

· 专论与综述 ·

# 地表水水质预警方法研究综述

嵇晓燕<sup>1</sup>, 杨凯<sup>1</sup>, 姚志鹏<sup>1</sup>, 陈亚男<sup>1</sup>, 安新国<sup>2</sup>, 韩温诺<sup>2</sup>

(1. 中国环境监测总站, 北京 100012; 2. 北京金水永利科技有限公司, 北京 100012)

**摘要:**阐述了水质预警的概念,介绍了水环境模型、生物毒性监测和数理统计方法在地表水水质预警中的应用,总结了各种方法的优缺点。分析了水质预警方法目前面临的挑战,并从融合多种预警方法、关联多维多元数据、建立一体化智能模型等3个方面,对水质预警未来的发展方向进行了展望。

**关键词:** 地表水;水质预警;水质模型

中图分类号: X832; X52

文献标志码: A

文章编号: 1006-2009(2022)03-0010-05

## An Overview on Early Warning Methods of Surface Water Quality

Ji Xiao-yan<sup>1</sup>, YANG Kai<sup>1</sup>, YAO Zhi-peng<sup>1</sup>, CHEN Ya-nan<sup>1</sup>, AN Xin-guo<sup>2</sup>, HAN Wen-nuo<sup>2</sup>

(1. China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China;

2. Golden Water Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100012, China)

**Abstract:** This paper expounded the concept of water quality early warning, introduced the application of water environment model, biological toxicity monitoring and mathematical statistics in surface water quality early warning, and summarized the advantages and disadvantages of various methods. The current challenges of water quality early warning methods were analyzed. The future development direction of water quality early warning was prospected from three aspects: integrating multiple early warning methods, associating multidimensional and multivariate data and establishing integrated intelligent model.

**Key words:** Surface water; Water quality early warning; Water quality model

近年来,随着水污染防治工作的全面推进,我国地表水环境质量显著提升,污染严重水体大幅减少。然而,水污染防治形势依然不容乐观,据不完全统计,2016—2020年我国发生水污染事件共计334起<sup>[1]</sup>。水质异常预警方法研究对于预防水质污染事件发生,以及进一步提升水环境质量具有重要的现实意义。国内外针对水质预警方法虽然有很多研究成果,但缺少对各类方法的系统性分析和总结。今梳理国内外地表水水质预警的主流方法,分析最新的研究成果及其应用,提出水质预警方法面临的挑战和发展方向,为开展地表水水质预警深入研究提供参考。

### 1 水质预警概念

预警指灾害发生前发布的紧急信号。联合国减灾办公室关于预警的宏观定义是通过确定机构

提供及时有效的信息,使暴露在危险中的个人能够采取行动,以避免或减少其风险,并为有效应对做好准备<sup>[2]</sup>。随着人们生态环境保护意识的加强,预警的概念开始被应用于水环境领域<sup>[3]</sup>。董志颖等<sup>[4]</sup>提出,水质预警指在限定时间、限定范围内对水质状况及影响进行监测、分析和评价,并通过对环境行为和人类行为的分析,对水质未来变化趋势进行预测,对水质变化造成的危害及程度进行预报预警,适时给出相应的对策。近期研究对水质预警的定义为依据监测数据分析警情变化并进行警兆

收稿日期:2021-11-20;修订日期:2022-03-11

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项“国家水环境监测监控及业务化平台技术研究”基金资助项目(2017ZX07302002);生态环境部“长江生态环境保护修复联合研究”基金资助项目(2019-LHYJ-01-0301)

作者简介:嵇晓燕(1981—),女,江苏淮安人,正高级工程师,博士,主要从事水环境质量监测与评价研究。

识别,针对水污染现状、变化趋势及突发污染事故制定应对计划并采取防范措施<sup>[5]</sup>。

地表水水质预警是以地表水为研究水体,以地表水环境质量为评价标准,通过该水体历史监测指标数据及在线实时监测指标数据建立多种分析评判模型,对当前水质情况及未来水质发展趋势进行客观、精准的诊断预测。当水体即将出现或已经出现变化时,以及在发生突发污染事故的情况下,自动产生相应的报警信息,以便相关环境管理机构及时制定并采取相应的污染防治措施。

## 2 水质预警方法

表 1 地表水水质预警方法分类

Table 1 Classification of surface water quality warning methods

类别	方法名称	优势	不足
基于水环境模型预警	QUAL2K	由简单模型组合而成,计算量较小	一维水质模型,应用少
	MIKE	适用性强,精度高,可视化程度高	计算量大,非开源,不同过程耦合难度大
	WASP	模块灵活,可与多种模型耦合	假定完全混合水体,有局限性
	EFDC	代码开源,通用性强,可与多种模型耦合,可视化程度高,计算效率较高	对基础资料要求全面,模型参数多,建模复杂度相对较高
基于生物毒性监测预警	基于水生生物行为分析	灵敏度较高,可靠性较好,适应能力较强	生物行为轨迹存在地域差异且不易观测,技术流程较复杂,普适性和可操作性较低
	基于发光菌发光抑制作用	灵敏度高,应用范围广	操作烦琐,误差较大,技术复杂,成本高
	基于微生物电化学技术	灵敏度高且响应速度快,操作简单	稳定性较差,运行期间维护频繁,易受水体化学反应影响
基于数理统计预警	统计学分析	实现简单,应用广泛	模型精准度较差,易产生误报或漏报
	人工智能技术	准确率高,计算速度快	数据质量要求高,结果可解释性不强

### 2.1 基于水环境模型的预警方法

#### 2.1.1 QUAL2K 模型

QUAL2K 是美国环境保护署 (USEPA) 研发的一个综合性的多样化河流水质模型,可以描述河流水体中氮磷营养盐、溶解氧和耗氧有机质的动态变化过程,被广泛应用于欧美和亚洲等流域水质管理<sup>[6]</sup>。QUAL2K 模型在我国台湾北部某河流的水质评价中,对生化需氧量、氨氮、总磷和沉积物需氧量等污染指标的模拟结果与监测数据基本一致<sup>[7]</sup>。Bui 等<sup>[8]</sup>利用 QUAL2K 模型对以有机和富营养污染为主的 Cau River 进行了水质模拟,结果接近于实测数据。张亚丽等<sup>[9]</sup>提出了基于 QUAL2K 模型的水质预警方法,并在卫河进行了化学需氧量和氨氮两项水质指标预警的实证研究,证明该模型在较规整河道中具有一定的适用性。QUAL2K 模型假定物质在河流中的迁移以平移和弥散的方式进行,且认为物质的迁移方式只发生在

基于不同的方法原理,将水质预警分为 3 大类:基于水环境模型预警、基于生物毒性监测预警和基于数理统计预警。基于水环境模型预警利用污染物在水体中发生的物理、化学变化,以及各因素之间相互关系的数学方程,对污染物的迁移转化建模,实现水环境污染预警;基于生物毒性监测预警利用水生生物感知水环境发生的变化,通过其应激反应对水质预警;基于数理统计预警通过对历史监测数据的统计分析,得出水质变化规律及未来发展趋势,当数据出现异常时进行预警。目前主流的地表水水质预警方法分类见表 1。

河道或水道纵向。该模型虽然适用于各类水域的水质模拟,但模型的率定难度大。

#### 2.1.2 MIKE 模型

MIKE 模型由丹麦水利所研发,适用于模拟内陆地表水系统的水质预警、洪水预报、防洪措施分析、灌溉和排水系统设计等。Stedmon 等<sup>[10]</sup>利用 MIKE11 模型对比利时 Molse Neet 河流进行了水质模拟,结果表明,该方法预测水质的效率比传统方法显著提高。胡琳等<sup>[11]</sup>利用 MIKE11 模型进行水质预警,结果表明模型计算值与实际监测值有较高的吻合性。Zheng 等<sup>[12]</sup>指出,可以根据设计的网络参数输出测量数据进行校准,验证和训练水质模型,并基于此建立多种指标的预警模型。MIKE 系列模型具有精度高、通用性强等优点,可用于河流、海洋、水库等地表水环境模拟研究。然而,其模型源代码不公开且价格较昂贵,建立模型的步骤比较复杂,模型参数较多且难以率定,因

而仅适用于基础数据较全及水体运动较为简单的河流或湖库。

### 2.1.3 WASP 模型

WASP 模型由美国 Hydroqual 公司于 1981 年开发,在河流、水库、湖泊、湿地、海洋和城市景观水等不同水体中得到广泛应用,其中河流应用最为普遍。Kim 等<sup>[13]</sup>使用 WASP 模型对韩国汉江下游的藻华发生模式建模,以解决汉江水质问题。孟祥仪<sup>[14]</sup>基于 WASP 模型对清水河沿岸典型污染源的水环境影响进行预警研究,实现了污染物的预警及污染影响范围的模拟。WASP 模型虽然能与多种模型耦合,但由于研究对象为完全混合水体控制单元,因而模拟具有一定的局限性。此外,其水动力学采用显性差分格式求解,在水流速度较低的情况下可能无法定性分析。

### 2.1.4 EFDC 模型

EFDC 模型由美国弗吉尼亚海洋研究所于 1988 年开发,包括一维、二维、三维水动力,泥沙输运,物质输移,水质动态变化及泥沉积成岩等模块,被广泛应用于地表河流、湖库等水体的水质监测预警。邵世保等<sup>[15]</sup>利用 EFDC 建立了河流水质污染扩散模拟模型,有较高的拟合与预测精度,可以实现水质预警。卢诚等<sup>[16]</sup>以十堰市神定河为研究对象,基于 EFDC 构建了水动力模型,结果表明模拟值与实测值的相对误差和决定系数均在适宜范围内。EFDC 模型可以将水龄与浮游植物数量相关联,定量分析三峡水库蓄水后水动力对水质的影响及其与藻类大量繁殖的关系<sup>[17]</sup>。EFDC 模型代码开源便于二次开发,多被用于水质、水动力模拟及水质预测预警。然而,该模型对基础数据要求较高,模型参数调试、结果解析较为复杂。

以上基于水环境模型的预警方法适用于水体环境物理、化学变化较稳定,反应符合一般变化规律的水体。对于水利工程频繁干预下的水体,其自身环境包括温度、流速、流向等会发生较大变化,甚至在局部区域还会影响气象环境包括降水、气温等,导致影响水质变化的反应环境与水环境模型内部机理所包含的反应环境截然不同,由此造成模型对水质的模拟不能客观反映真实情况。

## 2.2 基于生物毒性监测的预警方法

### 2.2.1 基于水生物行为分析

基于水生物行为分析的水质预警方法根据水

生物在水体受到污染后产生的异常行为反应进行水质预警。目前,生物监测在水质预警中的应用十分广泛,国内外比较常用的生物监测对象有细菌、大型溞、双壳类、鱼类等。蒋瑞卿<sup>[18]</sup>以鱼类为试验对象,通过改变水中氰化物的浓度来观察鱼类行为,为供水企业判断水体氰化物毒性提供依据。严升<sup>[19]</sup>通过调节水体 pH 值获取红鲫鱼鱼群的游动视频,实现了基于鱼群跟踪轨迹的生物水质预警方法。基于水生物行为分析的水质预警方法优点是灵敏、准确度高,可以弥补传统理化方法难以反映水质毒性效应的不足。然而,该方法适用的水质指标较少,试验时间长且操作烦琐,仅适用于水质要求高、比较封闭的水域。

### 2.2.2 基于发光菌发光抑制作用

发光细菌法基于发光菌发光抑制的原理分析污染物毒性变化,通过发光值与对照值比较得到发光抑制率,低于 20% 被认为具有急性毒性效应。发光细菌法是一种比较成熟的生物监测方法,在工业废水毒性监测及水域水质评价中应用较多,废水的综合毒性与发光菌的抑光率有良好的相关性<sup>[20-21]</sup>,适用于在线水质监测预警。郑剑平等<sup>[22]</sup>通过基于发光细菌法运行的水质毒性在线分析仪对不同重金属的响应特性,分析了发光细菌抑制率与水质的关系,为水质安全预警提供了参考。Woutersen 等<sup>[23]</sup>研发了一种含有固定转基因发光细菌的在线生物传感器,通过发光菌的发光强度对水的基因毒性作出响应。发光细菌法对有机污染物与重金属等毒性物质的监测具有较高灵敏度,在水环境毒性监测领域有广阔的应用前景。然而,细菌监测技术相对复杂,成本较高,受水体浊度等因素的影响较大。

### 2.2.3 基于微生物电化学技术

基于微生物电化学技术的水质预警方法将微生物的呼吸或代谢作用转换成电信号,通过判断电信号的变化进行水质预警,该技术可以实现水环境中的毒性物质预警<sup>[24]</sup>。Yang 等<sup>[25]</sup>研制了一种基于电化学生物传感器的水质急性毒性预警仪,通过对多个水样测试,表明该仪器对有色金属离子样品敏感,在水质风险预警方面具有潜在的应用前景。微生物传感器在应用过程中操作简单,对污染物响应的灵敏度高且反应快。然而,当水体中存在非生物电化学还原反应时会对电信号产生干扰,从而影响传感器的监测性能。

## 2.3 基于数理统计的预警方法

### 2.3.1 统计学分析

统计学分析是对水质历史数据及其他影响水质的数据进行分析,建立各种数据与水质数据之间的关系模型,在此基础上进行水质预警。其中,基于谱分析和相关性分析的水质预警技术比较成熟,应用较多。

谱分析是将水质的时间序列数据看作信号,通过转换分析得到数据规律及趋势,从而进行水质异常预警。王宝玉<sup>[26]</sup>利用傅里叶变换和连续小波变换识别了6个水质参数的异常时刻、持续时间和幅度,实现了水质指标的异常预警。Himanshu等<sup>[27]</sup>利用小波变换支持向量机对印度南部两个流域的水质指数进行预测,结果表明小波变换预测的准确性高,可作为水质预警的有效工具。利用谱分析进行水质预警虽然准确度较高,但对监测设备的精确性、鲁棒性要求较高,同时需要分析人员对信号处理转换技术有一定了解,应用门槛较高。

相关性分析是对两个或多个变量的相关密切程度进行分析。水质预警方法通常利用皮尔逊相关系数和回归方程分析指标间的相关性,利用MK检验进行趋势性分析,基于主成分分析、判别分析、聚类分析等对水质监测数据进行统计,实现水质异常预警<sup>[28-31]</sup>。王威等<sup>[32]</sup>引入预警概率的概念,借助皮尔逊Ⅲ型频率曲线给出了一种水源地水质分级预警阈值的计算方法。Zhang等<sup>[33]</sup>利用Copula函数对水环境的多元风险变化进行识别和评价,分析了水动力因素和流量对藻细胞密度变化的影响,达到对不同河段藻类进行预警的目的。水环境的复杂性导致水质数据受多种因素影响,大多数水质指标之间的相关性较弱,一般是凭经验进行相关指标的设置,并且不同水体之间的相关指标差异很大。

统计分析方法的优点是易于实现,适用于不同类型的水体。然而,由于水环境自身的复杂性,方法难以很好地捕捉数据规律,易产生误报或漏报。因此,基于统计学分析的水质预警方法更适用于流域的长时间尺度预警,以及变化比较稳定水体的短时间尺度预警。

### 2.3.2 人工智能技术

生态环境领域数据的日益积累为人工智能技术的应用奠定了基础。人工智能技术在水质预警中的应用主要分为预测模型和分类模型两个方面。

预测模型从大量的历史数据中学习数据特征,建立数据之间的关联性并进行水质预测,根据预测结果和实际结果的偏差实现水质预警。预测模型大致分为两类,一类是基于时间序列数据模型(包括ARIMA、fbProphet、LSTM、GRU等)实现预测。朱炜玉等<sup>[34]</sup>利用AR模型实现了水质时间序列的动态高精度预测,通过与设定阈值的比较识别水质异常,从而进行水质预警。另一类是基于多种模型的集成学习模型。王晶等<sup>[35]</sup>利用自适应遗传算法与BP神经网络模型,建立了由气温-水温-水质组成的水质预测模型GA-GABP,在此基础上实现了水质预警。预测模型由数据驱动,通过挖掘历史数据的变化规律实现预测和预警,其优点是结果准确率高,预警效果好,适用范围较广。对于小尺度流域而言,建立预测模型时要考虑气象条件、面源污染等对水质的影响;对于中、宏尺度流域而言,需要考虑经济数据、人文数据、社会数据等对水环境的影响。对于缺少历史数据的水体,难以建立比较精确的模型,且模型涉及的参数与水环境自身不存在因果关系,导致模型结果的可解释性不强,在一定程度上限制了模型的发展。

分类模型通过学习历史数据中异常水质数据的特征,对当前数据进行特征分析,若符合异常数据特征,则进行水质预警。分类模型包括随机森林、支持向量机、Kmeans算法等。刘云翔等<sup>[36]</sup>基于叶绿素a浓度,采用随机森林模型构建了水华预警模型。李若楠等<sup>[37]</sup>采用典型相关系数与随机森林建立了水质预警模型,用于探测水污染事件。分类模型的核心在于具有足够多的异常数据,在此基础上方可建立精确度较高的模型。

此外,基于机器学习进行预警的方法因其技术的先进性,可以深层次挖掘数据内部之间的关联性,建立多维度数据之间的关系模型,预警结果的准确性较高。然而,由于模型内部是“黑匣子”状态,导致其结果的可解释性不强,实际应用较少。

## 3 水质预警方法面临的挑战与发展方向

水质预警方法目前依然面临着很大的挑战。一方面,水质整体管控需要可以推广的预警方法。水环境是一个整体,水质管理需要从流域层面进行,只有统一的预警方法才能对流域水质整体把控,而目前很多水质预警方法由于模型的约束,造

成通用性不强。另一方面,水质精细化管理需要精准的水质预警结果。目前预警方法利用的数据单一,未综合考虑经济、水文、气象、地理条件等要素,无法建立完全符合水体真实情况的水质预警模型,误报、漏报情况时有发生,难以支撑日后水环境管理工作的需求。

结合当前水环境管理工作的业务需求,提出以下水质预警方法的发展方向。一是融合多种预警方法。不同的预警方法之间互相弥补,可以形成预警指标的全覆盖,提高预警的精确度、适用性,应用于不同类型的水体。二是关联多维多元数据。构建水环境质量预警的大数据保障体系,建立国家各数据中心的信息共享与业务合作机制,实现数据时空一体化。通过建立关联多维多元数据的模型,分析多种数据与水质之间的关系,进一步提升模型对水质预测预警结果的精准度。三是建立以水质为目标的一体化智能模型。以研究水体的水质管理为目标,自动化实现水质监测、异常数据判断、污染原因分析、溯源分析,以及管控措施的效果分析,构建污染事件数据库迭代优化模型。

随着水质预警技术的不断发展与水环境管理业务水平的持续提升,水质预警方法作为早期污染事件的“侦察兵”和水质恶化的“预言家”,可以为水质管理决策提供数据支撑,在地表水环境保护工作中发挥重要作用。

#### [参考文献]

- [1] 李生才,安莹. 2020年11—12月国内环境事件[J]. 安全与环境学报,2021,21(1):450-452.
- [2] UNISDR. Terminology: Basic terms of disaster risk reduction [M]. Geneva: United Nations, 2004.
- [3] 嵇晓燕,刘廷良,孙宗光. 地表水水质自动监测预警理论初探 [C]//李国刚. 环境监测技术新进展: 庆祝中国环境监测总站成立30周年论文集. 北京: 化学工业出版社, 2010: 111-115.
- [4] 董志颖,王娟,李兵. 水质预警理论初探[J]. 水土保持研究, 2002,9(3):224-226.
- [5] 计红,韩龙喜,刘军英,等. 水质预警研究发展探讨[J]. 水资源保护,2011,27(5):39-42.
- [6] 张弛. 基于QUAL2K模型的复州河污染特征模拟及其治理方案研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [7] FAN C, KO C H, WANG W S. An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on river water quality simulation[J]. Journal of Environmental Management, 2009,90(5):1824-1832.
- [8] BUI H H, HA N H, NGUYEN T N D, et al. Integration of SWAT and QUAL2K for water quality modeling in a data scarce basin of Cau River basin in Vietnam[J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2019,19(2):210-223.
- [9] 张亚丽,王艺铭,史淑娟,等. 基于QUAL2K模型的鹤壁卫河水水质模拟预警研究[J]. 中国环境监测,2018,34(5):138-143.
- [10] STEDMON C A, SEREDYNSKA-SOBECKA B, BOE-HANSEN R, et al. A potential approach for monitoring drinking water quality from groundwater systems using organic matter fluorescence as an early warning for contamination events[J]. Water Research, 2011,45(18):6030-6038.
- [11] 胡琳,卢卫,张正康. MIKE11模型在东苕溪水源地水质预警及保护的应用[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2016,31(1):28-36.
- [12] ZHENG F, TAO R, MAIER H R, et al. Crowdsourcing methods for data collection in geophysics: State of the art, issues, and future directions[J]. Reviews of Geophysics, 2018,56(4):698-740.
- [13] KIM J, LEE T, SEO D. Algal bloom prediction of the lower Han River, Korea using the EFDC hydrodynamic and water quality model[J]. Ecological Modelling, 2017,366:27-36.
- [14] 孟祥仪. 基于WASP模型的宁夏清水河水水质预警研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [15] 邵世保,吴雁,张德辉,等. 基于EFDC水动力-水质模型的建立——以慈湖河为例[J]. 环境与发展, 2020,32(2):103-105.
- [16] 卢诚,安堃达,张晓彤,等. 基于EFDC模型的神定河水水质模拟[J]. 中国环境监测,2020,36(4):106-114.
- [17] GAO Q, HE G, FANG H, et al. Numerical simulation of water age and its potential effects on the water quality in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydrology, 2018,566:484-499.
- [18] 蒋瑞卿. 生物监测在水质预警中的应用: 鱼类氰化物毒理试验[J]. 净水技术, 2018,37(S1):39-42.
- [19] 严升. 基于鱼群跟踪轨迹的生物水质预警方法研究[D]. 西安: 西安邮电大学, 2019.
- [20] 张述伟,孔祥峰,姜源庆,等. 生物监测技术在水环境中的应用及研究[J]. 环境保护科学, 2015,41(5):103-107.
- [21] 王兆群,司皖甦,严刚. 发光细菌法在环境监测中的应用[J]. 环境监控与预警, 2009,1(2):14-17.
- [22] 郑剑平,余琼珍,何松立,等. 水质毒性在线分析仪的运行特性及其在西江水水质预警监测中的应用研究[J]. 海峡科学, 2018(7):3-5.
- [23] WOUTERSEN M, GAAG B V D, BOAKYE A A, et al. Development and validation of an on-line water toxicity sensor with immobilized luminescent bacteria for on-line surface water monitoring[J]. Sensors, 2017,17(11):2682-2694.
- [24] CHU N, LIANG Q, HAO W, et al. Microbial electrochemical sensor for water biotoxicity monitoring[J]. Chemical Engineering Journal, 2021,404:127053-127065.

(下转第63页)