

·农业水管理· (栏目主编: 胡笑涛 李彦彬)

文章编号: 1672-3317(2025)01-0097-07

## 未来气候情景下黑河中游灌溉缺水风险评估

吴子晗<sup>1</sup>, 章孙逊<sup>2</sup>, 张帆<sup>1\*</sup>, 张馨予<sup>1</sup>, 刘美鲜<sup>3</sup>

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048; 3.内蒙古鄂尔多斯市杭锦旗水利事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017400)

**摘要:** 【目的】评估未来气候情景下典型干旱区农业缺水风险, 为研究区及类似区域未来灌溉水资源管理与农业可持续发展提供决策支持。【方法】对第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中的3种共享社会经济路径情景(SSP126、SSP245和SSP585)进行降尺度处理以获取未来气象情景数据, 结合BP神经网络、Hargreaves模型与作物系数法, 预测黑河中游灌溉可用地表水与作物需水量的未来变化。应用Copula模型模拟灌溉供需水量的联合分布, 分析水文情景组合概率, 评估未来气候模式下的缺水风险。【结果】2024—2100年, SSP126、SSP245、SSP585情景下年平均灌溉需水量较2023年分别增长10.21%、11.73%、14.59%, 年平均增长率分别为0.17%、0.16%、0.18%。各情景间最大与最小年径流量比值分别为1.21、1.27、1.34。SSP126情景下丰-枯与丰-丰概率增加, SSP245情景下丰-枯与平-平概率最高, SSP585情景下丰-枯概率降低, 平-平概率上升。SSP126情景下大多数年份缺少风险率低于0.6, SSP245情景下部分年份低于0.6, 而SSP585情景下所有年份缺水风险率均超过0.6。【结论】未来黑河上游径流量和下游作物灌溉需水量在不同SSP情景下均呈上升趋势。SSP126、SSP245、SSP585情景下缺水风险持续降低, 其中SSP585情景下的缺水风险最高, SSP245情景次之, SSP126情景最低。

**关键词:** 未来气候变化; Copula函数模型; 供需水组合概率; 灌溉缺水风险; 黑河中游

中图分类号: TV121<sup>+.4</sup>

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2024260

吴子晗, 章孙逊, 张帆, 等. 未来气候情景下黑河中游灌溉缺水风险评估[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(1): 97-103.

WU Zihan, ZHANG Sunxun, ZHANG Fan, et al. Assessing irrigation water shortage in the middle reaches of the Heihe River Basin under future climate scenarios[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(1): 97-103.

### 0 引言

随着全球气候变化加剧, 水资源合理分配和管理已成为全球性挑战。特别是在干旱和半干旱地区, 灌溉农业作为主要用水部门, 其水资源供需平衡对于保障粮食安全和农业可持续发展至关重要<sup>[1-3]</sup>。未来气候变化将同时对干旱区农业灌溉水资源供需双侧产生影响, 因此有必要厘清未来气候影响下区域灌溉可用水与灌溉需水变化规律, 评估缺水风险, 为水资源管理者提供有效水资源管理决策支持, 进而保障区域农业可持续发展。

准确预测灌溉水供需情况是流域水资源管理基础<sup>[4]</sup>, 以往围绕地表径流与灌溉需水预测模拟开展了大量研究。梁浩等<sup>[5]</sup>采取“分解-重构”策略, 融合多模型以尝试提高径流模拟准确性。在作物灌溉需水预测方面, Han等<sup>[6]</sup>利用神经网络模型并考虑作物系

数动态变化及降水效应, 预测灌溉需水。然而, 目前大多数研究主要围绕历史时期灌溉供需水模拟展开, 较少探究未来气候条件下灌溉供需水量耦合变化规律。因此, 本研究拟使用第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6), 在BP神经网络模型与Hargreaves模型的基础上结合作物系数法, 预估不同未来气候情景下黑河中游灌溉可用地表水与作物需水量变化, 为未来区域水资源规划管理提供科学依据。

评估气候敏感区缺水风险是目前水资源管理研究的热点问题。Copula模型作为一种评估多元概率分布方法, 广泛应用于干旱区水资源优化管理配置以及缺水风险影响因素研究<sup>[7]</sup>。如Li等<sup>[8]</sup>通过建立降水与蒸散发的Copula模型探究了农业干旱缺水风险驱动特征, Ribeiro等<sup>[9]</sup>利用Copula模型建立了作物产量与干旱指标间关系, 评估了意大利不同干旱严重程度缺水风险。这些研究有力推动了Copula模型在农业水资源管理方面应用。本研究拟尝试使用Copula模型模拟灌溉供需水联合分布, 整合供需水组合概率与缺水风险评估, 从多个角度分析区域灌溉缺水风险。

综上所述, 本研究将以我国典型干旱农区黑河流域中游为研究对象, 进行灌溉供需水预测模拟与缺水

收稿日期: 2024-06-24 修回日期: 2024-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(52409003)

作者简介: 吴子晗(2003—), 男, 研究方向为自然地理学。

E-mail: Wuzihan54652388@bjfu.edu.cn

通信作者: 张帆(1993—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为流域治理与生态修复。E-mail: Zhang\_fan@bjfu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

风险评估。以 2024—2100 年为研究时段,基于 CMIP6 数据生成未来气候情景模式,并结合 BP 神经网络与 Hargreaves 模型预测不同气候情景下黑河流域上游未来径流供水量与作物灌溉需水量,进一步使用 Copula 模型模拟灌溉需水和径流供水的联合分布,结合缺水指数分析未来时段内不同气候模式下黑河中游农业缺水风险。研究结果有望支撑研究区水资源管理实践,也为类似区域灌溉缺水风险评估提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黑河是中国第二大内陆河(38°32'06"—41°14'31"N, 99°34'59"—103°31'15"E)(图 1),其源自青海省祁连山脉,经过河西走廊,最终进入内蒙古自治区居延海。黑河流域中游地区主要包括甘州区、临泽县和高台县等 3 个行政区,中游地区灌溉水资源主要依赖于上游径流供给。由于区域水资源总量有限,受全球气候变暖加剧影响,干旱区农业灌溉用水问题日益突显<sup>[10]</sup>。明晰未来时期灌溉供需水动态变化,以支撑水资源管理部门规划流域水资源配置,成为黑河流域中游地区亟待解决的难题。

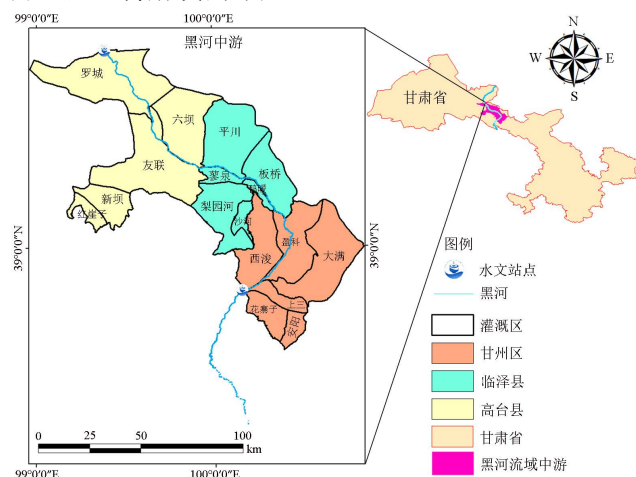


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 CMIP6 气候模型选取与降尺度

本研究使用的未来气候模式数据来源于 WCRP (World Climate Research Programme) 耦合模拟工作组组织的第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6)。本研究聚焦于 3 种共享社会经济路径 (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) 情景: SSP126, 可持续发展; SSP245, 中间路径; SSP585, 不可持续发展。这些情景分别与 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 相对应,涵盖了从低碳、高可持续性到高碳、不可持续性的不同极端发展模式<sup>[11]</sup>。因此,本研究选择 SSP126、SSP245、SSP585 情景进行 2024—2100 年气候情景模拟。

由于 CMIP6 不同模式数据分辨率不同,本研究使用 Delta 与插值结合的方法将空间分布数据统一插值到已知的 6 个气象观测站<sup>[12]</sup>。本文采用 Delta 法进行气候要素空间降尺度处理,该方法利用全球气候模型 (Global Climate Model, GCM) 预测的未来气候要素变化特征(如气温绝对增幅、降水量相对变化率等)叠加到基准期实测气候要素序列,计算每个 GCM 网格降水和气温数据作为网格中心点变化率<sup>[13]</sup>。然后利用双三次多项式曲面插值方法将 CMIP6 气候模式模拟的降水、最高和最低气温数据插值到已有气象站点。进而采用等距累积分布函数偏差校正方法对研究区降水、最高和最低气温数据分辨率进行修正。借助 MATLAB2021a 软件实现空间降尺度后,即可保证对未来情景降尺度后的数据对应 6 个气象站点位,分别归于不同网格上的数值。Delta 方法进行降水与温度数据降尺度的计算式为<sup>[12]</sup>:

$$P_f = P_o \times \frac{P_{Gf}}{P_{G0}}, \quad (1)$$

$$T_f = T_o + (T_{Gf} - T_{G0}), \quad (2)$$

式中:  $P_f$  为 Delta 法重建的未来降水系列;  $P_{Gf}$  为 GCM 预测的未来降水量;  $P_{G0}$  为 GCM 模拟的基准期多年平均降水量;  $P_o$  则为基准期观测的多年平均降水量;  $T_f$  为 Delta 法重建的未来气温;  $T_{Gf}$  为 GCM 预测的未来气温;  $T_{G0}$  为 GCM 模拟的基准期的多年平均气温;  $T_o$  则为基准期观测的多年平均气温。

结合上式,并考虑 CMIP6 不同模式下数据分辨率差异,本研究针对不同空间分辨率模式使用相同缩降方法 (Delta 与双三次多项式曲面插值) 保证气候变量在次网格上的非均匀性和 GCM 情景的空间分布特征,其插值式为<sup>[14]</sup>:

$$z = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j, \quad (3)$$

式中:  $i, j$  代表网格点对应的行数和列数;  $x^i, y^j$  代表对应网格点的位置;  $a_{ij}$  代表该位置网格点对应的数值。

#### 1.2.2 BP 神经网络模型

BP 神经网络是一种基于遵循误差反向传播算法的多层前馈神经网络,以梯度下降法作为核心支撑,旨在通过梯度搜索技术最小化实测值与模拟值的均方根误差。BP 神经网络具有自适应学习能力,能够通过反向传播算法调整网络权重,以最小化预测误差。

收集黑河流域中托勒、野牛沟、祁连、甘州、临泽、高台 6 个气象站点 1951—2023 年气象数据,以历史时期径流与灌溉需水数据作为目标变量,代入 BP 神经网络模型,设置 75% 的训练集和 25% 验证集,进行反复训练验证,模拟优度达到 95% 以上时训练完成。代入 CMIP6 处理获得的未来气候数据,预测得到未来 3 种 SSP 情景下径流量与灌溉需水量。

1.2.3 未来流域中游供需水量计算

黑河流域中游主要作物为小麦、玉米和蔬菜。灌溉需水量通过作物系数法、作物种植面积和降水量计算，如下<sup>[15]</sup>：

$$W_i = \sum_{t=1}^T \alpha_t S_t ET_0 10^{-3}, \quad (4)$$

式中： $t$  为作物种类 ( $t=1$  为小麦,  $t=2$  为玉米,  $t=3$  为蔬菜)； $\alpha_t$  为作物系数； $S_t$  为作物种植面积 ( $m^2$ )； $ET_0$  为蒸散发量 (mm)。蒸散发量  $ET_0$  与太阳辐射量有密切关系，以下式计算黑河流域太阳天顶辐射量 ( $R_a$ )<sup>[16]</sup>：

$$R_a = \frac{24 \times 60 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \sin(\omega_s)], \quad (5)$$

式中： $G_{sc}$  为太阳常数，取值为 0.082 0 (MJ/( $m^2 \min$ ))； $d_r$  为日地间相对距离的倒数； $\omega_s$  为太阳时角 (rad)； $\varphi$  为地理纬度 (rad)； $\delta$  为太阳磁偏角 (rad)。

未来气候情景条件下的  $ET_0$  依据 FAO-56 给出的缺乏太阳辐射量和相对湿度数据条件下 Hargreaves 公式进行计算，Hargreaves 式如下<sup>[17]</sup>：

$$ET_0 = a(T_{max} - T_{min})^{\lambda} (T_{mean} + \omega) R_a. \quad (6)$$

参照姜瑶<sup>[18]</sup>的研究，依据 FAO-56 给出的缺乏太阳辐射和相对湿度数据条件下的 Hargreaves 公式进行计算黑河流域中游甘州、临泽、高台 3 个站点的  $ET_0$ ，修正后的 Hargreaves 式如下：

$$ET_0 = 0.001(T_{max} - T_{min})^{0.336} (T_{mean} + 23.507) R_a, \quad (7)$$

$$ET_0 = 0.001(T_{max} - T_{min})^{0.336} (T_{mean} + 23.507) R_a, \quad (8)$$

$$ET_0 = 0.001(T_{max} - T_{min})^{0.336} (T_{mean} + 23.507) R_a, \quad (9)$$

式中： $R_a$  为太阳天顶辐射量 (MJ/( $m^2 \min$ ))； $T_{max}$  为日最高气温； $T_{min}$  为日最低气温； $T_{mean}$  为日平均气温。

1.2.4 基于 Copula 函数模型的缺水风险计算

1) 缺水情景组合概率计算

得到径流供水与作物需水的数据后，进行供需水组合情景的概率模拟计算。Copula 函数模型是用于描述随机变量之间依赖关系的一种方法。这里使用 Copula 函数模型计算净灌溉需水量和径流组合情景的联合概率。将  $x$  和  $y$  设置为净灌溉需水量和径流的随机变量，联合分布函数  $C(x, y)$  可以表示为<sup>[19]</sup>：

$$C(x, y) = C^{\theta}[F_X(x), F_Y(y)], \quad (10)$$

式中： $C^{\theta}[U, V]$  是 Copula 函数，包括高斯 Copula、t-Copula、Gumbel-Copula、Frank Copula 和 Clayton Copula 函数等类型； $\theta$  是 Copula 函数参数； $F_X(x)$  和  $F_Y(y)$  分别是  $x$  和  $y$  边际分布函数。

借助 Copula 函数模型，可以生成 2 个变量 ( $x$  和  $y$ ) 联合概率，具体步骤如下：

①采用 Pearson、Spearman 和 Kendall 相关系数分析净灌溉需水量与径流之间相关性。

②核密度分析方法是一种估计随机变量非参数边际分布函数的非参数方法，使用该方法估计建立净灌溉需水量和径流的个体边际分布函数。通过 Kolmogorov-Smirnov 方法对函数拟合优度进行测试。

③通过相关指数法估计二维阿基米德-Copula 函数 (包括 Gumbel、Clayton 和 Frank Copula) 中未知参数，Copula 函数参数则采用最大似然法估计。

④计算每个 Copula 函数平方欧氏距离，基于值大小来评估函数，选择值最小的 Copula 函数来构建净灌溉需水量和径流量联合函数。

为了更好反映干旱与农业供需水关系，本研究参考 Li 等<sup>[20]</sup>根据降水与径流划分水文年方法，将水文年分为丰水期、平水期和枯水期，据此确定灌溉需水量和径流量水平。分别以未来 3 种不同 SSP 情景下供水概率阈值 (35% 和 65%)，运用水文适线软件确定对应情景下需水阈值，根据需水阈值找到对应需水分布概率。此外，本研究使用 MATLAB 进行 Copula 函数模型编程，基于平方欧氏距离筛选出最优 Copula 模型。针对 3 种不同 SSP 碳排放路径，选择相应的 Copula 函数进行组合概率求解。如表 1 所示，本研究根据水文特征的丰、平、枯 3 种状态，构建了 9 种不同组合情景，并基于边际分布值求解了变量  $X$  和  $Y$  双变量联合概率。在 Copula 函数模型中，参数计算与选择参考了 Zhang 等<sup>[21]</sup>研究。首先确定每个变量的边缘分布，然后根据变量间依赖特性选择合适 Copula 函数。参数估计采用最大似然估计、贝叶斯方法或模拟进行，并借助模型拟合优度检验和残差分析来验证模型所选参数合理性。

表 1 组合概率对应范围及公式

Tab.1 Corresponding range and formula of combination probability

情景	径流 (X)	灌溉需水 (Y)	联合概率范围	联合概率
1	丰	枯	$P(X \geq X_2, Y \leq Y_1)$	$1 - u_2 - v_2 + C(u_2, v_2)$
2	平	平	$P(X_1 \leq X \leq X_2, Y_1 \leq Y \leq Y_2)$	$C(u_2, v_2) - C(u_2, v_1) + C(u_1, v_1) - C(u_1, v_2)$
3	枯	丰	$P(X \leq X_1, Y \geq Y_2)$	$C(u_1, v_1)$
4	枯	枯	$P(X \leq X_1, Y \leq Y_1)$	$u_1 - C(u_1, v_2)$
5	平	丰	$P(X_1 \leq X \leq X_2, Y \geq Y_2)$	$C(u_2, v_1) - C(u_1, v_1)$
6	平	枯	$P(X_1 \leq X \leq X_2, Y \leq Y_1)$	$u_2 - C(u_2, v_2) + C(u_1, v_2) - u_1$
7	丰	平	$P(X \geq X_2, Y_1 \leq Y \leq Y_2)$	$v_2 - v_1 - C(u_2, v_2) + C(u_2, v_1)$
8	枯	平	$P(X \leq X_1, Y_1 \leq Y \leq Y_2)$	$C(u_1, v_2) - C(u_1, v_1)$
9	丰	丰	$P(X \geq X_2, Y \geq Y_2)$	$v_1 - C(u_2, v_1)$

注 表中  $u_1, u_2, v_1, v_2$  是  $X_1, X_2, Y_1, Y_2$  的边际分布值，依据求解出的组合情景概率分析未来气候条件下缺水情景发生的可能性。

2) 流域缺水指数

缺水风险率 (Water shortage risk rate, *WSRR*) 定义为农作物灌溉需水量与实际径流灌溉供水量比值, 用于衡量流域缺水风险。经过地域差异修正得到黑河流域的缺水风险率一般 >0.6 认定为该地区存在水资源短缺风险<sup>[22]</sup>。缺水风险率计算式为:

$$WSRR = \frac{NIWR}{ARS}, \quad (11)$$

式中: *WSRR* 为缺水风险率; *NIWR* 为作物净灌溉需水量; *ARS* 为实际径流灌溉供水量。

2 结果与分析

2.1 降尺度数据偏差校正与性能评估

本研究中采用 Delta 与双三次多项式曲面插值结合方法实现 CMIP6 气象数据空间降尺度 (0.5°×0.5°), 进而提取托勒、野牛沟、祁连、甘州、临泽、高台 6 个气象站点数据。为减少降尺度数据的固有不确定性并提高其可靠性, 采用 1984—2023 年各气象站历史观测数据, 对托勒、野牛沟、祁连、甘州、临泽和高台等气象站月降水和温度数据进行偏差校正。图 2 展示了不同站点名称在降水、平均气温、最高气温和最低气温历史实测数据与 CMIP6 模型降

尺度后数据之间拟合序列误差分析结果。结果表明, 降尺度处理后的气温与降水数据精度均保持在较高水平, 即降尺度后数据可靠性较高。

2.2 未来气候情景下黑河上游年径流量与中游灌溉需水量

将降尺度后的 CMIP6 数据集输入到率定后的神经网络模型中, 模拟黑河流域上游区域未来径流量如图 3 所示。在 SSP126、SSP245 和 SSP585 情景下, 预计 2024—2100 年年平均径流量将分别增长 13.44%、13.91% 和 14.17%。与 1951—2023 年历史数据相比, 未来年际径流量波动幅度有所降低。历史数据表明, 2016 年记录了最大年径流量 (23.31 亿 m<sup>3</sup>), 而 1991 年则为最小值 (10.63 亿 m<sup>3</sup>), 二者比值为 2.19。未来情景预测中, SSP126、SSP245 和 SSP585 情景下最大年径流量与最小年径流量的比值分别为 1.21、1.27 和 1.34, 这表明流域径流稳定性有望提高。受到西北地区暖湿化影响, 不同 SSP 情景下径流量均有增加趋势。其中, SSP126 情景径流量增加趋势较缓, SSP245 和 SSP585 情景有较显著增长, 且 SSP585 情景径流趋势变化呈现抛物线型特征。

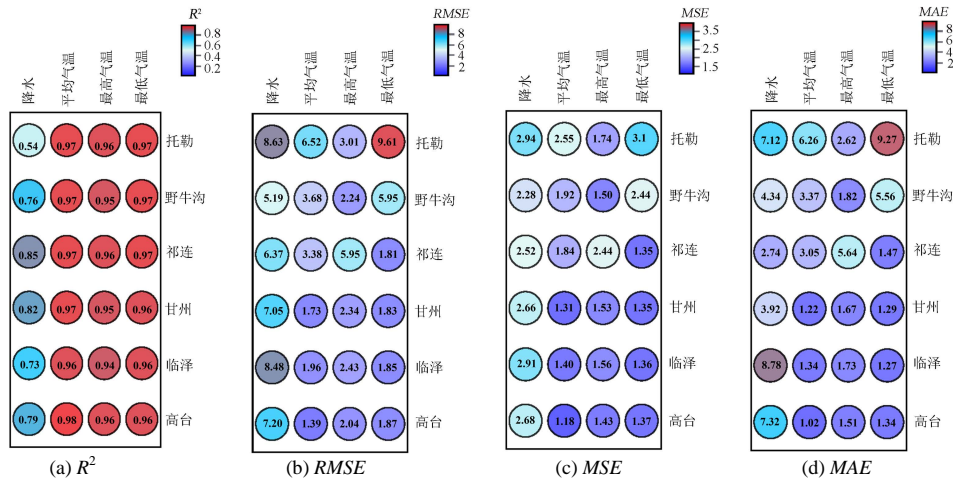


图 2 站点各气象实测数据与模型降尺度数据精度验证与性能评估结果

Fig.2 Results of accuracy validation and performance evaluation of meteorological measured data and modeled downscaled data at each site

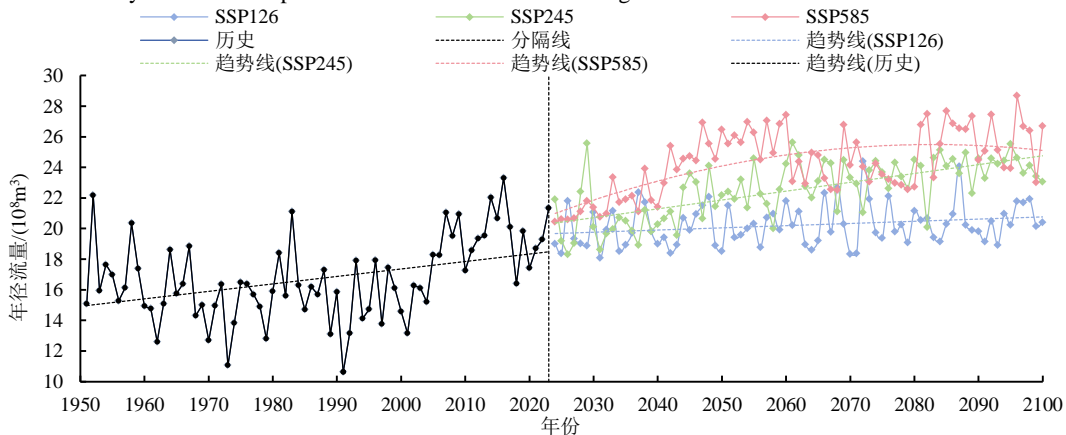


图 3 历史时期和未来 3 种情景下 2024—2100 年径流量变化

Fig.3 Changes in runoff from 2024 to 2100 under three historical and future scenarios

通过 1.2.2 中方法计算获得未来气候情景下黑河中游地区灌溉需水量如图 4 所示。历史阶段（1984—2023 年），黑河中游年平均灌溉需水量为 10.04 亿 m<sup>3</sup>，年均增长率约为 0.24%。未来阶段（2024—2100 年）在 SSP126、SSP245、SSP585 情景下，年平均灌溉需水量预期分别较 2023 年增长 10.21%、11.73% 和 14.59%，年平均增长率分别为 0.17%、0.16% 和 0.18%，即黑河中游的灌溉需水量将持续增加。

在 SSP126 和 SSP245 情景中，灌溉需水量增长

趋势较为平缓，而在 SSP585 情景下，增长速度加快。SSP585 情景下，年平均作物需水量最高（12.78 亿 m<sup>3</sup>），超出 SSP245 情景（12.47 亿 m<sup>3</sup>）和 SSP126 情景（11.73 亿 m<sup>3</sup>）。然而，SSP585 情景下年平均降水量（3.04 亿 m<sup>3</sup>）与 SSP245（3.07 亿 m<sup>3</sup>）和 SSP126（3.03 亿 m<sup>3</sup>）相比，差异不显著。SSP585 情景中的高排放路径与加速的社会经济发展预期将加剧全球变暖，导致气温上升，进而增加蒸散发速率<sup>[23]</sup>，导致作物灌溉需水量增加。

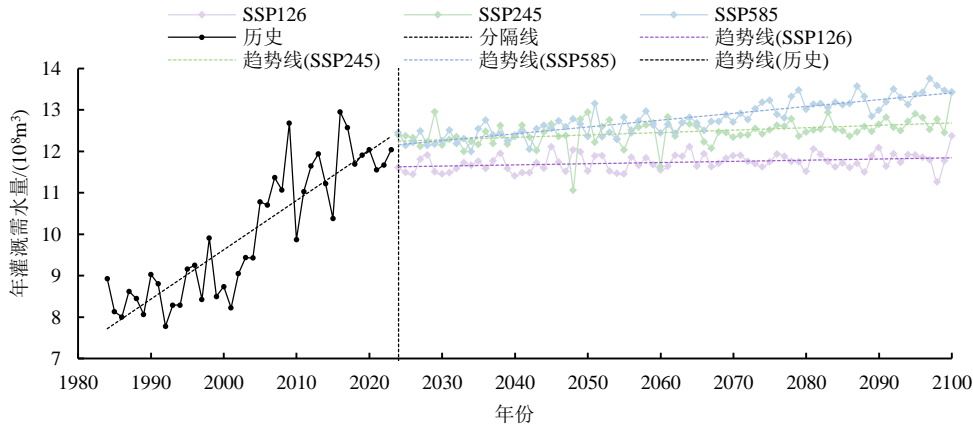


图 4 历史时期与未来 3 种情景下 2024—2100 年灌溉需水量变化

Fig.4 Changes in irrigation water demand in 2024—2100 under three scenarios for the historical period and the future

### 2.3 未来气候模式供需水组合情景概率与缺水风险分析

表 2 为不同情景下 3 种 Copula 模型拟合性能。使用优选出的 Copula 模型模拟供需水，计算供需水组合概率如图 5 所示。根据计算结果得到不同情景对应的 Copula 模型：SSP126 (Clayton-Copula)，SSP245 (Frank-Copula)，SSP585 (Frank-Copula)。可以发现，SSP126 情景下，丰-枯、丰-丰概率高于历史，而平-平、枯-枯、平-丰、平-枯概率降低，表明黑河中游灌溉缺水出现可能性降低，此情景下中游地区水资源可以保证区域农业可持续发展。SSP245 情景下，丰-枯、平-平、丰-平、枯-平概率急剧增加，即中游灌溉水资源供需矛盾有所缓解但干旱风险依然存在。SSP585 情景下，平-平概率最高，其次是平-丰，但平-枯、枯-枯概率较高，表明该情景下黑河中游地区未来仍存在较大缺水威胁。不同未来情景下黑河中游水资源供需变化较复杂，需对黑河流域中游灌溉缺水风险进行定量评估。

表 2 各未来发展路径对应 Copula 模型及参数

Tab.2 Copula model and parameters for each future development pathway

未来发展路径	平方欧式距离		
	Gumbel-Copula	Clayton-Copula	Frank-Copula
SSP126	0.143 4	0.026 1	0.147 2
SSP245	0.123 3	0.134 7	0.022 5
SSP585	0.107 9	0.105 2	0.015 8

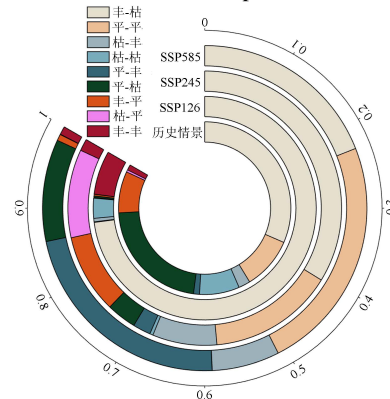


图 5 供需水组合概率

Fig.5 Combination probability of water supply and demand

通过缺水指数进一步定量分析缺水风险。图 6 展示了历史及未来 SSP 情景下缺水风险率变化。未来气候情景下，SSP585 情景下缺水风险显著高于 SSP245 情景，SSP126 情景相对风险较低。历史时期缺水风险率呈波动增加趋势。特别是 21 世纪之后缺水风险不断增加，中游地区农业供需水矛盾突出，黑河地区由农业水资源超量使用导致的生态问题频发。未来各 SSP 情景下风险率总体呈下降态势。SSP126 情景下，风险率下降较快并基本长期稳定维持在 0.6 以下。SSP245 与 SSP585 情景下，风险率虽有所下降，但中游地区的风险率仍将长期超出 0.6，黑河中游农业供需水矛盾仍将长期存在。鉴于低 SSP 路径下能够缓解农业供需水矛盾，因此要根据实际情况优先采纳此情景下适应性策略，包括提高水资源利用效率、

推广节水技术，并强化农业水管理政策。

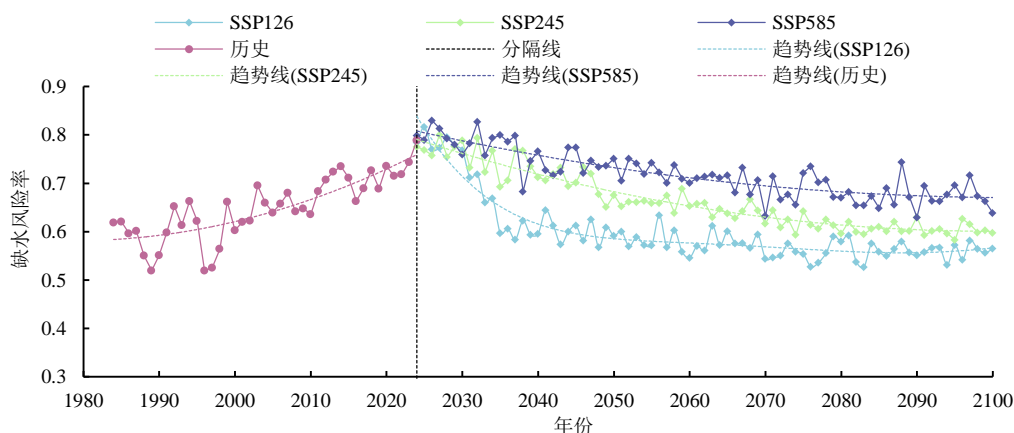


图 6 历史时期和未来 3 种情景下 2024—2100 年缺水风险率变化

Fig.6 Changes in irrigation supply-demand ratio under three future climate models

### 3 讨论

本研究聚焦干旱农区灌溉水资源缺水风险预测，以我国甘肃省黑河流域为研究对象，基于 CMIP6 提供的 3 种未来 SSP 气候模式下的气象数据，结合 BP 神经网络模型、Hargreaves 模型和作物系数法，模拟了未来黑河流域中游供需水变化情景，评估出不同社会经济路径下缺水风险，为未来水资源管理提供科学依据。水短缺风险是一个复杂系统性问题，涉及气候变异性、水资源管理、农业生产需求以及社会经济发展等多个方面<sup>[24]</sup>。本文所采用的模型和方法为评估未来水短缺风险提供了一种科学工具，但也存在一定局限性。本研究选择代表低、中、高 3 种共享社会经济路径下气候模式，以较好地反映未来社会经济发展方向，但对于未来的预测仍存在较大的不确定性，不能全面覆盖未来将发生的一些潜在极端情况，可能会导致预测结果失准。此外，本研究在径流模拟中采用了前期筛选出的 BP 神经网络模型<sup>[25]</sup>，参考作物蒸发蒸腾量 ( $ET_0$ ) 估算也使用了姜瑶在黑河中游区域研究中使用的 Hargreaves 模型<sup>[18]</sup>，这 2 个模型已经证明在黑河中游地区具有有效性。若要将本研究的方法应用于类似流域，仍需进行模型优选与参数率定。此外，水短缺风险评估和管理不仅需要考虑水资源供需，还需要综合考虑水资源多维度特性，包括水质、水资源季节性分布以及水资源社会经济价值，未来在进行水资源短缺风险分析时，应考虑这些因素综合影响。

### 4 结论

本研究模拟了黑河流域未来供水与需水变化，并利用 Copula 函数模型分析了干旱情景组合概率及其对中游缺水风险的影响。主要结论如下：

1) 在 SSP126、SSP245、SSP585 情景下，黑河上游年平均径流量预计从 2024—2100 年分别增加

13.44%、13.91%、14.17%。

2) 在相同情景下，黑河中游作物灌溉需水量预计较 2023 年增长 10.21%~14.59%，年均增长率为 0.16%~0.18%。

3) SSP585 情景下黑河中游地区灌溉缺水概率最高，且 SSP126 和 SSP245 情景均显示丰-枯组合概率最大。随着气候暖湿化，未来黑河中游地区各情景灌溉缺水风险都将降低，SSP585 情景下的缺水风险最高，SSP245 情景下次之，SSP126 情景下最低。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

### 参考文献:

- [1] RICHTER B D, BARTAK D, CALDWELL P, et al. Water scarcity and fish imperilment driven by beef production[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3: 319-328.
- [2] YAO T D, BOLCH T, CHEN D L, et al. The imbalance of the Asian water tower[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3: 618-632.
- [3] ZHANG J W, GUAN K Y, PENG B, et al. Sustainable irrigation based on co-regulation of soil water supply and atmospheric evaporative demand[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 5 549.
- [4] DAVISON B J, COWTON T R, COTTIER F R, et al. Iceberg melting substantially modifies oceanic heat flux towards a major Greenlandic tidewater glacier[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5 983.
- [5] 梁浩, 黄生志, 孟二浩, 等. 基于多种混合模型的径流预测研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(1): 112-125.
- [6] LIANG Hao, HUANG Shengzhi, MENG Erhao, et al. Runoff prediction based on multiple hybrid models[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(1): 112-125.
- [7] HAN X, WEI Z, ZHANG B Z, et al. Crop evapotranspiration prediction by considering dynamic change of crop coefficient and the precipitation effect in back-propagation neural network model[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 596: 126 104.
- [8] BÜNTGEN U, URBAN O, KRUSIC P J, et al. Recent European drought extremes beyond Common Era background variability[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14: 190-196.
- [9] LI M, XU Y W, FU Q, et al. Efficient irrigation water allocation and its impact on agricultural sustainability and water scarcity under uncertainty[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124 888.
- [10] RIBEIRO A F S, RUSSO A, GOUVEIA C M, et al. Copula-based agricultural drought risk of rainfed cropping systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 223: 105 689.
- [11] 李慧慧, 栾承梅, 夏栩, 等. 基于 CMIP6 气候模式的中国大陆未来极端降水情景预估[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(8): 16-29.

- LI Huihui, LUAN Chengmei, XIA Xu, et al. Prediction of future extreme precipitation scenarios in China based on CMIP6 climate model[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(8): 16-29.
- [11] ZOBEIDI T, YAGHOUBI J, YAZDANPANAH M. Farmers' incremental adaptation to water scarcity: An application of the model of private proactive adaptation to climate change (MPPACC)[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 264: 107-128.
- [12] KOFIDOU M, STATHOPOULOS S, GEMITZI A. Review on spatial downscaling of satellite derived precipitation estimates[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 82(18): 424.
- [13] BALLARIN A S, BARROS G L, CABRERA M C M, et al. A copula-based drought assessment framework considering global simulation models[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2021, 38: 100-110.
- [14] 郝振纯, 李丽, 徐毅, 等. 区域气候情景 Delta-DCSI 降尺度方法[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2009, 41(5): 1-7.
- HAO Zhenchun, LI Li, XU Yi, et al. Study on delta-DCSI downscaling method of GCM output[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2009, 41(5): 1-7.
- [15] NABAEI S, SHARAFATI A, YASEEN Z M, et al. Copula based assessment of meteorological drought characteristics: Regional investigation of Iran[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 276: 107-111.
- [16] 伊明启, 唐元智, 霍军军, 等. 未来气候变化下拉萨河流域径流变化趋势研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(1): 95-107.
- YI Mingqi, TANG Yuanzhi, HUO Junjun, et al. Study of runoff trends in the Lhasa River Basin under future climate change[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(1): 95-107.
- [17] WU J H, WANG Z C, DONG J H, et al. Robust runoff prediction with explainable artificial intelligence and meteorological variables from deep learning ensemble model[J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(9): e2023WR035676.
- [18] 姜瑶. 黑河中游绿洲多尺度农业水文过程及用水效率的模拟分析与优化调控研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- JIANG Yao. Simulation analysis and optimal regulation for agro-hydrological process and water use efficiency on multiple scales of the middle Heihe River basin[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [19] CHEN J X, WU H, ZHANG C L, et al. An inexact bi-level multi-objective modeling approach for managing agricultural water-food-carbon-land-ecology-nutrition nexus in an arid area[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 621: 129-145.
- [20] LI M, FU Q, GUO P, et al. Stochastic multi-objective decision making for sustainable irrigation in a changing environment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 223: 928-945.
- [21] ZHANG F, CUI N B, GUO S S, et al. Irrigation strategy optimization in irrigation districts with seasonal agricultural drought in Southwest China: A copula-based stochastic multiobjective approach[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 282: 108-123.
- [22] 左京平. 气候变化影响下塔里木河流域径流不确定性与缺水风险评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
- ZUO Jingping. Assessment of the uncertainty of runoff and the water shortage risk in the Tarim River Basin under the impact of climate change[D]. Shanghai: East China Normal University, 2021.
- [23] LENTON T M, XU C, ABRAMS J F, et al. Quantifying the human cost of global warming[J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6: 1237-1247.
- [24] CHIANG F, MAZDIYASNI O, AGHAKOUCHAK A. Evidence of anthropogenic impacts on global drought frequency, duration, and intensity[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 2754.
- [25] 吴子晗, 计嘉晨, 张帆. 黑河上游年径流模拟模型优选与归因分析[J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(3): 80-90.
- WU Zihan, JI Jiachen, ZHANG Fan. Optimization and attribution analysis of annual runoff simulation models in the upper reaches of the Heihe River, Northwestern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(3): 80-90.

## Assessing irrigation water shortage in the middle reaches of the Heihe River Basin under future climate scenarios

WU Zihan<sup>1</sup>, ZHANG Sunxun<sup>2</sup>, ZHANG Fan<sup>1\*</sup>, ZHANG Xinyu<sup>1</sup>, LIU Meixian<sup>3</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 3. Hangjin Banner Water Conservancy Development Center, Ordos City, Inner Mongolia, Ordos 017400, China)

**Abstract:** **【Objective】** Climate change is projected to increase the frequency of extreme weather events such as flooding and drought. This paper evaluates the risk of agricultural water shortage in the middle reaches of the Heihe River basin under different climate change scenarios. **【Method】** Using the CMIP6 SSP scenarios (SSP126, SSP245, and SSP585), downscaled meteorological data were integrated with the BP neural network, the Hargreaves model, and crop coefficients to predict changes in irrigation water availability and demand in the middle reaches of the Heihe River. Copula functions were applied to model the joint distribution of water supply and demand and assess the risk of water scarcity. **【Result】** Calculations for the period from 2024 to 2100 show that average annual irrigation demand is expected to increase by 10.21%, 11.73%, and 14.59% under SSP126, SSP245, and SSP585, respectively. The associated average annual growth rates will be 0.17%, 0.16%, and 0.18%, with the maximum-to-minimum annual runoff volume ratio being 1.21, 1.27, and 1.34, respectively. SSP126 will see an increased probability of wet-dry and wet-wet alternation, while SSP245 will exhibit the highest probability of wet-dry and normal-normal alternation. SSP585 will experience a decrease in the probability of wet-dry alternation and an increase in the probability of normal-normal alternation. Water scarcity risk is below 0.6 under the SSP126 scenario, below 0.6 in some years under SSP245, and consistently above 0.6 under the SSP585 scenario. **【Conclusion】** Runoff in the upstream regions and irrigation demands in the midstream regions of the Heihe River basin are both expected to increase under all SSP scenarios. Water scarcity risks are projected to decrease under the SSP126 and SSP245 scenarios, while SSP585 scenarios presents the highest water scarcity risk and SSP126 presents the lowest. These findings can inform the development of strategies to mitigate the impact of climate change on water scarcity in the catchment.

**Key words:** future climate change; Copula function model; probability of water supply and demand combination; irrigation water shortage risk; middle reaches of Heihe River

责任编辑: 韩洋