

Design and implementation of pollution traceability analysis system of surface water river section

Qingzhi Wei

Yuncheng Ecological Environment Comprehensive Monitoring Center, Yuncheng, Shanxi, 044000, China

Abstract

This paper designs a set of surface water river section pollution traceability analysis system. Taking a river basin in Shanxi Province as a case, it adopts three modules of data collection and transmission, data quality control and pollution traceability to realize multi-section real-time monitoring, data cleaning calibration and quantification of pollution source contribution. Field tests show that the system has high accuracy and reliability in automatic water quality monitoring, surface water quality control and fixed pollution source analysis, providing scientific support for watershed pollution control.

Keywords

water pollution; surface water; river section

地表水河流断面监测污染溯源分析系统设计与实现

卫庆芝

运城市生态环境综合监测中心, 中国·山西 运城 044000

摘要

随着工业化与城市化进程加快, 地表水污染问题日益突出。本文针对河流断面监测污染溯源需求, 设计了一套地表水河流断面监测污染溯源分析系统, 以山西某流域为案例, 采用数据采集与传输、数据质控和污染溯源三大模块, 实现多断面实时监测、数据清洗校准及污染源贡献量化。实地测试表明, 系统在水质自动监测、地表水质控和固定污染源分析方面具备高准确性与可靠性, 为流域污染治理提供科学支持。

关键词

水污染; 地表水; 河流断面

1 引言

地表水污染治理是流域环境保护的关键环节, 精准的污染溯源分析对科学治理具有重要意义^[1]。现有监测系统存在断面布设不足、数据质量参差和多源污染识别难等问题, 无法满足复杂污染场景的需求^[2]。本文设计了一套集成化的地表水监测污染溯源分析系统, 通过实时监测、数据质控和污染源量化分析, 实现对固定污染源与面源污染的动态追踪。

水污染源解析方法主要分为以下几类:

1.1 水质分析法

水质分析法是水污染源解析的基础, 通过分析水质指标, 确定污染物种类、浓度和分布情况。常用的水质分析法包括: (1) 化学分析法: 利用化学试剂与污染物发生反应, 通过比色、滴定等方法测定污染物浓度。(2) 仪器分析法:

利用仪器设备对水样进行测定, 如紫外-可见分光光度法、原子吸收光谱法、气相色谱法等。(3) 生物分析法: 利用生物对污染物的敏感性, 通过生物实验测定污染物浓度。

1.2 污染物追踪技术

污染物追踪技术通过分析污染物在水环境中的迁移、转化过程, 确定污染物来源。常用的污染物追踪技术包括:

放射性跟踪技术: 利用放射性同位素标记污染物, 追踪其在水环境中的迁移、转化过程。(2) 同位素跟踪技术: 利用稳定同位素标记污染物, 分析其来源和迁移途径。(3) 分子标记技术: 利用分子标记物分析污染物的来源和转化过程。

1.3 水环境模型法

水环境模型法通过建立水环境模型, 模拟污染物在水环境中的迁移、转化和

消减过程, 预测污染物分布和浓度。常用的水环境模型包括: (1) 水文模型: 模拟水体的流动、交换和储存过程。(2) 水质模型: 模拟污染物在水环境中的迁移、转化和消减过程。(3) 生物地球化学模型: 模拟污染物在水环境中

【作者简介】卫庆芝(1983-), 女, 中国山西运城人, 本科, 工程师, 从事环境监测研究。

的生物地球化学循环过程。

1.4 综合分析法

综合分析法将多种水污染源解析方法相结合,从不同角度分析污染物来源。

常用的综合分析法包括:(1)源解析模型:结合水质分析、污染物追踪技术和水环境模型,综合分析污染物来源。

(2)三维模型:利用地理信息系统(GIS)技术,构建污染物三维分布模型,分析污染物来源。(3)元分析:通过对多个水污染源解析结果进行统计分析,确定污染物来源。

水污染源溯源在环境管理中的核心环节,其目的是通过科学手段识别污染来源、解析污染路径并量化责任主体,从而为精准治污和预防污染提供依据。

2 案例概况

某流域位于山西省南部,流域面积约为3800km²,主要河道总长度约为310km,覆盖农业区和城镇区域。该流域共有15个水质监测断面,监测指标包括COD、NH₃-N、总磷等。近年来监测数据显示,COD均值为29.4mg/L,超过地表水Ⅲ类标准;NH₃-N均值为2.6mg/L,总磷均值为0.85mg/L。污染源主要包括3处工业排放口,某重点企业COD排放浓度达110.2mg/L;农业面源污染显著,每年化肥施用量约为3800吨;生活污水处理设施覆盖率不足70%,夏季雨季监测期间,水质指标波动尤为明显,污染扩散迅速。

3 系统总体架构

本系统针对山西省某流域的污染状况,以数据采集与传输模块、数据质控模块和污染溯源模块三个核心模块为基础,旨在实现地表水河流断面监测污染的自动化监测、数据质控及污染溯源分析,重点解决流域内监测断面分布不均、监测数据质量参差和污染源复杂等问题^[1]。整体架构见图1:

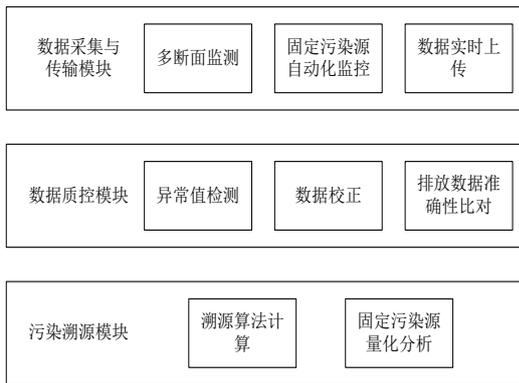


图1 系统整体架构

4 关键模块设计与实现

4.1 数据采集与传输模块

该模块负责实时获取流域内断面的水质监测数据,通

过无线通信技术将数据传输至云端数据库。通过覆盖15个断面和3个固定污染源进行多断面检测,采用YSI EXO2多参数水质传感器和Endress+Hauser CM44P自动监控设备,实现对COD、NH₃-N、TP、DO等指标的实时监测。YSI EXO2传感器布设于河道中,监测精度分别为COD±1mg/L、NH₃-N±0.05mg/L,每10min记录一次;CM44P设备安装于固定污染源对其进行自动化监控,5min记录一次排放废水的COD和流量。采集的数据通过LoRa通信传输至Dragino LPS8网关,覆盖半径15km,采用4G网络上传云端,支持断点续传,传输频率为10min/次。采集数据公式如下:

$$D_{ij} = \sum_{t=1}^n M_{ij}(t) \quad (1)$$

其中 D_{ij} 为第*i*个断面第*j*项污染指标的时序数据, $M_{ij}(t)$ 为传感器在时刻*t*的测量值,*n*为每日采集次数。模块确保数据采集全面性和准确性,为质控和溯源提供高频率、稳定的基础数据支持。

4.2 数据质控模块

数据质控模块是确保监测数据准确性与可靠性的核心环节,结合案例背景和监测需求采用Campbell CR1000数据采集器,对15个监测断面和3个固定污染源的数据进行实时记录与初筛,设定COD、NH₃-N、TP等关键指标的上下阈值范围(COD:0-40mg/L)进行异常值检测,并利用滑动均值法剔除异常波动数据(异常值比例控制在1%以内)。传感器通过YSI EXO CalCheck校准装置(精度±0.01mg/L)每月进行校准,确保关键指标的长期稳定性。固定污染源数据采用历史回归插补公式校正缺失值,插补误差不超过2%。通过Agilent 8453UV-Vis分光光度计对采样数据进行实验室比对,随机抽检30%断面,数据偏差控制在±5%以内,同时对不同断面间时序数据相关性进行检验,确保流域污染趋势的空间一致性。该模块有效提升了数据的准确性和可靠性,为污染溯源分析提供了高质量的基础数据。

4.3 污染溯源模块

污染溯源模块是系统的核心,用于结合监测数据和污染物扩散模型,定位污染来源。该模块结合污染物扩散模型和机器学习算法,部署于Dell PowerEdge R740服务器,配备NVIDIA Tesla T4GPU加速计算,利用ESRI ArcGIS Server动态展示污染扩散路径和污染源分布。模块采用对流-扩散模型(ADM)计算污染物的扩散路径,公式如下:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - kC \quad (2)$$

其中, C 为污染物浓度, u , v 为流速分量, D_x , D_y 为扩散系数, k 为衰减系数。模块针对固定污染源,采用随机森林算法量化各排放口的污染贡献率,输入特征包括流量、污染物浓度和距离等数据;针对面源污染,通过径流和土地利用类型分析区域贡献。结合监测数据,采用污染扩散模拟函数(下图2)模拟污染物在空间中的扩散和浓度变化。

```

from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor

# 污染扩散模拟
def simulate_diffusion(concentration, velocity, diffusivity, decay, steps):
    for _ in range(steps):
        concentration += (velocity * np.gradient(concentration) + diffusivity *
np.gradient(np.gradient(concentration)) - decay * concentration)
    return concentration

# 固定污染源贡献分析
def fixed_source_contribution(features, labels):
    model = RandomForestRegressor(n_estimators=100, random_state=42)
    return model.fit(features, labels)

```

图2 污染扩散模拟函数

污染物扩散路径通过对流扩散模拟完成，随机森林模型量化固定污染源的影响，实现高效溯源分析和污染分布的动态可视化，为后续污染治理和规划提供数据支持。

5 实地测试

为检测该系统的有效性，针对本案例进行实地测试，测试结果表明，水质自动监测模块对15个断面实时监测，COD和NH₃-N均值分别为29.6mg/L和2.5mg/L，数据每10min上传，完整率达99.2%。地表水质控模块通过采集器剔除异常数据，异常值比例降至0.8%，剔除率98.5%；校准装置确保COD校准精度±0.01mg/L，实验室比对COD偏差平均4.3%。固定污染源质控模块监控排放口，COD排放浓度均值112.5mg/L，流量均值15.6m³/h，缺失数据修复率98.7%。污染溯源模块通过随机森林模型量化固定污染源贡献率，排放口1为45%，排放口2为30%，排放口3为25%；面源污染扩散面积135.2km²，GIS可视化精度达95%，具体测试数据见下表1：

表1 实地测试数据

测试模块	测试内容	参数	测试结果	数据偏差控制
水质自动监测	多断面实时监测	COD (mg/L)	均值 29.6, 峰值 42.3	精度 ± 1mg/L
		NH ₃ -N (mg/L)	均值 2.5, 峰值 3.1	精度 ± 0.05mg/L
		数据上传频率	10min/次	数据完整率 99.2%
地表水质控	异常值检测	异常值占比 (%)	异常值比例 0.8	剔除率 98.5%
	数据校准精度	COD 校准 (mg/L)	校准精度 ± 0.01	数据误差 99.5%
	数据实验室比对	COD 偏差 (%)	平均偏差 4.3%	偏差控制 ≤ 5%
固定污染源质控	自动监测与插补	COD 排放浓度 (mg/L)	均值 112.5, 峰值 138.7	精度 ± 0.5mg/L
		流量 (m ³ /h)	平均值 15.6, 峰值 20.3	精度 ± 0.1m ³ /h
		缺失修复量 (%)	修复率 98.7	插补误差 ≤ 2%
污染溯源分析	固定污染源贡献量化	贡献率 (%)	排放口 1:45, 排放口 2:3, 排放口 3:25	模型误差 ≤ 3%
	面源扩散路径模拟	扩散面积 (km ²)	模拟扩散面积 135.2	可视化精度 95%

6 结语

本文提出的地表水污染溯源分析系统，集成实时监测、数据质控和溯源功能，在实地测试中表现出高监测完整率和精准度，能有效量化污染源贡献并动态展示污染扩散路径，为流域治理提供科学依据。未来将优化算法并扩大适用范围，提升系统性能与适应性。

参考文献

- [1] 丁雪莲,赵琰鑫,陈岩,等.基于通量贡献法的河流断面污染定量溯源[J].人民黄河,2024,46(07):104-111.
- [2] 汪桓江.河流污染的成因与环境管理策略分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(18):122-124.
- [3] 张经武.河流污染知识图谱的构建与应用[D].河北科技师范学院,2024.