

# 长江中游典型支流水功能区纳污能力计算研究 ——以举水流域新洲区为例

陈美瑶<sup>1</sup>, 邹振华<sup>2</sup>, 程小翠<sup>3</sup>, 李二明<sup>4</sup>, 苏海岚<sup>1</sup>, 黄韬<sup>5</sup>, 张俊宏<sup>1\*</sup>, 黄惟亚<sup>1</sup>, 岳垚<sup>1</sup>, 陈欣鑫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中南民族大学资源与环境学院, 资源转化与污染控制国家民委重点实验室, 湖北 武汉

<sup>2</sup>长江水利委员会长江中游水文水资源勘测局, 湖北 武汉

<sup>3</sup>湖北省水文水资源应急监测中心, 湖北 武汉

<sup>4</sup>武汉水务科学研究院, 湖北 武汉

<sup>5</sup>广西壮族自治区水利电力勘测设计研究院有限责任公司, 广西 南宁

收稿日期: 2023年8月2日; 录用日期: 2023年9月6日; 发布日期: 2023年10月7日

## 摘要

科学认识、合理分析水域纳污能力变化对促进污染减排、实现水功能区限制纳污红线管理至关重要。本文以举水为研究对象, 考虑长江水位变化影响, 构建了举水下游河段一维水动力模型, 并结合相关规范及文献资料, 选取COD、NH<sub>3</sub>-N作为污染物控制指标, 采用河流一维模型估算举水新洲区段各功能区容纳污染物的能力, 在此基础上量化了三峡水库调蓄影响下各功能区纳污能力的变化情况。结果表明, 三峡水库蓄水对各水功能区影响程度不同, 上段保留区的纳污能力不受影响; 保证率为75%、50%时, 蓄水后与蓄水前相比, 开发利用区与下段保留区纳污能力有所提高; 保证率为90%时, 蓄水后与蓄水前相比, 开发利用区与下段保留区纳污能力有所降低, 距离下游出口越近, 对水功能区纳污能力的影响越大。

## 关键词

举水, 新洲, 水动力模型, 水功能区, 纳污能力

# Study on the Calculation of Pollutant Carrying Capacity of Water Functional Areas in Typical Tributaries of the Middle Yangtze River

—Taking Xinzhou District of Jushui River Basin as an Example

Meiyao Chen<sup>1</sup>, Zhenhua Zou<sup>2</sup>, Xiaocui Cheng<sup>3</sup>, Ermeng Li<sup>4</sup>, Hailan Su<sup>1</sup>, Tao Huang<sup>5</sup>,  
Junhong Zhang<sup>1\*</sup>, Weiya Huang<sup>1</sup>, Yao Yue<sup>1</sup>, Xinxin Chen<sup>1</sup>

作者简介: 陈美瑶(1996-), 男, 湖北恩施人, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。Email: cmy723128@163.com

\*通讯作者 Email: zjh411891611@mail.scuec.edu.cn

文章引用: 陈美瑶, 邹振华, 程小翠, 李二明, 苏海岚, 黄韬, 张俊宏, 黄惟亚, 岳垚, 陈欣鑫. 长江中游典型支流水功能区纳污能力计算研究[J]. 水资源研究, 2023, 12(5): 441-448. DOI: 10.12677/jwrr.2023.125049

<sup>1</sup>Key Laboratory of Resources Conversion and Pollution Control of the State Ethnic Affairs Commission, College of Resources and Environmental Science, South-Central Minzu University, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Middle Changjiang River Bureau of Hydrology and Water Resource Survey, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

<sup>3</sup>Hubei Provincial and Water Resources Emergency Monitoring Center, Wuhan Hubei

<sup>4</sup>Wuhan Water Science Research Institute, Wuhan Hubei

<sup>5</sup>Guangxi Water & Power Design Institute Co., Ltd., Nanning Guangxi

Received: Aug. 2<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Sep. 6<sup>th</sup>, 2023; published: Oct. 7<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Scientific understanding and appropriate analysis of the change of water pollution carrying capacity are very important to promote pollution reduction and the red line management of water function area. In this paper, taking the Jushui River as the research object, considering the influence of the water level change of the Yangtze River, a one-dimensional hydrodynamic model of the lower reaches of the Jushui River is constructed. Combined with the relevant specifications and literature, COD and NH<sub>3</sub>-N are selected as the pollutant control indicators, and the one-dimensional model of the river is used to calculate the pollutant carrying capacity of each water functional area in Xinzhou District of Jushui River. On this basis, the changes in pollutant carrying capacity of each functional area under the influence of Three Gorges Reservoir regulation and storage are quantified. The results show that the Three Gorges Reservoir impoundment has different degrees of influence on each water function area, and the pollutant holding capacity of the upper reserved area is not affected. When the guarantee rate is 75% and 50%, the pollutant holding capacity of the development and utilization area and the lower reserved area increases after impoundment compared with that before impoundment. When the guarantee rate is 90%, the pollutant holding capacity of the development and utilization area and the lower reserved area decreases after impoundment compared with that before impoundment. The influence on the pollutant holding capacity of the water function area is greater in the area closed to the downstream outlet.

## Keywords

Jushui River, Xinzhou, Hydrodynamic Model, Water Functional Zone, Pollutant Carrying Capacity

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/>



Open Access

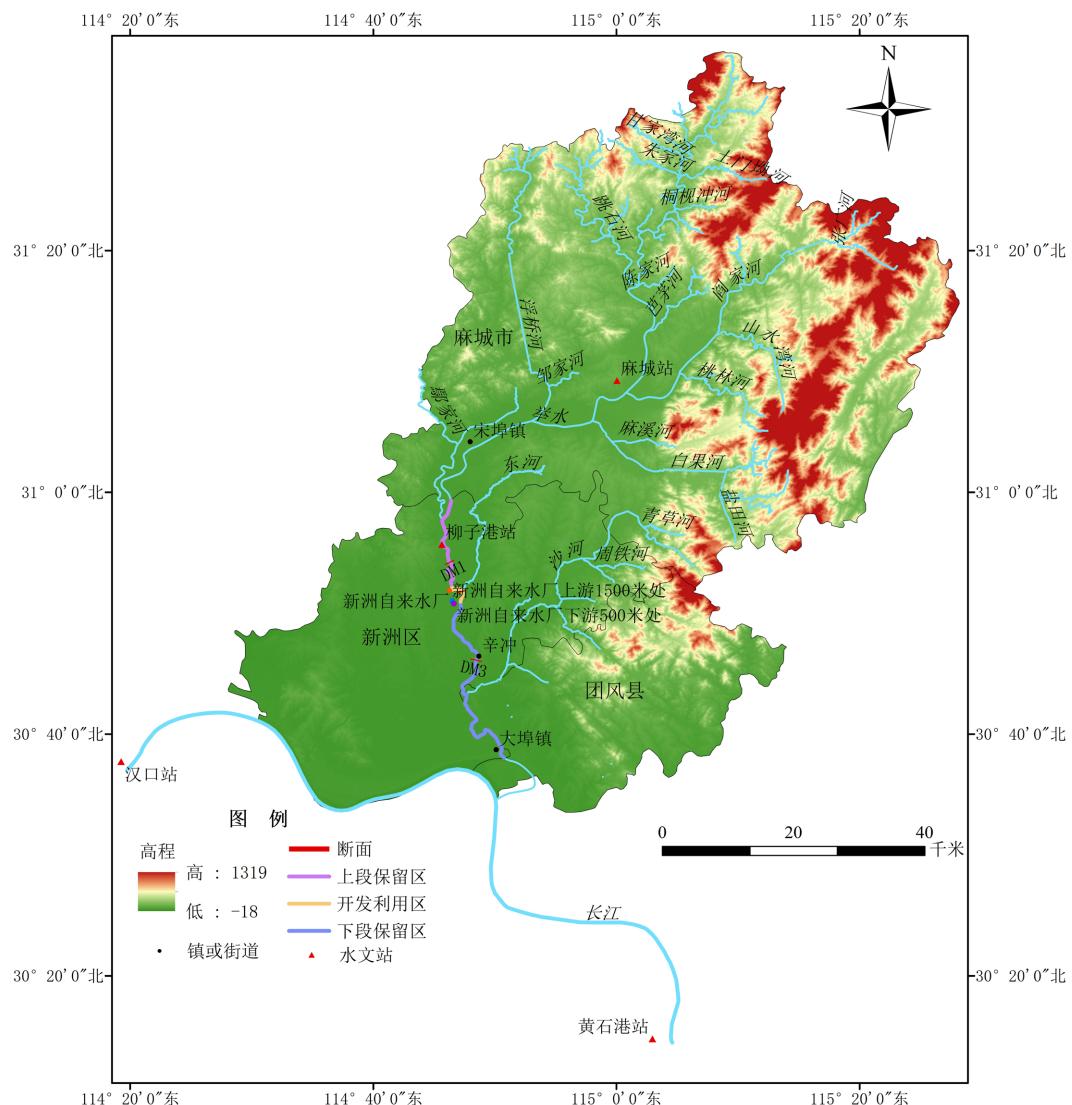
## 1. 引言

随着经济社会的迅猛发展，水质恶化等一系列水环境问题日渐凸显[1] [2]。“纳污能力”观念及其计算方式的提出对量化某一水域污染物的最大排放量、水体及水质保护起到了至关重要的作用[3] [4]。林金等[6]基于相关水文资料构建台州市区河道一维水质水动力模型，通过不断调整参数计算出可靠的河道水环境容量；陶淑芸[7]等基于相关资料构建了一维水质及水动力模型，计算出蔷薇河污染物总量和水功能区的水环境容量；李英霞[8]等基于相关水文资料构建章卫南河子流域一维水质模型，计算出章卫南河子流域水环境容量并讨论了设计流量和退化系数的确定方法。但目前很多研究未考虑不同水功能区断面平均流速的差异，不利于各水功能区的污染物排放管理，或是未考虑污染物的分区排放，对于不同功能区污染物排放的差异化管理存在一定局限，还有

一些研究未按照水功能区进行水环境容量的计算，对于河道污染分区治理仍存在困难。本研究采用一维水动力模型计算各功能区的断面平均流速并利用河流一维模型估算各功能区纳污能力，分析了三峡水库蓄水前后，不同保证率流量及水位条件下举水干流 COD、NH<sub>3</sub>-N 纳污能力的变化情况，为举水流域新洲区的污水排放控制提供科学依据。

## 2. 研究区概况

举水流域地处鄂东北地区，流经麻城市城区、宋埠镇、武汉市新洲区、黄冈市团风县等地，最终在团风县内汇入长江，干流里程约 165.7 km，平均坡降 0.063%。举水的几条重要支流从下游至上游分别是沙河、东河、鄢家河、浮桥河、白果河、阎家河。流域年平均降水约 1224 mm，降水分配存在季节性差异且年际变化较大。流域面积约 4046 km<sup>2</sup>。上游多为山地，中游地区丘陵遍布，从新洲城关以下进入滨江平原，地势平坦。流域内平原、山地、丘陵面积占比分别为 10.3%、43.5%、46.2%。新洲城关附近建有橡胶坝，库容 1211 万 m<sup>3</sup>。一般情况下，长江汉口水位在 27 m 以上时，举水河口段会顶托到柳子港。流域上下游有麻城站、柳子港站，两水文



**Figure 1.** Location diagram of Jushui watershed

**图 1. 举水流域位置示意图**

站为麻城市及新洲区的防汛抗旱提供了科学依据，举水流域位置如图1。

按《湖北省水资源综合规划细则》的总体规划，新洲区举水干流一级水功能区划分为：上段保留区、开发利用区、下段保留区[9]，如图1。

### 3. 研究方法

#### 3.1. 水动力模型

MIKE11水动力模型是基于垂向积分的物质和动量守恒方程，即一维Saint-Venant方程，模拟结果为河道各个断面、各个时刻的水位和流量等水文要素信息[10]。水动力模型计算范围从柳子港站至举水口，计算河段全长48.2 km，共布设断面45个，计算模型的所有断面均从实测1:10,000地形图上切取而得，断面间距为902~1103 m。将柳子港站的实测流量作为上游入流边界条件，汉口站和黄石港站对应时期的实测水位插值来推算举水口的水位，以此作为下游边界，河段平均糙率为0.037。

#### 3.2. 水域纳污能力数学模型

为了客观的描述水体自净或污染物降解规律，较准确的计算出河段的纳污能力，可采用一定的数学模型来描述此过程[11]。本研究纳污能力的估算参考《水域纳污能力计算规程(GB/T25173-2010)》[12]中的河流一维模型，该模型认为污染物在中、小型河流横断面上是均匀混合的。计算模型公式如下：

1) 污染物浓度按式(1)计算：

$$C_x = C_0 e^{-K \frac{x}{u}} \quad (1)$$

式中： $C_0$ 表示污染物的本底浓度，mg/l； $C_x$ 表示污染物质流过距离 $x$ 后的浓度，mg/l； $x$ 表示顺水流方向的距离，m； $u$ 表示设计流量条件下的断面平均流速，m/s； $K$ 表示污染物综合衰减系数， $s^{-1}$ 。

2) 相应的水功能区纳污能力按式(2)计算：

$$M = (C_s - C_x)(Q + Q_p) \quad (2)$$

式中： $M$ 表示水功能区纳污能力，g/s； $C_s$ 表示目标浓度值，mg/l。

3) 排污口的位置在河段中间时(即 $x = L/2$ )，各功能区下断面的污染物浓度及水功能区的纳污能力分别按式(3)、(4)计算：

$$C_{x=L} = C_0 e^{-\frac{KL}{u}} + \frac{m}{Q} e^{-\frac{KL}{u}} \quad (3)$$

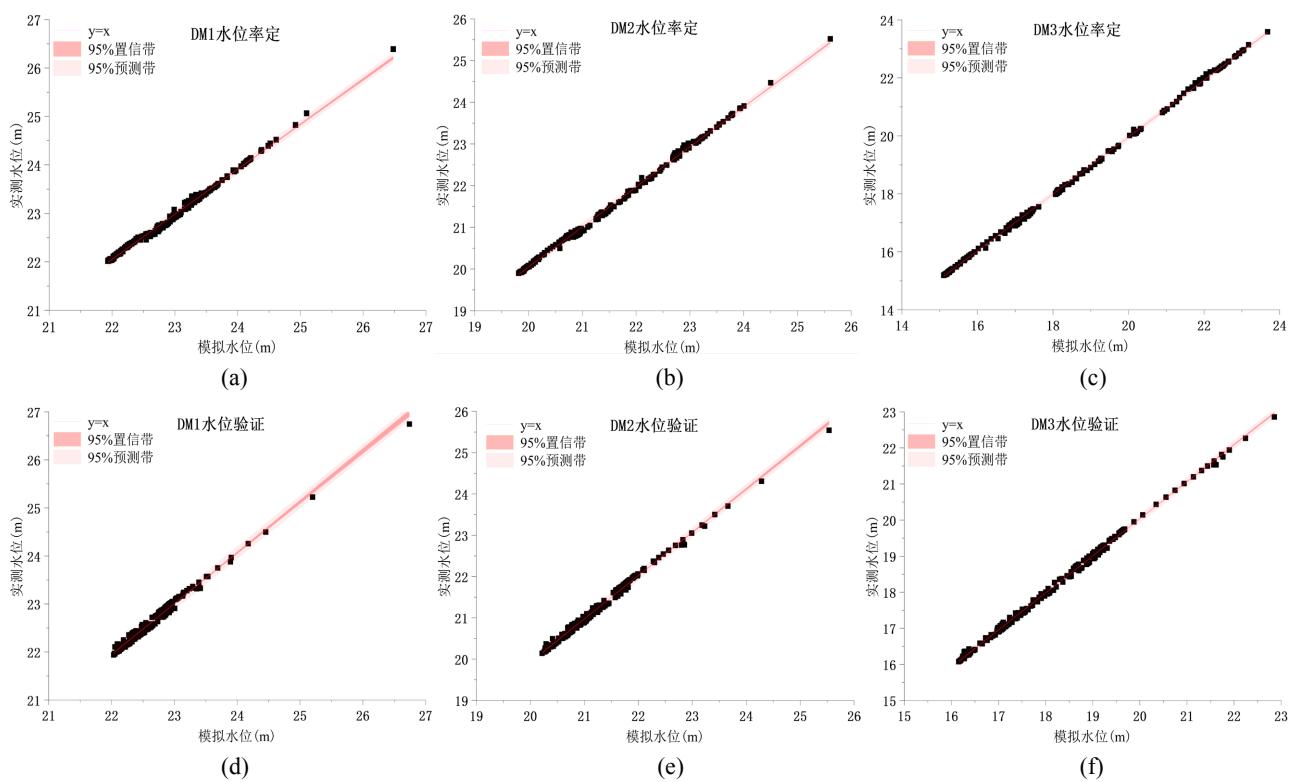
$$M = (C_s - C_{x=L})(Q + Q_p) \quad (4)$$

式中： $m$ 表示污染物的排放速度，g/s； $C_{x=L}$ 表示各个功能区下断面的污染物浓度，mg/l。

### 4. 纳污能力的计算

#### 4.1. 水动力模型的率定和验证

模型率定及验证选取了断面DM1、DM2、DM3，这些断面分别位于上段保留区、开发利用区、下段保留区。将2014年12月6日至2016年2月29日汉口站及黄石港站的实测水位插值出的举水口水位与同期柳子港站实测水位进行内插得到的水位值作为三个断面的水位实测值，其中2014年12月6日至2015年7月19日的水位系列用于率定，2015年7月20日至2016年2月29日的水位系列用作验证。研究河段水位的率定计算结果如图2(a)~(c)所示，经计算Nash效率系数分别为0.94、0.96、0.95，水位的验证结果如图2(d)~(f)所示，经计算Nash效率系数分别为0.93、0.95、0.94，拟合效果较好，满足计算精度要求。

**Figure 2.** Diagram of the water level calibration and verification results of the study river section**图 2.** 研究河段水位率定及验证结果图

## 4.2. 纳污能力相关参数的确定

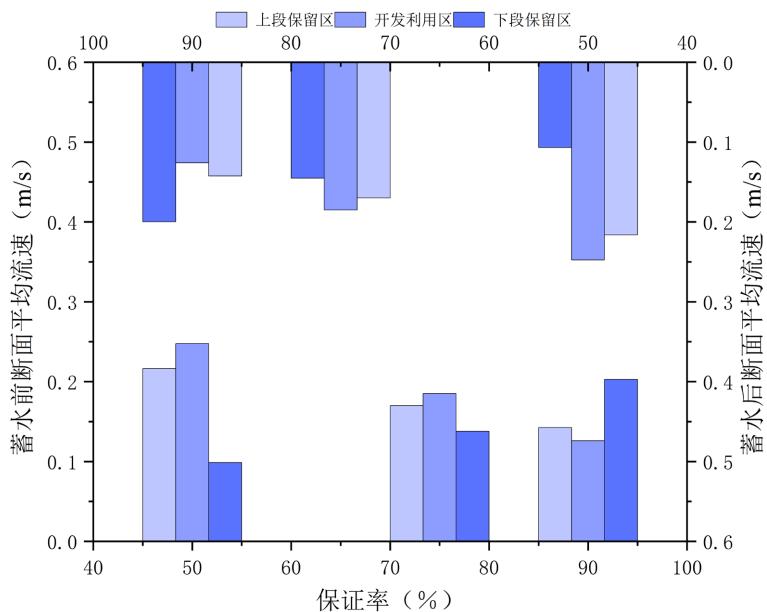
### 4.2.1. 断面设计流量和平均流速

计算河流水域纳污能力，应采用 90% 保证率最枯月平均流量或近 10 年最枯月平均流量作为设计流量[12]，将柳子港 1977 年 1 月至 2002 年 12 月及 2003 年 1 月至 2021 年 2 月的最枯月平均流量资料分别进行排频，得到三峡蓄水前后不同保证率下的设计流量，以此作为水动力模型上游边界条件；以汉口站和黄石港站对应时期的最枯月平均水位资料插值出举水口的水位并进行排频得到三峡蓄水前后两水文系列不同保证率的下游出口水位，作为下游边界条件，统计数据见表 1，各功能区断面平均流速计算结果如图 3 所示。

据图 3 可知，三峡水库蓄水前后不同保证率流量及水位条件下上段保留区与开发利用区的断面平均流速基本保持不变；保证率为 75%、50% 时，蓄水前后相比，蓄水后下段保留区受长江干流顶托作用较蓄水前小，断面平均流速有所增加；保证率为 90% 时，蓄水前后相比，蓄水后下段保留区受长江干流顶托作用较蓄水前大，断面平均流速有所降低。

**Table 1.** The water level of the Jushui River outlet and the design flow**表 1.** 举水出口水位及设计流量

时期	90% 保证率		75% 保证率		50% 保证率	
	出口水位(m)	设计流量( $m^3/s$ )	出口水位(m)	设计流量( $m^3/s$ )	出口水位(m)	设计流量( $m^3/s$ )
三峡水库蓄水前	10.98	8.45	13.36	13.50	15.50	25.10
三峡水库蓄水后	11.05	8.45	13.19	13.50	15.30	25.10



**Figure 3.** Diagram of the average flow velocity of each water function area section  
**图 3. 各水功能区断面平均流速图**

#### 4.2.2. 污染物的背景浓度

污染物的背景浓度是依据实际情况，参考主要控制断面背景浓度与补充监测断面实测情况选取[13]。根据举水柳子港水文站 1998~2000 年水质监测的最枯月平均值来确定开发利用区 COD、NH<sub>3</sub>-N 的背景浓度，其浓度分别为 11 mg/l、0.18 mg/l；举水新洲上段保留区 COD、NH<sub>3</sub>-N 的背景浓度根据相关文献[14]来确定，其浓度分别是 12 mg/l、0.27 mg/l；举水新洲下段保留区 COD、NH<sub>3</sub>-N 的背景浓度分别为 15 mg/l、0.5 mg/l。

#### 4.2.3. 水质目标浓度值

水质目标值的选择，常以水功能区类别为依据[15]。参照《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》并结合湖北省水功能区划成果，最终确定举水新洲开发利用区的 COD、NH<sub>3</sub>-N 目标浓度分别为 20 mg/l、1.0 mg/l，举水新洲上段保留区的 COD、NH<sub>3</sub>-N 目标浓度分别为 15 mg/l、0.5 mg/l，举水新洲下段保留区的 COD、NH<sub>3</sub>-N 目标浓度分别为 20 mg/l、1.0 mg/l。

#### 4.2.4. 污染物综合衰减系数

参考《全国水资源保护技术大纲》，确定综合衰减系数的方法可分为分析借用法、经验公式法和实测法[16]三种。本文采用分析借用法确定举水干流污染物综合降解系数。河流 COD、氨氮衰减系数  $K$  取值范围见表 2 [5]。参考相关文献中的污染物综合衰减系数取值，最终确定 COD 的  $K$  值取 0.2、NH<sub>3</sub>-N 的  $K$  值取 0.2 [17]。

**Table 2.** The value range of river COD and NH<sub>3</sub>-N attenuation coefficient  $K$   
**表 2. 河流 COD、NH<sub>3</sub>-N 衰减系数  $K$  取值范围**

河流	COD 的 $K$ 值范围( $d^{-1}$ )	NH <sub>3</sub> -N 的 $K$ 值范围( $d^{-1}$ )
举水	0.15~0.4	0.1~0.35

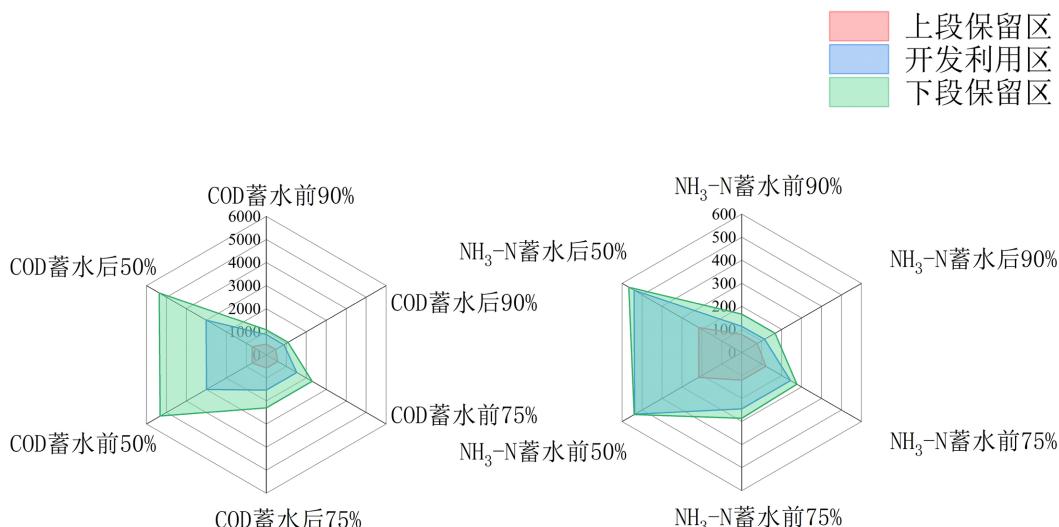
#### 4.2.5. 排污口的位置及污水流量

为简化计算，可将多个排污口概化为一个，其位置在河段中间[18]。开发利用区的主要排污口有 4 个，分别是北豪、长航背后、堤防背后、被絮围，排污口年排污量为 1277 万 t [9]。该功能区污水排放流量为  $Q_p = 0.405 m^3/s$ ，

COD 与 NH<sub>3</sub>-N 的入河速率分别为 10.467 g/s、3.621 g/s。举水新洲下端保留区只有一个排污口，即辛冲排污口，年排污量为 63.1 万 t。此功能区污水排放流量  $Q_p = 00.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ，COD 与 NH<sub>3</sub>-N 的入河速率分别为 0.155 g/s、0.054 g/s。

### 4.3. 纳污能力计算结果

经计算，蓄水前后举水流域新洲区各功能区的纳污能力如图 4 所示。由图可知，各功能区的纳污能力随保证率的减小而提高。不同保证率下，蓄水前后上段保留区纳污能力基本不变。保证率为 75%、50% 时，三峡水库调蓄导致蓄水后的长江干流水位较蓄水前有所降低、支流流速增加，开发利用区 COD、NH<sub>3</sub>-N 的纳污能力较蓄水前分别提高了 0.44%~0.66%、0.54%~0.72%；下段保留区 COD、NH<sub>3</sub>-N 的纳污能力较蓄水前分别提高了 0.60%~0.92%、3.70%~4.97%。保证率为 90% 时，枯水期三峡水库补水，蓄水后的长江干流水位较蓄水前有所提高、支流流速减小，开发利用区 COD、NH<sub>3</sub>-N 的纳污能力较蓄水前分别降低了 0.32%、0.47%；下段保留区 COD、NH<sub>3</sub>-N 的纳污能力较蓄水前分别降低了 0.56%、1.54%。下游出口水位为中低水位的情况下，上段保留区基本不受长江干流顶托影响，开发利用区受长江干流顶托影响有限，下段保留区在一定程度上受长江干流顶托影响。



**Figure 4.** Pollutant carrying capacity diagram of each water function area  
**图 4.** 各水功能区纳污能力图

## 5. 结论

1) 本研究构建了举水河口段一维水动力模型，模拟了不同保证率下水功能区的流速变化，并根据水域纳污能力计算规程计算了举水流域新洲区各水功能区纳污能力。根据纳污能力的计算结果可知，各水功能区均有一定的纳污能力。纳污能力随保证率的升高而降低，且水功能区距离下游出口越近对纳污能力的影响越大。

2) 三峡水库蓄水对各水功能区纳污能力影响程度不同，上段保留区基本不受影响，开发利用区所受影响有限，下段保留区所受影响较小。举水河段新洲区各水功能区的纳污能力主要取决于本河段水量条件，枯水期应严格控制污水排放。

## 基金项目

国家自然科学基金(51509273)；中南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(CZY20032)。

## 参考文献

- [1] DARJI, J., LODHA, P. and TYAGI, S. Assimilative capacity and water quality modeling of rivers: a review. AQUA Water

- Infrastructure, Ecosystems and Society, 2022, 71(10): 1127-1147. <https://doi.org/10.2166/aqua.2022.063>
- [2] MA, Q., PANG, Y. and MU, R. Water environmental capacity calculation based on control of contamination zone for water environment functional zones in Jiangsu Section of Yangtze River, China. Water, 2021, 13(5): 587. <https://doi.org/10.3390/w13050587>
- [3] DENG, L., YIN, J., TIAN, J., et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in the Han River basin. Water, 2021, 13(3): 249. <https://doi.org/10.3390/w13030249>
- [4] CHEN, Q., ZHU, M., ZHANG, C., et al. The driving effect of spatial-temporal difference of water resources carrying capacity in the Yellow River basin. Journal of Cleaner Production, 2023, 388: 135709. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135709>
- [5] 阎敏. 基于一维水质模型的湟水干流纳污能力计算[J]. 能源与环保, 2017, 39(11): 257-259+63.  
MIN Min. Calculation of pollution holding capacity of Huangshui main stream based on one-dimensional water quality model. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(11): 257-259+63. (in Chinese)
- [6] 林金. MIKE11 模型在台州市区河网纳污能力计算中的应用[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2014, 26(1): 13-18.  
LIN Jin. Application of MIKE11 model in calculation of pollution holding capacity of Taizhou urban river network. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2014, 26(1): 13-18. (in Chinese)
- [7] 陶淑芸, 王桂林. 蕾薇河污染模型建立与生态修复措施[J]. 人民珠江, 2016, 37(8): 82-86.  
TAO Shuyun, WANG Guilin. Establishment of pollution model and ecological restoration measures in Rose River. Pearl River, 2016, 37(8): 82-86. (in Chinese)
- [8] LI, Y. X., QIU, R. Z., YANG, Z. F., et al. Parameter determination to calculate water environmental capacity in Zhangweinan canal sub-basin in China. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(6): 904-907. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60196-0](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60196-0)
- [9] 刘志文. 武汉市新洲区举水流域水资源综合评价及主要污染物现状削减量分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2005.  
LIU Zhiwen. Comprehensive assessment of water resources and reduction of major pollutants in the water basin of Xinzhong District, Wuhan. Master's Thesis, Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese)
- [10] 刘伟, 刘洪超, 徐海岩. 基于 MIKE11 模型计算河流水功能区纳污能力方法[J]. 东北水利水电, 2009, 27(8): 69-70+72.  
LIU Wei, LIU Hongchao and XU Haiyan. Calculation of sewage holding capacity of river water functional area based on MIKE11 model. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2009, 27(8): 69-70+72. (in Chinese)
- [11] 王彦红. 水体纳污能力计算中各参数的分析与确定[J]. 山西水利科技, 2007(2): 55-57.  
WANG Yanhong. Analysis and determination of various parameters in the calculation of water pollution holding capacity. Shanxi Hydrotechnics, 2007(2): 55-57. (in Chinese)
- [12] 长江流域水资源保护局. 水域纳污能力计算规程[Z]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2010: 24.  
Yangtze River Basin Water Resources Protection Bureau. Regulations for calculating the pollution holding capacity of water areas. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. 2010: 24. (in Chinese)
- [13] 曹苗苗, 夏焕清, 柴娟. 汉江干流洋县段水功能区纳污能力分析计算[J]. 陕西水利, 2021(9): 123-125.  
CAO Miaomiao, XIA Huanqing and CHAI Juan. Analysis and calculation of pollution holding capacity in Yangxian section of the main stream of the Han River. Shaanxi Water Resources, 2021(9): 123-125. (in Chinese)
- [14] 文淇. 举水麻城段入河污染负荷及水环境容量研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学.  
WEN Qi. Study on pollution load and water environment capacity of river inflow in Macheng section of Jushui. Master's Thesis, Wuhan: Huazhong University of Science and Technology. (in Chinese)
- [15] 谢飞, 侯新, 李仁宗. 水功能区水域纳污能力及限制排污总量分析——以重庆市奉节县为例[J]. 水利科技与经济, 2012, 18(3): 29-32.  
XIE Fei, HOU Xin and LI Renzong. Analysis of pollutant holding capacity and total restricted pollutant discharge in water function zone: A case study of Fengjie County, Chongqing Municipality. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2012, 18(3): 29-32. (in Chinese)
- [16] 水利部水政水资源司. 水资源保护管理基础[M]. 北京: 水利水电出版社, 1996.  
Department of Water Resources, Ministry of Water Resources. Fundamentals of water resources conservation and management. Beijing: China Water Power Press, 1996. (in Chinese)
- [17] 喻婷, 陈晓群, 苗滕. 举水干流水功能区纳污能力计算研究[J]. 节水灌溉, 2019(9): 62-66+73.  
YU Ting, CHEN Xiaoqun and MIAO Teng. Study on calculation of pollution holding capacity in functional area of Jushui River mainstream. Water Saving Irrigation, 2019(9): 62-66+73. (in Chinese)
- [18] 刘康. 英德市水功能区纳污能力核算与分析[J]. 地下水, 2022, 44(6): 102-103+308.  
LIU Kang. Accounting and analysis of pollution holding capacity in water function area of Yingde City. Ground Water, 2022, 44(6): 102-103+308. (in Chinese)