



· 海绵城市 ·

【主持人语】在全球气候变化和城市化进程不断加快的影响下,极端降雨事件呈现多发、频发的特性。对此,增强城市防洪排涝能力,建设海绵城市、韧性城市成为现阶段我国城市雨洪领域研究的重点,也是发展水利新质生产力并使城市得以可持续发展的关键。围绕这一主题,诸学者分别从洪水过程模拟、降雨径流污染特征分析、绿色屋顶适建潜力评估、城市流域径流演变等多个方面开展海绵城市系统构建与城市洪涝治理研究。以期从应用需求的角度对城市雨洪防治和海绵城市的统筹规划建设等提供技术支持。

【主持人】王红瑞,北京师范大学水科学研究院教授,博士生导师。

变化环境下城市流域径流演变及响应研究

刘艺欣¹,李永坤²,张 力¹,王丽晶²,王红瑞¹

(1. 北京师范大学 水科学研究院,北京 100875;2. 北京市水科学技术研究院,北京 100048)

摘要 流域径流是变化环境的重要响应要素,在气候变化和人类活动的影响下,流域径流量已经发生了深刻变化,研究其演变及响应特征有助于提高人类对变化环境的应对能力。以北运河流域北京市主要集水区为研究区,通过分析水文气象观测站近40年水文数据,分析北运河流域降水径流变化趋势,提取洪水场次;引入全球气候模式数据,利用降尺度模型进行降尺度处理,与水文模型结合对流域径流进行了预报分析。结果表明:流域历史降水趋势性变化不明显,径流量呈增大趋势;未来北运河流域(通县站)水资源的变化在气候变化影响下较为明显,随着温度升高、降水增加,流量增大,预测流量在21世纪中期达到新高,为 $385.1\text{ m}^3/\text{s}$;随着辐射强迫的持续增加,水文响应程度也相应增大,北运河流域大部分径流峰值出现在2050时期后期和2090时期。研究结果可为城市流域未来水资源利用、防洪减灾措施与双碳目标的实现路径的探索提供一定的参考。

关键词 气候变化;流域径流;径流预报;双碳目标

中图分类号:TV122 **DOI**:10.16152/j.cnki.xdxzbz.2024-03-001

Urban watershed runoff evolution and the response under changing environment

LIU Yixin¹, LI Yongkun², ZHANG Li¹, WANG Lijing², WANG Hongrui¹

(1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract Basin runoff is an important response factor to changing environment. Under the influence of climate change and human activities, watershed runoff has undergone profound changes. Studying its evolution

收稿日期:2024-01-14

基金项目:国家自然科学基金(52279005);北京市自然科学基金(8222057)。

第一作者:刘艺欣,女,从事水文学及水资源研究,liuyixin@mail.bnu.edu.cn。

通信作者:王红瑞,男,教授,博士生导师,从事水资源系统分析研究,henrywang@bnu.edu.cn。

and response characteristics is helpful to improve human's ability to cope with changing environment. Taking the main catchment area of the Beijing municipal area of the North Canal as the study area, the variation trend of rainfall and runoff in the North Canal basin was analyzed by analyzing the hydrological data of hydrometeorological observation stations in the past 40 years, and the flood field was extracted. The global climate model data is introduced, the downscaling model is used for downscaling, and the runoff forecast is analyzed in combination with the hydrological model. The results show that the historical precipitation trend of the basin is not obvious, and the runoff is increasing. In the future, the change of water resources in the North Canal Basin (Tongxian Station) will be more obvious under the influence of climate change. With the increase of temperature and precipitation, the runoff will increase, and the discharge is predicted to reach a new high of $385.1\text{m}^3/\text{s}$ in the middle of this century. With the continuous increase of radiative forcing, the degree of hydrological response increases correspondingly, and most of the peak runoff in the North Canal basin occurs in the late 2050 and 2090 periods. The research can provide some reference for the future water resource utilization, flood containment and disaster reduction measures and the realization path of dual carbon targets in urban watershed.

Keywords climate change; watershed runoff; runoff forecast; carbon peaking and carbon neutrality goals

城市流域径流关系着城市生态环境、防灾减灾、水资源利用以及社会经济发展和稳定。百年间,全球气候发生了以变暖为主要特征的变化。探究径流对气候变化的响应,尤其是准确预估未来气候变化情景下径流变化对于水资源规划和管理以及水利高质量发展等都具有重要的科学与应用价值。研究气候变化对水文水资源的影响及响应应对措施是当今学界研究的重点问题之一。

关于水文气象要素的演变规律研究已相对成熟。1999年,叶陌生等^[1]分析了新疆地区水文气象特征的变化特征,判断了新疆地区冰雪径流对气候变暖的响应。周婷等^[2]利用 Mann-Kendall 和 Pettitt 数理统计方法分析了渭河清盛水文站的突变点。陈鑫等^[3]使用 Morlet 小波变换对关河水库流域水文序列进行周期性分析,验证了气候因素以及人类活动影响下的径流周期性变化特点。基于历史资料研究水文要素演变规律愈发成熟后,国内外专家学者开始对未来径流的演变展开研究。国外对径流预测研究较早,最早开始选取常用的数理统计方法对径流序列进行分析并使用对线性理论作相应预测。Carlson 等^[4]使用 ARMA(p, q) 模型对年径流进行预测。Theodore 等^[5]使用预测突发洪水和水文气候研究的分布式水文模型来解决径流的预测问题,使得该模型的使用范围得到扩大,并有力地促进了该研究的开展。伴随着计算机技术的迅猛发展,人工神经网络、支持向量机和深度学习等各类人工智能方法被相继提出并逐渐在水文预报领域得到广泛应

用^[6]。Shamseldin 等^[7]在水文学研究领域引入了 ANN 组合方法。Hong M 等^[8]提出采用遗传算法对相空间重构预测法进行改进,从而解决长期径流序列时对嵌入维度难以确定的难题,结果表明改进后的相空间重构预测法在丰水年和枯水年应用方面更有优势。

国内外学者围绕气候变化下的径流预测开展了大量的工作,并形成了“未来气候情景-水文模拟-径流预测”的研究思路^[9]。全球气候模式基于旋转球体纳维斯托克斯方程采用热力学理论模拟了包括辐射、潜热等多种能源项在内的全球大气环流模式,模拟和假设了全球气候在历史和未来时期的变化趋势。现有的全球气候模式可以较好地模拟大区域和季节尺度的平均气候变化特征,但是存在空间分辨率低、输出存在偏差等诸多问题,不能直接用于驱动影响模型(如水文模型)进行气候变化影响评估。为了解决全球气候模式与区域影响评估模型(如水文模型)之间的结合问题,降尺度方法得以发展。其中统计降尺度方法既能发挥出数值模式对大尺度环流较高的预测水平,又结合了区域范围内统计特征,避免全球模式对区域尤其是复杂地形的预测局限性。

目前,利用全球气候模式数据和统计降尺度模型在城市流域开展径流预报的研究相对较少。本研究基于全球气候模式数据和更完整的原始水文数据,构建了适用于北京市域内北运河流域的 HEC-HMS 模型,预测了流域未来降雨径流变化情况,旨在丰富预测城市流域径流的方法和技术体

系,为北运河流域应对气候变化、开展水资源战略规划和管理、研判治水方略^[10]、制定双碳目标实现路径^[11]等提供有力的科学支撑,对于促进实现城市高质量发展^[12]具有重要的理论和实践意义。

1 研究区概况

本文的研究区为北运河流域北京市域主要集水区,北京市北运河流域分布在潮白河流域与永定

河流域之间,流域面积为4 423 km²,是北京市内平原流域面积最大的流域(见图1)。气候特征方面,研究区属于大陆季风性气候,多年平均气温约11.7℃;降水多集中于6—9月,多年平均降水量约为600 mm,年际降水量变化较大,年内分布不均。地形特征方面,北部、东北部为山区,东南部由堆积平原构成,地势总体上呈西北高、东南低^[13]。

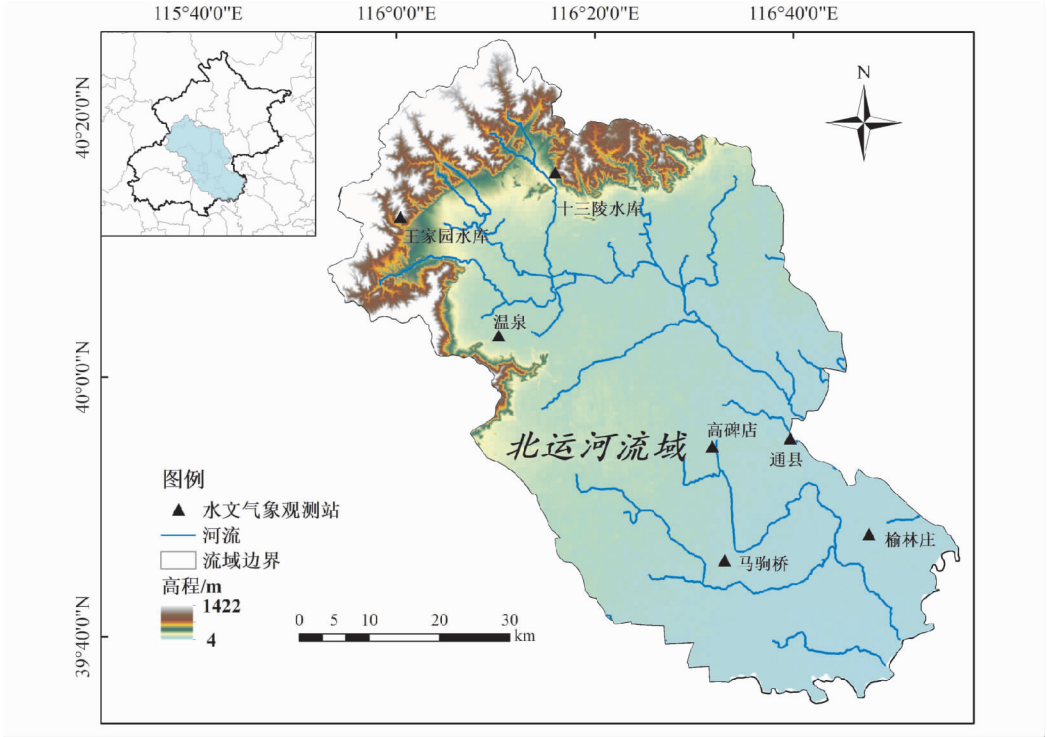


图1 研究区概况图
Fig. 1 Summary map of the study area

2 数据和方法

2.1 数据收集与处理

本研究涉及的数据包括输入模型的水文数据、气候模式数据等,数据来源及基本信息如下。

1) 水文数据。收集北运河流域王家园水库、十三陵水库、马驹桥、榆林庄、温泉、高碑店、通县7个代表性水文监测站、雨量监测站点的不同历时时期的逐日、逐场次降雨径流摘录资料。主要包括:2010—2020年降雨径流摘录资料、1980—2021年逐年径流量统计资料、流域控制站控制面积等,将数据整理为小时尺度,整理为适合模型输入的格式。北运河上游为温榆河,至通县站(即通州北关闸)与通惠河相汇合后始称北运河,是

北运河重要的监测站点之一,通县(北)闸上站的降水流量资料是研究北运河干流历史降水径流演变的重要资料来源(见图2)。根据2010—2020年通县(北)闸上站流量资料,提取出北运河流域7个代表性水文监测站的14场雨洪关系对应较好的场次洪水及降雨(见表1),作为后续研究内容基础数据资料。

2) 气候模式数据。本研究数据由CMIP6的气候模式BCC-CSM2-MR资料和北京市2000—2010年观测降雨资料构成,模式资料来源于国家气候中心。本研究选取基于SSP2(中度发展)的RCP 4.5路径下的人口密度和经济的未来预估数据(即SSP245典型情景)进行下一步研究,分析研究区未来不同时期气候变化特征。该数据的空间分辨率为1.125°×1.125°。本文通过同倍比法对

比两者历史年份(2000—2010 年)的降水数据,对未来气候情景数据进行了修正。

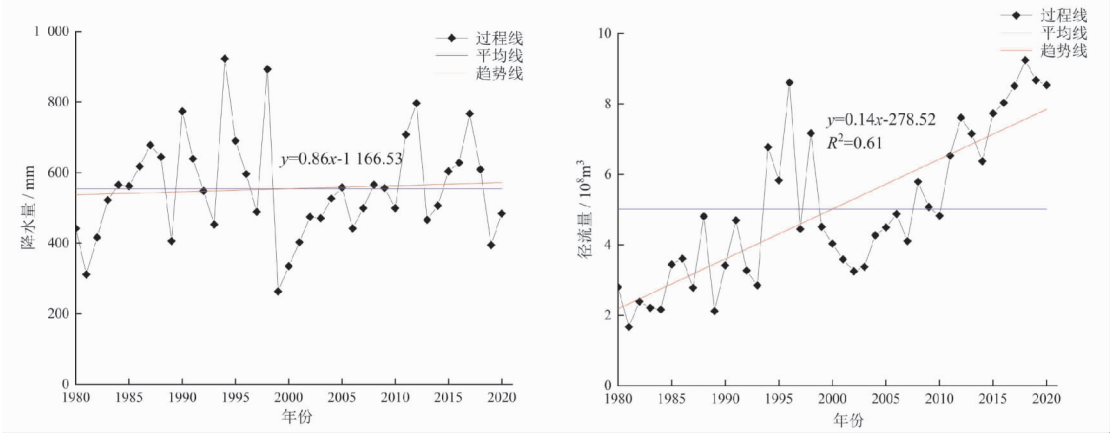


图 2 1980—2021 年通县观测站年平均降水量与径流量变化情况

Fig. 2 Changes of annual mean rainfall in Tongxian observation station from 1980 to 2021

表 1 北运河流域场次洪水特征统计表

Tab. 1 Statistical table of sub-flood characteristics in North Canal basin

序号	洪水 场次	洪水 历时/h	洪峰流量 /m ³ ·s ⁻¹	洪峰模数 m ³ /(s×km ²)	径流深/mm	径流 系数	峰型
1	110623	30	143.40	0.09	3.46	0.11	单峰
2	110814	30	173.00	0.10	6.47	0.16	双峰
3	120721	73	449.52	0.27	27.99	0.16	单峰
4	140901	75	102.00	0.06	5.98	0.10	双峰
5	150721	82	106.00	0.06	9.46	0.18	双峰
6	150727	42	161.00	0.10	7.09	0.23	单峰
7	150904	44	241.00	0.14	12.01	0.17	单峰
8	160719	144	659.92	0.39	51.84	0.19	单峰
9	180716	54	440.00	0.26	27.23	0.38	单峰
10	180723	60	320.80	0.19	15.82	0.21	单峰
11	180807	36	320.00	0.19	13.94	0.28	单峰
12	190804	50	341.68	0.20	13.66	0.39	单峰
13	190909	47	342.00	0.20	18.22	0.31	单峰
14	200812	61	311.00	0.18	15.47	0.21	双峰
15	平均值	59	293.67	0.17	16.37	0.22	—

2.2 研究方法

2.2.1 CMhyd 降尺度模型

流域模型通常用于模拟未来气候条件对水文过程的影响^[14]。然而,Teutschbein 和 Seibert 指出,由于系统模型误差或网格单元内的离散化和空间平均,温度和降水的模拟经常显示出明显的偏差,这阻碍了模拟气候数据作为水文模型直接输入数据的使用。偏差修正程序用于最小化每日

时间步长上观测和模拟气候变量之间的差异,以便由修正的模拟气候数据驱动的水文模拟与使用观测气候数据的模拟更好地匹配。CMhyd 是一种工具,可用于提取从全球和区域气候模型中获得的数据并对其进行偏差校正^[15]。

偏差校正程序采用转换算法来调整气候模型输出。基本思想是确定观测和模拟的历史气候变量之间的偏差,以参数化偏差校正算法,该算法用

于校正模拟的历史气候数据。偏差校正方法被假定为固定的,即用于当前气候条件的校正算法及其参数被假定为对未来条件也有效。因此,相同的校正算法被应用于未来的气候数据。

2.2.2 HEC-HMS 模型

HEC-HMS (hydrologic engineering center-hydrologic modeling system) 是一款用于模拟人工或者自然状态下流域降雨径流过程的分布式水文模型。HEC-HMS 的主要功能是用于洪水预报计算,在模拟洪水过程中融合物理概念。该模型考虑了流域下垫面情况以及气候因素,可连续或场次模拟流域在各种情况下的降雨径流过程,有助于提高洪水模拟精度。作为一款适用于湿润、半湿润、干旱和半干旱地区的分布式水文模型,HEC-HMS 模型具有强大的功能,不同模块中有不同的产汇流计算方法,多种计算方法结合使用,可以找到更适合研究流域的组合方法,使模拟结果更准确。基于研究区的自然地理条件,本研究选取以下 4 种方法组合。

1) SCS 曲线数法。SCS 曲线数法是一种经验计算流域降雨损失方法,由美国水土保持局基于水平衡原理率先提出,在短期降雨形成的径流过程中模拟效果更好^[16]。该方法计算公式为

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$
(1)

式中: P_e 代表时间 t 时的累计净降雨,mm; I_a 代表初始降雨损失,mm; S 代表土壤潜在最大截留,mm。根据众多实验性集水区的结果分析,美国土壤保护局推导出了 I_a 和 S 之间的关系式

$$I_a = 0.2S$$
(2)

累计净雨量公式转换为

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$
(3)

由于土壤潜在最大截留 S 与集水区中间参数曲线数 CN 存在相互转换关系, S 和 CN 转换公式如下。

CN 是无量纲参数,其理论取值在 $0 \sim 100$ 之间,取值大小与流域内土地利用、植被、土壤类型等下垫面情况密切相关,在降雨径流实际模拟过程中, CN 可根据流域下垫面真实情况对照美国国家工程手册提供的 CN 值表查询,一般取值范围在 $40 \sim 98$ 之间。

2) SCS 单位线法。SCS 单位线是一种参数化单位线模型^[17]。SCS 单位线将任意时间 t 的单位

线流量 U_t 表示成单位线的峰值流量 U_p 乘以一个系数和单位线峰值时间 T_p 的比值,计算公式为

$$U_p = C \frac{A}{T_p}$$
(4)

式中: A 代表集水区面积; C 是转换常数(SI 单位时区 2.08)。

峰值时间 T_p 计算公式为

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag}$$
(5)

式中: Δt 代表净降雨历时(HEC-HMS 中时间的计算间隔); t_{lag} 代表集水区洪峰延时,表示为降雨中心位置时间与峰值时间的差值。

SCS 单位线法只要输入集水区流域滞时 t_{lag} ,与汇流时间 t_c 的关系可用下式大致估算

$$t_{lag} = 0.6t_c$$
(6)

其中, t_c 是汇流时间的总和,包括地表坡面径流单元运动时间、浅槽水流单元运动时间和河道单元运动时间。

3) 退水曲线法。退水曲线法是一个基流指数衰减模型,源于对集水区任意时刻的基流量和初始基流可能存在某种联系的假设而建立,常用来解释集水区蓄水量的自然排水问题^[18],函数关系式为

$$Q_t = Q_0 k^t$$
(7)

式中: Q_t 表示时间 t 时的基流, m^3/s ; Q_0 代表初始基流(时), m^3/s ; k 为指数衰减常数。退水曲线取值如表 2 所示。

表 2 典型退水曲线常数取值

Tab.2 The constant value of the typical regression curve	
流量类型	退水常数
地下水	0.95
层间水	0.8 ~ 0.9
地表径流	0.3 ~ 0.8

4) 马斯京根法。马斯京根法是对水力学方程进行水文学简化,即将连续方程简化成水量平衡方程(河段入流减出流等于河段蓄水量变化)、将动量方程简化为槽蓄关系曲线(河段出流量与蓄水量成正比),由于使用起来较简单^[19],故应用较广泛。其方程为

$$Q_t = C_1 I_t + C_2 I_{t-1} + C_3 Q_{t-1}$$
(8)

$$C_1 = \left(\frac{\Delta t - 2KX}{2K(1 - X) + \Delta t} \right)$$
(9)

$$C_2 = \left(\frac{\Delta t + 2KX}{2K(1 - X) + \Delta t} \right)$$
(10)

$$C_3 = \left(\frac{2K(1 - K) - \Delta t}{2K(1 - X) + \Delta t} \right) \tag{11}$$

式中: Q_t 和 Q_{t-1} 分别对应河道 t 时刻、 $t-1$ 时刻的出流量; K 为洪水在河道的运动时间; X 为流量比重因子,一般取值范围在 $0 \sim 0.5$ 之间; Δt 为时间步长; I_{t-1} 、 I_t 分别为初始时刻入流量和计算时刻入流量。

2.2.3 模拟结果评价指标

根据《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008,以下简称“规范”),选取洪水预报合格率(R)、洪峰流量相对误差(E_Q)、峰现时差(ΔT)及纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient,NSE)作为模型模拟精度等级评定指标。评价标准为: E_Q 、 ΔT 绝对值越小,模拟结果越好; R 、NSE 的值越接近 1,模型精度越高。各项评价指标的计算方法如下。

1) 洪峰流量相对误差计算公式

$$E_Q = \frac{Q_s - Q_0}{Q_0} \times 100\% \tag{12}$$

式中: E_Q 为洪峰流量的相对误差值; Q_0 为实测洪峰流量, Q_s 为模拟出来的洪峰流量。根据规范规定, E_Q 允许误差范围为实测洪峰的 20%。

2) 峰现时差

$$\Delta T = T_2 - T_1 \tag{13}$$

式中: ΔT 为峰现时刻之差; T_1 为实测洪水峰现时间; T_2 为模型模拟出的峰现时间。根据“规范”规定, ΔT 允许误差范围在实测峰现时刻与模拟洪水过程的峰现时刻之间时距的 30% 之内,最大不超过 3 h。以上这 3 个指标可以用来评价场次洪水模拟结果是否达标。

3) 纳什效率系数(NSE,式中以 N_{NSE} 表示)计算公式

$$N_{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \tag{14}$$

式中: Q_i 为模拟的流量值; Q 为实测的流量值; n 为资料序列长度; $\bar{Q}$ 为实测流量的均值。

4) 合格率计算公式

$$R = \frac{m}{n} \tag{15}$$

式中: R 为洪水预报的合格率; n 为预报总次数; m 为合格预报次数。

根据合格率及确定性系数可以评价模型模拟精度等级,规定如表 3 所示。

表 3 模型模拟洪水精度等级
Tab.3 The accuracy level of the model to simulate flood

精度等级	甲级	乙级	丙级
合格率($R/\%$)	$R \geq 85.0$	$85.0 > R \geq 70.0$	$70.0 > R \geq 60.0$
纳什效率系数(N_{NSE})	$N_{NSE} \geq 0.90$	$0.90 > N_{NSE} \geq 0.70$	$0.70 > N_{NSE} \geq 0.50$

3 结果分析

3.1 模型参数率定

本研究中模型涉及的参数有 CN 值、不透水面积比例、地表截留、洪峰滞时、初始流量、衰退系数以及河道汇流演算所需的槽蓄曲线坡度 K 和比重因子 X 。采用人工调参法和目标函数法结合的方式来进行参数率定,率定过程如下:CN 值与洪峰滞时使用 CNgrid 和 HEC-Geo HMS 工具计算得出,其余参数首先通过人工试错的方式,结合典型流域特征以及其他学者在相似流域所作研究,在参数合理范围内逐一尝试不同的取值,不断重复该步骤直到模拟的洪水过程与实测结果较为吻合;在人工试错的基础上,使用 HEC-HMS 水文模

型内置的单变量梯度搜索(Univarite-Gradient)自动优化方法,以均方根误差(RMS)为参数率定标准,以实测资料为目标值,通过对各参数的初设值进行多次重复叠代,最终得出调整优化后的模型参数。同样选取流域 2010—2020 年间的 4 场典型洪水,其中 3 场用于各子流域参数率定,1 场用于模型验证,探索 HEC-HMS 模型在该流域的适用性,率定期的场次洪水模拟结果如图 3 所示。

流域参数率定结果见表 4。可以看出,CN 值平均值为 70。各子流域的洪峰滞时 lag 受到 CN 值和流域植被覆盖、地形地貌等多种因素的影响亦各不相同;衰退系数的取值能够侧面反映流域的退水规律,率定的结果看出各子流域衰退系数取值相同,因此子流域的退水规律基本相似。

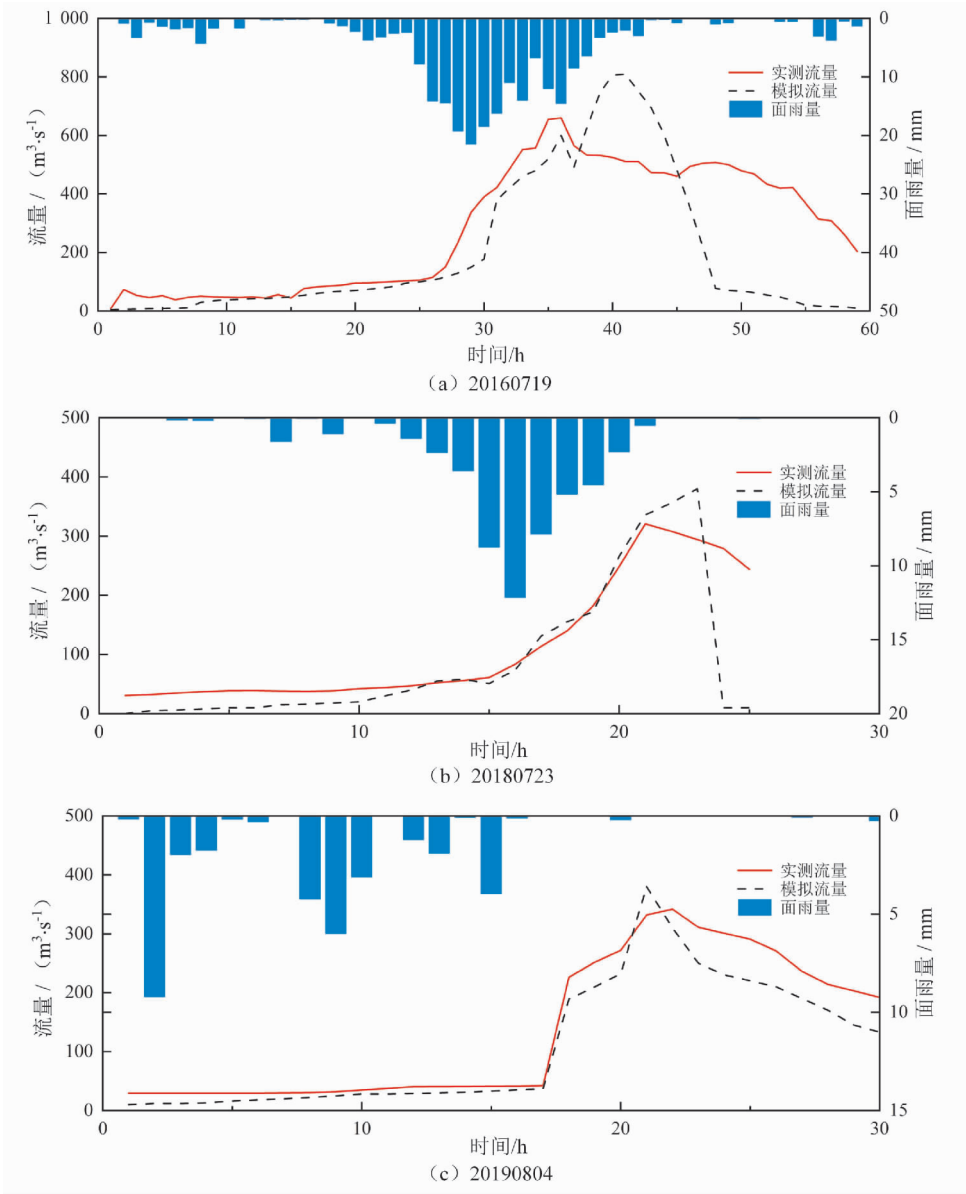


图3 率定期的场次洪水模拟
Fig. 3 Rate regular field flood simulation

峰现时间随着槽蓄曲线坡度 K 值的增大滞后,洪峰流量会随着比重因子 X 值的增大而减小。采用马斯京根法进行北运河流域(通县站)河道汇流演算,本研究最终率定的 K 值和比重因子 X 分别为2 h和0.2。

3.2 模型模拟结果及误差分析

据流域验证期和率定期场次洪水模拟结果,将洪峰流量、峰现时间的实测值和模拟值进行对比,计算结果的相对误差及纳什效率系数见表5。

由表5可知,洪峰流量相对误差的平均值为16.88%,模拟的峰现时刻与实测值的误差不超过4 h,平均峰现时间误差为2.25 h。平均 Nash 系

数为0.70,其中20180723场次洪水的 Nash 系数为0.64,本场洪水洪峰误差为18.45%,但峰现时间误差较小,为2 h。根据对本场洪水降雨过程分析,本场洪水对应着强降雨,起涨时间短,汇流时间快,洪峰流量较大,因此模拟效果不好。参照《水情预报规范》中对于洪峰流量、径流深、峰现时间和确定性系数的误差要求,挑选的4场洪水中合格率为75%,构建模型的精度为乙等。综上所述,HEC-HMS 分布式水文模型在流域验证良好,因此该模型适用于北运河流域(通县站),可模拟分析该流域洪水过程,率定出产汇流参数可分析该流域现阶段降雨事件下的洪水响应特征。

表 4 子流域模型参数率定值

Tab. 4 The calibration of sub-basin model parameters

子流域	流域面积 /km ²	CN 值	不透水面积 比例/%	地表截留 /mm	洪峰滞时 /min	初始流量 /(m ³ ·s ⁻¹)	衰退系数
Upper	164. 4	75	38	11	128	10	0. 9
Lower	195. 27	65	25	9	100	10	0. 8

表 5 北运河流域 HEC-HMS 模型校准和验证结果

Tab. 5 The calibration and verification results of HEC-HMS model in North Canal basin

洪水场次	洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)		洪峰误差/%	峰现时刻误差/h	Nash 系数
	实测	模拟			
20160719	659. 9	753. 4	14. 19	4	0. 67
20180723	320. 8	380. 0	18. 45	2	0. 64
20190804	341. 7	376. 7	10. 26	1	0. 80
20200812	311. 0	387. 6	24. 6	2	0. 68

3. 3 径流模拟结果

基于 CMhyd 模型对气候模式数据进行降尺度和偏差校正处理,再根据校准后的 HEC-HMS 模型,将基于 SSP2 的 RCP 4. 5 典型浓度发展路径下 2015—2100 年修正后的降水数据写入模型,其余参数不变,分析 2030—2100 年流域径流。

降尺度数据的时间范围是 2010—2100 年,本研究选取 2000—2015 年降雨数据为历史参照时段,对 2030—2039 年、2050—2059 年和 2090—2100 年(分别代表本世纪近期、中期和末期)展开研究。径流模拟结果见图 4。

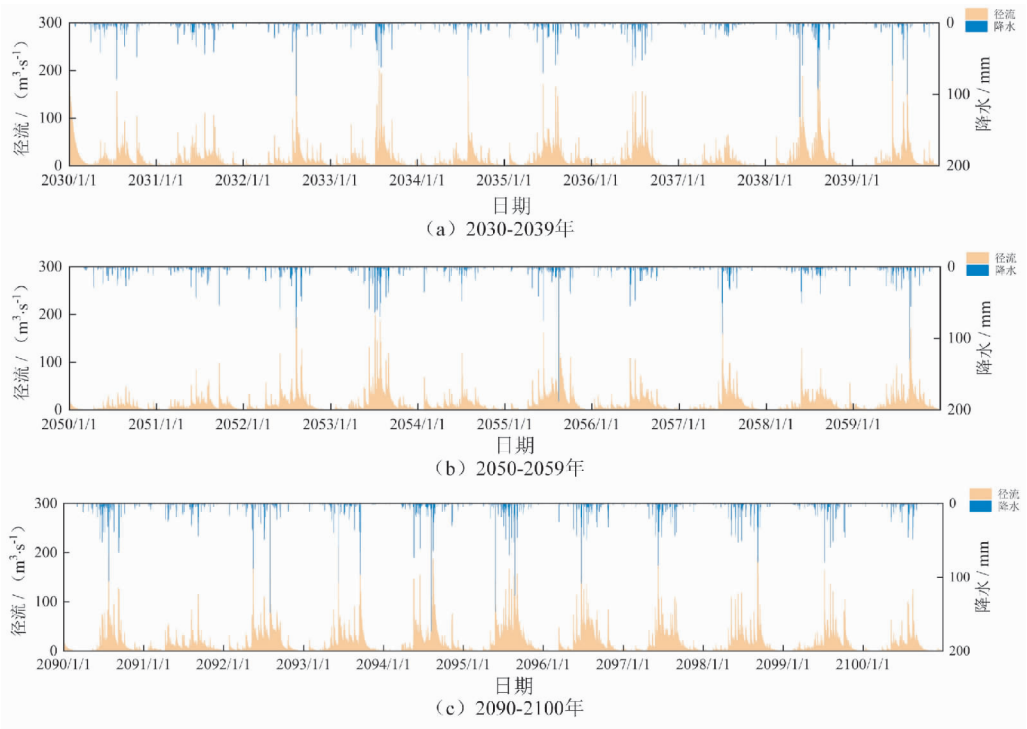


图 4 HEC-HMS 分布式水文模型径流模拟结果

Fig. 4 Results of runoff simulation by HEC-HMS distributed hydrological model

径流的变幅是气候变暖的一种响应结果,未来北运河流域(通县站)降水与径流的变化在气候变化影响下较为明显。结合 SSP245 未来气候情景下的径流预测结果,评估未来 2030—2100 年

降水量,得到近期、中期与末期的日降水量最大值分别为 131.38、187.71 和 173.39 mm。由于 2030 年左右温度升高相对不明显,降水量没有发生较大变化。伴随着设置情境中气温逐渐升高、辐射强迫增加,降水量也呈增大趋势。

分析未来气候情景下的径流变化可得:随着未来流域温度升高和降水增加,流量也在增大。由图 4 可知,SSP245 排放情景下 3 个阶段径流均呈增加趋势,流量在中期达到新高,为 385.1 m³/s。北运河流域大部分径流峰值出现在 2050 时期的后期和 2090 时期,表明随着辐射强迫的持续增加,水文响应程度也相应增加,月径流增加幅度也不断加大。同时由图 4 可知,到 2050 时期,流域 SSP245 发展路径下的月平均径流低于其他两个时期,枯水期月径流的情况更为显著。北运河流域未来 2090—2100 年模拟年径流过程线与中期情况较为类似,总体上径流的峰值大部分都出现在 SSP245 发展路径下的中期和远期。而近期由于降水和气温的变化与当下相比变幅不大,径流量也没有发生较大变化。因此,通过提高能源利用效率、保护修复森林、草原、湿地等措施有效实现碳排放强度和总量“双控”^[20],通过减缓环境温度与降水的增幅速度,可有效减小径流的变化幅度,减轻北运河流域水旱灾害;城市流域依托丰富的自然资源得以稳定快速发展,未来北运河流域要科学合理利用水资源,规划好水资源如何用、用多少,将流域优势充分发挥在城市建设中,实现城市的绿色高质量发展。

4 结论

径流演变趋势与决定水循环的气候条件和人类活动密切相关,如河川径流的流量和流速取决于各种环境因素,包括降水的数量和模式、气温、地形地貌和下渗能力。除了自然因素外,河流的水文状况还受到人类取用水资源、水库调蓄拦截、土地利用和覆被变化的影响。结合上述分析,综合对流域径流预报的模拟结果,针对北运河流域的防洪调度提出以下对策及建议。

1) 关注北运河流域 2038 年、2055 年、2095 年关键年份洪水情况,及时通过温潮减河、运潮减河削减洪峰,做好防洪预案。根据流域径流预报结果,北运河在 2038 年夏季、2055 年夏季、2095 年左右会出现径流量高峰,其中 2095 年左右流域的

径流量达到新高,发生 5 年一遇以下(含 5 年)洪水,需要通过温潮减河和运潮减河对北运河进行分洪。

2) 充分考虑人类活动对径流的影响,做好防洪预案。北运河应重点保障城市副中心行政区排水排涝设施的安全运行,做到标准内洪水安全行洪。在保障行洪安全的前提下,保障通航水位,实现洪水资源化。遇中雨及以上预报或河道大流量泄水时,应停止一切在北运河河道的水上活动,确保人员安全上岸,并将游船固定在安全区域,以防冲入河道,影响下游水工建筑物安全。

3) 控制碳排放,减少洪涝灾害发生。流域径流预报结果表明,未来气候变化背景下,北运河流域洪水的峰值流量都将可能增大,极端洪水的风险也相应增加,同时非汛期径流量也有一定的增加。通过综合碳排放气候情景,未来通过控制碳排放实现双碳目标,在一定程度上可降低发生洪涝灾害的风险。

参考文献

[1] 叶佰生,丁永建,康尔泗,等.近 40a 来新疆地区冰雪径流对气候变暖的响应[J].中国科学(D 辑:地球科学),1999,29(S1):40-46.
TE M S, DING Y J, KANG E S, et al. Response of snow and ice runoff to climate warming in Xinjiang in recent 40 years[J]. Scientia Sinica (Terrae), 1999 (S1): 40-46.
[2] 周婷,于福亮,李传哲,等.渭河清盛站水文情势变化分析[J].水电能源科学,2011,29(11):15-18,209.
ZHOU T, YU F L, LI C Z, et al. Analysis of hydrological regime changes of chuang saen station in Mekong River[J]. Water Resources and Power, 2011, 29 (11): 15-18, 209.
[3] 陈鑫,刘艳丽,刁艳芳,等.关河水库流域水文序列突变诊断与非一致性研究[J].中国农村水利水电,2020(5):28-32.
CHEN X, LIU Y L, DIAO Y F, et al. Research on the diagnosis of hydrologic series abrupt changes and inconsistency in Guanhe Reservoir Basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(5): 28-32.
[4] CARLSON R F, MACCORMICK A J A, WATTS D G. Application of linear random models to four annual streamflow series[J]. Water Resources Research, 1970, 6(4):1070-1078.
[5] APOSTOLOPOULOS T K, GEORGAKAKOS K P. Parallel computation for streamflow prediction with distrib-

- uted hydrologic models[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 197(1/2/3/4): 1-24.
- [6] 张力,王红瑞,郭珮楠,等. 基于时序分解与机器学习的非平稳径流序列集成模型与应用[J]. *水科学进展*, 2023, 34(1): 42-52.
- ZHANG L, WANG H R, GUO F N, et al. Integrated model and application of non-stationary runoff based on time series decomposition and machine learning[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(1): 42-52.
- [7] SHAMSELDIN A Y, O'CONNOR K M, CONNOR. A real-time combination method for the outputs of different rainfall-runoff models[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1999, 44(6): 895-912.
- [8] HONG M, WANG D, WANG Y, et al. Mid-and long-term runoff predictions by an improved phase-space reconstruction model[J]. *Environmental Research*, 2016, 11(24): 1-14.
- [9] CHEN H, XU C Y, GUO S L. Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 434-435: 36-45.
- [10] 左其亭,邱曦,马军霞,等. 黄河治水思想演变及现代治水方略[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(3): 1-9.
- ZUO Q T, QIU X, MA J X, et al. Evolution of flood control thought and modern flood control strategy in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2023, 34(3): 1-9.
- [11] 王红瑞,赵含,李占玲,等. 减碳与生物多样性若干问题评述[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2023, 53(1): 17-24.
- WANG H R, ZHAO H, LI Z L, et al. Review on some issues of carbon reduction and biodiversity[J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2023, 53(1): 17-24.
- [12] 孙才志,段兴杰. 黄河流域水资源-能源-粮食系统生态可持续发展能力评价[J]. *人民黄河*, 2023, 45(2): 85-90, 96.
- SUN C Z, DUAN X J. Ecological sustainable development capacity assessment of water-energy-food system in the Yellow River Basin[J]. *Yellow River*, 2023 45(2): 85-90, 96.
- [13] 袁冯,张君枝,王冀,等. 气候变化背景下北京市短历时暴雨的强度及雨型变化特征[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(5): 802-809.
- YUAN F, ZHANG J Z, WANG J, et al. Variation characteristics of intensity and pattern of short duration rainstorm in Beijing under the background of climate change[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(5): 802-809.
- [14] 张力,赵自阳,王红瑞,等. 气候变化下水文模拟不确定性若干问题讨论[J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 109-118, 149.
- ZHANG L, ZHAO Z Y, WANG H R, et al. Discussion on several issues of uncertainty in hydrological simulation under climate change[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1): 109-118, 149.
- [15] 刘浩. 澜沧江流域历史径流变化归因和未来径流变化预估[D]. 上海:华东师范大学,2022.
- [16] 程旭,马细霞,王武森,等. HEC-HMS 模型参数区域化在河南省小流域适用性研究[J]. *水文*, 2022, 42(1): 40-46, 102.
- CHENG X, MA X X, WANG W S, et al. Applicability Research of HEC-HMS model parameter regionalization in small basin of Henan Province[J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(1): 40-46, 102.
- [17] RAD S, DAI J F, XU J X, et al. Lijiang flood characteristics and implication of karst storage through Muskingum flood routing via HEC-HMS, S. China[J]. *Hydrology Research*, 2022, 53(12): 1480-1493.
- [18] 宋世凯,王海龙,郎子龙,等. 基于 HEC-HMS 模型的太行山小流域山洪模拟研究:以邢台路罗川流域为例[J]. *灾害学*, 2023, 38(1): 117-124.
- SONG S K, WANG H L, LANG Z L, et al. Mountain flood simulation of small basin in Taihang Mountains using HEC-HMS model: A case study of Luluochuan River Basin[J]. *Journal of Catastrophology*, 2023, 38(1): 117-124.
- [19] WANG W C, TIAN W C, XU D M, et al. Muskingum models' development and their parameter estimation: A state-of-the-art review[J]. *Water Resources Management*, 2023, 37(8): 3129-3150.
- [20] 王庆明,赵勇,王浩,等. 自然和社会水循环的能量驱动机制及其综合评价[J]. *水资源保护*, 2023, 39(6): 1-7, 15.
- WANG Q M, ZHAO Y, WANG H, et al. Energy driving mechanism of natural and social hydrology cycle and its comprehensive evaluation[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(6): 1-7, 15.

(编辑 亢小玉)