

未来气候情景下天山西部山区融雪径流变化研究

周育琳, 穆振侠, 彭亮, 尹梓渊, 汤瑞

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:基于三种不同模式的CMIP5气象数据,采用互信息法挑选预报因子结合RBF神经网络模型,预测不同排放情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)下未来气候变化下天山西部山区融雪径流的变化情况。对三种模式下不同排放情景预测出的未来径流量进行分析发现:(1)未来径流量在2020~2030年将持续上升,在2060年趋于稳定;未来径流量在非汛期有大幅度的增加而在汛期径流量减少;(2)通过灰色相关性分析找到未来不同模式不同情景下影响径流的主要相关因子,对各相关因子未来变化情况进行分析,发现径流在非汛期有大幅度的增加而在汛期径流量减少的主要原因是:非汛期的降水增加而蒸发减少或增加幅度不大;汛期降水减少而蒸发随气温升高导致汛期的径流量减少。

关键词:融雪径流;CMIP5;互信息;RBF神经网络

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2018)06-0012-06

气候变化导致全球范围内的水循环时空分配现状发生变化,从而加剧水资源危机^[1]。随着全球水资源紧缺问题越发严峻,气候变化对水资源的影响成为众多学者的研究热点^[2]。研究气候变化对径流影响的主要手段是气候情景和水文模型结合,以未来气象数据驱动水文模型,预估未来径流的变化情况。目前CMIP5已经公布了50多种模式不同排放情景的气象数据,采用这种最新的情景模式数据预估未来气候变化已经受到广泛关注。陈晓晨^[3]基于43个CMIP5模式数据对中国地区降水的模拟能力进行评价,结果表明CMIP5模式可以较好地模拟出中国地区降水的时间变化和空间分布特征;王铮浩^[4]采用CMIP5的9种模式结合SWAT模型分析靖江流域未来径流与气候变化的关系;陆桂华^[5]采用21个CMIP5全球气候模式预估了未来30年(2011~2040年)RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5三个情景下长江上游积雪的时空变化;郭彦^[6]等评估了25个CMIP5模式对1906~2005年中国年平均气温变化的模拟能力,并与CMIP3模式比较。研究表明,CMIP5模式对中国平均气温的模拟能力较CMIP3模式有所提高。

新疆天山西部山区属于西北干旱山区,即全球气候变化最为敏感的地区之一,其径流主要以降水与冰川融雪补给为主,受全球气候变化的影响,其径流的时空分布将发生急剧变化,水资源不确定性大幅度增加^[7]。开展该区域未来水资源变化研究,不仅能够支持当地工农业生产,对当地社会安定和合理安排水资源也起着决定性作用。本文借助CMIP5数据的NorESM1-M、MIROC-ESM、CNRM-CM5三种模式不同排放情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)的气象数据,采用互信息法对该研究区影响径流的相关因子进行挑选作为RBF神经网络模型的输入变量,预测研究区未来径流的变化情况。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

喀什河流域位于新疆天山西部,整个流域全长约为304km,面积约为9541km²。流域上仅有一个乌拉斯台水文站以及临近的尼勒克、伊宁气象站,基于站点1960~2005年的数据统计:流域多年平均径流量为102.2m³/s;多年平均降雨量为561.7mm;春季最高

收稿日期:2017-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51469034、51209181、51569031);新疆自治区地方公派出国留学成组配套项目(XJDF201307);新疆水文学及水资源重点学科基金项目(xjswszyzdk20101202)

作者简介:周育琳(1992-),女,福建泉州人,博士,主要从事水文水资源研究工作。E-mail:597049304@qq.com

气温为 8.97℃,最低气温为 3.03℃;夏季最高气温为 18.33℃,最低气温为 14.77℃;秋季最高气温为 8.40℃,最低气温为 3.40℃;冬季最高气温为 -4.83℃,最低气温为 -13.13℃;多年平均气温为 5.39℃。

1.2 数据来源

借助 1960~2005 年实测的水文数据、气象数据、探空数据(气象部门为了探测高空的气象要素

变化规律,在不同等压面设置探空气球进行气象要素的监测)等模拟研究区融雪为主河流的径流量,采用 CMIP5 数据的 NorESM1-M、MIROC-ESM、CNRM-CM5 三种模式不同排放情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)的模拟气象数据预估研究区未来(2006~2100年)的径流量。数据主要来源如表 1 所示。

表1 数据来源
Table1 The sources of data

	站点(模式)	时间	因子	数据来源
水文数据	乌拉斯台水文站	1960~2005 年逐月	降水、气温、径流	新疆水文年鉴
气象数据	尼勒克气象站	1960~2005 年逐月	水汽压、相对湿度、蒸发、日照时数、风速	新疆气象年鉴
探空数据	伊宁气象站	1960~2005 年逐月	大气温度、高度(500hPa、700hPa、850hPa 三个等压面所对应气温、高度的平均值)	新疆气象年鉴
CMIP5 数据	NorESM1-M、MIROC-ESM、CNRM-CM5	1960~2005 年逐月; 2006~2100 年逐月	降水、蒸发、地表温度、大气温度、相对湿度	IPCC 网站数据中心

2 研究方法

采用互信息法筛选该流域预报因子,结合 RBF 神经网络模型模拟及预测天山西部山区融雪径流。

2.1 互信息法

互信息是一种信息度量可以用来表示两个或多个变量之的相关性,而且能反映变量间线性相关关系之外的非线性相关关系。如果变量 X、Y 互不相关,则 X、Y 的联合分布密度等于边缘分布密度之积,可表示为:

$$p_{X,Y}(x,y)=p_X(x)p_Y(y) \tag{1}$$

给定 N 个离散观测样本,变量 X、Y 之间互信息计算公式为:

$$MI=\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln \left[\frac{p_{X,Y}(x_i,y_i)}{p_X(x_i)p_Y(y_i)} \right] \tag{2}$$

由式(2)可知,当 X、Y 互不相关时,MI 取值将趋近于 0;当 X、Y 之间存在函数关系时,MI 取值将趋近于正无穷大。

借助实测数据共 9 个与径流相关的因子序列,分别计算这 9 个气象序列与径流序列的互信息量值 MI,选取与径流相关性最好的 5 个因子(降水、蒸发、地表温度、大气温度、相对湿度)作为预报因子,即模型的输入变量。

2.2 RBF 神经网络模型

RBF 神经网络模型是一种黑箱模型,可以在输入数据与输出数据建立一个网络关系,通过建立这种相关关系来预测数据的变化趋势。一般将数据分为训练

数据、检验数据以及预测数据。在输入训练数据建立 RBF 神经网络模型时,为了让神经网络的输出不断与目标输出拟合,将不断修改各个神经网络权值和阈值,从而得到一个逼近数据内在复杂规律的网络结构与参数^[9],再对检验数据进行检验分析,如果精度达到要求则模型网络参数成立,模型将进一步对数据进行预测。

3 结果分析

3.1 CMIP5 不同模式的径流模拟及预测结果分析

3.1.1 模型运行与检验结果分析

选降水、蒸发、地表温度、相对湿度与大气温度 5 个相关因子作为 RBF 模型输入,借助 CMIP5 数据库中 NorESM1-M(M1)、MIROC-ESM(M2)、CNRM-CM5(M3)三个模式中(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)的不同排放情景下的模拟数据对天山西部山区融雪径流进行预测。采用 1960 年 1 月~2000 年 12 月的数据对模型进行训练,2001 年 1 月~2005 年 12 月的径流预测结果为模型的检验数据。三个模式的径流模拟结果如图 1 所示。计算模拟径流值与实际径流值的相关系数 R² 和平均相对误差如表 2 所示。

从表 2 可以看出:(1)实测值对径流的预测值与径流实际值的 R² 为 0.95,平均相对误差为 -1.95%,表明所选用的互信息法挑选因子与 RBF 神经网络模型可得到较好的预测精度;(2)三个模式对径流的预测值与径流实际值都为高度相关(分别为 0.91、0.93、0.94),说

明这三个模式的模拟数据可以模拟出影响因子与径流间的相关性关系。

表2 不同模式径流模拟评价

Table2 The results of runoff simulation under different models

	实测模拟	M1	M2	M3
R^2	0.95	0.91	0.93	0.94
平均相对误差	-1.95%	-24.69%	-9.71%	-23.51%

从图1可以看出:(1)M1模式的预测值与实际值的低值拟合效果较好,但高值的拟合效果不理想,其预测的高值总是高于实际径流值,且高于实测数据的预测值;(2)M2模式的预测值与实际值的低值拟合效果较好,但高值的拟合效果不理想,其预测的高值总是低于实际径流值,且低于实测数据的预测值;(3)M3模式的预测值与实际的高、低值拟合效果都很好,与实测数据的拟合效果一致;(4)三个模式的模拟数据都能较好的拟合实测值并与实测数据的拟合效果大致相同,由此可证实这三个模式的模拟数据可应用于天山西部山区融雪径流的预测研究。

3.1.2 不同模式对未来径流的预测结果分析

用M1、M2、M3三个模式对天山西部山区融雪径流进行预测。预测2020年至2100年的径流量。

从图2可以看出:(1)M1、M2模式预测的未来径流量在2020~2030年的径流年总量迅速增长,约在2030年取得年径流最大值,2030~2050年年径流总量呈下降趋势,2060年后年径流量趋于平稳;(2)M3模式中RCP2.6情景下预测的未来径流量在2020~2060年的径流年总量迅速增长,而RCP4.5与RCP8.5情景下的未来径流预测量则是在2020~2060年缓慢增长,2060年后三个情景下的年径流量趋于平稳。

3.2 不同因子变化情况下对未来径流量的影响

为寻找未来径流的变化原因,对不同模式不同情景下的未来降水、蒸发、地表温度、相对湿度与大气温度5组模拟数据分别与其预测出的未来径流量进行灰色相关性分析,分析结果如图3所示,其中气泡大小反应出该因子与径流的灰色相关性大小,气泡越大灰色相关性越大。

从图3中可以看出:(1)M1模式中三个不同排放情景下各因子与径流的灰色相关性大小基本保持一

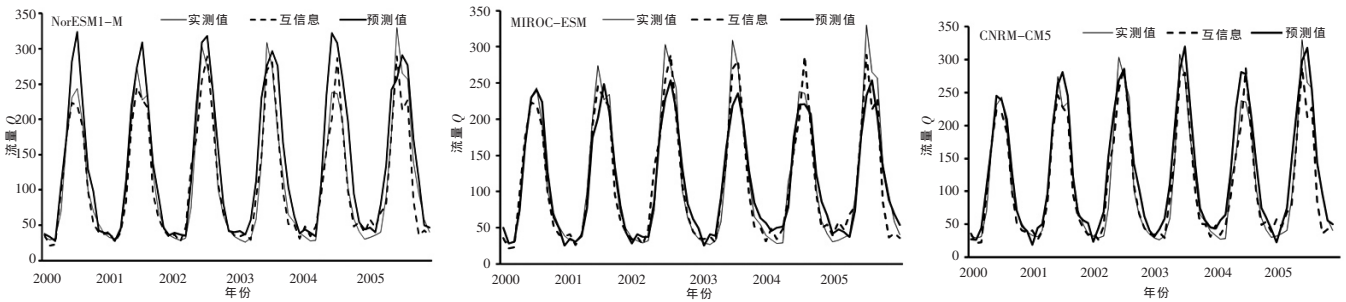


图1 不同模式径流模拟流量与实际流量对比

Fig.1 The comparison between the measured and simulated runoff under different models

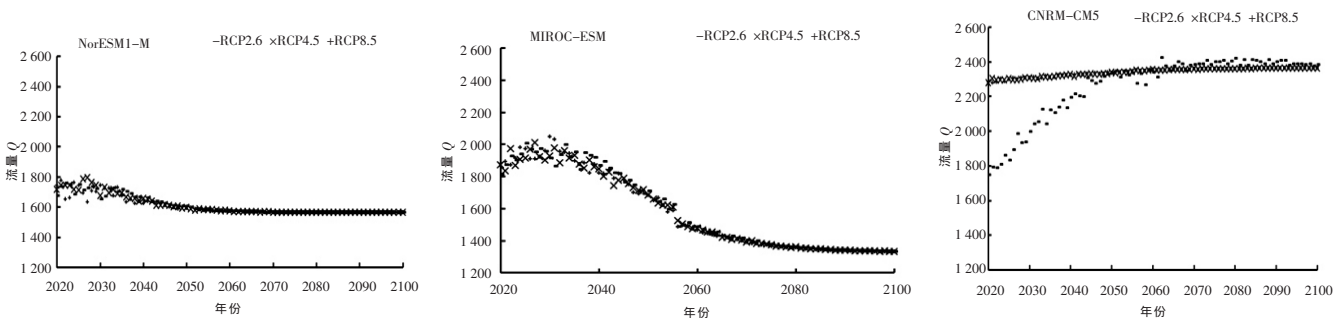


图2 不同模式对未来径流量变化的预测

Fig.2 The prediction of the future runoff changes under different models

致,其中降水、蒸发与大气温度与径流的相关性较大,可选做分析因子;(2)M2 模式不同情景下降水、蒸发因子与径流灰色相关性都大于其他因子,在 RCP2.6、RCP4.5 中大气温度的相关性大于地表温度,在 RCP8.5 情景下地表温度略大于大气温度,故在考虑总体相关性中选用降水、蒸发与大气温度作为 M2 的分析因子;(3)M3 模式的三种情景下可以明显得出降水、大气温度与地表温度是影响其径流变化的主要因子。得到不同模式的主要影响因子后,对不同模式下的不同因子未来变化情况进行分析,力寻未来径流变化的原因。

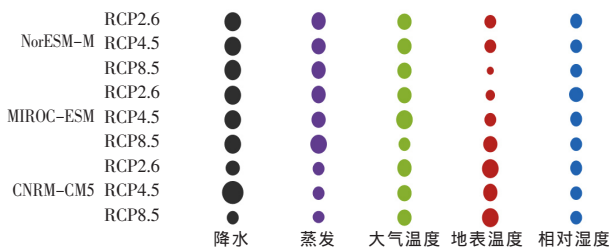


图3 不同情景下因子与径流的灰色相关性
Fig.3 The gray correlation between the factors and runoff under different scenarios

3.2.1 NorESM1-M 模式下的未来径流量分析

以 1960~2005 年作为基准年,计算 M1 模式不同排放情景下 2020~2100 年的多年平均降水、蒸发、大气温度以及径流较基准年的变化比例,如图 4 所示。

从图 4 可以看出:(1)三个不同排放情景下未来多年平均径流量在各月的增减比例保持大致相同,径流在非汛期(9月至次年4月)平均有 0.5%~2.8% 的增加,其中 1 月至 3 月增加幅度最大(2.5%~2.8%),而在 6、7 月平均有 0.18% 的减小,5 月与 8 月与基准期大致保持不变;(2)5~7 月不同情景下未来的降水量有不同程度的减少,在 0.04%~0.08% 的变化比例之间,其中 RCP4.5 的减少幅度最大,其他月份降水有不同幅度的增加(0.05%~0.13%),其中 RCP2.6 的增加幅度最大;(3)在不同情景下未来蒸发在 1 月有显著的减少,减少比例在 0.4%~0.8% 之间,11 月、12 月和 2 月都有部分情景的蒸发量减少,其他月份有不同幅度(小于 0.1%) 的增加;(4)不同情景下未来大气温度在 4~9 月有不同程度的上升,其中 4 月涨幅最大,RCP2.6 和 RCP8.5 情景的增长都大于 0.1%,6、7 和 8 月的涨幅较低,都低于 0.02%,在 10 月至次年 3 月,大气温度都有不同程度的减少,变化比例在 0.02%~0.2% 之间。

分析未来情景径流在非汛期增长的主要原因:(1)未来不同情景下的降水在非汛期增加,冬季增加最为明显;(2)非汛期未来不同情景的大气温度也有不同程度的减少,导致相应月份的蒸发也有不同程度的减少或增加幅度特别小。分析未来情景径流在汛期减少的主要原因:(1)未来不同情景下的降水在 5、6 和 7 月都有不同幅度的减少,在 4 月也有部分情景的降水量减少;(2)汛期未来不同情景的大气温度也有不同程度的上升,导致相应月份的蒸发也有不同的程度的增加带走部分径流。

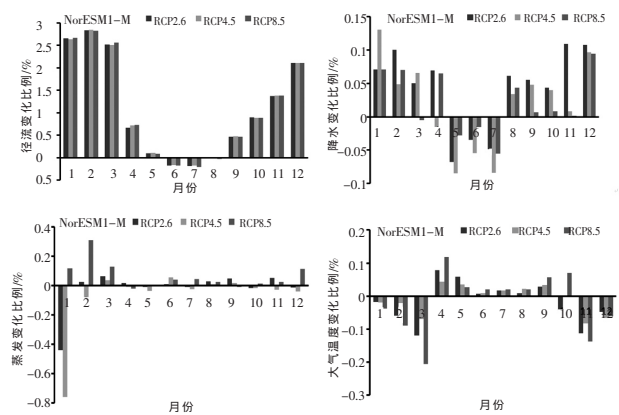


图4 NorESM1-M 模式下的径流、降水、蒸发和大气温度变化比例
Fig.4 The changes of runoff, precipitation, evaporation and atmospheric temperature under NorESM1-M model

3.2.2 MIROC-ESM 模式下的未来径流量分析

从图 5 可以看出:(1)RCP2.6 排放情景下未来多年平均径流量在各月的增减幅度较小,RCP4.5 与 RCP8.5 排放情景下径流的变化比例保持大致相同,在非汛期(9月至次年4月)平均有 0.45%~2.55% 的增加,其中 1 月至 3 月增加幅度最大(2.3%~2.55%),而在 6、7 月平均有 0.21% 的减小,5 月与 8 月与基准期大致保持不变;(2)RCP8.5 排放情景下未来降水量在各月的增减幅度较小,RCP2.6 与 RCP4.5 排放情景下降水的变化比例保持大致相同,1、5 和 6 月部分情景的未来降水量有不同程度的减少,在 0.02%~0.1% 的变化比例之间,其中 RCP4.5 的减少幅度最大,其他月份降水在不同情景下有不同程度的增加幅度,在 0.05%~0.13% 之间,其中 RCP4.5 的增加幅度最大;(3)在不同情景下未来蒸发在全年都有显著的上升,增加的幅度在 0.03%~0.24% 之间,其中 1 月与 12 月份的增加比例最大;(4)不同情景下未来大气温度在 3~11 月有 0.04%~1.49% 的增加,而在冬季(12 月至次年 2 月)有 0.19%~0.49% 的减少,其

中 RCP8.5 排放情景下的变化幅度最大。

分析未来情景径流在非汛期增长的主要原因是 RCP2.6 与 RCP4.5 排放情景下未来的降水在非汛期增加,冬季增加最为明显。分析未来情景径流在汛期减少的主要原因:(1)未来不同情景下的降水在 5 和 6 月份都有不同幅度的减少;(2)汛期未来不同情景的大气温度也有不同程度的上升,导致相应月份的蒸发也有不同的程度的增加带走部分径流。

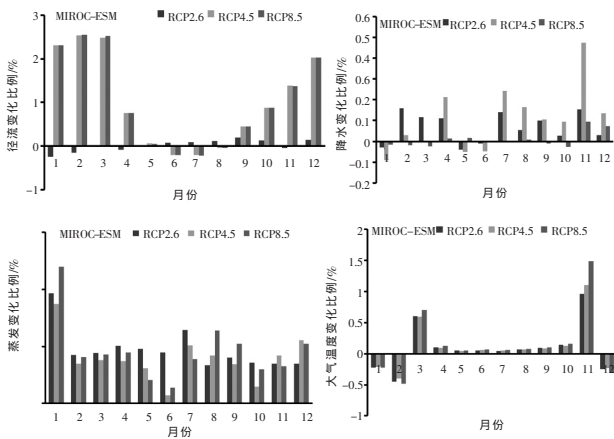


图5 MIROC-ESM 模式下的径流、降水、蒸发和大气温度变化比例
Fig.5 The changes of runoff, precipitation, evaporation and atmospheric temperature under MIROC-ESM model

3.2.3 CNRM-CM5 模式下的未来径流量分析

从图 6 可以看出:(1)RCP2.6 排放情景下未来多年平均径流量在各月的增减幅度较小,RCP4.5 与 RCP8.5 排放情景下径流的变化比例保持大致相同,径流在非汛期(9月至次年4月)平均有 0.9%~6% 的增加,其中 1 月至 3 月增加幅度最大(2%~6%),而在 6、7 月平均有 0.2% 的减小,5 月与 8 月与基准期大致保持不变;(2)5~7 月不同情景下未来的降水量有不同程度的减少,其中 5、6 月份的减少幅度较大,其他月份降水在不同情景下有不同的增加幅度,平均在 0.5%~0.3% 之间,其中 9 月的增加幅度最大;(3)在不同情景下未来地表温度在全年都有不同幅度的增加,PCR2.6 的增加比例最小,RCP8.5 的增加比例最大,并且地表温度在汛期增加最为明显;(4)不同情景下未来大气温度在 4 月至 10 月有不同程度的上升,其中 4 月与 10 月涨幅最大,在 11 月至次年 3 月,大气温度都有不同程度的减少,变化比例在 0.02%~1% 之间;(5)从降水和大气温度变化比例图中可知:在 RCP4.5 与 RCP8.5 排放情景下,CNRM-CM5 模式下的降水在(1~4 月和 8~12

月)的平均增大比例是其他模式的 1~4 倍,大气温度(在 4~10 月)的增大比例是其他模式的 1~2 倍,这是图 2 中 CNRM-CM5 模式相比于其他两种模式的未来径流量较大的主要原因。

分析未来情景径流在非汛期增长的主要原因:(1)大部分情景下未来的降水在非汛期增加;(2)非汛期未来不同情景的大气温度也有不同程度的减少,导致相应月份的蒸发也有不同的程度的减少或增加幅度特别小。分析未来情景径流在汛期减少的主要原因:(1)未来不同情景下的降水在 5、6 和 7 月都有不同程度的减少;(2)汛期未来不同情景的大气温度与地表温度都有不同程度的上升,导致相应月份的蒸发也有不同程度的增加带走部分径流。

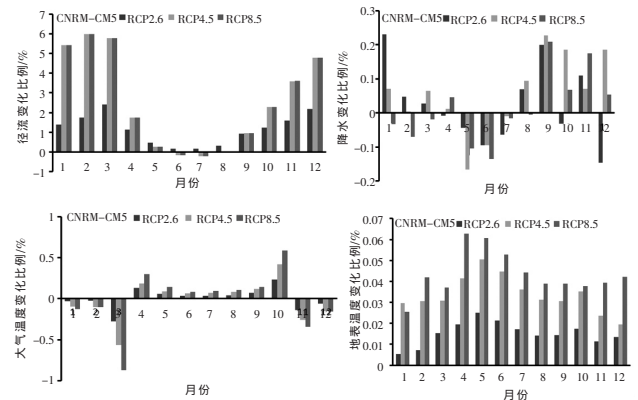


图6 CNRM-CM5 模式下的径流、降水、大气温度和地表温度变化比例
Fig.6 The changes of runoff, precipitation, atmospheric temperature and surface temperature under CNRM-CM5 model

4 结论

借助实测气象数据以及 CMIP5 中三种不同模式的模拟气象数据,采用互信息法挑选预报因子结合 RBF 神经网络模型对 2006 年至 2100 年径流量变化情况进行预测,通过灰色相关性分析找到未来不同模式不同情景下影响径流的主要相关因子,对各相关因子未来变化情况进行分析,找寻未来径流量变化原因。主要结论如下:

(1)采用互信息法筛选预报因子结合 RBF 神经网络模型,以 1960~2000 年训练模型,检验 2001~2005 年的径流预测精度发现其平均相对误差为 1.95%、 R^2 为 0.95,说明该研究方法适用于天山西部山区融雪径流的预报研究。

(2)采用 CMIP5 中三种不同模式的模拟气象数据,作为 RBF 神经网络模型的输入数据,以 1960~

2000年训练模型,检验2001~2005年的径流预测精度发现其预测出的径流量与实际径流的 R^2 在0.91~0.94之间,说明CMIP5中三种不同模式的模拟气象数据与径流之间的关系可以用来模拟天山西部山区实测气象数据与实际径流量的关系,其未来气象数据则可用于预测未来径流变化情况。

(3)对不同模式不同情景预测出的未来径流量进行分析发现:未来径流量在2020~2030年将持续上升,在2060年趋于稳定;未来径流量在非汛期有大幅度的增加而在汛期径流量减少。

(4)对不同模式的不同影响因子的未来模拟数据进行分析发现径流在非汛期有大幅度的增加而在汛期径流量减少的主要原因是:非汛期的降水增加而蒸发减少或增加幅度不大;汛期降水减少而蒸发随气温升高导致汛期的径流量减少。

参考文献:

- [1] 魏洁,畅建霞,陈磊. 基于VIC模型的黄河上游未来径流变化分析[J]. 水力发电学报, 2016,35(5):65-74.(WEI Jie, CHANG Jianxia, CHEN Lei. Runoff change in upper reach of Yellow River under future climate change based on VIC model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016,35(5):65-74. (in Chinese))
- [2] 邓慧平,吴正方,唐来华. 气候变化对水文和水资源影响研究综述[J]. 地理学报, 1996,51(4):161-170.(DENG Huiping, WU Zhengfang, TANG LaiHua. A review of the studies of the impacts of climate change on hydrology and water resources [J]. Acta Geographica Sinica, 1996,51(4):161-170. (in Chinese))
- [3] 陈晓晨. CMIP5全球气候模式对中国降水模拟能力的评估[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2014. (CHEN Xiaochen. Assessment of the Precipitation over China Simulated by CMIP5 Multi-models[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2014. (in Chinese))
- [4] 王珍浩,刘翼,董晓华,等. 基于CMIP5变化条件下的清江流域径流响应研究[J]. 水电能源科学, 2016,34(7):16-20. (WANG Zhenghao, LIU Yi, DONG Xiaohua. et al. Research of runoff change in Qingjiang River basin based on CMIP5 climate model [J]. Water Resources and Power, 2016,34(7):16-20. (in Chinese))
- [5] 陆桂华,杨焯,吴志勇,等. 未来气候情景下长江上游区域积雪时空变化分析-基于CMIP5多模式集合数据[J]. 水科学进展, 2014,25(4):484-493. (LU Guihua, YANG Ye, WU Zhiyong, et al. Temporal and spatial variations of snow depth in regions of the upper reaches of Yangtze River under future climate change scenarios: a study based on CMIP5 multi-model ensemble projections [J]. Advances in Water Science, 2014,25(4):484-493. (in Chinese))
- [6] 郭彦,董文杰,任福民,等. CMIP5模式对中国年平均气温模拟及其与CMIP3模式的比较[J]. 气候变化研究进展, 2013,9(3):181-186. (GUO Yan, DONG Wenjie, REN Fumin, et al. Assessment of CMIP5 simulations for China annual average surface temperature and its comparison with CMIP3 simulations[J]. Advance in Climate Change Research, 2013,9(3):181-186. (in Chinese))
- [7] 陈亚宁,杨青,罗毅. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012,35(1):1-9. (CHEN Yaning, YANG Qing, LUO Yi, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of northwest China[J]. Arid Land Geography, 2012,35(1):1-9. (in Chinese))

Change of Snowmelt Runoff in Western Tianshan Mountains under Future Climate Scenarios

ZHOU Yulin, MU Zhenxia, PENG Liang, YIN Ziyuan, TANG Rui

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Based on the meteorological data of three different models in CMIP5, the mutual information method was used to select the forecasting factors and the RBF neural network model was used to predict the changes of snowfall runoff in the western mountainous areas of Tianshan Mountains under different climate scenarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5). The results show that: (1) The future runoff will continue to rise during 2020-2030, and be stable in 2060. In addition, the future runoff increases significantly in non-flood season and decreases in flood season; (2) The main factors affecting the runoff in different scenarios under different modes were analyzed by the grey correlation method. Besides, the future changes of the relevant factors were analyzed. It is found that the main reasons for the increase of runoff in non-flood season and the decrease of runoff in flood season are that the precipitation increase while the evaporation decrease or increase slightly in the non-flood season, and the precipitation decrease while the evaporation increase with the temperature in the flood season.

Key words: snowmelt runoff; CMIP5; mutual information method; RBF neural network