

我国水环境监测发展挑战与智慧化趋势展望

Challenges in the development of water environment monitoring in China and the prospects of its intelligent trend

■文 / 刘鹏程^{1,2} 程海军¹ 刘晴靓¹ 吕东伟¹ 程喜全^{2,3} 张瑛洁^{2,3} 王明星¹ 马军^{1*}

本文作者马军系中国工程院院士,哈尔滨工业大学环境学院教授,城市水资源开发利用(北方)国家工程研究中心主任,国际水协会水厂设计与运行管理委员会主席,第三届黑龙江省生态环境监测专业技术人员大比武活动专家委员会主任

当前,我国对水环境的保护由单纯的水体化学污染指标控制逐步转变为水环境、水生态、水资源、水安全的统筹治理。生态环境监测在生态环境保护和生态文明建设中起到了关键的基础性和支撑性作用。水环境监测不仅能够及时发现和评估水资源质量的变化,还能政策制定者提供必要的支持,使其能够迅速应对各种水污染事件并采取有效的治理措施。随着人们对环境问题认识的加深以及科技的快速发展,水环境监测行业必须不断创新,以适应日益变化的环境需求。大数据、物联网和人工智能等新兴信息技术的快速发展,为水环境监测的进一步提升带来了巨大的机遇,推动该领域朝着数字化和智慧化方向迈进。

一、水环境监测现状与问题

我国的水环境质量监测始于1973年,并于1974年开始独立建制。1982年,国家环境保护总局会同17个有关部门组建了由54个监测站组成的国家环境监测网。在“十四五”期间,全国布设了3 641个国家地表水环境质量评价、考核、排名监测断面。针对不同的水环境,提出了具体的监测指标体系和评价体系。

(一) 城镇污水处理厂

经过多年的研究与实践,城镇污水处理厂的进出水水质监测技术已经取得了显著的进步。现代水质监测技术能够实时、准确地监测水中的各种污染指标,如化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)、氨氮、总磷等,为污水处理厂的运营提供坚实的数据支撑。同时,随着数据采集与收集技术的日益成熟,借助自动化、智能化的数据采集系统,已经实现了对污水处理厂各环节的实时监控,确保了数据的精确性与时效性。城镇污水处理厂已经形成了一整套相对完备的管

理体系。随着信息化技术的不断发展,污水处理厂还积极引入先进的管理信息系统,实现对污水处理过程的精细化管理,进一步提高管理效率和水平。

污水处理厂在应对溢流污染及生化系统运行状况监测等方面仍面临诸多挑战。溢流污染的处理是污水处理厂运营中的一大难题,往往在暴雨等极端天气下,污水流量骤增,超出污水处理厂的处理能力,致使未经充分处理的污水直接排放至环境中,对水体造成严重污染。针对此问题,污水处理厂需加强预警机制建设,通过实时监测与数据分析,提前预判溢流风险,并采取有效措施予以应对,如增设调蓄池、优化排水管网布局等。同时,生化系统运行状况监测是污水处理厂运营管理的关键环节。生化处理作为核心工艺,其运行效率与稳定性直接影响出水水质。然而,由于生化系统复杂多变,易受进水水质、温度、pH值等多种因素的影响,监测难度大、调控不及时。因此,污水处理厂需引入更先进的监测技术与智能化管理系统,以实现对生化系统的精准监控与高效调控,确保出水水质稳定达标。

(二) 排水管网

在城市基础设施的智能化升级中,排水管网监测技术的提升占据了举足轻重的地位。近年来,随着水位、流量、水质等传感器监测技术不断完善,以及数据采集与传输技术日益成熟,排水管网监测工作取得了显著成效。

传感器作为排水管网监测系统的“哨兵”,能够实时、准确地捕捉管道内的各种关键参数。水位传感器精准反馈水位变化,为防洪排涝决策提供有力支持;流量传感器通过测量水流速度,揭示排水管网的真实运行状态;而水质传感器则实时监测水质指标,确保排水质量始终符合环保标准。这些传感器的广泛应

用,不仅显著提升了排水管网监测的准确性和时效性,更为城市管理者提供了翔实、可靠的数据支撑。在数据采集与传输方面,物联网技术的飞速发展使得排水管网监测系统的数据传输更迅速、准确。借助物联网技术,传感器采集到的数据能够实时传输至监测中心,实现对排水管网运行状态的远程监控。同时,数据的存储和处理也变得更加高效、便捷,为后续的数据分析和预警提供了坚实基础。

随着全球气候变暖加剧,极端天气事件频发,城市内涝已成为许多城市面临的严峻挑战。面对这一挑战,人们发现既有预测预警技术手段尚存不足。为了有效应对城市内涝,需要依靠更加先进的预测预警技术,并结合对历史数据的深度处理和分析。通过安装高精度、实时性强的水位、流量和水质传感器,可以实时监测城市排水管网和关键区域的水情变化,捕捉微小的水位波动和流量变化,为内涝防控提供准确的基础数据。同时,结合遥感技术、地理信息系统(GIS)和气象雷达等先进手段,可以对城市地表水信息、降雨情况进行全面监测,进一步提高预测的准确性和时效性。利用大数据技术和人工智能算法,可以对历史数据进行深度挖掘和关联分析,揭示出内涝与降雨量、排水管网、地形地貌等因素之间的复杂关系,为城市内涝的精准预测和及时预警提供有力支持。

(三) 流域水资源监测

流域水资源监测在水资源管理中发挥着基础性的作用。该监测工作主要依靠流域内的水文观测站和遥感技术来完成,利用多种技术可实时获得河流、湖泊和水库的水量、水质信息。水文监控着重于监测降雨、蒸发和径流等核心指标。当前,气象监测、自动雨量计等技术都能提供瞬时气象数据。但在一些偏远地区,装备不完善、数据传输困难等问题仍是提高监测准确率的主要障碍。水质监测方法包括自动化监测站、现场实际监测及实验室分析等,这些方法均能实时监测水中的主要污染指标,如溶解氧和COD等。

近年来,源厂联网一体化多层次监控系统应运而生,它将遥感技术、自动化监控设备及数据分析工具有机地结合在一起,为流域综合实时监测提供了一种创新解决思路。然而,不同监测系统间的数据孤岛现象以及缺乏一致性调度策略制约着管理效能。今后,智能化、集成化以及动态化将是流域水资源监测技术发展的主要趋势。

二、水环境监测面临的挑战

目前,我国的水环境质量管理体系已初步形成一定规模,为水资源的管理和保护提供了重要的数据支持。建设人与自然和谐共生的美丽中国的目标对环境监测水平、质量和功能提出了更高的要求。目前,水环境监测主要面临如下挑战。

(一) 污水处理厂以末端监测为主,缺少全过程监测

污水处理厂末端监控是指在出水口监测COD、氨氮、总磷和总氮等指标。这种监测形式能够实现实时监控,并且便于利用物联网的信息化管理手段对监测数据进行管理,能够及时发现污染指标是否超标,起到监督作用,降低对水环境、水生态的影响。然而,末端监测方式在污染防治的主动性和系统性上存在不足,难以指导污水处理厂实现优化运行。

全过程监测是对进水水质、处理过程及出水水质等关键环节进行实时监控,以实现对整个处理过程的监管。通过深度分析与智能化处理,及时识别异常情况,提供整改提升方案和科学决策支持,从而提高管理效率与处理效果。全过程监测能够更早地识别潜在的污染问题,进而采取预防措施,避免污染事件或减少污染对生态环境的影响,有助于改变以末端监测为主的现状。因此,增加全过程监测的比例,对于提升我国水环境监测的系统性和全面性至关重要。

(二) 主要关注具体污染指标,缺少对水生态指标的监测

我国水环境监测长期以来主要关注的是具体的污染指标,如COD、氨氮、重金属等。这种监测模式确实能有效地反映某些特定污染物的浓度变化,为污染控制和环境治理提供基础数据。然而,这种以单一指标为导向的监测方式忽视了水体作为一个复杂生态系统的整体健康状况,难以全面评估水环境的生态功能。

水环境中,生物群落和生态过程对于维持生态系统的稳定和健康至关重要。例如,水体中的生物多样性、水生植物的生长状况、营养元素的循环等,都是衡量水生态系统健康状况的重要指标。目前的水环境监测体系对这些生态指标关注较少,缺乏系统性的监测和评估。因此,未来的水环境监测应当向更加综合和生态化的方向发展,将污染指标与生态健康指标结合起来,全面评估水体的生态功能和可持续性。

(三) 监测数据服务功能单一,缺乏系统性思维

我国水环境监测的数据服务功能较为单一,只侧

重于提供某些特定污染物的监测数据或满足某一类环境管理需求。然而,水环境问题往往是多因素、多过程、多空间尺度交织的复杂问题,单一的监测数据或目标难以满足反映水体环境整体健康状况的需求。例如,虽然污水处理厂出水重点监测COD、氨氮等指标,但是其所含的抗生素抗性基因、菌落结构会对受纳水体的生态安全同样具有重要影响,而这些指标往往未被纳入监测范围。

系统性思维则强调从整体和全局的角度进行水环境监测和管理。它要求在监测设计中考虑到水体的多功能性和复杂性,不仅要监测污染物,还要监测生态系统的各个组成部分和功能状态。此外,系统性思维还要求在监测中综合考虑空间和时间维度,既要关注水体的当前状态,还要关注其长期变化趋势以及不同区域之间的相互影响。

(四) 监测数据管理利用水平有待提高

尽管我国在水环境监测数据的获取方面取得了显著进展,但在数据的管理、分析和利用方面依然存在水平低、滞后的问题。大量数据被收集后,往往因数据管理系统不完善、数据共享机制不足、分析手段落后等原因,未能充分发挥其潜在价值。数据的存储、整理和标准化不足,导致不同地区、不同机构之间的数据格式、标准不统一,数据质量参差不齐,难以进行有效的整合和比较。收集到的监测数据往往没有及时地深度分析,其利用主要停留在简单的统计和报告阶段。面对复杂的环境问题,需要通过数据挖掘、大数据分析、机器学习等先进分析技术,从数据中揭示规律和趋势,指导环境管理和决策。当前,这些先进技术在我国水环境监测中的应用还处于起步阶段。

(五) 缺乏多介质环境之间污染物迁移转化监测

水环境中的污染问题往往涉及多介质环境(如水体、沉积物、大气、生物等)之间的相互作用和污染物的迁移转化。忽视这些多介质环境之间的相互关系,可能会导致对污染源、污染路径以及污染物最终归宿的误判,进而影响污染防治措施的有效性。

污染物在环境中的迁移和转化是一个涉及多种物理、化学和生物过程的复杂现象。例如,大气沉降是水中汞污染的重要来源,如果不把大气监测数据和水环境监测数据结合起来,就难以准确描述汞污染的迁移转化规律,特别是底泥中的汞含量。只有通过多介质环境的综合监测,才能全面了解污染物的迁移路

径、转化机制和最终归宿,从而制定出更为科学有效的污染治理策略。

(六) 需加强对水环境碳排放水平的监测

随着全球气候变化的加剧以及我国碳达峰碳中和战略的实施,碳排放的监测和控制已成为我国水环境治理的重点。然而,当前我国的水环境监测体系中,碳排放水平的监测仍然是一个相对薄弱的环节。水环境中的生物地球化学作用通过碳的释放和吸纳影响大气中的温室气体浓度。对碳排放水平进行监测,能够为水环境治理和管理提供数据和理论支撑。例如,传统的污水末端处理模式在管网输送和污水处理厂处理阶段会产生大量温室气体,对这些过程加以监测和识别,可为我国污水处理系统的碳减排提供有力支撑。

另外,我国水环境监测还存在如下一些问题。首先,由于各地区经济发展水平各异,导致生态环境监测技术和设备的发展水平参差不齐,部分地区仍依赖传统的监测手段,缺乏先进的技术支持。同时,由于对生态环境监测需求的快速增长,相关专业人才的培养和培训未能及时跟上,导致在具体监测及分析过程中缺乏足够的专业知识和技能。其次,尽管建设了大量监测站,但不同地区、不同部门的数据质量和标准可能存在差异,导致数据不一致,难以形成统一的、具有可比性的监测结果。一些偏远地区和农村的监测站点较少,监测覆盖面明显不足。再次,某些新污染物(如微塑料、药物残留等)和生物多样性监测仍较为薄弱。当前的生态环境监测往往侧重于单项指标的监测,缺乏对系统性、综合性问题的分析能力,难以有效支持生态环境管理决策。

三、水环境监测未来发展展望与策略

大数据、物联网、人工智能等现代信息技术的涌现为水环境监测的发展带来了巨大机遇。这些新兴技术的深度融合,必将推动水环境监测技术实现重大突破。未来的水环境监测行业应聚焦于以下几个方面。

(一) 统一标准的制定

随着传感器技术的不断进步,我国正致力于制定统一的传感器技术标准,以确保在水质监测中使用的设备具备一致的性能与可靠性。这一措施旨在提升数据的可比性和可重复性,确保监测结果的科学性。同时,针对水环境监测过程中的各个环节,将建立一套完善的质量管理体系,该体系将包括技术审核、数据验

证、结果评估等内容,确保数据采集、分析和报告的精确性与可信度。这些举措共同为提高水质监测的准确性和可信性奠定了基础。

(二) 利用大数据技术,结合历史监测数据和实时数据,建立一个综合数据库,以便于进行长期的趋势分析与评估

这种方式不仅能够揭示水环境系统的变化规律,而且可为决策制定过程提供支持。通过建立数学模型来模拟水环境系统的动态变化,预测未来的发展趋势,这一重要步骤将为决策者制定更加科学的水资源管理策略提供帮助,从而实现资源的可持续利用。此外,设立常态化监测机制,全面覆盖主要河流、水库、湖泊等水体,形成长期监测机制。这一机制能够防止监测工作受短期突发环境事件的影响而中断,通过持续的监测实现及时的响应与干预,为长效化的水质管理策略提供坚实基础。

(三) 通过人工智能技术构建的智能监测系统能够实现自动化数据处理和分析

例如,利用机器学习算法识别水中污染物或监测水质变化模式,并自动生成预警信息。同时,积极研发适用于水环境的数学模型,这些模型通过分析多变量之间的关系,为复杂生态系统提供更准确的动态特征呈现,进而支持科学决策。依托大数据与人工智能技术,建立一个综合水环境决策支持平台,该平台集成多种监测数据、模拟结果和专家建议,辅助政策制定和执行,推动智慧化水质管理向前发展。

(四) 加强过程监管

利用大数据、物联网、人工智能等技术实现过程分析、预测预警及量化监管。对污染治理设施各单元之间的逻辑关系进行深入分析,并对污水处理的各项参数进行全面计算,以评估治理设施是否按照设计参数正常运行。根据进水水质指标,动态调整运行参数,并结合治理设施的全过程数据,对出水水质进行前瞻性预测。督促实现污水处理设施的标准化运营,促进跨区域量化监督管理。

(五) 未来的水环境监测需要转向更加综合和生态化的视角

将污染指标与生态健康指标结合起来,全面评估水体的生态功能和可持续性。这要求在监测内容上增加对生物群落结构、水体营养盐动态、生态过程等方面的监测。同时,也需要发展生态模型和评估工具,以便将监测数据转化为对生态系统健康的综合评估,指导水环境的

保护与修复工作。

(六) 推行系统性思维的监测方式

综合运用地面监测、遥感监测、无人机监测等多种技术手段,从不同空间尺度获取数据;利用大数据分析和模型模拟技术,进行多因素综合分析;建立跨部门、跨区域的数据共享和协同工作机制,确保不同领域、不同区域的监测数据能够相互融合,形成完整的环境监测网络。

(七) 在水环境监测中逐步引入碳排放监测指标,建立完善的监测网络和数据采集系统

这需要从技术和管理两个层面着手,首先是开发适用于不同水体类型的碳监测技术、设备和方法,其次是制定统一的监测标准和操作规程,确保数据的准确性和可比性。此外,还应加强与气候变化研究的结合,通过综合分析水体碳排放数据,揭示其在全球碳循环中的作用。

(八) 未来的环境监测传感器将朝着多参数方向发展,即单个传感器可以同时监测多个参数

这不仅可提高数据采集的效率,还能降低部署多个传感器的成本以及减少空间占用。此外,多功能传感器还能综合分析各参数间的关系,提供更全面的环境信息。同时,未来传感器需要具备实时监测与数据分析、远程控制与自动校准、多传感器协同工作与网络化等功能。

总之,我国水环境监测的发展趋势体现在采用更先进的技术、建设集成化监控平台以及加强政策支持等方面。随着大数据、物联网和人工智能等现代信息技术的融合应用,人们实现了对水质的实时、准确监测和分析预警,有效地提升了水资源管理的科学性和精确性。同时,政府对水环境保护法规的不断完善以及公众环保意识的增强,也为水环境监测提供了坚实的政策和社会支持,推动了水环境治理和保护工作的深入开展。未来中国水环境监测的发展将是一个综合性、多元化的过程,涉及技术、政策法规、社会参与等多个方面。不断创新和改进我国水环境监测体系,将有效提升水环境治理水平,支撑深入打好污染防治攻坚战,助力美丽中国建设。

作者单位:1.哈尔滨工业大学环境学院,城市水资源与水环境国家重点实验室;
2.中欧膜技术研究院;
3.哈尔滨工业大学威海校区