

数据短缺条件下基于概率密度函数优化的LX河生态水位核定研究

赵延杰¹, 万永智²

¹优艺(聊城)水处理有限公司, 山东 聊城

²江苏省水文水资源勘测局徐州分局, 江苏 徐州

收稿日期: 2026年4月21日; 录用日期: 2026年5月25日; 发布日期: 2026年6月10日

摘要

针对中小河流水位监测数据短缺导致生态水位核定不确定性突出的问题, 本文以LX河为研究对象, 提出了一种基于概率密度函数的年保证率设定法增强方法。以MZ闸为控制断面, 基于2018~2021年有限日均水位数据, 采用皮尔逊III型、Weibull、广义极值、Burr及t位置尺度分布等5种函数进行拟合优度比选, 识别最优分布函数以扩充样本代表性, 进而以75%年保证率推求生态水位。同时利用曲线相关法建立水位-NDVI响应关系进行对比分析。结果表明, Burr分布拟合优度最佳(0.9814), 据此计算生态水位为28.10 m, 较曲线相关法($R^2 < 0.7$)更具可靠性, 最终核定LX河生态水位为28.10 m。研究可为水位监测数据短缺情况下中小河流生态水位的计算提供方法借鉴。

关键词

生态水位, 年保证率设定法, 曲线相关法, 概率分布拟合, NDVI

Research on Ecological Water Level Determination of LX River Based on Probability Density Function Optimization under Data Shortage Conditions

Yanjie Zhao¹, Yongzhi Wan²

¹Youyi (Liaocheng) Water Treatment Co., Ltd., Liaocheng Shandong

²Xuzhou Branch of Jiangsu Provincial Hydrological and Water Resources Survey Bureau, Xuzhou Jiangsu

Received: April 21, 2026; accepted: May 25, 2026; published: June 10, 2026

Abstract

Addressing the significant uncertainty in ecological water level determination due to the scarcity of water level monitoring data for small and medium-sized rivers, this paper takes the LX River as the research object and proposes an enhanced method based on the annual guarantee rate setting method using probability density function. Using the MZ sluice gate as the control section, and based on limited daily average water level data from 2018 to 2021, five functions—Pearson Type III, Weibull, generalized extreme value, Burr, and t-location scale distribution—were used for goodness-of-fit comparison. The optimal distribution function was identified to expand the representativeness of the sample, and then the ecological water level was estimated with a 75% annual guarantee rate. Simultaneously, the water level-NDVI response relationship was established using the curve correlation method for comparative analysis. The results showed that the Burr distribution had the best fit (0.9814), and the calculated ecological water level was 28.10 m, which was more reliable than the curve correlation method ($R^2 < 0.7$). The final ecological water level of the LX River was determined to be 28.10 m. This study can provide a methodological reference for calculating the ecological water level of small and medium-sized rivers when water level monitoring data is scarce.

Keywords

Ecological Water Level, Annual Guarantee Rate Setting Method, Curve Correlation Method, Probability Distribution Fitting, NDVI

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

河流生态系统是维持维系江河湖库生态系统的基本要素[1][2],其水文节律作为驱动生物地球化学循环与生态过程的核心要素,直接影响着水生生物栖息地完整性、水体自净能力及河岸带植被演替。近年来,受气候变化叠加高强度人类活动的双重胁迫,我国北方诸多河流径流过程变异显著,生态基流保障不足引发的河道萎缩、湿地退化、生物多样性锐减等问题日益凸显[3][4]。生态水位作为维系河流生态系统结构与功能完整性的临界水文阈值,已成为流域水资源优化配置与生态调度实践中亟待厘定的基础科学参数。

目前,有关生态水位确定的方法主要有水文学评价法,水力学评价法,栖息地评价法及功能法等[5][6]。然而,单一方法计算结果往往因理论假设局限及生态目标差异而存在不确定性,难以满足复杂河流系统精准化管理需求。因此,构建多方法交叉验证、多准则综合决策的生态水位计算范式,对于提升生态流量保障的科学性与可靠性具有重要的理论价值与实践意义[7]。

特别需要指出的是,我国数量众多的中小河流普遍面临水位监测数据序列短、频次低、代表性不足的现实困境,传统年保证率设定法直接依赖有限样本进行经验频率计算,易导致设计保证率对应水位值的抽样误差与代表性失真,计算结果稳健性受限。针对这一瓶颈,引入概率密度函数拟合技术对稀缺监测数据进行分布特征重构与信息延展,通过最优分布函数识别与理论频率替换,有效削弱样本随机性影响,可显著提升年保证率设定法在数据短缺条件下的鲁棒性与科学性。

为此, 本文以某市 LX 河为例, 提出一种数据稀缺条件下基于概率密度函数的年保证率设定法改进思路, 并与曲线相关法进行交叉对比, 综合确定生态水位推荐值, 以期为中小河流生态需水计算提供可推广的方法范式。

2. 河流概况及控制断面

LX 河属奎濰河水系, 河道全长 15.3 km, 是区域内水资源调配与防洪排涝的骨干河道。该工程体系通过拦蓄流域内地面径流并耦合废黄河跨流域引水, 构建起以农业灌溉为主、兼具行洪除涝功能的复合型水网通道。该河段主要生态保护对象为河岸带芦苇湿地群落及挺水-浮叶植物复合生态系统, 兼具鱼类产卵场与鸟类栖息地的生态服务功能。

按照《水利部关于做好河湖生态流量确定和保障工作的指导意见》¹(水资管〔2020〕67号), 河湖生态流量控制断面的确定, 应根据河湖生态保护对象, 选择跨行政区断面、把口断面(入海、入干流、入尾间)、重要生态敏感区控制断面、主要控制性水利工程断面等作为河湖生态流量控制断面。MZ 闸是 LX 河流的主要水文控制断面, 因此以 MZ 闸断面监测数据作为生态水位计算的主要依据。2019~2021 年 MZ 闸水位变化曲线如图 1。

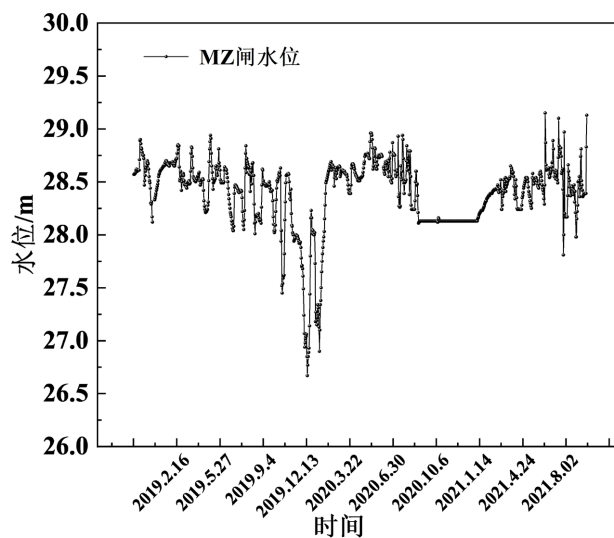


Figure 1. Water level variation curve of MZ sluice gate
图 1. MZ 闸水位变化曲线

3. 计算方法

3.1. 年保证率法

年保证率设定法最初由杨志峰等人针对河流最大允许废水排放量而提出, 其具体步骤和计算方法如下:

- (1) 根据系列水文资料对各月天然径流量进行排序;
- (2) 根据适宜的保证率(通常取 75%) [6], 求得该保证率所对应的水文年并计算当年月平均水位。

由于受水文资料数量和质量的限制, 为增强求解结果的可靠性与科学性, 往往需要先拟合水文资料的概率密度函数。目前具有较好适应性的概率分布函数主要包括皮尔逊III型分布、Weibull 分布、广义极

¹http://www.mwr.gov.cn/zw/zcjd/xgwj/202510/t20251001_2035381.html

值分布、Burr 分布以及 t 位置尺度分布。5 种分布的概率密度函数, 累积分布函数以及互补累积分布函数如下:

① 皮尔逊III型分布

皮尔逊III型分布的概率密度函数为: $f(x|a,b) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{-\frac{x}{b}}$, 其中 a 为形状参数, b 为尺度参数,

$\Gamma(a)$ 表示 Gamma 函数;

皮尔逊III型累积分布函数为: $F(x) = \Pr(X \leq x) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} \int_0^x t^{a-1} e^{-\frac{t}{b}} dt$;

皮尔逊III型互补累积分布函数为: $H(x) = \Pr(X \geq x) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} \int_x^{+\infty} t^{a-1} e^{-\frac{t}{b}} dt$ 。

② Weibull 分布

Weibull 分布的概率密度函数为: $f(x|a,b) = abx^{a-1} e^{-bx^a}$, 其中 a 为形状参数, b 为尺度参数。

Weibull 分布的累积分布函数为: $F(x) = \Pr(X \leq x) = 1 - e^{-bx^a}$;

Weibull 分布的互补累积分布函数为: $H(x) = \Pr(X \geq x) = e^{-bx^a}$ 。

③ 广义极值分布

广义极值分布的概率密度函数为: $f(x|a,b,\mu) = \frac{1}{b} \left[1 + a \left(\frac{x-\mu}{b} \right) \right]^{-\frac{a+1}{a}} \exp \left\{ - \left[1 + a \left(\frac{x-\mu}{b} \right) \right]^{-\frac{1}{a}} \right\}$, 其中 a

为形状参数, b 为尺度参数, μ 为位置参数;

广义极值分布的累积分布函数为 $F(x) = \Pr(X \leq x) = \exp \left\{ - \left[1 + a \left(\frac{x-\mu}{b} \right) \right]^{-\frac{1}{a}} \right\}$;

广义极值分布的互补累积分布函数为

$$H(x) = \Pr(X \geq x) = 1 - \Pr(X \leq x) = 1 - \exp \left\{ - \left[1 + a \left(\frac{x-\mu}{b} \right) \right]^{-\frac{1}{a}} \right\}。$$

④ Burr 分布

Burr 分布概率密度函数为: $f(x|a,b,c) = \frac{kb \left(\frac{x}{a} \right)^{b-1}}{\left[1 + \left(\frac{x}{a} \right)^b \right]^{c+1}}$, 其中 a 为尺度参数, b 为第一形状参数, c

为第二形状参数;

Burr 分布的累积频率函数为: $F(x) = \Pr(X \leq x) = 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{x}{a} \right)^b \right]^c}$;

Burr 分布的互补累积频率函数为: $H(x) = \Pr(X \geq x) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{x}{a} \right)^b \right]^c}$ 。

⑤ t 位置尺度分布

t 位置尺度分布的概率密度函数为 $f(x|a,b,\mu) = \frac{\Gamma\left(\frac{a+1}{2}\right)}{b\sqrt{a\pi}\Gamma\left(\frac{a}{2}\right)} \left[\frac{a + \left(\frac{x-\mu}{b}\right)^2}{a} \right]^{-\frac{a+1}{2}}$, 其中 a 为形状参数,

b 为尺度参数, μ 为位置参数, $\Gamma\left(\frac{a+1}{2}\right)$ 和 $\Gamma\left(\frac{a}{2}\right)$ 表示 Gamma 函数;

t 位置尺度分布的累积频率函数为:

$$F(x) = \Pr(X \leq x) = \frac{\Gamma\left(\frac{a+1}{2}\right)}{b\sqrt{a\pi}\Gamma\left(\frac{a}{2}\right)} \int_0^x \left[\frac{a + \left(\frac{t-\mu}{b}\right)^2}{a} \right]^{-\frac{a+1}{2}} dt;$$

t 位置尺度分布的互补累积频率函数为: $H(x) = \Pr(X \geq x) = 1 - \frac{\Gamma\left(\frac{a+1}{2}\right)}{b\sqrt{a\pi}\Gamma\left(\frac{a}{2}\right)} \int_0^x \left[\frac{a + \left(\frac{t-\mu}{b}\right)^2}{a} \right]^{-\frac{a+1}{2}} dt$ 。

3.2. 曲线相关法

曲线相关法认为生态系统指标和湖泊水位之间具有内在的相关性, 最低生态水位为生态功能指标对水位变化最为敏感的点, 可以通过计算河流湖泊生态功能与水位拟合曲线的拐点得到。对于季节性河流可看作是小型湖泊。芦苇湿地是小型湖泊最主要的生态景观, 可以用归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)作为量化指标。NDVI 与植物的光能利用率、叶面积指数、绿色植物生物量、干物质累积和年净初级生产力等都有着显著的相关性, 被广泛用于植被覆盖度、湿地净初级生产力等研究中。因此, 可以认为使用 NDVI 作为湿地生态功能指示指标是合理的。

NDVI 数据来源于美国 NASA (<https://earthdata.nasa.gov/>) 的 MODIS 植被指数产品数据 MOD13Q1。数据空间分辨率为 250 m, 时间分辨率为 16 d。在生成植被指数格点资料时, 考虑了分子散射、臭氧吸收、气溶胶订正算法。NDVI 可表示为:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$$

式中: NIR 和 R 分别为 TM 的近红外波段(波段 4)和红光波段(波段 3)的 DN 值。为了与 LX 河流水位资料对应, 选用时间跨度为 2018 年 11 月至 2021 年 9 月的遥感影像数据来计算不同年份生长季的 NDVI 平均值。

利用 NDVI 确定最低生态水位的步骤如下:

- ① 利用 MATLAB 软件对 NDVI 与河流水位之间的关系进行多项式拟合;
- ② 求取多项式的二阶导数, 令其=0, 其结果可被视为生态水位。

4. 生态水位计算及确定

4.1. 生态水位的计算

4.1.1. 年保证率设定法

基于日均水位数据, 运用 5 种概率分布进行统计分析(表 1), 日均水位数据比较服从 Burr 分布, 此时拟合优度 $R^2 = 0.9814$ 。根据日均水位数据运用最大似然估计法得到尺度参数 $a = 29.1205$, 第一形状参

数 $b = 123.2543$, 第二形状参数 $c = 13.3207$ 。根据日均水位数据拟合得到 Burr 分布的概率密度函数曲线及其互补累积频率曲线(图 2)。在保证率 75%下, LX 河 MZ 闸上最低生态水位为 28.10 米。

Table 1. Goodness of fit of the five probability distributions
表 1. 5 种概率分布的拟合优度

概率分布	R^2
皮尔逊III型分布	0.9308
Weibull 分布	0.9656
广义极值分布	0.9435
Burr 分布	0.9814
t 位置尺度分布	0.9787

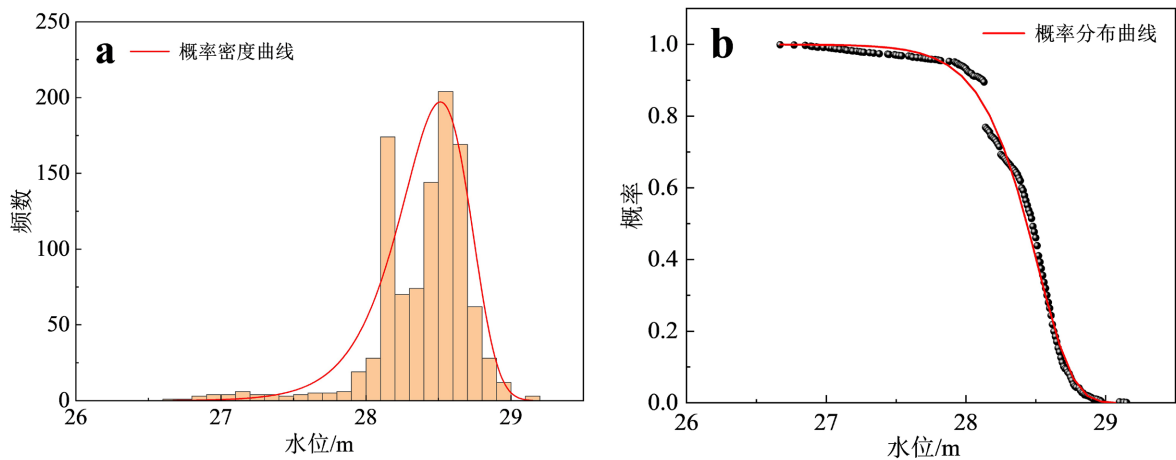


Figure 2. Probability density curve (a) and complementary cumulative distribution curve (b) of water level data at MZ sluice gate

图 2. MZ 闸水位数据概率密度曲线 (a) 及互补累积分布曲线 (b)

4.1.2. 曲线相关法

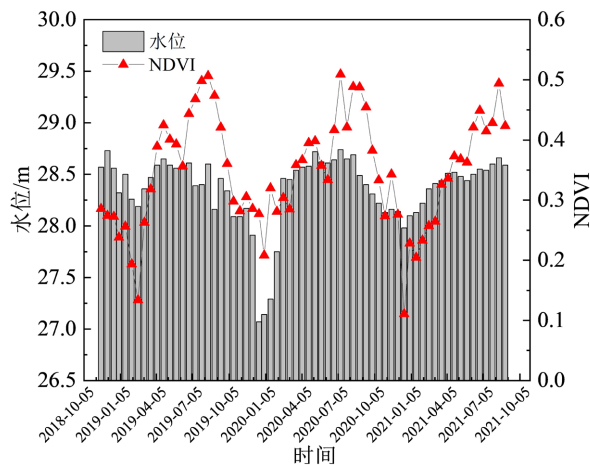


Figure 3. Changes in water level and NDVI at MZ sluice gate over time
图 3. MZ 闸水位与 NDVI 随时间的变化

绘制 NDVI 与水位之间的相关变化曲线(图 3), NDVI 与水位之间存在同步变化的趋势, 表明 NDVI 与季节及降水存在显著相关性。将 LX 河 MZ 闸 2018 年 12 月至 2021 年 8 月的月均水位及其对应的 NDVI 分成丰水期数据与枯水期数据。丰水期内月均水位(x)与对应的 NDVI (y)的散点关系如图 4, 并采用 3 次多项式拟合, 得到 $y = -9.5112x^3 + 8.1410 \times 10^2 x^2 - 2.3235 \times 10^4 x + 2.2085 \times 10^5$, 此时 $R^2 = 0.5061$ 。令 $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$, 得到最低生态水位为 28.53 m。

同理, 得到枯水期内月均水位与 NDVI 的关系: $y = -0.0488x^3 + 4.1350x^2 - 1.1666 \times 10^2 x + 1.0971 \times 10^3$, 此时 $R^2 = 0.6741$ 。令 $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$, 得到最低生态水位为 28.23 m。

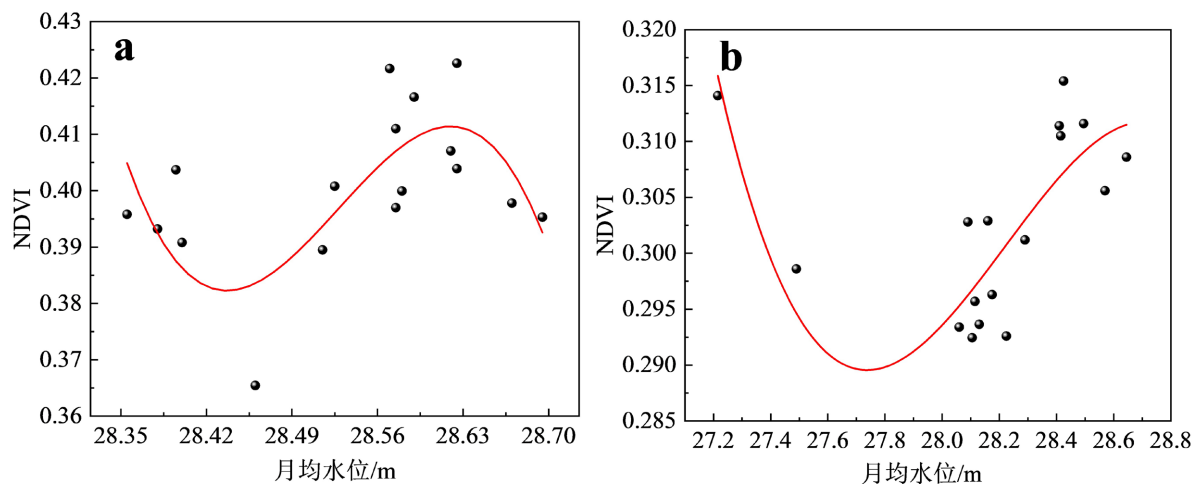


Figure 4. Fitting curves of water level and NDVI during the high-water season (a) and the low-water season (b)

图 4. 丰水期 (a) 与枯水期 (b) 水位与 NDVI 的拟合曲线

4.2. 生态水位的确定

NDVI-水位拟合曲线二阶导数为零处的拐点, 在生态学上表征湿地植被由水分胁迫限制转向非水分因素限制的临界转换阈值, 即该水位下植被覆盖度对水位变化的响应速率最大, 低于此阈值则植被光合作用与生物量累积的边际效益急剧递减。然而, 本研究采用的 MODIS NDVI 数据空间分辨率仅为 250 m, 远大于 LX 河河道宽度, 存在显著的混合像元效应, 单个像元涵盖河道水面、河岸带湿地及相邻农田等多种地物, 导致 NDVI 信号对河道水位变化的灵敏度被稀释, 且 16 d 的时间分辨率难以捕捉水位骤变引发的植被快速响应。因此, 曲线相关法结果($R^2 < 0.7$)的可靠性受限, 未来建议采用 Sentinel-2 (10 m 分辨率)或无人机遥感提升空间精度, 或引入增强型植被指数(EVI)等抗饱和性更强的指标优化生态水位识别。

Table 2. Selection of ecological water level target values for the LX River

表 2. LX 河生态水位目标值的选用

				单位: m
方法	年保证率设定法	曲线相关法		采用值
生态水位	28.10	丰水期	28.53	28.10
		枯水期	28.23	

由表 2 可知, 采用年保证率设定法和曲线相关法得到的生态水位值相差不大。年保证率设定法充分

考虑了河流的水文变化, 曲线相关法虽然考虑到了河流的生态功能, 但是未体现了河流的水文条件, 且决定系数 R^2 均小于 0.7。因此, 年保证率设定法计算的生态水位较曲线相关法更可靠, 综合判定 LX 河的生态水位为 28.10 m。

受监测资料序列长度限制(2018~2021 年有效日均水位数据不足 5 年), 当前生态水位计算成果存在显著的不确定性。首先, 短序列样本难以充分涵盖水文周期的丰枯极值变异, Burr 分布参数估计的抽样误差可能导致 75%保证率对应水位值的系统性偏移; 其次, 有限样本条件下, 分布函数的选择敏感性被放大, 尽管本研究通过 5 种函数的拟合优度比选确定了最优模型, 但不同分布在尾部概率估计上的理论差异仍构成模型结构不确定性; 此外, 基于 4 年数据外延推求长序列水文特征, 隐含了平稳性假设, 未考虑气候变化背景下水文节律的非平稳演变风险。因此, 28.10 m 的核定值应视为数据约束条件下的最优估计而非确定性真值, 未来需持续延长水位观测序列至 20 年以上, 并同步开展鱼类产卵场、湿地植被群落等生态要素的跟踪监测, 通过多源信息融合逐步修正与收敛生态水位阈值, 以提升结果的长系列代表性与生态目标契合度。

5. 结论

(1) 针对中小河流水位监测数据短缺的现状, 引入概率密度函数拟合技术对年保证率设定法进行优化改进, 通过 Burr 分布函数拟合有效延展了样本信息维度。该方法显著提升了数据稀缺条件下生态水位计算结果的稳健性, 为类似数据受限区域的生态需水核算提供了可推广的技术范式。

(2) LX 河 MZ 闸断面基于 75%保证率确定的生态水位为 28.10 m, 该值与曲线相关法计算结果(丰水期 28.53 m、枯水期 28.23 m)具有良好一致性, 但鉴于曲线相关法拟合优度偏低($R^2 < 0.7$)且未能充分反映水文节律变异特征, 综合判定年保证率设定法结果更可靠, 推荐作为 LX 河生态调度与水资源管控的基准阈值。

(3) 受监测资料系列长度限制(不足 5 年), 当前计算成果存在一定不确定性, 未来需持续延长水位观测序列并同步开展鱼类栖息地等生态要素监测, 以进一步验证与修正生态水位核定值, 提升结果的长系列代表性与生态目标契合度。

参考文献

- [1] 王鸿翔, 桑明崎, 查胡飞, 等. 基于生态水文学法的湘江生态流量研究[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 70-73.
- [2] 郭志阳, 朱慧雯, 谭茜, 等. 巢湖市下汤水库生态水位研究[J]. 治淮, 2025(2): 57-58.
- [3] 王艳芬, 陈怡平, 王厚杰, 等. 黄河流域生态系统变化及其生态水文效应[J]. 中国科学基金, 2021, 35(4): 520-528.
- [4] 于寒, 周茜冉, 邹元春, 等. 湿地生态恢复技术研究现状与展望[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(22): 20-25.
- [5] 刘永, 郭怀成, 周丰, 等. 湖泊水位变动对水生植被的影响机理及其调控方法[J]. 生态学报, 2006(9): 3117-3126.
- [6] 凌瑜楠, 刘英, 彭佳宾, 等. 博斯腾小湖最低生态水位与水量盈亏分析[J]. 环境工程, 2020, 38(10): 26-32+60.
- [7] 王德维, 王震, 王崇任, 等. 石梁河水库生态水位确定与保障研究[J]. 江苏水利, 2025(6): 48-51.