

# 湖泊磷污染负荷在线评估模型研究与应用

黎东洲<sup>1,2</sup>, 廖轶鹏<sup>1,2</sup>, 刘国庆<sup>1,2</sup>, 杨 光<sup>1,2</sup>, 柳 杨<sup>1,2</sup>, 巢予恬<sup>1,2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部太湖流域水治理重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 研究基于磷污染负荷评估模型, 建立各小流域与空间降雨关联关系, 对接实时降雨、预报降雨等数据进行模型在线改造, 并以常州漏湖为例, 设计开发数字孪生漏湖系统, 实时掌握当前、历史及预报入湖污染负荷, 为漏湖河湖修复提供基础决策支撑。

**关键词:** 湖泊; 磷污染评估; 磷污染在线模型; 数字孪生; 漏湖

中图分类号: TV664

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2024)03-0025-0005

## Research and application of online assessment model for phosphorus pollution load in lakes

LI Dongzhou<sup>1,2</sup>, LIAO Yipeng<sup>1,2</sup>, LIU Guoqing<sup>1,2</sup>, YANG Guang<sup>1,2</sup>,  
LIU Yang<sup>1,2</sup>, CHAO Yutian<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Key Laboratory of the Taihu Basin Water Treatment of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Based on the phosphorus pollution load assessment model, the correlation between various small watersheds and spatial rainfall is established, real-time rainfall, forecast rainfall and other data are connected for online model transformation. The study takes Changzhou Gehu Lake as an example to design and develop a digital twin Gehu Lake system, which can grasp the current, historical, and forecast pollution loads into the lake in real time, and provide basic decision-making support for the restoration of Gehu lakes.

**Key words:** Lake; assessment of phosphorus pollution; online model of phosphorus pollution; digital twin; Gehu Lake

磷污染是造成湖泊富营养化、蓝藻水华暴发、生态系统退化等问题的根源之一<sup>[1]</sup>, 而磷污染也是漏湖及周边区域面临的重要问题。近年来, 湖泊富营养化治理及水环境修复受到高度重视, 国内外学者在我国开展了大量湖泊治理与保护工作, 崔芳等<sup>[2]</sup>基于晒区域分区研究了鄱阳湖入湖总磷估算方法, Taranu等<sup>[3]</sup>研究了农业面源污染对浅水湖泊的影响, 蔡金傍等<sup>[4]</sup>对漏湖污染源进行了调查分析, 柳杨等<sup>[5]</sup>基于小流域分区研究了漏湖长荡湖磷污染通量, 基本掌握了入湖磷污染的来源与入湖通道规律, 通过与降水量建立联系, 能够快速估算未来不同污染源入湖污染量。

以河湖生态复苏为目标, 以数字孪生为手段, 支撑漏湖河湖保护工作具有重要的意义。本文基于漏湖入湖磷污染通量研究成果, 通过数据收集、模型构建、系统开发等建设数字孪生漏湖磷污染评估系统, 旨在有效支撑漏湖河湖生态管理工作, 并为类似湖泊磷污染负荷在线评估提供一定的参考。

## 1 湖泊磷污染负荷在线评估模型构建

### 1.1 湖泊磷污染负荷评估模型基本原理

#### 1.1.1 模型框架

磷污染负荷在线评估主要通过对各入湖小流

收稿日期: 2023-12-18

作者简介: 黎东洲(1990—), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为数字孪生流域。E-mail: dzli@nhri.cn

域进行划分,利用污染源调查及模型模拟解析不同小流域的磷污染负荷通量。通过建立各小流域入湖磷污染负荷与雨量的关系,读取实时、预报降雨数据进行入湖磷污染负荷在线评估,主要构建步骤包括小流域划分、磷污染负荷调查及模拟、小流域空间降雨关联及磷污染负荷在线评估模型构建。磷污染负荷评估计算流程如图1所示。

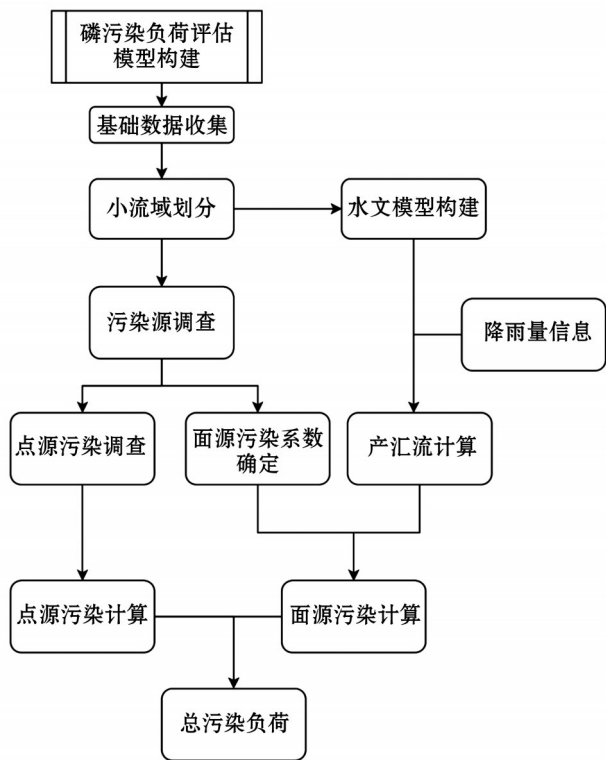


图1 磷污染负荷评估计算流程

(1)小流域划分。根据河道水系特点,利用地理工具进行河网提取、河网分级及集水区单元划分,根据河道等级信息对某等级以下集水区进行合并,形成该等级对应的小流域。

(2)污染源负荷调查评估。基于小流域划分成果,针对不同污染来源进行点源、面源调查,形成污染源调查成果。其中点源污染主要统计各重点工业、污水处理厂等污染源排放量信息;面源污染主要统计水产、林业、生活、工业、畜禽、农业等污染情况,其中各面源污染系数根据规范、经验公式或降雨实测进行系数确定。

$$W_{\text{total}} = \sum W_{\text{点}} + (R_{\text{水产}} + R_{\text{林业}} + R_{\text{生活}} + R_{\text{工业}} + R_{\text{畜禽}} + R_{\text{农业}} + \dots) \times V \quad (1)$$

其中: $W_{\text{total}}$ 为总污染负荷,kg; $\sum W_{\text{点}}$ 为点源污染负荷之和,kg; $R$ 为不同面源污染系数,kg/m<sup>3</sup>;V为入湖总

流量,m<sup>3</sup>。

(3)入湖污染负荷估算。在对污染负荷估算的过程中,需要掌握点源污染总量及面源污染总量。以年度污染负荷为例,通过调查年度点源污染总量、对面源污染系数及年径流量进行计算,确定污染源总和;如计算短中期由降雨导致的湖泊污染负荷,可以采用水文方法进行产汇流计算得到产流总量,再根据公式(1)估算面源污染量,该时段点源污染总量可以通过年度点源污染总量除以统计时长进行计算,或者根据不同月份点源污染总量计算来提高计算精度。

### 1.1.2 模型原理

对于平原较小区域,通常采用泰森多边形法对汇水单元进行划分<sup>[6]</sup>。对于地形比较复杂、水利工程较多的区域,需要结合地形、圩区、城市排水规划等资料对汇水单元进行划分。山丘区汇水单元划分原则:首先根据地形进行水文分析,划分出大的汇水区。局部汇水区如水库汇水区的划分,需要与已有资料进行校核,然后将汇水区域分配到水库或者沿程河道。平原区圩区汇水单元划分原则:汇水区不可跨越圩区,首先确定汇水区范围为圩区的范围边界,然后再进行细化。对农村圩区,依据排涝规划等资料、泰森多边形法等进一步细分汇水单元。对城镇圩区,依据市政管网排水规划等资料,采用泰森多边形法等进一步细分汇水单元。平原非圩区汇水单元划分原则:依据排涝规划等资料、现场调研、泰森多边形法等划分集水单元。

### 1.1.3 产流模型

在产流模型中,考虑比较典型的固定比例径流模型(Fixed)+初期损失模型来开展不同下垫面特点的产流计算。

对于特定硬质产流面,产流量是总雨量的固定比例:

$$R_n = C(P)R \quad (2)$$

式中: $R$ 为降水量,mm; $R_n$ 为净雨量,mm; $C$ 为径流系数,%; $P$ 为重现期,a; $C(P)$ 为在某一重现期下的径流系数,%。

径流系数主要由产流面的类型、表面植被种类以及地面坡度决定,同时受降雨特性(强度、历时)等因素的影响,有时用重现期来表示一定概率。对不透水面的径流系数通常取0.70~0.95。

### 1.1.4 汇流模型

地表汇流计算的任务是把各个子流域的净雨过程转化成子流域的出流过程。通过把子流域的3个组成部分近似作为非线性水库进行处理而实现汇

流计算,这是一个集总式的结构。假定每一个子流域没有特殊的形状,同时假定子流域的宽度 $\omega$ 代表地表径流的典型宽度,水库被概化成矩形区域。这样宽度就可以看做是待率定参数,用于调整预报值以便与计算的水文单元相符。非线性水库通过联立求解曼宁方程和连续性方程。

连续性方程:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = Ai^* - Q \quad (3)$$

式中:  $V=A \times d$ , 为地表积水量;  $d$  为水深;  $A$  为子流域面积;  $i^*$  为净雨;  $Q$  为出流量。

曼宁方程:

$$Q = W \frac{1.49}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (4)$$

式中:  $W$  为子流域漫流宽度;  $n$  为曼宁糙率系数;  $d_p$  为地表蓄滞水深;  $S$  为子流域宽度。

合并式(3)和式(4),得到一个非线性偏微分方程,解出未知量水深 $d$ :

$$\frac{dd}{dt} = i^* - \frac{1.49W}{A \cdot n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} = i^* + I_{wcon} (d - d_p)^{5/3} \quad (5)$$

在式(5)中,将子流域漫流宽度 $W$ 、坡度 $S$ 和糙率 $n$ 合并成一个参数 $I_{wcon}$ ,称为流量演算参数:

$$I_{wcon} = \frac{1.49W}{A \cdot n} S^{1/2} \quad (6)$$

对每一个时间步长,用有限差分法求解式,因此,净入流和净出流必须在每个时间步长内进行平均,以脚标1和2分别表示一个时段水深的初始值和终值,方程变为

$$d_2 - d_1 \Delta t = i^* \Delta t + I_{wcon} d_1 + 12 d_2 - d_1 - \Delta t p^{5/3} \quad (7)$$

用New-Raphson迭代法进行求解。

## 1.2 模型在线化改造

为支撑系统建设,需要将模型磷污染负荷计算模型进行在线改在,通过接口封装提供模型负荷。在线改造主要基于Restful接口风格进行标准化封装<sup>[6]</sup>。在线模型主要需要实现基于不同降雨数据源的自动预报及人工输入降雨的交互预报。其中自动预报通过JDBC等数据库连接工具自动读取实时及预报降雨数据,通过水文产汇流计算公式及污染负荷计算公式,评估入湖磷污染负荷量。人工预报通过开发人工预报接口,通过输入预报降雨数据,提交到模型进行计算,通过JSON数据返回污染负荷计算结果。

## 2 数字孪生湖泊磷污染负荷评估系统架构与功能设计

### 2.1 系统框架设计

基于水利部数字孪生建设框架,针对磷污染负荷评估的业务需求,通过数据汇聚、模型支撑、业务系统开发等技术路线进行系统开发,在数据底板方面,汇聚湖泊及周边基础数据、监测数据、地理空间数据、业务数据与跨行业数据,构建多层级数据底板;模型层面构建漏湖可视化模型及磷污染评估模型,形成数字孪生平台,并在此基础上开发业务应用,系统框架<sup>[7-8]</sup>如图2所示。



图2 系统框架



其中数据层面主要对接河流水系、基础地理、水利工程等基础信息数据,实时雨情、水情、水质等监测数据,影像、地形等地理空间数据,雷达图、卫星云图、预报降雨等跨行业共享数据。通过构建水文模型、磷污染评估模型,为业务应用系统提供支撑。系统开发采用微服务体系的前后端分离架构进行系统开发。其中前端采用了VUE页面框架,基于Leaflet的地图框架进行开发,后端数据服务及模型服务采用SpringBoot的框架进行开发,可视化服务基于WDP API进行渲染交互,开发架构如图3所示。

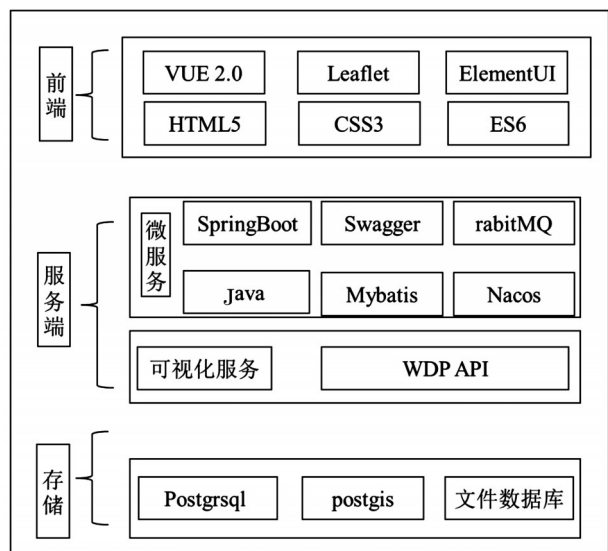


图3 开发架构

## 2.2 系统主要功能

系统构建主要考虑数字大厅、“四预”调度两个主要模块,其中数字大厅定位为业务态势感知,主要从业务层面出发,抽取各个业务关键信息结合二三维展示方式进行展示;“四预”调度围绕预报、预警、预演、预案、会商等四预业务体系进行构建,系统功能架构如图4所示。



图4 功能架构

## 3 案例应用——数字孪生太湖系统

选取常州太湖为研究区,构建湖泊磷污染负荷

评估模型,按照湖泊数字孪生系统设计思路,开发数字孪生太湖系统。

### 3.1 区域概况

常州市地处太湖流域西部,北临长江,东濒太湖,西界茅山,南接天目山余脉,腹部有洮、溇两湖。境内地形复杂,山丘、平原、圩区兼有,丘陵山区位于西南部,面积1 012 km<sup>2</sup>,占全市总面积的23%;中部和东部大部分是平原,面积1 585 km<sup>2</sup>,占全市总面积的36%;圩区主要分布在丘陵山脚和腹部洮、溇湖周围,部分在沿江地区和与锡澄交界处,面积1 253 km<sup>2</sup>,占全市总面积的29%;圩外河湖面积525 km<sup>2</sup>,占全市总面积的12%。全市地势高低相间,山圩相依,湖圩相连,河网密布。境内从南至北分成三大水系,包括南河水系,太湖、溇湖、洮湖三湖水系及运河水系。溇湖周边土地利用类型主要有耕地、园地、林地、草地、湿地、城镇村及工矿用地、交通运输用地、水域及水利设施用地等。根据第三次国土调查结果,常州市主要用地数据统计结果见表1。

表1 常州市各土地利用类型面积统计

| 土地利用类型    | 合计/km <sup>2</sup> | 占比/% |
|-----------|--------------------|------|
| 耕地        | 884.95             | 20.2 |
| 园地        | 251.39             | 5.7  |
| 林地        | 761.70             | 17.4 |
| 草地        | 96.89              | 2.2  |
| 湿地        | 6.17               | 0.1  |
| 城镇村及工矿用地  | 1 050.47           | 24.0 |
| 交通运输用地    | 202.85             | 4.6  |
| 水域及水利设施用地 | 1 107.06           | 25.3 |

### 3.2 太湖磷污染负荷在线模型构建

常州太湖区域共划分了74个自然汇水小流域单元,以自然汇流单元取代行政单元,作为磷污染负荷空间分布的统计单元。通过调查,太湖区域污染源主要分为工业、农业、畜禽养殖、水产养殖、林业和生活污染源。根据文件统计结果,各类型污染物入太湖年总量数据统计数据见表2。

基于小流域划分成果及污染源调查数据,建立污染源与流域降水量之前的关系。在实际污染负荷预报计算过程中,需要对接实时降雨及预报降雨数据,因此需要将各小流域单元与实时降雨、预报降雨进行空间关联,通过读取实时降雨数据、预报降雨数据进行污染负荷预报。其中实时降雨数据

表2 入湖磷污染通量统计

| 序号 | 污染类型 | 入漏湖总量/(t/a) |
|----|------|-------------|
| 1  | 生活   | 17.80       |
| 2  | 工业   | 26.45       |
| 3  | 农业   | 5.88        |
| 4  | 林业   | 1.31        |
| 5  | 水产   | 2.84        |
| 6  | 畜禽   | 11.05       |
| 合计 |      | 65.32       |

对接江苏省实时雨水情数据,预报降雨数据对接网格化预报降雨数据。

在进行小流域与实时降雨数据关联过程中,由于部分小流域无雨量站点,因此通过将雨量站点进行泰森多边界划分,并与小流域进行空间叠加的形式进行关联,关联后通过对位于小流域范围内的泰森多边形对应雨量站点数值加权平均的方式获取雨量值。

在与预报降雨站点关联过程中,由于小流域可能位于一个或者多个预报降雨格网中,通过地理空间相交工具建立小流域与预报格网的关联关系,并根据占据的不同格网面积权重进行加权平均,从而得到小流域预报降雨数据。

### 3.3 系统开发

#### 3.3.1 数字大厅

数字大厅主要展示漏湖及周边水系的水环境信息,包括磷污染负荷统计信息及预报信息、水质信息等。其中磷污染负荷通过自动预报方式,滚动计算污染负荷,按照工业、农业、生活、林业进行分类,展示近7d入漏湖总磷负荷预测信息,并以年为单位统计年度入湖总磷污染负荷总量信息;水质数据对接漏湖周边水质监测信息,展示漏湖周边总磷、总氮、溶解氧等水质信息,并对水质较差站点进行水质告警。

#### 3.3.2 “四预”调度

“四预”调度模块主要包括感知、预报、预警、预演、预案等模块,其中感知模块对接漏湖及周边实时雨情、水情、水环境监测数据,能够结合图表展示雨量、水位、水质等过程数据;预报模块对接了气象预报降雨信息,能够展示格网预报降雨信息,并通过自动接入预报降雨信息进行入湖磷污染预报评

估,展示各小流域入湖污染负荷量;预警模块能够对实时雨情、水情、水质信息进行告警展示,并根据入湖污染负荷阈值进行入湖污染预警展示;预演模块主要同通过磷污染负荷在线交互计算接口,通过输入降雨信息展示不同降雨条件下的磷污染负荷结果;预案模块主要结合突发污染预案、水生态治理方案等信息,展示漏湖生态治理相关预案信息。

## 4 结 论

本文根据湖泊污染源分析,构建湖泊磷污染负荷模型,建立入湖磷污染与降雨关系,进行模型在线化改造,并以常州漏湖为例,通过污染源调查成果,构建以小流域为单元的降雨空间关联,对接实时降雨数据、预报降雨数据,构建污染负荷在线评估模型;采用数字孪生手段,开发了数字孪生漏湖磷污染负荷评估系统,实现了漏湖磷污染负荷评估的“四预”功能,全面掌握漏湖当前及历史水环境状态、未来入湖污染状态,有效支撑漏湖管理保护工作,系统成果能够应用在类似湖泊的磷污染负荷评估上。

#### 参考文献:

- [1] 朱伟,吕艺,薛宗璞,等. 2020年太湖流域洪水及太湖总磷变化趋势分析[J]. 水资源保护,2023,39(6):16-22.
- [2] 崔芳,王华,曾一川,等. 基于流域分区的鄱阳湖流域入湖总磷负荷估算[J/OL]. 中国农村水利水电,1-16. [2023-12-17] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.tv.20231013.1719.058.html>.
- [3] TARANUZE,GREGORY-EAVES I. Quantifying relationships among phosphorus, agriculture, and lake depth at an inter-regional scale[J]. Ecosystem,2008,11(5):715-725.
- [4] 蔡金榜,孙旭,苏良湖,等. 漏湖污染源调查与分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(5):224-227.
- [5] 柳杨,范子武,谢忱,等. 常州市运北主城区畅流活水方案设计与现场验证[J]. 水利水运工程学报,2019(5):10-17.
- [6] 余宇峰,胡健伟,严琳,等. 水文模型的服务化封装方法研究与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):34-41.
- [7] 范子武,刘国庆,杨光,等. 城市防洪“四预”智能调度系统建设与应用[J]. 江苏水利,2022(增刊2):5-10.
- [8] 刘国庆,范子武,杨光,等. 江苏省数字孪生水网建设总体构想与先试经验[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(8):7-12.