

气候变化条件下的湖北省水资源预估

薛海涵^{1,2,3,4}, 秦鹏程^{1,2,3,4}, 刘敏^{1,2,3,4}

¹武汉区域气候中心, 湖北 武汉

²长江流域气象中心, 湖北 武汉

³三峡国家气候观象台, 湖北 宜昌

⁴中国气象局流域强降水重点开放实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年7月15日; 录用日期: 2023年8月17日; 发布日期: 2023年8月31日

摘要

未来气候变化导致的水资源量变化对湖北省的经济发展影响重大。利用径流实测数据和地表水资源数据分析了过去湖北省水资源情势, 并基于CMIP6多模式集合数据, 采用BP人工神经网络和径流系数法分别对丹江口水库入库流量、湖北省14个水资源分区和湖北省水资源量进行了预估。结果表明: 2023~2100年丹江口年入库流量呈现增加的趋势; 2023~2100年湖北省水资源量呈现增加趋势, 各水资源分区也呈现增加趋势; 由于预估的不确定性, 对湖北省水资源量的变化评价也存在较大的不确定性。

关键词

水资源, 气候变化, BP人工神经网络, 径流系数法

Water Resource Estimation under Climate Change Conditions in Hubei Province

Haihan Xue^{1,2,3,4}, Pengcheng Qin^{1,2,3,4}, Min Liu^{1,2,3,4}

¹Wuhan Regional Climate Center, Wuhan Hubei

²Meteorological Center of Yangtze River Basin, Wuhan Hubei

³Three Gorges National Climatological Observatory, Yichang Hubei

⁴China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory, Wuhan Hubei

Received: Jul. 15th, 2023; accepted: Aug. 17th, 2023; published: Aug. 31st, 2023

Abstract

The future changes in water resources due to climate change will have a significant impact on the eco-

作者简介: 薛海涵, 1994年8月出生, 河南驻马店人, 硕士研究生, 助工, 研究方向为气候评估与气候变化, Email: hhxue176@qq.com

文章引用: 薛海涵, 秦鹏程, 刘敏. 气候变化条件下的湖北省水资源预估[J]. 水资源研究, 2023, 12(4): 396-404.

DOI: 10.12677/jwrr.2023.124044

conomic development of Hubei Province. Utilizing measured runoff data and surface water resource data, the past water resource situation in Hubei Province was analyzed. Based on CMIP6 multi-model ensemble data, the BP artificial neural network and runoff coefficient method were used to estimate the inflow of Danjiangkou Reservoir, the fourteen water resource zones in Hubei Province, and the total water resources in the province. The results show that from 2023 to 2100, the annual inflow of the Danjiangkou Reservoir exhibits an increasing trend. From 2023 to 2100, the water resources of Hubei Province show an increasing trend, with an increasing trend observed in each water resource zone. Due to the estimated uncertainty, the assessment of changes in Hubei Province's water resources also carries significant uncertainty.

Keywords

Water Resources, Climate Change, BP Artificial Neural Network, Runoff Coefficient

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

湖北省拥有丰富的水资源,然而随着气候变化的加剧,湖北省的水资源正面临着严峻的挑战和风险,如径流量的改变[1]以及水资源脆弱性的增加等[2]。为了研究气候变化对水资源的影响,气候变化模式是一种主要采用的方法。全球气候模式(GCMs)可以模拟不同温室气体排放情景下气温、降水等气象要素的变化,通过与流域水文模型耦合可以进一步揭示气候变化对流域水文过程的影响。Chen 等[3]基于多种 GCMs 的研究认为汉江流域温度升高会使得丹江口水库年平均径流量降低,而月平均降水量减少/增加,将使丹江口水库年平均径流量分别减少/增加。Qiao 等[4]基于水利部的 RCCC-WBM 模型考虑中排放情景(SSP2-4.5)下,研究了南水北调不同水源区的降水、温度变化,并指出气候变化的加剧导致流域径流的不确定性增加。此外,也有学者研究了不同模式情景下的流域水资源极端事件,并指出在高排放情景下,汉江流域极端洪水水量大于中、低排放情景,但洪水频次却不断减少[5]。

目前研究水资源变化的预估模型主要有 SWAT 模型、VIC 模型、新安江模型、机器学习模型等。例如,黄华平等[6]将 SWAT 模型与 HUP 处理器相耦合,有效地应用于月尺度的丹江口入库径流模拟研究,提升了径流模拟结果精度;孟玉婧等[7]采用 BP (Back Propagation)人工神经网络模型模拟了内蒙古黄河流域头道拐水文控制站未来(2011~2100)年流量变化,评估未来气候变化对流域水资源的可能影响。

湖北省的水资源量主要来自降水产流和上游来水,其中上游来水主要由长江和汉江来水组成,因此通过分析丹江口水库、宜昌水文站流量特征以及降水产流量,能够在一定程度上反映湖北省水资源的变化趋势。本文基于 CMIP6 的 13 个气候模式数据,采用 BP 神经网络模型和径流系数法,分析了 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种情景下 2023~2100 年丹江口水库入库流量和湖北省水资源量的变化,为帮助应对气候变化带来的挑战、合理制定水资源适应策略提供参考依据。

2. 研究区域与数据来源

2.1. 研究区概况

湖北地处长江中游,是长江流域重要水源涵养地、三峡工程坝区和南水北调中线工程核心水源区。省内江河纵横交错、千湖星罗棋布,天然河网总体呈现以长江、汉江为轴线的向心格局。湖北省境内涉及长江和淮河

两个水资源一级区，可细分为 14 个水资源三级区(图 1、图 4)。

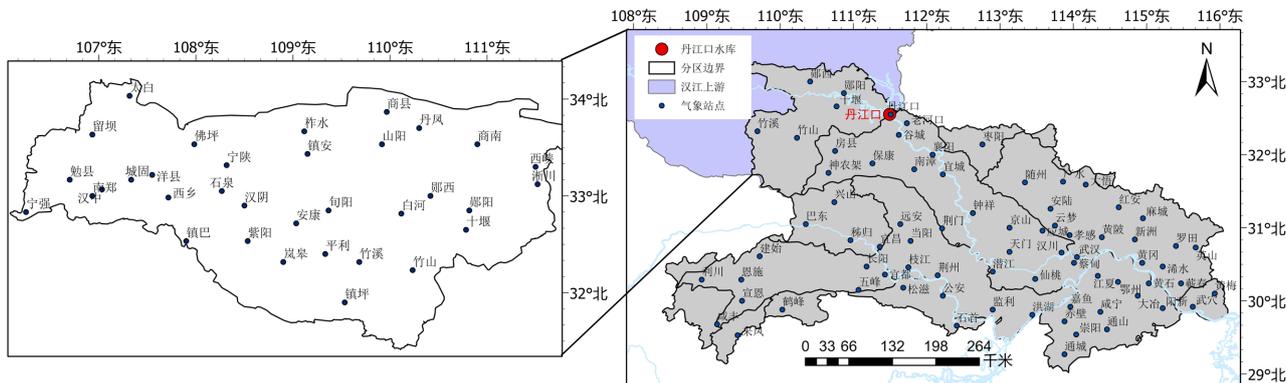


Figure 1. Meteorological stations in Hubei Province and the upper reaches of the Han River

图 1. 湖北省及汉江上游气象站点

2.2. 数据来源

本文采用 CMIP6 数据集中 2 个排放情景(SSP2-4.5 和 SSP5-8.5)下的 13 个全球气候模式进行气候预估(表 1) (https://wcrp-cmip.github.io/CMIP6_CVs/docs/CMIP6_source_id.html), 并通过降尺度方法获得湖北省及汉江上游空间分辨率为 0.25° 的日尺度网格数据, 该数据集的时间尺度为 1901~2100 年。本文选取 2023~2040 年、2041~2060 年和 2081~2100 年三个时期, 以量化 21 世纪近期、中期和远期气候变化的影响, 并采用 1995~2014 年作为基准期, 用于比较模型的性能和评估模拟结果。

Table 1. Description of the 13 GCMs used in the paper

表 1. 采用 13 个全球气候模式描述

模型	来源	大气分辨率(纬向 × 经度)
ACCESS-CM2	澳大利亚	1.25° × 1.875°
ACCESS-ESM1-5	澳大利亚	1.25° × 1.875°
BCC-CSM2-MR	中国	1.125° × 1.125°
CanESM5	加拿大	2.8125° × 2.8125°
CNRM-CM6-1	法国	1.875° × 1.875°
CNRM-ESM2-1	法国	1.875° × 1.875°
HadGEM3-GC31-LL	英国	1.25° × 1.875°
INM-CM4-8	俄罗斯	1.5° × 2°
INM-CM5-0	俄罗斯	1.5° × 2°
IPSL-CM6A-LR	法国	1.26° × 2.5°
MIROC6	日本	1.4° × 1.4°
MPI-ESM1-2-HR	德国	0.9375° × 0.9375°
MRI-ESM2-0	日本	1.125° × 1.125°

考虑站点分布和记录的完整性以及计算的需要, 选取 1956~1990 年汉江上游气象 34 个气象站点日尺度数据、1999~2020 年湖北省 76 个气象站点日尺度数据, 同时对数据缺失日数较多的月份进行剔除。

水文数据包含 1951~1990 年丹江口水库的月尺度入库实测径流、1999~2021 年湖北省年均地表水资源量，其中，湖北省水资源量数据来源于湖北省水利厅水资源公报，丹江口入库径流来源于长江水利委员会水文局，其中 1951~1967 年入库径流数据由黄家港及周边水文站数据换算、1968~1990 数据由丹江口水库水位流量关系换算。

汉江上游规划多级水电站，其中除石泉、安康水电站为季节调节水库外，其余均为日调节水库，且石泉、安康对天然过程改变微弱[8]。考虑 1951~1974 与 1975~1990 年石泉水库修建前后，年内月分配差异较小(图 2)，且与文献还原的天然径流分布接近[9]，因此采用实测入库径流数据构建预估径流模型。

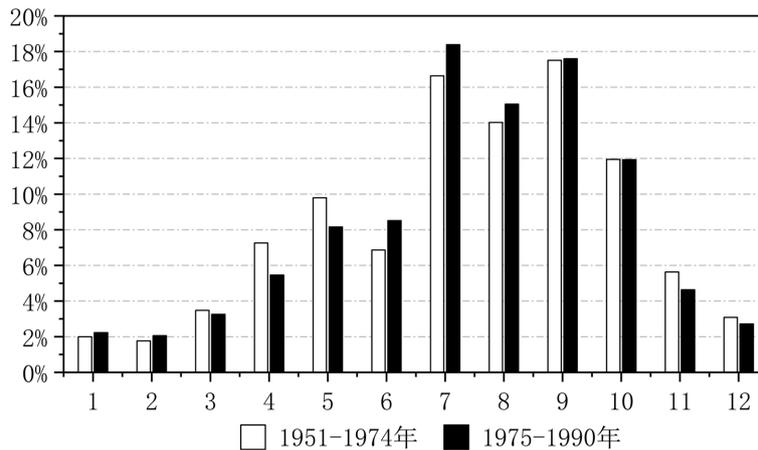


Figure 2. Comparison of monthly inflows of Danjiangkou Reservoir between 1951~1974 and 1975~1990

图 2. 丹江口水库 1951~1974 与 1975~1990 年各月入库流量分布对比

3. 研究方法

3.1. BP 神经网络

BP 神经网络是根据误差反向传播算法训练的多层前馈神经网络[10]。BP 神经网络由输入层、隐藏层和输出层组成。信号由隐藏层和输出层神经元处理，最终结果由输出层中的神经元输出。

$$a_1^{(1)} = f(W_1^{(1)} \cdot x + b_1^{(1)}) \tag{1}$$

$$a_2^{(1)} = f(W_2^{(1)} \cdot a_1^{(1)} + b_2^{(1)}) \tag{2}$$

$$a_{out}^{(1)} = f_2(W_{out}^{(1)} \cdot a_2^{(1)} + b_{out}^{(1)}) \tag{3}$$

式中： $a_1^{(1)}$ 是隐藏层 1 的输出， f 是激活函数， x 是输入层， $W_1^{(1)}$ 是隐藏层的权重， $b_1^{(1)}$ 是隐藏层 1 的偏差； $a_2^{(1)}$ 是隐藏层 2 的输出， $W_2^{(1)}$ 是隐藏层 2 的权重， $b_2^{(1)}$ 是隐藏层 2 的偏差； $a_{out}^{(1)}$ 是输出层的输出， f_2 是激活函数， $W_{out}^{(1)}$ 是输出层的权重， $b_{out}^{(1)}$ 是输出层的偏差。

水文模型中驱动因子涉及降水、蒸发因素等，因此选择降水量作为 BP 神经网络的输入要素，同时采用 Hargreaves 方法计算蒸发[11]。

$$ET_H = 0.0023(T + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.05} R_a \tag{4}$$

式中： ET_H 为 Hargreaves 模型计算的潜在蒸发量，单位： $mm \cdot d^{-1}$ ； T 为平均气温， T_{max} 为平均最高气温， T_{min} 为平均最低气温，单位： $^{\circ}C$ ； R_a 为大气顶层辐射，单位为 $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ，论文中采用纬度及日序数进行估算。

经过相关性分析及共线性诊断分析，最终选择汉江上游当月降水量、前 2 个月累计降水量、前 3 个月月累

计降水量以及前 3 个月累计蒸发量 4 个要素作为输入要素，并采用泰森多边形法处理为汉江上游面要素数据。隐藏层的激活函数设置为 Tanh 函数，输出层不设置激活函数，隐藏层 1 层数为 9 层，隐藏层 2 层数为 7 层，学习速率为 0.4，最大误差为 0.01。

选择 1956 年 1 月至 1990 年 12 月逐月数据作为实测样本(图 3)，其中 1956 年 1 月至 1982 年 12 月作为训练集(共 317 个)，1983 年 1 月至 1990 年 12 月作为测试集(共 96 个)。其中训练集纳什效率系数为 0.89，相对误差 MRE = 0.21；测试集纳什效率系数 NSE = 0.89，相对误差 MRE = 0.22。从年尺度来看，训练集纳什效率系数为 0.99，相对误差 MRE = 0.08；测试集纳什效率系数 NSE = 1.00，相对误差 MRE = 0.05。

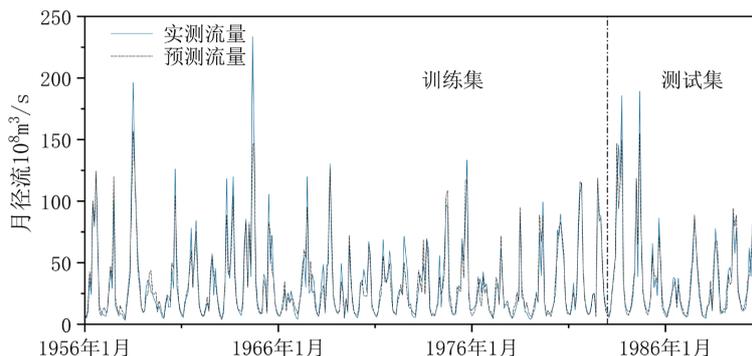


Figure 3. Comparison of observed and simulated monthly inflow discharge of Danjiangkou Reservoir

图 3. 丹江口水库月入库流量实测值与模拟值对比

3.2. 径流系数法

径流系数 α 指降雨产流径流量 R 与降雨量 P 的比值，是降水特性和下垫面条件的综合反映，能够反映流域产汇流能力。径流系数一般随降水的增大而增加；在相同降水量的情况下，又随地形坡度的加大而增加。本研究中采用径流系数法分别计算湖北省十四个水资源分区的地表水资源量以及湖北省总的地表水资源量，其中各水资源分区径流系数如图 4。

$$\alpha = \frac{R}{P} \tag{5}$$



Figure 4. Runoff coefficient for three-level water resource zones in Hubei Province

图 4. 湖北省三级水资源分区径流系数

采用克里金插值法将气象站点数据插值，并计算降水量 P 。图 5 为 1999~2020 年实际水资源量与预测水资

源量的对比, 除个别年份预测误差较大外, 整体平均相对误差 $MRE = 0.14$, 预测结果较为准确。

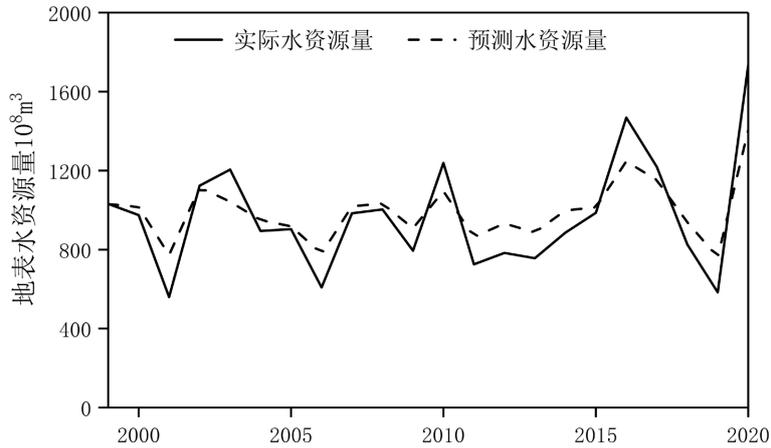


Figure 5. Actual and predicted surface water resources quantity in Hubei Province from 1999 to 2020

图 5. 湖北省 1999~2020 年地表水资源量实际与预测值

4. 气候变化下的湖北省水资源预估

4.1. 丹江口水库入库流量预估

采用 CMIP6 数据集中 2 个排放情景(SSP2-4.5 和 SSP5-8.5)下的 13 个全球气候模型(GCM)进行气候预估, 并通过降尺度方法获得汉江上游空间分辨率为 0.25° 的日尺度网格数据, 使用前已验证的 BP 人工神经网络模型得到径流系列。2023~2100 年模式平均流量整体变化不大, 在 SSP2-4.5 情景下变化幅度在 -9.2% 到 10.3% , 在 SSP5-8.5 情景下变化幅度在 -4.9% 到 15.5% (图 6)。从近、中和远期来看(表 2), 在 SSP2-4.5 情景下流量变化幅度从 -0.63% (近期)到 0.69% (远期), 在 SSP5-8.5 情景下流量变化幅度从 -0.82% (近期)到 2.67% (远期)。在 SSP2-4.5 情景下, 近期、中期和远期的变化范围分别为 $-24.40\% \sim 34.00\%$ 、 $-18.94\% \sim 15.44\%$ 和 $-26.44\% \sim 31.62\%$, 在 SSP5-8.5 情景下, 近期、中期和远期的变化范围分别为 $-19.49\% \sim 13.01\%$ 、 $-20.74\% \sim 18.32\%$ 和 $-25.55\% \sim 25.18\%$ 。

根据 1956~1990 年丹江口水库入库流量年序列, 变差系数 C_v 为 0.35, 在气候变化条件下, 各时期 C_v 值均有所增加, 不均匀性增加(图 7)。在未来不同时期下, 在近期和中期, SSP2-4.5 情景下 C_v 值总体大于 SSP5-8.5 情景; 在远期, SSP2-4.5 情景下 C_v 值总体小于 SSP5-8.5 情景。对 SSP5-8.5 情景, C_v 值不断增加, 不均匀性增加; 对 SSP2-4.5 情景, C_v 变化趋势不明显。

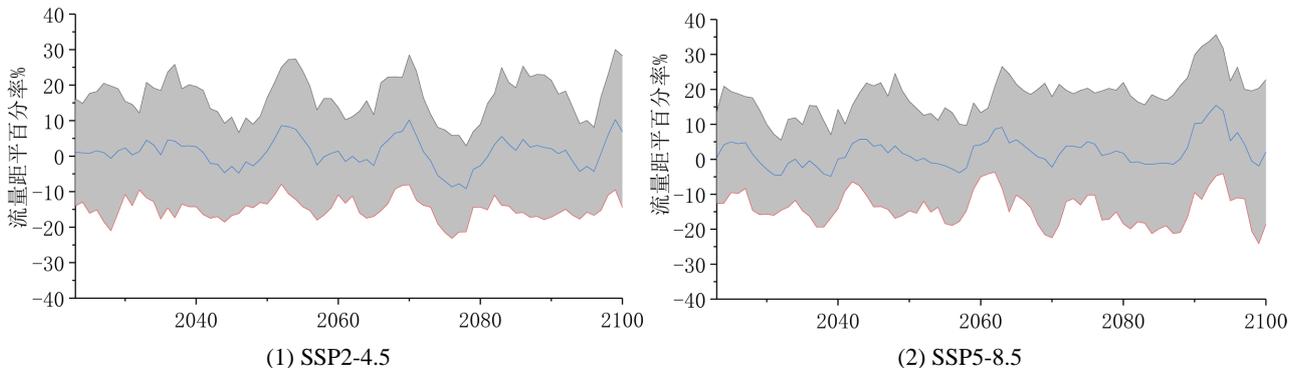


Figure 6. Anomalies percentage of inflow discharge from 2023 to 2100 at Danjiangkou Reservoir

图 6. 丹江口水库 2023~2100 年入库流量的距平百分率

Table 2. Anomalies percentage of inflow discharge in near, mid, and long terms at Danjiangkou Reservoir (%)
表 2. 丹江口水库近、中、远期入库流量的距平百分率(%)

指标	2023-2040		2041-2060		2081-2100	
	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
最大值	34.00	13.01	15.44	18.32	31.62	25.18
平均值	0.63	-0.82	0.21	0.77	0.69	2.67
最小值	-24.40	-19.49	-18.94	-20.74	-26.44	-25.55

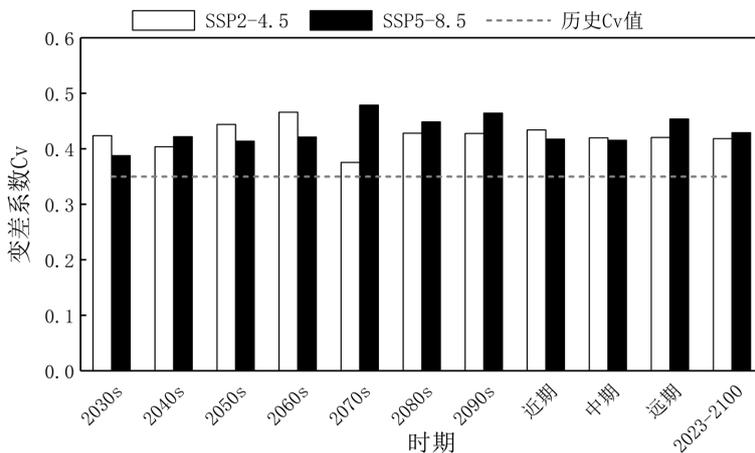


Figure 7. Coefficient of variation Cv of Danjiangkou Reservoir inflow in different periods

图 7. 丹江口水库不同时期入库流量的变差系数 Cv

4.2. 湖北省水资源量预估

采用 CMIP6 数据集中 2 个排放情景(SSP2-4.5 和 SSP5-8.5)下的 13 个全球气候模型(GCM)进行气候预估,并通过降尺度方法获得湖北省空间分辨率为 0.25°的日尺度网格数据,使用前已述径流系数法得到水资源量系列。在 SSP2-4.5 情景下,近期、中期和远期湖北省水资源量的变化幅度分别为 3.79%、7.94%和 12.68%;在 SSP5-8.5 情景下,各时期的变化幅度分别为 7.10%、10.57%和 19.22% (图 8)。在不同时期,湖北省水资源量均有所增加,其中远期增加幅度大于近期增加幅度,SSP5-8.5 情景水资源量的增加幅度大于 SSP2-4.5 情景。选用 Mann-Kendall 对 CMIP6 气候模式集合预估的湖北省水资源量进行了分析,在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下,湖北省水资源量均发生较为明显的上升趋势(通过 0.05 的检验)。对于湖北省水资源量,远期较近期的变化范围有所增加,SSP5-8.5 情景较 SSP2-4.5 情景变化范围有所增加(表 3)。

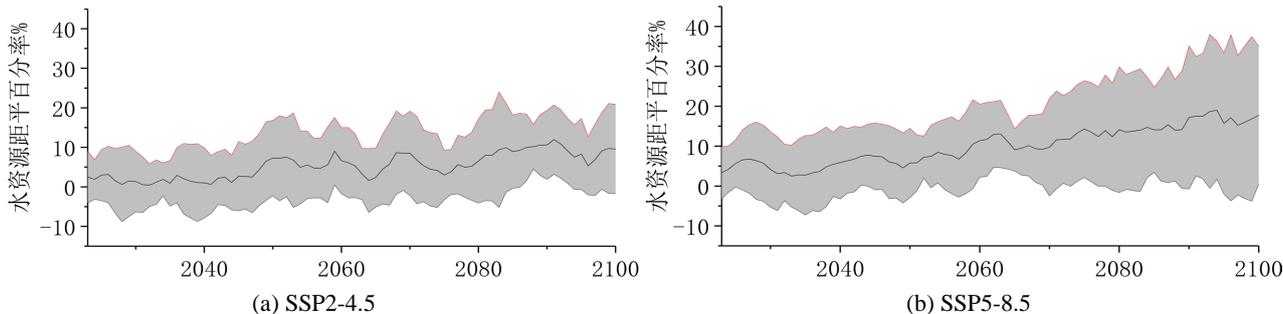


Figure 8. Estimated water resource trends in Hubei Province from 2023 to 2100

图 8. 预估的 2023~2100 年湖北省水资源变化趋势

在两种情景下,对于湖北省各水资源分区在远期的水资源量增加幅度均较近期大,SSP5-8.5 情景下的水资源增加幅度较 SSP2-4.5 情景大(表 3)。对近期,SSP2-4.5 情景下增加幅度在 2.79%~5.36%,鄂西南等地增加幅度较少;SSP5-8.5 情景下增加幅度在 6.08%~9.26%,鄂西北、江汉平原和鄂东南等地增加幅度最多。对中期,SSP2-4.5 情景下增加幅度在 6.54~10.77%,湖北省北部增加幅度较多,鄂西南等地增加幅度较少;SSP5-8.5 情景下增加幅度在 8.49%~14.24%,鄂西北东部、江汉平原北部和南部、鄂东北等地增加幅度较多。对远期,SSP2-4.5 情景下增加幅度在 11.44%~16.72%,鄂西及鄂东南等地增加幅度较少,湖北省北部及江汉平原南部增加幅度较多;SSP5-8.5 情景下增加幅度在 15.47%~22.81%,鄂西南等地增加幅度较少。

到 21 世纪末,对于汉江流域,在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 下,丹江口以上水资源量的变化范围分别为 4.1%至 24.2%和 11.4%至 35.4%;丹江口以下干流,预计 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 下的水资源量的变化范围分别为 1.2%至 26.4%和 10.1%至 40.0%;对于唐白河,SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 的变化范围预计分别为 3.6%至 27.8%和 10.2%至 36.6%。对于宜昌至湖口流域,在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 下,清江的水资源量变化范围预计分别为 0.3%至 20.8%和 4.4%至 29.2%。预计武汉至湖口左岸在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 下的变化范围分别为 4.6 至 23.8%和 7.6 至 43.4%。就宜昌至武汉左岸而言,SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 下预计水资源量的变化范围分别为 1.6%至 28.7%和 8.7%至 35.9%。近期、中期及远期的所有结果见表 3。

Table 3. Range of water resources quantity in different regions under different climate models (%)

表 3. 不同气候模式下各分区水资源量的变化范围(%)

季节	SSP2-4.5			SSP5-8.5		
	2023~2040	2041~2060	2081~2100	2023~2040	2041~2060	2081~2100
巢滁皖及沿江诸河	[-0.1, 11.6]	[2.5, 16.2]	[4.8, 21.6]	[0.4, 16.3]	[1.4, 15.3]	[8.0, 32.3]
城陵矶至湖口右岸	[-0.8, 12]	[1.9, 18.2]	[2.8, 23.0]	[-2.2, 17.9]	[1.6, 17.9]	[6.4, 28.6]
丹江口以上	[-1.9, 8.9]	[-1.5, 14.7]	[4.1, 24.2]	[2.8, 17.9]	[5.3, 17.8]	[11.4, 35.4]
丹江口以下干流	[-2.4, 11.0]	[-1.1, 15.5]	[1.2, 26.4]	[-3.1, 21.5]	[3.3, 19.4]	[10.1, 40.0]
洞庭湖环湖区	[-3.2, 13.9]	[-0.8, 22.2]	[4.4, 30.6]	[-3.2, 21.2]	[1.7, 22.7]	[7.3, 36.1]
澧水	[-2.6, 10.7]	[-0.5, 15.2]	[1.2, 20.9]	[0.1, 17.7]	[4.5, 16.4]	[4.1, 23.8]
清江	[-3.4, 9.6]	[-2.0, 14.6]	[0.3, 20.8]	[-0.9, 17.3]	[3.5, 17.3]	[4.4, 29.2]
思南以下	[-3.6, 11.2]	[0.1, 13.8]	[1.3, 22.5]	[-1.0, 11.2]	[3.3, 16.1]	[3.8, 27.0]
唐白河	[-2.0, 13.2]	[-2.1, 20.1]	[3.6, 27.8]	[-0.2, 20.7]	[4.3, 22.0]	[10.2, 36.6]
王家坝以上南岸	[-2.0, 13.9]	[-3.5, 18.4]	[4.6, 24.3]	[-0.9, 17.6]	[2.5, 22.8]	[9.8, 38.3]
武汉至湖口左岸	[-0.7, 10.9]	[-1.8, 15.6]	[4.6, 23.8]	[-0.2, 17.3]	[4.6, 18.8]	[7.6, 43.4]
宜宾至宜昌干流	[-2.3, 10.5]	[-2.1, 15.9]	[1.3, 22.5]	[-0.7, 18.7]	[4.4, 16.5]	[7.5, 34.0]
宜昌至武汉左岸	[-3.8, 9.8]	[-0.5, 17.8]	[1.6, 28.7]	[-4.2, 21.6]	[0.9, 20.4]	[8.7, 35.9]
沅江浦市镇以下	[-2.9, 10.3]	[-1.3, 14.9]	[1.3, 22.2]	[-0.1, 16.0]	[3.4, 17.2]	[3.5, 24.5]
湖北省	[-0.2, 12.4]	[0.1, 15.6]	[1.4, 24.0]	[1.4, 18.6]	[3.2, 17.1]	[8.9, 34.5]

5. 讨论与结论

本文分析了未来气候变化下的湖北省汉江流域丹江口水库入库流量和湖北省降水产流量的变化。未来气候变化会影响丹江口入库水量,CMIP6 的结果表明丹江口年径流量将会增加,湖北省未来的降水产流量会有所增加。此外,长江上游来水也在湖北省境外来水中占有较大比重,相关研究表明,宜昌水文站在未来气候变化下

径流量会有所减小,且枯水年年数与平水年年数均高于丰水年[12]。考虑在未来气候变化下湖北省降水产流增加、上游来水量存在不确定性,对湖北省水资源量的变化评价也存在较大的不确定性。

本文的主要结论有:

- 1) 在未来 80 年间,丹江口水库的年入库流量总体呈现增加的趋势,且年变系数增加,不均性增加。
- 2) 湖北省降水产流量呈现增加趋势,各水资源分区也呈现增加趋势,其中鄂西南水资源分区增加幅度小于其他分区。
- 3) 对丹江口水库入库流量以及湖北省和各水资源分区的水资源量而言,在未来气候变化条件下的变化范围均有所增加,并且 SSP5-8.5 情景下的变化范围较 SSP2-4.5 情景大。

基金项目

中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J051);湖北省气象局科技发展基金重点项目(2022Z05):湖北省低碳试点专项“湖北省适应气候变化行动方案”。

参考文献

- [1] 杨冬东. 长江流域水资源演变及中长期预测研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2021.
YANG Dongdong. Water resources evolution and medium-long term prediction in the Yangtze River basin. Master's Thesis, Nanjing: Nanjing University, 2021. (in Chinese)
- [2] SUN, F., KUANG, W., XIANG, W., et al. Mapping water vulnerability of the Yangtze River basin: 1994-2013. *Environmental Management*, 2016, 58(5): 857-872. <https://doi.org/10.1007/s00267-016-0756-5>
- [3] HUA, C., GUO, S., XU, C. Y., et al. Historical temporal trends of hydro-climatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin. *Journal of Hydrology*, 2007, 344(3-4): 171-184. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.034>
- [4] QIAO, C., NING, Z., WANG, Y., et al. Impact of climate change on water availability in water source areas of the south-to-north water diversion project in China. *Frontiers in Earth Science*, 2021(9): 747429. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.747429>
- [5] YANG, W., ZHANG, L., SHAN, L., et al. Response of extreme hydrological events to climate change in the water source area for the middle route of south-to-north water diversion project. *Advances in Meteorology*, 2016(4): 1-15. <https://doi.org/10.1155/2016/2486928>
- [6] 黄华平, 靳高阳, 郦于杰, 等. 丹江口水库入库月径流模拟及不确定性分析[J]. 水文, 2022, 42(4): 90-95.
HUANG Huaping, JIN Gaoyang, LI Yujie, et al. Monthly runoff simulation and uncertainty analysis for Danjiangkou Reservoir. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(4): 90-95. (in Chinese)
- [7] 孟玉婧, 李喜仓, 白美兰, 等. RCP 情景下内蒙古黄河流域径流预估及其对水资源的影响[J]. 气象科技, 2021, 49(1): 124-130.
MENG Yujing, LI Xicang, BAI Meilan, et al. Runoff estimate and its impact on water resources in Yellow River basin of Inner Mongolia under RCP scenarios. *Meteorological Science and Technology*, 2021, 49(1): 124-130. (in Chinese)
- [8] 赵红莉, 陈宁, 蒋云钟, 等. 汉江上游水资源时空演变及成因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 90-93+185.
ZHAO Hongli, CHEN Ning, JIANG Yunzhong, et al. Temporal-spatial evolution of water resources in the upstream of the Hanjiang River basin and the cause analysis. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, 7(6): 90-93+185. (in Chinese)
- [9] 张利升, 张睿, 郝建平, 等. 丹江口水利枢纽入库径流特性规律研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(A2): 4.
ZHANG Lisheng, ZHANG Rui, BING Jianping, et al. Characteristics research of Danjiangkou hydro-project income runoff. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(A2): 4. (in Chinese)
- [10] HE, S., SANG, X., YIN, J., et al. Short-term runoff prediction optimization method based on BGRU-BP and BLSTM-BP neural networks. *Water Resources Management*, 2023(37): 747-768. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03401-z>
- [11] 赵玲玲, 夏军, 许崇育, 等. 水文循环模拟中蒸散发估算方法综述[J]. 地理学报, 2013, 68(1): 127-136.
ZHAO Lingling, XIA Jun, XU Chongyu, et al. A review of evapotranspiration estimation methods in hydrological models. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(1): 127-136. (in Chinese)
- [12] 鞠琴, 郝振纯, 余钟波, 等. IPCC AR4 气候情景下长江流域径流预测[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 462-469.
JU Qin, HAO Zhenchun, YU Zhongbo, et al. Runoff prediction in the Yangtze River basin based on IPCC AR4 climate changes scenarios. *Advances in Water Science*, 2011, 22(4): 462-469. (in Chinese)