

基于喹啉类 Zn^{2+} 荧光探针的构建及应用研究

张艳阁^{1,2,3}, 李鹏宣², 赵付荣^{1,3}, 刘伟生^{2*}

(1.福建省海洋生物多样性保护与永续利用重点实验室, 闽江学院地理与海洋学院, 福建 福州 350108;

2.兰州大学化学化工学院, 甘肃 兰州 730070; 3.福州海洋研究院, 福建 福州 350108)

摘要:合成了一种新型氨基喹啉类分子(HL), 并采用质谱、核磁共振、元素分析和红外光谱等手段对其结构进行了系统表征。在此基础上, 进一步研究了 HL 的荧光性质。实验结果表明, 在乙腈-HEPES 缓冲体系中, HL 对 Zn^{2+} 呈现出典型的“关-开”型荧光增强响应, 且具备高灵敏度(检出限为 3.13×10^{-7} mol/L)与良好的选择性。紫外滴定、荧光滴定及 Job 曲线分析, 确定 HL 与 Zn^{2+} 之间的配位化学计量比为 1:1。HL 成功应用于活细胞中 Zn^{2+} 的荧光成像实验, 显示出在生物检测领域的潜在应用价值。

关键词: Zn^{2+} 荧光探针; 关-开; 喹啉类; 细胞成像; 高选择性

中图分类号: O657.31; X832

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)03-0248-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.03.040

Construction and application research of a novel quinoline-based fluorescent probe for Zn^{2+}

ZHANG Yan-ge^{1,2,3}, LI Peng-xuan², ZHAO Fu-rong^{1,3}, LIU Wei-sheng^{2*}

(1.Key Laboratory of Marine Biodiversity Conservation and Sustainable Utilization, College of Geography and Oceanography, Minjiang University, Fuzhou 350108, China; 2.College of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730070, China; 3.Fuzhou Institute of Oceanography, Fuzhou 350108, China)

Abstract: A novel aminoquinoline-based fluorescent sensor was synthesized and systematically characterized by mass spectrometry (MS), nuclear magnetic resonance (NMR), elemental analysis, and infrared (IR) spectroscopy. Its fluorescence properties were subsequently investigated. Experimental results revealed that the sensor exhibits high sensitivity toward Zn^{2+} with a detection limit of 3.13×10^{-7} M and excellent selectivity in an acetonitrile-HEPES buffer system. The binding stoichiometry between the sensor and Zn^{2+} was determined to be 1:1 based on UV-Vis titration, fluorescence titration, and Job's plot analysis. Furthermore, the sensor was successfully applied for fluorescence imaging of Zn^{2+} in living cells, demonstrating its promising potential in bioimaging applications.

Key words: Zn^{2+} fluorescent sensor; off-on; aminoquinoline-based; cellular imaging; high selectivity

锌是人体中含量仅次于铁的必需金属元素, 在许多生命活动中发挥着关键作用, 如 DNA 合成、金属酶功能调控、细胞凋亡及信号传导等^[1-4]。研究表明, 锌离子缺乏可能导致生殖功能障碍、免疫功能障碍、生长迟缓、厌食、糖尿病等临床疾病; 然而, 体内锌过量同样会引起不良后果, 包括腹泻、中毒等症状, 甚至与冠心病的发生相关^[1,5-6]。因此, 近年来开发高效、灵敏的 Zn^{2+} 检测方法备受研究者关注。

荧光探针因操作简单、灵敏度高及可实现即时检测等优点而越来越受到人们的欢迎^[7-9]。近些年来, 也发展起来很多检测不同离子及小分子的荧光探针^[1,10-15]。由于 Zn^{2+} 的 d 轨道为全充满状态, 不

具备过渡金属的 d-d 跃迁, 故直接测试其光谱是无法实现的。另外, 锌与镉在元素周期表中属于同一族, 其物理化学性质类似, 与荧光探针作用后, 光谱变化也可能较类似。因此, 开发具有高选择性和高灵敏度的 Zn^{2+} 探针也存在一些挑战。

检测 Zn^{2+} 的荧光探针也取得重要进展, 如基于罗丹明、香豆素、席夫碱、喹啉等荧光探针^[1]。但是, 为了满足不同需要, 仍需要设计合成步骤简单, 并且具有较好选择性、灵敏度的荧光探针。喹啉及其衍生物特别是 8-羟基喹啉和 8-氨基喹啉作为具有潜在配位能力的荧光团已被广泛应用于 Zn^{2+} 及其他多种金属离子的荧光探针设计中^[3-4,12-13]。基于

收稿日期: 2025-10-22; 修回日期: 2026-01-05

基金项目: 福州海洋研究院科技计划项目(2025F24); 闽江学院引进人才启动经费(MJY23029, MJY22021)

作者简介: 张艳阁(1988-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为环境化学、配位化学和功能材料, zhangyg18@mju.edu.cn; 刘伟生(1958-), 男, 博士, 教授, 研究方向为稀土配位化学、功能材料化学, 通讯联系人, liuws@lzu.edu.cn。

氨基喹啉较好的荧光性质及配位特性,设计、合成了一个以水杨酸为连接体两边分别连接氨基喹啉和苄胺的小分子,该分子对 Zn²⁺ 具有高选择性和高灵敏度。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

8-氨基喹啉、苄胺、水杨酸甲酯、氯乙酰氯、无水碳酸钾、三乙胺、乙醇、乙腈、无水级乙腈、DMF 等均为分析纯,使用前未做特殊处理。所用金属盐为硝酸盐或者氯化物。Bruker DRX 400 MHz 核磁共振仪,FLS920 稳态/瞬态荧光光谱仪(英国 Edinburgh Instrument 公司),Varian Cary 100 分光光度计,Elementar Vario EL 型元素分析仪;Nicolet Nexus 170 FT-IR 红外光谱仪,Hitachi F-7000 荧光光谱仪,徕卡 Stellaris5 激光共聚焦显微镜。

1.2 探针分子的合成与表征

化合物 A 和化合物 B 分别参照文献[4]合成(图1)。探针分子(HL)的合成步骤如下:向圆底烧瓶中加入 5 mmol 化合物 A 和 5 mmol 化合物 B,并加入适量无水级乙腈,使其溶解,后加入 6.5 mmol K₂CO₃ 和催化量的 KI,在回流状态下加热 24 h。待反应物冷却后,滤去不溶物,将其旋干。将所得粗产物进行柱层析分离纯化,得到白色固体,产率为 60%,熔点:148.6~150.1℃;元素分析:C₂₅H₂₁N₃O₃ 实际测量值为:C,71.65;H,4.958;N,10.36;理论值为:C,72.98;H,5.14;N,10.21;FT-IR(KBr,ν,cm⁻¹):3433(br),3317(m),1683(s),1640(s),1599(m),1539(vs),1488(m),1425(m),1325(m),1298(w),1249(m),1158(w),757(m);¹HNMR(400 Hz,CD₃CN,ppm),δ:10.44(Q-NHCO,s,1H),8.57(-NHCO,s,1H),8.76(dd,1H),8.68(dd,1H),8.28(dd,1H),7.98(dd,1H),7.65~7.45(m,4H),7.30(m,2H),7.20~7.10(m,5H),4.97(-COCH₂,s,2H),4.61(-CONH-CH₂,d,2H)。¹³CNMR(100 Hz,CDCl₃,ppm),δ:166.01,164.77,155.06,148.65,139.19,136.10,133.39,132.17,

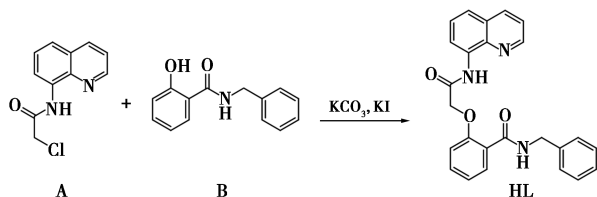


图1 配体 HL 的合成路线

131.04, 127.89, 127.72, 126.92, 126.91, 126.89, 126.88, 126.65, 126.35, 121.99, 121.81, 121.76, 116.97, 115, 82, 112.99, 67.98, 42.87。ESI-MS: m/z 412.3[(M+1)⁺]。

1.3 荧光与紫外性质测定

用于测试的各种金属硝酸盐溶液均为无水乙醇配制为 0.01 mol/L 的储备液,测试时,直接稀释至测试所用溶剂中;紫外数据在纯乙腈中测定,除特殊说明外所有荧光数据均在 CH₃CN-H₂O(1:1, v/v) 的 HEPES 缓冲溶液(50 mmol, 30 mmol/L NaCl, pH = 7.40) 测得。

1.4 细胞成像

Hela 细胞来自于温州医科大学。Hela 细胞在含有 10% 灭活的胎牛血清和 1% 青霉素/链霉素的 DMEM 培养基中培养,培养温度为 37℃,空气含有 5% CO₂。测试时,在细胞中加入 HL(5×10⁻⁵ mol/L),孵育 15 min,并用 PBS 冲洗 3 次,除去游离染料,然后向细胞中加入 Zn²⁺(5×10⁻⁵ mol/L),继续孵育 15 min。细胞成像通过徕卡 Stellaris5 激光共聚焦显微镜采集,并使用徕卡共聚焦软件进行分析。

2 结果与讨论

2.1 配体及配合物的紫外-可见吸收光谱

在乙腈溶剂中,对 HL 及其配合物的紫外吸收光谱进行测定。如图 2 所示,HL 在 295 nm 及 316 nm 处有 2 个较强的吸收峰。当往配体的乙腈溶液中(1.00×10⁻⁴ mol/L)滴加 Zn²⁺ 时,其 295 nm 及 316 nm 处的吸收峰有所降低,而在 363 nm 处出现了 1 个新的吸收峰,表明配合物的形成;随着 Zn²⁺ 浓度的增加,363 nm 处的吸收峰逐步上升,而 295 nm 及 316 nm 处的峰却逐渐下降,同时在 336 nm 处出现一个等吸收点。当 Zn²⁺ 浓度达到 1.00×10⁻⁴ mol/L 时,其 295、316、363 nm 处的吸收峰均无明显变化。从滴定谱图中右上角的图也可以看出当 [Zn²⁺]/

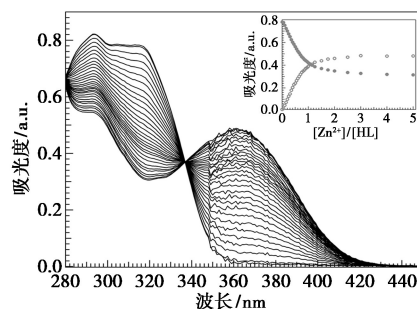


图2 紫外滴定光谱

[L]=1 时其吸收峰强度值达到一个平台。紫外滴定结果表明配体与金属离子配位比 ([HL]/[Zn²⁺]) 为 1:1。取其 363 nm 处的吸收值按文献 [15] 进行非线性拟合, 得出 HL 与 Zn²⁺ 的结合常数为 2.25×10⁵ M⁻¹。

2.2 荧光性质研究

对 HL 及在 Zn²⁺ 存在下的荧光量子产率进行测定。HL 的荧光量子产率为 4.17%, 当加入 Zn²⁺ 后, 荧光量子产率增加至 30.12%。

2.2.1 荧光测试条件选择

前面在纯有机溶剂中对 HL 的光谱性质进行初步探索, 但是对于传感器分子来说, 只在有机体系中具有特异性识别作用是远远不够的。要想其有应用价值, 就必须在有水环境中仍能达到对目标分子检测的目的。基于以上考虑, 对 HL 测试条件进行了详细的筛选, 最后权衡荧光强度与混合溶剂中水含量这 2 方面的因素, 确定在 CH₃CN-H₂O (1:1, v/v) 中, 具体研究其荧光性质。

荧光传感器的荧光强度易受到溶液中质子的影响。为研究传感器分子的 pH 适应范围, 测试了在 CH₃CN-H₂O (体积比 1:1) 混合溶剂中配体及 Zn²⁺ 配合物的荧光响应随 pH 的变化 (图 3)。在强酸性条件下 HL 及与 Zn²⁺ 形成配合物后的荧光都较弱且不随 pH 的改变而变化; 但在 pH 4~6 的范围内配合物的荧光强度逐渐上升, 在酸性较强的条件下, HL 酸效应较大, 影响 HL 与 Zn²⁺ 的配位。在近中性附近 pH 为 6~9 稍有波动但仍能保持较高的强度值; 当 pH>9 时荧光强度又大幅下降, 因为碱性较强, Zn²⁺ 与 OH⁻ 结合, 影响配合物的形成。因此, 从上述的变化趋势来看, 所设计的传感器分子在 pH 6~9 之间对 Zn²⁺ 有较好的荧光响应, 与生物体系中的微环境相吻合。

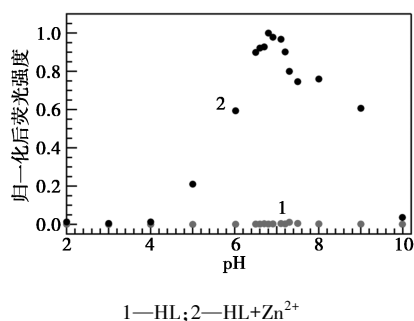


图 3 HL 在无 Zn²⁺ 及有 Zn²⁺ 存在下的归一化后的荧光强度变化

2.2.2 荧光选择性

如表 1 所示, 配体 HL 对 Zn²⁺ 都有很好的选择

性。当向配体 HL 溶液 (浓度为 10⁻⁴ mol/L) 中加入 2 倍于 HL 浓度的其他金属离子时, 荧光强度无明显增强, 仅加入 Zn²⁺ 时在 498 nm 处会出现一个很强的荧光发射峰, 增加强度约为 20 倍。因此, 配体对 Zn²⁺ 都有很高的选择性。

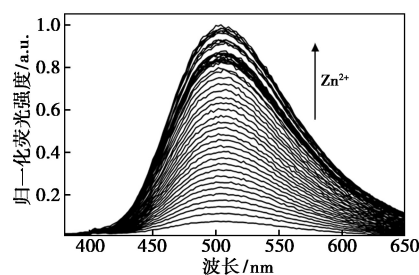
表 1 探针分子的离子选择性

名称	Mn ²⁺	Cu ²⁺	Cr ³⁺	Al ³⁺	Fe ³⁺	Hg ²⁺
相对荧光强度(I/I ₀)	0.31	0.24	0.37	0.44	0.45	0.62
名称	Ni ²⁺	Cd ²⁺	Co ²⁺	Li ⁺	Na ²⁺	Pb ²⁺
相对荧光强度(I/I ₀)	0.52	0.77	0.72	0.62	0.67	0.56
名称	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Zn ²⁺		
相对荧光强度(I/I ₀)	0.80	0.52	0.59	19.81		

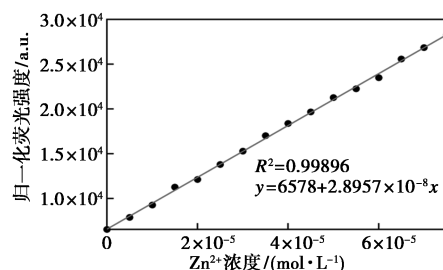
注: I₀ 为探针 HL 的荧光强度; I 为在 HL 中加入金属离子后的荧光强度。

2.2.3 荧光滴定

在 HEPES 缓冲溶液 (50 mmol/L, 30 mmol/L NaCl, pH=7.40, CH₃CN-H₂O, 1:1, v/v) 测试了配体 HL 对 Zn²⁺ 的荧光滴定实验。如图 4(a) 所示, 在含有 1.00×10⁻⁴ mol/L HL 的测试液中加入 Zn²⁺ 后, 498 nm 处的发射峰逐步增强。同时, 对荧光滴定数据进行了线性拟合 [图 4(b)], 通过线性拟合得出的斜率计算出配体对 Zn²⁺ 的检测限 (LOD, 3σ/k) 为 3.13×10⁻⁷ mol/L (R²=0.998 89)。



(a) 滴定曲线



(b) 荧光强度与 Zn²⁺ 浓度线性拟合

图 4 荧光滴定及荧光强度与 Zn²⁺ 浓度线性拟合

2.2.4 竞争性实验

评价一个传感器性能优异的关键标准之一, 不仅在于对目标金属离子的高选择性, 更在于在多种

干扰离子共存的复杂环境中,依然能保持高效与精准的特异性识别能力。进一步探究了 HL 在有其他共存离子时,对 Zn²⁺ 荧光响应情况。先向 HL 溶液(浓度为 1.00×10^{-4} mol/L)中加入 2.00×10^{-4} mol/L 干扰离子,再向混合体系中加入 2.00×10^{-4} mol/L Zn²⁺ 的加样方法来探究其荧光响应情况。由表 2 可以看出,虽然 Cu²⁺、Cr³⁺、Mn²⁺ 和 Hg²⁺ 对体系的荧光有一定的淬灭作用,但总的荧光信号较强,其他金属离子则几乎没有干扰。可见 HL 在有干扰离子存在的条件下仍对 Zn²⁺ 有很好的选择性。

表 2 探针离子的共存离子干扰性

名称	空白	Mn ²⁺	Cu ²⁺	Cr ³⁺	Al ³⁺	Fe ³⁺
HL+X(I/I ₀)	1.00	0.31	0.24	0.37	0.44	0.45
HL+X+Zn ²⁺ (I/I ₀)	19.81	18.82	7.31	17.99	22.96	29.38
名称	Hg ²⁺	Ni ²⁺	Cd ²⁺	Co ²⁺	Li ⁺	Na ²⁺
HL+X	0.62	0.52	0.77	0.72	0.62	0.67
HL+X+Zn ²⁺ (I/I ₀)	18.10	27.77	29.04	27.17	28.74	27.57
名称	Pb ²⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Zn ²⁺	
HL+X	0.56	0.80	0.52	0.59	19.81	
HL+X+Zn ²⁺ (I/I ₀)	26.44	27.95	25.82	28.65	31.89	

注: I₀ 为探针 HL 的荧光强度; I 为在 HL+其他离子或者 HL+其他离子+Zn²⁺ 的荧光强度。

2.3 配体与 Zn²⁺ 的结合性质

紫外滴定及荧光滴定实验结果均表明,配体与 Zn²⁺ 是按 1:1 的摩尔比进行结合的。为进一步验证这个实验结果还对其 Job 曲线进行了测定。如图 5 所示,Job 曲线图中的 2 条直线的交点都在 0.5 附近,说明配体与 Zn²⁺ 是以 1:1 的配位比形成配合物的,与之前的实验结果相吻合。

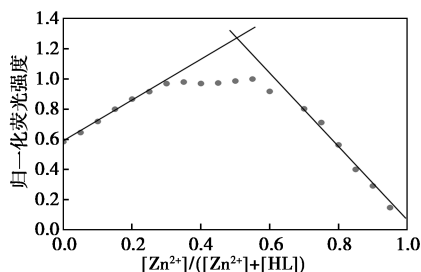


图 5 Job 曲线(Zn²⁺ 与 HL 浓度总和为 2.0×10^{-4} mol/L)

2.4 应用研究

同时,为拓展 HL 的应用,将该探针 HL 应用于细胞内 Zn²⁺ 的检测。如图 6 所示,在细胞中加入 5.0×10^{-5} mol/L 的 HL, 孵育 15 min, 在激光共聚焦

绿色通道下,几乎没有荧光,当向其中加入 5.0×10^{-5} mol/L Zn(NO₃)₂ 后,接着孵育 15 min, 细胞内出现明显的绿色荧光,同时,细胞形态保持完好。这说明,该探针可以应用于细胞内 Zn²⁺ 的荧光成像。

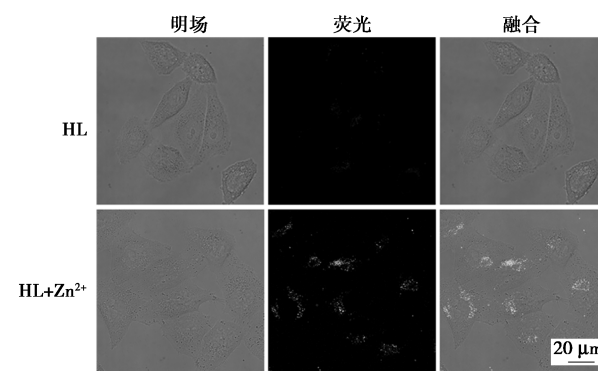


图 6 HL(5.0×10^{-5} mol/L) 及 HL 在 Zn(NO₃)₂ (5.0×10^{-5} mol/L) 在 HeLa 细胞中的荧光照片

3 结论

本研究合成了一个基于氨基喹啉类的小分子,通过质谱、核磁共振波谱、元素分析及红外光谱对其进行表征,并探究了其荧光性质。该分子在乙腈-HEPES 缓冲溶液(50 mmol/L, 30 mmol/L NaCl, pH=7.40, CH₃CN-H₂O=1:1, v/v)中对 Zn²⁺ 有很高灵敏度(检出限为 3.13×10^{-7} mol/L)和良好的选择性。通过紫外滴定、荧光滴定及 Job 曲线等方法确定配体与 Zn²⁺ 的配位比为 1:1。此外,该传感器成功应用于活细胞中 Zn²⁺ 的荧光成像实验,显示出良好的生物成像潜力。

注:感谢温州医科大学茹嘉喜副研究员在细胞荧光成像方面提供的帮助。

参考文献

- [1] Yu J, Yu H, Wang S, et al. Progress in research of zinc ion fluorescent probes for biological imaging [J]. Journal of Luminescence, 2024, 266: 120318.
- [2] Skrajnowski D, Bobrowska-Korczak B. Role of zinc in immune system and anti-cancer defense mechanisms [J]. Nutrients, 2019, 11(10): 2273.
- [3] Zhou X, Yu B, Guo Y, et al. Both visual and fluorescent sensor for Zn²⁺ based on quinoline platform [J]. Inorganic Chemistry, 2010, 49(9): 4002.
- [4] Li P, Zhou X, Huang R, et al. A highly fluorescent chemosensor for Zn²⁺ and the recognition research on distinguishing Zn²⁺ from Cd²⁺ [J]. Dalton Transactions, 2014, 43(2): 706.

(下转第 256 页)

- photofragmentation laser-induced fluorescence instrument for the detection of nitrous acid and hydroxyl radicals in the atmosphere [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(9): 6039–6056.
- [10] 聂劲松, 张为俊, 杨颀, 等. 激光诱导荧光法测量 OH 自由基中激光产生的 OH 自由基转动能级布居及其对测量的影响 [J]. *原子与分子物理学报*, 2001, (2): 123–126.
- [11] Blocquet M, Schoemaeker C, Amedro D, *et al.* Quantification of OH and HO₂ radicals during the low-temperature oxidation of hydrocarbons by fluorescence assay by gas expansion technique [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(50): 20014–20017.
- [12] Zhu G L, Hu R Z, Xie P H, *et al.* Calibration system for OH radicals based on differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(8): 080703.
- [13] Muller J B A, Elste T, Plass-Dulmer C, *et al.* A novel semi-direct method to measure OH reactivity by chemical ionization mass spectrometry (CIMS) [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(7): 4413–4433.
- [14] Czapki G, Bielski B H J. Absorption spectra of the OH and O-radicals in aqueous solutions [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 1993, 41(3): 503–505.
- [15] Bai X, Lu M, Yang D. HKOH-1: A highly sensitive and selective fluorescent probe for detecting endogenous hydroxyl radical in living cells [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2016, 100: S36.
- [16] Niu H, Chen K, Xu J, *et al.* Mitochondria-targeted fluorescent probes for oxidative stress imaging [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 299: 126938.
- [17] Xia Y, Zhang R, Wang Z, *et al.* Recent advances in high-performance fluorescent and bioluminescent RNA imaging probes [J]. *Chemical Society Reviews*, 2017, 46(10): 2824–2843.
- [18] Zhang S S, Kim H, Zhou Y, *et al.* Recent developments of small-molecule fluorescent probes for the detection of hydroxyl radical in biological systems [J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2025, 185: 118165.
- [19] Yan J, Wen Y, Gao Y, *et al.* Effect of atmospheric pressure plasma jet treatment on the performance of needleless electrostatic spinning with low concentration of PCL solution [J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2024, 116(2): 328–337.
- [20] Huang Z M, Zhang Y Z, Kotaki M, *et al.* A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites [J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(15): 2223–2253.
- [21] Wang X, Sun F, Yin G, *et al.* Tactile-sensing based on flexible PVDF nanofibers via electrospinning: A review [J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 330.
- [22] Mitroo D, Sun Y, Combet D P, *et al.* Assessing the degree of plug flow in oxidation flow reactors (OFRs): A study on a potential aerosol mass (PAM) reactor [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(3): 1741–1756.
- [23] Liu Q, Huang D D, Lambe A T, *et al.* A Comprehensive characterization of empirical parameterizations for OH exposure in the aerodynamic potential aerosol mass oxidation flow reactor (PAM-OFR) [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2025, 18: 2509–2521.
- [24] 朱晓艳. 数显式大气采样器检定方法的研究与探讨 [J]. *中国标准化*, 2024, (6): 159–162.
- [25] 罗维祺, 侯晓华. 电子流量计大气采样器校准方法研究 [J]. *中国计量*, 2023, (10): 85–90. ■

(上接第 251 页)

- [5] Shuttleworth C W, Weiss J H. Zinc: new clues to diverse roles in brain ischemia [J]. *Trends Pharmacol Sci*, 2011, 32: 480.
- [6] Chasapis C T, Ntoupa P S A, Spiliopoulou C A, *et al.* Recent aspects of the effects of zinc on human health [J]. *Arch Toxicol*, 2020, 94: 1443.
- [7] Wang L, Zhu X, Li J, *et al.* A novel one-stepped synthesized Schiff-base fluorescence probe for specific recognition of zinc ions with highly sensitive and its application in living cells [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2024, 322(5): 124847.
- [8] Chen C, Dou Y, Liu W, *et al.* Two-photon fluorescence probe for palladium with perchlorate induced quenching mechanism and its application in smartphone-based rapid detection [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 463: 132859.
- [9] Han Q, Liu X, Wang X, *et al.* Rational design of a lysosomal-targeted ratiometric two-photon fluorescent probe for imaging hydrogen polysulfides in live cells [J]. *Dyes and Pigments*, 2020, 173: 107877.
- [10] Irshad H, Khan K, Qvortrup K. Advances in fluorescent sensors for trace detection of metal contaminants and agrochemical residues in soil: A comprehensive review [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2025, 191: 118365.
- [11] Huang Y, Cao X, Deng Y, *et al.* An overview on recent advances of reversible fluorescent probes and their biological applications [J]. *Talanta*, 2024, 268: 125275.
- [12] Shi Z, Han Q, Yang L, *et al.* A highly selective two-photon fluorescent probe for detection of cadmium (II) based on intramolecular electron transfer and its imaging in living cells [J]. *Chemistry A European Journal*, 2015, 21(1): 290.
- [13] Ma Y, Wang F, Kambam S, *et al.* A quinoline-based fluorescent chemosensor for distinguishing Cadmium from zinc ions using cysteine as an auxiliary reagent [J]. *Sensors and Actuators B*, 2013, 188: 1116.
- [14] 张艳阁, 张红月, 赵付荣, 等. 基于香豆素苯并咪唑类的双光子荧光探针及其对 Cu²⁺ 的选择性识别 [J]. *化学进展*, 2025, 44(9): 1365.
- [15] Xu Z, Baek K H, Kim H N, *et al.* Zn²⁺-triggered amide tautomerization produces a highly Zn²⁺-selective, cell-permeable, and ratiometric fluorescent sensor [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132: 601–610. ■