

突发性水污染事故预警体系建设综述

杨慧慧¹, 谢红玉², 赵丁², 苏智², 贾滨洋^{2*}

(1. 东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096; 2. 成都市环境应急指挥保障中心, 四川 成都 610066)

摘要:随着流域水污染事件的频发,突发性水污染事故预警平台的科学建设成为流域应急管理的重要内容。基于预警平台数据感知层、数据管理层、业务感知层的总体架构,综述了国内外突发性水污染事故预警平台的建设现状。从水质监测技术、突发事故预警模型、预警平台整体构建4个方面分析了近年来突发性水污染事故预警平台的研究进展与不足,以期为流域突发性水污染预警系统的建设提供参考。

关键词:突发性水污染事故;流域污染;应急响应;预警平台

中图分类号:X84

文献标志码:A

文章编号:1674-6732(2022)01-0028-07

Summary of the Construction of the Early Warning Platform for Sudden Water Pollution Incidents

YANG Hui-hui¹, XIE Hong-yu², ZHAO Ding², SU Zhi², JIA Bin-yang^{2*}

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China; 2. The Environmental Emergency Command and Guarantee Center of Chengdu, Chengdu, Sichuan 610066, China)

Abstract: With the frequent occurrence of water pollution incidents, the construction of a water quality forecast and early warning platform has become an important part of river basin emergency management. Based on the architecture of the data perception layer, data management layer, and business perception layer of the early warning platform, this paper summarizes the construction status of the early warning platform for sudden water pollution accidents at home and abroad. Correspondingly, it reviews the research progress and shortcomings of the sudden water pollution early warning platform in recent years from the aspects of water quality monitoring technology, accident early warning model, and early warning platform construction, to provide a reference for the construction of an early warning system for sudden water pollution in the river basin.

Key words: Sudden water pollution incident; Watershed pollution; Emergency response; Early warning platform

近年来,我国流域污染事故频发,成为居民饮水安全的重要威胁。突发性水污染事件具有随机性及危害大的特点,极易引发严重的环境问题。水质预警平台可确定水质现状及未来变化趋势,在突发性水污染事故的自动预测、影响范围的展示等方面发挥了重要作用。为更好地规避流域环境风险,现从突发性水污染事故预警平台的总体架构出发,综述了监测技术、预警模型与预警平台等关键技术的研究进展,分析目前水质预警系统存在的不足,

并展望其发展方向。

1 国内外突发性水污染事故预警平台建设

1.1 突发性水污染事故预警平台总体架构

突发性水污染事故预警平台的工作过程如下:(1)水质状况实时监测;(2)发现异常数据,综合分析后报警;(3)追踪污染物位置;(4)分析污染物扩散速度和趋势;(5)提出有效的应急处理措施。因此,预警平台以信息获取、信息传输、数据处理、模

收稿日期:2021-10-18;修订日期:2021-11-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0603204);国家自然科学基金资助项目(50976024);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(50906013)

作者简介:杨慧慧(1996—),女,在读研究生,研究方向为环境应急处理研究。

*通讯作者:贾滨洋 E-mail:sisyang@126.com

型模拟为主要架构,包含数据感知层、数据管理层、业务应用层等重要建设内容,其总体架构见图 1。

由图 1 可见,数据感知层是预警平台的最底层,依托大量传感器和监测仪器等终端对各监测断面的水质监测数据进行采集与汇总,为水质预警及应急处理提供所需的数据支撑。数据管理层是预警平台的技术核心,内嵌各类水质模型及监测数据库,可基于监测结果评价当下水质,预测未来水质,计算污染物扩散趋势等,为突发事件的预警及处置提供理论指导。业务应用层面向应急管理人员,将底层收集的数据经模型层处理后,将水质在线监测数据与分析结果根据不同的需要进行展示。应用层支持水质监测与评价、水质趋势预测预警、污染溯源及应急处置,便于管理人员实施污染的精准管理与科学决策。

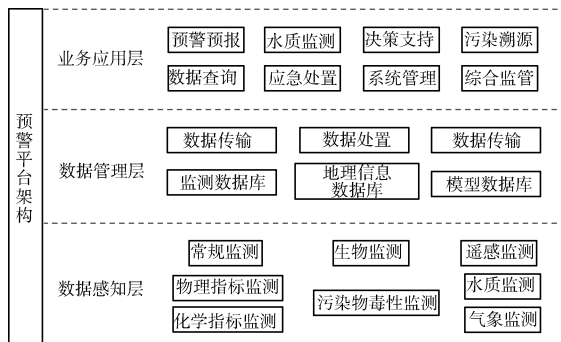


图 1 突发性水污染事故预警平台总体架构

1.2 国内突发性水污染事故预警平台建设

我国突发性水污染事故预警平台可分为 2 类。(1)宏观决策类预警平台,由风险分析、状态预测与评价、预警与决策响应 3 个部分组成,主要开展常规水污染和突发性水污染的风险识别与分析。已在我国南水北调工程、珠江三角洲、长江等流域得到应用。平台全面掌握污染风险源的发生概率及危害,有针对性地设定预警方案。但该类平台存在历史数据积累不足、基础设施不完备、数据处理和传输受限等问题。(2)管理类预警平台,由监测系统 and 预警系统组成。其针对具体发生的污染事故,对污染事故进行预警分析,在污染物到达指定区域前尽早预警,已成功应用于白河和西江等流域。但该类平台存在基层仪器的使用和维护不到位、大量数据处理不及时、专业管理能力较弱等问题,影响了预警平台的功能发挥^[1]。

1.3 国外突发性水污染事故预警平台建设

国外对于突发性水污染事故预警平台的建设起步较早,也可分为 2 类。(1)基于模型预测的预警平台,结合水文、气象及土地资源等数据,通过污染物迁移转化模型模拟污染物在水中的运输过程,预测污染物到达目标点的时间、浓度及峰值,从而实现水污染的预警与预报。比较成熟的有:①莱茵河流域水环境预警平台,建立了莱茵河专用的报警模型来预测污染物扩散情况,包括预警监测、突发污染报警、污染溯源、污染物扩散模拟及应急响应 5 个部分。系统配备在线监测仪、色谱/质谱分析仪及生物监测系统,能够对砷、铍、镉、有机污染物、氰化物等 10 种污染物及放射性物质进行监测^[1]。②俄亥俄河流域预警平台,集成 FLOWSED 和 WASP 污染物迁移转化模型用以计算污染物的运动,可对 21 种有机物成分进行分析并预测其时空分布情况。③多瑙河流域水环境预警平台,建立了污染物数据库和多瑙河流域预警模型以分析污染事故^[4],当事故发生后,平台迅速提供水质信息,集成卫星通信系统使得不同沿岸国家的数据能够及时传递。(2)基于实时监测数据的预警平台,仅监测日常数据并进行异常状态报警。如建于密西西比河、特伦特河、迪伊河及塞纳河等流域的平台,对有机污染物、生物毒性指标和营养盐类指标进行预警^[5],但此类平台没有嵌入相关计算模型,仅能实现污染的实时报警。

2 突发性水污染事故预警平台应用的监测技术

2.1 常规监测技术

水质监测技术的发展过程可以归纳为以下 3 个阶段^[6]。(1)人工监测:工作人员去流域现场采集水样并带回实验室,通过实验室仪器完成定量分析检测,该方法费时费力,难以掌握水质的实际变化情况。(2)现场仪器监测:使用便携式仪器进行现场测量,该方式简单快捷,但数据无法及时传回监控中心,且检测周期受到人力、物力的限制。(3)水质在线监测:自动化水质在线监测可以对水质参数进行整体采集,并实时反馈,出现异常情况可实现实时报警。目前水质监测已由手工采样和实验室分析监测向智能化、高精度、实时化方向发展,主要在线监测方法见表 1^[7]。

在线监测方法大多具有较高的可靠性和灵敏度,但各种方法均存在技术上的不足,同时每种方

法仅能够监测指定的物质,难以对所有污染物进行监测,具有一定的局限性。随着科技的发展,以气相色谱(GC)、气相色谱/质谱(GC/MS)、电感耦合等离子体发射光谱(ICP/AES)等为代表的现代分析仪器逐步应用到水质监测中,推动监测向痕量化、快速化方向发展。但监测仪器往往造价高、间

断运行,难以应用于大规模预警平台。因此,仍要发展快速、精确的监测技术,加大特定污染物及污染替代参数定量监测。在常规项目监测的基础上,加强有毒有害成分的监测研究工作,实现水质指标的全方位监测。

表 1 水质在线监测方法

序号	监测项目	分析方法	技术缺点
1	温度	热敏电阻法	
2	pH 值、溶解氧、电导率、氨氮、硝酸盐氮、氰化物、氟化物、氯化物	电极法	需要定期校正,低浓度时准确度差,易受温度变化影响
3	浊度	光散射法	需要定期清洗
4	高锰酸盐指数、化学需氧量	光度检测法	受浊度干扰明显,废液存在二次污染风险,对测量有干扰
5	氨氮	电位滴定法 比色法	滴定速度慢,测量时间长 受浊度干扰明显,试剂对环境污染大,在低浓度时准确度差
6	石油类	紫外荧光法	需要定期校正,结果一致性低
7	粪大肠菌群	固定酶底物法	运行成本高
8	铜、铅、锌、镉、砷、汞、铬、镭	电化学分析法	电极易老化,受共存离子干扰明显
9	总磷、总氮、氨氮、铜、铅、锌、镉、砷、铬、铁、锰、钡、钴、镍、锑、阴离子表面活性剂、硝酸盐氮、氰化物、硫化物、硫酸盐	分光光度法	受浊度或共存离子干扰明显,在低浓度时准确度差,废液存在二次污染风险
10	砷、汞、溶解氧	原子荧光法	易受环境温度影响,仪器维护技术要求高,在低浓度时稳定性差
11	苯、卤代烃、芳香烃等烃类	吹扫捕集-气相色谱分离 FID 检测在线分析仪 吹扫捕集-气相色谱分离微氦 离子化检测在线分析仪	需要氮气、氢气等多种气体配合,稳定性受影响 使用放射性物质,存在辐射风险

2.2 生物毒性监测技术

生物毒性监测是一项利用污染物与活体生物之间的应激效应(如活动规律、呼吸作用、异常行为等)来判定污染物毒性的技术。生物毒性监测指示生物及应用特点对比见表 2。由表 2 可见,各类生物指标均有各自的优缺点,并且受客观因素的影响,利用单一生物进行预警通常可靠性和准确性不足。如何找到一种兼具适用性、经济性和稳定性的方法,探寻多种指示生物联合预警是主要的发展方向。Magalhaes 等^[8]通过分析斑马鱼的个体和群体行为来分析 pH 值的亚致死效应。袁琳等^[9]对比了发光菌、绿藻、大型蚤和斑马鱼 4 种预警指示生物的优劣,并尝试多种生物联合预

警方法。未来仍须探索更优的生物毒性监测方式,或发展多种生物联合预警技术,根据不同生物的特点,更加全面、准确地反映污染物的危害与叠加影响,提高生物毒性监测的准确性与全面性。

2.3 遥感监测技术

遥感监测技术通过建立遥感观测值与水质参数浓度之间的关系来反演污染物的浓度,目前已实现对水体富营养化、悬浮物和石油类等指标的遥感监测,在我国丹江口水库、滇池、太湖等流域均有应用。水质遥感监测经历了分析法、经验法、半经验法、机器学习法和综合法的发展历程。

(1)分析法。分析法通过探究光在大气和水

表 2 生物毒性监测指示生物及应用特点对比

生物类型	反应参数	监测方法	成熟度	专业要求	优点	缺点	
细菌类	活动规律	CO ₂ 电极	低	较高	方法便捷,易于重复,适用范围广,易培养,成本低	需要无菌操作,易受浊度、盐度等因素干扰	
	生物发光特性	光电倍增管	高	中等			
	硝化作用	DO 溶解氧电极/氨电极	高	中等			
	呼吸作用	DO 溶解氧电极	中等	中等			
藻类	荧光反应	光电倍增管	中等	较高	对重金属污染物敏感	本身对污染物有一定的清除作用,需要配合富集情况来衡量	
	光合作用	安培电极	中等	较高			
无脊椎动物类	浮游动物	活动规律	红外摄像	中等	较高	对农药、重金属、化学污染物的敏感度更高	常常集群分布,采样准确度较低,需要大量的时间和人力投入
	水生昆虫	活动规律	接触式电极	中等	中等		
		呼吸作用	DO 溶解氧电极	中等	中等		
	水蚤	移动规律	摄像/光电池	中等	中等		
		呼吸作用	DO 溶解氧电极	低	较高		
鱼类	双壳贝类	贝壳开启位置	电磁线圈	高	较低~中等	可全面反映总体水质,评估对人体的危害	检测时间过长,试验鱼的选择与驯养条件较为严苛
		放电规律	电极	低	较高		
	移动规律	摄像/光电池	中等	较高			
	优先避让行为	摄像	中等	较高			
	趋流性	光电池	高	较低~中等			
	呼吸情况	非接触式电极	高	较低~中等			

体中的传播过程,利用遥感测得的水体反射率计算水质参数的相关指标,建立反射光谱与水质参数之间的关系。该方法稳定性好,不需要大量的地面实测水质数据为基础。但该方法基于已知水体中水质参数的光谱特性,在建立模型时需要测量固有光学量和表观光学量,其中部分参数随监测水域的不同而变化,因此在实际应用中效果并不理想。

(2)经验法。经验法利用遥感数据与地面实测数据之间的关系,选取相关系数最高的波段或波段组合用于统计分析,获得水质参数的最佳反演模型,在一定程度上能提高水质反演的精度。但经验法容易受到地域和时间的限制,通用性较差;需要大量实测数据作支撑才能达到理想的水质反演精度;在实测数据的影响下只能反演一定浓度范围内的水质参数,超出这个范围后,反演结果的误差明显增大,模型的准确性难以保障。

(3)半经验法。半经验法通过水质的光谱特征和实测数据的关系获得最佳波段或波段组合,选取合适的数学统计模型反演水质参数。该法充分利用了水质参数的光谱特征,目前应用最为广泛。盛琳等^[10]基于多光谱影像实施了叶绿素 a 的浓度反演及精度验证,发现半经验分析算法的反演精度和可移植性均优于传统经验模型。林剑远^[11]利用半经验法,建立了线性、二次多项式、指数和幂模型的水质参数反演模型。但半经验法仍有较强的时空局限性,针对不同类型、地区和季节的水体需要

寻找合适的数学统计模型,提高模型的通用性。

(4)机器学习法。随着人工智能的发展,机器学习理论越来越多地融入水质遥感监测中,如多元线性回归模型、神经网络模型、支持向量机模型等^[12-13]。水体光谱特征复杂,导致水质遥感监测是一个非线性的反演过程。机器学习可以通过持续的学习与修正来提升计算精度,处理遥感数据与水质参数间错综复杂的关系。Lin 等^[14]采用机器学习算法来验证藻类生物量计算的准确性,结果表明,该方法对于藻类状况的监测效果很好。徐逸等^[15]通过多种机器学习模型反演叶绿素 a 浓度,发现其浓度会影响部分模型的精度与一致性,导致计算结果存在误差。机器学习法在水质遥感监测中有着出色的表现,但构建遥感反演模型需要大量的训练样本,同时校正参数会增加模型训练的时间成本,因此如何平衡模型复杂程度和计算效率至关重要。此外,机器学习的理论基础还有待完善。

(5)综合法。单一的遥感监测方法均存在各自的局限性,受到水体的物理特征、组成成分的影响,经验模型的适用性仍欠缺。综合法通过结合多种水质遥感监测方法,发挥每种水质监测方法的优势,提高水质反演精度,增强模型的通用性。Hansen^[16]结合经验法与多元线性逐步回归方法建立叶绿素 a 的遥感反演模型,Pahlevan 等^[17]将高光谱数据与混合密度网络算法结合,2 种方式均显

著改进了叶绿素 a 的反演结果。

遥感水体监测技术已有一定成果,目前已构建出多种反演模型,但存在模型适应性差、监测指标不全面、精度相对不高等问题,对水质光谱特征及反演算法的研究仍须深入,反演精度还须进一步提高。目前单一参数的遥感光谱特性已较明确,但由于流域水体组成复杂,光谱曲线与多个水质参数之间的耦合影响仍是亟待解决的问题。

3 突发性水污染事故预警平台采用的预警模型

3.1 水质评价预测模型

水质评价预测模型是基于实测数据推断污染的发展趋势,多采用统计学方法,如单因子评价法、灰色系统评价法、主成分分析法等综合评价方法。各种评价方法的优缺点见表 3^[19]。

表 3 综合评价方法对比

方法	优点	缺点
综合指数法	目标明确,逻辑性强,评价较为综合	易简化问题
层次分析法	层次分明,系统性强	易受评价者主观影响
模糊综合法	考虑到系统内部的复杂性和模糊性	评价结果难以准确表达
灰色系统评价法	对系统参数要求较低	精确度易受影响
主成分分析法	能避免信息重叠	部分指标会失去价值

突发性水污染事故预警技术的关键是预测与预警模型的科学建立。由于其本身均存在不足,因此联合多种预测方法,发展多类型算法的优化技术进行组合预测成为研究的热点。如将神经网络模型与回归模型相结合来提高单一模型的预测精度^[20]。杨国栋等^[21]分析比较了人工神经网络和内梅罗综合污染指数法的评估效果,发现神经网络的评价效果更好,具有更明显的优势。童朝锋等^[22]采用改进的模糊数学评价法减小了水质评价中的不确定性和模糊性。朱炜玉等^[23]结合自回归模型与孤立森林算法实现水质动态高精度异常检测与预测分析。

水质评价预测模型的正确建立是水质预警平台科学工作的前提。如何优化数据智能处理算法,提高数据分析处理能力,始终是模型的发展方向。未来须加强预警模型与关联分析计算等方法的研究,构建适当的数学模型,探寻不同污染物之间的相互联系及响应关系,有效挖掘监测数据的潜在价值。

3.2 水质模拟模型

水质模拟模型基于水动力学模型,描述污染物在水中发生的物理、化学变化过程。目前已有 MIKE、EFDC、DELFT3D 等多种模型,各类水质模拟模型对比见表 4^[24]。

表 4 水质模拟模型对比

模型	水质项目	优点	缺点
QUAL2A	化学需氧量、生化需氧量、氮、磷等	模型简单,计算量较小	一维水质模型,仅能模拟较小的流域
MIKE 系列	水质、重金属、富营养化等	可用于分析大范围的流域环境,计算指标丰富	计算量大,所需时间较长,不同过程耦合存在难度
WASP	化学需氧量、溶解氧、生化需氧量、藻类、氮、磷、重金属、底泥等	交互性强,与其他模型能很好地耦合,便于二次开发	不适用于定性分析
EFDC	化学需氧量、氨氮、总磷、藻类等	多维模型,可研究点源、非点源污染等	所需数据种类多,对工作人员专业基础要求较高
DELFT3D	水质、盐度、水温等	计算稳定,精度高,能处理复杂地形	可调试的参数较少,在部分模拟上编程较为困难
HIMS-HEQM	多项水质项目	多尺度嵌套,流域面源污染与水体水质能很好地耦合	对工作人员专业基础要求较高

学者们一直致力于模型的改进。李林子等^[25]首次将 EFDC 和 WASP 联合,实现污染物的快速模拟和预测。朱茂森^[26]基于 MIKE11 软件建立了河流一维水质模型,成功推演了污染物的迁移、扩散规律。Hou 等^[27]开发了水质模型动态编译技术,结合水质模拟预测技术,实现饮用水水质预警与泄

漏模拟。

水质模拟模型是水质预警系统的核心。国内外开发的众多模型各有利弊,如何选择与实际情况更为符合的预测模型,是需要认真探讨的问题。目前仍缺乏本土化的模拟模型,多数水环境预测模型只能模拟特定污染物,难以与地理信息系统集成,

在应用上受到了限制。所以,仍须加强预警模型与关联分析计算等方法的研究,通过相应的分析算法提高数据挖掘的执行效率,并在数据挖掘模型的基础上,研究分析水质监测数据的特点和部分监测属性对水质的影响。

4 突发性水污染事故预警平台的应用

遥感技术、计算机技术和地理信息系统等技术的发展推动了交互式、集成化预警平台的开发。针对不同水体,我国构建不同的突发性水污染事故预警平台,功能和监测效率均具有一定的先进性。国内典型水污染事故预警平台见表5。

表5 国内典型水污染事故预警平台

应用流域	主要功能	具体技术
浑河 ^[28]	信息查询、风险评估、污染源管理、应急响应	算法库与GIS服务耦合、动态数据库交换技术
太湖 ^[29]	监控预警、风险评估、应急指挥	多元风险识别、水质模拟技术
西江(佛山段) ^[30]	模拟预测、污染溯源、应急指挥	LINQ to SQL技术、谷歌地图编程技术
龙江河 ^[31]	可视化展现、应急决策指挥	多维数据融合、云计算、移动互联网
三峡库区 ^[32]	风险评估、模拟预测、应急决策支持	面源污染模拟、云计算、物联网
滇池 ^[33]	数据分析、水质预测预报、应急响应	ArcGIS Server自动发布地图服务、模型一体化集成、多元数据预警分析
长江口 ^[34]	泄漏模拟、信息查询、地图操作	GIS技术、污染模拟技术

由表5可见,现有的预警平台已包含污染源管理、水质管理、风险评估、监控预警及应急响应模块,利用大数据、云计算、物联网等先进技术在典型流域的信息管理、水质预报、污染预警等方面发挥了较大作用,预警体系较为健全。但目前的水质评价和预警功能大多基于实测水质数据和国外开发的数值模拟模型,本土化的水环境模拟模型研究仍不够深入,因此需要开发出适于中国本土流域的水环境模拟模型,优化分析精度,利用人工智能等技术进一步做出更全面和精准的判断,提高系统主动发现风险并进行预警的能力。

此外,部分预警平台已具备应急决策组织、治理决策综合支撑等功能,但总体效果稍显薄弱,现有的应急方案制定与部署仍须依靠人工处理和发布,影响了预警的时效性,仍要加强预警平台智能

化建设,完善应急决策系统机制,提升应急响应时间及效率。目前在国家层面上依然缺乏完整的预警体系和相关流程,对我国流域水质的管理产生一定影响,因此要将地方流域成熟应用各类预警模型进行集成,逐渐完善国家层面的流域预警体系,为我国流域安全提供保障。

5 结语

作为保障流域安全的有力途径,突发性水污染事故预警平台须融合各类水质监测技术、预警模型与数据处理技术,确保其科学性与有效性。前人已开展大量研究,虽取得一定成果,但仍有较多理论须进一步探索,并且在实际应用中进行调整。随着水质监测技术的不断提高,预警理论与预测模型不断改进,预警系统的应用性和适应性必将增强,从而在流域水环境安全领域发挥更大的作用。

[参考文献]

- [1] 张锡辉,陶益. 水环境预警系统分类与功能分析[J]. 建设科技, 2011(17): 66-68.
- [2] DIEHL P, GERKE T, JEUKEN A, et al. Early warning strategies and practices along the River Rhine[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2006: 99-124.
- [3] GRAYMAN W M, VICORY JR A H, MALES R M. Early warning system for chemical spills on the Ohio river[M]. Springer Netherlands, 2000: 91-100.
- [4] PINTER G G. Early warning system on the Danube river[J]. Security of Public Water Supplies, 2000, 66: 101-106.
- [5] GULLICK R W, GAFFNEY L J, CROCKETT C S, et al. Developing regional early warning systems for US source waters[J]. Journal American Water Works Association, 2004, 96(6): 68-82.
- [6] 孙红巍. 流域水质在线监测与预警技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [7] 刘京, 刘廷良, 刘允, 等. 地表水环境自动监测技术应用与发展趋势[J]. 中国环境监测, 2017, 33(6): 1-9.
- [8] MAGALHAES C, MENDES J, VARDASCA R. Meta-analysis and systematic review of the application of machine learning classifiers in biomedical applications of infrared thermography [J]. Applied Sciences, 2021, 11(2): 42-50.
- [9] 陈洁, 袁琳, 叶丹, 等. 不同重金属污染物对两种发光菌的毒性测试研究[J]. 人民长江, 2014, 45(18): 77-81.
- [10] 盛琳, 陈静, 刘锐, 等. 一种水质分析方法: 基于GOCI影像的东平湖叶绿素a浓度估算[J]. 环境保护, 2017, 45(10): 60-63.
- [11] 林剑远, 张长兴. 航空高光谱遥感反演城市河网水质参数

- [J]. 遥感信息, 2019, 34(2): 23-29.
- [12] VERRELST J, MUNOZ J, ALONSO L, et al. Machine learning regression algorithms for biophysical parameter retrieval: Opportunities for Sentinel-2 and-3[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 118(4): 127-139.
- [13] KUPSSINSKU L S, GUIMARAES T T, SOUZA E M D, et al. A method for chlorophyll-a and suspended solids prediction through remote sensing and machine learning[J]. Sensors, 2020, 20(7): 2125.
- [14] LIN S, NOVITSKI L N, QI J, et al. Landsat TM/ETM+ and machine-learning algorithms for limnological studies and algal bloom management of inland lakes[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2018, 12(2): 1-17.
- [15] 徐逸, 董轩妍, 王俊杰. 4种机器学习模型反演太湖叶绿素a浓度的比较[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(4): 48-57.
- [16] HANSEN C H, WILLIAMS G P. Evaluating remote sensing model specification methods for estimating water quality in optically diverse lakes throughout the growing season[J]. Hydrology, 2018, 5(4): 62.
- [17] PAHLEVAN N, SMITH B, BINDING C, et al. Hyperspectral retrievals of phytoplankton absorption and chlorophyll-a in inland and nearshore coastal waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 253: 1-15.
- [18] MAJID N A, PHANG I C, DARNIS D S. Characteristics of *Pelargonium radula* as a mercury bioindicator for safety assessment of drinking water. [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(29): 35-39.
- [19] 李键, 杨玉楠, 吴舜泽, 等. 水环境预警系统的研究进展[J]. 环境保护, 2009, 416(6): 4-7.
- [20] SEO I W, YUN S H, CHOI S Y. Forecasting water quality parameters by ANN model using pre-processing technique at the downstream of Cheongpyeong dam [J]. Procedia Engineering, 2016, 154: 1110-1115.
- [21] 杨国栋, 王肖娟, 尹向辉. 人工神经网络在水环境质量评价和预测中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(6): 10-14.
- [22] 童朝锋, 吕立锐, 冯骞, 等. 基于改进的模糊数学评价法的外秦淮河水质评价[J]. 水资源保护, 2014, 30(4): 61-66.
- [23] 朱炜玉, 史斌, 姜继平, 等. 基于水质时间序列异常检测的动态预警方法[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 131-137.
- [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.
- [25] 李林子, 钱瑜, 张玉超. 基于EFDC和WASP模型的突发水污染事故影响的预测预警[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(8): 1010-1016.
- [26] 朱茂森. 基于MIKE11的辽河流域一维水质模型[J]. 水资源保护, 2013, 29(3): 6-9.
- [27] HOU D B, SONG X X, ZHANG G X, et al. An early warning and control system for urban, drinking water quality protection: China's experience [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(7): 4496-4508.
- [28] 林华. 浑河流域水环境风险预警平台的软件架构设计[J]. 环境保护科学, 2013, 39(2): 77-80.
- [29] 李维新. 太湖流域水环境风险评估与预警技术示范[J]. 中国科技成果, 2013(15): 33-34.
- [30] 朱素芳, 李勇, 张秋华. 西江流域可视化监控预警与应急系统的构建[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(9): 104-109.
- [31] 李丽和, 周小宁, 廖平德, 等. 龙江河流域水环境突发事件智能监控预警系统构建研究[J]. 环境监测管理与技术, 2015, 27(3): 32-36.
- [32] 张艳军, 秦延文, 张云怀, 等. 三峡库区水环境风险评估与预警平台总体设计与应用[J]. 环境科学研究, 2016, 29(3): 391-396.
- [33] 李俊萩, 高凌宇, 张晴晖, 等. 滇池蓝藻水华监测预警平台设计[J]. 中国环境监测, 2021, 37(2): 163-168.
- [34] 陈义中. 长江口突发水污染事故应急响应系统开发与应用[J]. 人民长江, 2013, 44(22): 5-9.

栏目编辑 周立平