

# 城市湖泊智慧化生态水位 预警系统的构建及应用

李博骏, 郭家诚, 黄金柏, 李 妍, 许湘鑫, 宋佩炫

(扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:**选取近扬州市中心区域一人工湖为研究区,基于水文生态水位计算方法推求生态水位阈值,综合运用物联网、云平台、大数据等智慧化资源和技术,构建适用于不同尺度湖泊的智慧型生态水位预警系统。通过自主研发软件对“水位实时监测—生态水位评估—预警等级研判—警情信息发布”全过程实行智慧化管控。应用结果表明:该湖泊生态水位预警系统具有准确、高效、智慧化程度较高等特点;与常规城市湖泊生态水位预警管控系统相比,其功能和效率实现全方位提升;从而为城市地区不同尺度湖泊生态水位管控提供了智慧型管理系统,为智慧城市的建设提供技术支持。

**关键词:**智慧化;生态水位;实时预警;城市湖泊

中图分类号:TV675

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2024)09-0033-0005

## Construction and application of intelligent ecological water level warning system for urban lakes

LI Bojun, GUO Jiacheng, HUANG Jinbai, LI Yan, XU Xiangxin, SONG Peixuan

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** Selecting an artificial lake near the center of Yangzhou city as the research area, the ecological water level threshold is calculated based on hydrological ecological water level calculation methods. By comprehensively utilizing intelligent resources and technologies such as the internet of things, cloud platforms, and big data, a smart ecological water level warning system suitable for different scales lakes is constructed. Through self-developed software, the entire process of “real-time monitoring of water level – ecological water level assessment – warning level assessment – alarm information release” is intelligently controlled. The application results show that the ecological water level warning system of the lake has the characteristics of accuracy, efficiency, and high degree of intelligence; Compared with the conventional urban lake ecological water level warning and control system, its functions and efficiency have been comprehensively improved; This provides a smart management system for ecological water level control of different scales lakes in urban areas, and provides technical support for the construction of smart cities.

**Key words:** intellectualization; ecological water level; real-time warning; urban lakes

收稿日期: 2024-04-28

基金项目: 江苏水利科技项目(2021050);扬州大学大学生科创基金项目(XCX20230528)

作者简介: 李博骏(2002—),男,本科,从事水文模拟及预报方面的研究。E-mail: 1920756312@qq.com

通信作者: 黄金柏(1974—),男,副教授,博士,研究方向为水文模拟、流域水文、陆面过程等。E-mail: huangjinbai@aliyun.com

城市湖泊在维持城市水资源平衡、改善城市生态环境,调节区域气候、提升城市景观效果等方面发挥着重要作用,承担着防汛、供水、城市生态平衡调控、城市风貌美化等重要职能<sup>[1]</sup>。传统的生态水位预警系统存在人为干预过多、响应速度缓慢、覆盖范围有限等诸多局限性,难以满足新时代城市湖泊生态预警和管控的需求。《“十四五”智慧水利建设规划》中明确要求提升水情测报和智能调度能力<sup>[3]</sup>,对城市湖泊生态水位预警技术提出了更高的要求。构建智慧化管控系统,对各种城市水体生态水位预警实现高效、智慧化管理,是智慧化城市建设的重要组成部分,也是智慧水利发展的必然要求。

在国外,水情监测预警方面的研究较多,如Zeng等<sup>[4]</sup>提出了一种集数据库系统、建模库、经验库和图形用户界面(Graphical User Interface, GUI)于一体的综合性水资源管理系统;Hatmoko等<sup>[5]</sup>提出了关于Pemali-Comal River水文方面的监测技术;Susanj等<sup>[6]</sup>探索在小规模流域实施EWS(Early Warning System, EWS)的可能性,并开发一种基于人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)作为EWS重要组成部分的水文预测模型开发方法。近年,国内同类研究发展较快,如王蓓等<sup>[7]</sup>提出了一种基于GPRS(General Packet Radio Service, GPRS)技术的水情信息传输系统;徐辉等<sup>[9]</sup>构建了武都水库水情自动测报系统<sup>[8]</sup>;宋天武等<sup>[9]</sup>设计了基于MC55的水情自动测报终端;张国学等<sup>[10]</sup>提出了“测站-中心-分中心”的信息流程方式并用于三峡水利枢纽的管理系统;王辉等<sup>[11]</sup>在测报系统中增加中心站北斗指挥机直收与网络转发两种方式实现双通道接入,实现了低成本、高效率、稳定安全的数据统一接入。总体来看,水情监测预警系统在国内外各种水体水情预报中应用越来越广泛,随着信息技术的不断进步,水情预警系统近年来正朝着智慧化方向发展。

本研究的主要目标是研发一种智慧型的生态水位预警系统,该系统兼具水位实时监测、预警等级合理研判和警情智能处理功能,此系统将为城市湖泊智慧化管理提供技术支持,服务于智慧城市建设。

## 1 材料与方法

### 1.1 智慧型资源要素

#### 1.1.1 物联网

物联网是一种利用信息识别设备的网络,使用

既定的通信和信息交换协议将所有可能的物品连接到互联网,实现智能识别、定位、跟踪、监控和管理。物联网技术在本次构建智慧型的生态水位预警系统中的应用主要为支持数据传输过程,系统通过物联网技术将监测点信息数据传输给预警中心,为决策管理者提供详细的初始信息,并提供原始数据以确定是否应该发出警报,体现预警的精准性和实时性。

所选人工湖位于近扬州市中心区域,在该人工湖设置水位监测点P(32°22'34"N, 119°25'16"E),所选水位设备为雷达水位监测仪(型号:CS475A-L,产地:美国),该设备可以根据监测需要设置不同的时间步长,对水位进行自动观测。使用CR800型数据采集器对雷达水位计的监测结果进行采集,该数据采集器拥有4 M数据和程序储存空间,同时采用表格式数据格式,便于后续的读取和整理。采集器采用PakBus®作为操作系统,支持LoggerNet软件,支持Modbus协议、SDI-12协议和SDM设备。

#### 1.1.2 大数据

大数据即是大量信息数据的集合,具有真实、多样、高速、大量和低价值密度的特点<sup>[12]</sup>。在系统构建时利用大数据技术优化档案的保存方式,通过CR800型数据采集器,对雷达水位监测结果在时间过程上形成长序列数据集,亦可对多个水位监测点不同时间步长的数据进行采集,从而形成不同时间步长和空间的位置的水位数据集。工作人员可将CR800型数据采集器接入互联网获取和收集信息,不仅大大减少前期准备工作量,节省大量的人力和时间等成本,还可以大幅降低人为因素造成的错误和消耗比例,提高效率。

#### 1.1.3 云计算平台

云计算是一种新的计算和服务模式,借助互联网技术对庞大的数据和信息资源进行整合和处理,并根据用户各种需要通过服务器将处理结果传送给用户的处理过程<sup>[13]</sup>。本研究构建的城市湖泊智慧化生态水位预警系统,以云平台作为系统的数据流转中枢,云平台通过API(Application Programming Interface, API)接口的形式,以HTTP(Hypertext Transfer Protocol, HTTP)通讯协议实现设备端及用户端之间的双向数据传输。

## 2 系统构建

### 2.1 系统结构

系统由硬件及软件2个部分构成。硬件部分包

括数据采集及通讯设备,用于水位监测和传输;软件部分依托云服务技术自行开发一套集生态水位阈值评估—可视化监测—智能预警等功能于一体的程序,对生态水位预警系统的硬件平台和工作过程进行管控;基于对实时生态水位的研判,评估预警等级并发布相应的预警信息。系统结构如图1所示。

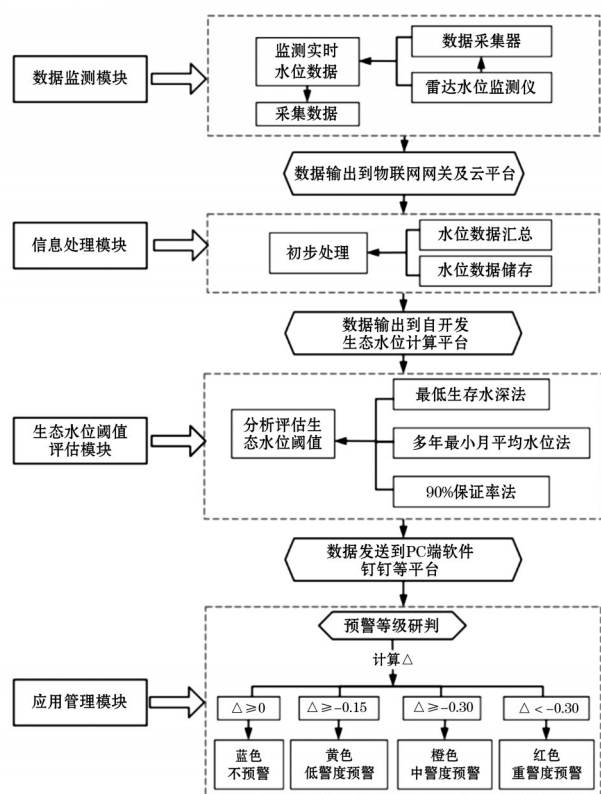


图1 系统结构

### 2.1.1 数据监测模块

数据监测模块的功能是利用雷达水位监测仪对湖泊水位实时监测,再通过数据采集器接收水位数据,并将数据传输到信息处理模块。雷达水位监测仪与数据采集器通过线缆连接进行数据通信,太阳能板作为设备的主要供电设备,同时将市电作为辅助供电(备用)电源。数据监测模块有通讯和休眠两种工作状态,当监测完成时可及时进入休眠状态,降低功耗,与低碳环保的生态设计理念相符。

### 2.1.2 信息处理模块

信息处理模块主要由物联网网关和云平台组成,其主要功能是利用物联网技术将监测设备连接到云平台,并通过4G、5G等网络在数据监测层和应用管理层之间提供低延迟的数据传输互动。信息处理模块接收数据监测模块传输的水位数据并进行初步处理,处理后的数据传送至生态水位阈值的

计算模块作为生态水位率定的基础数据,并将最终数据处理结果传输到应用管理模块中。

### 2.1.3 生态水位阈值评估模块

为提升城市湖泊生态水位阈值率定的合理性,采用最低生存水深法、多年最小月平均水位法、90%保证率法3种计算方法计算湖泊生态水位,结合对监测点历史水位数据的分析来评估湖泊的生态水位阈值。

(1)最低生存水深法。河湖生态系统中,鱼类一般是其中的顶级生物群落,认为鱼类最低生存水位即可满足河道内其他生物的生存需求。研究区人工湖的鱼类体长在0.1 m左右,依照《水电水利建设项目河道生态用水、低温水和过鱼设施环境影响评价技术指南》[环评函(2006)4号],由国家环境保护总局办公厅于2006年印发,以及鱼类相关研究成果,选取2~3倍的鱼类体长作为最低生存水深,据此,以研究区鱼类3倍体长的水深(0.3 m)推求该人工湖生态水位<sup>[14]</sup>。

将该人工湖监测点河底高程与最低生存水深相加,可得到最低生存水位,见式(1)。

$$h = h_1 + h_2 \quad (1)$$

式中: $h$ 为最低生存水位,m; $h_1$ 为研究区人工湖监测点河底高程,m; $h_2$ 为最低生存水深,m。

已知研究区人工湖监测点河底高程为3.3 m,则最低生存水位3.6 m,即采用最低生存水深法推求的生态水位为3.6 m。

(2)90%保证率法。保证率法是对长系列日平均水位经验点据进行配线。首先需计算历年逐日平均水位,采用皮尔逊Ⅲ型曲线(P-Ⅲ曲线)对日平均水位进行排频,P-Ⅲ型分布的概率密度由式(2)~(5)通过计算得到,而后选取特定保证率下的水位作为基本生态水位<sup>[15-16]</sup>。

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - \alpha_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-\alpha_0)} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{4}{C_s^2} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2}{xC_v C_s} \quad (4)$$

$$\alpha_0 = x \left( 1 - \frac{2C_v}{C_s} \right) \quad (5)$$

式中: $f(x)$ 为P-Ⅲ型的概论密度函数; $\Gamma(\alpha)$ 为伽马函数; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\alpha_0$ 为参数。

利用研究区水位资料经计算得到的研究区水位P-Ⅲ曲线如图2所示,由该图可知,取 $C_v=0.06$ , $C_s=1.47$ 时,理论频率曲线拟合效果较好,大多数经



验点据落在曲线上,此时决定系数 $R^2=0.915$ ,拟合优度较高。取理论频率曲线上90%保证率对应的水位作为该人工湖最低生态水位,为3.85 m。

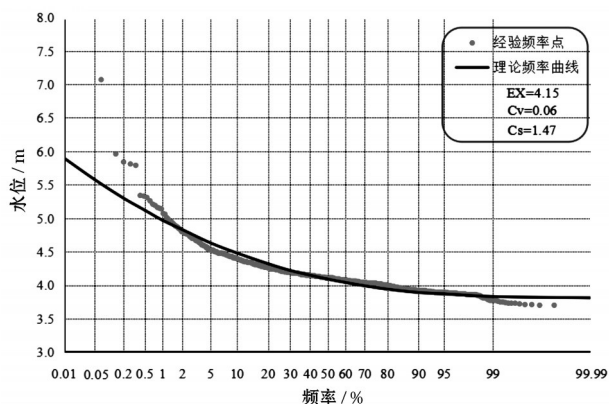


图2 水位频率曲线

(3)多年最小月平均水位法。多年最小月平均水位法是在现有历史水位数据的基础上,选取近年来的水位数据,以最小月平均实测水位的多年平均值作为生态基本水位<sup>[15-16]</sup>,计算方法如下:

$$\bar{Z}_{\min} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_{\min}^i \quad (6)$$

式中: $\bar{Z}_{\min}$ 为多年最小月平均水位,m; $Z_{\min}^i$ 为各年最小月实测水位,m; $n$ 为年数。

基于研究区人工湖监测点2019—2023年水位监测数据,计算得到最小月平均水位为3.97 m,即采用多年最小月平均水位法推求的该人工湖生态水位为3.97 m。

构建生态水位阈值率定子模块,其主要功能是对最低生存水深法、90%保证率法、多年最小月平均水位法推求的人工湖生态水位进行软件优选和人工复选,确定最佳生态水位阈值。软件阈值优选:选取分别采用3种方法得到的不同生态水位计算结果的最大值作为生态水位阈值,见式(7)。

$$H = \max(H_1, H_2, H_3) \quad (7)$$

式中: $H$ 为生态水位阈值,m; $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 分别为采用最低生存水深法、90%保证率法、多年最小月平均水位法求得的生态水位,m。

人工阈值复选:系统通过软件阈值优选模块筛选生态水位阈值的同时,保留最佳生态水位阈值的人工复选权限,设置人工阈值复选功能,管理人员可结合城市湖泊的不同生态保护目标、水功能分区的差异及专家经验,从最低生存水深法、90%保证率法、多年最小月平均水位法计算结果中复选并确定最佳的阈值。需要说明:此功能不仅为所选人工湖设

置,而且是作为智慧型生态水位预警系统对城市不同尺度湖泊生态水位阈值优选的一个普适性功能。

## 2.2 应用管理模块

应用管理模块的主要功能是通过自开发软件(计算机程序),实现对城市湖泊水位实时监测—生态水位精准评估—预警信息实时传递等功能的“一键式”管理。利用MATLAB软件开发应用管理模块,该模块为集计算、绘图、分析、预警等功能于一体的智慧化管理平台,该模块可基于实时水位数据实现对湖泊生态水位阈值全天候预警等级研判及警情实时发布。

### 2.2.1 预警等级划分

以实时水位与生态水位阈值之间的差值[式(8)]作为预警等级的判断指标,基于二者之间差值的大小设置4个区间,分别设置蓝、黄、橙、红4种颜色,作为预警等级划分依据,发布相应等级预警。

$$\Delta = H_t - H \quad (8)$$

式中: $H_t$ 为实时水位,m; $H$ 为生态水位阈值,m。当 $\Delta \geq 0$  m时,不预警,可视化平台中的预警灯显示为蓝色;当 $\Delta \leq -0.15$  m时,低警度预警,可视化平台中的预警灯显示为黄色;当 $\Delta \geq -0.30$  m时,中警度预警,可视化平台中的预警灯显示为橙色;当 $\Delta < -0.30$  m时,重警度预警,可视化平台中的预警灯显示为红色。

### 2.2.2 预警机制

实时水位预警模块基于对实时水位的分析,对是否发布生态水位预警及预警等级进行研判,做出预警响应,并将预警信息发送至管理人员的移动通讯设备,步骤如下。

步骤1:实时水位监测与传输。数据监测模块以用户所设置的时间步长对水位实时监测并将数据传输至信息处理模块;

步骤2:生态水位阈值率定。生态水位阈值率定模块对生态水位进行计算、筛选、复选,实现生态水位阈值率定、优选,并将结果传输至应用管理模块;

步骤3:预警信息处理及发布。应用管理模块基于湖泊实时水位与生态水位阈值信息,判断是否发布预警信息。在发布预警信息的情况下,确定预警等级并做出相应的预警响应,同时将预警信息发送至管理人员的移动通讯设备(终端)。

## 3 系统应用

### 3.1 研究区域概况

选取的人工湖位于扬州市内,临近市中心区

域,其周边分布着住宅区、商业区和多条道路;湖泊周围被多种树木环绕,具有城市人工湖的典型特征;水域面积约5 200 m<sup>2</sup>,其水位主要受降雨、蒸发和土壤入渗等自然因素影响,有地表径流产生的情况下,自湖泊四周有地面径流汇入。此外,周边居民的日常活动,如使用湖水清洗衣物、取湖水灌溉植物、个别随机倾倒生活污水等,对该人工湖水环境造成影响。

### 3.2 应用案例及效果评价

#### 3.2.1 应用案例

扬州市冬季降水量较少,春季阴、雨天较多,次降雨事件的降水量一般不大,夏季雨量充沛,集中降雨事件较多。常态下,湖泊水位满足生态水位要求,系统不发布预警信息。

先假定某日日照充足。雷达水位监测仪于当日11时测得湖泊水位为3.79 m,根据式(8)有:

$$\Delta = 3.79 - 3.85 = -0.06 \text{ m}$$

$$0 \text{ m} < \Delta \leq -0.15 \text{ m}$$

即监测点的水位与生态水位阈值之间的差值在0~-0.15 m之间,系统可视化平台中的预警灯显示为黄色,系统发布低警度预警(图3)。

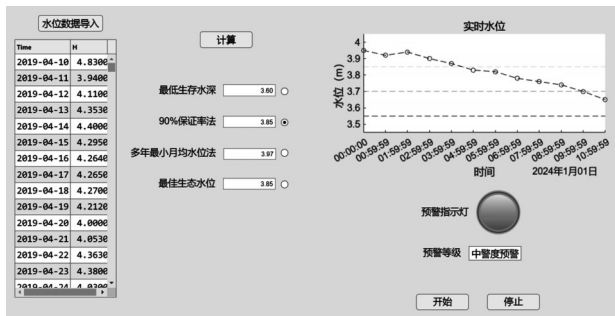


图3 低警度预警界面

若雷达水位监测仪于当日11时测得水位为3.65 m,根据式(8)有:

$$\Delta = 3.65 - 3.85 = -0.20 \text{ m}$$

$$-0.15 \text{ m} < \Delta \leq -0.30 \text{ m}$$

即监测点的水位与生态水位阈值之间的差值在-0.15 m与-0.30 m之间,系统可视化平台中的预警灯显示为橙色,系统发布中警度预警(图4)。

若雷达水位监测仪于当日11时测得水位为3.50 m,根据式(8)有,

$$\Delta = 3.50 - 3.85 = -0.35 \text{ m}$$

$$-0.30 \text{ m} \leq \Delta$$

即监测点的水位与生态水位阈值之间的差值小于-0.30 m,系统可视化平台中预警灯的实时状态

为红色,系统发布高警度预警(图5)。

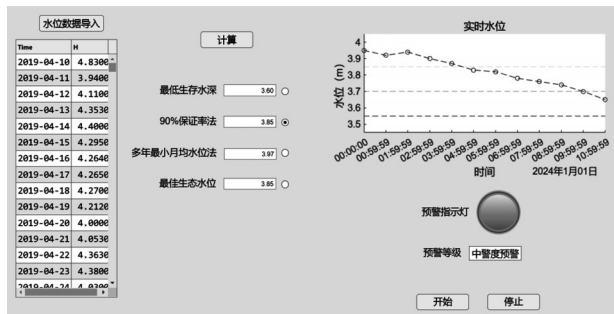


图4 中警度预警界面

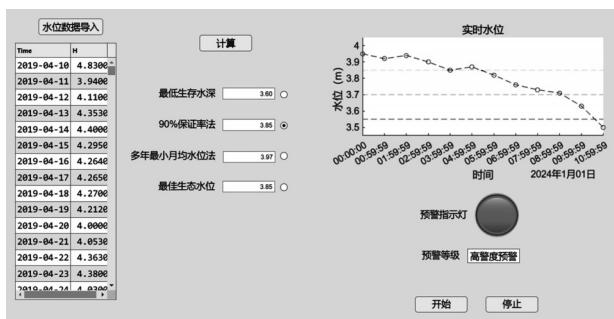


图5 高警度预警界面

#### 3.2.2 效果评价

(1)应用效果评价。江苏省水文水资源勘测局宿迁分局对该系统的实际应用效果表明:系统水位信息监测与传输过程兼具高效、精准、实时性;生态水位阈值计算、筛选、率定过程专业性、合理性强;预警信息研判和发布具有准确、实时性,且智能化程度较高;运行过程实现“一键式”管理,具有管理方便、实效性强、能耗低等优点;系统整体智慧化程度较高。

(2)系统升级处理可操作性评价。系统以“模块化”方式构建,各模块结构上相互独立,根据工作流程整体上形成“层状结构”,结构简单,便于调整。随着城市湖泊水情管控和生态水位预警智慧化要求的提高,或出现湖泊生态水位管控要素增加等情况,系统功能需做升级处理。可以通过针对性地调节系统相应模块的功能,实现系统功能调整和升级,操作简便、易于实现,相关工作将在未来河湖水情智慧化管理研究中不断探索。

## 4 结 语

在智慧水利、智慧城市建设时代背景下,本文综合运用物联网、大数据、云平台等智慧化技术和

(下转第42页)

防范、处置和责任等“六项机制”在泵站运行管理的逐步落实、完善,有效提升了管理水平和本质安全,但大量的风险管理信息增加了现场人员的工作压力,因此建立信息编码机制、动态信息应用流程是大型泵站枢纽工程风险管理信息系统的设计关键。根据本文分析可知,六位数的危险源编码能够确定风险点、危险源类别和危险源个体信息,十位数的管控措施编码能够确定管控措施类别、管控层级和管控负责人信息,通过编码机制可使数据库与风险管理模块相关联实现查找、研判、防范、预警等功能。

风险状态变化信息的输出与接受形式是泵站现场管理人员、作业人员及时获悉风险信息的关键。根据危险源数据库中信息的变化,“风险告知动态提醒机制”能够及时将告知书签订流程推送给作业人员,同时将风险公告栏及警示标志设置要求推送给管理人员,明确各岗位的风险管控要求。基于加权风险矩阵法的“固有风险与残余风险四色图绘制机制”,能够考虑管控措施对危险源风险值的

影响,分析固有风险与残余风险的变化,并实现风险四色图与风险状态的同步变化。泵站运行管理涉及风险因素类型多而复杂,如何结合泵站设备设施运行管理特点,动态考虑管控措施风险折减指数和设置合理的重大危险源预警阈值有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 乔镜铭. 大型泵站电气设备运行与维护管理措施研究[J]. 新疆有色金属, 2024, 47(4): 83-84.
- [2] 刘圣桥, 谷峪, 郑英. 调水工程泵站控制系统网络安全风险评估[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(增刊1): 403-406.
- [3] 孙浩夫. 抽水泵站机电设备安全运行与管理风险研究[J]. 地下水, 2021, 43(3): 286-288.
- [4] 徐铭. 基于“六项机制”的基层水管单位安全生产风险管控探索[J]. 江苏水利, 2023(5): 61-64.
- [5] 王伟, 朱延琴. 基于加权风险矩阵法的泵站运行风险分级管控分析[J]. 水利科技, 2022(3): 34-37.

(上接第37页)

资源,构建了城市湖泊智慧化生态水位预警系统,对城市湖泊水位监测与信息传输-生态水位计算与阈值优选-预警情况研判与信息实时发布全过程实现“一键式”管理;在所申请国家发明专利(已受理)授权之后,将在不同尺度城市湖泊水情信息管理和生态水位预警管控中推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 沈颜奕, 陈星. 城市湖泊生态系统健康评价与修复研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2): 82-85, 91.
- [2] 刘晓南, 程炯, 王瑾. 广州市快速城市化区的水塘景观变化及其影响因素[J]. 城市观察, 2017(3): 50-60.
- [3] 曾焱, 程益联, 江志琴, 等. “十四五”智慧水利建设规划关键问题思考[J]. 水利信息化, 2022(1): 1-5.
- [4] ZENG Y, CAI Y, JIA P, et al. Development of a web-based decision support system for supporting integrated water resources management in Daegu City, South Korea[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(11): 10091-10102.
- [5] WALUYO HATMOKO, RADHIKA, BAYU RAHARJA. Monitoring and prediction of hydrological drought using a drought early warning system in Pemali-Comal river basin, Indonesia[C]. //1st International Symposium on LAPAN-IPB Satellite (LISAT) for Food Security and Environmental Monitoring 2014; Bogor, Indonesia, 25-26 November 2014.

- TEXAS; Elsevier B.V., 2015: 56-64.
- [6] IVANA SUSANJ, NEVENKA OZANIC, IVAN MAROVIC. Methodology for developing hydrological models based on an artificial neural network to establish an early warning system in small catchments[J]. Advances in Meteorology, 2016(2016), 1-14.
- [7] 王蓓, 刘玉甫, 吴建军. GPRS技术在水情自动测报系统中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(3): 132-134.
- [8] 徐辉. 武都水库水情自动测报系统的构建及其关键技术[J]. 中国水利, 2010(12): 33-36.
- [9] 宋天武. 基于MC55模块的水情自动测报终端的设计[J]. 水利水电技术, 2010, 41(4): 91-94.
- [10] 张国学, 彭凌. 三峡枢纽水情自动测报系统运行管理模式研究[J]. 人民长江, 2011, 42(10): 70-72.
- [11] 王辉, 代慧涛, 刘宇. 异构水情自动测报系统的统一接入应用方案[J]. 水利水电技术, 2012, 43(11): 55-57.
- [12] 王玉申, 杨光, 杨凯, 等. 云计算与大数据技术在智慧医疗的应用策略[J]. 中国科技信息, 2023(2): 135-137.
- [13] 张巨莉. 基于云计算的水利信息化应用研究[J]. 地下水, 2020, 42(6): 275-276.
- [14] 王振祺, 方红远, 许广东, 等. 苏北平原河流生态水位确定与保障措施研究[J]. 人民珠江, 2022, 43(5): 36-42.
- [15] 王鹏, 华祖林, 褚克坚, 等. 高度城镇化地区河网水系生态调控方案[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 205-212.
- [16] 朱晔. 南方平原河网地区河流生态水位研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.