

# 贵阳市水生态足迹驱动机制与适应性管理路径评估

钟鸣<sup>1</sup>,李析男<sup>1</sup>,高运法<sup>1</sup>,杨世琼<sup>2</sup>,万晓安<sup>1</sup>,杨松<sup>1</sup>,王梓滔<sup>3</sup>

(1. 贵州省水利水电勘测设计研究院股份有限公司; 2. 贵州省生态与农业气象中心;  
3. 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司)

**摘要:** 构建了涵盖现状评估、机制解释、趋势预测、路径评估的贵阳市水生态足迹综合评估框架,识别了驱动水生态足迹演化的关键因素,并在多种政策情景下对2024—2028年贵阳市水生态足迹进行了预测与适应性管理路径评估。结果表明:2024—2028年贵阳市人均水生态足迹深度始终大于1,城市对存量水资源具有长期依赖性;驱动机制分析显示,GDP、单位GDP用水强度和供水总量是驱动贵阳市水生态足迹演化的主要因素;节水路径是2024—2028年贵阳市的最优适应性管理路径,其在风险规避与系统韧性方面表现最佳。

**关键词:** 水生态足迹;水资源;适应性管理路径;城市可持续发展;贵阳市

**Driving mechanism and adaptive management path assessment of water ecological footprint in Guiyang City//** Zhong Ming<sup>1</sup>, Li Xi'nan<sup>1</sup>, Gao Yunfa<sup>1</sup>, Yang Shiqiong<sup>2</sup>, Wan Xiaolan<sup>1</sup>, Yang Song<sup>1</sup>, Wang Zitao<sup>3</sup> (1. Guizhou Water & Power Survey-Design Institute Co., Ltd.; 2. Guizhou Provincial Ecological and Agricultural Meteorological Center; 3. Jiangsu Water Conservancy Engineering Science and Technology Consulting Co., Ltd.)

**Abstract:** A comprehensive evaluation framework for the water ecological footprint of Guiyang City has been constructed, covering current situation assessment, mechanism explanation, trend prediction, and path assessment. The key factors driving the evolution of water ecological footprint have been identified. The water ecological footprint of Guiyang City from 2024 to 2028 under various policy scenarios was predicted and the adaptive management path was evaluated. The results show that from 2024 to 2028, the water ecological footprint depth per capita in Guiyang City is always greater than 1, indicating that the city has a long-term dependence on existing water resources. The analysis of the driving mechanism shows that, GDP, unit GDP water intensity and total water supply are the main factors driving the evolution of Guiyang's water ecological footprint. The water-saving path is the optimal adaptive management path for Guiyang City from 2024 to 2028, which performs the best in risk avoidance and system resilience.

**Key words:** water ecological footprint; water resources; adaptive management path; urban sustainability; Guiyang City

水资源不仅是人类生存的基础保障,也是支撑社会经济持续发展的战略性资源<sup>[1-2]</sup>。作为连接自然生态系统与城市社会经济系统的核心纽带,水资源在维系生态平衡与支撑经济增长中发挥着基础性作用<sup>[3]</sup>。随着全球气候日益变暖与人类活动强度持续加剧,水资源短缺的紧张局势日益突出,如何实现可持续发展已成为全球共同关注的重大议题<sup>[4]</sup>。水生态足迹(water ecological footprint, WEF)作为评估水资源利用强度与生态承载力关系的综合指标,具有结构清晰、适用范围广等优势,已被广泛应用于区域水资源管理与可持续性的评估<sup>[5-9]</sup>。基于 WEF 视角开展水资源可持续研究,对于深刻理解水资源短缺问题、构建人水和谐关系具有深远意义。

Wackernagel 等<sup>[10]</sup>首次引入了生态足迹(ecological footprint, EF)模型,该模型基于承载力理念阐明了自然资源消耗与生态系统承载力之间的关系,通过比较生态足迹和当地生态承载能力来确定地区的可持续性。为了对自然资本的存量和流量进行区分, Niccolucci 等<sup>[11-12]</sup>在 EF 模型中引入了足迹广度和足迹深度两个指标,足迹广度反映人类活动对水资源流动资本的占用水平,足迹深度反映存量资本的消耗程度。基于足迹广度和足迹深度建立的三维水生态足迹(three-dimension water ecological footprint, 3D-WEF)模型可以更好地描述水资源资本的真实损耗情况。随着研究的不断深入,生态足迹理论的应用范围逐渐扩展到水资源<sup>[13]</sup>、能量<sup>[14]</sup>、驱

基金项目:贵州省科技厅科技支撑项目(黔科合支撑[2024]一般130);贵州省水利厅科技专项经费项目(KT202515)

作者简介:钟鸣(1994—),男,高级工程师,硕士,主要从事水资源规划管理与生态水文研究。E-mail:zhongminghu@163.com

通信作者:李析男(1985—),男,正高级工程师,博士,主要从事水资源规划管理与生态水文学研究。E-mail:lixinan1985@126.com

动机机制<sup>[6]</sup>、生态系统服务<sup>[14]</sup>等方面。近年来,3D-WEF 模型已广泛应用于长江经济带<sup>[15]</sup>、新疆地区<sup>[7]</sup>、京津冀城市群<sup>[16]</sup>、黄河流域<sup>[17]</sup>等典型区域,这些研究从时空演变、效率评估、解耦机制等角度丰富了 WEF 理论体系,但多聚焦于静态核算和单一机制解释,尚缺乏对驱动因素与水资源管理适应性的系统探索。另外,目前关于 3D-WEF 模型的研究多集中于流域和省域等宏观尺度,难以直接指导具体城市的精细化水资源管理。城市作为水资源消耗和管理的具体单元,其内部复杂的社会经济活动与水资源系统间的反馈机制在大尺度研究中往往被平滑或忽略。以往研究受限于数据样本量小、驱动因素复杂交织等原因,复杂驱动机制下城市尺度 WEF 演化的定量预测能力仍有不足。而随着人工智能技术的不断发展,机器学习方法也逐步被引入环境与水文研究领域<sup>[18-19]</sup>。其中,极限梯度提升(XGBoost)模型凭借其在多变量特征提取、小样本适应性和模拟精度等方面的优秀表现,已在相关领域展现出较高的应用潜力<sup>[20-21]</sup>。

鉴于此,本文利用对数平均迪氏指数(LMDI)模型对 WEF 进行定性分析,通过多元逐步回归分析提取关键驱动变量;结合自回归积分移动平均(ARIMA)模型,构建 ARIMA-XGBoost 组合预测模型,提升 WEF 的预测精度与解释能力;构建融合政策路径、水文年型、模型不确定性的蒙特卡罗模拟框架,评估贵阳市未来的水资源盈亏风险,以期提升贵阳市水资源系统的调控适应性与决策科学性。

## 1 研究区概况

乌江流域是长江经济带的重要组成部分,同时也是长江上游重要的生态屏障,其生物多样性对于维护长江流域的生态平衡具有不可替代的作用。然而,经济快速发展与生态系统的脆弱性叠加,使发展与保护的矛盾在该区域尤为突出。贵阳市是乌江流域的重要中心城市(图 1)。2002—2023 年贵阳市多年平均水资源总量为 43.50 亿 m<sup>3</sup>,多年平均供水总量为 11.19 亿 m<sup>3</sup>,总体上水资源总量和供水总量保持相对稳定,涵盖了丰、平、枯 3 种典型水文年。2002—2023 年贵阳市常住人口增长了 290.75 万人,GDP 增长约 18.3 倍,用水矛盾逐渐突出。本文研究数据主要来源于 2002—2023 年《贵阳市统计年鉴》以及《贵阳市水资源公报》。

## 2 研究方法

### 2.1 3D-WEF 核算方法

3D-WEF 模型主要核算指标包括 WEF、水生态

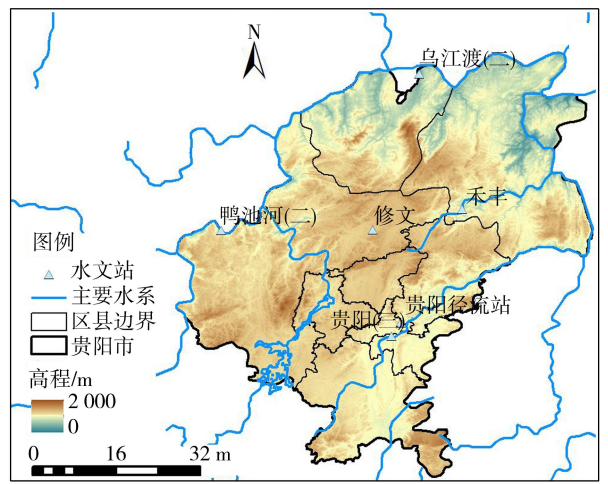


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

承载能力(water ecological carrying capacity, WEC)、水生态盈亏(water ecological deficit, WED)、水生态足迹广度(water ecological footprint size, WEFS)和水生态足迹深度(water ecological footprint depth, WEFD),计算公式见文献<sup>[7, 22-23]</sup>。

### 2.2 驱动机制识别

LMDI 模型能够对多重驱动因素进行完整且无残差的分解,本文考虑 WEF 的演化受人口、经济、技术和结构等因素的共同影响,采用 LMDI 模型,并基于 Kaya 恒等式,将其驱动因素分解为产业结构、技术水平、经济水平、人口规模 4 个维度<sup>[24]</sup>,其分解表达式为:

$$\Delta W_{EF} = \Delta E_I + \Delta E_T + \Delta E_S + \Delta E_P \quad (1)$$

式中: $\Delta W_{EF}$  为 WEF 变化程度; $\Delta E_I$ 、 $\Delta E_T$ 、 $\Delta E_S$ 、 $\Delta E_P$  分别为产业结构、技术水平、经济水平、人口总量对水生态足迹的效应值,其大于 0 表示该因素对 WEF 为促进作用,小于 0 表示该因素对 WEF 为抑制作用。

在完成 LMDI 分解后,采用多元逐步回归分析识别影响 WEF 演化的显著因素,为后续预测模型提供必要的输入变量。回归分析以年度 WEF 作为因变量,以 GDP、单位 GDP 用水强度、供水总量等为自变量,进行标准化处理并进行多重共线性检验(统计量  $V_{IF} < 4$  通过检验)。通过逐步回归筛选出显著变量,最终确定模型输入变量集。为确保模型的稳健性和解释能力,使用五折交叉验证法对模型进行验证<sup>[25]</sup>。

### 2.3 组合预测模型构建

构建结合 ARIMA 模型与集成学习方法的组合预测框架预测 WEF 的非线性演变趋势。首先利用 ARIMA 模型预测 WEF 时间序列的线性趋势<sup>[26-29]</sup>;其次采用 XGBoost 模型进一步挖掘非线性因素与残

差关系,以增强模型的预测精度<sup>[21]</sup>。组合预测模型的表达式为:

$$\hat{y}_{Z,t} = \hat{y}_{A,t} + \epsilon_t \quad (2)$$

式中: $\hat{y}_{Z,t}$  为组合模型第  $t$  年的预测值; $\hat{y}_{A,t}$  为 ARIMA 模型第  $t$  年的预测值; $\epsilon_t$  为模型残差。

在模型残差部分,构建以 GDP、单位 GDP 用水强度、供水总量为驱动变量的特征集,以  $\epsilon_t$  为目标变量,构建机器学习回归模型对残差进行非线性建模,表达式为:

$$\epsilon_t = f(X_t) + \sigma_t \quad (3)$$

式中: $X_t$  为第  $t$  年的驱动因素变量; $\sigma_t$  为随机误差项; $f(\cdot)$  为利用 XGBoost 模型训练得到的残差回归函数。为提高模型性能与稳定性,本文采用贝叶斯优化策略对两类机器学习模型的关键超参数进行自动调优。调参过程中结合时间序列特性引入基于时间顺序的滑动式交叉验证策略,对不同超参数组合进行性能评估,以确保模型在非平稳背景下的稳定性。

鉴于 ARIMA 模型在长期趋势预测中误差会随预测步长的增加而累积,导致预测精度逐渐降低。本文引入误差累积率指标,科学确定组合模型在城市 WEF 预测中的适用年限,从而判定模型预测结果的有效性<sup>[30-31]</sup>。具体来说,以残差方差乘以累计自相关权重作为预测不确定性上限的近似指标,用于辅助判断中短期可接受预测范围,定义误差阈值界限为训练期残差方差的 1.5 倍与 2 倍,若某一预测年限的误差方差超过此范围,视为该年限后的预测不再可信。基于残差序列自相关的误差累积评估方法公式为:

$$\text{Var}(\hat{y}_{t+h}) = \sigma^2 (1 + 2 \sum_{k=1}^h \rho_k) \quad (4)$$

式中: $\sigma^2$  为组合预测模型训练期残差方差; $\rho_k$  为组合预测模型残差序列的第  $k$  阶自相关系数; $h$  为预测步长。

## 2.4 水资源适应性管理路径评估

为了实现适应性管理路径的定量评估,构建基于风险决策理论的综合评估框架。该框架利用蒙特卡洛模拟生成的各情景下 WEF 的概率分布,计算尾部风险( $R_T$ )、后悔值( $R_S$ )和变异指数( $C_V$ )3 个指标。 $R_T$  反映路径在极端情况下的潜在损失; $R_S$  反映路径在不确定性情境中的鲁棒性; $C_V$  反映该管理路径下 WEF 的相对波动性。计算公式为:

$$R_T = \frac{1}{N(1-\alpha)} \sum_{i=1}^{N(1-\alpha)} W_{EFi} \quad (5)$$

$$R_{S,j,i} = W_{EF,j,i} - \min\{W_{EF,j,i}\} \quad (6)$$

$$C_V = \sigma(W_{ED,j}) / \mu(W_{ED,j}) \quad (7)$$

式中: $\alpha$  为置信水平,本文取 0.95; $N$  为蒙特卡罗模

拟结果的总数; $W_{EF,j,i}$  为路径  $j$  第  $i$  次模拟得到的 WEF 值; $\mu(\cdot)$  为均值函数; $\sigma(\cdot)$  为标准差函数; $W_{ED,j}$  为路径  $j$  的 WED 值。

对  $R_T$ 、 $R_S$ 、 $C_V$  3 个指标进行无量纲化处理,采用层次分析(AHP)法确定其权重,进而应用逼近理想解排序(TOPSIS)法<sup>[32]</sup>对不同管理路径进行量化评估,最终确定研究区在预测期内的首选水资源适应性管理路径。

## 3 结果与分析

### 3.1 WEF 演变趋势

图 2 为 2002—2023 年贵阳市 3D-WEF 核算指标变化趋势。由图 2 可见,2002—2023 年贵阳市人均水生态足迹整体呈现波动下降态势,人均水生态盈亏始终为正值,表明贵阳市在此期间并未出现水生态赤字。从结构上看,人均水生态足迹深度在此期间均大于 1,且多年平均值达到 1.61,说明贵阳市的用水模式长期需要借助多年调节水库等存量水资源来维持供给。同时,人均水生态足迹广度与人均水生态足迹在数值上保持一致,这与 2002—2023 年贵阳市人均水生态承载力始终高于人均水生态足迹有关。从年度视角来看,这一特征表明贵阳市对当年径流的消耗并未超出当年可供给水量。需要注意的是,2009 年和 2011 年等贵阳市水资源生态承载力偏低,人均水生态盈余十分有限,然而水生态足迹深度依然维持在 1.2 以上,说明在枯水年份贵阳市水资源系统具有潜在的生态风险。总体而言,2002—2023 年贵阳市人均水生态足迹深度长期维持在 1.3~1.8,变化幅度不大,呈现出高位稳定、小幅波动的特征;这在一定程度上反映出贵阳市产业结构与发展模式相对稳定,同时也表明贵阳市发展对存量水资源具有长期依赖性,未来亟须在生态保护与经济发展之间寻求动态均衡。

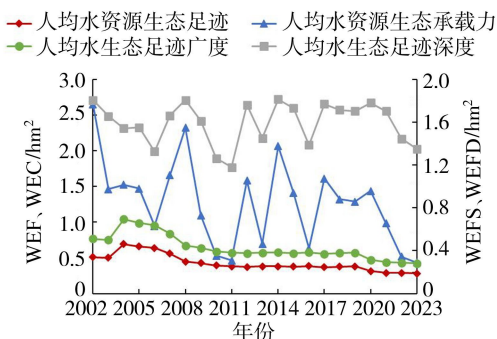


图 2 2002—2023 年贵阳市 3D-WEF 核算指标变化趋势  
Fig. 2 Change trends in 3D-WEF accounting indexes in Guiyang City from 2002 to 2023

### 3.2 驱动机制识别结果

#### 3.2.1 LMDI 分解结果

图3为2003—2023年贵阳市 WEF 驱动因素 LMDI 分解结果。由图3可见,经济效应与技术效应是驱动贵阳市水资源生态足迹变化的核心因素。经济效应在2003—2023年始终为正,是推动 WEF 持续上升的主要驱动因素;技术效应在多数年份为负,对 WEF 增长具有明显抑制作用,如2005—2006年、2007—2008年、2010—2011年,其抑制作用有效抵消了经济扩张带来的水资源压力;人口效应大部分年份的效应值为1~4,对 WEF 的影响总体较弱,但在2009—2010年(14.56)和2019—2020年(35.10)对 WEF 的驱动效应显著提升;结构效应数值长期接近0,对 WEF 变化没有实质性影响。总体来看,贵阳市 WEF 的演变格局表现为经济扩张的持续施压与技术进步的阶段性抵消并存,而人口与产业结构因素作用有限;未来城市的水资源管理需进一步依靠节水技术提升与产业结构优化来缓解经济发展对水资源带来的压力。

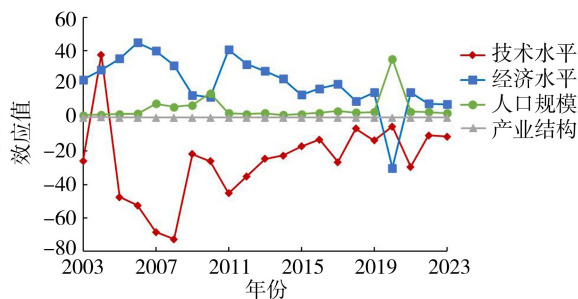


图3 2003—2023年贵阳市 WEF 驱动因素 LMDI 分解结果

Fig.3 LMDI decomposition results of driving factors of WEF in Guiyang City from 2003 to 2023

#### 3.2.2 多元逐步回归分析结果

贵阳市水生态足迹驱动因素多元逐步回归公式为:

$$W_{EF} = 184.93 - 0.0257G - 0.017q_{GDP} + 20.6W_s \quad (8)$$

式中:  $W_{EF}$  为 WEF 值;  $G$  为 GDP 值;  $q_{GDP}$  为单位 GDP 用水强度;  $W_s$  为供水总量。拟合结果的  $R^2$  为 0.998, 五折交叉验证的  $R^2$  为 0.998、 $F$  值为  $2.719 \times 10^6$ , 表明回归方程对 2002—2023 年贵阳市 WEF 时序演化具有极高的解释力与泛化能力。残差近似服从正态分布 (Jarque-Bera 检验值为

0.0769), Durbin-Watson 值为 1.290, 表明残差序列不存在严重的一阶自相关, 模型拟合结果稳健可靠。

表1为贵阳市 WEF 驱动因素多元逐步回归分析结果。由表1可见, 供水总量是对贵阳市 WEF 影响最显著的正向因子 ( $p < 0.001$ ), 说明水资源供给的增加直接推动了水生态足迹的扩大。单位 GDP 用水强度与 WEF 呈显著负相关关系 ( $p = 0.017$ ), 表明节水技术进步和效率提升对缓解水资源消耗具有显著作用。GDP 变量的回归系数虽为负, 但未通过显著性检验 ( $p = 0.107$ ), 显示经济增长对 WEF 的边际影响有限, 但其方向与“提高效率促进水足迹下降”的趋势一致。同时, 各驱动因素的  $V_{IF}$  值均小于 4, 排除了显著多重共线性风险。总体来看, 该回归方程能够较好地刻画 2002—2023 年贵阳市 WEF 的演变特征, 并揭示了供水能力与技术进步在驱动机制中的主导作用。

### 3.3 模型拟合效果评价

选取均方根误差 (RMSE) 和纳什效率系数 (NSE) 作为评价 ARIMA-XGBoost 组合预测模型的拟合效果的指标, 以 2002—2020 年数据作为训练集, 2021—2023 年数据作为验证集。在全样本期 (2002—2023 年), 组合预测模型的 RMSE 为 10.32, NSE 为 0.75, 表明组合预测模型在小样本条件下能够有效捕捉 WEF 的历史变化趋势, 并展现出较好的预测性能。本文以全样本期内拟合残差的方差作为误差参考量  $\sigma_e^2$ , 据此绘制累计预测误差方差-预测步长的曲线。结果显示, 在预测步长  $h$  为 1~5 a, 累计预测误差方差最大为 113.7, 低于  $1.5\sigma_e^2$  (158.5) 的控制阈值, 表明组合预测模型在短、中期具有良好的误差控制与稳定性。模型预测期设为 2024—2028 年, 在保障预测精度的同时兼顾误差控制与政策制定的实际适用性。

### 3.4 适应性管理路径评估

为应对城市水资源管理中的不确定性并提升管理策略的前瞻性与韧性, 本文设定 3 种政策情景: 实施节水政策、维持现状、经济发展优先。为刻画社会经济系统的不确定性, 对 GDP 增长率和单位 GDP 用水强度引入  $\pm 5\%$  的正态扰动, 通过蒙特卡洛方法生成未来变量组合。同时, 为提高模型输出的现实性, 在 ARIMA-XGBoost 组合模型的残差部分叠加均

表1 贵阳市 WEF 驱动因素多元逐步回归分析结果

Table 1 Results of multiple stepwise regression analysis of WEF driving factors in Guiyang City

驱动因素	回归系数	标准误差	$t$ 值	$p$ 值	95%置信区间	$V_{IF}$
GDP	-0.0146	0.008	-1.755	0.107	[-0.033, 0.004]	3.652
单位 GDP 用水强度	-0.0224	0.008	-2.799	0.017	[-0.040, -0.005]	3.368
供水总量	7.0843	0.006	1236.1	<0.001	[7.072, 7.097]	1.735

值为0、标准差为1的高斯噪声,以模拟系统性误差与环境扰动效应。结合历史数据和规划资料确定不同的GDP增长率、单位GDP用水强度和模拟扰动,构成3种管理路径:节水路径(S1)、维持现状路径(S2)、经济优先路径(S3),如表2所示。

参考《贵阳市水资源综合规划报告》,丰水年、平水年、枯水年的发生频率分别设为28.4%、47.8%、23.8%,对应的供水总量分别为11.45亿、11.16亿、10.80亿 $m^3$ 。基于ARIMA-XGBoost组合预测模型,对2024—2028年贵阳市3种管理路径下不同水文年的WEF进行模拟,并计算 $R_T$ 、 $R_C$ 、 $C_v$  3

个指标值。结合贵阳市水资源现状,确定 $R_T$ 、 $R_C$ 、 $C_v$ 的权重分别为0.30、0.15、0.55,从而得到2024—2028年贵阳市WEF预测区间及管理路径评估结果,如表3所示。由表3可见,3种管理路径下的WEF在潜在风险方面从小到大依次为S1、S2、S3;另外,3种管理路径的 $C_v$ 值接近,但S1的 $R_C$ 显著低于S2、S3路径且 $R_T$ 最小,说明在多数情况下S1为最优管理路径,在极端年份抗风险能力最强。在韧性管理优先的政策导向下,S1的TOPSIS贴近度最高,因此S1为2024—2028年贵阳市的推荐管理路径。

表2 政策情景设置

Table 2 Policy scenario setup

管理路径	政策情景	$r/\%$	$q_{GDP}/(m^3/元)$	模拟扰动设定
S1	实施节水政策	5.5	17.0	$r \sim N(\hat{r}, 0.05\hat{r}), q \sim N(\hat{q}, 0.05\hat{q}), \epsilon_i \sim N(0, 1)$
S2	维持现状	6.0	17.5	$r \sim N\hat{r}, 0.05\hat{r}, q \sim N(\hat{q}, 0.05\hat{q}), \epsilon_i \sim N(0, 1)$
S3	经济发展优先	6.5	18.0	$r \sim N(\hat{r}, 0.05\hat{r}), q \sim N(\hat{q}, 0.05\hat{q}), \epsilon_i \sim N(0, 1)$

注: $r$ 为GDP增长率, $\hat{r}$ 为上一年度GDP增长率, $\hat{q}$ 为上一年度单位GDP用水强度。

表3 2024—2028年贵阳市WEF预测区间及管理路径评估结果

Table 3 2024-2028 Guiyang WEF prediction interval and management path assessment results

管理路径	WEF预测区间/万 $hm^2$					评价指标			TOPSIS贴近度
	2024年	2025年	2026年	2027年	2028年	$R_T$	$R_C$	$C_v$	
S1	[195.6, 201.4]	[197.0, 202.7]	[197.8, 203.6]	[198.3, 204.0]	[198.7, 204.3]	204.6	0.000	0.005 03	0.951
S2	[196.4, 202.3]	[197.8, 203.6]	[198.6, 204.4]	[199.1, 204.8]	[199.5, 205.2]	205.5	0.875	0.005 15	0.510
S3	[197.2, 203.2]	[198.6, 204.4]	[199.3, 205.3]	[199.8, 205.7]	[200.3, 206.1]	206.4	1.775	0.005 27	0.051

### 3.5 讨论

结合LMDI分解与多元逐步回归的结果来看,贵阳市WEF的驱动演化主要由经济扩张、供给规模、效率进步三者的动态博弈结果主导。经济效应在LMDI分解结果中长期为正,表明经济扩张对用水需求的持续拉动<sup>[33]</sup>;而多元逐步回归结果将供水总量识别为最显著正向驱动因素,说明“经济增长—供给扩张—需求释放—WEF上升”这一传导路径成立,LMDI分解与多元逐步回归形成交叉佐证。技术进步的抑制效应在LMDI与多元逐步回归结果中均得到了验证:LMDI分解中技术效应多为负,多元逐步回归结果则显示单位GDP用水强度与WEF呈显著负相关关系,表明用水效率提升能够有效对冲经济扩张所带来的用水压力。但这一抑制效应具有阶段性,当供给扩张与用水需求上行叠加时,总量效应会部分抵消节水成效<sup>[34-35]</sup>。此时,必须配合实行产业结构调整与水价、水权等需求侧约束,技术进步才能体现为WEF的实质回落。人口效应在LMDI分解中贡献较小且未在多元逐步回归中形成稳健显著项,结构效应在多数年份接近0,未呈现稳定驱动或抑制作用。但在WEC较低的年份或枯水年份,人口规模仍可能压缩水生态盈余空间、放大系统脆弱性,届时需要通过弹性配水与应急预案加以对冲。

综合LMDI分解与多元逐步回归结果,技术效应对抑制贵阳市WEF的增长发挥了重要作用。从政策情景模拟结果来看,节水路径是贵阳市的推荐适应性管理路径。未来贵阳市水资源管理宜以节水路径为基础,结合产业结构优化和非常规水资源利用,形成“强化型节水+结构调整”的复合发展模式,同时引入降低系统波动性的调控机制,以在控制水生态足迹增长的同时增强系统韧性,实现水资源安全与经济发展的动态平衡。在政策制定上应着眼于:①持续加大对节水技术、水循环利用技术等研发投入与推广应用,确保技术效应能持续、稳定地发挥核心抑制作用,对冲经济增长带来的水资源短缺压力;②深入分析技术效应出现波动的年份,汲取经验防范技术瓶颈,加快产业结构绿色升级,并逐步淘汰落后高耗水产能,促使产业结构优化发挥对抑制WEF增长的作用;③结合人口发展趋势,进一步提升水资源管理水平,倡导全社会形成节水型的生产生活方式,使人口效应能更稳定地发挥积极作用。

## 4 结论

a. 构建了涵盖现状评估、机制解释、趋势预测、路径评估的水生态足迹综合评估框架,应用于贵阳市,结果表明2002—2023年贵阳市WEF整体呈现

波动下降态势,但 WEFD 始终大于 1,表明城市长期依赖存量水资源维系供给,存在潜在生态风险。

**b.** LMDI 分解与多元逐步回归分析结果共同表明,经济扩张是驱动贵阳市 WEF 增长的首要因素,而技术进步带来的用水效率提升是抑制其增长的核心力量。其中,供水总量的变化被识别为影响 WEF 最显著的直接驱动因素,验证了供给与需求之间的传导路径在城市水资源消耗过程中的主导作用。

**c.** 从趋势预测与路径评估来看,构建的 ARIMA-XGBoost 组合预测模型在小样本条件下表现出较高的拟合精度与稳定性,适用于贵阳市 WEF 的中短期预测。该模型的蒙特卡洛情景模拟与 AHP-TOPSIS 评估结果表明节水路径是保障贵阳市水资源安全的最优管理路径。

## 参考文献:

- [ 1 ] 游进军,贾玲,杨朝晖,等. 协调公平与效率的“四水四定”研究 I:方法与模型[J]. 水利学报,2024,55(2):158-166. (You Jinjun, Jia Ling, Yang Zhaohui, et al. Study on “water dominates development” based on equity and efficiency I: methodology and model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55 (2): 158-166. (in Chinese))
- [ 2 ] 左其亭,张志卓,马军霞. 竞争性用水问题本质及解决途径与方法[J]. 水资源保护,2025,41(1):1-8. (Zuo Qiting, Zhang Zhizhuo, Ma Junxia. Essence, resolutions, and dealing methods of competitive water use issues[J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (1): 1-8. (in Chinese))
- [ 3 ] 成琨,王子欣,孙楠. 国内外水资源价值与价格研究综述[J]. 水利经济,2024,42(4):7-13. (Cheng Kun, Wang Zixin, Sun Nan. Review of domestic and international research on the value and price of water resources[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024,42(4):7-13. (in Chinese))
- [ 4 ] 王若禹,赵志轩,黄昌硕,等.“四水四定”水资源管控理论研究进展[J]. 水资源保护,2023,39(4):111-117. (Wang Ruoyu, Zhao Zhixuan, Huang Changshuo, et al. Research progress on water resources management theory of “basing four aspects on water resources” [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (4): 111-117. (in Chinese))
- [ 5 ] Fan Yupeng, Qiao Qi, Xian Chaofan, et al. A modified ecological footprint method to evaluate environmental impacts of industrial parks [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 125:293-299.
- [ 6 ] Guo Jing, Wei Zhen, Xie Xianrong, et al. Dynamic change and driving force of natural capital in Qinghai province based on the three-dimensional ecological footprint, China

- [J]. Ecological Indicators, 2022, 145: 109673.
- [ 7 ] Li Donglin, Zuo Qiting, Jiang Long, et al. An integrated analysis framework for water resources sustainability considering fairness and decoupling based on the water resources ecological footprint model: a case study of Xinjiang, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 383:135466.
- [ 8 ] 许锴,陈东景. 基于水足迹的水资源利用与经济高质量发展脱钩关系研究[J]. 水利经济,2024,42(5):20-27. (Xu Nuo, Chen Dongjing. Research on decoupling relationship between water resource utilization and high-quality economic development based on water footprint [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42 (5):20-27. (in Chinese))
- [ 9 ] 王艳秋,翟英南,江禹薇,等. 东北三省能源-粮食水足迹与水资源空间匹配研究[J]. 水利经济,2025,43(2):59-66. (Wang Yanqiu, Zhai Yingnan, Jiang Yuwei, et al. Research on the spatial matching of energy-food water footprint and water resources in the three provinces of Northeast China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43 (2): 59-66. (in Chinese))
- [ 10 ] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: economics from an ecological footprint perspective [J]. Ecological Economics, 1997, 20(1):3-24.
- [ 11 ] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, et al. How deep is the footprint?: a 3D representation [J]. Ecological Modelling, 2009, 220(20):2819-2823.
- [ 12 ] Niccolucci V, Galli A, Reed A, et al. Towards a 3D national ecological footprint geography [J]. Ecological Modelling, 2011, 222(16):2939-2944.
- [ 13 ] 郝帅,孙才志,宋强敏. 基于 ESTDA 模型的中国水生态足迹及水生态压力评价[J]. 生态学报,2021,41(12):4651-4662. (Hao Shuai, Sun Caizhi, Song Qiangmin. Evaluation of water ecological footprint and water ecological pressure based on ESTDA model in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (12): 4651-4662. (in Chinese))
- [ 14 ] Mancini M S, Galli A, Niccolucci V, et al. Stocks and flows of natural capital: implications for ecological footprint [J]. Ecological Indicators, 2017, 77: 123-128.
- [ 15 ] Jin Kexin, Zhang Sen, Yang Yalin, et al. Evaluation of water-carbon-ecological footprints and its spatial-temporal pattern in the central plains urban agglomeration [J]. Ecological Indicators, 2023, 155:110982.
- [ 16 ] Tuoku Lina, Men Baohui. Evaluation of water resource use efficiency in Beijing-Tianjin-Hebei based on three-dimensional water ecological footprint [J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110884.
- [ 17 ] Lai Zhicheng, Li Lei, Huang Min, et al. Spatiotemporal evolution and decoupling effects of sustainable water

- resources utilization in the Yellow River Basin: based on three-dimensional water ecological footprint[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 366: 121846.
- [18] Jiang Ruirui, Fei Liangjun, Kang Shouxuan. Analysis and prediction of urban agglomeration ecological footprint based on improved three-dimensional ecological footprint and shared socioeconomic pathways [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170: 113079.
- [19] Wu Jie, Yu Haozhe, Cao Ning, et al. Ecological footprint analysis as a tool for advancing sustainable development goals (SDGs): evidence from China [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 176: 113653.
- [20] Zhang Tengxu, Wang Zhuohao, Huang Liangke, et al. A novel XGBoost-based approach for reconstruction terrestrial water storage variations with GNSS in the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 659: 133255.
- [21] Niazkar M, Menapace A, Brentan B, et al. Applications of XGBoost in water resources engineering: a systematic literature review (Dec. 2018-May 2023) [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2024, 174: 105971.
- [22] 李嘉欣, 彭少明, 朱永楠, 等. 基于能值理论的河南省三维水生态足迹评价与预测[J]. *人民黄河*, 2023, 45(12): 76-82. (Li Jiaxin, Peng Shaoming, Zhu Yongnan, et al. Evaluation and prediction of three-dimensional water ecological footprint in Henan province based on energy theory [J]. *Yellow River*, 2023, 45(12): 76-82. (in Chinese))
- [23] 邓锦山, 叶生进, 徐志芬, 等. 川东南水资源生态足迹及生态承载力时空分析研究[J]. *中国农村水利水电*, 2023(4): 125-133. (Deng Jinshan, Ye Shengjin, Xu Zhifen, et al. Spatial and temporal analysis of ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Southeast Sichuan [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(4): 125-133. (in Chinese))
- [24] 阳君, 肖作林, 徐伟峰. 基于LMDI模型的四川盆地作物水足迹时空演变及驱动因素分析[J]. *水资源保护*, 2025, 41(1): 160-169. (Yang Jun, Xiao Zuolin, Xu Weifeng. Analysis of spatiotemporal evolution and driving factors of crop water footprint in the Sichuan Basin based on LMDI model [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(1): 160-169. (in Chinese))
- [25] Gou Sheng, Gao Cheng, Zhao Guozheng, et al. Research on combined prediction model based on BP neural network model and multiple regression analysis model [J]. *Procedia Computer Science*, 2025, 262: 785-794.
- [26] Phan T T H, Nguyen X H. Combining statistical machine learning models with ARIMA for water level forecasting: the case of the Red River [J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 142: 103656.
- [27] Siddique M A B, Mahalder B, Haque M M, et al. Forecasting air temperature and rainfall in Mymensingh, Bangladesh with ARIMA: implications for aquaculture management [J]. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 2025, 51(3): 294-303.
- [28] Muñoz-Rodríguez D, González-Ortega M J, Aguilera-Ureña M J, et al. Innovation ARIMA models application to predict pressure variations in water supply networks with open-loop control. Case study in Noja (Cantabria, Spain) [J]. *Energy Nexus*, 2025, 18: 100423.
- [29] 陈星, 沈紫菡, 许钦, 等. 陕西省月用水量预测方法研究[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(1): 73-78. (Chen Xing, Shen Zihan, Xu Qin, et al. Research on monthly water consumption prediction methods in Shaanxi Province [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(1): 73-78. (in Chinese))
- [30] Singh S, Parmar K S, Kumar J. Development of multi-forecasting model using Monte Carlo simulation coupled with wavelet denoising-ARIMA model [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2025, 230: 517-540.
- [31] Wang Liping, Chen Longjun, Jin Shucen, et al. Forecasting the green behaviour level of Chinese enterprises: a conjoined application of the autoregressive integrated moving average (ARIMA) model and multi-scenario simulation [J]. *Technology in Society*, 2025, 81: 102825.
- [32] 李少朋, 赵衡, 王富强, 等. 基于AHP-TOPSIS模型的江苏省水资源承载力评价[J]. *水资源保护*, 2021, 37(3): 20-25. (Li Shaopeng, Zhao Heng, Wang Fuqiang, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu province based on AHP-TOPSIS model [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(3): 20-25. (in Chinese))
- [33] 张义, 邹永福, 李丰生, 等. 基于灰色神经网络模型的水资源生态足迹预测: 以广西为例[J]. *人民长江*, 2017, 48(1): 37-42. (Zhang Yi, Zou Yongfu, Li Fengsheng, et al. Prediction of water resources ecological footprint based on grey neural network model: a case study of Guangxi [J]. *Yangtze River*, 2017, 48(1): 37-42. (in Chinese))
- [34] 贾璐璐, 于国荣, 张代青, 等. 基于改进灰色模型的河南省水生态足迹分析与预测[J]. *水力发电*, 2022, 48(3): 5-9. (Jia Lulu, Yu Guorong, Zhang Daiqing, et al. Analysis and prediction of water ecological footprint in Henan province based on improved grey model [J]. *Water Power*, 2022, 48(3): 5-9. (in Chinese))
- [35] 宾零陵, 蒋睿文, 曹永强, 等. 京津冀水资源生态足迹动态变化与预测[J]. *水资源保护*, 2023, 39(5): 32-38. (Bin Lingling, Jiang Ruiwen, Cao Yongqiang, et al. Dynamic change and prediction of ecological footprint of water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(5): 32-38. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-08-23 编辑: 王芳)