

doi: 10.12452/j.fxcxb.25080403

膜分离-流动分析-分光光度法自动分析复杂基质工业废水中的氨氮

胡 骏¹, 华燕莉², 黄 瑞², 林坤德^{1*}

(1. 厦门大学 环境与生态学院, 福建 厦门 361102; 2. 中油(长汀)催化剂有限公司, 福建 龙岩 366309)

摘要: 基于膨体聚四氟乙烯(ePTFE)中空纤维膜分离技术, 结合流动分析和溴百里酚蓝分光光度法, 开发了一种简便、高效自动分析复杂基质工业废水中氨氮的方法。探究了基质pH值、盐度和有机氮对氨氮测定的影响, 结果表明, 以上因素均不会干扰该方法分析氨氮。在优化条件下, 方法的检出限为0.16 mg/L, 线性范围为0.57~30 mg/L, 具有良好的精密度(RSD≤3.0%), 分析速度快(样品通量为15 h⁻¹)。将该方法应用于工业废水中的氨氮检测, 结果与蒸馏-中和滴定法(HJ 537-2009)测定结果基本相近, 且基底加标回收率为94.1%~99.0%, 显著优于标准方法的加标回收率(47.7%~68.5%)。该方法为复杂基质废水的氨氮检测提供了一种成本较低、自动化程度高和抗干扰能力强的可靠方法, 在水质检测领域展现出良好的应用前景。

关键词: 膜分离; 氨氮; 复杂基质工业废水; 流动分析; 水质检测

中图分类号: O657.3; X832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2026)01-0177-07

Membrane Separation-Flow Analysis-Spectrophotometry for the Automatic Analysis of Ammonia Nitrogen in Complex Industrial Wastewater

HU Jun¹, HUA Yan-li², HUANG Rui², LIN Kun-de^{1*}

(1. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. China National Petroleum(Changting) Catalyst Co., Ltd, Longyan 366309, China)

Abstract: Based on membrane separation technology, combined with flow analysis and bromothymol blue spectrophotometry, a simple and efficient method for the automatic analysis of ammonia nitrogen in complex industrial wastewater was developed. The impact of substrate pH, salinity and organic nitrogen on the determination of ammonia nitrogen were examined in the experiments. The findings illustrated that the above factors would not interfere with the analysis of ammonia nitrogen by this method. Under optimized conditions, the method achieved a detection limit of 0.16 mg/L and a linear range of 0.57~30 mg/L, with good precision (RSD≤3.0%) and fast analysis speed (sample throughput of 15 h⁻¹). When applied to ammonia nitrogen detection in industrial wastewater, the results were comparable to those obtained by the distillation-neutralization titration method (HJ 537-2009). The recoveries using industrial wastewater as a spiked matrix significantly (94.1%~99.0%) higher than those from the standard method (47.7%~68.5%). This method provides a reliable, low-cost, highly automated, and interference-resistant solution for ammonia nitrogen detection in complex-matrix wastewater, and shows a good application prospect in the field of water quality detection.

Key words: membrane separation; ammonia nitrogen; complex industrial wastewater matrices; flow analysis; water quality detection

氨氮是工业废水中的关键污染物之一, 其浓度控制对满足废水排放标准或回用水质要求至关重要^[1]。因此, 开发实时、准确且可靠的氨氮自动监测技术, 对于保障水环境质量和优化工业过程控制具有重要意义。流动分析技术因其自动化程度高、试剂消耗较低、适用性广等优势^[2], 已成为氨氮自动监测的主流方法之一。其中, 流动分析结合分光光度法^[3-4], 凭借操作简便、成本低廉及技术成熟等

收稿日期: 2025-08-04; 修回日期: 2025-09-10

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD091102)

* 通讯作者: 林坤德, 博士, 教授, 研究方向: 环境分析化学, E-mail: link@xmu.edu.cn

网络首发日期: 2025-10-28

优点,广泛应用于工业废水氨氮的自动化检测。

然而,工业废水基质复杂,常含色度、浊度、盐度及共存干扰物(如挥发性胺类)等,严重干扰分光光度法的准确性。为降低基质干扰、提升检测的选择性与准确性,需在分析前进行水样预处理。常用的预处理方法包括蒸馏法^[5-6]、吹脱法^[7]及膜分离法^[8-10],其优缺点比较见表1。其中,膜分离法因可有效分离多数基质干扰且易与在线分析系统耦合,实现自动化监测,而受到广泛关注^[11-14]。目前,在线膜分离技术主要有渗透蒸发和气体扩散两种。渗透蒸发技术通过夹层形成气隙将样品和膜分隔^[15],避免水样与膜的直接接触,有助于减轻膜污染。然而,该技术中膜易因夹层两侧压差而受损^[9];选择机械强度较高的膜往往导致分离效率下降与灵敏度降低;此外,顶部空间对气态分析物的稀释效应及夹层的密封问题也限制了其实际应用^[16]。相比之下,气体扩散技术由于扩散距离短,通常具有更高的灵敏度^[17]。但在检测浑浊或组分复杂样品时,可能会导致膜堵塞或泄漏。中空纤维膜接触器(HFMC)由管状的中空纤维膜和聚四氟乙烯(PTFE)外管组成,在维持高分离效率的同时避免了夹层结构中膜易损的问题,在复杂基质水样的氨氮在线分离中展现出良好的应用潜力^[12]。

表1 废水氨氮测定3种常用水样预处理方法的比较

Table 1 Comparison of three common sample pretreatment methods for ammonia nitrogen determination in wastewater

Method	Main advantage	Main disadvantage	Application
蒸馏法	方法成熟、标准化高,适用水质范围广	耗时长、能耗高、干扰仍可能存在、不易自动化	实验室标准测定、法规监测
吹脱法	装置简单、能耗低、可处理大体积水样	吹脱效率受条件影响大、低浓度氨氮富集能力有限、易受挥发性胺干扰	现场或半连续处理,部分在线应用
膜分离法	抗基质干扰强、能耗低、易自动化、膜堵塞、膜泄漏试剂消耗少		在线自动监测、复杂基质废水快速分析

本研究基于溴百里酚蓝(BTB)显色分光光度法,结合在线膜分离技术,建立了一种适用于复杂工业废水的氨氮自动检测方法。通过优化膜分离过程和显色反应条件,有效消除了复杂基质(浊度、盐度及共存干扰物)对检测的影响,实现了高自动化、高稳定性和高效率的氨氮连续在线监测,为复杂基质废水的氨氮监测提供了可靠技术支撑。

1 实验部分

1.1 试剂

BTB(分析纯)购自上海阿达玛斯贝塔化学试剂有限公司;氯化铵(NH_4Cl ,分析纯)、NaOH(分析纯)、浓HCl(36.5%,优级纯)和二水合柠檬酸三钠(分析纯)均购自国药集团化学试剂上海有限公司;硼酸(H_3BO_3)购自广东汕头西陇科学股份有限公司;实验用水均为当日制得的超纯水(电阻率 $\geq 18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$)。

硼酸盐缓冲溶液:称取32 g硼酸溶解于1 000 mL超纯水中,用5 mol/L NaOH溶液调至pH 9.0。为防止生成金属离子沉淀,在溶液中同时加入100 g二水合柠檬酸三钠。

1.2 废水

实际废水采自中油(长汀)催化剂有限公司脱氨处理后的回用废水。废水pH 9.0~11.5, Na_2SO_4 含量2%~5%, Al^{3+} 质量浓度 $\leq 15 \text{ mg/L}$, Ca^{2+} 质量浓度 $\leq 30 \text{ mg/L}$ 。浑浊水样分析前使用聚醚砜滤头(内径25 mm,孔径0.45 μm)过滤。

1.3 分析系统的构建

氨氮自动分析系统如图1所示。该系统由4部分组成:(1)流动系统,(2)膜分离装置,(3)显色反应模块,(4)检测系统。流动系统由1台四通道蠕动泵和1个六通阀构成,蠕动泵泵管采用内径为1.89 mm的橡胶管,其他管路采用内径0.70 mm×外径1.59 mm的PTFE管。膜分离装置采用HFMC作为核心组件,由ePTFE中空纤维膜(内径1.00 mm×外径1.50 mm,安徽科纳诺膜科技有限公司)和PTFE外管(内径2.175 mm×外径3.175 mm)组成。该模块两端配有PTFE材质的三通接头。膜分离模块附有加热和温度控制装置,用以实现 $(45 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 的恒温反应。显色反应模块为长度0.8 m(内径0.70 mm×外径1.59 mm)的PTFE混合反应盘管(MC)及加热和温度控制装置。检测系统由光学检测单元和信号采集单元组成:光学检测单元采用U型流通池(光程2 cm)、LS-1-LL卤钨灯光源和STS-VIS型多波长光纤光

谱仪(美国 Ocean Optics 公司)通过光纤串联构成,检测波长为 630 nm。整个分析系统通过 LabVIEW 编制的程序自动控制。

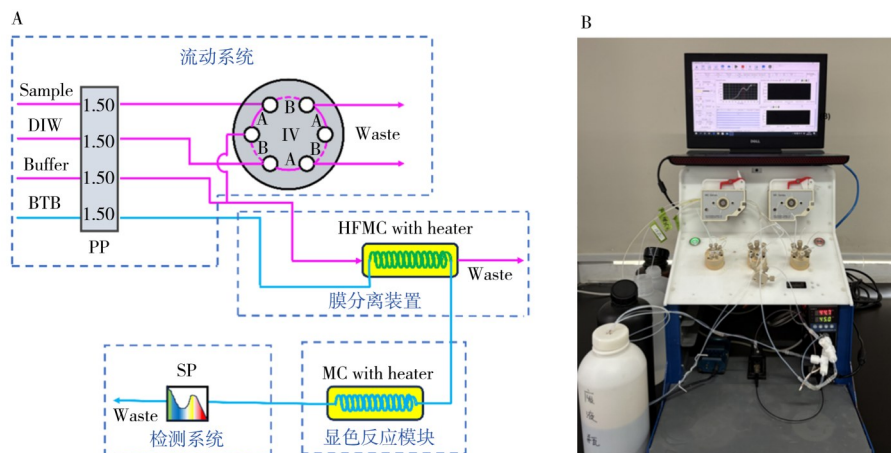


图1 氨氮自动分析系统流路(A)及实物图(B)

Fig. 1 Flow diagram(A) and physical image(B) of the automatic ammonia nitrogen analysis system

PP: peristaltic pump, the value represents the flow rate (mL/min); IV: six-way valve, in the A valve position, the solid line pipeline is connected, in the B valve position, the virtual line pipeline is connected; MC: mixing coil; SP: spectrophotometry module (PP: 蠕动泵, 数值代表流速 (mL/min); IV: 六通阀, 处于 A 阀位时, 实线管路接通, 处于 B 阀位时, 虚线管路接通; DIW: 超纯水; MC: 混合盘管; SP: 分光光度模块)

1.4 分析系统运行程序

氨氮检测前, 设置仪器运行参数, 使蠕动泵保持运行, 调整流速为 1.50 mL/min。氨氮分析步骤包括: (1) 将六通阀 IV 切换至 B 位 30 s, 超纯水冲洗 HPMC 外管; (2) 六通阀 IV 切换至 A 位 20 s, 样品与硼酸盐缓冲溶液混合, 然后通过 HPMC 外管, 在 45 °C 下使 NH_4^+ 转化为 NH_3 , 所生成的 NH_3 扩散透过中空纤维膜进入内管被 BTB 吸收液吸收; (3) 六通阀 IV 切换至 B 位 190 s, 超纯水冲洗 HPMC 外管; 与此同时, 吸收了 NH_3 的 BTB 吸收液被推进混合盘管中充分混合, 混合后的溶液进入流通池, 并在 630 nm 波长下进行检测。在上述运行条件下, 样品通量为 15 h^{-1} 。

2 结果与讨论

2.1 分析系统参数的优化

BTB 溶液浓度、进样时间、分离膜长度、反应温度和显色反应管盘长度是氨氮分析系统的关键参数。为考察上述参数对分析系统的影响, 采用单因素法进行了优化。以含 10 mg/L 的氨氮标准溶液为测试样品, 所有样品平行测定 3 次, 优化结果见图 2。

2.1.1 BTB 溶液浓度的优化 BTB 作为氨氮测定的显色剂, 其浓度直接影响分析灵敏度。如图 2A 所示, 在 0.04~0.2 mmol/L 范围内, 标准溶液的吸光度随 BTB 浓度增加而显著升高, 表明该区间内显色反应尚未饱和。然而, 当 BTB 浓度超过 0.2 mmol/L 时, 吸光度逐渐下降。因此, 选定 0.2 mmol/L BTB 溶液作为吸收液。

2.1.2 进样时间的优化 进样时间决定了样品的进样量。实验结果表明(图 2B), 在 10~30 s 范围内, 吸光度随进样时间的增加而提升, 说明更长的进样时间可提高方法的灵敏度。然而, 当进样时间超过 20 s 时, 出现“双峰”现象, 表明 BTB 溶液与 NH_3 混合不完全。因此, 进样时间确定为 20 s。

2.1.3 分离膜长度的优化 分离膜长度直接影响氨气的分离效率。如图 2C 所示, 在 30~60 cm 范围内, 吸光度随分离膜长度的增加而增加。实际应用中, 可以增长或缩短分离膜长度, 从而提高或降低方法的灵敏度, 以满足不同的测定范围要求。根据实际废水中氨氮的浓度范围, 本研究选择 30 cm 的分离膜, 以兼顾分离效率与检测范围的适应性。

2.1.4 反应温度的优化 温度对 NH_4^+ 转化为 NH_3 和膜分离两个过程均具有显著影响^[18-19]。一方面, 温度升高可以促进样品中的 NH_4^+ 转化为 NH_3 ; 另一方面, 温度升高可以提高 NH_3 向膜另一侧吸收液扩散的速率。实验结果(图 2D)显示, 在 40~60 °C 范围内, 吸光度随温度升高而增大, 说明升温可促进 NH_4^+

转化为 NH_3 和提高膜分离效率。在满足分析灵敏度的前提下,选择反应温度为 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.1.5 显色反应盘管长度的优化 显色反应盘管的长度和温度会影响 BTB 溶液的混合与显色程度。当 BTB 溶液吸收 NH_3 后,体系的 pH 值发生改变,从而引发 BTB 的特征性颜色变化^[20]。若体系混合不均匀会导致 BTB 溶液显色不均匀,进而显著影响分析结果的准确性。如图 2E(内插图)所示,当 BTB 显色不充分时,直接检测会造成信号峰形异常,表现为明显的峰拖尾和“双峰”,严重干扰了信号峰识别和定量准确性。通过延长反应时间可促使 BTB 溶液充分显色^[21],同时改善峰形。因此,本方法在流通池前端增设 0.8 m 的 PTFE 混合盘管和加热装置。优化后的结果见图 2E,可观察到峰拖尾和双峰现象基本消除,方法的准确性和重复性均得到显著提升。另外,升高反应盘管的温度也可以加速 BTB 吸收液的混合与显色。但当温度超过 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 时(图 2F),流路中气泡生成加剧,导致信号稳定性下降。因此,控制显色反应盘管的温度为 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 。

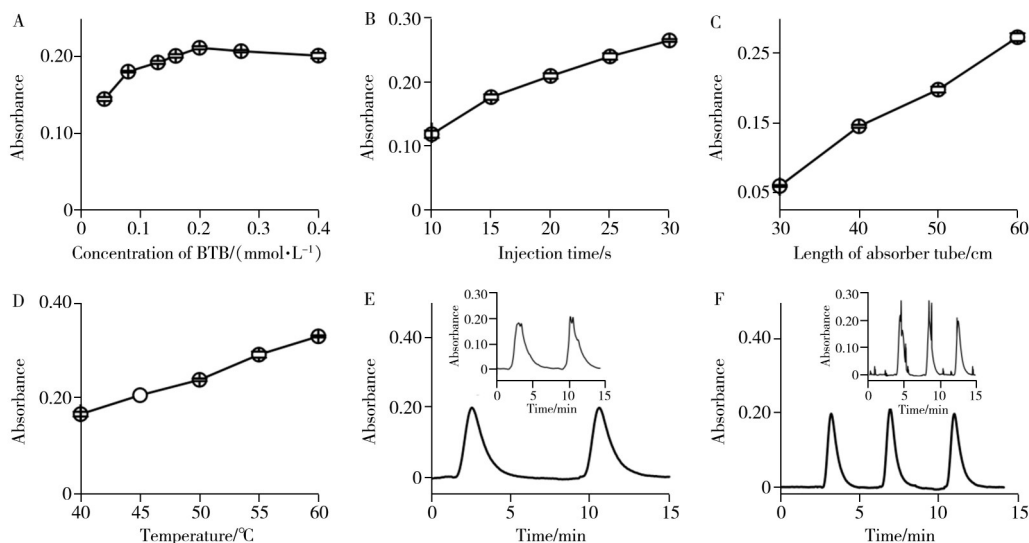


图 2 分析系统主要参数的优化

Fig. 2 The optimization of the main parameters for the system

A. BTB absorption solution concentration; B. injection time; C. separation membrane length; D. temperature; E. typical signal output diagram with (main) versus without (inset) a color-developing coil; F. typical signal output diagram without (main) versus with (inset) bubble interference (A. BTB 吸收液浓度; B. 进样时间; C. 分离膜长度; D. HFMC 反应温度; E. 增设显色盘管时的典型信号输出图,内插图为未增设显色盘管时的典型信号输出图; F. 无气泡干扰时的典型信号输出图,内插图为有气泡干扰时的典型信号输出图)

2.2 样品 pH 值的影响

工业废水通常具有较大的 pH 值波动范围,水样 pH 值对氨氮测定的影响主要表现为两个方面。一方面,水样 pH 值会冲击反应体系的缓冲能力,导致水样混合后 pH 值发生变化,从而影响 NH_3 的转化效率;另一方面,BTB 本身是酸碱指示剂,不具有显色选择性,样品中的 H^+ 或 OH^- 浓度太高时,可能会少量透过膜而干扰 BTB 显色。因此,本研究使用硼酸盐缓冲体系(pH 9.0)作为缓冲溶液,该体系能够维持稳定的碱性环境以促进氨气的转化释放。另外,硼酸盐缓冲溶液中的柠檬酸三钠能有效络合水样基质中的金属离子,避免生成沉淀,堵塞管路^[22]。实验采用超纯水作为基底,通过 HCl 和 NaOH 调节其 pH 值为 $5.0\sim 12.0$,制备系列空白样品进行测试。结果如图 3 所示,所测试 pH 值条件下的吸光度值均低于 0.005 ,表明水样 pH 值变化对测定系统影响很小,基本可以忽略。

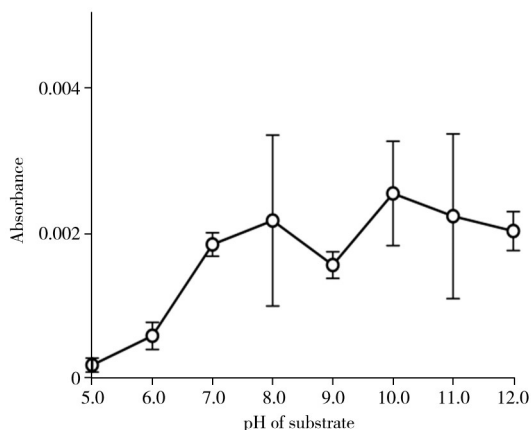


图 3 水样 pH 值对氨氮测定的影响

Fig. 3 Effect of substrate pH on ammonia nitrogen determination

2.3 盐度和有机氮的干扰

氨氮分析系统应用于工业废水检测时,样品中的高浓度离子会干扰 NH_4^+ 向 NH_3 的转化效率,从而

影响方法的准确性^[23]。为验证方法的抗盐度干扰能力,实验采用梯度稀释盐度为35的人工海水,制备0、7、14、21、28、35盐度系列空白基底,分别添加1 mg/L和5 mg/L 氨氮标准溶液进行测试。由图4A可见,加标水样重复测定的相对标准偏差(RSD)分别为2.1%和2.3%($n=12$),表明本方法具有良好的盐度耐受性。

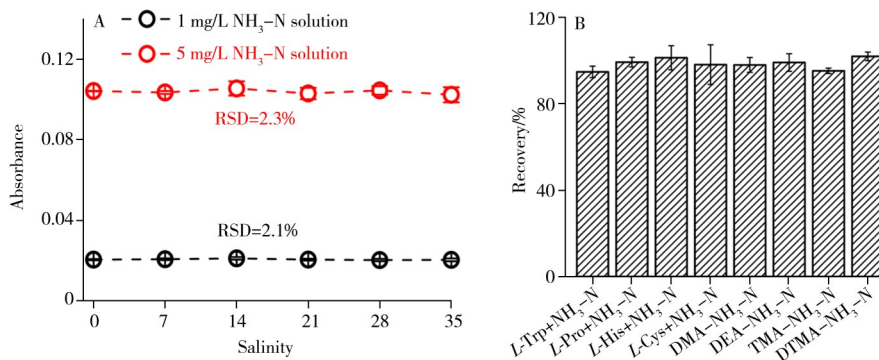


图4 盐度(A)和有机氮(B)对氨氮测定的影响

Fig. 4 Effect of salinity(A) and organic nitrogen(B) on ammonia nitrogen determination

在碱性加热条件下,样品中的有机氮如甲胺、乙胺、二甲胺、二乙胺等挥发胺会透过膜与 NH_3 进行竞争性反应,导致氨氮检测结果产生显著正干扰^[8,24]。为系统性评估有机氮的干扰效应,本研究选择L-色氨酸(L-Trp)、L-脯氨酸(L-Pro)、L-半胱氨酸(L-His)、L-组氨酸(L-Cys)、二甲胺(DMA)、二乙胺(DEA)、三甲胺(TMA)和二甲基乙胺(DMEA)作为测试对象,将2 mg/L(以N计)的各干扰物与等浓度氨氮标准溶液混合,通过工作曲线法计算回收率。结果如图4B所示,所有测试条件下的加标回收率均稳定在94.0%~102%范围内,表明所选有机氮化合物在实验浓度下对氨氮测定基本无干扰。

2.4 方法分析性能

在优化条件下,系统评估了方法的分析性能。在选定的实验条件下,连续测定9次0.5 mg/L氨氮标准溶液,以吸光值的3倍标准偏差除以工作曲线斜率,计算得到方法的检出限(LOD)为0.16 mg/L;以吸光值的10倍标准偏差除以工作曲线斜率,计算得到方法的定量下限(LOQ)为0.57 mg/L。图5A显示了不同浓度氨氮标准溶液的典型信号输出,由内插图可见在0.57~30 mg/L范围内,吸光度与质量浓度呈良好线性关系,线性方程为 $A=0.0204\rho+0.0017$ ($r^2=0.9952$, $n=3$)。精密度测试结果如图5B所示,1、5和10 mg/L加标样品重复测定7次的RSD分别为2.6%、3.0%和2.5%,表明方法具有良好的重现性。

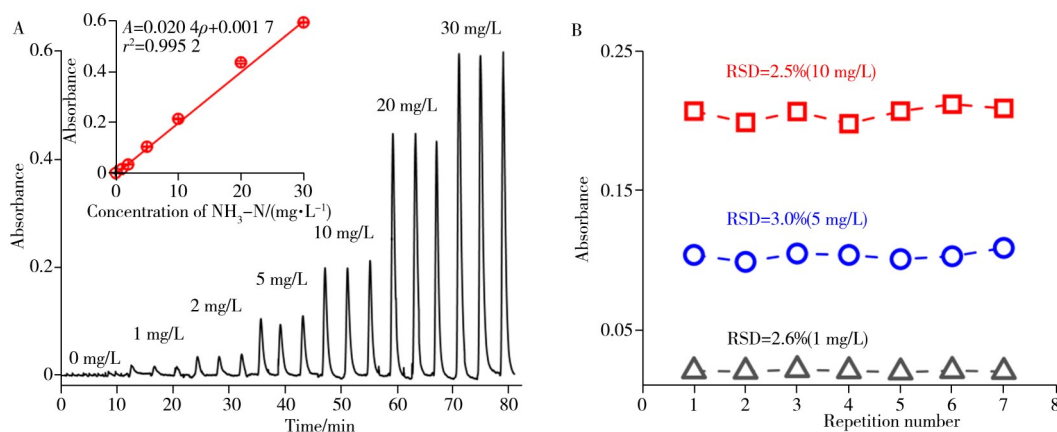


图5 典型信号输出图(内插图为标准工作曲线)(A), 加标样品测定的精密度(B)

Fig. 5 Typical signal output diagram(the inset is the standard working curve)(A), the precision of the spiked sample(B)

2.5 方法应用

利用本方法和蒸馏-中和滴定法(HJ 537-2009)^[5]对中油(长汀)催化剂有限公司脱氨氮处理后的废

水进行对比分析, 实验结果见表 2。由表 2 可见, 本方法测定的工业废水氨氮浓度与标准方法结果基本相近。值得注意的是, 本方法的加标回收率为 94.1%~99.0%, 显著优于标准方法的回收率 47.7%~68.5%。标准方法回收率偏低的可能原因为: 所用废水来自石油催化裂化催化剂生产线, 废水成分复杂, 盐度高(含 2%~5%的 Na_2SO_4), 且 Al^{3+} 和 Ca^{2+} 浓度较高, 可能影响蒸馏过程中 NH_4^+ 的转化效率。这一结果充分证明本方法所获数据准确可靠。

表 2 本方法与标准方法检测工业废水中氨氮的结果对比

Table 2 Comparison of the developed method with standard method for ammonia nitrogen detection in industrial wastewater

Sample	Spiked/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Standard method		This study	
		Measured/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Recovery/%	Measured/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Recovery/%
1	0	2.80	—	2.06	—
	2.90	4.18	47.7	4.85	96.6
	4.20	4.97	51.7	6.01	94.1
	6.05	5.78	49.3	8.05	99.0
2	0	6.00	—	6.53	—
	2.90	5.81	65.3	9.34	97.0
	4.20	6.27	61.4	10.56	96.1
	6.05	8.11	67.3	12.44	97.7
3	0	10.60	—	12.65	—
	2.90	12.49	65.3	15.42	95.8
	4.20	13.27	63.5	16.75	97.6
	6.05	14.75	68.5	18.50	96.7

2.6 方法比较

本方法与现有适用于废水氨氮分析的常见方法的比较见表 3。废水的氨氮排放标准通常在 mg/L 级别, 现有分析方法的检出限均能满足相关要求。与蒸馏-中和滴定法(HJ 537-2009)类似, 流动注射-水杨酸分光光度法(HJ 666-2013)^[6]分析复杂基质水样也须进行蒸馏预处理。相比蒸馏法和吹脱法等传统预处理方式, 膜分离法更易实现在线自动分析。与常见的夹层式气体扩散单元膜分离方法相比, 本研究采用的 HFMC 法具有结构简单、膜元件更换方便、不易堵塞等优点。

表 3 废水氨氮分析常见方法比较

Table 3 Comparison of common methods for the analysis of ammonia nitrogen in wastewater

Method feature	Separation method	Sample throughput	LOD	Linear range	Sample	Ref.
滴定法	蒸馏法	手工操作	0.05 mg/L	—	污水、工业废水	[5]
流动注射+分光光度法	蒸馏法	—	0.01 mg/L	0.04~5.00 mg/L	污水、工业废水	[6]
顺序注射+分光光度法	吹脱法	非连续式	9.1 $\mu\text{g/L}$	0.014~14 mg/L	地表水、污水、海水	[7]
流动注射+分光光度法	夹层式膜分离	—	0.6 mg/L	1~40 mg/L	地表水、废水	[8]
流动注射+分光光度法	夹层式膜分离	11 h^{-1}	0.1 mg/L	0.2~20 mg/L	工业废水	[9]
流动注射+分光光度法	夹层式膜分离	8~10 h^{-1}	0.03 mg/L	0.05~15 mg/L	地表水、废水	[10]
流动分析+分光光度法	HFMC	15 h^{-1}	0.16 mg/L	0.56~30 mg/L	工业废水	本研究

3 结 论

本研究成功开发了一种可靠的全自动氨氮分析系统用于工业废水氨氮的自动监测。通过在线膜分离装置, 有效克服了高盐度和有机氮等复杂基质的干扰。本方法的检出限为 0.16 mg/L , 线性范围 0.57~30 mg/L , 精密度 $\text{RSD}\leq 3.0\%$ ($n=7$), 样品通量 15 h^{-1} 。本方法自动化程度高, 环境友好, 在工业废水的氨氮在线自动化监测中具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] Back S, Saito N, Lee S. *J. Environ. Chem. Eng.*, **2023**, 11(1): 109075.
- [2] Chen X, Zhang M, Li X, Xu J, Liang Y. *Talanta*, **2023**, 256: 124274.
- [3] Huang H B, Li X Y, Zhang J, Liu J K, Li H L, Shi L, Yuan J, Shen R J. *Phys. Test. Chem. Anal.: Chem. Anal.* (黄海波, 李旭洋, 张杰, 刘建坤, 李花玲, 时磊, 袁静, 申汝佳. 理化检验-化学分册), **2025**, 61(5): 607-612.
- [4] Qiu Z W. *Environ. Sci. Technol.* (仇镇武. 环境科学与技术), **2025**, 48(2): 112-118.
- [5] HJ 537-2009. Water Quality-Determination of Ammonia Nitrogen-Distillation-Neutralization Titration. National Environmental Protection Standard of the People's Republic of China (水质 氨氮的测定 蒸馏-中和滴定法. 中华人民共和国国家环境保护标准).

- [6] HJ 666-2013. Water Quality-Determination of Ammonia Nitrogen by Flow Injection Analysis (FIA) and Salicylic Acid Spectrophotometry. National Environmental Protection Standard of the People's Republic of China(水质 氨氮的测定 流动注射-水杨酸分光光度法. 中华人民共和国国家环境保护标准).
- [7] Wang P, Tian Y, Liu C Y, Wang W L, Chen X W, Zhang Y F, Chen M L, Wang J H. *Chin. J. Anal. Chem.* (王朋, 田永, 刘传禹, 王炜亮, 陈旭伟, 张岩峰, 陈明丽, 王建华. 分析化学), **2024**, 52(2): 178-189.
- [8] Andrew K N, Worsfold P J, Comber M. *Anal. Chim. Acta*, **1995**, 314(1/2): 33-43.
- [9] Wang L, Cardwell T J, Cattrall R W, Castro M D Luque de, Kolev S D. *Anal. Chim. Acta*, **2000**, 416: 177-184.
- [10] Hong L, Sun X, Wang L. *Anal. Lett.*, **2009**, 42(15): 2364-2377.
- [11] Masserini R T Jr, Abbot W, Hunt H R, Friden E, Heil C A, Klass S M. *Mar. Chem.*, **2022**, 245: 104158.
- [12] Li P, Li S, Yuan D, Lin K. *Sci. Total Environ.*, **2023**, 880: 163281.
- [13] Ferreira F T S M, Mesquita R B R, Rangel A O S S. *Microchem. J.*, **2023**, 193: 109102.
- [14] Uhlikova N, Almeida M I G S, Mckelvie I D, Kolev S D. *Talanta*, **2024**, 271: 125671.
- [15] Castro M D Luque de, Papaefstathiou I. *Trends Anal. Chem.*, **1998**, 17(1): 41-49.
- [16] Mornane P, Haak J van den, Cardwell T J, Cattrall R W, Dasgupta P K, Kolev S D. *Talanta*, **2007**, 72(2): 741-746.
- [17] Šrámková I, Horstkotte B, Sklenářová H, Solich P, Kolev S D. *Anal. Chim. Acta*, **2016**, 934: 132-144.
- [18] Valente I M, Oliveira H M, Vaz C D, Ramos R M, Fonseca A J M, Cabrita A R J, Rodrigues J A. *Talanta*, **2017**, 167: 747-753.
- [19] Giakissikli G, Anthemidis A N. *Anal. Chim. Acta*, **2018**, 1033: 73-80.
- [20] Shimada T, Hasegawa T. *Spectrochim. Acta A*, **2017**, 185: 104-110.
- [21] Klimundová J, Forteza R, Cerdà V. *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, **2003**, 83(3): 233-246.
- [22] Lupi C, Dell'Era A, Pasquali M. *Int. J. Hydrogen Energy*, **2017**, 42(48): 28766-28776.
- [23] Zhu Y, Yuan D, Lin H, Zhou T. *Anal. Lett.*, **2016**, 49(5): 665-675.
- [24] Timofeeva I I, Bulatov A V, Moskvina A L, Kolev S D. *Talanta*, **2015**, 142: 140-144.

(责任编辑: 盛文彦)