP4.5情景(中等温室气体排放)以及RCP8.5情景(高等温室气体排放)来预测渭河流域未来降雨、气温等输出,利用2000s的土地利用类型图作为大尺度半分布式水文模型VIC的驱动数据,对渭河流域未来的径流进行预测。

1 气象模型的建立

1.1 研究区域

渭河是黄河第一大支流,发源于甘肃省鸟鼠山,涉及陕甘宁三省,于陕西潼关汇入黄河。流域总面积13.5万km²,干流全长818km,地形自西向东逐渐变缓,北部为黄土高原,南部是秦岭山区。渭河两岸支流较多,泾河是其最大的支流,北洛河为第二大支流。该流域地处干旱和湿润区的过渡地带,为大陆性季风气候,年均气温6~14℃,年均降水量450~700mm,年均蒸发量1000~2000mm。

1.2 统计降尺度模型的建立

统计降尺度是利用气候统计法建立大尺度环流场与局地气候要素之间的关系,其基本原理是假设大气过程与预报变量的时空变化之间存在经验关系,利用这种关系通过转换函数进行模拟和预测。

预报因子的选择一般遵循4个标准^[9-10],按相关原则选取预报因子为:5500m和1400m高度下的气温、位势、垂直速度、相对湿度、纬向/经向风速以及地表气温、地表大气压力、海平面压力、地表纬向/经向风速、地表风速、对流层温度、对流层大气压力。通常的,为判断模拟效果的优劣,以拟合度 R^2 、均值相对误差 R_{mean} 、标准差相对误差 R_{sd} 作为评价指标。

本研究采用逐步回归建立统计降尺度模型,对渭河各气象站降水、气温进行模拟,并加权平均到全流域上,其空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,覆盖渭河流域7个经纬网格,见图1。

计算结果表明,RCP4.5、RCP8.5两种情景在率定期(1960—2000年)、验证期(2001—2010年)评价效果良好,见表1。因此,本文以该两种情景所预测的未来4个时期(2020s、2030s、2040s、2050s)的月降水、气温数据作为驱动VIC模型的气象文件,来预测未来各时期渭河流域的径流。

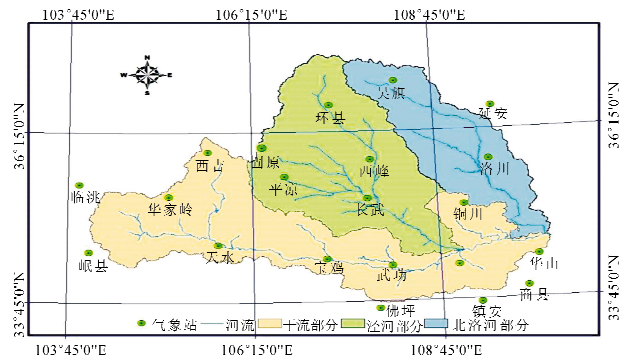


图1 渭河流域气象站点和NCEP网格示意图

Fig.1 Schemes of meteorological stations and NCEP grid in Weihe River Basin

表1 统计降尺度降水、气温评价指标

Tab.1 Statistical downscaling of precipitation, temperature evaluation index

降水	起止年份	$R_{mean}/\%$	R^2	$R_{sd}/\%$
率定期	1960—	-0.49~	0.515~	-17.80~
	2000	9.65	0.787	43.96
验证期	2001—	-35.83~	0.149~	-3.39~
	2010	0.39	0.842	68.96
气温	起止年份	$R_{mean}/\%$	R^2	$R_{sd}/\%$
率定期	1960—	-0.01~	0.659~	-3.68~
	2000	1.19	0.959	-25.28
验证期	2001—	-34.32~	0.566~	-34.32~
	2010	6.05	0.991	6.05

2 水文模型的建立

在自然界中,地表径流主要由两种机制产生:超渗产流和蓄满产流。在一个网格的不同部分,这两种产流机制一般会同时出现,预测未来径流变化规律时,忽略其中之一或者加强其中之一的作用都会导致过高或者过低评价地表径流。本研究选取VIC^[11-13]模型作为气候模式输出产品的对接。VIC可变下渗能力水文模型是一个基于空间分布网格化的分布式水文模型,该模型研究了从小到大、不同尺度、不同气候下的应用,在陆-气间能量平衡、水量平衡和径流模拟方面都有着出色的表现。VIC_4.1.2g版本考虑了在蓄满产流和超渗产流中土壤非均匀性的影响,因此,以超渗产流机制为主的干旱、半干旱的渭河流域选用VIC模型来研究未来径流变化规律是合理可行的^[14]。

2.1 气象资料

本研究以Arcgis将渭河流域按 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的经纬度分为75个小格,每个网格的气象输入数据为日降水、风速、最高温度与最低温度。在率定期,气

象资料来源于国家气象中心提供的渭河流域 21 个站点 2001—2010 年的强迫数据;在预测期,气象资料来源于 RCP4.5、RCP8.5 情景下未来降水和气温的输出。对于每个网格气象强迫数据的生成,本研究采用以距离为权重的插值方法,将 21 个气象站的数据插值到 75 个网格框架中。其公式为:

$$P_w = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} P_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \quad (1)$$

式中, n 为网格内包含站点的个数, d_i 表示第 i 个站点到网格中心点的距离, P_i 为第 i 个站点所对应的观测数据, P_w 即为插值后的结果。该插值法的特点是只以距离作为影响因素,而未考虑地形对降水和气温空间分布的影响。

2.2 汇流模型输入文件

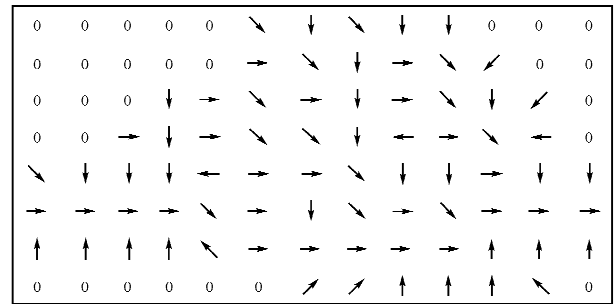
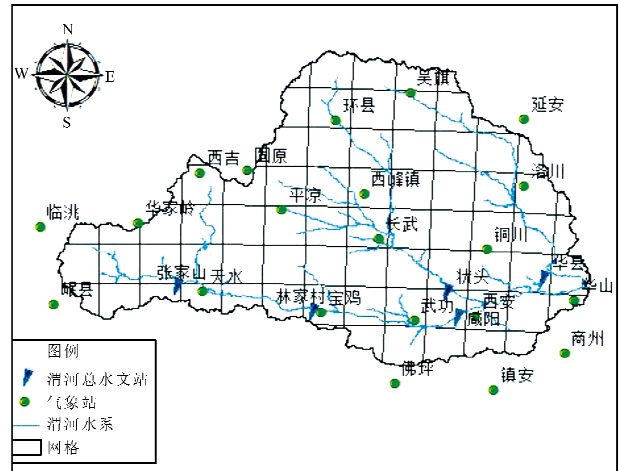
对于研究区网格系统,流动的方向用数字 1~8 来表示,生成的汇流模型如图 2。

应用 DEM(Deterministic eighth-neighbours)算法,将网格中心单元的水流流向定义为邻近 8 个网格单元中坡度最陡的单元:

$$\theta = \arctg \left| \frac{h_i - h'_i}{D} \right| \quad (2)$$

式中, h_i 为网格的高程, h'_i 为相邻网格的高程, D 为网格之间的中心距离。由于实际 DEM 高程数据存

在四周高中间低的凹陷点,其高程值与周围点最小高程值相等,因此,本研究对一些不合理的流向,按照实际流动方向进行了人工调整,结果见表 2。



注: 0 代表该网格不参与程序运行, 每个箭头的方向代表该网络的实际汇流方向。

图 2 模型网格划分

Fig. 2 Mesh of the model

表 2 人工修正流向表
Tab. 2 The manual correction of flow meter

经纬度	35°25'~ 107°25'	35°25'~ 105°25'	34°25'~ 106°25'	36°25'~ 106°75'	35°25'~ 108°75'	36°25'~ 109°25'	35°25'~ 109°75'
原流向	↘	←	→	↑	→	→	↘
修正后流向	→	↓	↙	↘	↓	↓	↓

流速文件、扩散系数文件、网格有效面积比文件的格式与汇流文件相同。由于研究的时间步长为月,因此可以用模型提供的缺省值,本研究设定扩散系数为 850 m²/s,流速为 2 m/s,网格有效面积比除了流域边界外,均取 1,即 100%。

2.3 模型参数率定

VIC 模型的植被类型基于 Maryland 大学发展的全球 1 km×1 km 土地覆盖数据来确定,共分为 14 类,植被参数库包含所有植被的相关参数,当网格中包含某类植被时就用相应的参数。在植被类型参数文件中, B 、 D_s 、 D_m 、 W_s 、 d_2 、 d_3 等 6 个参数需要按照网格内的实际情况进行调整,即参数率定。对于半分布式水文模型 VIC,每个网格的 6 个参数都

可改变,但由于模型本身的不确定性以及同一流域下垫面在时空上的近似性,本研究将流域按照汇流文件划分为林家村、咸阳、华县、张家山、状头 5 个分区,在相同分区内,网格内同一参数的取值相同,如图 3。

由模型的汇流机制可知,上述 5 个分区中,林家村站、张家山站、状头站三个分区控制站的参数相对独立,而咸阳站在林家村站的下游,因此参数受上游林家村站的影响;同理,华县站控制分区的参数分别受到林家村和咸阳站参数的影响。在实际操作中,采用逐步率定的步骤,应用均匀设计率定方法,对各个站点进行率定。均匀设计方案具有速度快、率定成果好的特点,因此本研究优先选用^[15-16]。

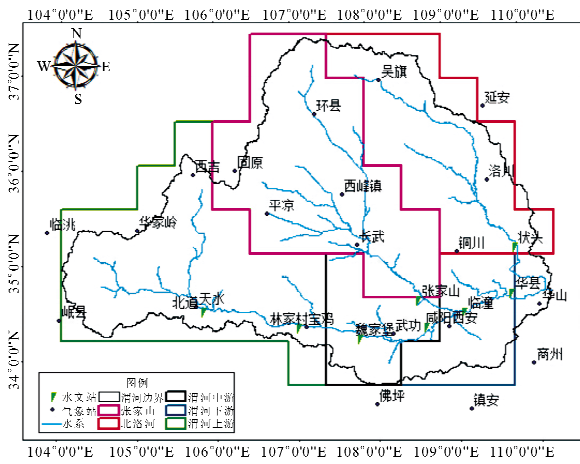


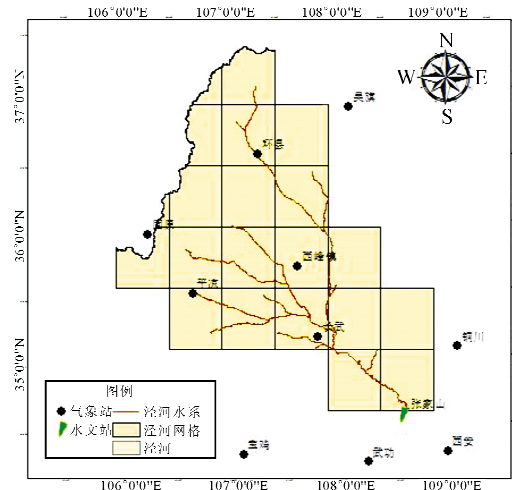
图3 参数率定分区

Fig.3 Parameter calibration partition

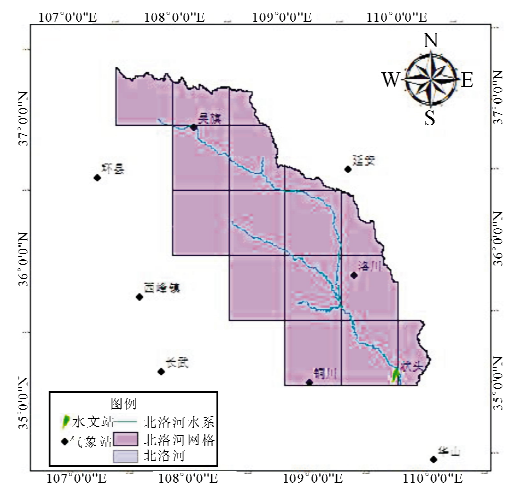
1) 对独立的张家山站、状头站控制区域的网格进行率定,作为泾河与北洛河的率定参数,见图4。

2) 当林家村站控制区域参数率定完成后,保持其值不变,对咸阳站控制区域的网格进行调参,直到咸阳站控制区域满足要求,此时,渭河中游的参数为林家村站控制网格和咸阳站控制网格之和,见图5。

3) 同理,保持林家村站、咸阳站控制站参数值不变,对华县站控制网格进行调参,最终,渭河下游华县站控制站参数为林家村站、咸阳站和华县站三个站控制的网格之和;当所有分区参数率定结束后,以华县站与状头站径流之和作为渭河流域所有网格汇流的最终结果,见图6。



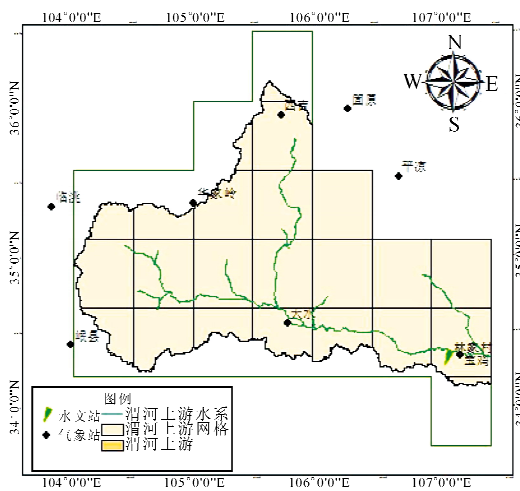
(a) 张家山站网格



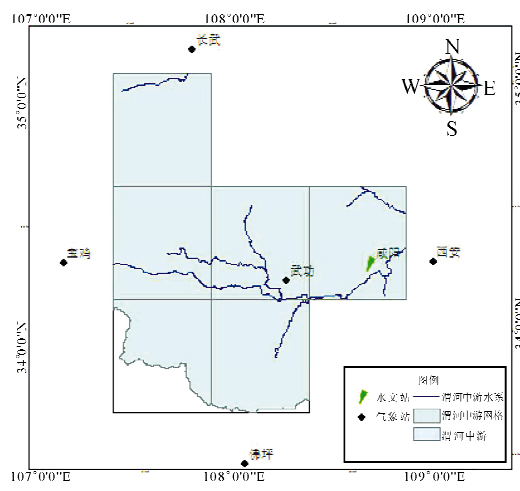
(b) 状头站网格

图4 张家山站、状头站控制区域

Fig.4 The control area of Zhangjiashan and Zhuangtou station



(a) 林家村站网格



(b) 咸阳站网格

图5 林家村站、咸阳站控制区域

Fig.5 The control region of Linjiacun and Xianyang Station

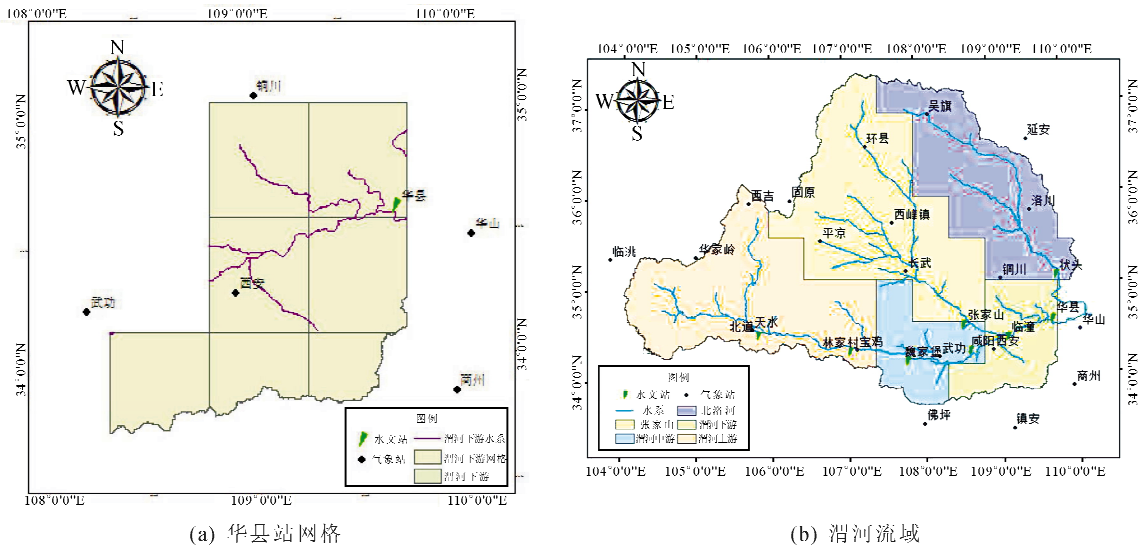


图 6 华县站、全渭河控制区域
Fig. 6 The control region of Huaxian and all of Weihe station

3 率定成果及检验

通常情况下,在率定完成后,用多年径流相对误差 $E_r(\%)$ 和模型效率系数 C_e 两个指标来判断率定成果的优劣。

$$E_r = (\overline{Q_c} - \overline{Q_o}) / \overline{Q_o} \quad (3)$$

式中, $\overline{Q_o}$ 和 $\overline{Q_c}$ 分别为实测和模拟的多年平均年径流量(mm)。

$$C_e = \frac{\sum(Q_{io} - \overline{Q_o})^2 - \sum(Q_{ic} - \overline{Q_o})^2}{\sum(Q_{io} - \overline{Q_o})^2} \quad (4)$$

式中, Q_{io} 和 Q_{ic} 分别为实测和模拟流量系列(m^3/s)。

在率定成果判定指标中, E_r 越小,模拟效果越好, C_e 值越接近于 1,模拟效果越好。本研究中 E_r 与 C_e 的阈值分别为 10%与 0.70。

按均匀设计原理对上述 5 个分区分别进行调参,应用每次设计的方案驱动 VIC 模型,将所得结果用(3)、(4)两式进行检验,直至满足所设定阈值,见表 3。

表 3 2000—2010 年各水文站模拟结果
Tab. 3 The simulation results of the hydrological stations from 2000 to 2010

站点	指标	
	C_e	E_r
张家山	0.84	2.58
状头	0.88	1.84
林家村	0.94	1.18
咸阳	0.82	3.21
华县	0.77	3.36

模型将 $34^{\circ}75' \sim 110^{\circ}25'$ 所对应的坐标作为渭河全流域网格汇流的出口断面,该断面的汇流与上

述 5 个分区相关,因此,渭河流域的最终参数为表 4 各个分区的参数之和。

表 4 2000—2010 年各水文站控制区域率定参数
Tab. 4 The Calibration parameters of all control region of hydrological stations from 2000 to 2010

站点	参数					
	B	D_s	D_m	w_s	d_2	d_3
张家山	0.58	0.663	2.0	0.552	1.8	0.734
状头	0.05	0.492	6.0	0.548	2.4	0.841
林家村	0.30	0.032	8.0	0.833	2.2	0.957
咸阳	0.42	0.025	11.0	0.668	1.7	0.456
华县	0.25	0.043	9.0	0.533	2.4	0.349

综上,渭河流域在 2000s 各土地利用类型条件下的土壤参数调试结束。以本套参数驱动 VIC 模型在全流域上的模拟,以 2001—2011 年的降水、风速、日最高气温和最低气温四组数据作为率定期的气象资料。均匀设计方案率定结果表明:2001—2011 年率定期,渭河流域 Nash 系数为 0.72,总量精度误差为 7.8%,其结果如图 7 所示。

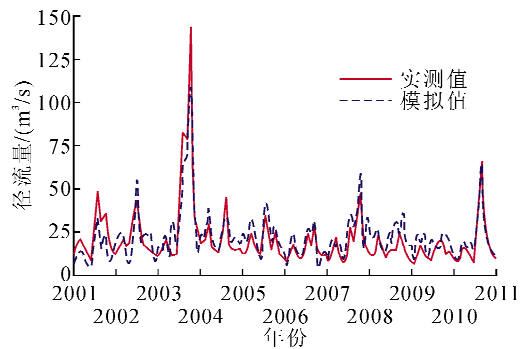


图 7 渭河流域率定期成果
Fig. 7 The results of calibrating in Weihe River

4 渭河流域未来径流变化

2000—2010年基准期渭河流域平均径流量为53.5亿m³,本研究将未来划分为2020s、2030s、2040s及2050s四个时段,保持流域下垫面条件即所率定的参数不变,在模型的每个网格中,按照反距离权重法输入全球气候模式CanESM2在RCP4.5和RCP8.5情景下未来4个时期渭河流域的降水和气温的预测结果,驱动VIC模型,得出未来相应时段的径流。由于在应用逐步回归法预测未来渭河流域21个气象站1月份的降水时,有些站点出现负值,因此本研究对这些异常值进行处理,以确保数据的合理性。具体的处理方法为:

- 1) 当负值绝对值与0很接近时,本研究认为绝对值 $|x_i| \leq 1$ mm,取该降水数据为0;
- 2) 当负值绝对值较小时,本研究认为绝对值

$|x_i| \leq 5$ mm,取其绝对值作为该点本月降水数据;
3) 当负值绝对值较大时,本研究认为绝对值 $|x_i| \geq 5$ mm,舍弃该值,并取对应月份长系列均值作为降水数据。

本研究以RCP4.5情景下宝鸡站2018年1月、商县站2022年1月、西安站2023年1月三个负值作为修正范例予以说明,见表5。RCP4.5模式预测结果见图8。

表5 降水修正示例
Tab.5 The example of precipitation correction

修正项目	站点		
	宝鸡	商县	西安
时间	2018年1月	2022年1月	2023年1月
原始降水/mm	-4.61	-0.765	-10.581
修正降水/mm	4.61	0	6.72
方法	取绝对值	取0	取多年平均

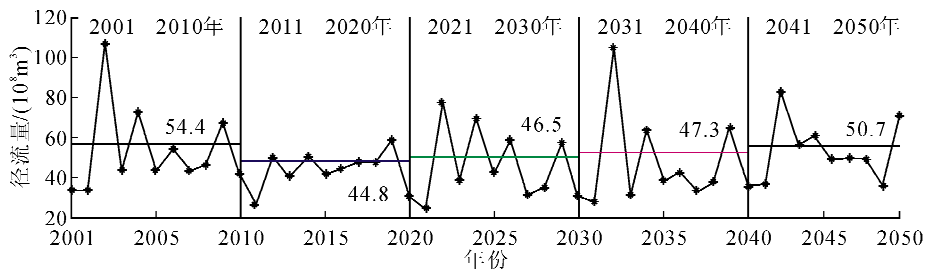


图8 RCP4.5情景渭河流域未来径流变化

Fig.8 The future changes in the Weihe River runoff under the RCP4.5 scenario

由统计降尺度的预测结果可知,在RCP4.5情景下,流域多年平均气温较基准期降低了0.17℃,因此认为该因素对VIC模型影响不显著;而多年平均降水较基准期减少132 mm。从图8可以看出,受降雨因素影响,渭河流域未来径流总体上呈现减少趋势;由于未来4个时期降水呈现先减少后增加的趋势,因此2020s、2030s、2040s、2050s的径流也呈现先减少后增加的趋势,其值分别比基准期减少了16.3%、13.0%、11.6%和5.2%(见表6)。

表6 基于RCP4.5情景VIC模型的未来径流预测
Tab.6 The future runoff forecast based on the RCP4.5 scenario in VIC model

年代	径流量/(10 ⁸ m ³)	状态	百分率/%
基准期	2000s	53.5	—
规划期	2020s	44.8	减少 -16.26
	2030s	46.5	减少 -13.08
	2040s	47.3	减少 -11.58
	2050s	50.7	减少 -5.23

同样的,保持流域下垫面条件率定参数不变,以RCP8.5情景下的降水、气温数据驱动VIC模型,得到该情境下未来渭河流域的径流变化规律,如图9、表7所示。

表7 基于RCP8.5情景VIC模型的未来径流预测
Tab.7 The future runoff forecast based on the RCP4.5 scenario in VIC model

年代	径流量/(10 ⁸ m ³)	状态	百分率/%
基准期	2000s	53.5	—
规划期	2020s	42.6	减少 -20.37
	2030s	44.5	减少 -16.82
	2040s	45.1	减少 -15.70
	2050s	50.2	减少 -6.16

在RCP8.5情景下,温室气体排放量加大,因此相较于RCP4.5情景,其降水更少,气温更高。图9表明,用该情景的气候数据驱动VIC模型所得的径流结果与RCP4.5预测趋势一致,整体上渭河流域未来径流呈现减少趋势,5个时期的变化规律均为先减少后增加。

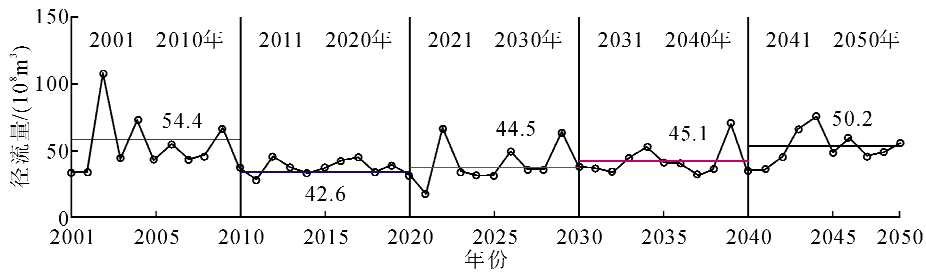


图 9 RCP8.5 情景渭河流域未来径流变化

Fig. 9 The future changes in the Weihe River runoff under the RCP8.5 scenario

综上,不论基于哪种情景,本文采用气候模式与水文模型耦合的研究思路,分析认为渭河流域径流的预测结果从整体上都呈现减少趋势,这一论断同传统的如 M-K、神经网络、多元线性回归、小波分析等预测方案所得结论一致,因此,从侧面验证了本研究假设情景的合理性,以及方案在流域的适应性。

为近一步分析不同排放情景下未来时期降雨、径流的关系,用模比系数将 RCP4.5 与 RCP8.5 情景下的降雨序列和 VIC 模型预测的径流序列进行转换,该方法可以消除均值大小带来的影响,如图 10、11 所示。

可以看出,不论哪种排放情景,渭河流域的降雨、径流在未来时期的趋势性一致,其线性趋势线的斜率为正,皆呈现缓慢增加趋势。

本研究将 RCP4.5 模式下未来降水多年均值的等值线绘于渭河流域图中,如图 12 所示。由图可知,该流域未来多年平均降水量分布东多西少,南多北少,呈现出由东南向西北逐渐减少的趋势。因此,该流域未来降水量有明显的地域分布不均匀性。同样的,将 RCP4.5 情境下 VIC 模型输出的网格径流深绘制成等值线图,可以看出, VIC 模型预测的每个网格的径流深分布也呈现明显的地域特征,并与未来降水有相同的分布规律。

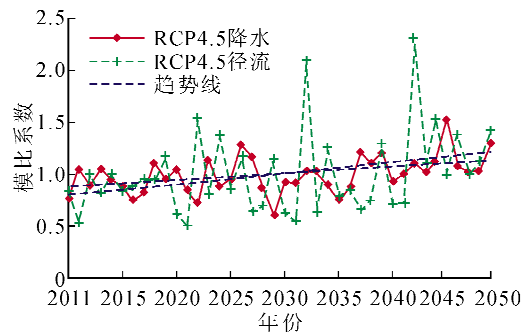


图 10 RCP4.5 情景渭河流域降水径流模比系数图

Fig. 10 The rainfall runoff modulus coefficient diagram on the RCP4.5 scenario in Weihe River Basin

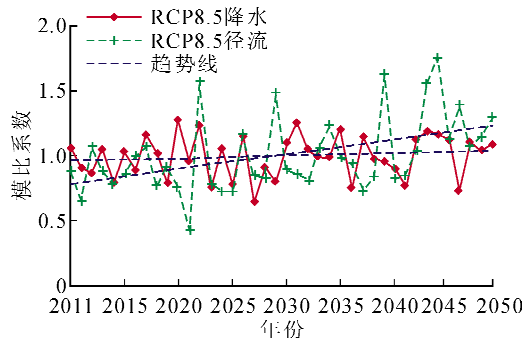


图 11 RCP8.5 情景渭河流域降水径流模比系数图

Fig. 11 The rainfall runoff modulus coefficient diagram on the RCP8.5 scenario in Weihe River Basin

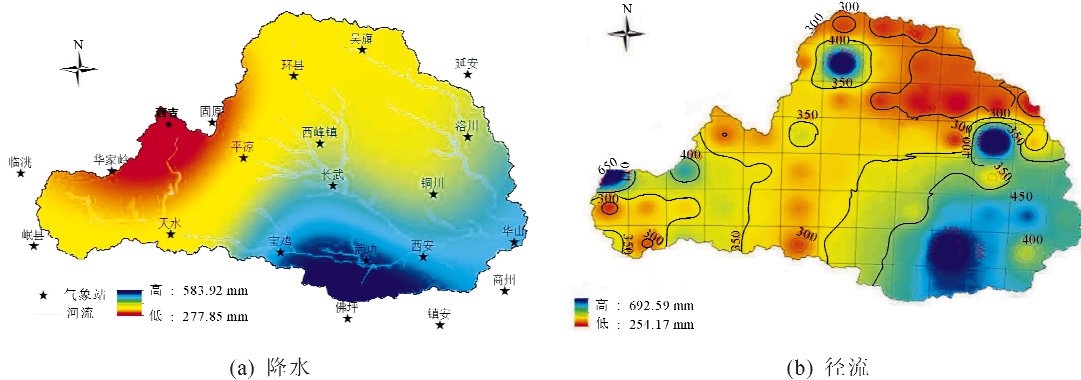


图 12 RCP4.5 情景渭河流域降雨、径流等值线图

Fig. 12 The contour line of rainfall and runoff under RCP4.5 scenario in Weihe River Basin

RCP8.5 的降水、径流等值线分布图与 RCP4.5 类似,可以看出,该情境下未来时期的降水、径流深的地域不均匀性比 RCP4.5 更为显著,在此不再赘述,如图 13 所示。

综上所述,可以认为在干扰因素较少时(例如本研究没有考虑人类活动的影响),VIC 模型对于

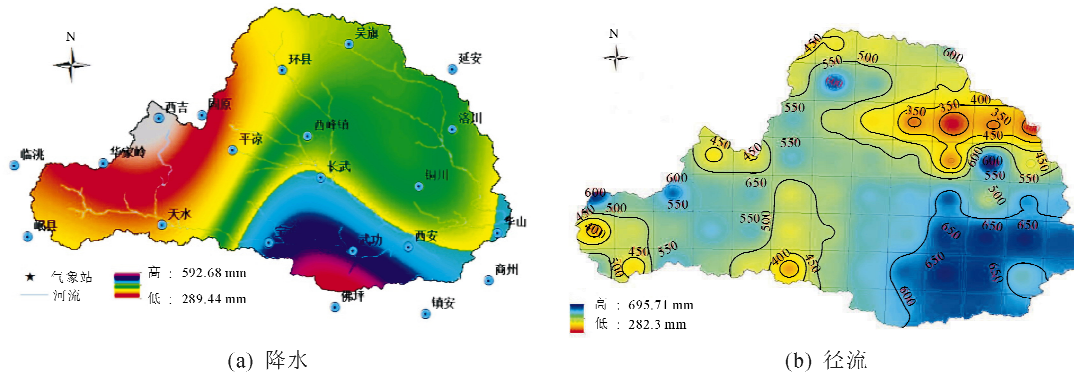


图 13 RCP8.5 情景渭河流域降雨、径流等值线图

Fig. 13 The contour line of rainfall and runoff under RCP8.5 scenario in Weihe River Basin

5 结 论

在利用气候模式与水文模型耦合预测径流规律时,应注意选取气候模式为该流域未来最可能发生的情景,这样才能确保研究的意义。由于未来时期我国西部大开发战略以及以渭河流域工农业在未来一个阶段内仍将呈现持续发展的状态,本研究选取了 CanESM2 模式下 RCP4.5(温室气体中等排放)和 RCP8.5(温室气体高等排放)两种情景下的气象输出与 VIC 相嵌套的结合模型,来预测渭河流域径流变化。主要得到以下结论:

1) 对 VIC 模型的汇流文件采用了图形化处理,以箭头的方向表示网格的汇流方向,该方法简单直观,可以人工调整不合理的流向,以提高 VIC 模型模拟的准确程度。在模型参数率定时,按照控制站点将流域分为林家村、张家山、状头三个独立的分区以及咸阳、华县两个非独立分区,研究表明,合理的分区有助于提高模型率定的速度和精度;

2) 对于 RCP4.5 与 RCP8.5 两种情景,由于未来气温变化幅度较小,所以影响水文模型预测值的主导因素为降水变化;与基准期的 53.5 亿 m^3 的径流量相比,两种情景下未来径流与降水变化整体上呈现减少趋势,且规律相同,在 2020s、2030s、2040s、2050s 四个时期呈现先减少后增加的趋势;研究没有考虑人类活动的影响,若要独立出人类活动的影响,则应该更替不同的水文模型下垫面进行研究;

3) 计算结果表明,RCP4.5 和 RCP8.5 两种情

CanESM2 气候模式的输出产品具有较好的适应性,可以较好的预测出不同排放情境下,由于降水、气温变化而导致的径流变化。

对于进一步的研究,如果要分离人类活动对径流的影响,可以采用保持水文模型的气象输入资料不变而更换下垫面的方法。

境下,未来降水、径流值分别与其模比系数过程线的斜率呈现正相关关系,降水等值线分布图与 VIC 模型生成的网格径流深等值线图有着相同的分布规律;

4) 受研究条件的限制,本文并未进行气候模式的预测与组合,而是采用了已有的计算成果与水文模型对接,在今后的研究中,将增强对气候模式的预测部分的研究,发展更多的气候模式产品,与水文模型耦合,以期获得不同的径流预测备选方案为工程服务。

参考文献:

- [1] 李艳玲, 畅建霞. 基于谐波小波的径流序列变异检测[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(5): 208-212.
Li Yanling, Chang Jianxia. Detection of the abrupt changes in runoff based on harmonic wavelet[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(5): 208-212.
- [2] 王孝礼, 胡宝清, 夏军. 水文时序趋势与变异点的 R/S 分析法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2002, 35(2): 10-12.
Wang Xiaoli, Hu Baoqing, Xia Jun. R/S analysis method of trend and aberrance point on hydrological time series [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2002, 35(2): 10-12.
- [3] Jiang S H, Ren L L, et al. Analyzing the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahc basin in northern China [J]. Hydrology Re-

- search, 2012, 43(1-2): 3-13.
- [4] 朱悦璐, 畅建霞, 刘宸岩. 渭河流域水文变异诊断研究[J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(2): 170-174.
Zhu Yuelu, Chang Jianxia, Liu Chenyan. The research on the hydrological variation diagnosis of the Weihe River Basin[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 30(2): 170-174.
- [5] 刘珂, 许吟隆, 陶生才, 等. 多模式集合对中国气温的模拟效果及未来30年中国气温变化预估[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 363-369.
Liu Ke, Xu Yinlong, Tao Shengcai, et al. Validation of multi-model ensemble to air temperature of China and projection of air temperature change in china for the next three decades[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(2): 363-369.
- [6] Knoxville B A. Sensitivity of simulated climate to model resolution [J]. Climate, 1991, 4(5): 469-485.
- [7] Wilby R L, Dawson C W, Barrow E M. SDSM-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts [J]. Environmental Modeling & Software, 2002, 17(2): 147-159.
- [8] Sailor D J, Li X. A semiempirical downscaling approach for predicting regional temperature impacts associated with climatic change [J]. Journal of Climate, 1999, 12: 103-114.
- [9] Wilby R L, Hay L E, Leavesley G H. A comparison of downscaled and raw GCM output: implications for climate change scenarios in the San Juan River Basin, Colorado [J]. Journal of Hydrology, 1999, 225: 67-91.
- [10] 雷江群, 畅建霞, 涂欢, 等. 统计降尺度方法对渭河流域气候要素的模拟及预估[J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(2): 176-181.
Lei Jiangqun, Chang Jianxia, Tu Huan, et al. Simulation and prediction of climatic elements in Weihe River Basin using statistical downscaling method [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(2): 176-181.
- [11] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99 (D7): 14415-14428.
- [12] Liang X, Xie Z. A new surface runoff parameterization with sub grid-scale soil heterogeneity for land surface models [J]. Advances in Water Resources, 2001, (24): 1173-1192.
- [13] Xie Z, Su F, Liang X, et al. Applications of a surface runoff model with Horton and Dunne runoff for VIC [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(2): 165-172.
- [14] 徐宗学. 水文模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 121-133.
- [15] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表 [M]. 北京: 科学出版社, 1994: 7-13.
- [16] 方开泰. 均匀试验设计的理论、方法与和应用—历史回顾 [J]. 论数理统计与管理, 2004, 23(3): 69-80.
Fang Kaitai. The uniform design theory, method and application—historical review [J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2004, 23(3): 69-80.

(责任编辑 周蓓)