

## 基于水质可达的湖湾水环境综合治理

刘清华 黎作尚 丰莉 邓柏松 韩振华 黄璐怡  
长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430000

**[摘要]**湖泊水环境治理需统筹控源截污、内源清除及生态修复等系统性措施。针对当前治理方案依赖经验、缺乏定量评估的问题,以汤逊湖香榭湾劣V类水体为对象,应用 MIKE21 构建水质水力模型,定量评估综合治理工程的水质目标可达性。结果表明:实施排口截污、岸线整治、生态缓冲带及水生生态修复工程后,湖区 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 等指标浓度显著下降,出口水质可稳定达到V类标准,污染物削减率超 80%。

**[关键词]**水动力模型; MIKE21; 水质可达性; 综合治理; 汤逊湖香榭湾

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17722

中图分类号: X524

文献标识码: A

## Comprehensive Management of Lake Bay Water Environment Based on Achievable Water Quality

LIU Qinghua, LI Zuoshang, FENG Li, DENG Baisong, HAN Zhenhua, HUANG Luyi  
Yangtze Ecology and Environment Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

**Abstract:** The management of lake water environment requires systematic measures such as controlling sources and intercepting pollution, removing internal sources, and ecological restoration. In response to the problem of relying on experience and lacking quantitative evaluation in the current governance plan, a water quality hydrodynamic model was constructed using MIKE21 for the inferior Class V water body in Xiangxie Bay, Tangxun Lake, to quantitatively evaluate the water quality target reachability of the comprehensive governance project. The results showed that after implementing the discharge interception, shoreline remediation, ecological buffer zone, and water ecological restoration projects, the concentrations of COD, NH<sub>3</sub>-N, TP and other indicators in the lake area significantly decreased, and the outlet water quality could stably meet the Class V standard, with a pollutant reduction rate of over 80%.

**Keywords:** hydrodynamic model; MIKE21; water quality accessibility; comprehensive governance; Tangxun Lake Xiangxie Bay

### 引言

在共抓开展长江大保护、打好水污染防治攻坚战背景下,湖泊生态修复成为重点任务。2019 年武汉市印发《武汉市河湖流域水环境“三清”行动方案》<sup>[1]</sup>,重点开展汤逊湖等流域综合治理,消除劣 V 类水体,确保 2025 年全市河湖流域水质基本达标。汤逊湖近年水质持续恶化,湿地健康等级为中等,湖水 TN、TP 严重超标<sup>[2]</sup>,其子湖香榭湾片区因外源污染输入、水动力条件弱化等问题,水质达劣V类,生态退化显著。

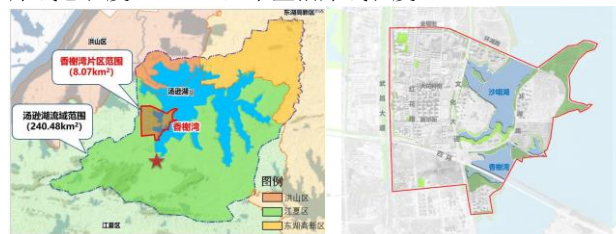
截断外源污染、移除内源污染、修复水生态是提升河湖水质的重要措施<sup>[3-5]</sup>。以汤逊湖香榭湾片区为例,在对研究区水环境、水生态、水景观全面排查的基础上,以“通湖水、控污水、固岸线、修生态、净水质”的思路制定了排口截污工程、岸线整治工程、生态缓冲带工程、水生生态修复工程等工程措施。由于浅水湖泊水动力弱、水环境容量小等特性,合理的前期方案设计和论证是确保水质效果达标的重要保证<sup>[6]</sup>,仅靠经验分析和整体分析难以准确评估工程方案的目标可达性<sup>[7]</sup>。MIKE21 模型在湖泊水质模拟中应用广泛<sup>[8-9]</sup>,可有效支撑治理方案的科学设计。以香榭湾为对象,应用 MIKE21 构建水质水力模型,评估“控源截污-生态修复”综合治理措施的水质可达性,评

估实施效果。

### 1 基本情况

#### 1.1 研究区域位置

香榭湾片区汤逊湖流域西侧(图 1a),汇水面积 8.07km<sup>2</sup>,水域面积 1.05km<sup>2</sup>,主要包括水域面积 0.31km<sup>2</sup>的香榭湾和水域面积 0.74km<sup>2</sup>的沙咀湖(图 1b)。香榭湾片区平均水深 1.5~2.0m,水体透明度在 30~80cm,平均透明度 50cm。岸线总长度 14.85km,未整治岸线长度 2.67km。



(a) 香榭湾片区位置

(a) 香榭湾片区水系图

图 1 香榭湾片区和水系分布

#### 1.2 水系现状问题

香榭湾片区现状水质为劣V类, TN 超标 0.5 倍, TP 超标 1 倍。其中沙咀湖排口水质最差,其中总氮超标 20 倍,总磷超标 17.3 倍以上,降雨期污染物浓度稍微较低。

总体上看,香榭湾水质优于沙咀湖。香榭湾水环境表现在以下突出问题。

(1) 雨污混流严重: 香榭湾片区雨水排放模式以直排汤逊湖为主, 正在进行雨污分流改造。沿湖湾较明显的混流排口有 5 处, 管径 D600~D1500, 晴天有混流污水外排, 对水体环境影响较大。

(2) 水系功能退化: 沙咀湖底泥淤积深度范围为 60~90cm, 平均深度 75cm, 沙咀湖南侧底泥淤积严重, 水体流速缓慢, 湖体之间联通性较差。

(3) 岸线杂乱无章: 香榭湾岸线总长度 14.85km, 未整治岸线长度 2.67km, 占 17.98%。未整治岸线多为泥土边坡, 不利于水体生态净化。西北角靠近文化大道附近堆土严重, 影响生态环境, 现状岸滨带无法亲水, 缺乏沿湖景观设施。

(4) 生态结构失衡: 香榭湾片区水生植被覆盖率较低, 浮游动物密度及生物量逐年减少, 湖泊水生态系统结构遭到破坏。浮游植物香浓维纳多样性指数在 0.9~2.1 之间, 呈现中度至重度污染状态。沙咀湖的叶绿素 a 浓度范围为 12.4~24.3 $\mu\text{g}$ , 综合营养状态指数 TLI (chl) 沙咀湖为 52.3~59.7, 均为轻度富营养状态。浮游动物香浓维纳多样性指数在 1.7~2.6 之间, 总体呈现轻中度污染状态。

### 1.3 水环境容量及污染削减分析

沙咀湖片区污染类型主要有生活污染、工业污染、雨水径流污染、降尘污染和内源污染。污染物总量为 COD 622.42t/a、NH<sub>3</sub>-N 51.19t/a、TP 6.46t/a、TN 84.28t/a。按照各类污染源来看, 沙咀湖主要污染源来源为生活点源 (51%~82%), 雨水径流污染 (17%~51%), 内源主要有部分 TN 和 TP 污染 (16%~19%)。各类型污染源统计情况详见表 1。

表 1 沙咀湖入湖污染负荷分析

| 污染源类型  | COD/ (t/a) | NH <sub>3</sub> -N/ (t/a) | TN/ (t/a) | TP/ (t/a) |
|--------|------------|---------------------------|-----------|-----------|
| 生活点源   | 322.26     | 42.3                      | 52.64     | 3.81      |
| 工业点源   | 0.0887     | 0.0027                    | 0.0078    | 0.0003    |
| 雨水径流污染 | 287.27     | 8.89                      | 16.59     | 1.28      |
| 降尘污染   | 12.8       | 0                         | 1.55      | 0.08      |
| 内源污染   | 0          | 0                         | 13.49     | 1.29      |
| 污染合计   | 622.42     | 51.19                     | 84.28     | 6.46      |

根据《武汉市水功能区划》等, 2025 年汤逊湖主湖水质达到Ⅳ类, 沙咀湖水质达到 V 类。根据沙咀湖水质治理目标, 计算得到 2025 年环境容量如下表 2 所示, COD 为 124.14t/a, NH<sub>3</sub>-N 为 6.21t/a, TN 为 8.67t/a, TP 为 0.69t/a。

在不考虑治理工程措施的边界情况下, 对汤逊湖流域中的污染量进行预测。考虑 2025 年汤逊湖污水处理厂尾水入湖污染维持不变, 工业企业不增加排污, 汤逊湖 2025 年规划人口 97.5 万人测算点源污染。面源污染以维持现

有负荷情况考虑。预测降尘污染以维持现有负荷情况考虑。按照污染来源, 对比现状污染情况, 其污染增长量主要来自区域内的人口增长及内源污染释放量增加。

表 2 沙咀湖入湖污染与环境容量对比

| 内容            | COD/ (t/a) | NH <sub>3</sub> -N/ (t/a) | TN/ (t/a) | TP/ (t/a) |
|---------------|------------|---------------------------|-----------|-----------|
| 入湖污染物         | 622.42     | 51.19                     | 84.28     | 6.46      |
| 2025 年入湖污染物预测 | 766.88     | 70.31                     | 108.06    | 8.17      |
| 2025 年环境容量    | 124.14     | 6.21                      | 8.67      | 0.69      |

通过对比现状入湖污染与 2025 环境容量, 2025 年入湖污染量总量增加, 入湖 COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 超过环境容量的 6.3 倍、11.3 倍、12.5 倍、11.8 倍。为达到沙咀湖水质 V 类的目标, COD、NH<sub>3</sub>-N、TN 和 TP 削减率较高, 分别为 80.06%、87.88%、89.71%、89.33%, 均超过 80%。

## 2 治理策略

### 2.1 技术路线

香榭湾片区水环境综合治理工程为系统工程, 涉及源头、过程和末端等方面, 工程措施包括“控源截污”“退渔还湖”“岸线整治”“生态缓冲带”“连通疏浚”“水生态修复”等, 工程量大, 需要系统考虑, 协同实施, 统合综效, 实现香榭湾水环境总体目标。

坚持问题导向和目标导向, 通过排查香榭湾片区水环境、水景观、水生态等现状存在的问题, 明确综合治理的目标。遵循“控源截污、生态修复、长制久清”的水环境综合治理路线, 通过水岸同治、系统治理、因地制宜, 安排沿湖排口截污工程、岸线整治工程、生态缓冲带工程、两湖连通疏浚工程、水生态修复工程共五大类的工程措施, 系统治理香榭湾片区水环境问题。

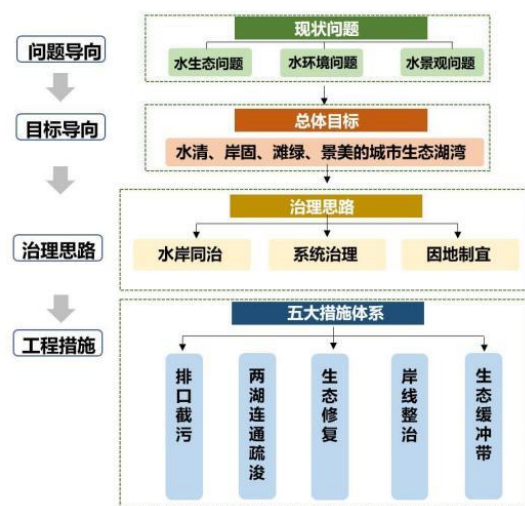


图 2 综合治理技术路线

#### (1) 沿湖排口截污工程

5 处沿湖混流排口截污改造, 包括新建截流井 4 座、

闸门井 1 座、一体化污水泵站（1500m<sup>3</sup>/d）1 座及配套污水管道。



图 3 沿湖排口截污工程总体布局

### （2）岸线整治工程

香榭湾西北角四环线下存在在 2007 年左右形成成大量堆土，侵占了湖泊蓝线，在护岸整治前需要提前进行占湖清退，恢复湖泊水面。对香榭湾片区开展占湖清退，按照宜退则退、逐级削坡、生态缓冲的原则，清退后开展岸线生态修复，本次占湖清退工程范围现状地面高程 18.2~27.5m 左右，通过土方开挖恢复至湖底高程 17.5m 处，占湖清退工程范围约 10 万 m<sup>3</sup>。此外，对侵占岸线的土坑进行退坑还湖，挖土方工程量约 2.3 万 m<sup>3</sup>。

### （3）沙咀湖生态净化工程设计

对污染较重，淤积深度大的区域实施清淤，清淤面积约 6.7 万 m<sup>2</sup>，平均深度 0.3m。配合清淤，进行有害鱼类清除和拦截，对部分区域进行清淤及清表，提高水体透明度，营造良好的水生植物种植条件。种植亚洲苦草、密齿苦草等约 35 万 m<sup>2</sup>，恢复沉水植物群落，构建湖泊恢复并保持优良水质及清水态的基础。采用直接种植的方式种植睡莲、荇菜、水鳖等去污能力强的浮叶植物约 0.8 万 m<sup>2</sup>。为进一步增加水体的净化能力，增加生态系统的多样性和稳定性，种植菖蒲、黄花鸢尾、水生花叶美人蕉等挺水植物约 2.5 万 m<sup>2</sup>，如图 4 所示。

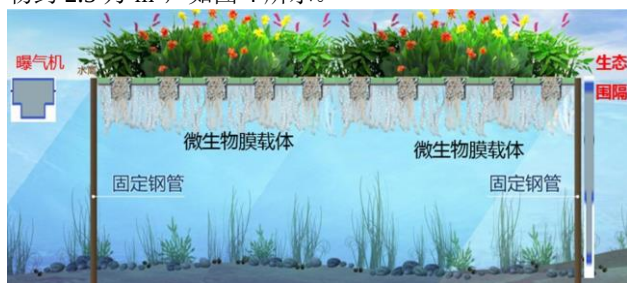


图 4 排口生态改造示意图

为调节水生动物结构群落，通过投放鱼类，以优化湖泊生态系统，增加水体自净能力，改善水质，考虑鲢鳙和肉食性乌鳢对浮游植物摄食的下行效应，控制蓝藻水华爆

发，通过乌鳢控制小杂鱼，按 100 尾/亩的密度投放。此外，投放螺、蚌等构建合理的大型底栖动物群落，促进水生植物的生长。

对沿湖排口进行生态化处理，利用曝气和生态附着基质优化提升排口区域的水质。在雨水排口周边水域布设强化处理设施主要包括生态拦污围隔、生态浮床及曝气充氧设备。单体为复合纤维浮动湿地，布置曝气设备避免水体黑臭，设置强化预处理系统，结合挺水、沉水植物布置构建净化湿地。

## 3 目标可达性分析

### 3.1 水环境数学模型

为了定量分析工程实施后对沙咀湖水环境效果和影响，并制定合理的调度运行方案，采用 MIKE 21 构建沙咀湖的二维湖泊水动力水质模型。MIKE 21 是一个专业的与水有关的工程软件包，可用于模拟河流、湖泊、河口、海湾、海岸及海洋的水流、波浪、泥沙及环境场。基于 MIKE 21 中的 AD 模块（Transport 模块）模拟沙咀湖生态湿地水体中的对流和扩散过程。

MIKE 21 模型基于 Boussinesq 和流体静压假定的二维不可压雷诺平均 N-S 方程，其基本原理如下：

连续性方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

MIKE 21 FM 对流扩散模块（Transport）描述水体中污染成分输移转化运动过程的平面二维运动方程为：

$$h \frac{\partial c}{\partial t} + u h \frac{\partial c}{\partial x} + v h \frac{\partial c}{\partial y} = D_x h \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y h \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + S_c + P_c \quad (2)$$

式中：c 为污染成分浓度（mg/l）；u、v 为沿 x、y 方向的流速（m/s）；D<sub>x</sub>、D<sub>y</sub> 为 x、y 方向的扩散系数（m<sup>2</sup>/s）；S<sub>c</sub> 表示源（汇）项（g/m<sup>2</sup>/s）；P<sub>c</sub> 表示污染成分的生化反应过程。

### 3.2 模型建立

以汤逊湖 2012 年典型年降雨文件、2022 年水质监测数据为初始条件、沙咀湖径流面源水量水质为边界条件，得到各种因素作用的水质模拟结果，验证沙咀湖生态湿地出流水质目标可以达到 V 类。沙咀湖水动力水质二维模型计算网格及地形见下图所示，二维模型其他相关参数取值见下表。沙咀湖湖底曼宁系数根据水生态修复方案和水生植物布局设置，布局了水生植物区域的曼宁系数大于无植物区域，即有水生植物区域湖底糙率大于无植物区域，如图 5 所示。

### 3.3 水质目标可达性分析

考虑沙咀湖片区采取的生活污水收集处理、环湖缓冲带建设等措施，沙咀湖生态湿地主要削减进入沙咀湖的雨水径流污染。模拟生态湿地工程实施后的水质浓度场动态分布，模型输出典型年逐日水质浓度场结果，以夏雨后 3d 和冬季雨后 3d 水质较差的时刻为例，各指标浓度空间变化见下图，结果显示沙咀湖与汤逊湖连通的北部出流区



和南部出流区 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 各指标浓度均达到 IV~V

类水质标准，如图 6 所示。

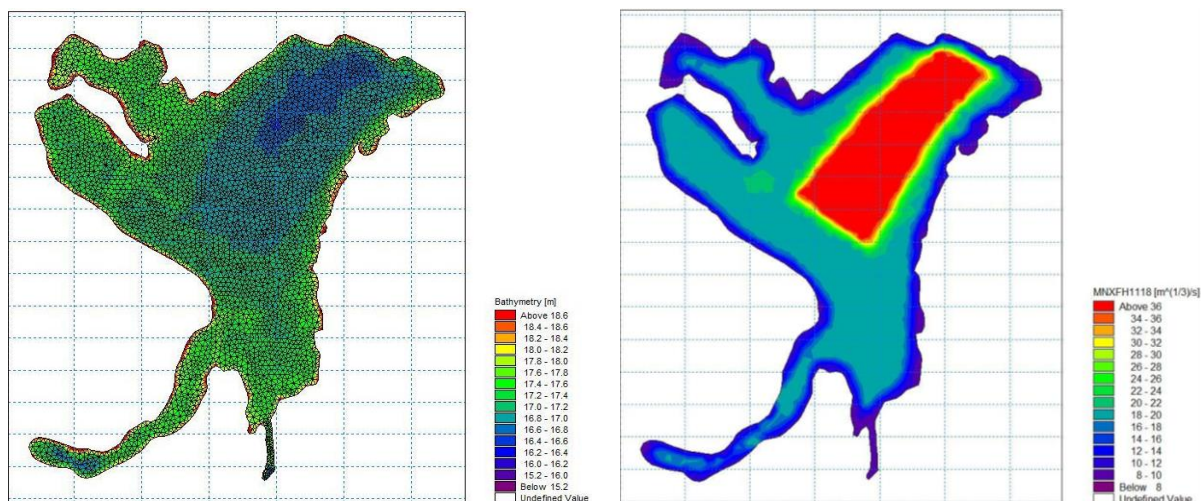


图 5 沙咀湖水动力模型计算网格及地形

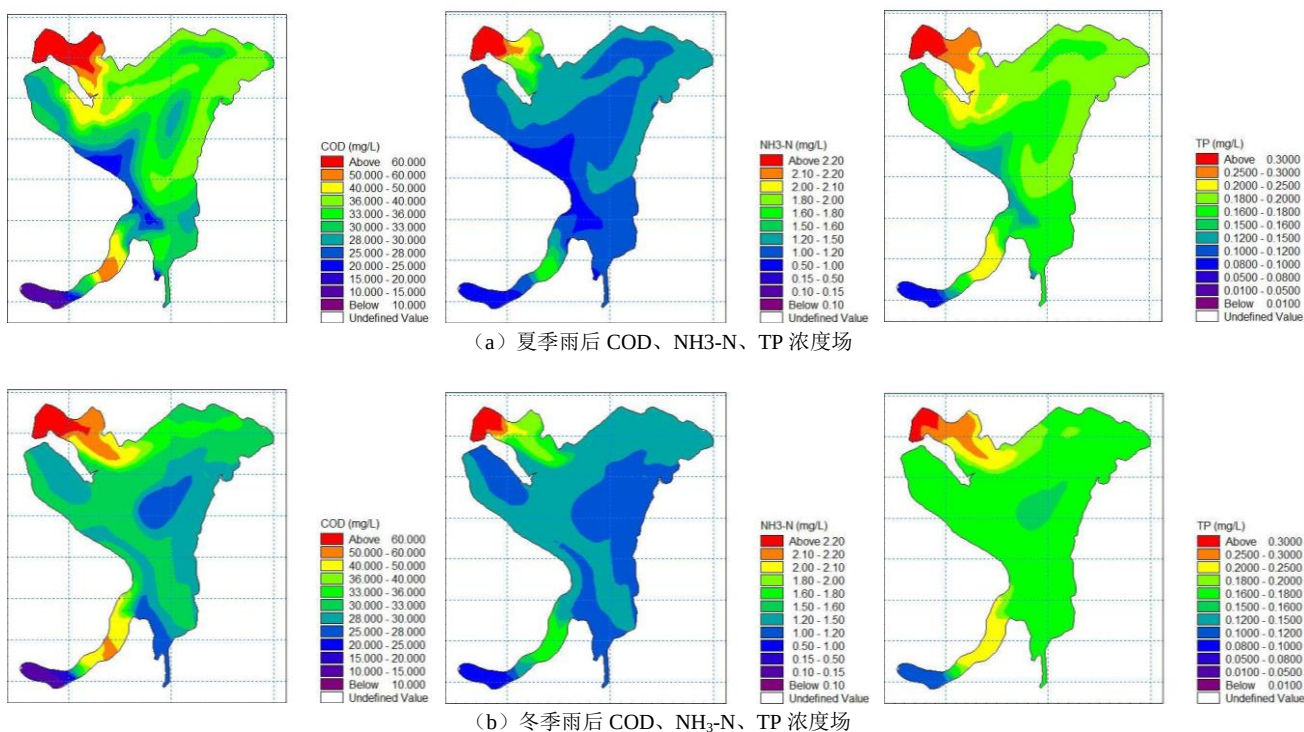


图 6 沙咀湖生态湿地夏季、冬季 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 浓度场

#### 4 结论与建议

(1) 汤逊湖香榭湾片区污染较为严重，雨污混流严重、湖泊底泥淤积、岸线杂乱、水生态系统受到破坏。现状水质为劣 V 类，入湖 COD、NH<sub>3</sub>-N、TN 和 TP 需 80% 以上削减率方可实现 V 类水质目标。

(2) 通过沿湖排口截污工程、岸线整治工程、生态缓冲带工程、水生态修复工程等工程措施，可显著改善水体流动性及自净能力。

(3) MIKE21 模型验证了治理方案的有效性，评估

了水环境治理水质目标可达性，结果表明工程实施后，沙咀湖水质将得到明显改善，各指标浓度均达到 IV~V 类水质标准。MIKE21 能很好地用于浅水湖泊综合治理成效评估中，对优化前期设计方案具有重要作用。

#### 【参考文献】

- [1]刘力,张雅,李朋,等.武汉市典型湖泊湿地生态系统健康评价——以汤逊湖为例[J].资源环境与工程,2022,36(6):773-781.
- [2]向莹,黄守斌,黄安,等.九江市琵琶湖外源污染模拟与削

减控制工程设计[J].中国给水排水,2023,39(6):113-121.

[3]周道坤,刘晓伟,荣楠,等.湖北网湖自然保护区水质改善对策研究[J].环境科学与技术,2020,43(2):255-261.

[4]付俊峰,杨淑敏,宋炳月,等.人工湿地植被覆盖对营养物质净化作用的模拟研究[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2024,1(13):22.

[5]毛毅,饶世雄,陈铁,等.基于水动力水质模型的浅水型湖泊水环境治理目标可达性评估[J].给水排水,2024,60(2):65-71.

[6]刘克臻,周艳莉,崔潇龙.基于 InFoWorks ICM 模型的城市片区排水防涝方案优化研究[J].给水排水,2023,59(3):60-64.

[7]黄明,马飞虎,匡武,等.基于 MIKE21 研究生态补水对巢湖水质时空分布的影响[J].环境污染与防治,2024,46(4):463-470.

[8]奚斌,陈倩倩,陈伟,等.基于 Mike21 模型的河道水质提升工程试验研究[J].中国农村水利水电,2023(5):5-11.

作者简介:刘清华(1987.11—),男,工程师。研究方向:主要从事流域水环境综合治理相关研究。