

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.04.014

# ZnO NPs 增敏流动注射化学发光法检测雨水中的 $H_2O_2$

陈 华, 陈祖琴, 杨 敏, 谢 雪

(重庆大学 化学化工学院, 重庆 400044)

**摘 要:** 基于 ZnO 纳米颗粒 (ZnO nanoparticles, ZnO NPs) 增敏 luminol- $H_2O_2$  化学发光, 结合流动注射技术, 研究建立一种简单、快速、灵敏地测定雨水中微量  $H_2O_2$  的方法。考察 pH, ZnO NPs, luminol 和  $H_2O_2$  浓度对化学发光的影响。在优化条件下,  $H_2O_2$  浓度在 0.06~20  $\mu\text{mol/L}$  范围内,  $H_2O_2$  浓度的对数 ( $\lg c$ ) 和化学发光峰面积的对数 ( $\lg A$ ) 具有良好的线性关系, 检出限 (LOD) 为 0.016  $\mu\text{mol/L}$  ( $3\sigma$ )。将此方法应用于雨水中微量  $H_2O_2$  的测定, 回收率为 95%~102%, RSD ( $n=11$ ) 为 2.41%。

**关键词:** Luminol; ZnO 纳米颗粒;  $H_2O_2$ ; 雨水

中图分类号: O657.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2016)04-112-06

## Determination of $H_2O_2$ in rainwater using flow injection chemiluminescence enhanced by ZnO nanoparticles

CHEN Hua, CHEN Zuqin, YANG Min, XIE Xue

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

**Abstract:** Based on the fact that the ZnO nanoparticles (ZnO NPs) can enhance the weak chemiluminescence (CL) of the luminol- $H_2O_2$  system, a simple, fast and sensitive flow injection CL method was developed for the determination of  $H_2O_2$  in rainwater. Experimental parameters affecting CL were optimized, including pH and concentrations of ZnO NPs, luminol and  $H_2O_2$ . Under optimal conditions, the logarithm of CL peak area ( $\lg A$ ) is linear with the logarithm of the concentration ( $\lg c$ ) of  $H_2O_2$  when the concentration of  $H_2O_2$  ranges from 0.06 to 20  $\mu\text{mol/L}$  and its limit of detection is 0.016  $\mu\text{mol/L}$  ( $3\sigma$ ). The method has been successfully applied to the determination of  $H_2O_2$  in rainwater, giving recovery rate in the range of 95%~102% and RSD ( $n=11$ ) of 2.41%.

**Keywords:** luminol; ZnO NPs;  $H_2O_2$ ; rainwater

过氧化氢 ( $H_2O_2$ ) 是参与环境和生物过程中的一种重要化合物<sup>[1]</sup>。因具有氧化漂白、高效杀菌和易分解等特点,  $H_2O_2$  被广泛用于食品和工业生产中。但超量或非法添加  $H_2O_2$ , 易导致环境污染。已证明  $H_2O_2$  是环境中氧化  $SO_2$  生成  $H_2SO_4$  最为有效的氧化剂, 而形成的  $H_2SO_4$  是引起酸雨的主要原因, 这是全球严重的环境问题<sup>[2]</sup>。因此, 检测雨水中  $H_2O_2$  的含量可为环境信息提供重要的指标。

已有多种测定  $H_2O_2$  的方法报道, 包括滴定分析法<sup>[3]</sup>、荧光分析法<sup>[4-5]</sup>、分光光度法<sup>[6-7]</sup>、电化学法<sup>[8]</sup>等。这些方法各有优点, 但存在着选择性差和灵敏度低等不足。化学发光法具有灵敏度高、线性范围宽、仪器设

收稿日期: 2016-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (21005092)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (21005092).

作者简介: 陈华 (1977-), 男, 重庆大学副教授, 主要从事分析化学研究, (E-mail) chenhuacqu@aliyun.com。

备简单、操作方便和分析快速等优点,并已得到了广泛研究与应用<sup>[9-11]</sup>。

纳米材料由于具有特殊的物理和化学性质被广泛应用于各个领域。近年来,纳米材料也被应用于化学发光分析中,被用来开发各种新型的高灵敏、高选择性的检测方法和器件<sup>[12-13]</sup>。ZnO NPs 是一种 n 型半导体化合物,表现出很好的光催化活性,具有制备简单、价格便宜和形貌易控制等优点,已被广泛应用于光催化<sup>[14-15]</sup>、工业催化<sup>[16]</sup>、气体传感器<sup>[17]</sup>和太阳能电池<sup>[18]</sup>等中。Li 等<sup>[19]</sup>发现 ZnONPs 促进 Luminol-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 化学发光现象,并研究了 ZnO 纳米粒径大小对 Luminol-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 发光的影响。笔者在前人研究的基础上,系统研究了该方法的分析特性和影响因素,并结合流动注射技术,建立了流动注射化学发光分析方法,并应用于雨水中微量 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的测定。该方法具有简单、快速、灵敏度高、线性范围宽及重现性好等特点。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与试剂

IFFM-E 型流动注射化学发光分析仪(西安瑞迈分析仪器有限公司);UV-2450 紫外-可见分光光度计(日本 SHIMADZU 公司);电子天平(日本 SHIMADZU 公司);数显恒温磁力搅拌器(金坛市双捷实验仪器厂);高速冷冻离心机 GL-16A(上海菲洽尔分析仪器有限公司);KQ-100B 型超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司);DELTA320 pH 计(梅特勒-托利多仪器有限公司);艾柯 DZG-303A 纯水制备仪(成都唐氏康宁科技发展有限公司);ZEISS Libra200 透射电镜(德国 ZEISS 公司)。

Luminol(Aladdin 公司);甲醇(分析纯,重庆川东化工有限公司);EDTA、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、NaHCO<sub>3</sub>、Zn(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 和 NaOH(分析纯,成都市科龙化工试剂厂);实验用水为去离子水。

### 1.2 标准溶液的配制

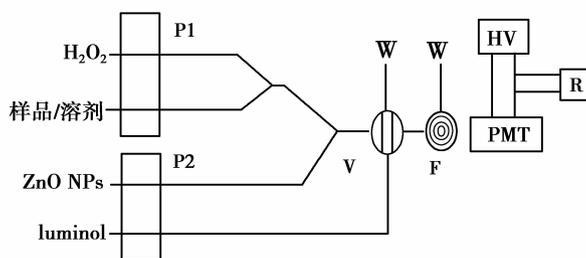
准确称取 0.442 9 g luminol,用 0.1 mol/L NaOH 溶液溶解,并定容至 250 mL 棕色容量瓶中,配制成 10 mmol/L 鲁米诺储备液,在 4 ℃ 下避光保存,放置 7 d 后使用。根据需要,用 0.1 mol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-NaHCO<sub>3</sub> (pH 9.83) 缓冲溶液稀释成所需浓度,即配即用。

### 1.3 ZnO 纳米颗粒(ZnO NPs)的制备

参照文献<sup>[20]</sup>制备 ZnO NPs:称取 3.2927 g Zn(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O(0.03 mol),溶于 100 mL 的甲醇溶液。在室温常压下,超声 10 min,得到澄清透明的溶液。将溶液转移到圆底烧瓶中,在反应温度 60 ℃ 下回流,用磁力搅拌器不断搅拌,反应 24 h,反应结束后冷却到室温。转速为 1 300 r/min 离心分离 10 min。先用甲醇洗涤除去副产物,然后用水洗涤甲醇,得到单相 ZnO NPs。重复实验,制备一定量的 ZnO NPs。电镜分析结果表明,制备的 ZnO NPs 形状为球形,粒径为 36 nm。

### 1.4 化学发光的测定

采用图 1 所示流路研究 luminol-ZnO NPs-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的化学发光。实验条件:luminol 浓度为 0.10 mmol/L; luminol 溶液 pH 为 9.83;ZnO NPs 质量浓度为 0.10 g/L;H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度为 0.10 mmol/L;蠕动泵转速为 20 r/min。



P1,P2—蠕动泵;V—进样阀;F—流通池;W—废液;HV—负高压;  
R—计算机;PMT—光电倍增管

图 1 化学发光流路图

Fig.1 Diagram of flow injection CL system

## 2 结果与讨论

### 2.1 ZnO 纳米颗粒促进化学发光

考察在 luminol- $\text{H}_2\text{O}_2$  体系中添加 ZnO NPs 后的影响,结果如图 2 所示。在没有 ZnO NPs 存在的条件下,luminol- $\text{H}_2\text{O}_2$  有微弱的化学发光。ZnO NPs 是一种半导体材料,在光照条件下,当一个具有超过半导体的隙带能量的光子射入 ZnO NPs,一个电子从价带被激发到导带,其后留下了一个空穴。被激发到导带上的电子容易被溶解在溶液中的氧气捕获,生成超氧阴离子自由基( $\text{O}_2^{\cdot-}$ ), $\text{O}_2^{\cdot-}$  经过一系列过程可快速转变为羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )<sup>[21]</sup>。同时价带的空穴把周围环境中的羟基变成 $\cdot\text{OH}$ 。因此,加入的 ZnO NPs 可催化分解  $\text{H}_2\text{O}_2$  产生一些活性中间产物如 $\cdot\text{OH}$  和  $\text{O}_2^{\cdot-}$ <sup>[22-23]</sup>,而这些自由基与 luminol 反应生成 luminol 自由基。Luminol 自由基和 $\cdot\text{OH}$  反应,从而增强化学发光,其增强倍数大约为 3 倍。ZnO NPs 的加入,增强了 luminol- $\text{H}_2\text{O}_2$  化学发光,放大发光信号,提高灵敏度。

### 2.2 实验条件的选择

#### 2.2.1 不同 ZnO NPs 质量浓度对化学发光的影响

考察 ZnO NPs 质量浓度对化学发光的影响,其结果如图 3 所示。ZnO NPs 质量浓度在 0.025~0.10 g/L 时,化学发光峰面积(A)随 ZnO NPs 质量浓度增加而增加,当质量浓度达到 0.10 g/L 时,峰面积达到最大;当 ZnO NPs 质量浓度大于 0.10 g/L 时,该体系化学发光的峰面积随着 ZnO NPs 质量浓度的增大而减小。可能的原因是 ZnO NPs 质量浓度的增大而发生聚集降低光催化性能,从而影响产生自由基的速率<sup>[24]</sup>。当 ZnO NPs 发生聚集时,质量传递和遮蔽效应可能也会降低自由基的生成,纳米粒子表面活性理论也表明活性表面对纳米颗粒的反应速率起着重要的作用<sup>[25]</sup>。后续研究选择 ZnO NPs 质量浓度为 0.10 g/L。

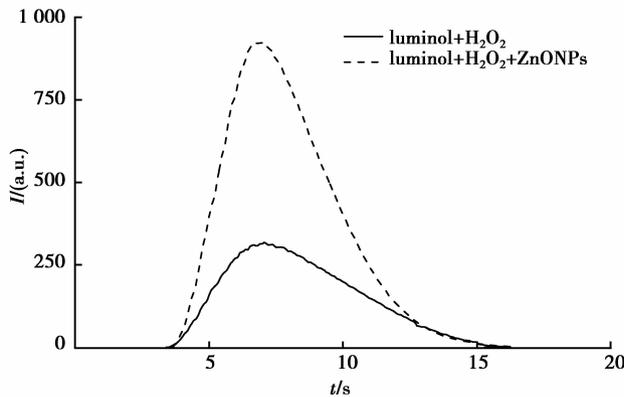


图 2 ZnO NPs 对 luminol- $\text{H}_2\text{O}_2$  化学发光的影响  
Fig.2 Enhancement of luminol- $\text{H}_2\text{O}_2$  CL  
by ZnO NPs

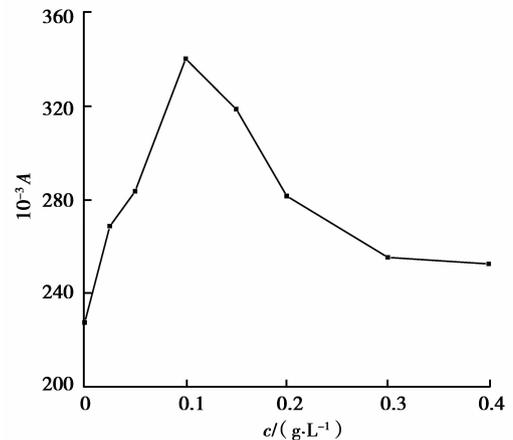


图 3 ZnO NPs 质量浓度对化学发光的影响  
Fig.3 Effect of the mass concentration of  
ZnONPs solution on CL

#### 2.2.2 不同 luminol 浓度对化学发光的影响

Luminol 浓度会影响化学发光,结果如图 4 所示。当 luminol 浓度范围在 0.01~0.10 mmol/L 时,化学发光峰面积随着 luminol 浓度增加而增大,当 luminol 浓度大于 0.10 mmol/L 时,化学发光峰面积增加不明显,趋于平衡。后续研究采用 luminol 的浓度为 0.10 mmol/L。

#### 2.2.3 不同 luminol 溶液 pH 对化学发光的影响

考察 luminol 溶液 pH 对化学发光的影响,结果如图 5 所示。当 luminol 溶液 pH 范围在 9.26~9.83 时,发光峰面积随着 pH 的增加而增加,达到 9.83 时,峰面积达到最大值。当 luminol 溶液 pH 大于 9.83 后,发光峰面积不断下降。luminol 在酸性溶液中反应活性很低,在碱性条件下反应活性高,因此 luminol 溶液 pH 值在 9.26~9.83 范围内对 luminol 的发光具有很大的影响<sup>[26]</sup>。后续研究采用 luminol 溶液 pH 值为 9.83。

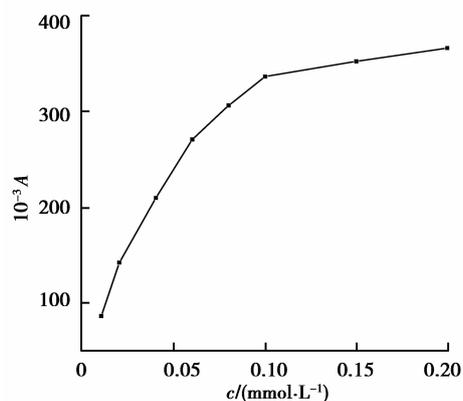


图4 luminol 浓度对化学发光的影响

Fig.4 Effect of the concentration of luminol solution on CL

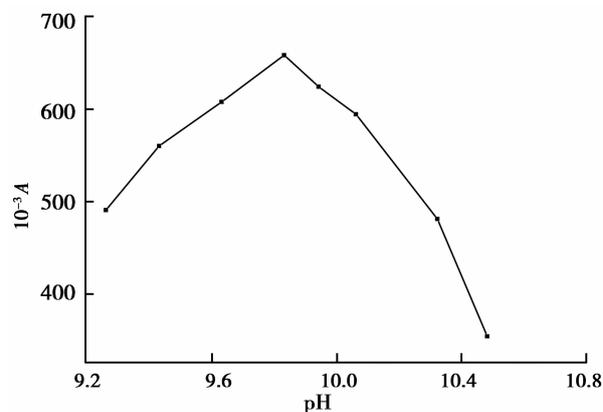


图5 luminol 溶液 pH 对化学发光的影响

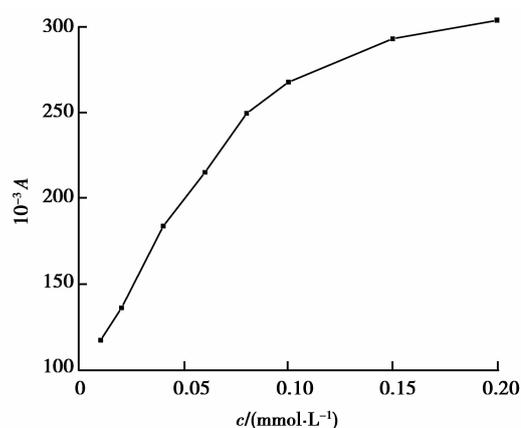
Fig.5 Effect of the pH of luminol solution on CL

#### 2.2.4 不同 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度对化学发光的影响

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度对 luminol-ZnO NPs-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 体系化学发光的影响如图 6 所示。当 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度范围在 0.01~0.10 mmol/L 时,化学发光峰面积随着 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度的增加而增加,当 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度大于 0.10 mmol/L 后,峰面积增加不明显,趋于平衡。后续研究采用的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度为 0.1 mmol/L。

#### 2.3 线性范围、检测限和重现性

根据优化条件:ZnO NPs 质量浓度为 0.10 mg/L; luminol 浓度为 0.10 mmol/L;luminol 溶液 pH 为 9.83,测定雨水中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的浓度。实验得到 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的浓度在 0.06~20 μmol/L 范围内,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度的对数(lgc)和化学发光峰面积的对数(lg A)具有良好的线性关系,线性关系为  $\lg A = 0.7516 \lg c + 8.7192$  ( $r^2 = 0.9959, n = 11$ )。根据 IUPAC(3σ)规定,计算方法的检出限(LOD)为 0.016 μmol/L。平行测定浓度为 0.4 μmol/L 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 标准溶液 11 次,其相对标准偏差为 2.41%。与采用其他方法测定 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的文献相比(如表 1),本实验方法能够获得较低的检测限和较宽的线性范围。

图6 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度对化学发光的影响Fig.6 Effect of the concentration of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution on CL表 1 其他方法测定 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 分析参数比较

分析方法	线性范围/(mol·L <sup>-1</sup> )	检出限/(mol·L <sup>-1</sup> )	引用文献
紫外分析	$5.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-7}$	[6]
电化学分析	$5.0 \times 10^{-7} \sim 2.0 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-7}$	[8]
化学发光	$2.0 \times 10^{-7} \sim 2.0 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-7}$	[27]
高效液相色谱	$8.0 \times 10^{-8} \sim 2.0 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-9}$	[28]
本实验法	$6.0 \times 10^{-8} \sim 2.0 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-8}$	

#### 2.4 干扰实验

为了检查该实验方法的选择性,选择雨水中可能含有的干扰离子,在选定的实验条件下,以浓度为 0.4 μmol/L 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 进行干扰实验,以相对误差 ±5% 作为干扰水平上限。结果如表 2 所示,从表中可以得到除 Fe<sup>3+</sup> 以外,其他离子均无明显的干扰,加入适量的 NaF 可以消除 Fe<sup>3+</sup> 的干扰。

表 2 干扰离子的影响

Table 2 Effect of coexisting ion

干扰物质	可容许浓度比
$\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{NO}_3^-, \text{F}^-$	1 000
$\text{HPO}_4^{2-}, \text{SO}_4^{2-}$	500
$\text{Ca}^{2+}, \text{NH}_4^+$	200
$\text{HSO}_3^-, \text{Mg}^{2+}$	100
$\text{Zn}^{2+}, \text{Ni}^{2+}$	50
$\text{Cu}^{2+}, \text{SO}_3^{2-}$	10
$\text{Mn}^{2+}, \text{Co}^{2+}$	5
$\text{Fe}^{3+}$	1

## 2.5 样品分析

收集得到不同时间的雨水,过滤后,用标准加入法测定雨水中  $\text{H}_2\text{O}_2$  的含量,同时对样品进行回收率测定,回收率在 95% ~ 102%之间,其结果如表 3 所示。

表 3 雨水中  $\text{H}_2\text{O}_2$  的测定结果

Table 3 Results of analysis of hydrogen peroxide in rainwater

取样时间	样品浓度/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	标准加入量/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	测得总量/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	回收率/%
20140621-早上	0.39	0.2	$0.59 \pm 0.0019$	102
		0.4	$0.77 \pm 0.0032$	97
		0.8	$1.17 \pm 0.0026$	98
20140621-中午	0.20	0.1	$0.30 \pm 0.0021$	96
		0.2	$0.40 \pm 0.0053$	96
		0.4	$0.58 \pm 0.0091$	95

## 3 结 论

笔者基于 ZnO NPs 能够增强 luminol- $\text{H}_2\text{O}_2$  化学发光,建立了 luminol-ZnO NPs- $\text{H}_2\text{O}_2$  流动注射化学发光体系。应用此方法测定雨水中微量  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,得到了比较满意的结果。 $\text{H}_2\text{O}_2$  浓度在 0.06~20  $\mu\text{mol/L}$  范围内, $\text{H}_2\text{O}_2$  的  $\lg c$  和  $\lg A$  具有良好的线性关系,LOD 为 0.016  $\mu\text{mol/L}$ ( $3\sigma$ ),回收率为 95%~102%,RSD ( $n=11$ )为 2.41%。与其他方法相比,此方法具有简便、快速、灵敏、线性范围宽、重现性好等特点。

### 参考文献:

- [1] Wang C L, Mulchandani A. Ferrocene-conjugated polyaniline-modified enzyme electrodes for determination of peroxides in organic media[J]. Analytical Chemistry, 1995, 67(6): 1109-1114.
- [2] Sakugawa H, Kaplan I R, Tsai W T, et al. Atmospheric hydrogen-peroxide[J]. Environmental Science & Technology, 1990, 24(10): 1452-1462.
- [3] Klassen N V, Marchington D, McGowan H C E.  $\text{H}_2\text{O}_2$  Determination by the I<sub>3</sub><sup>-</sup> Method and by  $\text{KMnO}_4$  Titration[J]. Analytical Chemistry, 1994, 66(18): 2921-2925.
- [4] Li J, Dasgupta P K, Tarver G A. Pulsed excitation source multiplexed fluorometry for the simultaneous measurement of multiple analytes. Continuous measurement of atmospheric hydrogen peroxide and methyl hydroperoxide.[J]. Analytical Chemistry, 2003, 75(5): 1203-1210.
- [5] Xu C, Zhang Z. Fluorescence determination of hydrogen peroxide using hemoglobin as a mimetic enzyme of peroxidase[J]. Analytical Sciences, 2001, 17(12): 1449-1451.
- [6] Luo W, Abbas M E, Zhu L, et al. Rapid quantitative determination of hydrogen peroxide by oxidation decolorization of methyl orange using a Fenton reaction system[J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 629(1-2): 1-5.

- [7] Chang Q, Deng K J, Zhu L H, et al. Determination of hydrogen peroxide with the aid of peroxidase-like Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoparticles as the catalyst[J]. *Microchimica Acta*, 2009, 165(3/4): 299-305.
- [8] Upadhyay A K, Ting T W, Chen S M. Amperometric biosensor for hydrogen peroxide based on coimmobilized horseradish peroxidase and methylene green in ormosils matrix with multiwalled carbon nanotubes[J]. *Talanta*, 2009, 79(1): 38-45.
- [9] Qin W. Flow injection chemiluminescence-based chemical sensors[J]. *Analytical Letters*, 2002, 35(14): 2207-2220.
- [10] Su Y Y, Chen H, Wang Z M, et al. Recent advances in chemiluminescence[J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2007, 42(2): 139-176.
- [11] Zhang L J, Chen Y C, Zhang Z M, et al. Highly selective sensing of hydrogen peroxide based on cobalt-ethylenediaminetetraacetate complex intercalated layered double hydroxide-enhanced luminol chemiluminescence [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 193: 752-758.
- [12] Su Y Y, Xie Y, Hou X D, et al. Recent advances in analytical applications of nanomaterials in liquid-phase chemiluminescence[J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2014, 49(3): 201-232.
- [13] Giokas D L, Vlessidis A G, Tsogas G Z, et al. Nanoparticle-assisted chemiluminescence and its applications in analytical chemistry[J]. *Trac Trends in Analytical Chemistry*, 2010, 29(10): 1113-1126.
- [14] Stroyuk A L, Granchak V M, Korzhak A V, et al. Photoinitiation of butylmethacrylate polymerization by colloidal semiconductor nanoparticles[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2004, 162(2/3): 339-351.
- [15] Sydorov D, Smertenko P, Piryatinski Y, et al. Electrochemically assembled planar hybrid poly(3-methylthiophene)/ZnO nanostructured composites[J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 81: 83-89.
- [16] Moezzi A, McDonagh A M, Cortie M B. Zinc oxide particles: Synthesis, properties and applications [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 185/186: 1-22.
- [17] Karimi M, Saydi J, Mahmoodi M, et al. A comparative study on ethanol gas sensing properties of ZnO and ZnO.94Cd0.06O nanoparticles[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2013, 74(10): 1392-1398.
- [18] Guérin V M, Rathousky J, Pauporté T. Electrochemical design of ZnO hierarchical structures for dye-sensitized solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 102: 8-14.
- [19] Li S F, Zhang X M, Du W X, et al. Chemiluminescence Reactions of a Luminol System Catalyzed by ZnO Nanoparticles[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(3): 1046-1051.
- [20] Hosono E, Fujihara S, Kimura T, et al. Non-basic solution routes to prepare ZnO nanoparticles[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2004, 29(2): 71-79.
- [21] Lawrence G D, Mavi A, Meral K. Promotion by phosphate of Fe(III)-and Cu(II)-catalyzed autoxidation of fructose[J]. *Carbohydrate Research*, 2008, 343(4): 626-635.
- [22] Biparva P, Abedirad S M, Kazemi S Y. ZnO nanoparticles as an oxidase mimic-mediated flow-injection chemiluminescence system for sensitive determination of carvedilol[J]. *Talanta*, 2014, 130: 116-121.
- [23] Li S F, Zhang X M, Du W X, et al. Chemiluminescence Reactions of a Luminol System Catalyzed by ZnO Nanoparticles[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(3): 1046-1051.
- [24] Buxton G V, Greenstock C L, Helman W P, et al. Critical-review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen-atoms and hydroxyl radicals ( $\cdot\text{OH}/\cdot\text{OH}$ ) in aqueous-solution[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1988, 17(2): 513-886.
- [25] Hotze E M, Bottero J Y, Wiesner M R. Theoretical Framework for Nanoparticle Reactivity as a Function of Aggregation State[J]. *Langmuir: the Acs Journal of Surfaces & Colloids*, 2010, 26(13): 11170-11175.
- [26] Xu H, Su K H, Che W R, et al. Theoretical study on the chemiluminescence mechanisms of luminol-DMSO-NaOH system[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2006, 64(19): 1981-1987.
- [27] Hanaoka S, Lin J M, Yamada M. Chemiluminescent flow sensor for H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> based on the decomposition of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> catalyzed by cobalt(II)-ethanolamine complex immobilized on resin[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2001, 426(1): 57-64.
- [28] 徐金荣, 陈忠明. 高效液相色谱-荧光检测法测定环境样品中的过氧化物[J]. *色谱*, 2005, 23(4): 366-369.  
XU Jinrong, CHEN Zhongming. Determination of peroxides in environmental samples by high performance liquid chromatography with fluorescence detection[J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2005, 23(4): 366-369. (in Chinese)