



南水北调中线水源数字孪生 水质安全技术体系及应用

中线水源公司

2025·12

目录

CONTENT

01

项目背景

02

设计思路

03

创意内容

04

创新型及亮点

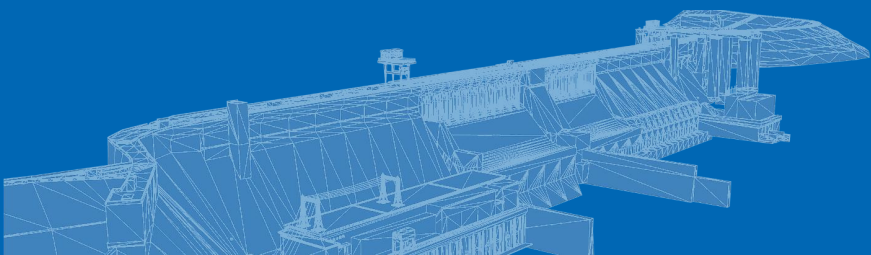
05

可推广性及预期成效

01

第一部分

项目背景



1. 项目背景

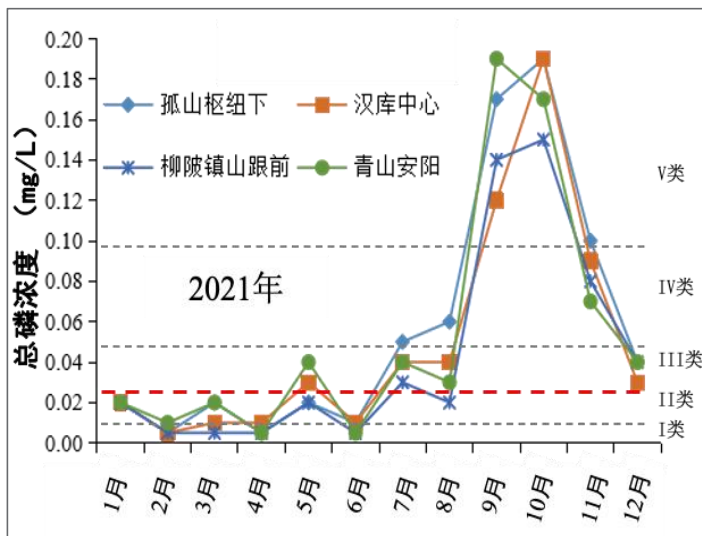
丹江口水库作为南水北调中线工程的水源地，是保障北方受水区供水安全的“生命线”。正式通水以来累计向北方输水调水逾750亿立方米，惠及沿线26座大中城市、200多个县（市、区），直接受益人口超1.18亿人。

目前丹江口库区水质**总体良好**，但仍存在外源污染输入及汛期偶发性总磷升高、局部库湾富营养化等**风险**：

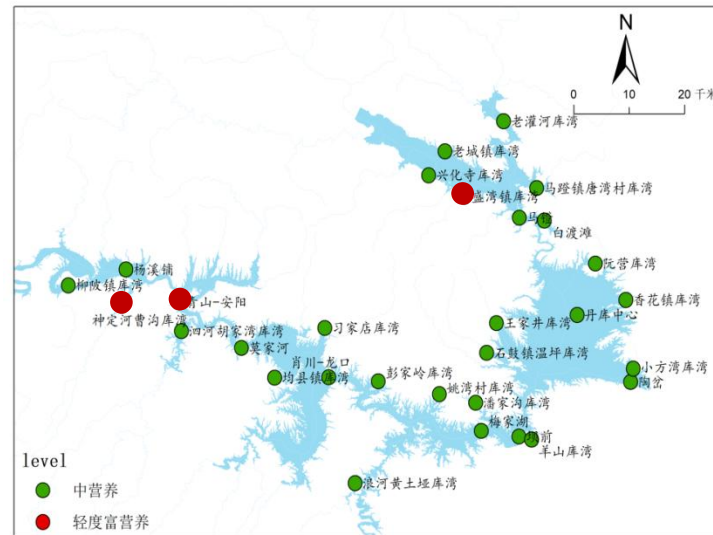
- **突发污染事故**：水源区桥梁数百座，危化品运输风险高；尾矿库共计275座，其中89座涉及重金属，尤其是**镉污染**风险大，如2021年11月老灌河、2023年8月丹江发生镉污染事件，近期汉江支流仙河也发生镉超标事件。
- **汛期水质超标**：水库水质受上游来水影响显著，汉江秋汛期间**总磷**等水质指标存在偶发性升高风险，特别是极端来水情况下可能出现水质风险，影响水库水质。



水源区尾矿库分布



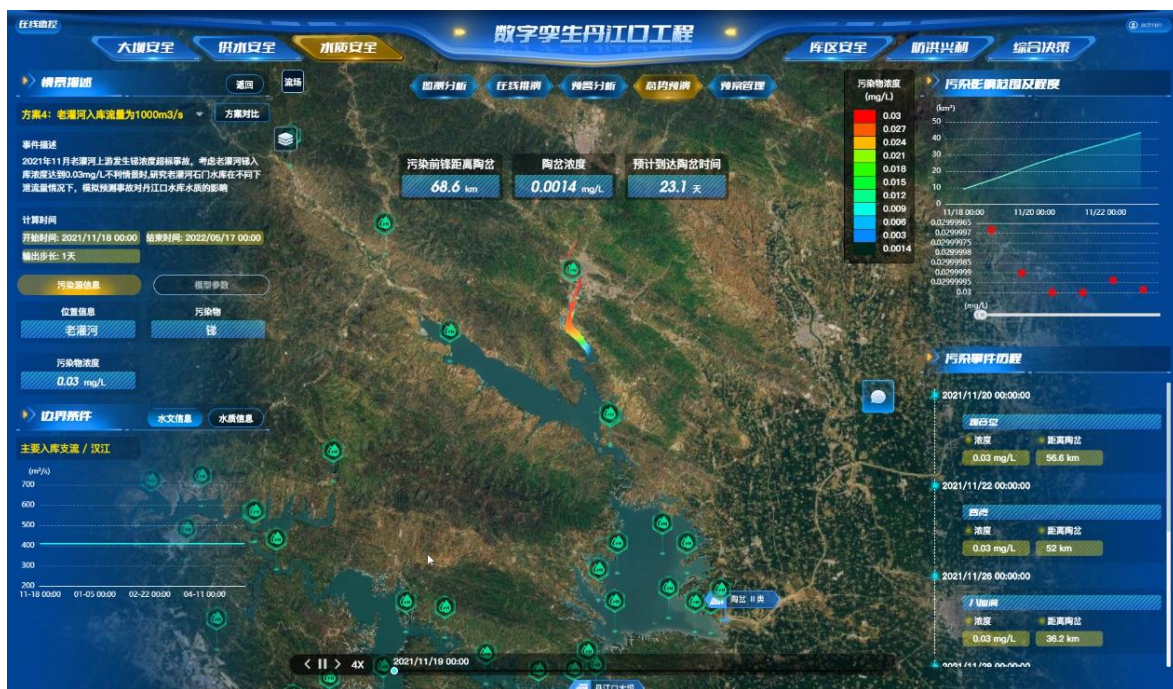
总磷汛期升高



局部库湾富营养化

1. 项目背景

2021、2023年入库支流老灌河和丹江相继发生尾矿库泄漏，导致上游河道重金属镉浓度超标。



2021年老灌河镉超标事件模拟



2023年丹江镉超标事件模拟

构建数字孪生水質安全技术体系，用于丹江口水库运行期间**常规和风险指标**的高效高精度**模拟推演**，对显著提升水质安全保障能力具有重要应用价值。

02

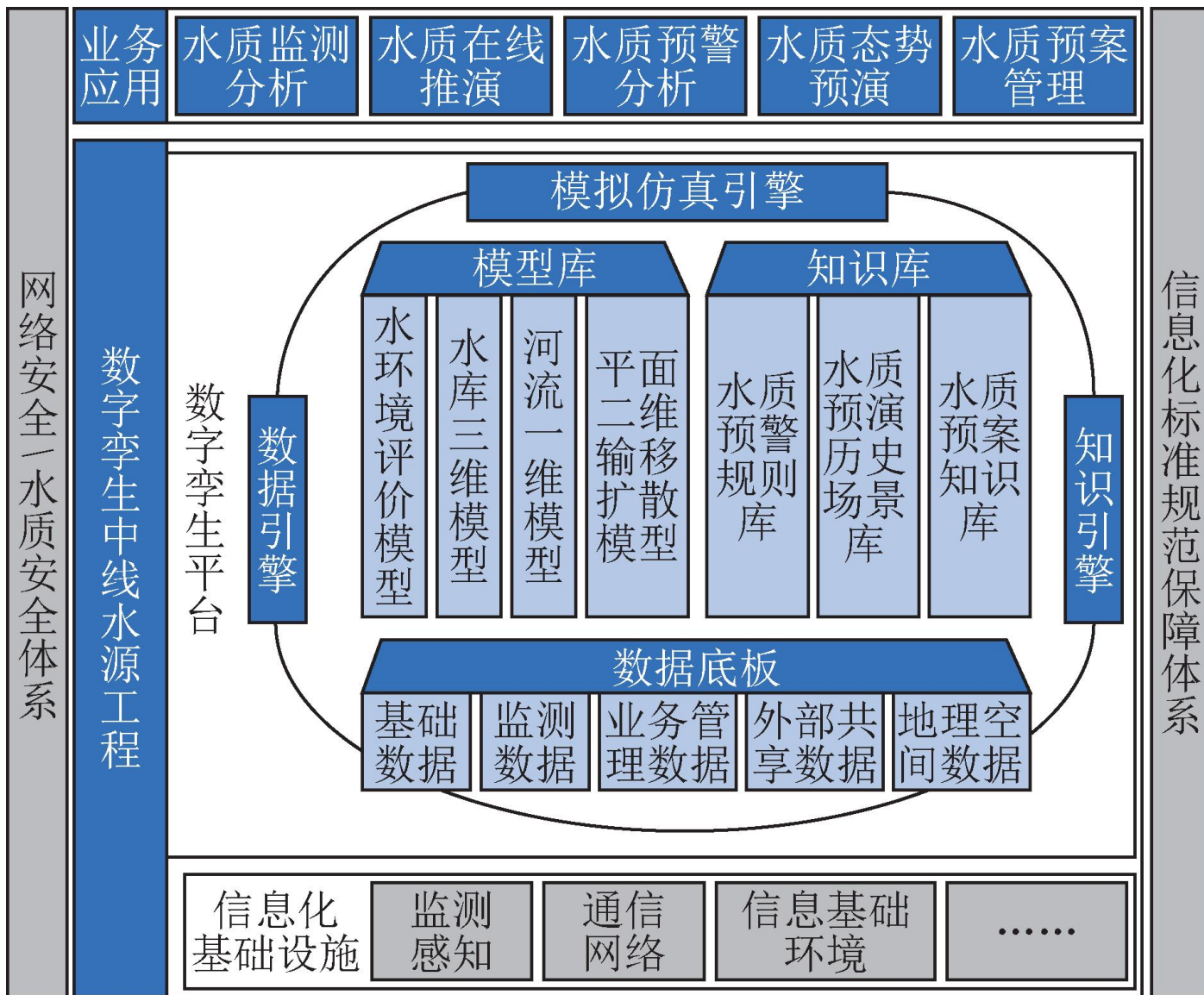
第二部分

设计思路



水质安全技术架构

- **数据底板。**包括数据接入更新、水质安全数据资源中心建设，主要实现多源数据融合，为模型和业务提供算据支撑。
- **模型库。**主要建设水环境评价、水库三维水动力水质、河流一维水动力水质等模型，平面二维污染物输移扩散模型和突发水污染事故模拟模型，作为核心支撑水质“四预”功能
- **知识库。**主要建设水质预警规则库、预演历史场景库和水质预案知识库，支撑预警分析、安全态势预演研判和预案决策。
- **业务应用。**包括水质监测分析、在线推演、预警分析、态势预演、预案管理，最终实现水质“四预”功能，提升水质安全智能分析决策能力。

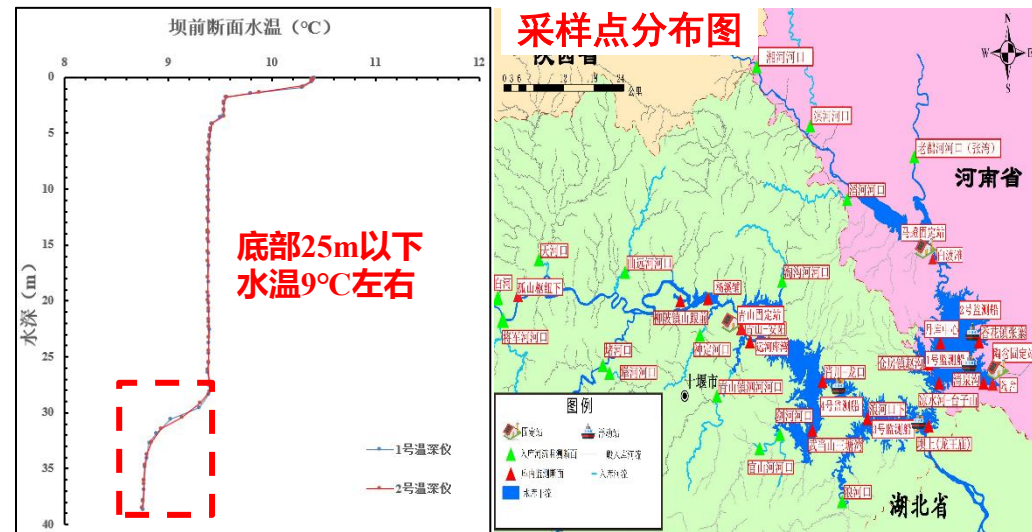


数字孪生丹江口工程水质安全技术架构

1. 水质安全数据底板建设

水质安全数据底板

- **水文数据**：收集接入库区**4条**入库支流水文监测数据，2023年库区**12条无水文站**入库支流流量数据，2023-2024年6次监测库区19条典型断面流场数据
- **水质数据**：接入库区及支流**32个逐月**人工监测数据，**16条**支流及**7个**库区**自动站**监测数据
- **地形数据**：收集集成库区库区**1:5000**水下地形数据
- **水温数据**：收集集成2023-2024年6次监测库区19条典型断面**水温监测**数据
- **共享数据**：接入**13处中线局**自动监测数据；与南水北调集团中线有限公司开展数据共享工作；接入了库周**24个国控断面**数据
- 实现水质安全数据采集、存储和管理，为模拟计算与应用分析提供算据支撑。



序号	站点名称	监测时间	水质类别	水温(°C)	pH无量纲	溶解氧(mg/L)	浊度(NTU)	电导率(μS/cm)	高锰酸盐(mg/l)
1	陶岔站	2024-10-07 00:00:00	II类	23.8	8.19	7.24	8.06	266	1.77
2	陶岔站	2024-10-07 01:00:00	II类	23.9	8.18	7.16	8.41	266	/
3	陶岔站	2024-10-07 02:00:00	II类	23.8	8.17	7.12	8.2	266.4	/
4	陶岔站	2024-10-07 03:00:00	II类	23.8	8.18	7.13	8.17	266.6	/
5	陶岔站	2024-10-07 04:00:00	II类	23.7	8.19	7.2	8.8	266.4	1.67
6	陶岔站	2024-10-07 05:00:00	II类	23.8	8.17	7.07	8.24	266.7	/
7	陶岔站	2024-10-07 06:00:00	II类	23.7	8.17	7.07	8.07	266.4	/
8	陶岔站	2024-10-07 07:00:00	II类	23.8	8.17	7.07	8.64	266.5	/
9	陶岔站	2024-10-07 08:00:00	II类	23.7	8.18	7.14	9.26	266.4	1.8
10	陶岔站	2024-10-07 09:00:00	II类	23.9	8.17	7.07	8.18	266.3	/

水质自动站监测数据

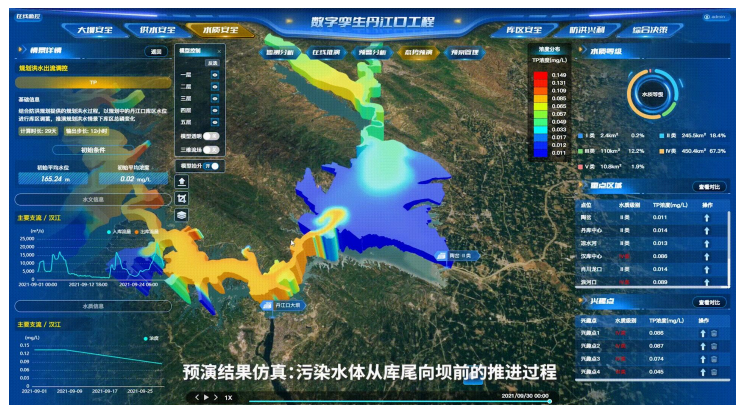
2. 模型库建设



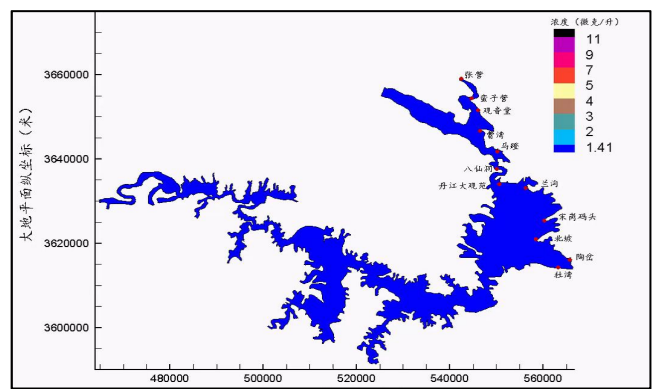
水质安全模型

建立以水动力水质机理模型为核心的模型库，实现了氮磷等关键指标浓度及污染扩散模拟

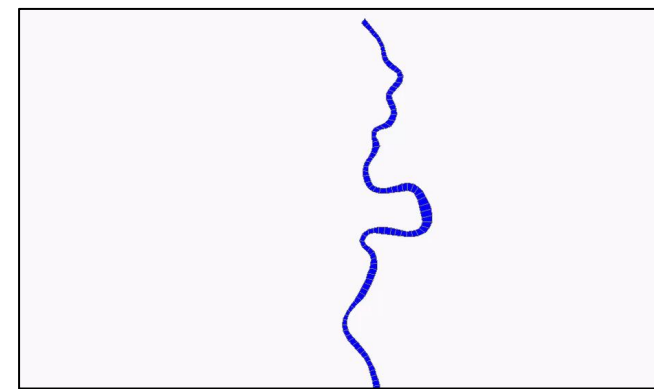
- 研发基于反应动力学机理的**三维水动力水质模型**，实现水库全域流场和浓度场、水质垂向分层的三维模拟；
- 研发具备模拟急缓流交替和干湿交替能力的**二维水动力水质模型**和突发水污染事故快速模拟模型；
- 研发河流**一维水动力水质模型**，模拟污染物在主要入库河流中的迁移过程及沿程浓度变化。



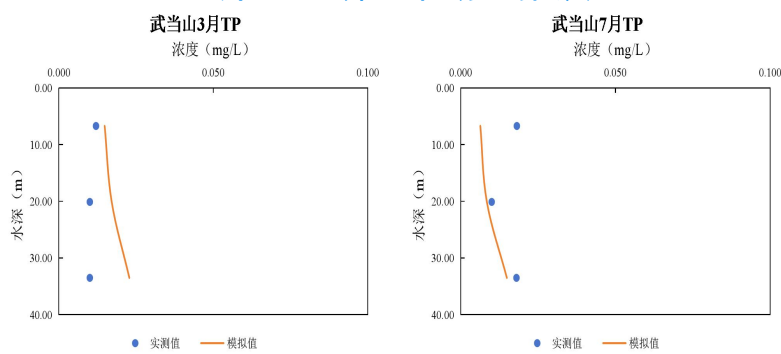
库区总磷三维动态推演



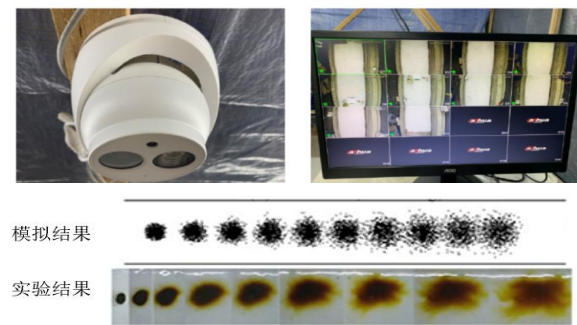
老灌河镉事故二维模拟



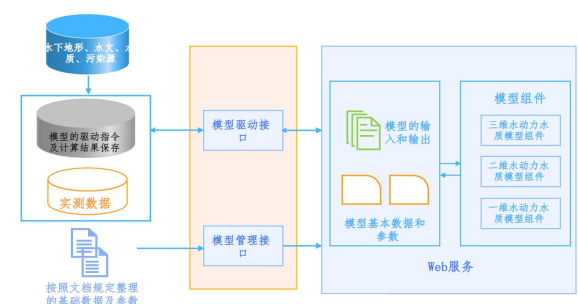
老灌河镉污染扩散一维模拟



总磷垂向验证



油膜运动轨迹验证



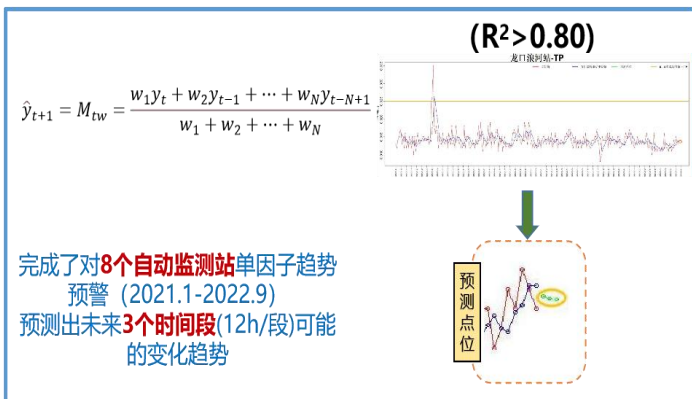
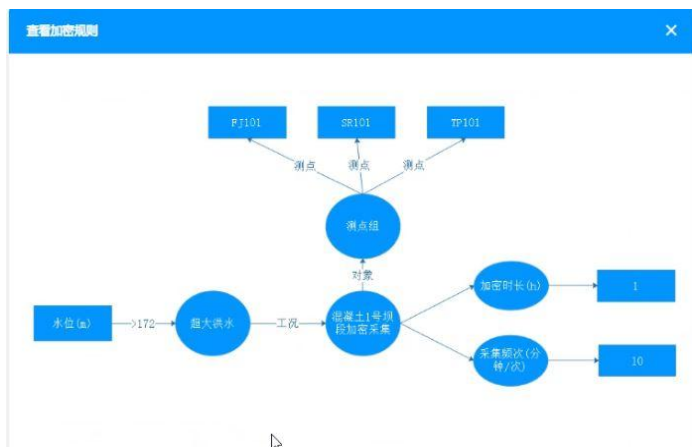
模型标准通用化流程

3. 知识库建设

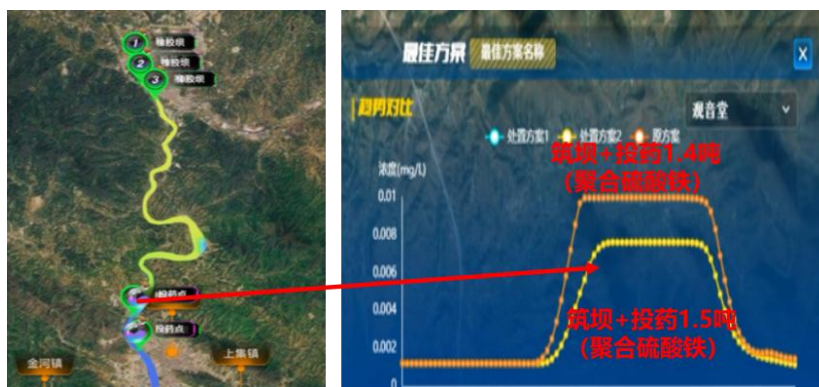
水质安全知识

建立水质预警规则库、水质预案库，支撑水质超标预警、应急预案自动生成

- 水质预警规则：开发**水质超标告警规则与图谱**，结合人工智能技术，对水质浓度异常升高趋势进行判定；
- 水质预案库：开发**应急监测方案自动生成规则**，构建**应急处置方案库**和**危化品及处置措施**信息库。



水质监测告警与异常趋势预警



应急处置预案库



阶段	时间	监测指标	采样点	监测频次
阶段一	2021/11/13-2021/11/22 (10天)	全指标 (污染指标+连带指标+常规指标)	所有断面	2次/天 陶岔4次/天
阶段二	2021/11/13-2021/11/22 (10天)	全指标 (污染指标+连带指标+常规指标)	断面减一半	2次/天
阶段三	2021/11/23-2021/12/02 (10天)	(污染指标+连带指标)	断面再减一半	1次/天
阶段四	2021/12/03-2021/12/12 (10天)	(污染指标)	三个断面	1次/天

应急监测方案

4. 水质安全“四预”应用建设

➤ 基于数据底板、模型库、知识库建设成果及数字孪生场景构建技术，**开发水质监测分析、在线推演、预警分析、场景预演、预案管理等业务应用**，实现水质监测分析和在线推演、预警分析、态势预演、预案管理功能的全链条贯通，提升水质安全管理效能。

预测

接入实时监测数据，自动调用模型在线计算，展示入库污染三维演进过程。



预警

对监测结果、在线推演的数据进行超标自动报警，实时了解水体超标风险。



预演

对典型组合场景下的库区水质变化、污染事故进行二三维仿真预演。



预案

针对污染事件，生成加密监测方案，提出可能的处置方案并评估实施效果。



03

第三部分

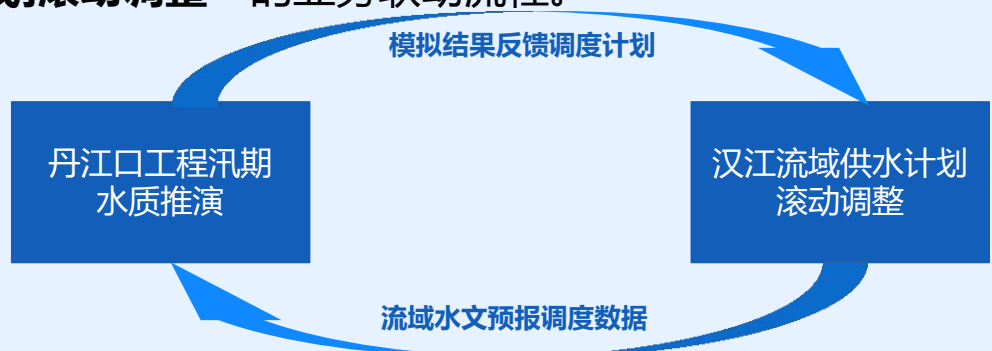
创意内容



1. 流域水文预报与水库水质安全互联互通

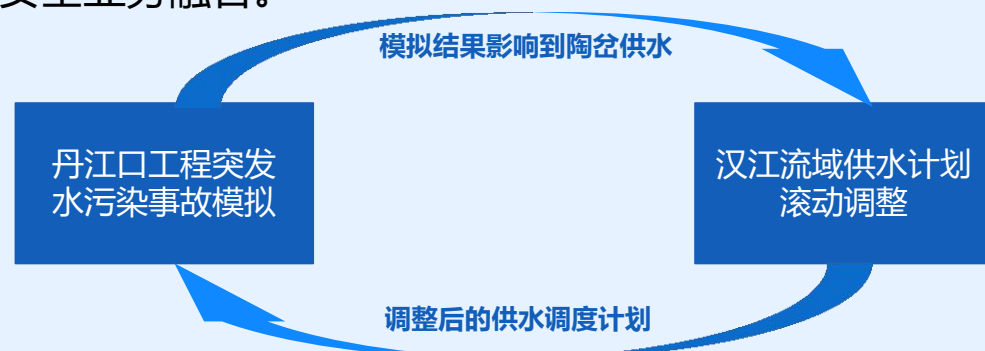
流域水文预报与水质安全推演互馈

- 以接口方式接入汉江流域水情预报数据，实现洪水期水质滚动推演；构建消息事件驱动的“库区水质预演-供水计划滚动调整”的业务联动流程。

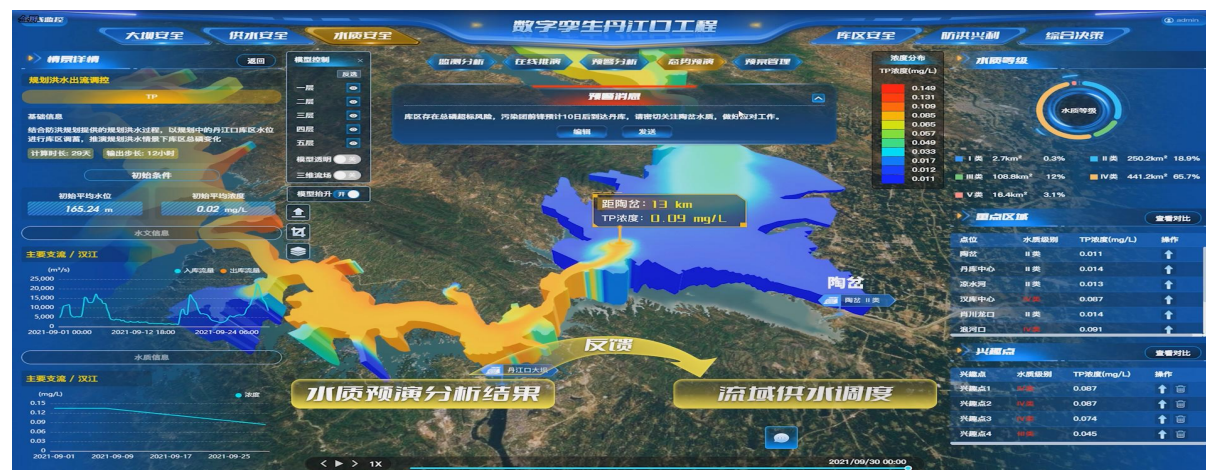


水质应急与流域供水安全互馈

- 构建消息事件驱动的“突发水污染预演-供水计划滚动调整”的业务联动流程，实现工程水质应急处置与流域供水安全业务融合。



流域水文预报与库区水质滚动预演联动互馈



突发水污染预演-供水计划滚动调整业务互馈

2. 研发丹江口水库三维水动力水质模型



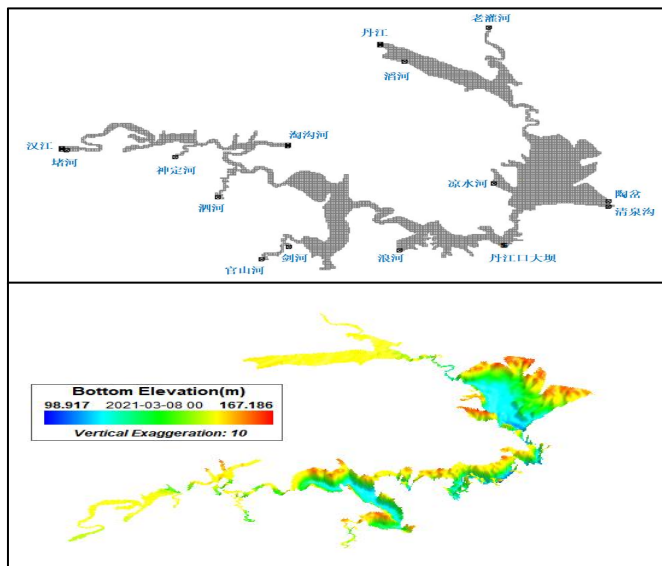
研发丹江口水库水体 (1050km²) 三维水动力-水质耦合机理数学模型, 模拟垂向分层水动力、污染物的时空分布与演进过程

难点

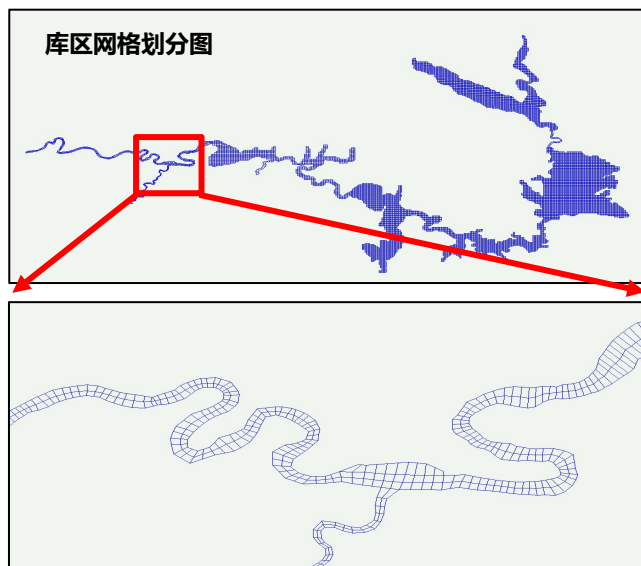
- 丹江口水库为大型深水湖库, 库区**水动力过程复杂**, 且存在明显的**水质垂向分层**现象, 难以真实反映汛期水体的空间异质性以及精细化表达污染物扩散范围的问题

解决思路

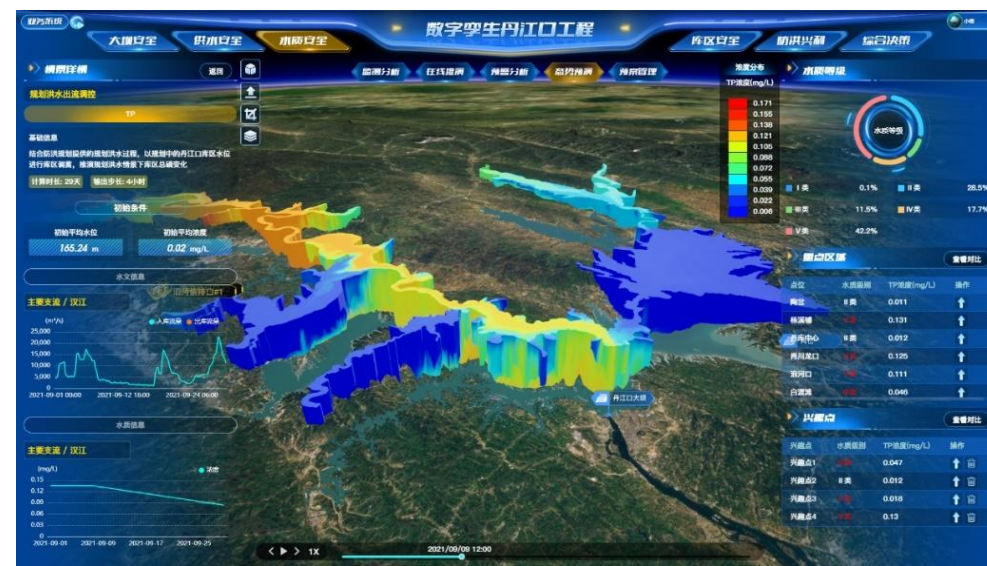
- 研发丹江口水库三维水动力水质模型, 突破**污染反应动力学建模、加速计算、融合监测数据的模型热启动**等关键技术, 有效提升模拟精度, 实现库区总磷等指标的高效高精度模拟推演。



地形及边界条件



模型网格构建



洪水场景下库区水质浓度场三维模拟仿真

3. 构建突发水污染事件快速模拟预演技术体系

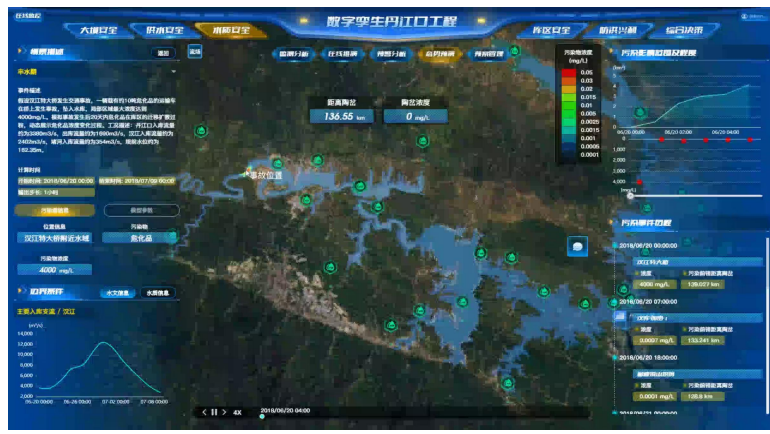


难点

- 丹江口水库汉库和丹江水动力交换复杂，如何在复杂流场条件下实时、准确模拟污染物输移扩散过程？
- 丹江口水库范围大污染物类型（易溶于水和难溶于水）和排放方式多样（瞬时、持续和间断排放），现有的模型难以全面覆盖水库所有潜在的突发水污染场景。

解决思路

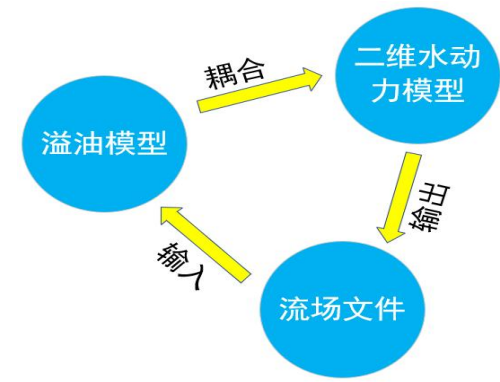
- 开发污染场景边界自主设置算法，实现污染物不同排放方式情景模拟；
- 开发水库二维高精度水动力数学模型，准确模拟库区复杂水流结构，并实现与污染物输移扩散模型和“油粒子”模型深度耦合，实时提供库区水位、流场等数据。
- 精准预判污染带前锋运动轨迹、浓度变化、距敏感目标实时距离和预计到达时间



易溶于水污染物模拟结果



难溶于水（溢油）污染物模拟结果



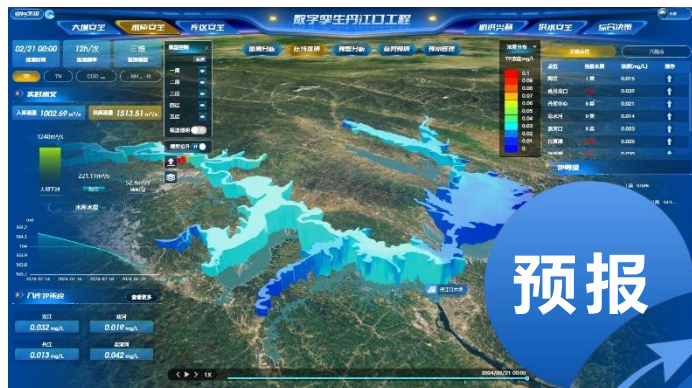
水动力模型与溢油模型耦合

4. 水质“四预”业务的全链条贯通

➤ 以完善优化数据底板、模型平台及信息化基础设施能力为基础，以研发的高精度水动力水质机理模型为核心，打造具有水质在线推演、预警分析、态势预演、预案管理的水质安全“四预”平台。

水质预报

每天定时预测
预报水质浓度
分布、类别、
跨类等分析



预报

预案

水质预案

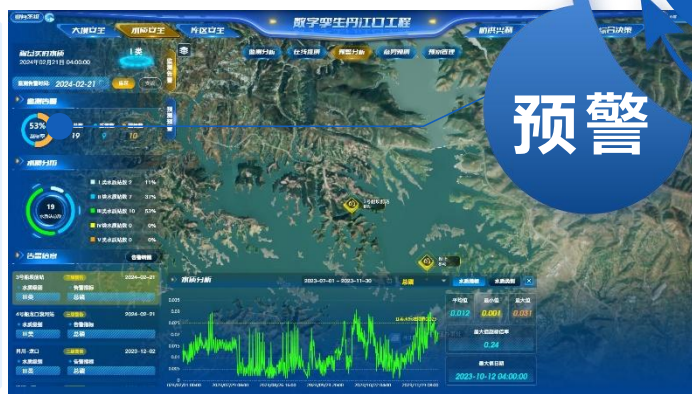
自动生成加密
监测方案，并
模拟评估预案
处置效果



模型

水质预警

基于预警规则，
自动筛选不达
标的水质断面、
超标指标等



预警

预演

水质预演

结合预警信息，
实现多情景下
污染物迁移演
变过程预演



监测分析

融合多源异构
数据，进行水
质基础数据分
析及展示



04

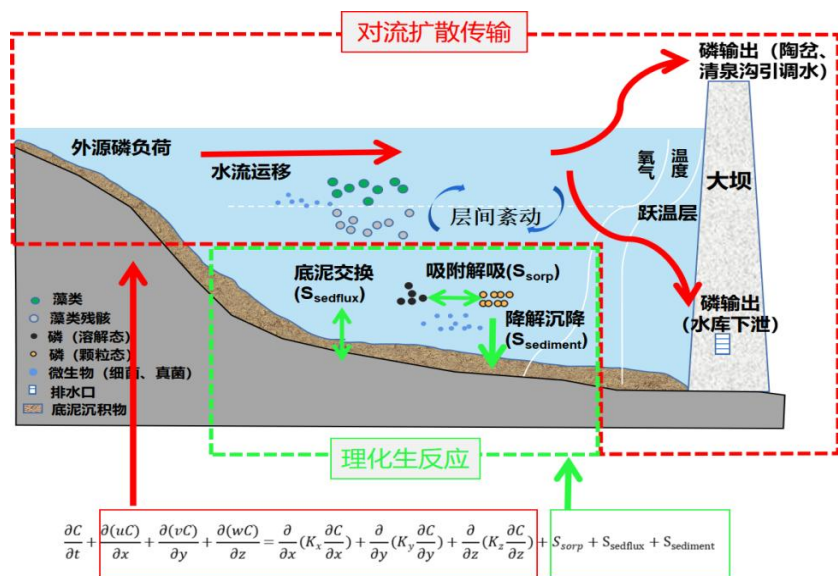
第四部分

创新性 & 亮点

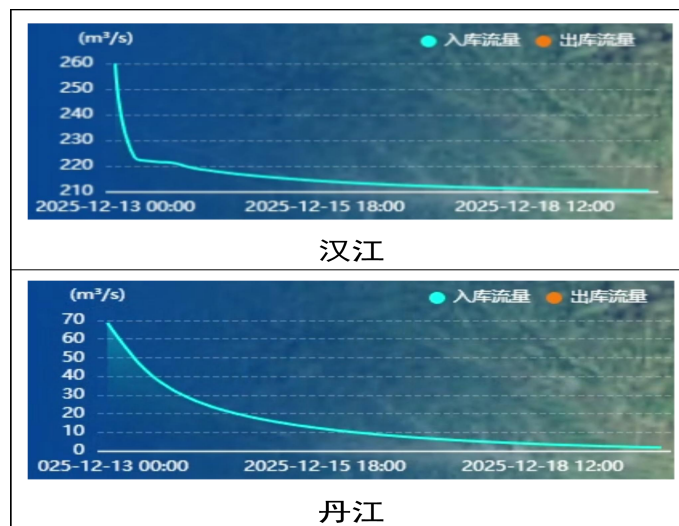


1. 耦合水文预报与多维水动力水质模型的水质安全“四预”应用

- 依托数字孪生丹江口平台，融合高精度算据、高性能算力与高精度算法，构建耦合水文预报模型与1/2/3维水动力水质模型的“四预”应用体系，实现水质“预报—预警—预演—预案”一体化。
- 可动态模拟突发污染扩散、实时推送预警、评估处置效果，全面支撑水质安全“回溯历史、感知当下、预见未来”的智能管理。



丹江口总磷迁移转化过程



主要入库河流未来7天流量预报



水质指标浓度变化趋势与垂向分层

2. 开创“人防”向“技防”转变的水质安全创新管理模式

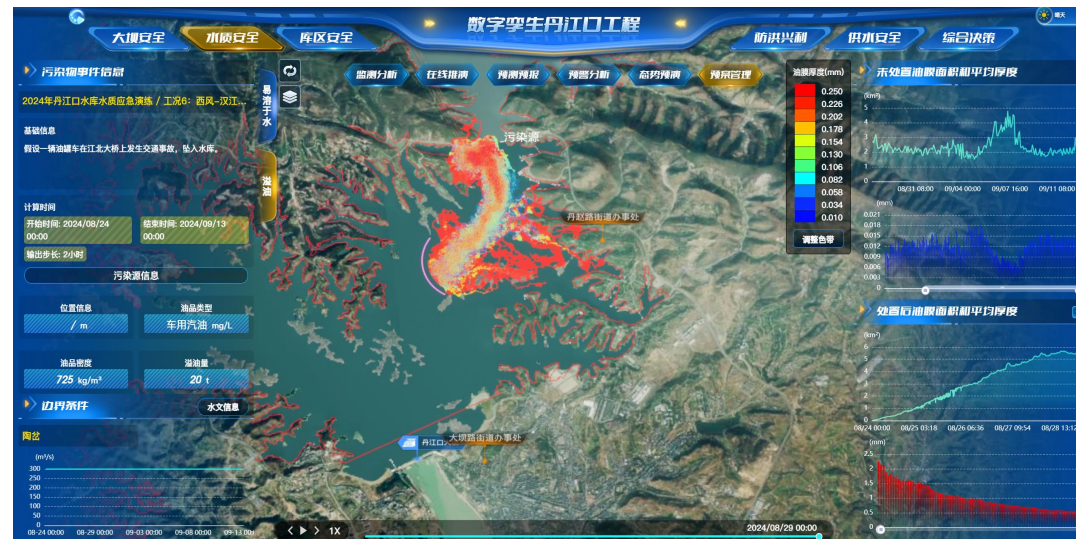
- 从“被动应对”到“主动预防”
 - 阈值预警 + 趋势预测，提前发现潜在风险
 - 模拟污染扩散路径，预置处置方案
- 从“经验判别”到“智能决策”
 - 基于历史与实时数据的模型辅助决策
 - 正向预演、处置预案与模拟效果迭代互馈



实时预警



推荐水质加密监测方案



处置预案与模拟效果迭代互馈

05

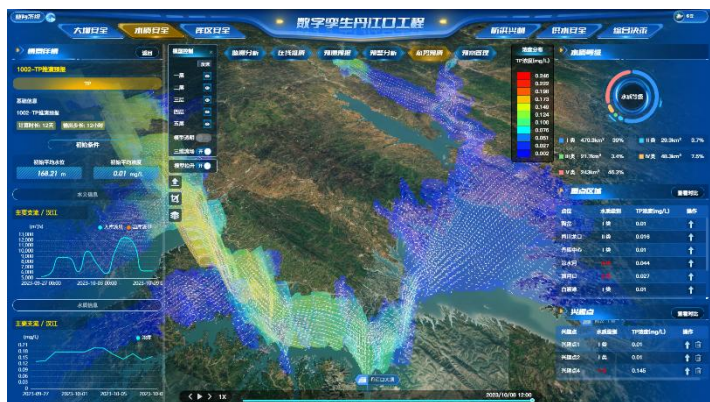
第四部分

可推广性及预期成效



1. 可推广性

- 成果在丹江口水库2023年、2025年汉江秋汛及水库170m蓄水、突发水污染等重要事件和水库日常运行管理等业务中，投入使用并发挥显著作用。
- 多项水质数字孪生关键技术成果在南水北调中线、三峡、西藏中曲流域、新疆头屯河流域等多个工程与流域智慧化建设中成功推广应用，成效显著，在行业中发挥了引领示范作用。



丹江口水库



三峡水库



西藏中曲



头屯河流域



岳城水库



实现全线水质十二项指标

南水北调中线

2. 应用成效

- 数字孪生平台自2023年上线以来，除了为公司日常运行管理提供技术支撑外，还开展了各类**突发水污染事件应急推演**、**水库低水位运行期典型与极端来水条件下专项推演**、**陶岔引渠拦藻网系统应用效果推演**以及**2023-2025汉江秋汛专项推演**，通过前瞻性分析与模拟推演，提前制定有针对性的防控措施，切实提升水源地工程安全、水质安全管理水平，为汉江秋汛防御与汛后蓄水提供前瞻性、科学性、安全性的决策支持。

2023年4月24日

泗河偷排事件模拟推演

2024年9月29日

丹江口库区及其上游流域—
中线总干渠联动水质安全保障应急演练

2025年8月

陶岔引渠拦藻网系统应用效果推演

2023年8月28日

丹江发生了锑浓度超标事件

2025年6月

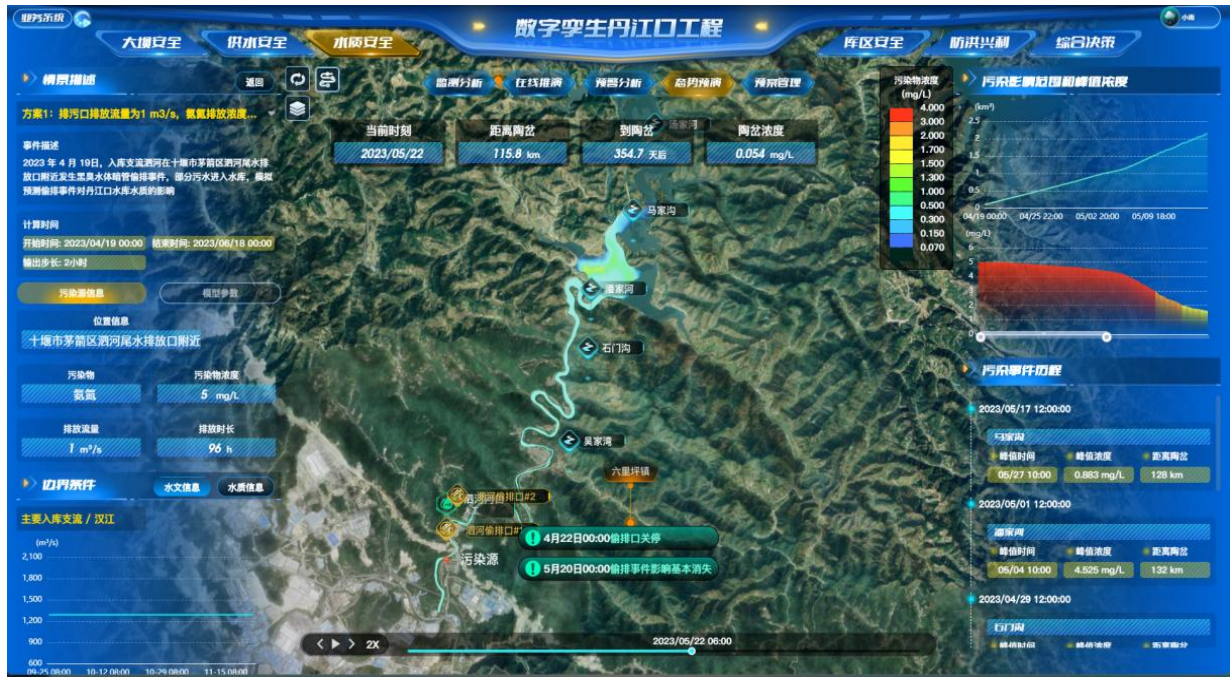
水库低水位运行期典型与极端来水条件下专项推演

2025年9月19日

2025年度数字孪生汛期专项推演

2.1 泗河偷排污水事件

2023年4月24日，泗河沿岸企业非法偷排污水被媒体曝光后，复演偷排污水事件对库区的影响范围和影响程度。复演结果表明，4月22日偷排口被关停后，累积最远影响到泗河马家沟附近水域，**尚未进入汉库**，污染带距陶岔约116公里，**不会影响陶岔供水**。



泗河沿岸企业非法偷排污水事件对库区影响复演结果（实测工况）

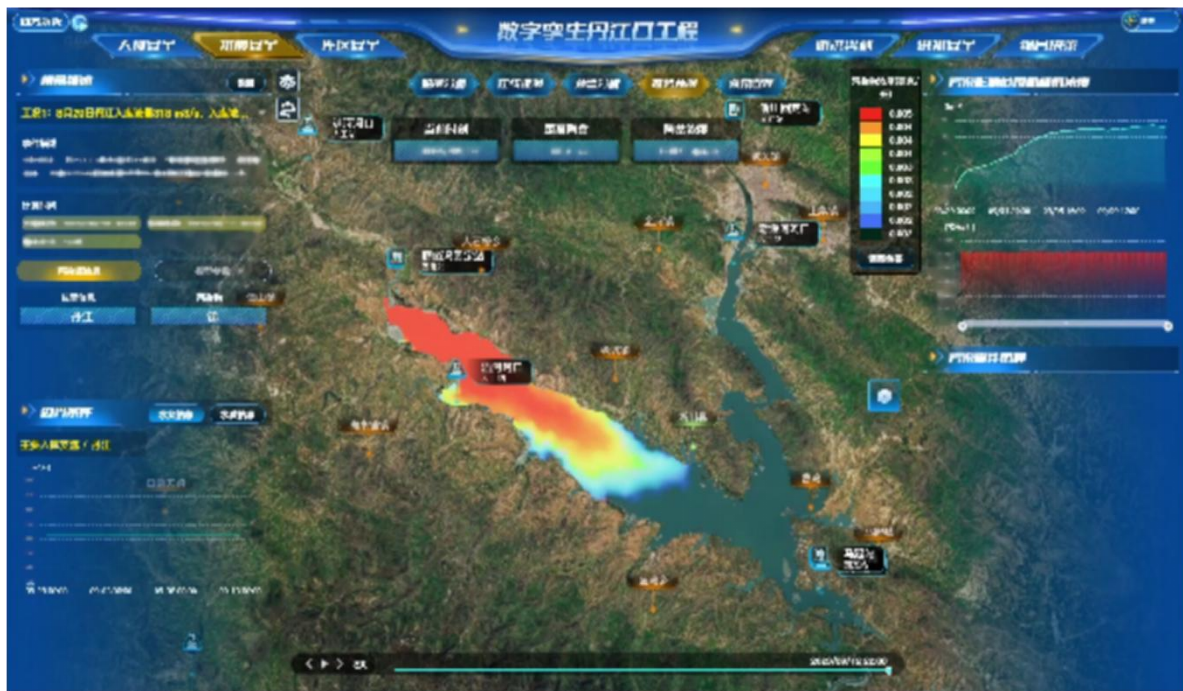


泗河沿岸企业非法偷排污水事件对库区影响复演结果（最不利工况）

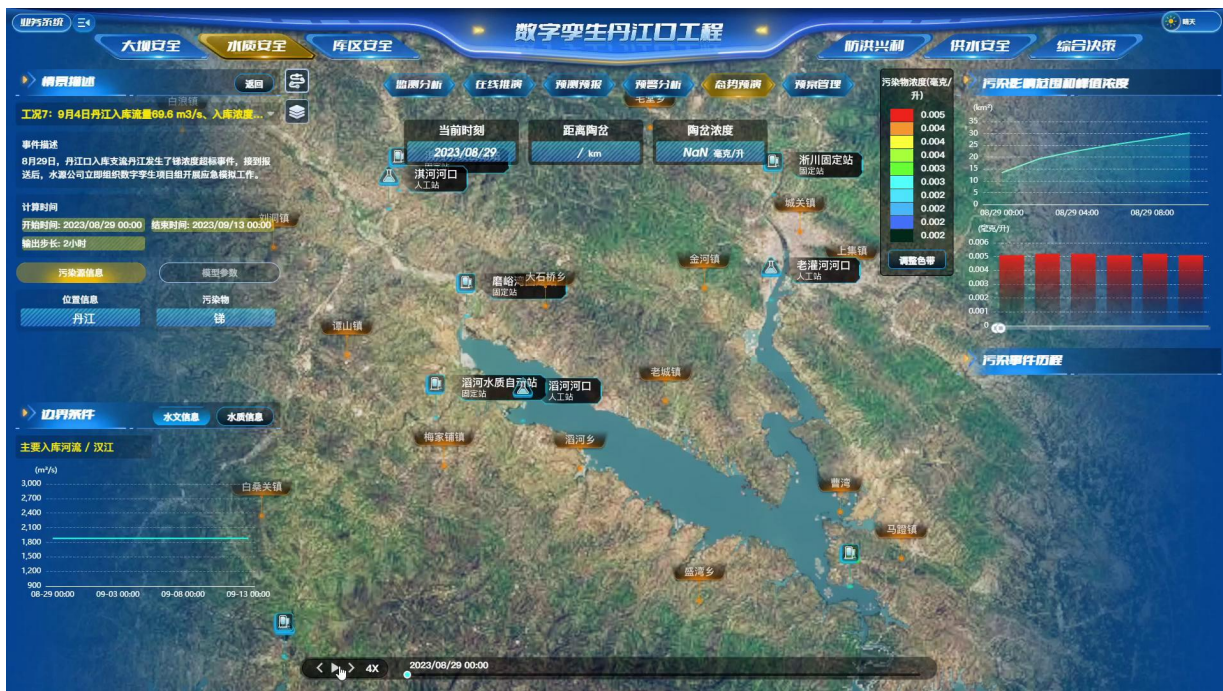
2.2 丹江入库锑浓度超标事件

2023年8月28日，水库入库支流丹江发生了锑浓度超标事件，连续7日滚动推演锑浓度超标对库区水质影响范围和影响程度。提前预测至9月4日，库区未来15天内锑浓度不存在超标区域，事件对库区影响基本消失。

本次推演科学、准确研判了本次突发事件对库区水质影响，为制定应急处置方案提供了有效技术支撑。推演成果以《水利部长江委水资源节约与保护局关于报送荆紫关锑浓度超标应急工作简报的函》（总7期）报送水利部。



2023年8月29日推演结果

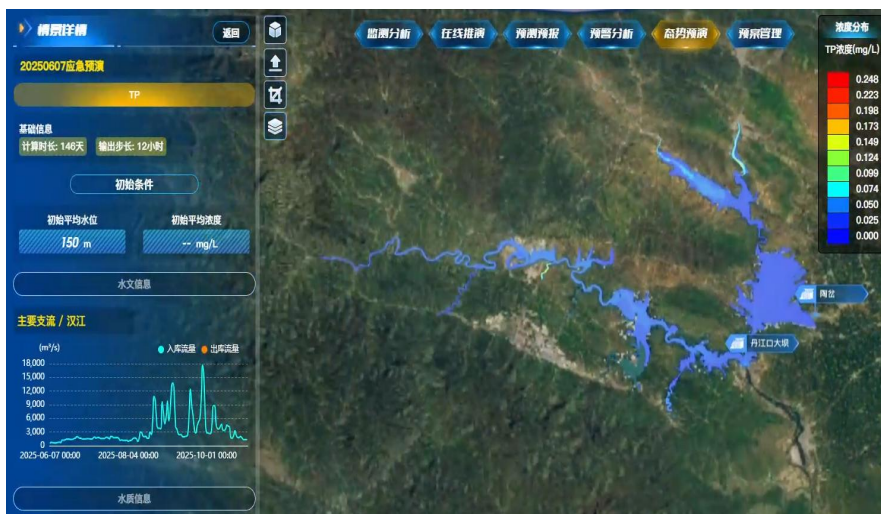


2023年9月4日推演结果

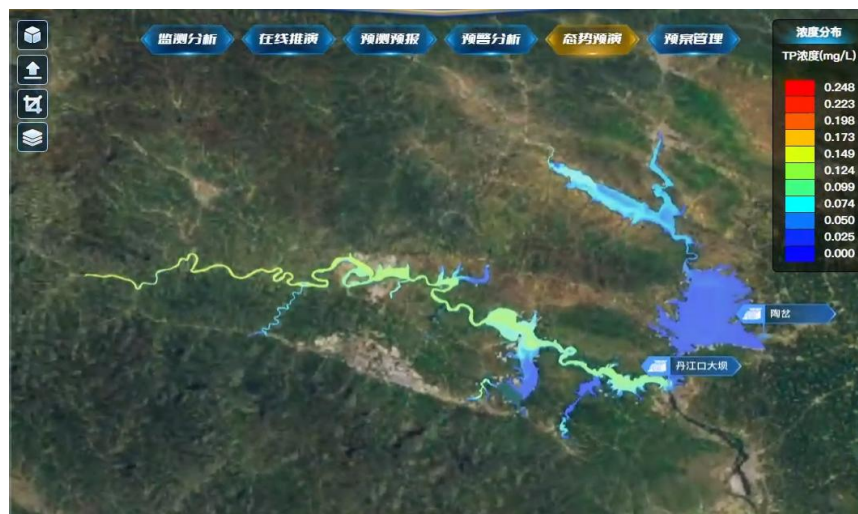
2.4 水库低水位运行期典型与极端来水条件下专项推演

2025年水库低水位运行期，采用三维水动力水质模型，按2021年来水重现及水库蓄到170m条件下，推演库区25年汛期水质安全形势及对陶岔水质的影响。

推演结果表明：整个模拟周期内，陶岔总磷浓度受影响但始终维持Ⅱ类及以上水质。



7月1日总磷预测



9月18日总磷预测



9月27日总磷预测



10月15日总磷预测

助力治江事业高质量发展，
护佑“一泓清水永续北上”。