

水体痕量铝快速自动检测方法研究

龚文婷¹ 赵东兰² 郜子蕙³ 余维滨¹ 刘升⁴ 郜洪文^{1*}

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 辽宁省有色地质一〇五队有限责任公司, 葫芦岛 125000;

3. 上海绿帝环保科技有限公司, 上海 200082; 4. 淮北师范大学计算机学院, 淮北 235000)

摘要:在氯代十六烷基吡啶(CPC)存在下, 铝离子与依来铬菁 R(ECR)反应生成蓝色络合物, 利用分光光度法研究了配位反应条件: pH 5.75 乙酸-乙酸钠缓冲溶液、0.2 mL 0.800 g·L⁻¹ ECR 和 0.2 mL 1.25 g·L⁻¹ CPC, 反应 10min。基于此优化条件, 设计了由进样系统、控制与测量系统组成的自动检测工作程序, 建立了铝自动检测方法, 并制备了基于室外快速检测使用的铝检测剂 I、II。通过对铝标准溶液、实际水样的测量, 自动检测方法 with ICP-AES 法测定结果一致, 其 LOD=0.004 mg·L⁻¹ Al, RSD 0.5%~1.2%, 铝加标回收率 93%~102%。同时, 稳定性实验表明, 铝检测剂 I、II 在室温条件下至少稳定半年。该自动检测法具有灵敏度和准确度高、实时动态测量、操作简单等特点, 将为水环境移动式自动检测仪的研制提供重要方法和技术。

关键词: 铝离子 检测剂 分光光度法 自动检测方法

DOI:10.3969/j.issn.1001-232x.2021.01.013

Rapid and automatic determination of trace amounts of aluminum in water. Gong Wenting¹, Zhao Donglan², Gao Zihui³, Yu Weibin¹, Liu Sheng⁴, Gao Hongwen^{1*} (1. College of Environment Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Liaoning nonferrous Geology Team 105 Co., Ltd. Huludao 125000, Liaoning Province, China; 3. Shanghai Lvdi Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai 200082, China; 4. School of Computer, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, Anhui Province, China)

Abstract: In the presence of cetylpyridinium chloride (CPC), aluminum ion reacts with eriochrome cyanine R (ECR) to form a blue complex. The coordination reaction conditions are studied by spectrophotometric method; pH 5.75 acetic acid-sodium acetate buffer solution, 0.2 mL 0.800 g·L⁻¹ ECR and 0.2 mL 1.25 g·L⁻¹ CPC, react for 10 minutes. Based on the optimized conditions, an automatic detection program including sampling system, control and measurement system is designed, an automatic detection method for aluminum is established, and the aluminum detection agents I and II for outdoor rapid detection are prepared. The test results of automatic detection method are consistent with those of ICP-AES, LOD = 0.004 mg·L⁻¹ Al, RSD is in the range of 0.5%–1.2%, and the recovery rate of aluminum is in the range of 93%–102%. The stability experiment results show that the aluminum detection agents I and II are stable for at least half a year at room temperature. This automatic detection method has the advantages of high sensitivity and accuracy, real-time dynamic measurement, and simple operation.

Key words: Aluminum ion; Detection agent; Spectrophotometric method; Automatic detection method

铝是自然界中含量最多的金属矿物质, 铝及其合金广泛应用于航空航天^[1,2]、交通运输^[3,4]、食品包装^[5,6]等行业。由于铝矿的过度开采和冶炼, 以致电解铝“产能过剩”等问题, 同时也伴随环境铝污染问题

的产生, 甚至出现食品中铝超标事件^[7]。1989年, 世界卫生组织和联合国粮农组织(WHO/FAO)正式将铝确定为食品污染物, 并相继提出成年人每周摄入量应控制在 2 mg/kg 以下^[8,9]。在我国《生活饮用水卫

生标准》(GB 5749—2006)规定铝含量不得超过 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[10]。自然水体的酸碱度过高或过低都会导致难溶铝化合物转变为溶解态铝。

近年来,水质监测已逐渐从传统的人工监测过渡到在线实时监测^[11]。水质在线检测技术不仅能够摆脱地理位置、天气、时间等条件限制,而且能够提供实时、准确的全流域水环境信息,现已成为水质检测的重点发展方向。目前,水质检测站已具备一定水质自动检测能力,为各级政府管辖区内水体水质状况进行实时的监测提供重要手段。但依然存在诸多问题:一是建立在流域中的自动检测站通过水泵将待测水样提升至监测站房,需要配备多种体积庞大的分析仪器,操作条件严格,人员专业素质要求高,无法满足野外或现场自由动态检测的要求^[12,13]。二是对于重要水体控制断面、污染源排水口采用的自动检测设备,大部分检测项目较少,主要以水温、pH、溶解氧、电导率、浊度、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、COD 等为主,对有害物质的监测项目较少。虽然现在已有内置电感耦合等离子体的在线自动检测设备,可以检测有害重金属元素,但依然存在设备多,占地大,便携性不好的问题。三是在野外环境检测方面,国内外出现比色法^[14]、试纸法^[15]和试剂盒法^[16]等便携式水质测定方法,但无法实现动态化检测。四是现有的移动水质检测设备主要包括水质检测车^[17]和水质检测船^[18],需要组合集成配备多厂家仪器实现多参数检测,价格昂贵,占用空间大,在发生突发性污染事故时,易出现难以快速部署到事发地进行水质监测等问题。因此,设计和建立操作简单、快速自动水质检测的方法流程,对进一步研制便携式自由移动检测仪更具有重要现实意义。

根据铝离子与依来铬菁 R(ECR)显色反应原理,通过缓冲溶液、显色剂、掩蔽剂等进样条件优化实验,研发铝检测试剂,借助多通道进样泵和“矢量色度”测量仪^[19],设计、建立集进样、混合、显色、测量于一体的水质痕量铝自动检测方法,已成功用于多种含铝水样的自动检测,同时开展铝检测试剂的长效稳定性试验。

1 实验部分

1.1 仪器、设备

分光光度计(S-4100 型,韩国);注射泵(Smart SY-01 型,南京润泽流体);矢量色度测量仪(GE U1

型,上海绿帝环保科技);电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES, Agilent 720ES 型);测量池(自行设计);电子分析天平(AL104 型);酸度计(PHS-3C 型,上海雷磁)。

1.2 试剂与溶液配制

(1)铝标准储备液: $1000 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ Al, 介质 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HNO_3 , 购置于阿拉丁试剂公司。

(2)铝标准使用溶液: $10.00 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ Al, 移取 1.000 mL 铝标准储备液于 100 mL 容量瓶中,用水定容,混匀。

(3)乙酸-乙酸钠缓冲溶液:通过酸度计测量,乙酸、无水乙酸钠按不同配比配制 pH 为 $4.5 \sim 9.0$ 乙酸-乙酸钠缓冲溶液。

(4) $1.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯代十六烷基吡啶溶液(CPC):称取 0.125 g CPC 溶解于 30 mL 水,转移到 100 mL 容量瓶,加水定容,摇匀。

(5) $0.800 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ECR 溶液:称取 0.080 g ECR 溶解于 50 mL 乙醇,转移到 100 mL 容量瓶,用乙醇定容,摇匀,用棕色瓶密封保存。

(6)掩蔽剂:硫脲(10%)、抗坏血酸(1%)。

(7)铝检测剂 I:分别称取 27.3 g 无水乙酸钠、 3.00 mL 冰醋酸和 0.125 g CPC,与 100 mL 水混合、溶解。

(8)铝检测剂 II:分别称取 0.080 g ECR 和 1.00 g 抗坏血酸,混合、溶解于 100 mL 乙醇。

上述实验用水均为去离子水。

1.3 实验方法

1.3.1 Al-ECR 显色反应

(1)条件优化实验:取 5 mL 铝标准溶液($0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)于玻璃管,加入 0.2 mL pH 5.75 乙酸-乙酸钠缓冲溶液、 0.2 mL $1.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ CPC 溶液、 $0.800 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ECR 溶液和 0.2 mL 0.5%抗坏血酸溶液,混合均匀,显色 10 min ,用分光光度计测量吸光度(A)。

(2)标准曲线:分别移取 5 mL 铝离子浓度为 0 、 0.010 、 0.030 、 0.050 、 0.070 、 $0.100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 标准溶液于反应管中,加入 0.2 mL 铝检测剂 I,摇匀,加入 0.2 mL 铝检测剂 II,摇匀,静置 10 min ,以去离子水为参比,测定 Al-ECR 显色溶液的吸光度和矢量色度(c. v.)。

1.3.2 自动检测流程设计

自动检测过程由进样模块、控制与测量模块组

成(图1),包括多通道进样泵(f)、LED光源(g)、测量池(h)、传感器(i)、色度测量仪(j)、电脑控制系统(m)、电池(k)等,泵(f)操作指令(控制参数)由电脑(m)发出,显色溶液(h)的测量是由色度测量仪(j)

发出指令并接收颜色信息(i),两个操作系统(j,m)同步工作,即可完成进样、混合、显色、测量全过程自动执行。

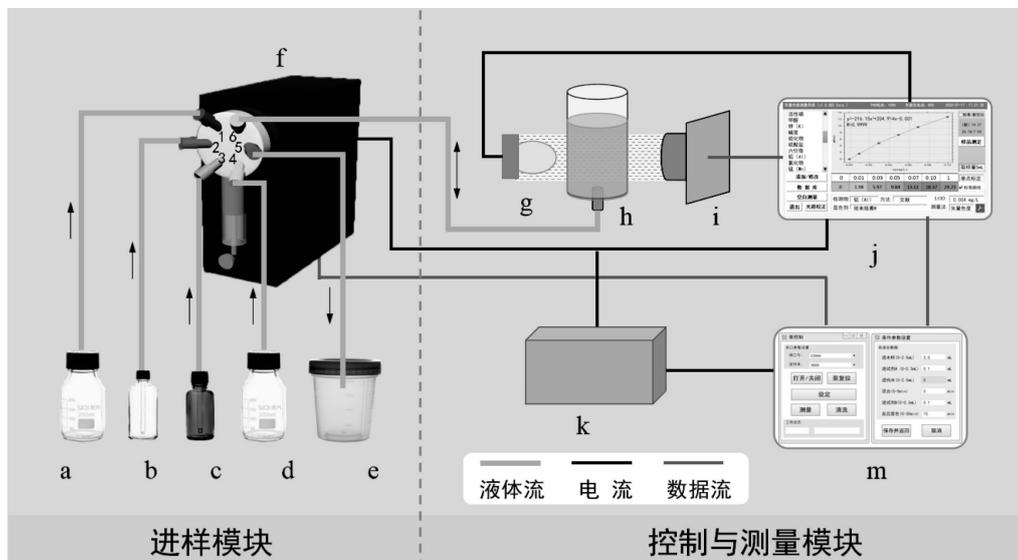


图1 各检测单元工作流程示意图

a. 水样; b. 检测剂 I; c. 检测剂 II; d. 去离子水; e. 废液桶; f. 多通道进样泵; g. LED 光源; h. 测量池; i. 传感器; j. 色度测量仪; k. 电池; m. 电脑控制系统

1.3.3 自动检测工作程序

(1)准备:按图1,连接电流、液体流、数据流各通路。将多通道进样泵的阀头用硅胶管分别连接至水样(a)、检测剂 I (b)、检测剂 II (c)、去离子水(d)、测量池(h)、废液桶(e),并将进样管充满液体,保证溶液连续进样运行工作。

(2)测量:在电脑控制系统(m)设置样品测量相关参数(图2),进样泵(f)按照指令依次定量吸取水样(a)、检测剂 I (b)、II(c)和去离子水(d)到泵管内,通过充分混合完成显色反应,将显色液泵入测量池(h),操作测量仪(j)接收传感器(i)显色溶液测量参数,计算结果显示于测量仪(j)界面。



图2 泵控制界面和条件参数设置窗口

1.3.4 水样自动检测

(1)试剂空白测量:在电脑操作界面(图2左)点击“设定”,在弹出的条件参数设置窗口(图2右)分别输入水样、铝检测剂I、铝检测剂II进样量为0、0.1、0.1 mL(此时,去离子水自动进样2.5 mL),反应显色10 min,“保存并返回”。点击“测量”键(图2左),进样泵(f)收到指令并开始工作,执行进样、混合、显色,10 min后,将显色液泵入测量池(h),在测量仪(j)操作界面点触“空白测量”,传感器(i)即采集试剂空白颜色信息,之后,测量液通过进样泵(f)指令自动排至废液桶(e)。

(2)水样测定:按照上述同样方法,设置水样、铝检测剂I、铝检测剂II进样量为2.5、0.1、0.1 mL(此时,去离子水进样量为0 mL),反应显色10 min。待显色液泵入测量池(h)后,在测量仪(j)操作界面点触“样品测量”,传感器(i)即采集水样显色液的颜色信息,测量仪(j)将根据试剂空白测量信息和内置铝标准曲线计算水样中铝浓度,之后,测量液通过进样泵(f)指令自动排至废液桶(e)。

(3)清洗:测量完成后,在电脑操作界面(图2左),点击“清洗”,多通道进样泵(f)指令自动吸取去离子水(d),冲洗泵管、管路、测量池(h),之后排至废液桶(e)。

2 结果与讨论

2.1 吸收光谱

按照实验方法,配制试剂空白和 $0.100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Al-ECR显色溶液,在350~750 nm波长下吸收光谱如图3。由曲线1知,试剂空白在492 nm处有吸收

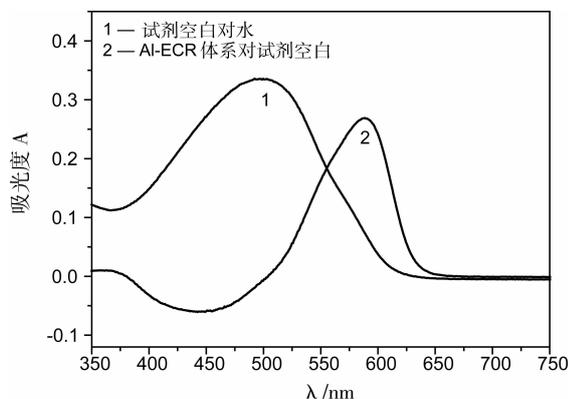


图3 Al-ECR显色液(pH 5.75)吸收光谱

1. 试剂空白,以水参比;2. $0.100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝显色溶液,以试剂空白参比

峰,由曲线2,Al-ECR显色溶液最大吸收峰在588 nm处,表明Al-ECR配合物最大吸收波长红移96 nm。因此,本实验选择588 nm为工作波长。

2.2 条件优化实验

2.2.1 pH影响

分别配制pH 4.50、5.00、5.25、5.50、5.75、6.00、6.25、6.50、6.75、7.00、8.00、9.00乙酸-乙酸钠缓冲溶液,加入到试剂空白和在Al-ECR显色反应中,吸光度测量结果如图4。由图4曲线1、2,在pH 5.00~6.00,试剂空白和铝溶液均有明显吸收。随pH上升,溶液吸光度呈现下降趋势,Al-ECR显色反应受到抑制。在pH 5.75, $0.100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝显色体系吸光度达到最大值,因此,选择pH 5.75为pH最佳显色反应条件。

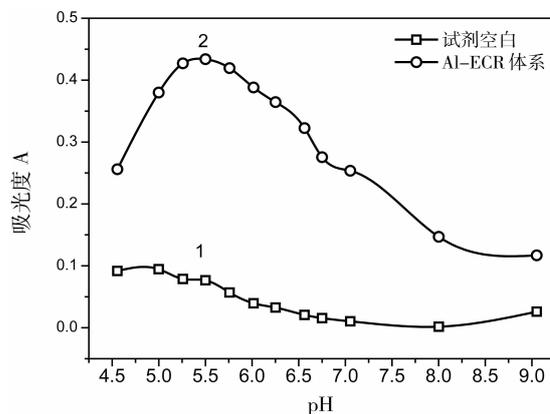


图4 pH对Al-ECR体系吸光度影响

1. 试剂空白,以水参比;2. $0.100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝显色溶液,以水参比

加入不同体积的pH 5.75乙酸-乙酸钠缓冲溶液,测量Al-ECR反应溶液吸光度的变化,结果表明,缓冲溶液加入量在0.1~0.50 mL对试剂空白和Al-ECR显色体系无显著影响。本实验选择该缓冲溶液加入量为0.2 mL。

2.2.2 ECR用量影响

为探究ECR对铝显色反应影响,在 $0.050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝溶液中,分别加入 $0.800 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ECR溶液0、0.05、0.10、0.15、0.20、0.30 mL,反应10 min,吸光度测量结果如图5所示。由图5曲线1、2可知,试剂空白和铝络合物吸光度随ECR用量增加而增大。当显色剂 $> 0.1 \text{ mL}$,Al-ECR溶液吸光度达到最大并趋于稳定,本实验选取ECR溶液加入量为0.20 mL。

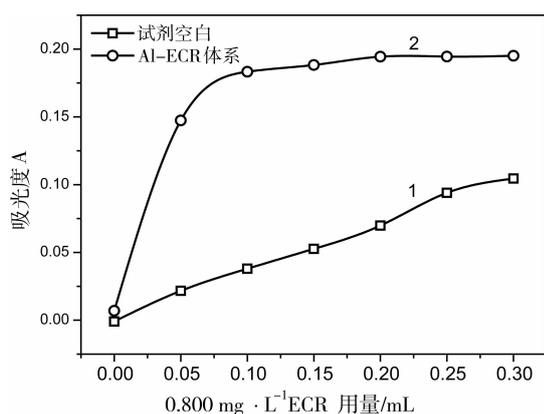


图5 ECR用量对Al-ECR体系吸光度影响

1. 试剂空白,以水参比;2. $0.050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝显色溶液,以试剂空白参比

2.2.3 CPC用量影响

在加入 0.2 mL pH 5.75 乙酸-乙酸钠缓冲溶液和 0.2 mL ECR 条件下,探究 $1.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ CPC 不同加入量对 $0.100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Al-ECR 显色反应影响,结果如图6所示。

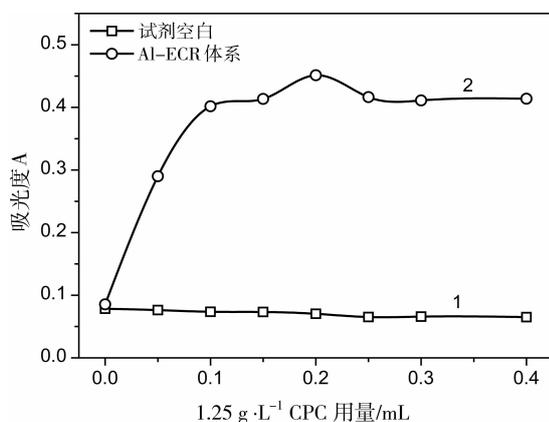


图6 CPC用量对Al-ECR显色反应吸光度影响

1. 试剂空白,以水参比;2. $0.050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝显色溶液,以水参比

由图6可知,在不加入CPC时,ECR与铝显色反应不明显。随着CPC加入,Al-ECR显色溶液吸光度明显增大(曲线2),当ECR溶液加入量大于 0.1 mL ,吸光度接近最大,且趋于稳定。由曲线1,试剂空白在 588 nm 波长吸光度值较小,对Al-ECR配合物的吸光度测量影响不大。可见,在Al-ECR显色体系中,加入CPC可以显著提高反应体系灵敏度,表明阳离子表面活性剂对该反应有显著的增敏效应。本实验选取加入 0.2 mL $1.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ CPC。

2.2.4 显色时间影响

为便于在自动检测中操作,按照上述最佳用量条件实验结果,混合、配制铝检测剂I、II(方法见1.2试剂配制)。在 $0.050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝溶液中,依次加入铝检测剂I、II各 0.2 mL ,并在 $0 \sim 60 \text{ min}$ 内测定显色溶液在 588 nm 下吸光度变化,结果表明,加入铝检测剂II 5 min后,Al-ECR络合反应吸光度趋于最大,且在 60 min 内保持稳定。

2.3 标准曲线

按实验步骤配制 $0 \sim 0.010 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝标准溶液系列,加入铝检测剂I、II,显色 10 min ,分别利用分光光度计和自动检测系统测量显色溶液,铝质量浓度与吸光度(A)和矢量色度(c.v.)关系如图7。

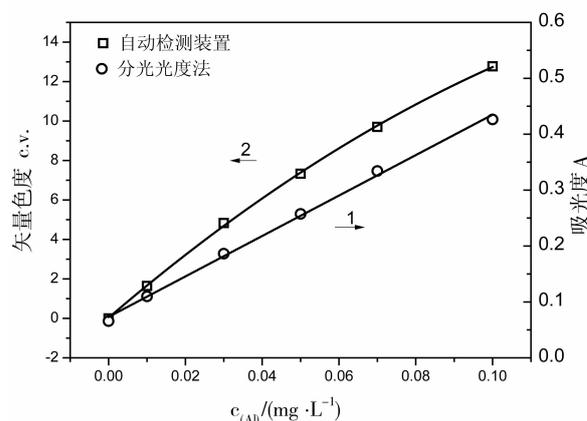


图7 标准曲线

1. 分光光度法;2. 自动检测方法

从图7曲线1可知,在 $0 \sim 0.100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围,铝浓度与吸光度成线性关系,遵循朗伯-比尔定律,线性拟合方程 $y = 3.62x + 0.0732$ ($R^2 = 0.9976$),计算摩尔吸收系数 $\epsilon_{588 \text{ nm}} = 9.77 \times 10^5 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。由曲线2,自动检测方法拟合方程 $y = -216x^2 + 204x - 0.001$ ($R^2 = 0.9999$)。因此,自动检测方法具有更高灵敏度和准确性。

2.4 精密度与检出限

按照实验方法,分别配制 $0.030 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.070 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝标准溶液各7组平行显色液,分别用分光光度法和自动检测方法检测,结果分别为: $0.030 \pm 0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.071 \pm 0.004 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.030 \pm 0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.070 \pm 0.002 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,计算其相对标准偏差(RSD)分别为 2.6% 、 2.1% 和 1.2% 、 0.5% 。因此,自动检测方法的精密

度优于分光光度法。

按照实验方法,配制 21 组试剂空白,分别采用分光光度法和自动检测方法进行测量,吸光度(A)与矢量色度(c. v.)结果分别为: 0.078 ± 0.006 和 0.214 ± 0.121 。按照 IUPAC 计算方法,得到两种方法的检出限分别为 $0.005, 0.004 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Al}$ 。

2.5 干扰离子影响及掩蔽剂选择

在选定的实验条件下,对 $50.0 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝离子标准溶液加入干扰离子进行测试,结果表明(误差 $\leq \pm 10\%$):5000 倍 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- ; 2000 倍 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ; 1000 倍 Pb^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} ; 200 倍 Cr^{3+} ; 100 倍 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} ; 20 倍 Fe^{3+} ; 10 倍 F^- ; 2 倍 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 在误差要求范围内不影响测定结果。

水体中 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 、 F^- 对铝检测产生较大干

扰,需要加入掩蔽剂提高 Al-ECR 显色体系选择性。通过加入 $0.1 \text{ mL } 10\%$ 硫脲消除 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cu}^{2+}$ 的干扰;加入 $0.3 \text{ mL } 1\%$ 抗坏血酸消除 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}^{2+}$ 的干扰^[20];氟离子对测定结果产生负干扰,当水样中含有 F^- 时,在一定量水样中加入 2 mL 浓硫酸^[21],在加热板上加热蒸干,再加入定量的水溶解残渣使溶液体积保持不变,可消除 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ F}^-$ 对铝的干扰。

2.6 水样测定

取某湖水(1#)、管网自来水(2#)和某工业废水(3#),浑浊水样预先过滤。分别采用上述建立的自动检测方法进行测定,并进行加标回收实验,同时采用 ICP-AES 国家标准方法进行检测,结果见表 1。

表 1 实际水样分析

水样	ICP-AES 法, ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) Al	自动检测方法(n=3)			Al 回收率(%)
		水样, ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) Al	加标, ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) Al	测定, ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) Al	
1#	未检出	未检出	30.0	28.6、28.0、28.4	93.3 ~ 95.4
2#	31.8、32.6、32.6	30.0、30.2、29.6	50.0	77.4、76.8、76.1	93.0 ~ 94.7
3#	123、123、125	121、120、121	50.0	170、171、172	98.0 ~ 102.3

结果表明:3 种水样中铝浓度范围在 $0 \sim 125 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,自动检测法与 ICP-AES 法检测结果基本一致。采用 ICP-AES 法、自动检测法,其 RSD 分别为 $0.9 \sim 1.4\%$ 、 $0.2 \sim 1.1\%$ 。采用自动检测法,铝加标回收率在 $93.0\% \sim 102.3\%$ 。从检测准确度、精密度可知,该自动检测方法可以满足水体痕量铝的检测要求。

2.7 检测剂稳定性

在室温条件下,将铝检测剂 I、II 各 100 mL 装入透明玻璃瓶,加盖保存,分别在保存第 1、10、30、60、90、120、150、180 天,按照实验方法配制试剂空白,并利用矢量色度仪测量溶液透光度分别为:72.97、73.66、73.02、72.51、73.74、71.47、71.34、72.09,即在 6 个月内,透光度仅下降 1.2% ,9 次测量 RSD 1.2% ,结果表明,铝检测剂 I、II 在室温条件下至少可稳定半年,因此,铝检测剂 I、II 稳定性好,便于在野外自动检测中携带、保管和长期使用。

3 结论

水质在线自动监测技术具有检测速度快、相对成本低、实现在线原位测量等优点,受到国内外学术界和产业界的广泛重视。但现有仪器大多为固定式,机动性差,无法满足水环境动态检测需要。根据在弱酸性条件下铝与 ECR 发生显色反应,改变传统的实验室试剂逐一加入法,研制稳定性好的长效铝检测剂 I、II,通过设计进样、测量、计算自动化工作程序,研究了水样痕量铝自动检测方法。

该方法具有操作简单、灵敏、准确、快速等特点,此外体积小、质量轻的非固定式组装模块为环境水质便携式自动在线检测仪的开发奠定了坚实的基础。

参考文献

- [1]徐进军,江茫,熊纯. 铝锂合金及其在航空航天领域成形技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2019, 48(24):

- 11-16.
- [2]曹景竹,王祝堂. 铝合金在航空航天器中的应用(1)
[J]. 轻合金加工技术, 2013, 41(02): 1-5.
- [3]王祝堂. 美洲陆虎汽车公司发明一种汽车用新铝合金
[J]. 轻合金加工技术, 2015, 43(07): 49.
- [4]罗彦云,蒲全卫,左国良. 铝合金和镁合金在轨道交通
装备轻量化上的应用[J]. 电力机车与城轨车辆, 2020,
43(03): 1-5.
- [5]乔兆华,单利君,林勤保,宋欢,郭捷,王蓉珍. 铝塑复
合食品包装中的铝向食品模拟物的迁移研究[J]. 食品
工业科技, 2016, 37(13): 250-253.
- [6]施本贵. 铝塑复合半刚性包装的方便食品[J]. 食品与
发酵工业, 1992,(06): 66-71.
- [7]郑倩. 食品中铝超标食用对人体的危害以及测定研究
[J]. 食品安全导刊, 2017,(15): 94.
- [8]FAO/WHO. Evaluation of certain food additives and
contaminants: Thirty-third Report of the joint FAO/
WHO Expert Committee on Food Additives [R]. WHO
Technical Report series, 1989: 776.
- [9]WHO. Global environment monitoring system-food con-
tamination monitoring and assessment programme
(GEMS/Food)[R]. Geneva: WHO, 2010.
- [10]中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会.
生活饮用水卫生标准:GB 5749-2006 [S]. 北京:中国质
检出版社, 2014.
- [11]Rathi S, Gupta R. A simple sensor placement approach
for regular monitoring and contamination detection in
water distribution networks[J]. Ksce Journal of Civil
Engineering, 2016,20: 597-608.
- [12]高娟,华璐,滑丽萍,等. 地表水水质监测现状分析与
对策[J]. 首都师范大学学报, 2006, 27(1): 75-80.
- [13]郝岩. 水环境监测中存在的问题及对策[J]. 科技创新与
应用, 2020,(03):139-140.
- [14]任楠,陈娜. 对以往比色法测定低含量铝的技改新方
法[J]. 云南地质, 2019, 38(01): 137-140.
- [15]战春梅,田然,郑冬梅,田波. 试纸法快速检测水中铝
含量的研究[J]. 食品工业, 2015, 36(03): 295-297.
- [16]陈楠,熊松,王炜,黄汉初. 快速测铝试剂盒的研制
[J]. 分析科学学报, 2010, 26(05): 563-566.
- [17]张镗. 移动检测车快速检测水中的铅[J]. 现代农业科
技, 2013,(07): 221,223.
- [18]贺艳峰. 无人自动测量船水质采样及在线监测系统探
究分析[[J]. 才智 2011,(25):60.
- [19]郜子蕙,郜子涵,刘升,等. 溶液显色反应定量分析检
测装置,发明专利 ZL 201510010348. 3.
- [20]王静兰,潘应元. 铬天青 S-溴化十六烷基吡啶分光光
度法测定水中微量铝[J]. 青岛医学院学报, 1988,
(02): 128-131.
- [21]邢书才,李风华. 铬菁 R 显色分光光度法测定水中铝
[J]. 化工环保, 2018, 38(05): 615-620.

收稿日期:2020-08-28



作者简介:龚文婷,硕士研究生,主要从事环境分析检测工作。

* 通讯联系人:E-mail:emsl@tongji.edu.cn.