

流动注射化学发光法在分析化学中的研究与应用

赵燕芳, 张 诺, 魏 琴*, 韩颜颜, 毛珂霞, 蔡燕燕, 李 茹

济南大学化学化工学院, 山东省氟化学化工材料重点实验室, 山东 济南 250022

摘 要 近年来, 流动注射化学发光法作为一种灵敏度高、分析速度快、分析成本低、线性范围宽、仪器设备简单的分析方法, 发展迅速, 应用广泛。作为一种痕量分析方法, 它已经渗透到分析化学的各个领域。首先阐述了流动注射化学发光法的原理和特点, 并详细介绍了不同种类化学发光的体系; 接着综述了近几年国内外该方法在分析化学领域中药物分析、环境和生命科学监测方面的研究进展, 并从测定样品、反应介质、发光体系、线性范围和检出限等诸方面总结和概括了流动注射化学发光法的应用情况; 最后针对流动注射化学发光法存在的一些问题提了建议, 并对该方法在药物分析、免疫分析、矿物分析、环境监测、临床医药、生命科学等方面广阔的应用前景做了展望。

关键词 流动注射; 化学发光; 药物分析; 环境监测; 生命科学

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)09-2512-06

引 言

随着社会的发展, 药物分析、环境监测和生命科学与我们的生活息息相关, 同时也是分析化学领域的研究热点。流动注射化学发光法的出现推动了各大领域的发展。流动注射是在非平衡状态下完成试样的在线处理与测定的定量流动分析技术, 是一种日益成熟并得到广泛应用的进样技术, 目前该方法的应用已经渗透到分析化学的各个领域^[1-3], 从而促进了分析的自动化。化学发光法作为高灵敏度的检测手段, 具备仪器设备简单、操作方便、灵敏度高、线性响应范围宽、分析速度快和易于实现自动化等显著优点, 已成为分析化学中一个研究的十分活跃的内容, 被广泛应用于金属离子、药物和其他有机小分子的分析中。流动注射和化学发光联用产生的流动注射化学发光法集中了二者的优点, 该方法已应用于分析化学的诸多领域, 并发挥着重大的作用。本文主要对国内外近几年流动注射化学发光法在药物分析、环境监测和生命科学这三大领域的研究与应用进行综述分析, 并对该方法今后的发展趋势和应用前景做了展望和预测。

1 流动注射化学发光法

1.1 流动注射分析技术

流动注射(flow injection)是由丹麦的 Ruzicka 和 Hansen 首先提出的, 它是一种新技术, 摆脱了溶液化学分析平衡理论的束缚, 使非平衡条件下的化学分析成为可能。它应用范围广, 包括一些高灵敏度、高选择性但不稳定的反应、动力学反应以及化学发光和生物发光反应, 因而它能够得到均匀与平衡体系无法提供的广泛信息。流动注射分析是一种容易实现现场与邻近实验室联线的自动分析系统^[4]。流动注射技术具有装置小型化, 操作简单; 自动化程度高, 分析速度快; 分析结果重现性良好; 所需试剂量少; 灵敏度高, 检测限低等优点^[5]。随着对流动注射技术的要求逐渐提高, 该技术得到了进一步的发展, 可以与其他技术结合^[6,7], 拓展了其应用的空间, 使其成为一种应用更为广泛的技术。

目前流动注射除了和化学发光法结合, 还与许多其他的方法联用形成新的分析测试方法, 具体见表 1。

1.2 化学发光法

化学发光(Chemiluminescence, 简称 CL)是一种由化学反应引起的光辐射现象。它是基于分子发光强度和被测物含量之间的关系建立的分析方法^[13]。化学发光法是近年来发

收稿日期: 2009-10-26, 修订日期: 2010-01-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(20577016), 山东省自然科学基金项目(Y2008B44), 山东重点学科基金项目(XTD0705)和济南市科技发展计划项目(201004015)资助

作者简介: 赵燕芳, 女, 1984 年生, 济南大学化学化工学院硕士研究生 e-mail: zhyf2006@163.com

* 通讯联系人 e-mail: sdjndxwq@163.com

展起来的一种灵敏度极高的痕量元素分析新技术。由于近年来发现越来越多的化学物质具有增强或抑制化学发光的作

用,再加上与其他技术的结合,因此该检测技术的应用范围进一步扩大。

Table 1 Combining of the technology of flow injection and other testing methods

联用技术	特点	文献
流动注射分光光度法	可以检测金属离子、无机离子等,该方法简便,仪器结构简单,价格低廉,至今仍是应用最广泛的检测方法。	[8]
流动注射电化学法	流程简单,没有光度法检测中可能存在折射光的干扰。	[9]
流动注射原子光谱法	可大大节省试剂,样品经过分离富集等预处理,提高了测定的选择性和灵敏度,可以检测无机离子与有机污染物。	[10]
流动注射荧光法	利用物质的荧光性质,进行在线检测的一种方法。	[11]
流动注射毛细管电泳法	对系统施加分离电压,试样受电迁移和电渗流共同作用被分离和在线检测。	[12]

在化学发光分析中,发光体系是一个重要的部分,大致有4类^[14]: (1) 无机离子-化学发光剂; (2) 无机离子催化-氧化剂-化学发光剂; (3) 无机元素离子催化有机物的氧化-化学发光体系; (4) 各种乳化剂-化学发光体系。另外还有NBS-荧光素体系发光体系等。

1.3 流动注射化学发光法

流动注射化学发光法最初应用于一些简单离子的定量测定,后来随着新的研究和改进,应用范围扩大,进一步用于检测复杂体系^[15-21]等,该方法成为分析化学中一种有效的微量或痕量分析方法,从而开发出分析化学的一个全新领域。

2 流动注射化学发光法在分析化学中的应用

流动注射化学发光分析法由于具有高的灵敏度和良好的线性范围,被广泛应用于分析化学中的药物分析、环境监测和生命科学等各个领域。下面主要介绍该方法在这三个领域中的应用。

2.1 流动注射化学发光法在药物分析方面的应用

药物在人们生活中发挥着越来越重要的作用,药物分析研究本身要求灵敏度高,流动注射化学发光作为一种有效的痕量分析技术,为药物分析提供了很好的手段。

2.1.1 流动注射化学发光法在农药方面的应用

农药作为一种重要的农业生产资料,在消灭农作物病、虫、草害,保护农作物生长方面具有重要的作用。但是农药的大量使用也给人们身体健康和生态环境带来很大影响,流

动注射化学发光法可用于多种农药或其残留的检测。将该方法在农药分析中的主要应用列于表2。

2.1.2 流动注射化学发光法在医药分析中的应用

在人们日渐关心健康的今天,医药分析显的尤为重要,流动注射化学发光法在药物的药效、动力学、机理等方面的研究有更大的潜力。将该方法在医药分析中的主要应用列于表3。

2.2 流动注射化学发光法在环境监测方面的应用

作为一种灵敏的检测方法,流动注射化学发光法已广泛地应用于痕量环境样品的分析监测,对环境中的水样和空气样品的快速分析有着重要的意义。

2.2.1 流动注射化学发光在无机离子分析方面的应用

流动注射化学发光法是一种分析无机元素灵敏度极高的新手段,为环境检测方面的无机离子的分析提供了手段。将该方法在环境无机离子分析中的主要应用列于表4。

2.2.2 流动注射化学发光在化合物分析方面的应用

流动注射化学发光法在分析环境中化合物特别是有机化合物方面的应用有很多文献报道,这对进一步研究发光体系的发光机理,寻找更灵敏的发光试剂很有帮助。将该方法在环境化合物中的主要分析应用列于表5。

2.3 流动注射化学发光法在生命科学方面的应用

在生命科学领域中,放射性同位素法、荧光法和比色法已经得到广泛的应用,但这些方法各有不足之处,流动注射化学发光法则弥补了这方面的不足。将该方法在生命科学分析中的主要应用列于表6。

Table 2 Application of flow injection chemiluminescence in pesticide analysis

测定药物	测定样品	试剂	反应介质	线性范围 /($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	检出限 /($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	文献
氨基乙酸	药剂	荧光素-NBS	$c(\text{NaOH})=0.17 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.1~100.0	3.0×10^{-2}	[22]
异丙威	杀虫剂	连二亚硫酸钠	$c(\text{H}_2\text{SO}_4)=0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.1~10.0	8.0×10^{-2}	[23]
抗蚜威	水样	罗丹明 B- Cu^{2+} - H_2O_2	$c(\text{多聚磷酸})=4.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	0.1~10.0	5.8×10^{-2}	[24]
敌敌畏	蔬菜样品	鲁米诺- H_2O_2 -OP	$c(\text{NaOH})=0.04 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.08~25.0	2.2×10^{-2}	[25]
代森锌	杀菌剂	荧光素-NBS	$c(\text{NaOH})=0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.9~700.0	3.0×10^{-1}	[26]
敌百虫	杀菌剂	鲁米诺- H_2O_2	$\text{pH}(\text{NaOH}-\text{NaHCO}_3)=1.8$	0.01~10.0	3.2×10^{-3}	[27]
乐果	合成样品	鲁米诺- H_2O_2	$\text{pH}(\text{NaOH})=12.0 \sim 12.5$	0.01~10.0	8.0×10^{-3}	[28]
敌草快	除草剂	铁氰化钾-奎宁	$c(\text{NaOH})=0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.01~0.6	2.0×10^{-3}	[29]

注: NBS: 溴代琥珀酰亚胺; OP: 聚乙二醇辛基苯基醚

Table 3 Application of flow injection chemiluminescence in pharmaceutical analysis

测定药物	测定样品	试剂	反应介质	线性范围 ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	检出限 ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	文献
仑安西林	合成样品	鲁米诺- H_2O_2	$c(\text{NaOH})=0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.01~10.0	5.6×10^{-3}	[30]
白藜芦醇	药剂	NCS-鲁米诺	$c(\text{NaOH})=0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.002 5~0.08	6.3×10^{-4}	[31]
邻二苯酚	血清	KIO_4 -鲁米诺	$c(\text{NaOH})=0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.003~0.1	1.5×10^{-4}	[32]
舒必利	片剂	铈(IV)-亚硫酸钠	$c(\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2)=1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.1~10.0	3.0×10^{-2}	[33]
异烟肼	药剂	荧光素-NBS	$c(\text{NaOH})=0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.01~15.0	6.0×10^{-3}	[34]
去乙酰毛花苷	注射剂	KIO_4 -鲁米诺	$c(\text{NaOH})=0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.01~10.0	3.1×10^{-3}	[35]
强力霉素	尿样	罗丹 6G-Ce(IV)	$c(\text{HNO}_3)=0.8 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.01~1.0	2.0×10^{-3}	[36]
诺氟沙星	胶囊	KIO_4 -鲁米诺	$c(\text{NaOH})=0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.008 4~0.12	2.0×10^{-3}	[37]
曲克芦丁	针剂	KIO_4 - MnSO_4	$c(\text{HCl})=1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.2~80.0	7.0×10^{-2}	[38]
己烯雌酚	药剂	KIO_4 -鲁米诺	$c(\text{NaOH})=0.03 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.013 4~1.340	4.0×10^{-3}	[39]
诺氟沙星	制剂	Ce(IV)- Na_2SO_3	$c(\text{H}_2\text{SO}_4)=0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	$7.9 \times 10^{-7} \sim 1.9 \times 10^{-5}$	8.2×10^{-8}	[40]
维静宁	血浆	NCS * 二氯荧光素	$c(\text{NaOH})=2.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.006~1.0	9.0×10^{-4}	[41]
阿替洛尔	血浆	KMnO_4 - Na_2SO_3	pH=2.0	0.008~10.0	1.0×10^{-1}	[42]
维生素 B ₁₂	片剂	鲁米诺- H_2O_2	pH=10.7	0.000 05~1.0	5.0×10^{-6}	[43]
多巴胺	血浆	KIO_4 -鲁米诺	$c(\text{NaOH})=0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.000 2~0.06	1.17×10^{-4}	[44]
盐酸多巴胺	制剂	KIO_4 -鲁米诺	$c(\text{NaOH})=0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.000 1~0.1	2.0×10^{-5}	[45]
新鱼腥草素钠	片剂	罗丹明 B	$c(\text{H}_2\text{SO}_4)=0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.008~4.0	2.7×10^{-3}	[46]
马来酰肼	制剂	鲁米诺- KIO_4	$c(\text{NaOH})=0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.35~50.0	6.0×10^{-2}	[47]
克林霉素	尿样	鲁米诺	$c(\text{NaOH})=0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.000 1~0.07	1.0×10^{-4}	[48]
布洛芬	尿样	KMnO_4 - Na_2SO_3	$c(\text{NaOH})=2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.1~20.0	3.0×10^{-2}	[49]
洛美沙星	针剂	$[\text{Ag}(\text{HIO}_6)_2]^{5-}$	$c(\text{H}_2\text{SO}_4)=1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.03~3.7	9.1×10^{-3}	[50]

注: NCS: N-氯代丁二酰亚胺; * 标注数字单位为: $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

Table 4 Application of flow injection chemiluminescence in inorganic ions analysis

测定药物	测定样品	试剂	反应介质	线性范围 ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	检出限 ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	文献
铈(III)	土壤样品	鲁米诺- H_2O_2	pH(NaOH)=12.3	0.000 05~0.05	1.0×10^{-5}	[51]
砷(III)	环境水样	甲醛-六偏磷酸钠- KMnO_4	$c(\text{HCl})=6.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.002~0.3	1.0×10^{-3}	[52]
硒(IV)	天然水	NaIO_4 - H_2O_2	二次水	$1.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-5}$	4.2×10^{-8}	[53]
铈(II)	矿样	Co(II)-鲁米诺- H_2O_2	pH(Na_2CO_3 - NaHCO_3)=12.0	0.003~10.0	1.0×10^{-1}	[54]
镉(II)	土壤样品	黄绿素- H_2O_2	$c(\text{NaOH})=0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.000 1~0.005	5.7×10^{-5}	[55]
钒(V)	环境水样	KIO_4 -鲁米诺	$c(\text{NaOH})=0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.000 2~0.1	6.0×10^{-4}	[56]

注: * 标注数字单位为: $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

Table 5 Application of flow-injection chemiluminescence in compounds analysis

测定药物	测定样品	试剂	反应介质	线性范围 ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	检出限 ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	文献
腐殖酸	土壤样品	NBS	$c(\text{NaOH})=0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.1~1 000.0	3.0×10^{-2}	[57]
苯酚	工业废水	KMnO_4 - H_2O_2	$c(\text{多聚磷酸钠})=1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.1~100.0	4.0×10^2	[58]
焦性没食子酸	工业废水	KIO_4 -鲁米诺	$c(\text{NaOH})=0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.1~2.0	7.8×10^2	[59]
二氧化氯	自来水	鲁米诺	pH(NaOH-KCl)=12.5	0.000 5~0.2	3.0×10^{-4}	[60]
亚硝酸盐	蔬菜	鲁米诺-铁氰化钾	$c(\text{NaOH})=0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.001~10.0	5.0×10^{-5}	[61]
二氯苯酚	河水	鲁米诺- KMnO_4	$c(\text{NaOH})=1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.1~20.0	1.4×100	[62]
双酚 A	自来水	鲁米诺-过硫酸钾	$c(\text{NaOH})=0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	$9.0 \times 10^{-9} \sim 1.0 \times 10^{-5}$	9.9×10^{-10}	[63]
COD	水样	KMnO_4 -戊二醛	—	0.16~19.24	1.0×10^{-1}	[64]

注: * 标注数字单位为: $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。COD: 化学需氧量

3 流动注射化学发光法存在的问题

流动注射化学发光法应用广泛,但该方法仍存在一定问

题亟待解决:首先,发光体系的灵敏度还达不到某些痕量测定实验的期望值,目前该方法的检出限和一些实验要求相比仍有一定的差距,需要寻找很好的增敏剂来辅助增加灵敏度以完善和丰富发光体系;其次,对于干扰较多的物质加以避

Table 6 Application of flow injection chemiluminescence in life sciences analysis

测定药物	测定样品	试剂	反应介质	线性范围 ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	检出限 ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	文献
苏丹红 I	辣椒酱	鲁米诺- H_2O_2	$c(\text{NaOH})=0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.000 01~0.007	7.5×10^{-6}	[65]
芹菜素	芹菜	罗丹明 6G-Ce(IV)	$c(\text{HNO}_3)=1.8 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.000 5~0.2	2.0×10^{-5}	[66]
茶多酚	茶饮料	鲁米诺- KMnO_4	$c(\text{NaOH})=0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.002~0.5	1.2×10^{-4}	[67]
维生素 C	饮料	鲁米诺- KMnO_4	$c(\text{NaOH})=0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	$1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-4}$	4.0×10^{-6}	[68]
三聚氰胺	牛奶	鲁米诺-肌球蛋白	$c(\text{NaOH})=0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.000 01~0.005	3.0×10^{-6}	[69]
异黄酮	大豆	铁氰化钾	$c(\text{NaOH})=0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	$1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0$	4.6×10^{-1}	[70]
铁蛋白	蛋白质	鲁米诺- H_2O_2	$\text{pH}=2.0$	0.000 5~0.01	3.6×10^{-4}	[71]
赤藓红	色素	NCS	$c(\text{NaOH})=0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.1~10.0	3.0×10^{-2}	[72]
头孢他美脂	血浆	鲁米诺- H_2O_2	$c(\text{NaOH})=0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	$4.0 \times 10^{-4} \sim 0.1$	1.0×10^{-4}	[73]
冬氨酸	茶叶	$\text{Ru}(\text{phen})_3^{3+}$ -Ce(IV)	$c(\text{H}_2\text{SO}_4)=8.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	$2.0 \times 10^{-7} \sim 1.3 \times 10^{-5}$	1.5×10^{-8}	[74]
DNA 杂交	合成样品	鲁米诺- H_2O_2 -Cu(II)	$\text{pH}=5.0$	$2.0 \times 10^{-12} \sim 1.0 \times 10^{-10}$	5.5×10^{-13}	[75]

注: * 标注数字单位为: $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

免,或采取防止干扰的措施;最后,有待于设计自动化更高的流动注射化学发光分析仪,实现复杂体系的有效检测。

4 展 望

随着流动注射化学发光法的应用领域不断扩大,流动注

射设备灵敏度的提高,发光检测体系的优化,新的高效能发光试剂和发光体系的开发,流动注射化学发光分析技术和其他检测技术的联用,该方法能够充分满足药物化学、免疫分析、矿物分析、环境监测、临床医药、生命科学等领域愈来愈高的要求。由此可以看出流动注射化学发光法的应用前景十分广阔。

参 考 文 献

- [1] Waseem A, Yaqoob M, Nabi A. Talanta, 2007, 71(1): 56.
- [2] Motyka K, Onjia A, Mikuška P, et al. Talanta, 2007, 71(2): 900.
- [3] Zhang S S, Zhong H, Ding C F. Anal. Chem., 2008, 80(19): 7206.
- [4] HAN Xiao-zhan(韩小战). Shanxi Science and Technology(山西科技), 2007, 6(3): 127.
- [5] JIN Shao-xiang(金少祥). Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis(理化检验-化学分册), 2009, 45(2): 238.
- [6] Qu P, Yan S C, Lu H, et al. Microchim Acta, 2008, 163(3-4): 321.
- [7] Feng Q Z, Zhao L X, Yan W, et al. Anal. Bioanal. Chem., 2008, 391(3): 10739.
- [8] SU Ling, ZHANG Hai-tao(苏 苓, 张海涛). Environmental Science and Technology(环境科学与技术), 2009, 32(4): 112.
- [9] Liu X M, Li S Y, Zhang J S, et al. Journal of Chromatography B, 2009, 27(1): 3144.
- [10] XUE Guang-rong, XIA Min-yong(薛光荣, 夏敏勇). Chemical Analysis And Meterage(化学分析计量), 2008, 17(1): 38.
- [11] LI Jiao, LIU Jun-cheng(李 蛟, 刘俊成). Chinese Journal of Analysis Laboratory(分析实验室), 2009, 28(5): 91.
- [12] YIN Dong-guang, WU Ming-hong, XIE Chun-juan, et al(尹东光, 吴明红, 谢春娟, 等). Chinese Journal of Analytical Chemistry(分析化学), 2009, 37(1): 152.
- [13] XIONG Xun-yu, TANG Yu-hai, YU Chun-ling, et al(熊迅宇, 唐玉海, 于春玲, 等). Northwest Pharmaceutical Journal(西北药学杂志), 2006, 21(6): 284.
- [14] LIU Ming-yang, YIN You-jun, ZHAO Jing-hong, et al(刘名扬, 尹有军, 赵景红, 等). Inspection and Quarantine Science(检验检疫科学), 2007, 17(3): 56.
- [15] Usshera S J, Milnea A, Landing W M, et al. Analytica Chimica Acta, 2009, 652(1-2): 59.
- [16] Fan S L, Qu F, Zhao L, et al. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2006, 386(7-8): 2175.
- [17] Rezaei B, Khayamian T, Mokhtari A. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2009, 49(2): 234.
- [18] Kanwal S, Fu X H, Su X G. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2009, 74(5): 1046.
- [19] Maya F, Estela J M, Cerdà V. Analytica Chimica Acta, 2007, 601(1): 87.
- [20] Lagalante A F, Greenbacker P W. Analytica Chimica Acta, 2007, 590(2): 151.
- [21] Li B X, Guo L L, Xu C L, et al. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2008, 71(3): 892.
- [22] FANG Lu-qiu, MA Xing-ju, LU Hong-fa, et al(方卢秋, 马兴菊, 卢红发, 等). Journal of Chongqing Normal University(Natural Science Edition)(重庆师范大学学报·自然科学版), 2007, 24(1): 62.
- [23] HE Shu-hua, HOU De-yong, ZHANG Zhu-jun(何树华, 侯德勇, 章竹君). Applied Chemistry(应用化学), 2006, 24(11): 1298.
- [24] HE Shu-hua, HOU De-yong, ZHANG Zhu-jun(何树华, 侯德勇, 章竹君). Chinese Journal of Analytical Chemistry(分析化学研究简

- 报), 2006, 34(11): 1622.
- [25] BAO Chang-li, FAN Xi, SONG Hai-ou, et al(鲍长利, 樊 熹, 宋海欧, 等). Journal of Jilin University(Science Edition)(吉林大学学报·理学版), 2006, 44(4): 649.
- [26] FANG Lu-qiu(方卢秋). Agrochemicals(农药), 2006, 45(6): 406.
- [27] XIE Fu-rong, TU Mao-zhen, XIE Zeng-hong(谢福荣, 涂貌贞, 谢增鸿). Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory(光谱实验室), 2006, 23(3): 644.
- [28] ZHANG Li, YANG Ying-chun, JI Ai-jun, et al(张 丽, 杨迎春, 吉爱军, 等). Journal of Sichuan Normal University(Natural Science)(四川师范大学学报·自然科学版), 2008, 31(2): 250.
- [29] López-Paz J L, Catalá-Icardo M, Antón-Garrido B. Anal. Bioanal. Chem., 2009, 394(4): 1073.
- [30] HE Shu-hua(何树华). Journal of Instrumental Analysis(分析测试学报), 2006, 25(6): 115.
- [31] YAO Xing-jun, WANG Shu-hao, DU Ling-yun(姚型军, 王术皓, 杜凌云). Journal of Instrumental Analysis(分析测试学报), 2006, 25(4): 88.
- [32] QIU Xiao-xiang, SONG Zheng-hua(丘小香, 宋正华). Journal of Nanyang Normal University(南阳师范学院学报), 2006, 5(6): 51.
- [33] SUN Shu-wen, LÜ Jiu-ru(孙述文, 吕九如). Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science)(陕西师范大学学报·自然科学版), 2006, 34(2): 80.
- [34] MA Ming-yang, LU Jiu-ru(马明阳, 吕九如). Journal of Analytical Science(分析科学学报), 2007, 23(1): 13.
- [35] HAN Xiao-nian, TANG Yu-hai, YU Chun-ling, et al(韩小年, 唐玉海, 于春玲, 等). Chinese Journal of Analysis Laboratory(分析试验室), 2006, 25(6): 49.
- [36] WANG Hao, WANG Rui-fen, HUANG Yu-ming(王 皓, 王瑞芬, 黄玉明). Journal of Xinan Normal University(Natural Science)(西南师范大学学报·自然科学版), 2007, 29(5): 18.
- [37] YU Chun-ling, TANG Yu-hai, HAN Xiao-nian, et al(于春玲, 唐玉海, 韩小年, 等). Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis(理化检验-化学分册), 2008, 44(1): 86.
- [38] CHEN Xiao-li, MA Hong-yan, ZHANG Yao-feng(陈小利, 马红燕, 张耀峰). Chinese Journal of Analysis Laboratory(分析试验室), 2006, 25(7): 109.
- [39] LUO Li-rong, ZHOU Fu-lin, ZHANG Zhu-jun(罗李荣, 周福林, 章竹君). Chinese Journal of Analysis Laboratory(分析试验室), 2006, 25(4): 79.
- [40] Yu X J, Bao J F. Journal of Luminescence, 2009, 129(9): 973.
- [41] Zhang H Z, Nie F, Lu J R. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2009, 72(4): 858.
- [42] Li D D, Du J X, Lu J R. Microchimica Acta, 2008, 161(1-2): 169.
- [43] Kumar S S, Chouhan R S, Thakur M S. Analytical Biochemistry, 2009, 388(2): 312.
- [44] YU Chun-ling, TANG Yu-hai, HAN Xiao-nian, et al(于春玲, 唐玉海, 韩小年, 等). Journal of Instrumental Analysis(分析测试学报), 2006, 25(1): 119.
- [45] Wang X L, Li A Y, Zhao H C, et al. Journal of Analytical Chemistry, 2009, 64(1): 75.
- [46] Yang X F, Yao H C, Zhai J B, et al. Journal of Fluorescence, 2007, 17(1): 15.
- [47] Fang Y J, Yan S L, Baoan Ning B A, et al. Biosensors and Bioelectronics, 2009, 24(8): 2323.
- [48] Shao X D, Xie X F, Song Z G. Microchimica Acta, 2007, 157(3-4): 159.
- [49] Payán M R, López M A B, Torres R F, et al. Talanta, 2009, 79(3): 911.
- [50] Sun H W, Chen P Y, Wang F, et al. Talanta, 2009, 79(2): 134.
- [51] JI Ai-jun, YANG Ying-chun, HE Li-ping(吉爱军, 杨迎春, 何立平). Chemical Analysis and Meterage(化学分析计量), 2008, 17(1): 41.
- [52] LIU Yang, HUANG Yu-ming(刘 杨, 黄玉明). Journal of Xinan University(西南大学学报), 2007, 29(5): 36.
- [53] XU Wei-min, GAN Ning, PAN Jian-guo, et al(徐伟民, 干 宁, 潘建国, 等). Guangdong Trace Elements Science(广东微量元素科学), 2006, 13(4): 48.
- [54] WU Zhi-hao, LI Gui-min, WANG Jin-zhong, et al(吴志皓, 李桂敏, 王金中, 等). Chinese Journal of Analysis Laboratory(分析试验室), 2006, 25(2): 4.
- [55] FENG Yuan-yuan, YANG Ying-chun, JI Ai-jun, et al(冯媛媛, 杨迎春, 吉爱军, 等). Chinese Journal of Analysis Laboratory(分析试验室), 2009, 28(7): 58.
- [56] Liu J B, Qiao B, Zhang N, et al. Journal of Geochemical Exploration, 2009, 103(1): 45.
- [57] FANG Lu-qiu(方卢秋). Environmental Monitoring in China(中国环境监测), 2007, 23(2): 26.
- [58] LI Li-qing, SUN Han-wen, CHEN Xue-yan(李丽清, 孙汉文, 陈雪艳). Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis(理化检验-化学分册), 2007, 43(3): 191.
- [59] HE Shu-hua, HOU De-yong, JIANG Hong(何树华, 侯德勇, 江 虹). Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis(理化检验-化学分册), 2008, 44(4): 316.
- [60] LIU Xi-dong, GUO Hui(刘希东, 郭 惠). Journal of Instrumental Analysis(分析测试学报), 2006, 25(2): 81.

- [61] FAN Cai-ling, ZHU Ling-feng, JIANG Zhi-hong, et al(范彩玲, 朱灵峰, 姜志宏, 等). Food Science(食品科学), 2006, 22(9): 88.
- [62] Feng Q Z, Zhao L X, Yan W, et al. Anal. Bioanal. Chem., 2008, 391(3): 1073.
- [63] LI Xue-feng, XIE Tai-ping, ZHANG Li-ke, et al(李学峰, 谢太平, 张立科, 等). Chemical and Engineering of Hebei(河北化工), 2009, 32(6): 59.
- [64] Yao H, Wu B, Qu H B, et al. Analytica Chimica Acta, 2009, 633(1): 76.
- [65] Liu Y H, Song Z G, Dong F X, et al. J. Agric. Food Chem., 2007, 55(3): 614.
- [66] LIU Ze-min, HUANG Yu-ming(刘泽敏, 黄玉明). Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)(西南师范大学学报·自然科学版), 2006, 31(3): 89.
- [67] YU Yu-yan, SHA Mei, ZHANG Shu-ling, et al(余宇燕, 沙玫, 张淑玲, 等). Chinese Journal of Analysis Laboratory(分析试验室), 2006, 25(4): 101.
- [68] WANG Jian-guo, WANG Jing-wu, YI Xiu-guang(王建国, 汪敬武, 易绣光). Acta Agriculturae Jiangxi(江西农业学报), 2009, 21(5): 99.
- [69] Wang Z M, Chen D H, Gao X, et al. J. Agric. Food Chem., 2009, 57(9): 3464.
- [70] YANG Dan, CHANG Jing, HAO Zai-bin, et al(杨丹, 常晶, 郝再彬, 等). Chinese Journal of Analytical Chemistry(分析化学研究简报), 2006, 34(8): 1113.
- [71] LI Zheng-ping, HAN Jun, LÜ Xue-chong, et al(李正平, 韩军, 吕学冲, 等). Journal of Hebei University (Natural Science Edition)(河北大学学报·自然科学版), 2009, 29(3): 274.
- [72] LIU Pei-juan, DU Jian-xiu(刘佩娟, 杜建修). Chinese Journal of Analysis Laboratory(分析试验室), 2009, 28(7): 9.
- [73] Shao X D, Li X, Liu B, et al. Journal of Analytical Chemistry, 2009, 64(1): 71.
- [74] Lee S H, Jeon C W, Wabaidur S M. Journal of Fluorescence, 2008, 18(3-4): 655.
- [75] Ding C F, Zhong H, Zhang S H. Biosensors and Bioelectronics, 2008, 23(8): 1314.

Studies and Application of Flow Injection Chemiluminescence in Analytical Chemistry

ZHAO Yan-fang, ZHANG Nuo, WEI Qin*, HAN Yan-yan, MAO Ke-xia, CAI Yan-yan, LI Ru

Shandong Provincial Key Laboratory of Fluorine Chemistry and Chemical Materials, School of Chemistry and Chemical Engineering, University of Jinan, Ji'nan 250022, China

Abstract At present, flow-injection chemiluminescence is of high sensitivity, fast analysis, low cost, wide linear response range, and simplified operation for trace analysis, and makes a feature of fast development and wide application. As a trace analysis method, it is infiltrated in diverse areas. The principle and characteristics of flow-injection chemiluminescence were expounded, and the chemiluminescence systems were introduced in detail in the present article. The research developments, which were mainly about drug analysis, environment monitoring and life sciences examination, were summarized, at home and abroad. The application situations of the method were briefed from aspects of determination of sample, the reaction medium, chemiluminescence systems, the linearity range, and the detection limit. Finally, the author proposed suggestions in view of this method to address the ongoing problems, and prospected broad application of flowing injection chemiluminescence in drug analysis, immunoassay, mineralogical analysis, environment monitoring, clinical medicine and life sciences.

Keywords Flow-injection; Chemiluminescence; Drug analysis; Environment monitoring; Life sciences

(Received Oct. 26, 2009; accepted Jan. 29, 2010)

* Corresponding author