

张殷钦, 康文健, 乔海娟, 等. 气候变化背景下流域生态需水预估: 以好溪流域为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 313-323. ZHANG Y Q, KANG W J, QIAO H J, et al. Estimation of watershed ecological water demand under the background of climate change: A case study of Haoxi Watershed[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 313-323. (in Chinese)

# 气候变化背景下流域生态需水预估

——以好溪流域为例

张殷钦<sup>1,2</sup>, 康文健<sup>1,3</sup>, 乔海娟<sup>4</sup>, 龙岩<sup>1,3</sup>, 张丛林<sup>5</sup>

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北省水资源高效利用工程技术研究中心, 河北 邯郸 056038; 3. 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038; 4. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029; 5. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190)

**摘要:** 为探究未来气候变化对流域生态需水量的影响, 保障河流生态需水量, 针对好溪流域进行生态需水量计算及预测。基于好溪流域气象数据及下垫面条件建立流域生态需水模型, 并根据 GF1-WFV 遥感影像数据订正后的地表反射率和作物种植结构提升模型模拟精度。选择 CanESM<sub>2</sub> 气候模式下的 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 这 3 种排放情景, 建立气候变化背景下流域生态需水预测方法, 计算现状年并预测未来年份的生态需水量及生态需水保障程度。结果表明, 基于光学遥感影像进行数据订正后, 模型模拟精度有所提升, 率定期的模型精度  $R^2$  从 0.80 提升为 0.85, 验证期的  $R^2$  从 0.75 提升至 0.78。应用提升精度后的模型进行生态需水预测, 在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 2025—2100 年的年均生态需水分别增加了 0.27 亿、0.21 亿和 0.29 亿  $m^3$ , 其中 RCP8.5 情景下生态需水保障程度最高, RCP4.5 情景下生态需水保障程度最低。

**关键词:** 流域; 气候变化; 模拟精度; 生态需水量; 预测

**中图分类号:** TV11    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0032

气候变化通过改变全球水文循环引起水资源的重新分布, 并且与气温、降雨量等要素产生直接关联, 进而导致下垫面的蒸散发、径流发生改变。随着我国国民经济的快速发展, 部分流域水资源供需矛盾日趋尖锐, 影响着流域内环境与经济的可持续发展, 同时气候变化对其生态需水量也产生了直接影响, 使其表现出不同的演变规律。目前已有的传统方法, 如历史流量法、水力定额法、栖息地法等相关方法<sup>[1]</sup>较少考虑生态需水的预测, 且缺乏对生态需水预测模型模拟精度的评价, 致使现有生态需水预测模型对其模拟结果缺乏衡量标准, 难以直接应用于实际工作。本文建立生态需水预测模型, 在模型的模拟精度提升方面开展研究, 为提升流域生态需水模拟精度提供新思路, 并结合气候变化背景下生态需水预测结果, 进行生态需水保障程度预测,

对比现状及未来生态需水保障程度变化情况, 确保流域生态需水满足阈值, 为流域水资源的开发利用和流域生态环境保护提供科学依据。

流域生态需水是指将流域内生态系统的结构、功能和生态过程维持在一定水平所需要的水量, 是一定生态保护目标对应的水生态系统对水的需求<sup>[2]</sup>。当前, 与流域生态需水相关的研究主要体现在以下几个方面: 在研究对象方面, 已有研究从生态功能完整性<sup>[3]</sup>、植被生态需水量<sup>[4]</sup>、景观格局<sup>[5]</sup>、生境要素(水深、流速和氨氮)<sup>[6]</sup>、土壤水分限制系数<sup>[7]</sup>、非汛期鱼类生存的基本水深条件和产卵期所需的水流条件<sup>[8]</sup>、生态耗水规律<sup>[9]</sup>等多个要素对流域生态需水量的影响展开了深入探究; 在研究方法方面, 已有研究通过综合生态水力学法<sup>[10]</sup>、半干旱草原河岸带划分法<sup>[11]</sup>、改进的流量历时保证率法<sup>[12]</sup>、生态

收稿日期: 2022-12-03    修回日期: 2023-03-07    网络出版时间: 2023-04-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20230412.1036.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019QZKK0401); 水利部专项课题项目(E000951901)

作者简介: 张殷钦(1985—), 女, 甘肃会宁人, 讲师, 博士, 硕士生导师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: [yinqin928@163.com](mailto:yinqin928@163.com)

通信作者: 张丛林(1985—), 男, 天津人, 副研究员, 主要从事流域管理战略与政策研究。E-mail: [zhangconglin@casid.cn](mailto:zhangconglin@casid.cn)

水力半径法<sup>[13]</sup>、年内展布法<sup>[14]</sup>、流速法<sup>[15]</sup>、Tennant 法<sup>[16]</sup>、河道边界条件水动力学与水质耦合模型<sup>[17]</sup>、植被和土壤生态需水测评模型<sup>[18]</sup>、生态需水框架<sup>[19]</sup>等方法计算流域生态需水。

针对未来生态需水量的预测:在模型算法方面,已有研究通过自适应变尺度粒子群 RBF 神经网络混合优化算法<sup>[20]</sup>、经济社会-生态环境-水资源复合需水预测模型<sup>[21]</sup>、阿维里扬诺夫公式<sup>[22]</sup>、马尔可夫链校正的 GM-BP 模型<sup>[23]</sup>、灌区水资源预测模型<sup>[24]</sup>等方法对短期生态需水量进行了预测;在研究内容方面,已有研究通过设定研究区域水域面积增加值法<sup>[25]</sup>、国际耦合模式比较计划第 5 阶段(coupled model inter-comparison project, CMIP5)数据法等方法预测未来生态需水量<sup>[26]</sup>。此外,部分研究还比较了采用不同方法进行短期生态需水量预测的效果<sup>[27]</sup>。

总体来看,已有研究已取得诸多成果,但还有待进一步完善:在生态需水预测模型的模拟精度提升方面有待开展深入研究;在生态需水保障程度的预测方面尚缺少相关研究。

## 1 研究区域概况

好溪属瓯江水系,发源于浙江省丽水市磐安县大盘山南侧笔架山马祥岭,向西南流经壶镇双溪村,纳入白竹溪水,至青川村附近有北山溪注入,过东方镇岱石口村汇入汉溪水,在兰口村与章溪汇合,然后水出缙云县境,入莲都区境,汇入大溪。好溪

干流全长 129 km,流域面积 1 340 km<sup>2</sup>,河道平均比降 4.3‰,见图 1。

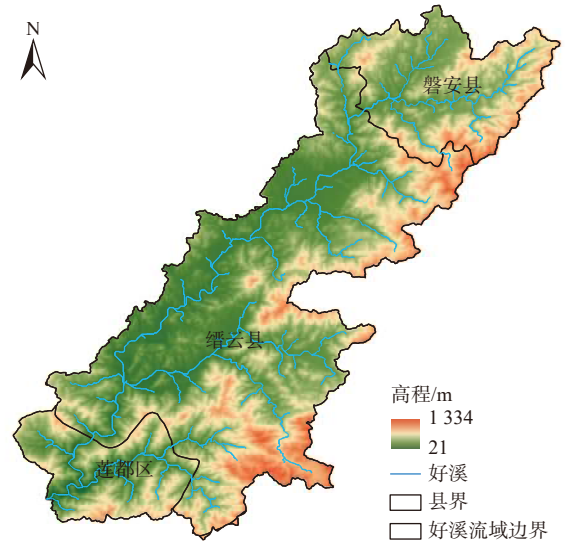


图 1 好溪流域水系

Fig. 1 Water system diagram of Haoxi Watershed

在好溪流域开发过程中,人类活动对其产生的影响逐渐增强,因此有必要开展生态需水研究,以保证流域的合理开发与利用。当前,在缙云县开发建设阶段,被要求建设防洪工程,建设骨干大型水利枢纽工程好溪水利枢纽工程,以控制好溪洪水,根治中下游水灾,综合利用水资源,逐步达到综合治理开发好溪的目的。

## 2 数据与研究方法

### 2.1 数据来源

文中所需数据及其来源见表 1。

表 1 所需数据基本情况  
Tab. 1 Basic information of required data

数据类型	数据精度	年份	来源
气象数据(最高和最低气温、风速、水汽压、相对湿度、日照时数、净辐射等)	逐日数据	1984—2020	国家气象网
气象预测数据(降雨量、气温等)	逐日数据	1984—2100	CanESM2数据
水文观测数据(径流量、降雨量)	逐日数据	1984—2020	浙江政务网、流域水文年鉴
DEM图、土壤图和土地利用图	分辨率为30 m	2020	中国科学院资源环境科学数据中心
GF1-WFV遥感影像数据	分辨率为2 m	2020	中国资源卫星应用中心
Landsat遥感数据	分辨率为30 m	2020	地理空间数据云

### 2.2 研究方法

首先进行生态需水的计算,并且建立生态需水模拟模型,应用遥感数据提高模型精度,通过降尺度气候模型预测未来气象数据,基于改进的生态需

水模型预测生态需水量及生态需水保障程度,并与现状年的生态需水进行对比分析,研判生态需水量及其保障程度的变化趋势,研究思路见图 2。

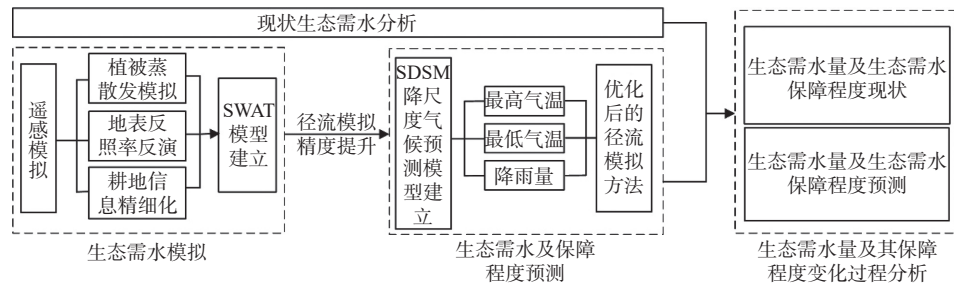


图2 研究思路

Fig. 2 Research ideas

### 2.2.1 生态需水量计算方法

流域生态需水主要包括河道生态基流、蒸发需水量、渗漏需水量和植被生态需水量4部分。

生态基流。Tennant法具有简单、方便的优势,采用Tennant法确定生态需水仅需利用历史流量资料,计算结果与水资源规划结合起来比较容易,具有宏观的指导意义,该方法以年平均流量的百分比作为生态流量<sup>[28]</sup>。

蒸发需水量。河道蒸发需水量是指为维持河流系统正常的生态环境功能,当水面蒸发量高于降水量时,必须接纳河流水面系统以外的水体来补充,这部分水量称为河流水面蒸发需水量。

$$Q = A(E - P) \quad E > P \quad (1)$$

$$Q = 0 \quad E < P \quad (2)$$

式中:  $Q$ 为水面蒸发需水量,  $m^3$ ;  $A$ 为计算时段内平均水面面积,  $m^2$ ;  $E$ 为计算时段内平均蒸发量,  $mm$ ;  $P$ 为计算时段内平均降水量,  $mm$ 。当降水量大于蒸发量时,认为蒸发需水量为零<sup>[29]</sup>。

渗漏需水量。水量渗漏包括自然渗漏和侧渗两种,影响河流湿地渗漏的因素有河道岩性、河流水文参数、水文地质参数等。对一般平原区而言,当河道水位高于两岸地下水位时,河水渗漏补给地下水。

$$W_{\text{渗}} = k_1 A_r \quad (3)$$

式中:  $W_{\text{渗}}$ 为河道年渗漏损失,  $m^3$ ;  $A_r$ 为河流水面面积,  $m^2$ ;  $k_1$ 为经验系数,由河道土质决定。

植被生态需水量。植被生态需水量根据FAO56 Penman-Monteith公式进行计算:

$$ET = ET_0 \times K_c \times K_s \times A_p \quad (4)$$

式中:  $ET$ 为 $t$ 时段内植被需水量;  $ET_0$ 是天然植被的潜在蒸散量,由气候条件决定;  $K_c$ 为植被系数,与植被种类和生长阶段有关;  $K_s$ 为土壤水分限制系数,与土壤中的水量和土壤种类相关;  $A_p$ 为不同植被类型面积,由影像解译得出<sup>[30]</sup>。

生态需水量总和。根据生态需水量的分项计算

得到河流生态需水总量,计算公式为

$$W = W_b + Q + W_{\text{渗}} + ET \quad (5)$$

式中:  $W_b$ 为生态基流。

### 2.2.2 生态需水模拟及精度提升方法

SWAT模型建立。选取目标区域长序列逐日径流数据和气象站点的气象观测数据建立流域SWAT模型,设置模型的模拟时段以及预热时期,然后进行流域径流的率定与验证,最后完成模型模拟结果的输出。

土地利用数据精度提升。基于光学遥感影像数据,应用ENVI软件对研究区域内遥感影像进行遥感解译,计算得到不同波段地表反射率,并对研究区的遥感订正作物种植结构进行修正,提高土地利用图的精度。

### 2.2.3 生态需水及保障程度预测方法

SDSM(statistical downscaling model)为一种统计降尺度模型,其基本原理是通过建立多年的观测数据来设定地区气候因素和大规模气候条件之间的统计经验关系,并且使用独立的观测数据来测试设定的统计关系。该模型选用的大气环流模式为加拿大气候影响情境中心提供的第二代加拿大地球系统模式(the second generation Canadian earth system model, CanESM<sub>2</sub>)模式,经过软件处理后,能够较好地模拟中国不同区域的降雨量、最高气温以及最低气温,以达到预测未来年份气候的目的。

选择2025至2100年的日降水量、日最高温与日最低温为预测变量,将CanESM<sub>2</sub>模式数据输入已率定和验证的SDSM模型,生成流域未来时期长序列气象资料,并预估未来年份流域内降水、最高气温和最低气温变化情况。

设置不同气候情景模式。为了预估未来全球和区域气候变化情况,必须事先提供未来温室气候和气溶胶等的排放情况,即排放情景。排放情景通常是根据一系列因子假设得到的,包括经济发展、人



口变化、技术进步、全球化、环境条件、公平原则等, 对应未来可能出现的不同社会经济发展状况。

根据 CanESM<sub>2</sub> 数据, 区分不同的典型浓度路径 (RCP), 建立 RCP8.5 情景、RCP4.5 情景和 RCP2.6 情景, 分析未来 75 年各情景下气候变化情况与流域生态需水量变化趋势。运用 SDSM 模型预测流域气象站每日的最高气温、每日最低气温及日降水量。通过反距离权重插值美国国家环境预报中心 (NCEP) 再分析数据得到 26 个预测要素的格点数据, 对其进行多元逐步线性回归分析, 确立 3 个预测变量和预报因子之间的统计关系, 最终确定预报因子。

SWAT 模型与 SDSM 联合应用。将好溪流域预测的气象数据代入 SWAT 模型中, 分别计算 RCP8.5、RCP4.5 和 RCP2.6 情景下的生态需水量以及生态需水保障程度。

### 2.2.4 生态需水保障程度计算方法

根据 SL/Z 712—2014《河湖生态环境需水计算规范》<sup>[2]</sup>, 评价河流流量的生态适宜程度, 应用现状及径流预测数据进行现状生态需水保障程度计算和未来生态需水保障程度预测, 其根据未来年份中每日生态流量能否达到生态需水量的要求判定生态需水量的满足程度, 公式为

$$\eta = \frac{\bar{Q}_{\min}}{\bar{Q}} = \frac{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \bar{q}_i}{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} q_{\min,i}} \quad (6)$$

式中:  $\bar{Q}_{\min}$  为最小年平均流量;  $\bar{Q}$  为多年年平均流量;

$\bar{q}_i$  为第  $i$  个月的多年平均径流量;  $q_{\min,i}$  为  $i$  个月的多年最小月均径流量。各变量的单位均为  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

## 3 研究结果

### 3.1 生态需水计算

蒙大拿法将水生生物的生育期分为鱼类产卵期 (4—9 月) 和一般用水期 (10 月—翌年 3 月), 同时也是对年内汛期与非汛期的划分<sup>[3]</sup>。但好溪流域内降雨时段与之不同, 因此, 根据降雨量的多少, 将时段划分改为汛期 (3—8 月) 和非汛期 (9 月—翌年 2 月)。由此, 针对基准年 (2020 年) 的河道基流、河道蒸发需水量和河道渗漏需水量分别进行计算, 得到 9 月份到翌年 2 月份的河道基流为 0.67 亿  $\text{m}^3$ , 3—8 月份的河道基流为 1.58 亿  $\text{m}^3$ , 河道蒸发需水量为 0, 河道渗漏需水量为 0.9 亿  $\text{m}^3$ 。因此, 好溪流域现状年 9 月份到翌年 2 月份生态需水量为 1.57 亿  $\text{m}^3$ , 3—8 月份为 2.48 亿  $\text{m}^3$ 。

对好溪流域不同降水频率下生态需水量进行计算, 在丰水年 (25% 降水频率)、平水年 (50% 降水频率) 和枯水年 (75% 降水频率), 流域生态需水量计算结果见表 2。在主要用水季 (3—8 月) 和一般用水季 (9 月—翌年 2 月) 的生态需水总量中, 75% 降水频率最多, 25% 降水频率次之, 50% 降水频率最少。这是由于 75% 降水频率年份少雨, 河道干旱缺水, 导致了蒸发需水量的增多, 因此生态需水总量增多。在降雨量能完全弥补蒸发量时, 降雨量的增多导致径流量增多, 进而导致所需生态基流的增多, 因此 25% 降水频率下的生态需水量较 50% 更多。

表 2 好溪流域不同降水频率下生态需水量计算结果

Tab. 2 Calculation results of ecological water demand under different precipitation frequencies in Haoxi Watershed 单位: 亿  $\text{m}^3$

不同降水频率	生态基流		蒸发需水量	渗漏需水量	植被生态需水量	总计	
	3—8月	9月—翌年2月				3—8月	9月—翌年2月
75%降水频率	1.09	0.62	1.38	0.90	0.09	3.46	2.98
50%降水频率	1.72	0.64	0	0.90	0.10	2.72	1.64
25%降水频率	2.26	0.83	0	0.90	0.13	3.28	1.86

### 3.2 径流模拟结果对比

#### 3.2.1 遥感数据处理结果

应用 ENVI 软件对好溪流域遥感影像进行预处理 (图 3)。依据 Liang<sup>[31]</sup> 建立的计算公式进行地表

反照率的计算, 对好溪流域总体地表反照率取值 0.18。基于 GF1-WFV 遥感影像数据对土地类型中耕地作物进行分类提取, 将耕地类型进一步细分为水稻、茭白及其他作物的种植。对土地利用图进行

修正,明确种植区作物分类,并与原土地利用类型图融合为新的土地利用类型图,依据此建立 SWAT 径流模型。



图3 遥感图像辐射定标及大气校正过程

Fig. 3 Radiometric calibration and atmospheric correction of remote sensing image

### 3.2.2 SWAT 模型的率定和验证

SWAT 模型采用 SUF12 算法进行参数敏感性分析,选取最敏感的参数进行率定,设定参数的初始范围,并通过多次迭代来逐渐满足评估指标,提

供校正参数的最终范围和最佳值,获得校样的排序,最终率定期  $R^2$  取值为 0.80,验证期  $R^2$  取值为 0.75 (图 4),表明模型能够应用于好溪流域生态需水量研究。

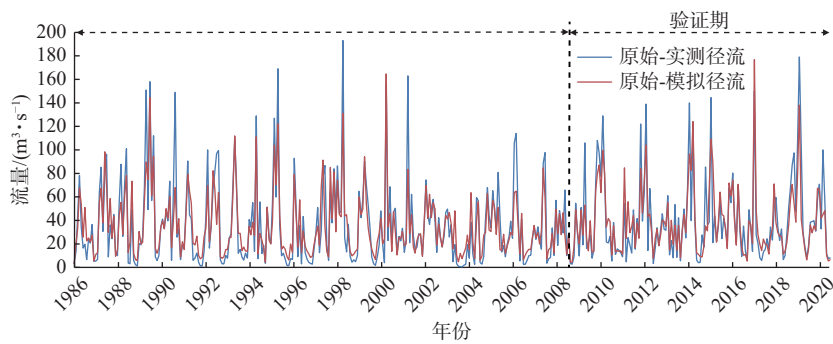


图4 原始数据径流模型模拟情况

Fig. 4 Simulation of runoff model based on original data

将基于遥感数据计算出的好溪流域地表反射率带入到土壤数据库中,应用修正过的土地利用图进

行模型建立,最终率定期  $R^2$  取值为 0.85,验证期  $R^2$  取值为 0.78(图 5),参数率定结果见表 3。

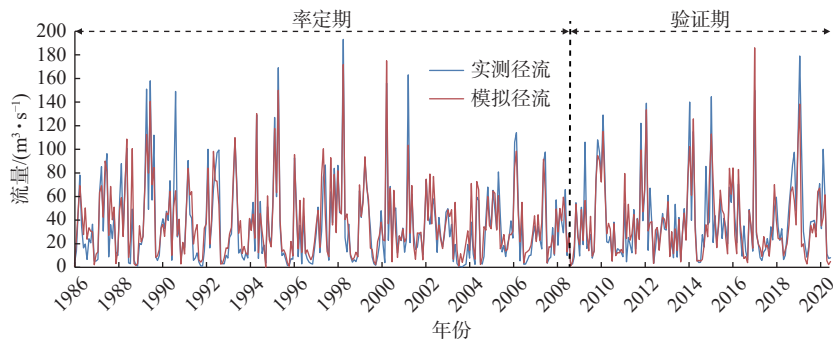


图5 数据订正后径流模型模拟情况

Fig. 5 Simulation of runoff model after data correction

## 3.3 生态需水量及其保障程度情景分析

### 3.3.1 气候变化情景分析

针对日降水量、日最高气温和日最低气温,应

用预报因子(表 4),建立降尺度模型并进行模型的率定和验证。其中,日最高温和日最低温的模拟结果较好,相关系数分别达到了 0.90 和 0.93,能够较

好地反映出温度的变化情况;由于影响降雨的物理机制相对复杂,但日降雨量模拟的相关系数仍能达

到 0.21,因此该降尺度模型能够应用于流域的气象数据模拟。

表 3 模型参数率定结果

Tab. 3 Calibration results of improved model parameters

参数名称	原模型参数率定结果			改进后模型参数率定结果		
	参数初始范围		率定值	参数初始范围		率定值
	下限	上限		下限	上限	
r_CN2.mgt	-0.2	0.2	0.4	-0.2	0.2	0.2
v_ALPHA_BF.gw	0	1.0	-0.4	0	1.0	0.0
v_GW_DELAY.gw	30.0	500.0	507.6	30.0	500.0	393.2
v_GWQMN.gw	0	2.0	1.7	0	2.0	1.4
r_SOL_K().sol	0	1.0	0.8	0	1.0	0.7
r_SOL_AWC().sol	0	1.0	0.8	0	1.0	0.7
r_SOL_BD().sol	1.0	2.5	2.2	1.0	2.5	2.0

表 4 预报因子筛选结果

Tab. 4 Screening results of prediction factors

预测要素	预报因子
年降雨量	p1_z, p5_u, p5zh, p8_z, prcp, s500
年平均最高气温	p1_u, p1_v, p5_u, p8_z, s500, temp
年平均最低气温	p1_v, p5_u, p8_v, p500, s500, s850

表 4 中: p1\_z 为海平面涡度; p5\_u 为 500 hPa 经向气温; p5zh 为 500 hPa 散度; p8\_z 为 850 hPa 涡度; prcp 为降水; s500 为 500 hPa 相对湿度; p1\_u 为海平面经向气温; p1\_v 为海平面纬向气温; temp 为近地表气温; p8\_v 为 850 hPa 纬向气温; p500 为 500 hPa 位势高度; s850 为 850 hPa 相对湿度。

在 RCP2.6 情景下,从 2025 年开始日最高气温变化较为剧烈,变化趋势与 RCP4.5 趋于一致,至 2069 年开始逐渐趋于稳定,也是 3 种模式中唯一气温没有呈现上升趋势的情景。总体来看, RCP2.6 情

景下气温变化平稳,仅有个别年份出现剧烈的震荡,如在 2062 年出现历史最低气温 23.1℃。但 RCP2.6 情景下年平均最低气温变化情况与年平均最高气温相反,前期变化平稳,后期变化相对剧烈。根据数据分析,这是由于冬季气温上升所导致,所预测年份的逐日最低气温中并无 0℃ 以下的情况出现,这说明在流域范围内有变暖趋势,暖冬到来导致最高气温与最低气温变化趋势相异情况的出现。在 RCP4.5 情景下,气温变化总体平稳,且最高气温与最低气温变化趋势趋于一致,均呈现缓慢上升的状态,此时相关政策对 CO<sub>2</sub> 的排放有抑制作用,因此温度上升趋势并不明显。在 RCP8.5 情景下,年均最高气温在 2050 年之前、年均最低气温在 2060 年之前的变化趋势与 RCP2.6 和 RCP4.5 情景基本保持一致,但由于此情景下没有对 CO<sub>2</sub> 的排放量加以限制,因此由于温室气体的累积效应,气温在一定的平稳年份后出现急速上升的趋势,后期变化剧烈,升温效果显著,见图 6。

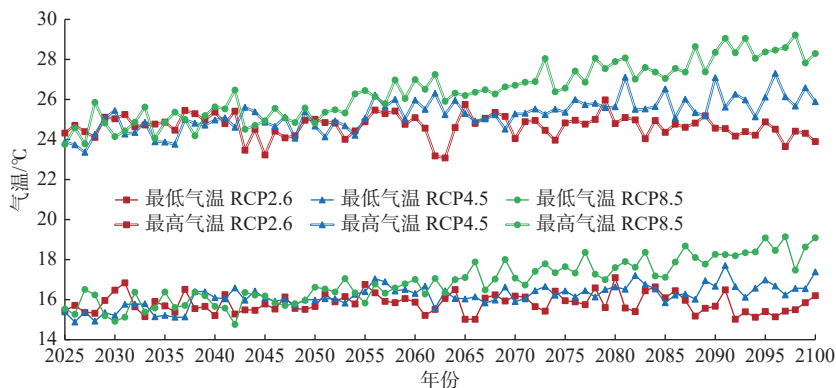


图 6 不同情景下好溪流域最高温和最低温变化情况

Fig. 6 Changes of maximum and minimum temperatures in Haoxi Watershed under different scenarios

RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情景下降雨量年际变化较大,波动明显。RCP2.6 情景下,从总量来看,2060 年之前年降水量有增加的趋势,但以 2060 年为转折点,其后降水量逐年震荡减少。在 RCP4.5 情景下,2025—2040 年和 2080—2090 年的年降雨量变化幅度较大,年际分配不均匀,其余大部分时段年降水量变化趋势相对缓和,仅在 2058 年出现极大峰值点 2 135 mm,2028 年和 2084 年出现雨量极

小值 1 300 mm 和 1 357 mm。RCP8.5 情景下,在前期阶段(2025—2040 年)雨量呈现下降的趋势,中期阶段(2040—2060 年)雨量无明显上升或下降的趋势变化,后期阶段(2060—2100 年)震荡上升,年降雨量在波动中增多,变化显著,并且表现出了非常明显的雨热同期效应与气温同时出现震荡上升的变化趋势,见图 7。

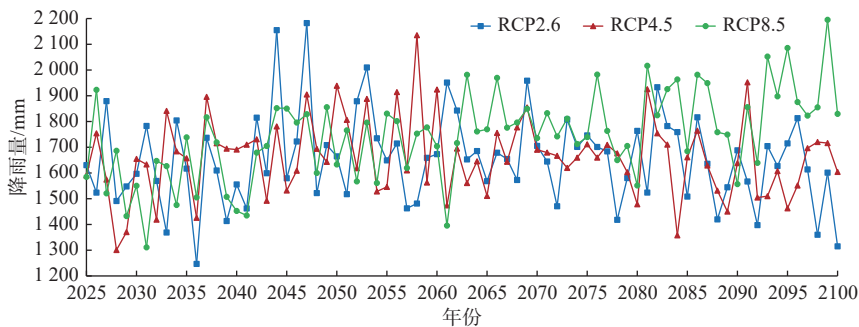


图 7 不同情景下好流域降雨量变化情况

Fig. 7 Rainfall variation in Haoxi Watershed under different scenarios

### 3.3.2 生态需水量情景分析

2025—2100 年 3 种情景下的生态需水量从总体上均呈现上升趋势,其中:RCP8.5 情景增量变化最为显著,2100 与 2025 年生态需水年均值的差值为 0.29 亿  $m^3$ ;RCP4.5 情景变化量最小,差值为 0.21 亿  $m^3$ ;RCP2.6 情景下差值为 0.27 亿  $m^3$ 。这是由于 RCP8.5 情景下,降雨量增加最为明显,径流增多,同

时年均最高气温和最低气温较高且逐年上升,蒸发量增多,进而导致生态需水量增多。RCP4.5 情景下,降雨量变化趋势与 RCP2.6 情景基本相同,但 RCP4.5 情景下年均最高气温和最低气温较高,部分年份蒸发量大于降雨量,因而生态需水量略高于 RCP2.6 情景,见图 8。

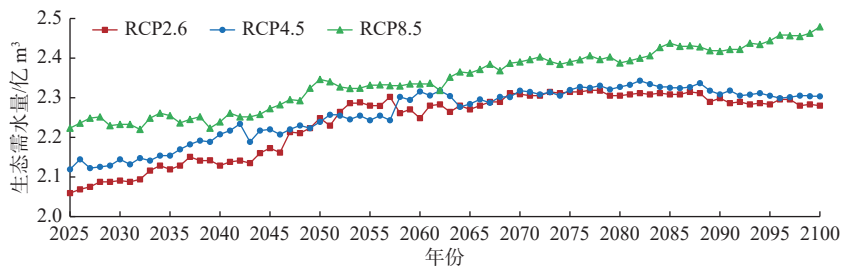


图 8 不同情景下好流域生态需水量变化情况

Fig. 8 Changes of ecological water demand in Haoxi Watershed under different scenarios

### 3.3.3 生态需水保障程度情景分析

由图 9 可知,3 种不同情景的生态需水保障程度呈现 3 种不同的变化趋势。RCP2.6 情景下:生态需水保障程度大部分在 0.9 以上,最低值出现在 2039 年,为 0.778;基于趋势线的变化分析,直至 2100 年,生态需水保障程度无明显上升或下降的趋势。RCP4.5 情景下:生态需水保障程度情况较差,其主要原因是 RCP4.5 情景下气温呈上升趋势,而降雨量年际变化与年内变化较大,致使出现河道径

流无法满足生态需水量的时期较多;基于趋势线的变化分析,该情景下生态需水保障程度呈现下降趋势,该趋势会导致河道生境变差,甚至出现季节性断流的风险。RCP8.5 情景下:生态需水保障程度相对较好,所有年份的保障程度均在 0.8 以上,且保障程度在 0.9 以上的年份相较于其他两个情景占比更大;从趋势线的变化情况分析,RCP8.5 情景的生态需水保障程度呈现上升趋势,较高的生态需水保障程度更有利于河道生境稳定。



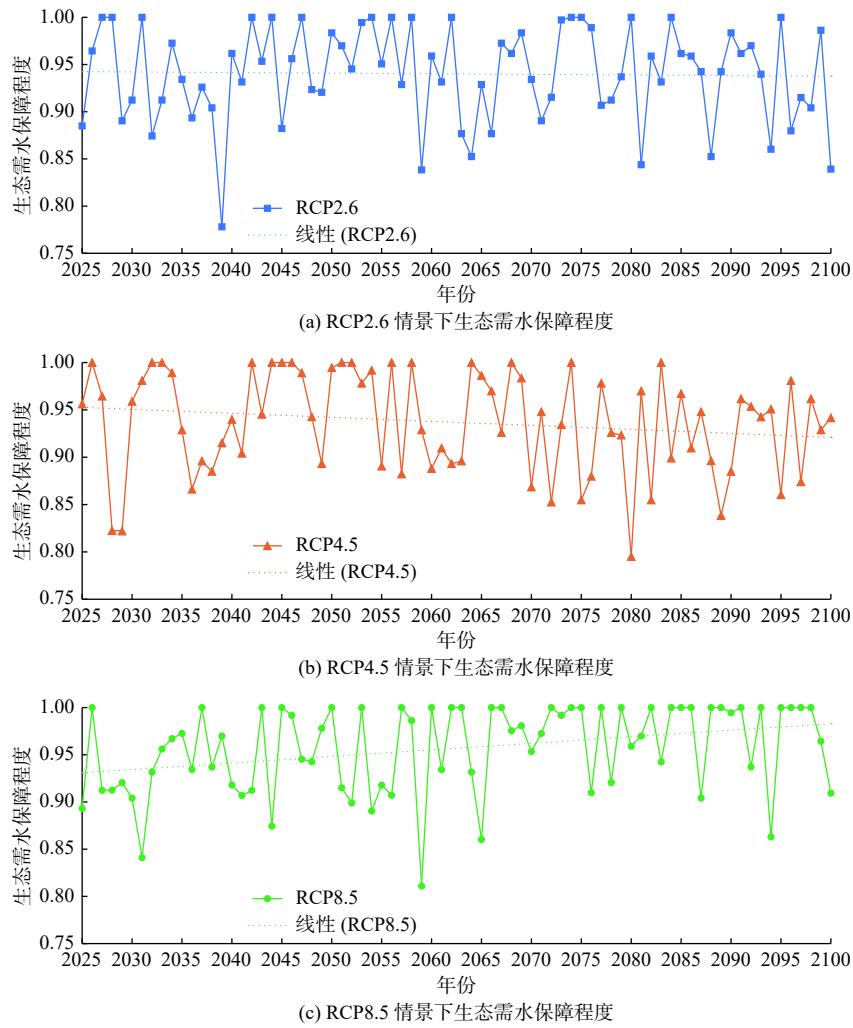


图 9 3 种情景下的生态需水保障程度

Fig. 9 Ecological water demand guarantee degree under three scenarios

#### 4 结论

本文通过计算现状年和未来年份的生态需水量,进行生态需水量及其保障程度的变化趋势分析,得出结论如下:

好河流域河道内生态需水量主要包括河道生态基流量、蒸发需水量、渗漏需水量和植被生态需水量 4 部分。分别计算了 25%、50% 和 75% 不同降水频率下生态需水量情况,在主要用水季(3—8 月)和一般用水季(9 月—翌年 2 月)的生态需水总量中,75% 降水频率最多,25% 降水频率次之,50% 降水频率最少。

基于光学遥感影像数据进行地表反射率和土地利用作物种植结构的订正,将其应用到 SWAT 模型中,在原始数据率定期  $R^2$  取值为 0.8。验证期  $R^2$  取值为 0.75 的基础上,改进后的模型模拟精度  $R^2$  率定期达到了 0.85,验证期达到了 0.78,证明该方法能够有效提升模型模拟精度。

基于未来年份 3 种不同情景下的生态需水变化量的研究,可以得出未来气候要素中的温度和降雨量变化对生态需水量的变化有显著影响。在 RCP2.6 情景下,在气温和降雨量共同影响下的生态需水量在 2050 年以前增幅相对显著,2050 年以后逐渐趋于稳定,且生态需水保障程度也基本趋于稳定;在 RCP4.5 情景下,气温变化趋势与 RCP2.6 大致相同,降水量总体基本保持一致,因此两者生态需水量相近;在 RCP8.5 情景下,受气温和降雨量的共同影响,生态需水量在后期呈现上升趋势,此外,其生态需水保障程度也趋于上升趋势。

#### 参考文献:

- [1] 徐志侠,陈敏建,董增川. 河流生态需水计算方法评述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004(1): 5-9. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1980.2004.01.002.
- [2] 水利部水利水电规划设计总院. 中华人民共和国水利部. 河湖生态需水计算规范: SL/T 712—2021[S].



- 北京: 中华人民共和国水利部, 2021.
- [3] 张远, 赵长森, 杨胜天, 等. 基于关键功能组的河道内生态需水计算[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(1): 108-113. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.20180017](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.20180017).
- [4] 冯湘华, 宋孝玉, 覃琳, 等. 肃南裕固族自治县天然草地植被生态需水研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 115-122,148. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0091](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0091).
- [5] ZHAO F, LI H, LI C H, et al. Analyzing the influence of landscape pattern change on ecological water requirements in an arid/semiarid region of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578(C): 124098-124098. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2019.124098](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124098).
- [6] 吕翠美, 刘苗苗, 王民, 等. 基于四大家鱼生境需求的灌河生态需水过程研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(5): 149-157. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2021.05.016](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2021.05.016).
- [7] 宋孝玉, 刘雨, 覃琳, 等. 内蒙古鄂托克旗天然草地植被生态需水量研究[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(3): 107-115. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2021.03.013](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2021.03.013).
- [8] LU S B, CAI W T, SHAO W, et al. Ecological water requirement in upper and middle reaches of the Yellow River based on flow components and hydraulic index[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(20): 10956-10956. DOI: [10.3390/IJERPH182010956](https://doi.org/10.3390/IJERPH182010956).
- [9] 马佳丽, 刘东伟, 王杰, 等. 基于长时间序列(1975—2020年)生态耗水的岱海动态生态需水分析[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(1): 207-219. DOI: [10.18307/2022.0117](https://doi.org/10.18307/2022.0117).
- [10] 王晨阳, 成晓龙, 申超, 等. 城市水生态修复工程生态需水量分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(3): 390-398. DOI: [10.12202/j.0476-0301.2020110](https://doi.org/10.12202/j.0476-0301.2020110).
- [11] DUO L, YU R H. New grassland riparian zone delineation method for calculating ecological water demand to guide management goals[J]. *River Research and Applications*, 2020, 36(9): 1838-1851. DOI: [10.1002/rra.3707](https://doi.org/10.1002/rra.3707).
- [12] 刘立军, 张扬, 郭丽君, 等. 基于改进流量历时保证率法的河道生态需水计算[J]. *中国农村水利水电*, 2020(3): 74-77,82. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2284.2020.03.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2284.2020.03.014).
- [13] 杨阳, 汪中华, 王雪莲, 等. 河流生态需水计算及空间满足率分析: 以济南市为例[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(5): 513-522. DOI: [10.11867/j.issn.1001-8166.2020.021](https://doi.org/10.11867/j.issn.1001-8166.2020.021).
- [14] 朱晔, 方红远, 王铖洁, 等. 改进的年内展布法在河流生态需水计算中的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2021(10): 105-109. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2284.2021.10.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2284.2021.10.016).
- [15] 闫少锋, 熊瑶, 谢文俊. 基于流速法与环境流量的生态需水研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(2): 51-57. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2284.2021.02.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2284.2021.02.009).
- [16] 纪昌明, 曹成琳, 王弋. 基于水系连通的开都河生态需水及供水量分析[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(3): 835-843. DOI: [10.13292/j.1000-4890.202103.026](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202103.026).
- [17] 余真真, 闫莉, 王瑞玲, 等. 多目标协控下伊洛河自净需水流量研究[J]. *水资源保护*, 2020, 36(5): 38-42. DOI: [10.3880/j.issn.10046933.2020.05.006](https://doi.org/10.3880/j.issn.10046933.2020.05.006).
- [18] 钟旭珍, 王丽霞, 姚昆, 等. 基于生态环境功能分区的关中-天水区生态需水量测评[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(6): 240-246. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2020.06.032](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2020.06.032).
- [19] WU H S, SHI P, QU S M, et al. Establishment of watershed ecological water requirements framework: A case study of the Lower Yellow River, China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 820: 153205-153205. DOI: [10.1016/J.SCITOTENV.2022.153205](https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.153205).
- [20] 许昆. 涑水河流域生态环境需水量计算和预测[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(11): 107-110. DOI: [10.13522/j.cnki.ggps.2016.11.020](https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2016.11.020).
- [21] 黄国如, 李彤彤, 王欣, 等. 基于系统动力学的海口市需水预测分析[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(12): 1-5,40.
- [22] 孙栋元, 胡想全, 金彦兆, 等. 疏勒河中游绿洲天然植被生态需水量估算与预测研究[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(1): 154-161. DOI: [10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2016.01.018](https://doi.org/10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2016.01.018).
- [23] 王文川, 李文锦, 徐冬梅, 等. 基于马尔可夫链校正GM-BP模型的径流预测[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(5): 44-49. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0108](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0108).
- [24] LI Y, XIE J C, JIANG R G, et al. Application of edge computing and GIS in ecological water requirement prediction and optimal allocation of water resources

- in irrigation area[J]. *PloS one*, 2021, 16(7): e0254547-e0254547. DOI:10.1371/JOURNAL.PONE.0254547.
- [25] 郭巧玲, 杨云松, 李建林, 等. 额济纳绿洲生态需水及其预测研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(5): 135-139. DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2011.05.028.
- [26] DONG L, ZHANG G X, ZHANG K. Analysis and predication of wetland ecological water requirement in Nenjiang basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(18): 6165-6172. DOI: 10.5846/stxb201401100077.
- [27] 黄天意, 周晋军, 李雅君, 等. 六种预测模型在北京城市生态环境用水短期预测中的比较[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(3): 119-133. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.03.012.
- [28] 徐志侠, 董增川, 周健康, 等. 生态需水计算的蒙大拿法及其应用[J]. *水利水电技术*, 2003(11): 15-17. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2003.11.005.
- [29] 严登华, 王浩, 王芳, 等. 我国生态需水研究体系及关键研究命题初探[J]. *水利学报*, 2007(3): 267-273. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2007.03.003.
- [30] RICHARD G. A; LUIS S. P; MARTIN S, et al. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, 131(1): 2-13. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(2).
- [31] LIANG S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2): 213-238. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00205-4.

## Estimation of watershed ecological water demand under the background of climate change: A case study of Haoxi Watershed

ZHANG Yinqin<sup>1,2</sup>, KANG Wenjian<sup>1,3</sup>, QIAO Haijuan<sup>4</sup>, LONG Yan<sup>1,3</sup>, ZHANG Conglin<sup>5</sup>

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Hebei Water Resources Efficient Utilization Engineering Technology Research Center, Handan 056038, China; 3. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Handan 056038, China; 4. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 5. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Climate change has caused the redistribution of water resources by changing the global hydrological cycle. The main factors are changes in temperature and rainfall, and the variation of these climate factors directly led to the change in surface runoff. At present, people pay too much attention to economic development and ignore the protection of the ecological environment, which has led to the contradiction between the supply and demand of water resources in the watershed. At the same time, under the environment of global warming, the ecological water demand of the watershed has been more or less affected, and the ecological balance of the watershed has been seriously threatened.

The previous research results were drawn up and Tennant, Penman-Monteith formula, and other methods were used to calculate the current annual ecological water demand of Haoxi Watershed. The results showed that the current ecological water demand of Haoxi Watershed was 157 million m<sup>3</sup> from September to February of the next year, and 248 million m<sup>3</sup> from March to August.

Using CanESM<sub>2</sub> meteorological prediction data under RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios, the location of Haoxi Watershed was extracted and downscaled to obtain the climate prediction data. The grid data of 26 prediction factors were obtained by inverse distance weight interpolation NCEP reanalysis data. Multivariate stepwise linear regression was applied to establish the statistical relationship between the three prediction variables and the prediction factors, and finally, the prediction factors were determined. The daily precipitation, daily maximum temperature, and daily minimum temperature from 2025 to 2100 were selected as predictive variables to analyze climate change and the changing trend of ecological water demand of the watershed under each scenario in the next 75 years. The CanESM<sub>2</sub> model data was standardized and verified in SDSM model to generate the long-term series data of the watershed in the future. The changes in precipitation, daily maximum mild temperature and daily minimum temperature in future years were also estimated. The obtained meteorological forecast data was put into

the high-precision ecological water demand model established above to generate the long-term forecast value of ecological water demand to 2100. Based on the predicted value of ecological water demand, the degree of ecological water demand guarantee in the future years was calculated.

Due to the lack of accuracy of land use data sources applied in the current research, the simulation accuracy of ecological water demand in Haoxi Watershed was low. Therefore, the remote sensing image data of GF1-WFV and ENVI software were used for remote sensing interpretation to obtain the surface albedo and high-precision land use data in the study area, and the interpreted data were put into the existing SWAT model to compare the improvement effect of data accuracy before and after substitution.

In terms of the comparison of the simulation results of ecological water demand, the results of the original model were as follows: Periodic  $R^2$  is 0.8, and the verification period  $R^2$  is 0.75. The high-precision land use data and surface albedo obtained from the interpretation of multivariate remote sensing data were substituted into the simulation results obtained by the model. The periodic  $R^2$  value was 0.85 and the validation  $R^2$  value was 0.78. Therefore, the simulation accuracy of the model was significantly improved. In the forecast changes of meteorological data in the next 75 years, the maximum temperature and minimum temperature under RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 all had different amplitude increases. From the general trend, the temperature increase was the largest under RCP8.5 and the lowest under RCP2.6. Compared with the temperature, the rainfall showed no obvious change trend, and the overall fluctuation was large. In terms of the forecast of ecological water requirement, the ecological water requirement of the three different scenarios will increase to varying degrees, but the two scenarios of RCP2.6 and RCP4.5 will gradually stabilize after 2065, while the RCP8.5 will continue to increase. Therefore, the variation trend of ecological water demand guarantee degree can be obtained. RCP2.6 tends to be stable, RCP4.5 shows a downward trend, and RCP8.5 shows an upward trend. In terms of the comparison of the simulation results of ecological water demand, the simulation results of the original model were as follows: the rate periodic  $R^2$  is 0.8, and the verification period  $R^2$  is 0.75. The high-precision land use data and surface albedo obtained from the interpretation of multivariate remote sensing data were substituted into the simulation results obtained by the model. The periodic  $R^2$  value was 0.85 and the validation  $R^2$  value was 0.78. Therefore, the simulation accuracy of the model was significantly improved. In the forecast changes of meteorological data in the next 75 years, the maximum temperature and minimum temperature under RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 all had different amplitude increases. From the general trend, the temperature increase was the largest under RCP8.5 and the lowest under RCP2.6. Compared with the temperature, the rainfall showed no obvious change trend, and the overall fluctuation was large. In terms of the forecast of ecological water requirement, the ecological water requirement of the three different scenarios will increase to varying degrees, but the two scenarios of RCP2.6 and RCP4.5 will gradually stabilize after 2065, while the RCP8.5 will continue to increase. Therefore, the variation trend of ecological water demand guarantee degree can be obtained. RCP2.6 tends to be stable, RCP4.5 shows a downward trend, and RCP8.5 shows an upward trend.

The results showed that the established ecological water demand model could be applied to the study of Haoxi Watershed, and the simulation accuracy improvement method based on the remote sensing simulation interpretation method could improve the accuracy of the model. In addition, the predicted ecological water demand and the degree of ecological water demand guarantee in the next 75 years and clarified the law of its change, which had important reference significance for guaranteeing the basic ecological functions of the river watershed.

**Key words:** watershed; climate change; simulation accuracy; ecological water demand; prediction