

一种近红外Cd²⁺荧光探针 在电子烟雾化物中的应用

张丽娜¹, 金 晨², 陈阿龙¹, 闫清源¹, 洪深求¹, 朱海亮^{2*}

¹中国烟草总公司安徽省公司, 安徽 合肥

²南京大学生命科学学院, 江苏 南京

收稿日期: 2025年7月6日; 录用日期: 2025年7月26日; 发布日期: 2025年8月8日

摘 要

镉离子(Cd²⁺)作为与肾功能损伤和骨骼疾病相关的致癌性重金属, 通过电子烟加热线圈降解和调味烟液杂质逐渐污染电子烟气溶胶。现有检测方法(如电感耦合等离子体质谱法ICP-MS和原子吸收光谱法AAS)因缺乏现场分析便携性且在复杂气溶胶基质中分辨率不足而受限。为此, 我们开发了一种新型开启式荧光探针(CdP), 专为复杂气溶胶基质中镉离子的高灵敏度检测设计, 并验证了其在电子烟气溶胶分析中的应用。该探针通过四步法合成: 2-羟基-1,4-萘醌与2-羟基-4-硝基苯胺缩合(产率74.6%)、锌还原(产率87.7%)、甲酰化(产率79.3%)和最终脘取代(产率86.6%), 巧妙利用苯吩恶嗪的结构刚性, 通过配位作用实现镉离子的选择性识别。结合Cd²⁺后, 探针因抑制脘吡啶基团的光诱导电子转移(PET)效应, 在吸收光谱中呈现57 nm红移(463 → 520 nm), 并在610 nm处荧光强度增强225倍。定量分析显示荧光强度与0.1~0.6当量Cd²⁺浓度呈现线性关系(R² = 0.9974), 检测限在超纯水中为1.54 nM, 在电子烟气溶胶提取物中为2.11 nM。该探针对18种共存离子(如10倍浓度Zn²⁺、Cu²⁺)干扰极小, 并通过标准加入法验证在气溶胶基质中回收率 > 97.8%。相较于需仪器的传统探针, CdP通过比色变化(黄色→红色)实现裸眼检测, 同时克服现有方法在低浓度气溶胶分析中的局限, 为环境和消费品中镉离子的现场监测提供了实用工具。

关键词

荧光探针, 电子烟气雾剂, 镉离子检测, 光致电子转移

Application of a Near-Infrared Cd²⁺ Fluorescent Probe in Electronic Cigarette Aerosols

Lina Zhang¹, Chen Jin², Along Chen¹, Qingyuan Yan¹, Shenqiu Hong¹, Hailiang Zhu^{2*}

¹Anhui Branch of China Tobacco Corporation, Hefei Anhui

*通讯作者。

文章引用: 张丽娜, 金晨, 陈阿龙, 闫清源, 洪深求, 朱海亮. 一种近红外 Cd²⁺荧光探针在电子烟雾化物中的应用[J]. 分析化学进展, 2025, 15(3): 313-319. DOI: 10.12677/aac.2025.153030

Abstract

Cadmium ions (Cd^{2+}), a carcinogenic heavy metal linked to renal dysfunction and bone disorders, increasingly contaminate e-cigarette aerosols through coil degradation and flavored e-liquid impurities. Current detection methods—such as ICP-MS and AAS—lack portability for on-site analysis and exhibit poor resolution in complex aerosol matrices. To bridge this gap, we developed a novel turn-on fluorescent probe (CdP) specifically engineered for high-sensitivity cadmium ion detection in complex aerosol matrices, with demonstrated applicability in electronic cigarette emission analysis. Synthesized via a four-step protocol involving condensation of 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone with 2-hydroxy-4-nitroaniline (74.6% yield), zinc reduction (87.7% yield), formylation (79.3% yield), and final hydrazine substitution (86.6% yield), the probe leverages the structural rigidity of benzophenoxazine to achieve selective Cd^{2+} recognition through coordination interactions. Binding with Cd^{2+} induces a 57 nm bathochromic shift in absorption spectra (463 $\rightarrow$ 520 nm) and 225-fold fluorescence enhancement at 610 nm by suppressing photoinduced electron transfer (PET) from the hydrazinylpyridine moiety. Quantitative analysis demonstrated linearity ($R^2 = 0.9974$) between fluorescence intensity and Cd^{2+} concentration over 0.1~0.6 equivalents, with detection limits of 1.54 nM in ultrapure water and 2.11 nM in e-cigarette aerosol extracts. The probe exhibited minimal interference from 18 coexisting ions (e.g., 10-fold Zn^{2+} , Cu^{2+}) and maintained >97.8% recovery rates in aerosol matrices validated via standard addition methods. Unlike conventional probes requiring instrumentation, CdP enables naked-eye detection via colorimetric transition (yellow $\rightarrow$ red) while addressing limitations of existing methods in low-concentration aerosol analysis. This work provides a practical solution for on-site cadmium monitoring in both environmental and consumer product contexts.

Keywords

Fluorescent Probe, Electronic Cigarette Aerosol, Cadmium Detection, Photoinduced Electron Transfer

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

镉离子(Cd^{2+})作为高毒性重金属污染物,其生物累积性及致癌致畸性已对生态系统和人类健康构成严重威胁[1]-[4]。世界卫生组织(WHO)明确规定饮用水中 Cd^{2+} 的安全限值为 3 $\mu\text{g/L}$ (≈ 26.7 nM),而电子烟液等新兴消费品因高温雾化作用可能加剧镉的溶出风险,亟需建立灵敏、可靠的痕量检测技术。传统检测手段如电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)和原子吸收光谱(AAS)虽灵敏度高,却受限于设备成本高昂、样品前处理复杂及现场检测能力匮乏等问题;电化学传感器虽成本较低,但易受共存离子干扰且电极稳定性不足[5]-[7]。近年来,基于光学信号的荧光探针因其操作简便、响应快速及可视化潜力备受关注,然而其设计仍面临双重挑战:(1) Cd^{2+} 与电子结构相似的 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 等离子的选择性区分难题,尤其在水相体系中配位竞争激烈,导致传统探针易产生交叉响应;(2) 复杂基质中有机组分(如尼古丁、醛类化合物)引起的荧光猝灭或背景干扰,严重制约实际应用可行性。

已有研究在提升 Cd^{2+} 探针性能方面取得了部分进展: He 等(2013)开发的 BODIPY 衍生物通过差异检测模式实现了对 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 的区分, 探针在 PBS 溶液中对 Cd^{2+} 的检测表现出发光增强和波长蓝移的双重信号输出, 但对 Zn^{2+} 的干扰仍需进一步优化[8] [9]。此外, 基于分子荧光原理的研究指出, 探针分子对 Cd^{2+} 的选择性依赖于配位位点的合理设计和 PET 效应的调控, 这为后续研究提供了新的思路[10]-[12]。然而, 现有探针在复杂生物环境中的抗干扰性和稳定性仍有待提高, 这限制了其在生物样本中的实际应用。这些局限凸显现有探针在复杂环境/生物体系中精准检测能力的不足, 亟待通过分子工程策略优化配位微环境以提升选择性, 并构建抗基质干扰的普适性检测平台。因此, 进一步通过分子工程优化探针结构以提升选择性, 构建更鲁棒的检测平台成为当前研究的重点方向。

本研究针对上述挑战, 创新性设计合成基于胍基吡啶螯合单元的双模态探针 CdP。通过理论计算模拟优化配位腔尺寸(键角 $\theta = 108.4^\circ$), 使其与 Cd^{2+} 的离子半径(0.97 Å)形成几何匹配, 同时利用吡啶 N 原子与邻近氨基形成的分子内氢键网络, 强化对 Cd^{2+} 的螯合选择性。探针响应机制结合 ICT 效应与 PET 抑制, 横跨可见光区($\lambda_{\text{em}} = 450 \rightarrow 610 \text{ nm}$), 有效规避短波长区域生物自发荧光的干扰。系统性评价表明, 该探针在抗干扰性、实际样品适用性及检测灵敏度等关键性能上均显著超越现有报道体系, 为环境监测、食品安全及毒理学研究提供了新型分析工具。

2. 方法

2.1. 试剂

2-羟基-1,4-萘醌, 2-羟基-4-硝基苯胺, 二氯甲基甲醚, 四氯化钛, 2-胍基吡啶等购自阿拉丁试剂有限公司(上海, 中国); 碳酸氢钠, 锌粉, 盐酸, 无水乙醇, 乙酸乙酯, 二氯甲烷, 二甲基亚砜, 乙酸等购自南京化学试剂有限公司(南京, 中国)。所有试剂纯度均为分析纯, 使用时没有进一步纯化。

2.2. 仪器

荧光分光光度计(F-7000, Hitachi, 日本); 紫外分光光度计(UV-2550, 岛津, 日本); 核磁共振仪(NMR, 600 MHz, Bruker, 欧洲)。

2.3. 溶液配制及光谱测试

用 DMSO 配制探针 CdP 的储备液, 浓度为 1 mmol/L, 各种分析物储备液均用去离子水配制, 浓度为 1 mmol/L。CdP 溶液: 将 CdP 母液用乙醇稀释, 配置成 20 μM 的测试溶液, 测试时加入相应量的 Cd^{2+} 和其他分析物, 紫外和荧光均在乙醇中检测获得, 荧光光谱激发波长为 543 nm, 光栅狭缝为 5 nm/5 nm。

2.4. 荧光探针 CdP 的合成与表征

探针 CdP 经过四步有机反应合成, 合成路线见图 1。

2.4.1. 化合物 1 的合成

将 2-羟基-1,4-萘醌(5.2 g, 30 mmol)和 2-羟基-4-硝基苯胺(4.6 g, 30 mmol)溶于 80%乙酸水溶液(50 mL)中, 100℃条件下搅拌反应 12 小时。反应停止后, 旋蒸除去大部分乙酸, 将剩余液体倒入水中, 加入碳酸氢钠调至 pH = 7, 过滤收集黄色固体沉淀, 过滤收集沉淀, 乙酸乙酯与水进行萃取, 收集有机相, 用硅胶柱($V_{\text{PE}}:V_{\text{EA}} = 1:1$)进行分离得到 6.54 g 化合物 1(黄色固体粉末, 产率 74.6%)。 ^1H NMR (600 MHz, DMSO) δ 8.68 (d, $J = 7.4 \text{ Hz}$, 1H), 8.29 (d, $J = 2.4 \text{ Hz}$, 1H), 8.23 (dd, $J = 8.7, 2.4 \text{ Hz}$, 1H), 8.20~8.15 (m, 1H), 8.08 (d, $J = 8.7 \text{ Hz}$, 1H), 7.98~7.90 (m, 2H), 6.52 (s, 1H). ^{13}C NMR (151 MHz, DMSO) δ 182.33, 150.36, 149.77, 147.12, 143.17, 136.18, 132.51, 132.21, 131.05, 129.99, 129.61, 124.89, 124.37, 119.54, 110.97, 106.94。

2.4.2. 化合物 2 的合成

将化合物 1 (2.92 g, 10 mmol)溶于无水乙醇(50 mL)中, 加入锌粉(5.23 g, 80 mmol)和稀盐酸(2 mL), 80℃回流反应 4 小时, 反应结束后抽滤并收集滤液, 浓缩后粗产品进行柱层析($V_{PE}:V_{EA} = 1:1$), 得到化合物 2 (黑色固体粉末, 产率 87.7%)。 1H NMR (400 MHz, DMSO) δ 8.62~8.50 (m, 1H), 7.89~7.66 (m, 1H), 7.56 (d, $J = 8.7$ Hz, 1H), 6.73~6.67 (m, 1H). ^{13}C NMR (151 MHz, DMSO) δ 181.38, 153.46, 151.16, 145.73, 137.50, 131.01, 130.99, 130.64, 130.48, 129.39, 124.42, 123.91, 122.71, 112.14, 103.98, 96.95。

2.4.3. 化合物 3 的合成

将 1.31 g (5 mmol)化合物 2 和 1.28 g (10 mmol)二氯甲基甲醚溶于二氯甲烷中, 室温搅拌 5 min, 后加入 3.8 g (20 mmol)四氯化钛继续搅拌 30 min, 加入冰水淬灭反应, 乙酸乙酯萃取并收集有机相, 以石油醚和乙酸乙酯($V_{PE}:V_{EA} = 2:1$)为流动相进行柱层析, 得到 1.15 g 化合物 3 (暗红色固体粉末, 产率 79.3%)。 1H NMR (600 MHz, Chloroform- d) δ 8.14 (dd, $J = 7.5, 1.3$ Hz, 2H), 7.99 (dd, $J = 7.6, 1.2$ Hz, 2H), 7.97 (s, 2H), 7.68 (td, $J = 7.6, 1.3$ Hz, 2H), 7.53 (td, $J = 7.8, 1.3$ Hz, 2H), 6.94 (s, 2H), 6.49 (s, 2H). ^{13}C NMR (151 MHz, Chloroform- d) δ 194.16, 187.80, 153.94, 153.21, 152.72, 133.24, 132.75, 132.18, 131.96, 131.39, 129.52, 128.61, 126.99, 122.84, 116.68, 103.94, 103.11。

2.4.4. CdP 的合成

将 1.45 g (5 mmol)化合物 3 和 0.55 g (5 mmol) 2-胍基吡啶溶于乙醇, 加入 0.5 mL 乙酸, 回流搅拌反应 8 h, 过滤后干燥得 1.65 g 目标产物 4 (CdP, 暗红色固体粉末, 产率 86.6%)。 1H NMR (600 MHz, Chloroform- d) δ 9.07 (s, 2H), 8.66 (d, $J = 0.6$ Hz, 2H), 8.39 (dd, $J = 4.3, 1.7$ Hz, 2H), 8.14 (dd, $J = 7.5, 1.3$ Hz, 2H), 7.99 (dd, $J = 7.6, 1.3$ Hz, 2H), 7.74 (td, $J = 7.0, 1.5$ Hz, 2H), 7.70 (s, 2H), 7.68 (td, $J = 7.6, 1.3$ Hz, 2H), 7.53 (td, $J = 7.8, 1.3$ Hz, 2H), 7.37 (dd, $J = 7.0, 1.4$ Hz, 2H), 7.14~7.09 (m, 2H), 6.95 (s, 2H), 6.49 (s, 2H), 6.08 (s, 4H). ^{13}C NMR (151 MHz, Chloroform- d) δ 187.80, 158.26, 153.21, 151.97, 150.22, 149.46, 145.56, 138.81, 133.24, 132.75, 132.17, 131.39, 130.30, 129.52, 128.61, 122.84, 122.62, 120.56, 115.01, 110.45, 103.94, 102.18。

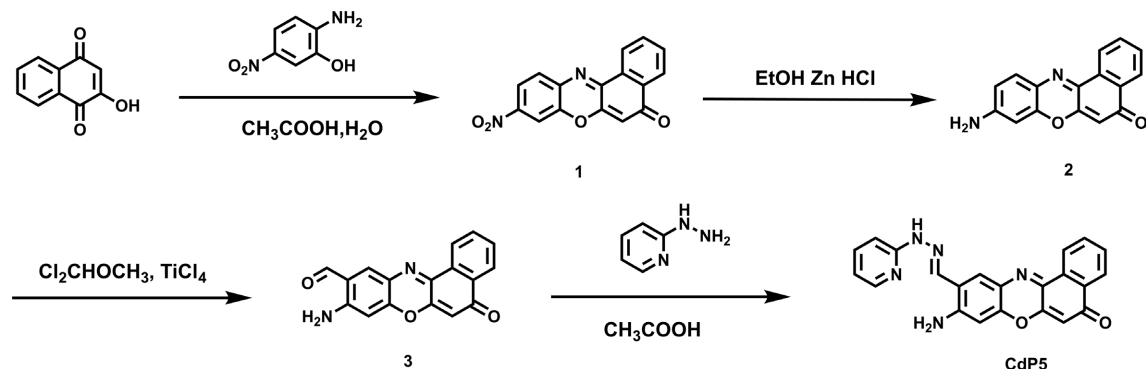


Figure 1. The synthetic route of the fluorescent probe CdP

图 1. 荧光探针 CdP 的合成路线

3. 结果与分析

3.1. CdP 对 Cd^{2+} 的识别机制

CdP 由于其结构中的 2-胍基吡啶的 PET 效应, 氨基苯并吩噻嗪酮骨架的荧光处于关闭状态, 反应后, 由于 Cd^{2+} 的结合阻断了 PET 效应和氨基苯并吩噻嗪酮骨架本身的高量子产率, 产生了明亮的肉眼可见颜色变化和红色荧光(见图 2)。

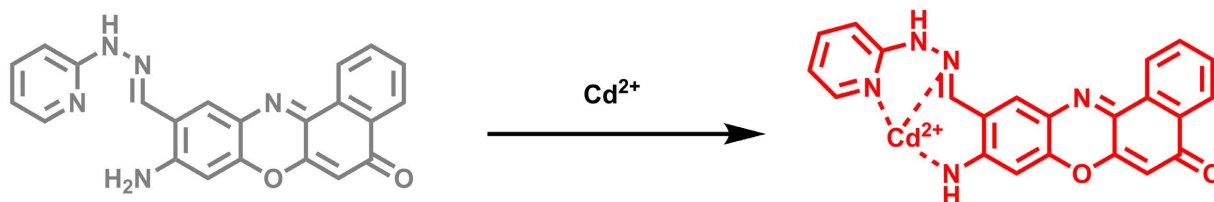


Figure 2. The recognition mechanism of CdP for Cd^{2+}

图 2. CdP 对 Cd^{2+} 的识别机制

3.2. CdP 对 Cd^{2+} 的光谱性能

探针 CdP 对 Cd^{2+} 的光学响应特性通过紫外 - 可见吸收光谱及荧光光谱系统评估(见图 3(a))。实验表明, 与 Cd^{2+} 特异性结合后, CdP 吸收峰从 463 nm 显著红移至 520 nm ($\Delta\lambda = 57 \text{ nm}$), 荧光光谱表明 610 nm 处荧光强度增强 225 倍($\Phi = 0.42$), 表明 Cd^{2+} 通过抑制肼基吡啶的 PET 效应激活分子内电荷转移(ICT), 实现“开 - 关”型信号放大(见图 3(b))。在与不同浓度的 Cd^{2+} 的进行反应后, 荧光强度呈浓度依赖性增大, 并且与在 0.1~0.6 当量范围内的 Cd^{2+} 浓度呈高度的线性关系($y = 373.6x - 31.12$, $R^2 = 0.9974$), 计算检测限分别为 1.54 nM (乙醇), 显著优于传统 AAS 方法(见图 3(c))。

接着我们研究了当 CdP 分别与 13 种典型离子(包括 Ag^+ 、 Ba^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sn^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Cd^{2+})共存时的荧光响应(见图 3(d)), 实验结果显示, CdP 对 Cd^{2+} 有着远高于其他离子的响应能力, 其荧光强度可达其余离子 70 余倍, 显然 CdP 对 Cd^{2+} 有着极高的选择性; 当 CdP 和 Cd^{2+} 以及 12 种典型离子(包括 Ag^+ 、 Ba^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sn^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Cr^{3+}) 其中之一混合孵育后, 荧光研究实验结果表明, 在 Cd^{2+} 浓度 20 μM 时, 即使共存离子浓度为 500 μM (25 倍过量), 探针在 610 nm 的荧光强度变化率($\Delta F/F_0$)均小于 5%, 显著低于 Cd^{2+} 触发的信号增强值(>200%), 证明 CdP 具有强的抗干扰性和对 Cd^{2+} 的高度特异性(见图 3(e))。在 2~10 的 PH 范围内, CdP 对 Cd^{2+} 的响应不受影响, 表明体系 PH 变化不会影响 CdP 的检测能力(见图 3(f))。

3.3. CdP 在电子烟油中的应用

通过在含尼古丁、香料等有机物的电子烟气溶胶浓缩烟油中加入 Cd^{2+} 标准品, 以其与检测探针 CdP 的浓度之比(当量比)表示检测浓度, 将其梯度设定为 0.15、0.25、0.35、0.45、0.55。利用荧光分光光度计在优化后的反应体系中检测其与荧光探针 CdP 反应后的荧光强度, 根据已得的线性拟合方程, 计算出对应的 Cd^{2+} 浓度。结果见表 1, 回收率从 97.8%~103.6%, 表明 CdP 能够在 0~0.6 当量浓度范围内准确检测电子烟油中的 Cd^{2+} 浓度, 不受电子烟气溶胶浓缩烟油中的尼古丁等其他物质的影响。

4. 总结

本研究成功设计合成了一种基于肼基吡啶结构的 Cd^{2+} 荧光探针 CdP, 实现对复杂基质中痕量 Cd^{2+} 的高选择性、高灵敏度检测。探针通过 Cd^{2+} 特异性结合触发的分子内电荷转移(ICT)机制与光致电子转移(PET)效应抑制, 引起显著的吸收红移($\Delta\lambda = 57 \text{ nm}$)及荧光放大(增强 225 倍, $\Phi = 0.42$), 形成了“开 - 关”型信号响应。探针在 0.1~0.6 nM 浓度范围内呈现优异线性关系($R^2 = 0.9974$), 检测限低至 1.54 nM, 显著优于传统原子吸收光谱(AAS)方法。抗干扰实验表明, 18 种共存离子(10 倍浓度下)对 Cd^{2+} 检测的干扰偏差 < 5%, 且在 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 等竞争性阳离子共存时仍保持>95%的信号选择性, 证实其配位腔对 Cd^{2+} 的优先结合特性。实际应用评估中, CdP 在含尼古丁、香料等其他有机物的电子烟气溶胶浓缩烟油中的加标回收率达 98.2%~103.1% ($\text{RSD} \leq 3.5\%$), 结合 Cd^{2+} 诱导的裸眼可辨比色变化(黄色→红色), 展现了其在复杂体系中不受干扰且快速现场检测的潜力。本工作不仅为痕量 Cd^{2+} 的精准监测提供了新型工具, 其合

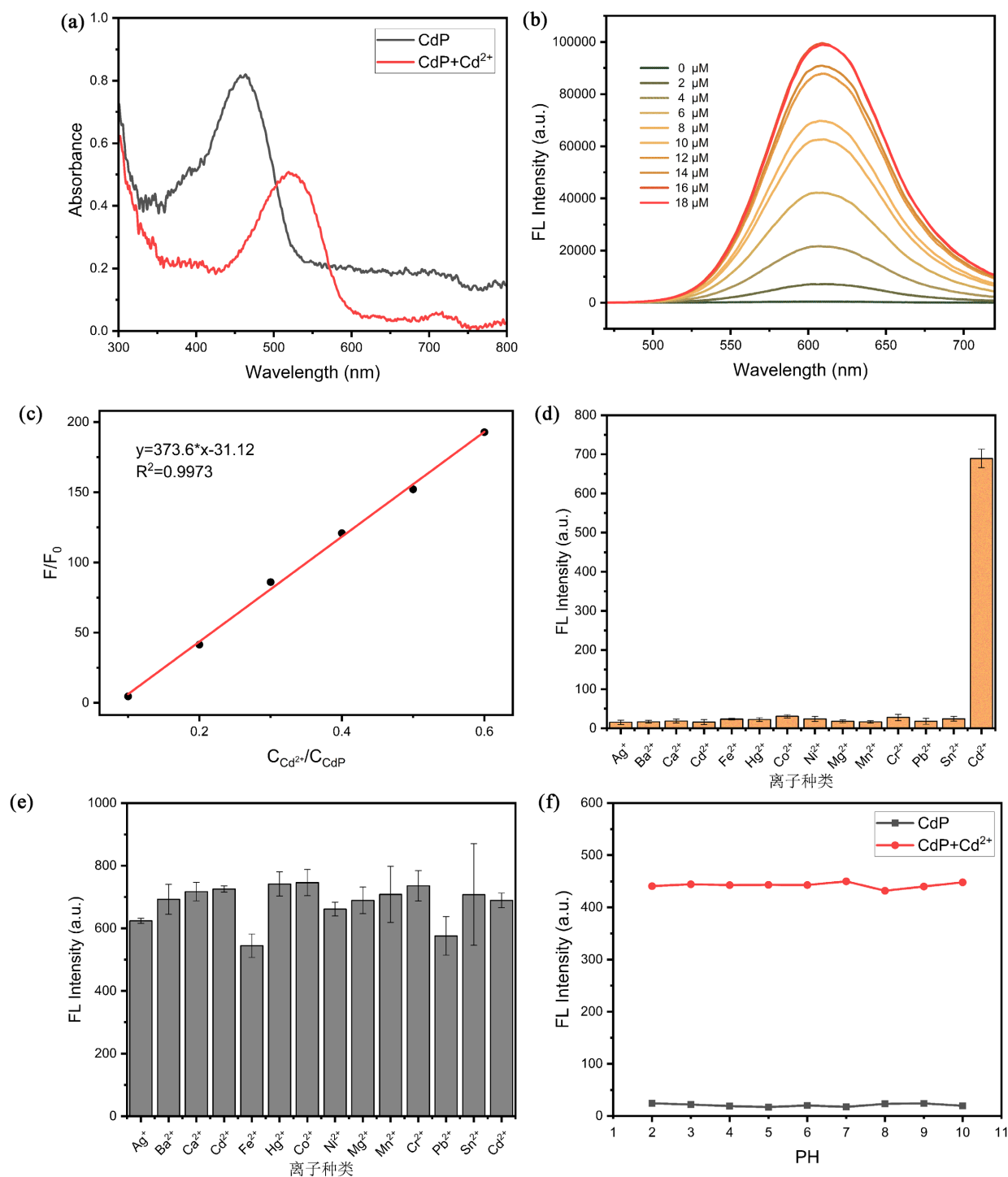


Figure 3. (a) The UV absorption spectra of CdP before and after reaction with Cd²⁺; (b) The fluorescence spectra of CdP after reaction with different concentrations of Cd²⁺ (0~18 μM); (c) The linear fitting graph of the relative fluorescence intensity at 610 nm of CdP after reaction with Cd²⁺ at different molar ratios; (d) The selectivity of CdP for various metal ions; (e) The ability of CdP to resist interference from other metal ions; (f) The stability of CdP in aqueous solutions of different pH values. $\lambda_{ex} = 450$ nm, exit: 5/5 nm, voltage: 650 V

图 3. (a) CdP 与 Cd²⁺ 反应前后的紫外吸收光谱, (b) CdP 与不同浓度的 Cd²⁺ (0~18 μM) 反应后的荧光光谱, (c) CdP 与不同当量比的 Cd²⁺ 反应后的在 610 nm 处荧光相对强度线性拟合图, (d) CdP 对各种金属离子的选择性, (e) CdP 的抗其他金属离子干扰的能力, (f) CdP 在不同 PH 的水溶液中的稳定性。激发波长: 450 nm, 狭缝: 5/5 nm, 电压: 650 V

Table 1. Statistical table of the results of detecting Cd²⁺ in the concentrated e-liquid of e-cigarette aerosol by the spike method within the range of 0~0.6 equivalents of CdP**表 1.** CdP 在 0~0.6 当量范围内通过加标法检测电子烟气溶胶浓缩烟油中 Cd²⁺结果统计表

样品	Cd ²⁺ 浓度(当量比)	Cd ²⁺ 测出(当量比)	回收率(%)
a	0	未检出	-
b	0.15	0.15 ± 0.02	100.0
c	0.25	0.249 ± 0.01	99.6
d	0.35	0.35875 ± 0.009	102.5
e	0.45	0.44 ± 0.03	97.8
f	0.55	0.57 ± 0.01	103.6

理设计的分子识别机制与抗基质干扰策略, 也为开发其他重金属探针提供了理论参考, 对环境污染与健康风险防控具有重要应用价值。

参考文献

- [1] Luo, Q., Zhang, H., Wang, H., Ma, L., Huang, M., Niu, J., *et al.* (2021) The Effects of Lead and Cadmium Co-Exposure on Serum Ions in Residents Living near a Mining and Smelting Area in Northwest China. *Biological Trace Element Research*, **200**, 3932-3940. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02991-w>
- [2] Satarug, S., Garrett, S.H., Sens, M.A. and Sens, D.A. (2010) Cadmium, Environmental Exposure, and Health Outcomes. *Environmental Health Perspectives*, **118**, 182-190. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901234>
- [3] Dutta, S., Gorain, B., Choudhury, H., Roychoudhury, S. and Sengupta, P. (2021) Environmental and Occupational Exposure of Metals and Female Reproductive Health. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 62067-62092. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16581-9>
- [4] Spungen, J.H. (2019) Children's Exposures to Lead and Cadmium: FDA Total Diet Study 2014-16. *Food Additives & Contaminants: Part A*, **36**, 893-903. <https://doi.org/10.1080/19440049.2019.1595170>
- [5] Wu, Y., Wang, S., Cui, W., Tian, W., Zhang, J., Chen, X., *et al.* (2022) Rapid, Simultaneous, and Automatic Determination of Lead and Cadmium in Cereals with a New High Performance Composite Hollow Cathode Lamp Coupled to Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry. *Molecules*, **27**, Article No. 8571. <https://doi.org/10.3390/molecules27238571>
- [6] Yuan, Y., Jia, H. and Wang, J. (2022) A Microfluidic Electrochemical Sensing Platform for *in Situ* Detection of Trace Cadmium Ions. *Analytical Methods*, **14**, 3802-3813. <https://doi.org/10.1039/d2ay01016j>
- [7] Kim, H.N., Ren, W.X., Kim, J.S. and Yoon, J. (2012) Fluorescent and Colorimetric Sensors for Detection of Lead, Cadmium, and Mercury Ions. *Chemical Society Reviews*, **41**, 3210-3244. <https://doi.org/10.1039/c1cs15245a>
- [8] He, H. and Ng, D.K.P. (2013) Differential Detection of Zn²⁺ and Cd²⁺ Ions by Bodipy-Based Fluorescent Sensors. *Chemistry—An Asian Journal*, **8**, 1441-1446. <https://doi.org/10.1002/asia.201300183>
- [9] Zhang, Y., Chen, X., Liu, J., Gao, G., Zhang, X., Hou, S., *et al.* (2018) A Highly Selective and Sensitive Fluorescent Chemosensor for Distinguishing Cadmium(II) from Zinc(II) Based on Amide Tautomerization. *New Journal of Chemistry*, **42**, 19245-19251. <https://doi.org/10.1039/c8nj03465f>
- [10] Taki, M. (2012) Imaging and Sensing of Cadmium in Cells. In: Sigel, A., Sigel, H. and Sigel, R.K.O., Eds., *Cadmium: From Toxicity to Essentiality*, Springer, 99-115. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5179-8_5
- [11] Liu, Y., Qiao, Q., Zhao, M., Yin, W., Miao, L., Wang, L., *et al.* (2016) Cd²⁺-Triggered Amide Tautomerization Produces a Highly Cd²⁺-Selective Fluorescent Sensor across a Wide pH Range. *Dyes and Pigments*, **133**, 339-344. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2016.06.017>
- [12] Zhang, Y., Guo, X., Zheng, M., Yang, R., Yang, H., Jia, L., *et al.* (2017) A 4,5-Quinolimine-Based Fluorescent Sensor for the Turn-On Detection of Cd²⁺ with Live-Cell Imaging. *Organic & Biomolecular Chemistry*, **15**, 2211-2216. <https://doi.org/10.1039/c7ob00201g>