

化学法和光学法在线水质分析仪表在突发污染事件中的性能比较

向阳^{1,4}, 杨梦杰^{1,2,4}, 潘汉青^{3,4}

[1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2. 江苏申武先进技术研究院有限公司, 江苏 常州 213168; 3. 杭州希玛诺光电技术股份有限公司, 浙江 杭州 310000; 4. 长三角绿色建筑与韧性城市产业技术联合创新中心, 江苏 常州 213168]

摘要: 快速有效地识别突发水体污染事件是在线水质监测技术研发的重要内容。在构建包含实时响应性、测量准确性、可识别性、可校正性、可适应性、可扩展性六个维度的在线水质分析仪表性能指标体系的基础上, 系统分析评估了突发水体污染事件下化学法和光学法在线水质分析仪表的性能。结果表明, 在应对突发水体污染事件时, 化学法与光学法仪表在测量精度方面均存在一定不足, 但在实时响应性、可识别性、可校正性、可适应性、可扩展性等方面, 化学法仪表的性能表现一般, 而光学法仪表则具有较好的性能表现。

关键词: 水污染; 在线水质分析; 突发事件; 性能比较

中图分类号: X853

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)07-0343-06

Comparison of Performances of Chemical and Optical On-line Water Quality Analyzers in Sudden Pollution Events

XIANG Yang^{1,4}, YANG Mengjie^{1,2,4}, PAN Hanqing^{3,4}

[1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd, Shanghai 200092, China; 2. Jiangsu Shenwu Advanced Technology Research Institute Co., Ltd, Changzhou 212168, China; 3. Hangzhou Simano Optoelectronic Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 4. Joint Innovation Center for Yangtze River Delta Green Building and Resilient City Industry Technology, Changzhou 212168, China]

Abstract: The rapid and effective identification of sudden water pollution events is the important content in the research and development of on-line water quality monitoring technologies. Based on the construction of an online water quality analysis instrument performance index system that includes six dimensions of real-time responsiveness, measurement accuracy, identifiability, correctability, adaptability and scalability, the performances of chemical and optical online water quality analyzers in response to sudden water pollution events are systematically analyzed and evaluated. The results show that in response to the sudden water pollution events, both chemical and optical instruments have certain deficiencies in measurement accuracy, but in terms of real-time responsiveness, identifiability, correctability, adaptability and scalability, the chemical instrumentation performance is average, while the optical instrumentation has a better performance.

Keywords: water pollution; on-line water quality analysis; sudden event; performance comparison

0 引言

近年来,国内外突发性水污染事件频繁发生,对水环境质量造成严重危害,是当前水环境保护工作面临的难题^[1-2]。频繁发生的水体污染事件,也对民

众的日常生活造成了显著的不利影响,成为全民广泛关切与热议的焦点议题^[3-4]。2015年4月16日国务院印发《水污染防治行动计划》^[5],进一步明确了水环境治理的政策和计划。2021年11月2日,国务院印发的《关于深入打好污染防治攻坚战的意见》^[6]中则提出,要建立完善现代化生态环境监测体系。在线水质监测仪表作为突发性水污染事件的“哨兵”,如何快速发现水污染事件,并在第一时间作出响应,将水污染事件带来的损失降到最低,已经成为在线水质监测仪表研究开发领域的一大课题^[7]。

收稿日期: 2024-12-03

基金项目: 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司课题(K2024J006A)

作者简介: 向阳(1967—),男,博士,工程师,从事环境工程科研工作。

突发水体污染事件通常具备不确定性、危害性、污染方式多样性、污染物种类复杂性等特征^[8-10],如2011年6月4日的新安江水污染事件^[11]、2012年2月3日的江苏镇江水污染事件^[12]及2012年1月15日的广西龙江镉污染事件^[13]等。正因为突发水体污染事件的这些特征,使得对高效、准确的在线水质监测技术研发提出了很高的要求^[8,14]。当前,国内外针对水质的在线监测技术主要可以分为基于传统物理化学检测方法与基于新型光学检测方法的在线水质监测装置^[15]。由于无需添加化学试剂,且不存在二次污染等,光学法在线水质分析仪表受到了广泛关注,同时技术也日渐成熟^[16-18]。但在针对发生不可预测的突发水体污染事件中,化学法与光学法在线水质分析仪表的性能优劣,仍缺少系统的多维度对比评估。

本文从实时响应性、测量准确性、可识别性、可校正性、可适应性及可扩展性六个维度,针对当前主流的两类在线水质分析仪表在突发污染事件中应用性能进行系统的分析与评估,以期对突发水体污染事件的在线监测与应急管理提供参考。

1 两类在线水质分析仪表

1.1 化学法在线仪表

化学法在线仪表指采用化学分析原理,通过化学试剂和化学反应(氧化、还原、催化等)将多种目标污染物转化为单一化学成分,然后滴定分析该单一成分的含量,来量化污染程度的在线水质分析仪表。

这一类仪表的工作原理是将水质综合指标分析流程自动化,摒弃了传统实验室的繁琐人工操作,转而采用电磁阀、滴定泵、电加热器、自动比色计及电磁搅拌器等自动化设备,在嵌入式计算机系统的智能集成与调控下,形成了一个闭环的在线分析系统,提升了分析效率^[19]。

以在线化学仪表的化学需氧量(COD)分析流程^[20]为例,使用了重铬酸钾氧化剂、硫酸银—硫酸催化剂、试亚铁灵指示剂等化学试剂,以及自动控制的搅拌、加热、回流、比色等设备。基本测定方法是用重铬酸钾充分氧化水样中的污染物(主要是有机物),然后通过检测消耗掉的氧化剂量来间接地测定水体中污染物的含量。因此,虽然水样中与COD指标有关的有机物多种多样,但测定时只需计算重铬酸钾氧化剂的用量即可。

1.2 光学法在线仪表

光学法在线仪表指采用光学分析原理,通过光学器件和光学反应(光吸收、光激发、光散射等)直接区分和感知多种目标污染物,然后通过数学计算分析各污染物的含量,来量化污染程度的在线水质分析仪表^[21-23]。

在这种工作原理的测量装置中,除光源、光谱敏感器、水样采样装置等物理光学检测设备和嵌入式计算机数据处理单元外,不包含其他化学反应过程^[24]。

第一代光学法仪表利用紫外—可见(UV/Vis)波段(200~800 nm)的连续光谱光束穿透水体时,其能量会被其中各种有机物分子选择性吸收的原理,通过测量光束接收端的UV/Vis吸收光谱强度,结合数学模型计算出水体中有机物综合指标测量值^[25]。

第二代光学法仪表采用了更为精确有效的方法,即利用三维荧光发射光谱、拉曼散射光谱和UV/Vis吸收光谱进行信息融合,通过复杂的化学计量学算法逐个解析出水体中各种与水质污染指标相关成分的含量,最后据此计算水质指标的值。由于包含了更多的水样成分光学反应信息,因此提高了测量精度^[26]。

2 性能评估方法

结合突发性水污染事件的不可预估性,污染物未知性,污染范围及程度不确定性,污染影响持续性等特点,构建了在线水质分析仪表的性能指标体系,具体将围绕六项指标对两类在线水质分析仪表进行系统的全方位性能评估。

(1)实时响应性(Real-time Response)

指突发事件发生后,仪表快速、及时给出监测信息的能力。

实时响应性是在线水质分析仪表最重要的性能评估指标。若该指标性能良好,则能对突发水污染事件做出及时响应,并为相关职能部门及时做出突发事件应对决策提供有力支撑,保障水环境安全;若该指标性能较差,则会造成水污染事件不能被及时发现,导致水污染蔓延时间延长,污染范围增大,最终致使水污染影响民生民计,也为相关部门解决水污染事件带来的危害增加了难度。如广西龙江镉污染事件,若龙江河该材料厂下游附近装有实时响应性良好的在线水质分析仪表,则该次违法排污事件能被及时发现并处理,水污染范围不会绵延近三百

公里,严重影响两岸居民日常生活,因此在线水质分析仪表实时响应性指标是关乎水环境安全,关乎人民基本生活的重要指标。

(2)测量准确性(Measurement Accuracy)

指由于自然灾害、人为事故或恶意排放造成的测量水体中未知成分突现或超量程浓度突变,对仪表测量精度的影响。

根据《地表水自动监测技术规范(试行)》(HJ 915—2017)可知,准确性一般按规定浓度样品测定结果的相对偏差进行评估,其中pH、溶解氧、温度按照绝对偏差进行评估。绝对偏差与相对偏差的计算方法如下:

$$AD = x_i - c \quad (1)$$

$$RD = \frac{\bar{x} - C}{C} \times 100\% \quad (2)$$

式中:AD为绝对偏差; x_i 为第*i*次测量;*c*为参照值;RD为相对偏差; $\bar{x}$ 为多次测定平均值;*C*为参照值。

仪表测量准确性的评估意义在于,仪表测量信息可作为突发水污染事件的定性评估信息还是定量评估信息。若在线水质分析仪表测量准确性良好,则该仪表水质参数分析信息可以为相关职能部门提供可靠技术信息支撑,为突发水污染事件制定和实施应急方案提供准确的参数信息,如新安江水污染事件,若新安江安装有在线水质分析仪表且测量准确性良好,则相关职能部门可通过仪表分析信息确定污染范围及浓度,制定应对措施,有效地减少突发事件带来的经济损失,保障人民用水安全,因此在线水质分析仪表测量准确性对仪表性能评估和突发水污染事件应急方案制定具有重要意义。

(3)可识别性(Recognizability)

指突发事件发生时,在线仪表能够实现对多种特异性污染物质及其浓度准确识别的能力。

在线水质分析仪表可识别性可理解为因突发水污染事件发生原因多变、污染方式多样、污染物种类复杂,若仪表具备较高的可识别性,则可以对突发污染事件中的不同污染物质进行识别。即使在无法保证准确测量信息,但仍可及时识别突发事件发生的污染物种类。如当监测到镉浓度超出预设范围时,在线水质分析仪表可给出“发生镉污染突发事件!”的报警信息。因此可识别性是在线水质分析仪表在测量准确性难以得到有效保证的情况下,最重要的突发水污染事件应对解决指标。

(4)可校正性(Correctability)

指仪表通过现场常规维护手段,消除突发事件对测量精度影响的能力。

突发水污染事件带来的水环境污染,会影响在线水质分析仪表的测量精度和可识别性,因此可校正性作为仪表突发污染事件后的仪表性能提升指标,有着十分重要的意义。该指标若良好,可以扩大仪表的可识别范围,提高仪表测量准确性,进而则减小同类水环境污染物带来的环境伤害,将经济和环境损失降到最低。

(5)可适应性(Adaptability)

指仪表通过现场常规维护手段,使其通过每次突发事件的处理,不断提高仪表水质适应性和扩大量程范围的能力。

水环境复杂多变,突发事件时有发生,因此在线水质分析仪表的可适应性作为仪表性能提升的重要指标,在仪表现场实际应用过程中尤为重要。若仪表可适应性强,则每次突发水污染事件信息,如污染物质、污染浓度等,均可在仪表中进行保存并学习,进而为仪表日后应用提供更为全面的信息。在实际应用中,若仪表不具备可适应性,则对突发水污染事件不具备学习能力,同类水污染事件二次发生,仪表依然不能及时发现并预警,造成水污染加重。

(6)可扩展性(Expansibility)

指仪表通过现场或远程技术手段,修改仪表的核心测量方法,显著升级仪表技术性能的能力。

在线水质分析仪表的可扩展性,可理解为仪表的“生命力”。仪表的实际应用环境会因自然天气,人为干扰,突发事件等情况发生变化,所以仪表需要通过增加可分析参数,扩展可分析范围来提高测量准确度和实时响应性,因此可扩展性不仅能延续仪表实际应用的生命周期,也能为水环境监测带来长久的保障。

3 在线水质分析仪表性能对比

以常见的COD在线监测为例,对第一节定义的两类在线分析仪表在出现突发污染事件时的表现,按上列六项性能指标进行了对比评估。

3.1 实时响应性

(1)化学法仪表

化学法仪表在每次测量时需确保化学反应的充分、完全进行并达到稳定态,才能得到分析结果,因此反应时间较长,致使仪表无法及时快速发现水污染事件并作出响应^[27]。如重铬酸盐法^[20]规定加热

回流消解时间为120 min,快速消解分光光度法^[28]规定消解时间为15 min。考虑到其他必要操作,在线COD化学分析仪的测量周期将进一步拉长。

(2) 光学法仪表

光学法仪表因其分析过程为光传导,信息采集速度极快,主要耗时集中在数值计算。在现代计算机技术的支撑下,通常全过程分析时间为秒级,所以对水污染事件能快速及时响应。如第一代COD光学分析仪的测量时间为30 s,第二代COD光学分析仪的测量时间为60 s,比化学分析仪表快1~2个数量级。

3.2 测量准确性

(1) 化学法仪表

单一的化学分析方法通常理论上只能覆盖水体中部分目标污染物(如有机物),如测定COD的重铬酸钾氧化消解法只对有活泼氢键的有机物有效,但不能消解饱和脂肪烃、苯、吡啶等有机物^[29];且由于化学反应的特点,导致水质分析的灵敏度较低。更重要的是,化学反应通常易受水中干扰性化学成分严重影响,如众所周知水中较高浓度的氯离子或锰离子的存在会导致COD化学分析结果产生30%~70%的测量误差^[30],而干扰因素的消除强烈依赖于化学分析人员的经验,在线化学分析仪表中固定的分析流程设置使其在处理各种干扰物影响方面缺乏灵活性。因此当突发事件引起的水质成分变化或浓度变化在化学法的有效测定范围之外时,将会存在一定的不可预估测量误差。

(2) 光学法仪表

理论上光学法仪表采用的光吸收、光散射、光发射等光学反应原理,对水体中的目标污染物有良好的覆盖。在南水北调工程某段开展的化学法水质在线仪表应用性能测试结果表明(见表1),pH的偏差范围在0.03~0.14之间,电导率的偏差范围小于±5%,氨氮的偏差范围在±15%之内,总氮的偏差范围基本在±10%之内,存在单次达到22%的偏差,高锰酸盐指数的偏差范围基本在±10%之内。光学法感知灵敏度远高于化学反应,但需经过逐一标定才能实现有效测定。此外,部分早期型号的光学分析仪由于采用单一的吸光度分析原理,受浊度、色度等影响较大,但第二代光学分析仪采用多种光学反应联合测定原理后,对水体中无关化学成分的抗干扰能力有所增强^[26]。总的来说,光学法仪表的测量能力主要取决于其标定,如突发事件引起的水质成分变化或浓度变化在光学法仪表的有效标定范围之外

时,将导致不可预估的测量误差。

3.3 可识别性

(1) 化学法仪表

由于化学反应试剂和流程的特定性,化学法在线仪表通常仅对特定的化学物质或离子具有较好的识别能力。通过配置合适的化学试剂和仪器,可以特异性地检测和识别污染水体中的特定目标物质。因此化学法的可识别性受限于已有的化学试剂和仪器,对于一些未装备的、新型的有机污染物或者未知的污染物,则难以通过化学法仪表来进行检测识别^[31]。

(2) 光学法仪表

由于不同的污染物质具有不同的吸收、发射或散射光谱特征。水体分析样品的光学吸光度光谱或荧光光谱分布模式(即不同波长下的光强分布方式)对样品成分或浓度的变化较为敏感,因此可通过样品光谱的模式分析自动识别不同水体污染物质的异常,进而做出及时有效的突发事件定性预警,即仪表具备良好的可识别性。但如果水体浑浊度高、颜色较深,则会干扰光的传播与检测,从而影响对污染物的准确识别。

3.4 可校正性

(1) 化学法仪表

由于化学反应试剂和流程的特定性,以及受到环境因素等的影响,化学法仪表通常需要定期进行校准和标定,以确保测量结果的准确性。校准过程中会涉及到使用标准溶液、仪器参数调整等常规维护操作,使得整体过程会较为复杂。

(2) 光学法仪表

光学法水质分析的有效性与仪表的标定直接相关。通常一些光学法水质分析仪表具有一定的自校准或补偿功能,可在一定程度上减少人工校准的工作量;同事仪表标定可“记忆”新的水质成分的光学反应特性(即光谱模式),从而提高特定水质的测量精度。因此此类仪表均带有高效的现场标定/校正功能,配合实验室对被污染水样的化学分析结果,可方便地对水质异常事件造成的测量误差进行现场校正。校正完成的光学法仪表对同类水污染成分具有较高识别性和测量准确度,因此仪表具备良好的可校正性。

3.5 可适应性

(1) 化学法仪表

由于化学反应试剂和流程的特定性,无法通过

表 1 光学法仪表与实验室人工检测结果对比表

序号	pH			电导率			氨氮			总氮			高锰酸盐指数		
	仪表	实验室	AD	仪表	实验室	RD/%	仪表	实验室	RD/%	仪表	实验室	RD/%	仪表	实验室	RD/%
1	8.44	8.30	0.14	256	264	3	0.04	0.035	-14	1.46	1.43	-2	1.9	2.0	5
2	8.43	8.40	0.03	261	259	-1	0.04	0.042	5	1.44	1.51	5	2.1	2.1	0
3	8.36	8.30	0.06	257	261	2	0.04	0.045	11	1.66	1.54	-8	2.2	2.2	0
4	8.36	8.30	0.06	256	260	2	0.04	0.043	7	1.80	1.48	-22	2.1	2.1	0
5	8.41	8.30	0.11	265	268	1	0.04	0.038	-5	1.54	1.43	-8	2.1	2.2	5
6	8.44	8.40	0.04	264	260	-2	0.04	0.041	2	1.50	1.53	2	2.3	2.2	-5
7	8.44	8.40	0.04	260	269	3	0.04	0.035	-14	1.41	1.53	8	2.0	2.2	9
8	8.44	8.40	0.04	262	267	2	0.04	0.038	-5	1.42	1.47	3	2.3	2.2	-5

注:AD表示绝对偏差(Absolute Deviation),RD表示相对偏差(Relative Deviation)。

现场校正、参数调整等常规维护手段改变仪表原设计的水质和浓度有效适用范围。化学法仪表核心原理是将水质综合指标分析流程自动化,因此各分析单元固定且不可更改,分析流程也按照实验室流程固定,所以难以基于多次突发事件的经验对仪表性能进行改进,即化学法仪表可适应性一般。

(2)光学法仪表

仪表带有的现场标定/校正功能具备积累叠加效应,可通过多次突发事件的现场校正逐步缩小对各种水质的测量误差,越来越适应复杂水质变化,或即具备“对突发事件的学习能力”,因此仪表具备良好的可适应性。

3.6 可扩展性

(1)化学法仪表

该类型仪表的核心能力取决于其采用的化学试剂和反应流程的设计,定量计算算法(通常是单波长比色或分光光度计算)相对简单,不占主导地位。因此当仪表硬件条件一旦固定后,较难通过现场或远程技术手段改变仪表原设计的核心测定流程,即化学法仪表的可扩展性一般。

(2)光学法仪表

由于该类型仪表的核心能力是在水样原始光谱的基础上,通过复杂的化学计量学计算获得测量结果,因此在仪表硬件条件已固定的条件下,仍可根据计算方法方面的最新研究成果,通过现场/远程技术手段,不断升级仪表计算软件,使仪表处理突发事件的能力越来越好,即仪表具备良好的可扩展性^[24]。

表2汇总对比了以上讨论的两种类型在线水质分析仪表在突发水污染事件发生时的性能。

4 结 语

综上所述,化学法在线水质分析仪表与光学法

表 2 在线水质分析仪表在突发水污染事件发生时的性能比较

性能指标	化学法仪表	光学法仪表
实时响应性	一般	较高
测量精确性	不定	不定
可识别性	一般	较高
可校正性	一般	较高
可适应性	一般	较高
可扩展性	一般	较高

在线水质分析仪表在发生难以预测的突发水体污染事件时,在测量精度方面均存在一定不足。但在实时响应性、可识别性、可校正性、可适应性、可扩展性等方面,化学法仪表的性能表现一般,而光学法仪表则具有较好的性能表现。此外,需要注意的是,在长期使用中化学法仪表会随着元器件的老化,性能受到一定影响,需进行不断地维护;而光学法仪表在使用方法得当情况下,应对突发事件的能力会得到提升。

参考文献:

[1] 王永桂,张潇,张万顺.流域突发性水污染事故快速模拟与预警系统[J].环境科学与技术,2018,41(7):164-171.

[2] 雷霄,李冬,寇蓉蓉,等.突发性水污染事故应急监测及预案评估应用实证——基于模糊层次综合评判法[J].环境保护科学,2023,49(5):76-82.

[3] 徐小钰,朱记伟,李占斌,等.国内外突发性水污染事件研究综述[J].中国农村水利水电,2015(6):1-5;11.

[4] 马盟盟,李岩岩,张欢欢.流域突发水环境污染应急监测及防治技术研究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(13):50-52.

[5] 国务院.关于印发水污染防治行动计划的通知[EB/OL].(2015-04-16)[2024-07-27].http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm.

[6] 国务院.关于深入打好污染防治攻坚战的意见[EB/OL].(2021-11-07)[2024-11-30].https://www.gov.cn/zhengce/2021-11/07/content_5649656.htm.

[7] 王有家.水体突发性环境污染事故应急监测技术研究[J].环境与发展,2020,32(12):75-76.

[8] 任宗明,赵瑞彬,樊玉琪,等.水体突发污染事件的在线生物监测技术研究进展[J].生态毒理学报,2019,14(2):29-41.

- [9] 张晶晶.我国突发水污染事件应急处置技术与对策研究[J].中国资源综合利用,2019,37(10):116-118.
- [10] 张金建,周勇勇.突发性水污染事故的应急处理[J].环境与发展,2019,31(4):71-73.
- [11] 浙江即时报.关于苯酚槽罐车泄漏事故处置情况通报[EB/OL].(2011-06-06)[2024-07-27].<http://zjnews.zjol.com.cn/05zjnews/system/2011/06/06/017575964.shtml>.
- [12] 环境保护部办公厅.关于江苏省环保系统妥善应对韩籍货轮苯酚泄漏导致镇江市自来水“异味”事件的通报[EB/OL].(2012-03-30)[2024-07-27].https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201204/t20120401_225631.htm.
- [13] 广西壮族自治区生态环境厅.2012年龙江河镉污染事件案例回顾[EB/OL].(2013-06-08)[2024-07-27].<http://sthjt.gxzf.gov.cn/zfxgk/zfxgkgl/fdzdgknr/xzsysf/wryyj/t3625438.shtml>.
- [14] 陈运,廖振良.突发水污染事件的在线检测技术研究进展[J].能源环境保护,2019,33(6):1-5;31.
- [15] Carstea E. M., Bridgeman J., Baker A., & Reynolds D. M. Fluorescence spectroscopy for wastewater monitoring: a review[J]. Water research, 2016(95): 205-219.
- [16] Guo Y, Liu C, Ye R, & Duan Q. Advances on water quality detection by uv-vis spectroscopy[J]. Applied Science, 2020, 10(19): 6874.
- [17] 王一帆,邱晓鹏,张静,等.基于光谱法分析纳滤截留典型消毒副产物相关性研究[J].给水排水,2024,60(6):85-91.
- [18] 周昆鹏,白旭芳,毕卫红.荧光光谱法检测水质COD时温度、浊度、pH的影响分析[J].光谱学与光谱分析,2019,39(4):1097-1102.
- [19] 朱玉东,颜婷莉,徐建秋.浅谈水质自动监测系统架构及应用[J].水利信息化,2015(2):40-44.
- [20] HJ 828—2017,水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法[S].
- [21] 代雷雷.基于紫外光谱的水质有机物污染异常检测方法研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [22] 赵志伟,王菲,张诗雨,等.饮用水水源水质安全监测预警技术发展综述[J].三峡生态环境监测,2023,8(1):1-10.
- [23] 黄明柱,姚灵,王欣欣.光谱法水质在线监测技术研究进展[J].工业计量,2023,33(2):21-24;27.
- [24] 杜正,吴梦青,周熙,等.光学法水质在线监测系统在突发污染事件中的应用潜力评估[J].环境保护与循环经济,2024,44(8):62-68.
- [25] MESQUITA D P, QUINTELAS C, AMARAL A L, et al. Monitoring Biological Wastewater Treatment Processes: Recent Advances in Spectroscopy Applications[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology (S1569-1705), 2017(16): 395-424.
- [26] 周昆鹏,白旭芳,毕卫红.基于荧光多光谱融合的水质化学需氧量的检测[J].光谱学与光谱分析,2019,39(3):813-817.
- [27] 周铭睿,曲江北,李彭,等.分散式农村污水基于三维荧光光谱和紫外-可见全波段吸收光谱的“聚类-回归”COD预测模型[J].光谱学与光谱分析,2022,42(7):2113-2119.
- [28] HJ/T 399—2007,水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法[S].
- [29] 权建康.K₂Cr₂O₇法降解煤气化水中典型有机物的研究[D].昆明:昆明理工大学,2017.
- [30] 孙冬月,官香元.重铬酸钾法测定COD中的干扰及消除[J].环境科学与管理,2009,34(6):124-126.
- [31] 杨慧慧,谢红玉,赵丁,等.突发性水污染事故预警体系建设综述[J].环境监控与预警,2022,14(1):28-34.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

