

BOD-Q水质测定仪的研制及其实验教学应用

宋诚, 王厦, 刘鸿*

中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714

摘要: 生化需氧量(BOD)是水污染控制领域科学研究中关键的数据指标。传统BOD基于溶氧耗量的检测方法, 具有测试周期长、结果误差大、重现性差、操作复杂等问题, 严重制约着水环境水生态领域的发展和实验教学的应用。本文提出一种BOD检测的新原理、新方法、新仪器, 阐述了一项原始创新科学仪器——“BOD-Q水质测定仪”的研制及其实验教学应用, 结果表明, 该仪器将BOD检测时间从传统的5天缩短至0.5–5小时, 检测误差 $\leq 10\%$, 将该仪器引入实验教学中可丰富教学内容, 提高教学质量。

关键词: BOD; 微生物库伦法; BOD-Q水质测定仪; 原始创新科学仪器; 实验教学

中图分类号: G64; O6

Development of the BOD-Q Water Quality Analyzer and Its Application in Laboratory Teaching

Cheng Song, Sha Wang, Hong Liu *

Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China.

Abstract: Biochemical oxygen demand (BOD) is a critical indicator in scientific research related to water pollution control. The traditional BOD testing method, based on dissolved oxygen consumption, has several disadvantages, including a long testing period, significant errors, poor reproducibility, and complex procedures, which hinder the advancement of water environment and ecology research as well as its application in experimental teaching. This paper presents a new principle, method, and instrument for BOD detection, detailing the development of an innovative scientific instrument—the “BOD-Q Water Quality Analyzer”—and its application in laboratory teaching. The results indicate that this instrument reduces the BOD detection time from the conventional 5 days to just 0.5 to 5 hours, with a detection error of less than 10%. Integrating this instrument into laboratory teaching enriches the curriculum and enhances teaching quality.

Key Words: Biochemical oxygen demand (BOD); Microbial coulometric method; BOD-Q water quality analyzer; Original innovative scientific instruments; Laboratory teaching

当今社会, 水资源的保护与合理利用已成为全球关注的焦点。然而, 随着工业发展和人口增长, 水体污染问题日益严重, 对生态环境和人类健康构成了严重威胁。在水环境监测与保护领域中, 生化需氧量(BOD)是评估水质污染程度的关键指标之一, 其结果的快速、准确测定关乎着水质安全与生态平衡。

目前, 国内外测试BOD的方法主要有以下几种: (1) 稀释接种法^[1], 应用最为普遍, 我国主要采

用五日稀释接种法；(2) 空气压差法^[2]；(3) 微生物传感器方法^[3]。这些方法均是基于溶氧耗量的原理^[4]，在实际应用中存在一系列局限性。一是测定周期长，时效性差：传统方法如五日稀释接种法，需要检测5天才能出结果，这对于实际应用场景来说，时效性严重不足；二是测试误差大，重现性差：传统方法每次使用的微生物接种量、活性以及培养环境温度的微小差异，都会导致检测结果不稳定，影响数据的准确性和重现性；三是检测浓度范围有限：传统方法通常需要对水样高倍数稀释后才能进行测试，这一过程增加了不可避免的操作误差，限制了检测的适用范围和便捷性；四是操作复杂，人工依赖性高：传统BOD检测涉及大量溶液配制和繁琐步骤，对操作者的技能要求较高，增加了实验的难度和不确定性，不利于教学中普及和应用^[5-9]。由此可见，研制BOD快速准确的检测仪器，对推动教学实验项目管理水平，发展高端国产仪器装备具有迫切的现实需求。

本文提出一种BOD检测的新原理、新方法——微生物库伦法，突破了传统BOD检测基于溶氧耗量原理的限制，将检测时间从5 d缩短至0.5-5 h，误差降低至10%以内，极大提高了检测效率和准确度。基于该技术原理研制的BOD-Q水质测定仪，成功实现了BOD检测的智能化、在线化、批量化，解决了水质关键指标BOD快速检测的世纪难题，在水环境管理、水污染控制及教学实验仪器等领域具有重要的科学价值和实际意义。

1 BOD-Q水质测定仪

1.1 原理方法

BOD-Q水质测定仪的原理方法为微生物库伦法，核心在于BOD与微生物降解有机物过程中产电量 Q 之间的化学计量关系公式，通过定量测定有机物生化反应的产电量 Q 值以准确获取BOD值，由此形成了BOD-Q新概念。

如图1所示，微生物电化学反应器中，有机物在阳极微生物的作用下发生降解反应并释放电子，电子通过外电路从阳极向阴极定向转移，形成电流，电流对时间的积分，即为库伦量。由库伦量计算出有机物代谢所需要的氧的质量浓度，即生化需氧量。

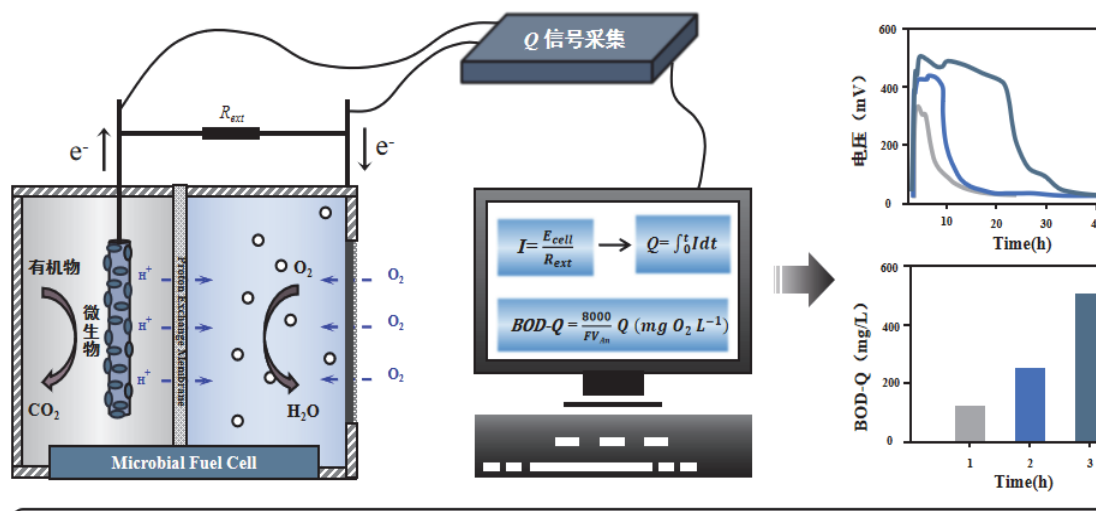


图1 微生物库伦法原理示意图

1.2 仪器研制

1.2.1 硬件

硬件是确保BOD-Q水质测定仪性能稳定、结果准确的关键，主要包括信号采集、数据处理和温度控制三个核心板块，仪器电路板器件如图2所示。信号采集板块将微生物电化学反应器两端的电压

模拟信号转换成数字信号，确保信号采集的完整性和精确度；数据处理板块主要由工控机的中央处理器(CPU)和上位机软件组成，CPU接收来自信号采集板块的数字信号，通过内部算法进行精准计算并输出；温度控制板块与上位机经串口交互实现仪器的恒温，保证微生物电化学反应器在最适宜温度下工作。

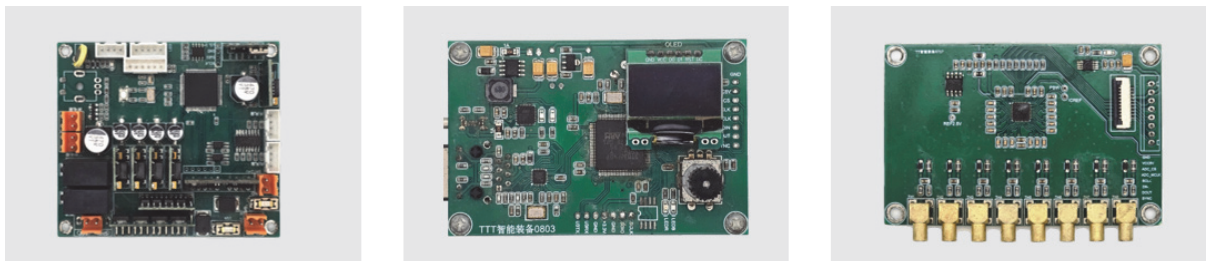


图2 电路板器件

1.2.2 软件

上位机软件负责接收、处理、展示数据信号，确保仪器与服务器实时通信，软件界面如图3所示。其主要功能如下：

- (1) 数据接收与处理：上位机软件接收来自信号采集卡的原始数据，通过内置算法对数据进行实时处理，计算出BOD-Q值，确保数据处理的实时性和准确性；
- (2) 数据存储与发送：处理后的数据不仅存储在本地数据库中，以便后续分析和回溯，同时，还会将数据实时发送至云服务器，实现数据的远程监控和管理；
- (3) 实时展示与可视化：软件界面友好，能够实时显示检测结果，包括数值读数和曲线图，使检测过程可视化，便于教学中学生直观了解BOD变化趋势和实验进展。



图3 软件界面

1.2.3 自动进样

自动进样旨在实现从样品采集到测试结束全过程的自动化运行，图4为自动进样器外观图。该系统的关键功能包括：

(1) 样品自动采集与预处理：系统采集待测样品并进行必要的预处理，确保样品状态符合检测要求；

(2) 自动加样：根据检测需求，自动精确进样，保证反应条件的一致性和准确性；

(3) 连续测试与换液：系统支持样品批量、连续测试，自动更换测试液，无需人工干预，大大提高了测试效率；

(4) 自动冲洗与维护：测试结束后，系统自动进行内部冲洗，清除残留物质，防止交叉污染。

该系统可替代人工实验操作，既减少了实验老师和学生的人为误差，又保证了实验数据的准确性和可靠性，同时减轻了操作负担，使学生更专注于实验设计和数据分析，提高实验教学的整体质量。

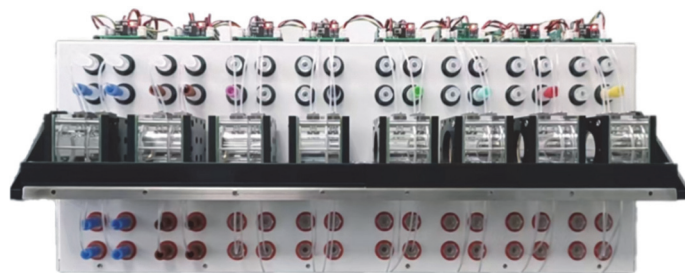


图4 自动进样器

1.2.4 微生物电化学反应器

微生物电化学反应器作为BOD-Q水质测定仪的核心部件，其性能和设计直接影响检测效率和结果准确性。研制过程中首先构建高效的微生物电化学反应体系，然后建立体系内荷电物质传质方程与氧化剂三相界面传质方程，再创新阳极微生物功能菌群、阴极催化剂，使微生物电化学反应器的性能得到显著提升。通过智能工业设计优化出模块式微生物电化学反应器，如图5所示，通电模式由传统的夹取式升级为接触式，提高了导电效率，增强了抗腐蚀性。

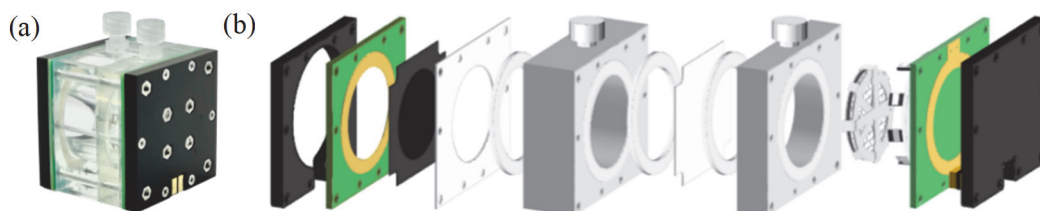


图5 微生物电化学反应器(a)及其结构图(b)

2 仪器辅助功能

2.1 大数据云平台

大数据云平台将仪器、用户及监测点位通过大数据信号传输构建到一起，图6为云平台界面，其主显示界面直观地呈现了仪器的运行状态、全国分布情况以及在线水质测试的实时数据，便于管理部门针对水质状态快速响应和积极决策；此外，批量化管理功能协助多台仪器的状态监控和集中管理。云平台不仅实现了BOD-Q水质测定仪的智能化管控，还通过预警、在线升级、数据处理等功能，为水质监测提供全方位的技术支持。

2.2 移动端APP

移动端APP界面如图7所示，APP与仪器一对一绑定，同步实时显示仪器各项检测数据，为实验人员提供一种全新、便捷的数据查看和仪器管理的方式，方便实验人员在仪器启动后随时查看运行状态和数据变化趋势，提升实验教学的灵活性。



图6 云平台界面



图7 移动端APP

3 仪器性能测试

3.1 操作步骤

3.1.1 仪器的启动与预热

仪器启动后自动加载上位机软件，在主界面开启恒温模式，将腔内温度设定为30℃，待温度达到预设值后即可进行测试。

3.1.2 水样的测试

水样测试流程如图8所示，首先将待测水样注入微生物电化学反应器内，然后在仪器主界面输入“稀释倍数”和“水样体积”并选择测试停止条件为5 h，接着开启数据采集，最后将微生物电化学反应器放入仪器。数据采集自动停止后，仪器主界面显示的BOD值即为待测水样的BOD值。

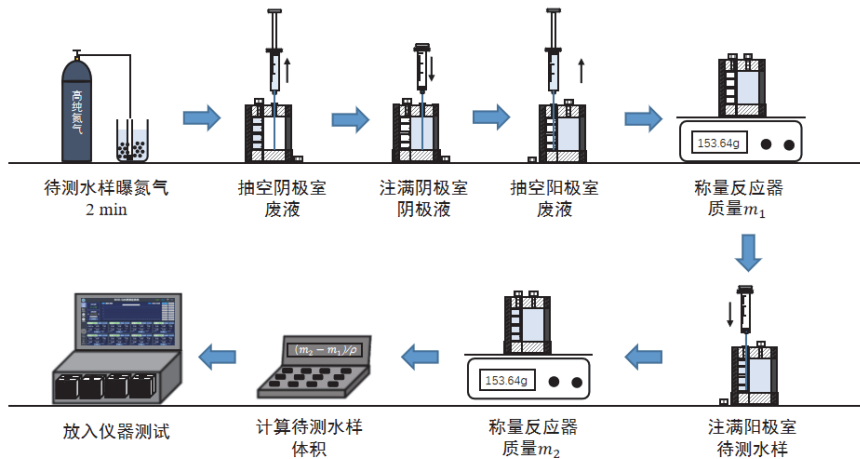


图8 水样测试流程

3.2 精密度测试

在全国7所高校实验室用BOD-Q水质测定仪分别对BOD₅含量为5、50、200 mg·L⁻¹的标准溶液进行6次重复测定，结果如表1所示。

表1 BOD-Q水质测定仪精密度测试数据

| 理论值/(mg·L ⁻¹) | 实验室内相对标准偏差 | 实验室间相对标准偏差 | 重复性限/(mg·L ⁻¹) | 再现性限/(mg·L ⁻¹) |
|---------------------------|-------------|------------|----------------------------|----------------------------|
| 5 | 1.59%–9.75% | 2.76% | 5.1 | 5.1 |
| 50 | 1.93%–7.02% | 3.09% | 7.0 | 7.5 |
| 200 | 0.92%–5.76% | 2.08% | 18.8 | 23.1 |

实验数据表明BOD-Q水质测定仪实验室内相对标准偏差<10%，实验室间相对标准偏差为<5%，重复性和再现性好，验证了仪器的精密度高，符合实验教学要求。

3.3 准确度测试

在全国7所高校实验室用BOD-Q水质测定仪分别对BOD₅含量为5、50、200 mg·L⁻¹的标准溶液进行6次重复测定，结果如表2所示。

表2 BOD-Q水质测定仪准确度测试数据

| 理论值/(mg·L ⁻¹) | 相对误差 | 相对误差最终值 |
|---------------------------|-------------|---------------|
| 5 | 0.29%–6.98% | 2.37% ± 1.81% |
| 50 | 0.26%–7.90% | 4.62% ± 5.23% |
| 200 | 0.79%–7.84% | 3.45% ± 4.82% |

实验结果显示仪器的相对误差<10%，相对误差最终值<10%，表明仪器的准确度高，符合实验教学要求。

3.4 测试数据比对

分别用微生物库伦法^[10]与5日稀释接种法^[11]对BOD标准溶液和实际废水同步进行测试，结果如表3所示。

表3 微生物库伦法与5日稀释接种法测试结果

| 样品 | 微生物库伦法 | | 稀释接种法 | | 偏差 d_i |
|-----------------------------|-----------------------------|------|---|------|----------|
| | BOD-Q/(mg·L ⁻¹) | 测试时间 | BOD ₅ /(mg·L ⁻¹) | 测试时间 | |
| 2 mg·L ⁻¹ 标准溶液 | 2.14 | 5 h | 2.13 | 5 d | 0.01 |
| 5 mg·L ⁻¹ 标准溶液 | 4.97 | 5 h | 4.65 | 5 d | 0.32 |
| 50 mg·L ⁻¹ 标准溶液 | 47.92 | 5 h | 47.65 | 5 d | 0.27 |
| 100 mg·L ⁻¹ 标准溶液 | 99.14 | 5 h | 97.75 | 5 d | 1.39 |
| 200 mg·L ⁻¹ 标准溶液 | 184.33 | 5 h | 189.64 | 5 d | -5.31 |
| 500 mg·L ⁻¹ 标准溶液 | 498.40 | 5 h | 497.65 | 5 d | 0.75 |
| 生活污水 | 160.66 | 5 h | 160.55 | 5 d | 0.11 |
| 新疆煤化工废水 | 28.00 | 5 h | 24.65 | 5 d | 3.35 |
| 烟草废水 | 10.48 | 5 h | 12.23 | 5 d | -1.75 |
| 制药废水 | 284.30 | 5 h | 289.16 | 5 d | -4.86 |
| 福安药业废水 | 6.22 | 5 h | 5.53 | 5 d | 0.70 |
| 悦来污水处理厂 | 23.18 | 5 h | 21.01 | 5 d | 2.17 |
| d_i 的平均值 | | | | | -0.24 |

从表3实验数据可见测试5 h的BOD-Q值与测试5 d的BOD₅值基本一致, 表明BOD-Q水质测定仪检测数据准确、可靠, BOD-Q值可替代BOD₅值, 进一步表明仪器可用于实验教学的推广和普及。

4 教学应用

目前, BOD-Q水质测定仪已在四川大学、武汉大学、华东理工大学等多所高校进行实验应用, 获得老师和学生的一致好评, 普遍反馈仪器测试数据精准、操作便捷、稳定性好, 能够快速、准确地获取BOD数据。其中, 武汉大学和华东理工大学用BOD-Q水质测定仪测得的数据已在SCI一区和二区发表^[12-15], 其检测数据的准确性和可靠性获得国际学术界的认可。BOD-Q水质测定仪在高校的成功应用, 不仅佐证了其在BOD检测中的优越性能, 还凸显了其在提升科研教学水平方面的巨大潜力。

BOD-Q水质测定仪在实验教学中的推广可培养和提高学生的以下能力:

(1) 科学思维 and 创新能力: 通过学习仪器的原理方法, 掌握生物产电、信号传输、数据处理等方面的知识, 为今后工作、学习中解决科学问题提供引导, 提升学生的自主创新能力, 加深对科学原理的理解和掌握。

(2) 实验操作技能: 在实验教学的过程中涉及到称量、配液、计算等基础实验操作, 稳固学生实验操作能力, 提高学生实验实操的基本功, 保证学生实验结果的准确性和可靠性, 为将来在本学科领域升学、深造和工作中奠定坚实的基础。

(3) 跨学科知识整合: 仪器的实验教学涉及到生物、化学、物理、数学等多个学科知识, 有助于学生提高整合跨学科知识能力, 提升综合解决问题的水平, 为将来的升学、工作中多学科交叉应用打下坚实的基础。

(4) 创新思维与技术改进: BOD-Q水质测定仪作为一款高端国产化科学仪器, 学生在进行实验时需要进行观察、操作和分析等一系列科学思维活动, 有助于培养学生的科学思维方式和习惯, 鼓励学生探索科学仪器的改进升级。

5 结语

BOD-Q水质测定仪为原始创新科学仪器, 提供了一种BOD检测的新原理、新方法、新仪器, 具有时效性强、结果准确、操作简单等显著优势。目前, 仪器已在水环境管理和水污染控制等领域广泛应用并得到检测结果论证, 现将其在水环境与工程领域的实验教学进行推广, 为教学实验提供了新的视角和思路, 进而提高实验教学的质量, 提升学生的实践创新和实际操作能力, 有助于培养高水平环境领域人才, 对国产高端科学仪器的规模化应用产生重要而深远的影响。

参 考 文 献

- [1] 曹阳. 环境工程, 2024, 32 (增), 138.
- [2] 陈小芸. 化学分析计量, 2012, 21 (3), 71.
- [3] 张国伟, 李捷, 刘泽浩, 李永强. 环境监控与预警, 2010, 2 (5), 15.
- [4] Arlyapov, V.; Kamanin, S.; Ponamoreva, O.; Reshetilov, A. *Enzyme Microb. Technol.* 2012, 50 (4-5), 215.
- [5] 王芳. 山西化工, 2024, 3 (44), 71.
- [6] 张丽. 山西化工, 2023, 11 (43), 65.
- [7] 吴婷婷. 皮革制作与环保科技, 2023, 4 (17), 49.
- [8] 杜慧慧, 王伟, 孙彦君, 王秀梅, 安亚红. 中国环境管理干部学院学报, 2016, 3 (6), 83.
- [9] 李珊. 低碳世界, 2018, No. 5, 26.

- [10] 中国城市科学研究会. T/CSUS 28-2021 水质生化需氧量(BOD)的测定-微生物库伦法. 北京: 中国标准出版社, 2023: 1-16.
- [11] 中华人民共和国环境保护部. HJ 505-2009 水质五日生化需氧量(BOD₅)的测定-稀释与接种法. 北京: 中国环境科学出版社, 2009: 1-16.
- [12] Li, Y.; Lu, D.; Liu, X. Y.; Li, Z. J.; Zhu, H.; Cui, J. X.; Zhang, H. R.; Mao, X. H. *Chem. Eng. J.* **2022**, *427*, 130944.
- [13] Yao, J. C.; Yao, G. J.; Wang, Z. H.; Yan, X. J.; Lu, Q. Q.; Li, W.; Liu, Y. D. *J. Environ. Manage.* **2023**, *325*, 116394.
- [14] Zhou, F.; Xiao, W. Z.; Zhou, K. Y.; Zhuang, J. L.; Zhang, X.; Liu, Y. D.; Ni, B. J.; James, P. S.; Zhou, M.; Luo, X. Z.; *et al.* *Chem. Eng. J.* **2022**, *433*, 134452.
- [15] Zhuang, J. L.; Sun, X.; Zhao, W. Q.; Zhang, X.; Zhou, J. J.; Ni, B. J.; Liu, Y. D.; James, P. S.; Li, W. *Water Res.* **2022**, *210*, 117964.