

# 我国地表水环境质量预报技术进展及在岱海流域的探索实践

金海峰<sup>1</sup>, 张国辉<sup>2</sup>, 王乐乐<sup>3</sup>, 阮时雷<sup>1</sup>, 张婷婷<sup>1</sup>

1. 内蒙古环保投资在线监控有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010020

2. 乌兰察布市生态环境局, 内蒙古 乌兰察布 012000

3. 凉城县岱海自然保护区服务中心, 内蒙古 乌兰察布 013750

**摘要:**研究了近40年来我国水质预报技术的发展历程,分析了水质空间维度预报和时间维度预报的技术演进,明确水质预报机理模型具有更广泛的应用空间,技术发展开始呈现与大数据技术融合的趋势。在岱海水质预报业务实践中,融合大数据和水质预报机理模型技术,构建了以水质预报预警为基础的水环境精细化业务应用体系,探索了岱海水环境“事前管理”新模式。

**关键词:**地表水环境;预报预警;概率模型;机理模型;事前管理

**中图分类号:** X84; X832 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-6002(2025)S1-0027-07

**DOI:** 10.19316/j.issn.1002-6002.2025.S1.04

## Progress in Forecasting Technology of Surface Water Environment Quality in China and Its Exploration Practice in Daihai

JIN Haifeng<sup>1</sup>, ZHANG Guohui<sup>2</sup>, WANG Lele<sup>3</sup>, RUAN Shilei<sup>1</sup>, ZHANG Tingting<sup>1</sup>

1. Inner Mongolia Environment Protection Investment Online Monitoring, Hohhot 010020, China

2. Ulanqab Ecological Environment Bureau, Ulanqab 012000, China

3. Liangcheng County Daihai Nature Reserve Administrative Center, Ulanqab 013750, China

**Abstract:** This study examines the progress of water quality forecasting technology in China in the past 40 years, analyzing progress in both spatial and temporal dimensions of water quality prediction. It is clear that the water quality forecasting mechanistic models have wider application potential, and technological development is beginning to show a trend of integration with big data technologies. In the operational practice of water quality forecasting in Daihai basin, combined with big data and water quality forecasting mechanism model technology, a refined operational application system for water environment management based on water quality forecasting and early warning has been constructed. This explores a new model of “pre-management” for the water environment in Daihai basin.

**Keywords:** surface water environment; forecast and early warning; statistical model; mechanistic model; prior management

经过多年快速发展,我国经济取得了长足进步,但与此同时,环境污染问题日益凸显。为此,国家大力推进环境监测与治理工作。地表水作为支撑工业生产和民生福祉的重要自然资源,其保护与污染治理工作的紧迫性愈加突出,因而亟需进一步提升水环境监管能力,并加大水污染治理力度。

当前,我国开展地表水监管的技术手段以监测为主,在加强污水、雨水达标排放的前提下,通过覆盖广泛的地表水环境质量监测网络,实现对地表水水质的监测、监督和监管,并依托监测数

据,通过适当的分析方法,开展水污染溯源、污染通量核算、水环境承载力分析等后期工作。综合来看,我国当前地表水环境管理采用的是“事中监测、事后评估”的模式。

地表水环境质量预报预警是地表水环境管理领域的新发展方向,能够实现对地表水环境的“事前管理”。水环境预报预警技术的引入,能够完善地表水环境管理的“事前预警、事中监测、事后评估”全链条体系,具有广泛的应用前景。但在实践应用中,存在技术门槛高、理论不清晰、系统性不足、应用落地困难等问题。

收稿日期: 2025-09-24; 修订日期: 2025-11-04

第一作者简介: 金海峰(1984-),男,蒙古族,内蒙古通辽人,学士,高级工程师。

通讯作者: 张婷婷

# 1 我国地表水环境质量预报预警研究进展

我国地表水环境质量预报预警研究最早可追溯到 20 世纪 80 年代。许可<sup>[1]</sup>尝试将河流作为一个系统,通过推导河流“完全混合式化学反应槽(CSTR)模型”卡尔曼滤波方程组,以氧亏浓度为测量对象,实现对下一时段河流水质的预报。高维真<sup>[2]</sup>基于上游和沿程污染物汇入情况,推导了预测下游断面水质的算法模型。

截至目前,国内水质预报按预报对象可分为两类,分别为水质空间维度预报和水质时间维度预报。水质空间维度预报,类似于洪水预报,是基于上游及沿程污染物汇入情况,预报下游断面水质情况;水质时间维度预报,是基于当前时刻水质情况,预报下一时刻的水质情况。水质时间维度预报按预报周期可分为两类,一类为短临预报(时点以小时、日为单位),另一类为长期预报(时点以月、季、年为单位)<sup>[3]</sup>。在预报技术上,从目前的文献及工程实践来看,水质预报方法分为基于概率模型的预报方法和基于机理模型的预报方法,具体见图 1。

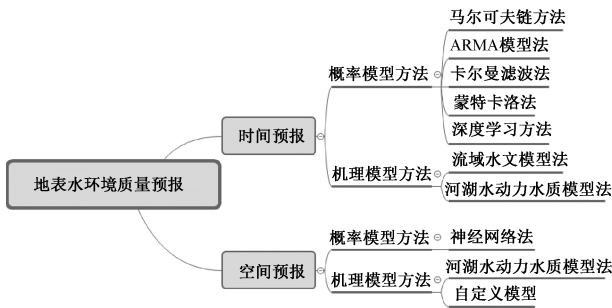


图 1 我国地表水环境质量预报体系划分

Fig. 1 Classification of surface water environmental quality prediction system in China

## 1.1 水质空间维度预报

从实际需求角度,水质空间维度预报主要应用于 3 个领域:环境咨询、水质预报、水污染应急评估。在环境咨询中,需要基于周边现实环境及建设项目污水排放情况,评价工程建设对特定地表水监测断面的影响。这种预报基本上是基于机理模型实现。在水质预报领域,通常是用于预判流域或水体中的污染迁移扩散对某些区域水质的影响,采用的方法既有概率模型法<sup>[4]</sup>,也有机理模型法<sup>[2,5-7]</sup>。在水污染应急评估领域,水质空间维度预报得到了广泛应用。从目前的实践应用

看,该领域多采用机理模型法,通过对机理模型在代码级的二次开发与封装,建设在线水污染应急系统(C/S 或 B/S 架构)。所采用的机理模型的来源有两种:一是自有模型,即对一/二维水动力水质方程组的数值求解;二是成熟软件,即采用成熟的科研或开源模型。从应用趋势看,水污染应急评估是水质空间维度预报的主要应用方向<sup>[8]</sup>。

## 1.2 水质时间维度预报

在实践应用中,水质时间维度预报主要应用于地表水环境质量管理。管理机构期望能够借其及时预判监控断面的潜在超标风险,以预先采取防控措施。在模型建设方面,水质时间维度预报发展出两条技术路线,即概率模型方法和机理模型方法。概率模型方法仅仅关注监控断面,通过对断面长时间序列水质监测数据进行建模,构建针对该断面的水质预报概率模型。概率模型方法主要包括 ARMA<sup>[9-10]</sup>、机器学习<sup>[11-12]</sup>、神经网络<sup>[13-14]</sup>、马尔可夫链<sup>[15-17]</sup>等。其中,马尔可夫链属于无记忆模型,ARMA 模型和神经网络模型属于简单的有记忆模型,而机器学习则属于能够深度学习和记忆历史数据复杂规律的高级有记忆模型。综合来看,机器学习方法的预报效果较好。在机理模型水质预报方面,主要采用的模型包括 QUAL2K、WASP、EFDC、MIKE、Delft3D 等。由于不同模型的特点不同、应用场景不同,目前还难以评价哪个模型更优。周刚等<sup>[18]</sup>从模型的通用性、可靠性、友好性、先进性和易用性角度出发,建立了水质模型的综合评价指标体系,认为 Delft3D、EFDC 模型较优。从应用前景看,概率模型方法只能应用于单个断面的水质预报,不具备溯源、水环境承载力评估等衍生应用空间;而机理模型不仅能够综合考虑河湖及其流域的环境要素情况,其衍生应用前景也更为广阔。

## 1.3 水质预报技术发展趋势

从当前的应用实践来看,国内水质预报需求更多来源于水质时间维度预报,因为借此可以实现对流域水环境的“事前管理”。在模型应用方面,一个重要趋势是将流域水文模型和河湖水质模型相结合,以便能够统筹考虑面源和点源污染影响。例如,张万顺<sup>[19]</sup>采用将流域面源模型与河湖水质模型耦合的方式,开发了三峡库区水环境风险监控预警平台、三峡库区上游流域水环境风险监控预警平台(四川)、三峡库区水质水生态预测预警平台(重庆),实现了对三峡库区总磷、总

氮、氨氮、化学需氧量、叶绿素 a 等 28 项指标的预测预警,以及对三峡库区上游四川、重庆面源污染的预报。由于机理模型的运算成本高,不适合用于开展水污染溯源、决策分析等业务,李宁等<sup>[20]</sup>采用并行计算技术,建立了淮河流域沙颍河支流水网水质模型,完成了对整个沙颍河水系的大规模水质模拟。马金锋等<sup>[21]</sup>基于 Delft3D 模型,验证了采用 Hadoop 构建水质预报模型的技术可行性,认为其在水环境模拟、水环境预测、水污染风险动态预警、水质目标管理、突发水污染事故应急决策等领域具有广泛的应用前景。同样基于集群运算技术,MA 等<sup>[22]</sup>以 SWAT 模型为例,验证了采用集群运算技术方法,针对复杂机理模型进行参数率定的可行性。此外,研究人员逐渐开始将概率模型方法与机理模型方法结合起来。刘悦忆等<sup>[23]</sup>针对模型输入中区间入流的不确定性,采用历史序列拟合的方法,提出区间入流的对数正态概率分布函数,并使用蒙特卡洛方法随机抽样模拟产生大量区间入流序列,作为水动力学-水质模型的输入条件进行计算,建立了基于蒙特卡洛模拟的水质概率预报模型。在实践应用方面,基于水质预报模型的多业务综合应用是未来的主要发展方向。李茜等<sup>[24]</sup>介绍了国家水环境质量预报预警系统研究进展,提出了基于地表水环境质量预报模型开展治理决策精细化支撑的主要应用方向,包括水环境风险评估、水环境容量核算及承载力评估、决策支持分析、污染溯源分析、突发水污染事故应急决策等。马金锋等<sup>[25]</sup>体系化地阐述了构建地表水环境质量预报预警大数据平台的技术框架,为水环境质量预报预警平台建设提供了思路和参考。刘军等<sup>[26]</sup>通过将原位监测与机理模型相结合,构建了秦淮河小流域水质预报业务化系统。

## 2 岱海流域水环境质量预报预警系统建设

岱海位于内蒙古自治区乌兰察布市南部凉城县一个狭长的陷落盆地中,由周围 20 多条河流和 中层地下水汇聚而成,属于典型的内陆咸水构造湖。

近 60 年来,岱海水面面积持续减小,水环境持续恶化。为加强水环境事前管控,乌兰察布市生态环境局开展了岱海水环境质量预报预警平台建设。河流水环境质量预报更加侧重于对

流-扩散过程模拟,而岱海属于典型的封闭式咸水湖,在开展水环境质量预报预警方面存在特殊性,其水质主要受盐度与温度共同驱动的密度分层影响,所以盐度模拟是构建岱海水环境质量预报预警模型的重点。

### 2.1 技术路线

岱海流域水环境质量预报预警系统已于 2024 年建设完成,其功能以水质预报预警为核心,并在此基础上拓展实现了水环境容量核算、流域水污染溯源、污染防治措施评估。对国内水环境质量预报预警技术的分析显示,概率模型方法已经不适用于水环境精细化管理。为此,岱海流域水环境质量预报预警系统建设选择了机理模型方法,并在模型选择、参数率定、溯源分析等方面采用了当前国内较为前沿的技术手段。针对岱海水环境质量预报预警需求,系统建设选用 EFDC 模型;考虑到流域面源污染的影响,将 SWAT 模型与 EFDC 模型在代码层级进行了耦合。耦合后的预报预警模型在水文、气象数据的驱动下,实现了未来 3 天水质预报预警,预报参数为水质监测常规 9 参数。

此外,基于耦合的水质预报预警模型,进一步实现了岱海未来 3 天水环境容量实时测算;基于前文所述集群运算技术,实现了入岱海河流污染溯源功能;通过对入岱海河流对应流域属性进行在线修改,实现了岱海流域治理措施效果评估。技术路线图如图 2 所示。

### 2.2 预报预警模型

#### 2.2.1 耦合水质预报预警模型的搭建

岱海流域水质预报预警是以分布式水文模型和水动力水质模型为核心,通过将两者耦合,构建了岱海流域水质预报预警模型体系。其中,分布式水文模型选择 SWAT 模型,水动力水质模型选择 EFDC 模型。模型耦合手段是将 SWAT 模型计算的污染物汇集量,通过 python 代码程序从 output\_rch 结果文件中提取出来,然后写入 EFDC 模型中对应的河流 inp 文件,由此实现了 SWAT 模型和 EFDC 模型的松耦合。图 3 说明了模型之间的耦合关系。其中,SWAT 模型的作用是实现流域陆相过程中的产流、汇流、产污、汇污过程的模拟,用于面源污染负荷核算;EFDC 模型实现了对岱海水质的模拟。此外,通过机器学习模型实现了水文数据预报,并将其作为 SWAT、EFDC 模型的驱动条件。

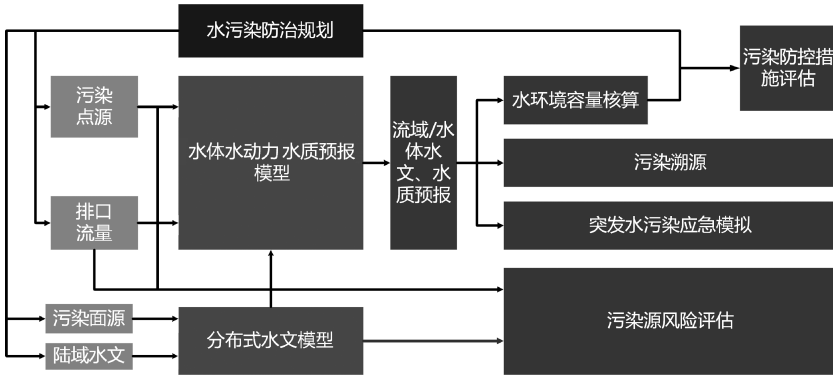


图2 岱海流域水环境质量预报预警系统技术体系

Fig. 2 Technical system of water environment quality forecast and early warning system in Daihai basin

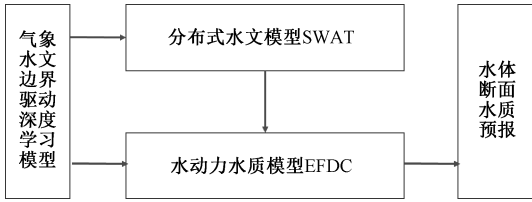


图3 SWAT模型与EFDC模型的耦合方式

Fig. 3 The coupling method between SWAT model and EFDC model

2.2.2 关键技术处理

耦合后的水质预报模型虽然在代码层面实现了耦合,但还需要外部数据的驱动。所需驱动数据主要是气象数据、河流水文数据。气象数据通过采集方式获取,来自凉城县境内的凉城气象站。水文数据来源于弓坝河(长期有水)水质自动监测站。

(1) 水下地形获取

水下地形是水质预报预警模型的重要驱动数据,影响着污染物的迁移、扩散过程。本文中的岱海水下地形获取采用“卫星导航系统+地基增强系统+单波束声呐”的技术手段实现,结果见图4。

(2) 参数设定与率定

水质预报预警模型需要进行参数率定,涉及SWAT、EFDC两个模型中的物理和化学参数。由于两个模型待率定的参数众多,传统率定手段的效率和可靠性难以保障。为此,本文采用模型参数自动率定方法<sup>[22]</sup>,技术路线如图5所示。其中,SWAT模型率定了SCS径流曲线数、主河道平均宽度、主河道水力传导率、土壤有效含水量、土壤容重、土壤蒸发补偿因子等23个参数,EFDC模型率定了底部糙率、Smagorinsky系数、水平涡黏系数、垂直涡黏系数、最大硝化

率、水解和矿化速率、半饱和常数、温度系数、沉降速率等37个参数。

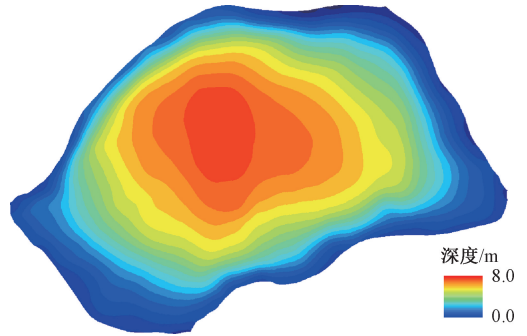


图4 岱海水下三维地形

Fig. 4 Underwater 3D topography of Daihai basin

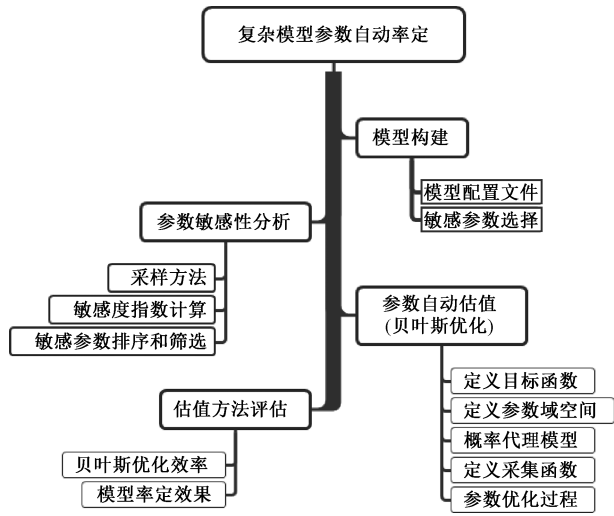


图5 模型参数自动率定方法

Fig. 5 Automatic calibration method for model parameter

2.3 业务系统设计

岱海流域水环境质量预报预警系统以水质预报预警功能为核心,建立起一套能够融合多源数

据的水质预报预警应用体系。在数据层,通过多种手段采集模型需要的数据,分类建库,依托计算机集群资源,多线调度耦合水质预报模型引擎。在此基础上,从岱海流域水环境管理业务出发,开发了水质预报预警、水污染溯源分析、水环境容量管理等核心功能模块,在数据展示方面开发了“数字岱海”功能。

### 2.3.1 水质预报预警模块

水质预报预警模块实现了水质预报预警功能。该模块通过 GIS 技术,实现了岱海水质预报预警,预报参数以总磷、总氮、氨氮、高锰酸盐指数为主。由于 EFDC 模型只能评估化学需氧量,为了能够将其转化为高锰酸盐指数,通过长期数据比对,率定出岱海水体化学需氧量与高锰酸盐指数之间的转换系数。

在预报时效方面,每天在午夜零点之前,预报出未来 3 天的结果。为了确保能够与岱海水质监测数据进行比对,模块按照岱海水质自动监测站的监测时点,输出对应的水质预报数据。此外,可以查看不同监测点位的水质预报数值以及水质等级评价结果。针对预报出的超标点位,自动计算首要污染物和超标倍数。

### 2.3.2 水污染溯源分析模块

基于水质预报预警模型,结合计算机集群运算技术<sup>[19]</sup>,实现了岱海流域污染溯源。污染溯源采用人工启动方式,当水质预报预警模型发出点位超标预警时,可通过选择对应的监测点位及超标污染物,启动污染溯源功能。由于本文采用了耦合的水质预报数值模型,所以污染溯源实际是核算不同河流对岱海超标点位的污染贡献率,并根据污染贡献率进行排名,将排名靠前的河流作为主要污染来源。

### 2.3.3 水环境容量管理模块

在实现水质预报预警的同时,开展了岱海水环境容量预报。当前,岱海的水质按照 V 类标准评定。为此,该模块基于水质预报预警模型核算出未来 3 天不同时段的水环境容量,计算不同时段的污染物总量。由此,根据岱海水环境容量和污染物总量预报结果,进一步核算出岱海的剩余纳污能力——纳污余量。

不同于传统的仅满足某个断面水质达标要求的水环境容量测算方法,本文在测算水环境容量时,要求岱海水质预报预警模型的任何一个网格均需要达到 V 类水质要求。此外,该模块还具备

设定水文条件下的水环境容量、纳污余量分析功能。

## 3 结论与展望

本研究实现了岱海流域水环境质量预报预警的体系化应用。岱海为干旱-半干旱地区咸水湖,由于点源污染已经得到全面管控,其水环境质量主要受面源污染影响。本研究通过将面源污染模型、湖库水质模型结合起来,通过融合气象、地形、土地利用、土壤、农田管理等数据,实现了岱海流域水环境精细化管控。从国内目前水环境管理实践看,大部分湖库型水体的污染来源主要受到面源污染和本底污染物释放的影响。因此,本研究构建的水环境质量预报预警系统具有重要的实践意义和借鉴价值。

岱海水环境质量预报预警系统的建设为岱海水环境管理提供了决策支持。目前,该系统已投入应用。鉴于岱海氨氮、总氮基本处于 II 类水质标准的实际情况,目前主要预报高锰酸盐指数和总氮。通过与实测数据进行比对评估,预报结果的纳污效率系数保持在 0.5~0.6。在污染溯源方面,基本锁定岱海污染主要来源于流域西南部地区,这与该区域存在大量农田面源污染的实际情况相符。在水环境容量方面,按照 V 类水质标准进行评估,可以发现,高锰酸盐指数和总氮经常出现超载现象,因而这两个指标属于重点管理对象。

相比水质机器学习模型,水质预报机理模型具有更广阔的应用前景。虽然我国开展水质预报预警研究已经有 40 多年,但从前期的研究来看,基本以理论为主。在技术发展过程中,形成了概率模型和机理模型两条路线。但从当前国内水环境管理的实际需求看,水质预报仅仅是基础,污染溯源、水环境容量分析等精细化管理业务的需求逐渐增多,而这些需求是概率预报模型所不能满足的。为此,本研究充分利用面源污染机理模型和岱海水质机理模型,通过计算机技术实现了岱海流域水环境管理的业务化应用,是理论向实践转化的一次重要探索。

未来,水质预报预警技术将与大数据技术进一步深度融合。机理预报模型本身就属于大数据技术的应用方向之一,其不仅融合了大量的多源数据,而且通过数学物理方法建立起数据之间的

关系,因而计算量巨大。为了满足水污染溯源、治理措施效果评估等多场景计算需求,并行计算、分布式计算技术与机理预报模型的深度融合已成为一个重要发展趋势。

### 参考文献 (References):

- [1] 许可. 卡尔曼滤波方法在河流水质预报中的应用[J]. 水文, 1981(6): 54-60.  
XU Ke. Application of Kalman Filtering Method in River Water Quality Prediction[J]. Journal of China Hydrology, 1981(6): 54-60.
- [2] 高维真. 一个河流水质预测预报模型[J]. 环境科学, 1981, 2(1): 31-34.  
GAO Weizhen. A River Water Quality Prediction Model[J]. Environmental Science, 1981, 2(1): 31-34.
- [3] 彭希珑. 赣江南昌段水源地水质预报模型研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2005.
- [4] 李亦芳, 程万里, 刘建厅. 基于人工神经网络与回归分析的水质预测[J]. 郑州大学学报(工学版), 2008, 29(1): 106-109.  
LI Yifang, CHENG Wanli, LIU Jianting. The Forecast of Water Quality Based on Artificial Neural Networks and Regression Analysis[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2008, 29(1): 106-109.
- [5] 吕俊, 彭斌, 唐奇善. 郁江水水质预警预报系统建设模式的探讨[J]. 水资源保护, 2006, 22(5): 81-83.  
LYU Jun, PENG Bin, TANG Qishan. Research on the Construction Mode of Water Quality Forecast System of Yujiang River[J]. Water Resources Protection, 2006, 22(5): 81-83.
- [6] 肖彩, 张艳军, 彭虹, 等. 水质预警预报系统的研究与应用——以汉江武汉段为例[J]. 贵州环保科技, 2005, 11(3): 1-6.  
XIAO Cai, ZHANG Yanjun, PENG Hong, et al. Research and Application of Water Quality Early Warning and Forecasting System—Taking Wuhan Section of Hanjiang River as an Example[J]. Guizhou Environmental Protection Science and Technology, 2005, 11(3): 1-6.
- [7] 钟名军. 数字河道水质预警预报研究及应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [8] 张建杰. 突发水污染事件条件下三峡库区饮用水源地水质安全预警预报研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [9] 胡兰心. 基于时间序列分析的上海水质变化趋势及社会经济驱动研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [10] 杜鑫, 吴钢, 许东. 基于 ARMA 模型的地表水水质预测方法研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(32): 221-224.  
DU Xin, WU Gang, XU Dong. Prediction Methods Analysis of the Water Quality Based on the ARMA Model[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(32): 221-224.
- [11] 邹青宏. 基于多时间尺度双向 LSTM 网络的水质预测方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [12] 王军, 高梓勋, 朱永明. 基于 CNN-LSTM 模型的黄河水质预测研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(5): 96-99, 109.  
WANG Jun, GAO Zixun, ZHU Yongming. Research on Yellow River Water Quality Prediction Based on CNN-LSTM Model[J]. Yellow River, 2021, 43(5): 96-99, 109.
- [13] 赵文喜, 周滨, 刘红磊, 等. 基于 BP 神经网络的海河干流叶绿素浓度短时预测研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(11): 134-140.  
ZHAO Wenxi, ZHOU Bin, LIU Honglei, et al. BP Neural Network-Based Short-Term Prediction of Chlorophyll Concentration Inmainstream of Haihe River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(11): 134-140.
- [14] 刘根生. 黄河兰州段水量水质预报模型研究[C]//水文泥沙研究新进展——中国水力发电工程学会水文泥沙专业委员会第八届学术讨论会论文集. 2010: 104-109.
- [15] 操群, 柳炳祥, 林洋. 马尔可夫链在鄱阳湖入湖河流水质预报中的应用[J]. 科技创新导报, 2011, 8(12): 235-236.  
CAO Qun, LIU Bingxiang, LIN Yang. Application of Markov Chain in Water Quality Prediction of Poyang Lake Inflow Rivers [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2011, 8(12): 235-236.
- [16] 王巨宏. 平顶山市湛河水水质预报模型研究[J]. 干旱环境监测, 2001, 15(3): 173-175.  
WANG Juhong. Study on Predictive Model of Water Quality of Zhanhe River in Pindingshan City[J]. Arid Environmental Monitoring, 2001, 15(3): 173-175.
- [17] 钟政林, 曾光明, 卓利, 等. 马尔可夫过程在河流综合水质预报中的应用[J]. 环境工程, 1997, 15(2): 41-44.  
ZHONG Zhenglin, ZENG Guangming, ZHUO Li, et al. Markov Process Applied to Prediction for River Comprehensive Water Quality [J]. Environmental Engineering, 1997, 15(2): 41-44.

- [18] 周刚,熊勇峰,呼婷婷,等.地表水水质模型综合评价技术体系研究[J].环境科学研究,2020,33(11):2561-2570.  
ZHOU Gang, XIONG Yongfeng, HU Tingting, et al. Comprehensive Evaluation Technology System for Surface Water Quality Models [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(11): 2561-2570.
- [19] 张万顺.流域水环境精细化模拟与智能云平台技术研究及应用[R].武汉:武汉大学,2021.
- [20] 李宁,黄刘生,陈国良.淮河沙颍河段水质预报系统的设计与实现[J].计算机工程与应用,2001,37(8):127-129.  
LI Ning, HUANG Liusheng, CHEN Guoliang. Design and Implementation of Water Quality Prediction System of Shaying River [J]. Computer Engineering and Applications, 2001, 37(8): 127-129.
- [21] 马金锋,唐力,饶凯锋,等.Hadoop下水环境模拟集群运算模式[J].大数据,2019,5(6):73-84.  
MA Jinfeng, TANG Li, RAO Kaifeng, et al. Cluster Computing Mode for Water Environment Simulation Based on Hadoop [J]. Big Data Research, 2019, 5(6): 73-84.
- [22] MA J F, RAO K F, LI R N, et al. Improved Hadoop-Based Cloud for Complex Model Simulation Optimization: Calibration of SWAT as an Example [J]. Environmental Modelling & Software, 2022, 149: 105330.
- [23] 刘悦忆,赵建世,黄跃飞,等.基于蒙特卡洛模拟的水质概率预报模型[J].水利学报,2015,46(1):51-57.  
LIU Yueyi, ZHAO Jianshi, HUANG Yuefei, et al. Water Quality Probability Forecasting Model Based on Monte Carlo Simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(1): 51-57.
- [24] 李茜,张鹏,彭福利,等.国家水环境质量预报预警研究进展及业务发展思路[J].中国环境监测,2019,35(1):8-16.  
LI Qian, ZHANG Peng, PENG Fuli, et al. Research Progress and Preliminary Plan of National Water Quality Forecasting and Alarming System [J]. Environmental Monitoring in China, 2019, 35(1): 8-16.
- [25] 马金锋,郑华,彭福利,等.水环境质量预报预警大数据平台研究[J].中国环境监测,2022,38(1):230-240.  
MA Jinfeng, ZHENG Hua, PENG Fuli, et al. Research on Water Environment Quality Forecast and Early Warning Big Data Platform [J]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38(1): 230-240.
- [26] 刘军,潘泓哲,柏松,等.基于多源监测与数值模拟的小流域水质预测预报研究——以南京市秦淮河流域为例[J].中国环境监测,2025,41(5):238-249.  
LIU Jun, PAN Hongzhe, BAI Song, et al. Study on Water Quality Prediction and Forecasting in Small Watershed Based on Multi-source Monitoring and Numerical Simulation: A Case Study of the Qinhuai River Basin in Nanjing City [J]. Environmental Monitoring in China, 2025, 41(5): 238-249.