

荧光探针检测金属离子的研究进展

平欣妮

浙江师范大学化学与材料科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2023年3月6日; 录用日期: 2023年3月26日; 发布日期: 2023年4月7日

摘要

所有形式的生命都对金属元素有绝对的要求, 因为金属元素在各种生化工程起着重要的作用。但随着金属离子污染物排放的加剧, 同样会对人类、动物和植物造成严重的健康和环境问题。由于这些特点, 对金属离子的检测变得尤为重要。荧光探针具有微环境灵敏度高、时空分辨率高等优良的光物理性质, 被广泛应用于金属离子检测。在这篇综述中, 主要介绍了近几年来不同结构的荧光探针用于检测痕量金属离子的研究进展。

关键词

金属离子, 荧光探针, 痕量, 高灵敏度

Advances in the Detection of Metal Ions by Fluorescent Probes

Xinni Ping

School of Chemistry and Materials Science, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Mar. 6th, 2023; accepted: Mar. 26th, 2023; published: Apr. 7th, 2023

Abstract

All forms of life have an absolute requirement for metal elements, as they play an important role in various biochemical engineering. However, as the release of metal ion pollutants intensifies, they can cause equally serious health and environmental problems for humans, animals, and plants. Due to these characteristics, the detection of metal ions has become particularly important. Fluorescent probes have excellent photophysical properties such as high microenvironmental sensitivity and high spatiotemporal resolution and are widely used for metal ion detection. In this review, the main focus is on the progress of research in recent years on the use of different structures of fluorescent probes for the detection of trace metal ions.

Keywords

Metal Ions, Fluorescent Probes, Trace, High Sensitivity

Copyright © 2023 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. 前言

金属离子对所有种类的生命物种和生命形式都是必不可少的，因为它们在许多化学、生物和环境过程中扮演着至关重要的角色[1]。大多数金属离子是通过采矿、倾倒废物、排放工业水和燃煤等人为过程产生的，所有这些都破坏我们的生态系统[2]。水溶性金属离子污染物很容易扩散，对世界各地的生态系统构成严重威胁，因为它们最终可能会从最初的源头扩散到数百公里处[3]。同时，这些金属离子不能生物降解，因此很容易积聚在我们的生态系统和食物链中，导致严重的健康问题。世界卫生组织(WHO)和环境保护局(EPA)已经确定了饮用水中金属离子的安全范围或最高污染水平[4]。因此，发展选择性和早期检测痕量重金属离子的策略目前正受到相当大的关注。

一些最著名的痕量金属离子检测方法需要高度复杂的分析技术，如原子吸收光谱(AAS) [5]、电感耦合等离子体质谱(ICP-MS) [6]、飞行时间质谱仪(TOFMS) [7]、质谱学(MS) [8]和 X 射线荧光光谱(XR-FS) 方法[9]。这些标准技术非常准确和灵敏，但通常需要昂贵的仪器、广泛的样品前处理和技术专业知识，这使得它们成本高昂，不太适合实时和现场检测。在各种分析技术中，金属离子的发光检测因其高灵敏度、高选择性、高信噪比、成本相对较低、操作简单以及探针分子可通过分子工程精确调节来检测广泛的分析物而受到广泛关注。如表 1 列举了金属离子的检测方法。本文主要介绍了荧光检测法检测金属离子的最新研究进展。

Table 1. Metal ion detection methods

表 1. 金属离子的检测方法

检测方法	特点
原子吸收光谱法	操作简便、选择性好、分析速度快、灵敏度高、检出限低；不能多元素同时分析
电感耦合等离子体质谱法	多元素快速分析、分析下限低、分析速度快、检测限低；运行费用高
飞行时间质谱检测法	扫描速度快、分辨能力强；定性能力不足、售价高、需要认真维护
质谱学检测法	结构简单、成本低、维护简单；定性能力不足、分辨率低、速度慢、检测上限低
X 射线荧光光谱法	分析速度快、不损坏样品、检测成本低；精密度高、制样简单、对轻元素检测的灵敏度低、易受干扰
荧光检测法	操作简便、成本低廉、选择性高、准确稳定、灵敏度高、受外界影响小

2. 金属离子荧光探针的设计策略

到目前为止，学者们基于一些特定分子结构或基团对金属离子显示出的高亲和力和反应性，可以改变光物理性质，从而导致光学信号的变化，多种荧光探针被设计出来用于金属离子的检测。

成熟的荧光探针设计策略包括扭曲的分子内电荷转移(TICT)、分子内电荷转移(ICT)、激发态分子内质子转移(ESIPT)等。除了这些策略外,根据荧光探针聚集态下的荧光信号变化,又可分为聚集诱导猝灭(ACQ)和聚集诱导发光(AIE)。这些策略的结合为开发检测金属离子的荧光探针提供了先决条件。还必须指出的是,可以同时采取一项以上策略,从而进一步创造新的机会来提高敏感性和选择性。

3. 荧光材料在重金属离子检测中的应用

3.1. 铜离子检测

铜(II)离子是一种必需的营养物质,它在维持细胞内代谢平衡方面发挥着重要作用[10]。Cu²⁺离子调节失调可能会产生不良影响,导致一系列严重疾病,如阿尔茨海默病、门克斯综合征、威尔逊病等。体内 Cu²⁺离子水平过高还会导致神经退化,以及肾脏或肝脏损害[11]。根据世界卫生组织的指南,饮用水中 Cu²⁺的最高允许水平为 3 毫克/升,可接受的范围为 0.05~3 毫克/升。因此,对痕量 Cu²⁺进行快速、简便的分析在环境监测中具有重要意义。

Tang 等人开发了一种对金属离子具有螯合能力的水杨醛席夫碱类荧光探针 DPAS [12],如图 1 所示。实验发现 DPAS 聚集体在纯水中位于 565 nm 处有发射峰表现为亮黄色发光,通过 ESIPT 过程表现出较强的 AIE 特性。在 14 种不同金属离子存在的情况下,DPAS 只对 Cu²⁺做出了响应,显示出明显的荧光猝灭,565 nm 处的荧光强度降至其原始强度的 10%。在 0~0.6 mM 范围内,DPAS 对 Cu²⁺离子在水介质中的检出限为 0.067 μM,检出限与荧光强度与 Cu²⁺浓度呈良好的线性关系。

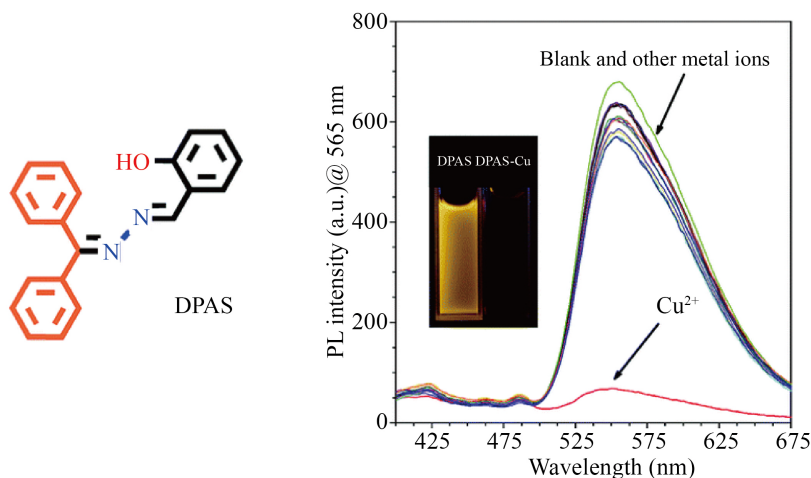


Figure 1. The structural formulae of DPAS and the changes in the PL spectra of DPAS in a THF/water mixture ($F_w = 100\%$) upon the addition of different metal ions

图 1. DPAS 的化学结构以及 DPAS 在四氢呋喃/水($F_w = 100\%$)体系中加入不同金属离子后荧光光谱的变化

Wu 等人[13]通过在氟硼二吡咯(BODIPY)骨架上引入酰胺受体合成了荧光探针分子 HHPBA-BODIPY,并在骨架上连接了酚羟基和羰基作为供体, Cu²⁺与 HHPBA-BODIPY 的配位导致荧光吸收光谱和发射光谱的变化,从而表明溶液中 Cu²⁺的含量。HHPBA-BODIPY 溶于乙醇后,发射峰位于 510 nm 处表现为强绿色荧光。在 Cu²⁺存在下,荧光强度迅速减弱,并且 Cu²⁺浓度与荧光强度呈良好的线性关系,检出限为 0.35 μM。此外, HHPBA-BODIPY 还能有效地测定水样中的 Cu²⁺,为环境监测提供了检测痕量 Cu²⁺的可能性。

3.2. 汞离子检测

汞(Hg)对于人类健康是极具威胁的, 因为即使是很少量的接触也会导致严重的健康问题, 并对发育中的婴儿和儿童产生严重的副作用[14]。最重要的是, 它通过生态途径进行生物积累, 导致食物链上的浓度放大[15]。通常, 它以三种形式存在于我们的生态系统和环境中, 即无机汞(Hg^{2+})、元素汞(Hg^0)和有机形式, 例如甲基汞(MeHg) [16]。世界卫生组织和环境保护局精确定义了饮用水中汞离子的含量[17]。因此, 迫切需要选择性和灵敏地检测汞离子。

Kong 和他的同事们合成了一种 AIE 性质的水溶性荧光探针 Tmbipe [18], 上面修饰了四个带正电荷的甲基化苯并咪唑基团, 可以与两个 Hg^{2+} 离子或两个有机汞分子(如 MeHg^+ 和 PhHg^+)配位形成平面双核 Hg^{II} 四卡宾络合物, 然后该络合物可以自聚集以开启荧光用于汞检测。在 200 nM-20 μM 范围内, Hg^{2+} 、 PhHg^+ 和 MeHg^+ 的检测下限分别为 63 nM、78 nM 和 94 nM, 检出限与荧光强度与 Hg^{2+} 、 PhHg^+ 和 MeHg^+ 浓度呈良好的线性关系。

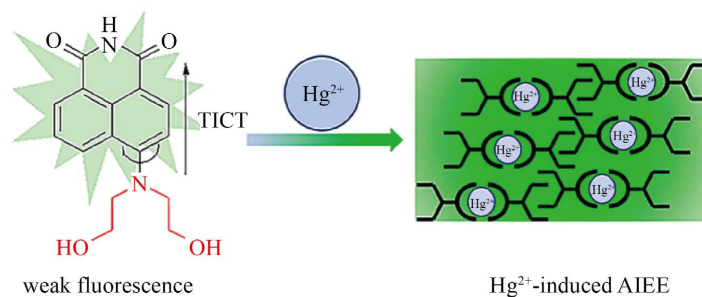


Figure 2. Schematic diagram of the mechanism used by NIDEA for the detection of Hg^{2+} ions

图 2. NIDEA 用于检测 Hg^{2+} 离子的机制示意图

Zhu 等人[19]基于 TICT 机理, 合理地构建了一种具有聚集诱导发光特性的水溶性荧光染料 NIDEA, 如图 2 所示。通过 N-未取代的萘酰亚胺基团与 Hg^{2+} 的特定结合, 形成经典的“亚胺-汞-亚胺”结构, 使 NIDEA 显示出令人难以置信的荧光增强效应。荧光滴定实验表明, 探针 NIDEA 的荧光强度与 Hg^{2+} 浓度在 0~2.5 μM 和 2.5~7.5 μM 范围内呈良好的线性关系, 检出限为 46.7 nM。二乙醇胺的引入使得该探针具有良好的水溶性, 可直接应用于实际水样中。

3.3. 锌离子检测

过渡金属锌离子是仅次于铁的人体第二丰富和必需的微量元素[20]。它还在神经传递、细胞凋亡、基因表达和酶调节等多个病理生理过程中发挥重要作用[21]。许多神经系统疾病, 如阿尔茨海默氏症、癫痫和帕金森氏症, 可能与锌离子稳态失调有关[22]。因此, 有必要发展检测锌离子的灵敏和选择性的光谱技术。

Pratap 和他的同事[23]开发了一种基于 ES IPT 功能化的硫代[3,2-c]吡喃衍生物荧光探针 P, 并表现出 AIE 性质。P 由于 ES IPT 现象而表现出弱发光, 这种现象在 Zn^{2+} 与硫代并[3,2-c]吡喃相互作用生成络合物 P- Zn^{2+} 后被减弱, 锌离子的加入促进了发射强度显示出 7 倍的增强, 对 Zn^{2+} 的检出限为 0.67 μM 。

3.4. 银离子检测

银被广泛应用于制药、电子和摄影等领域, 导致产生大量的工业银废物, 然后排放到环境中。过量

的银离子会危害生物和人类健康[24]。因此,检测不同介质中的痕量银离子对环境保护和人类健康具有重要的现实意义。

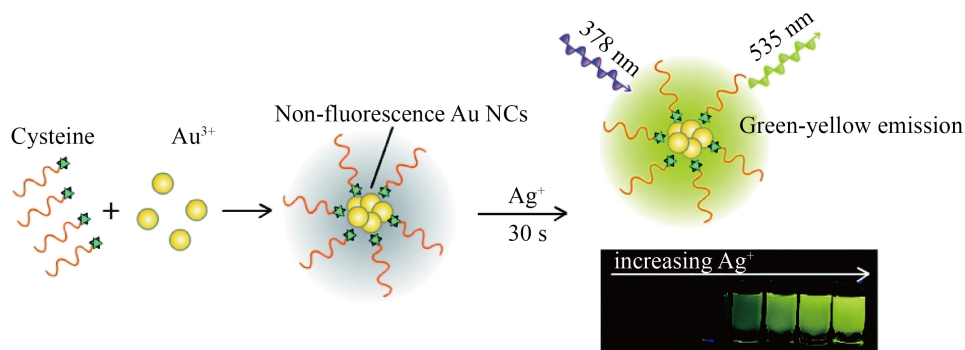


Figure 3. Schematic representation of the mechanism for detection of Ag^+ using Cys-Au NCS
图 3. 使用 Cys-Au NCS 检测 Ag^+ 的机制示意图

Cao 和他的同事[25]制备了一种能对 Ag^+ 快速、选择性荧光开启的新型半胱氨酸稳定金纳米团簇(Cys-Au NCS)探针,如图 3 所示。在非荧光的 Cys-Au NCS 溶液中加入 Ag^+ 可以在 30 s 内迅速诱导出可见的荧光“开启”现象,“开启”的荧光为黄绿色,发射峰位于 535 nm。进一步的研究表明,这种荧光“开启”现象是 Ag^+ 所特有的,金属纳米团簇可以与金属离子相互作用,获得双金属荧光纳米团簇。因此,荧光强度增加的原因是双金属荧光纳米团簇的形成,而不是聚集引起的发光。并且在 3.0~30.0 μM 的范围内,“开启”的荧光强度与 Ag^+ 的量呈线性关系。因此,将非荧光半胱氨酸-金纳米管应用于环境水样中 Ag^+ 的检测,获得了 0.26 μM 的检出限。

3.5. 铝离子检测

铝是地壳中第三丰富的元素(重量占 8.3%),仅次于氧和硅[26]。许多文献报道已经证实了它在神经毒性中的作用,并观察到它与阿尔茨海默氏症和帕金森氏病、骨骼软化和慢性肾功能衰竭密切相关[27]。根据世卫组织的指南,人类平均每天的铝摄入量约为 3~10 mg,饮用水中铝的摄入量不应超过 200 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (7.41 μM)。因此,使用非侵入性发光方法来灵敏和选择性地检测 Al^{3+} 是非常必要的。

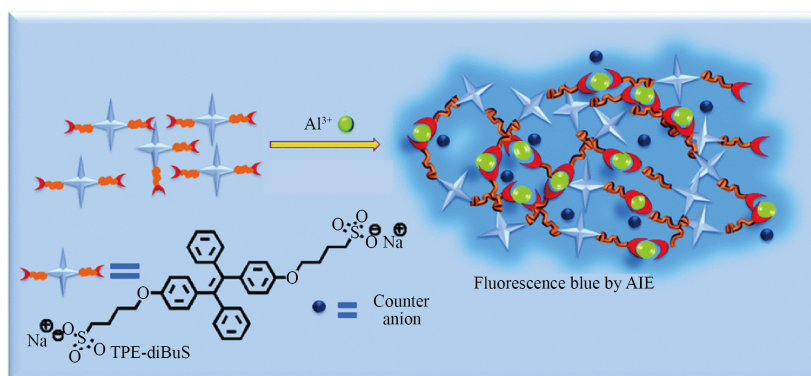


Figure 4. Schematic representation of sensing process of TPE-diBuS towards Al^{3+}
图 4. TPE-diBuS 对 Al^{3+} 的检测过程示意图

Chatterjee 和他的同事已经合成了一种水溶性 AIE 活性探针 TPE-diBuS [28],如图 4 所示。TPE-diBuS

通过离子相互作用与水溶液中的 Al^{3+} 离子结合, 并通过 $-\text{SO}^3$ 基团与 Al^{3+} 的交联自发形成 TPE-diBuS-Al 聚集体, 从而促进了 RIM 过程, 触发明亮的蓝色荧光, 实现对水中 Al^{3+} 离子的荧光响应。由于 AIE 性质, TPE-diBuS 在水中是不发光的, 加入 Al^{3+} 后, 使其 468 nm 处的荧光强度逐渐增强。在 0~1 μM 范围内, Al^{3+} 的相对荧光强度与 Al^{3+} 浓度呈线性关系, 检测下限为 $5.0 \times 10^{-8} \text{ M}$ 。

3.6. 铁离子检测

铁是生命所必需的营养物质, 也是人体内含量最丰富的过渡金属[29]。人体内过多的铁会导致癌症、器官功能障碍、色素沉着症、帕金森氏症和阿尔茨海默氏症等疾病, 而铁缺乏则会导致贫血[30]。因此, 新的检测 Fe^{3+} 分析方法的开发对于监测各种生物和生化过程中的 Fe^{3+} 浓度具有重要意义。

Zhang 等人[31]以三苯胺亚砷为发光核, 羟基为识别基团, 设计合成了一种用于 Fe^{3+} 检测的荧光关闭型热激活延迟荧光(TADF)探针 TPA-SO-OH, 如图 5 所示。低温磷光光谱表明, 该探针具有 0.16 eV 的最小化单重态和三重态之间的能级差(ΔE_{ST}), 保证了 TADF 过程的反向系间窜越(RISC)。荧光测试表明, 该探针具有明显的铁离子响应特性。通过理论计算发现探针的发光是一种给电子到拉电子的 ICT 发光, 随着 Fe^{3+} 离子浓度的增加, 识别基团羟基与铁离子相互作用, 并诱导能量从 ICT 发光向低能态转移, 使探针的荧光猝灭。根据荧光滴定的结果计算出标准差, 获得的检测下限为 13 nM。此外, 该探针在不同的酸碱环境中具有良好的荧光稳定性, 有利于其实际应用。

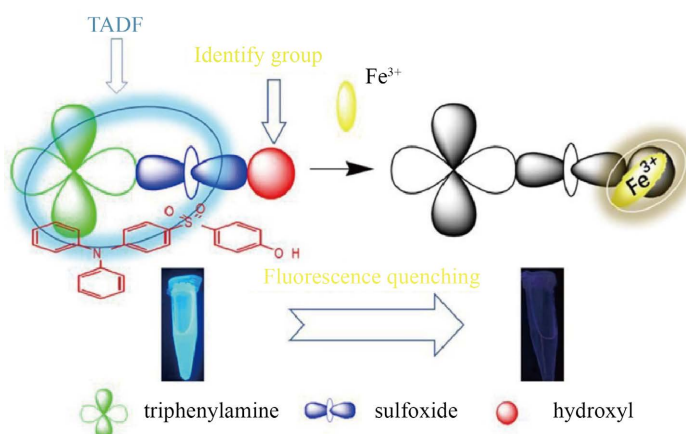


Figure 5. Schematic representation of sensing process of TPA-SO-OH towards Fe^{3+}

图 5. TPA-SO-OH 对 Fe^{3+} 的检测过程示意图

4. 总结

总之, 对各种金属离子的识别和检测已经是化学传感器领域的一个重要研究领域。由于荧光测量的快速、无损和灵敏的性质, 结合合适的探针的荧光测量是测量这些分析物的首选和优秀的方法, 并且在基于各种平台的荧光化学传感器的定义和组成方面已经取得了重要的进展。越来越多的研究人员从事这一领域的研究, 在探针的开发、合成和应用方面积累了大量的理论和实践经验, 促进了新型荧光探针的进一步发展。本文综述了金属离子荧光探针的研究进展。针对不同的金属离子, 在选择合适的材料和策略来设计和合成荧光探针方面已经取得了很大的进展。然而, 在荧光探针的实际应用中仍然存在着局限性和前所未有的挑战, 如不同环境中 pH、温度对探针行为的影响, 对荧光探针的设计提出了更高的要求。因此, 未来还有很多方面需要进一步改进, 包括探针在生物体内的兼容性和荧光探针检测的精确性等,

以便它们能够适用于更复杂的检测环境。我们相信，荧光探针将成为生物医学领域的一种非常强大的工具，并在未来为生物学做出巨大贡献。

参考文献

- [1] Ding, Y., Zhu, W.-H. and Xie, Y. (2017) Development of Ion Chemosensors Based on Porphyrin Analogues. *Chemical Reviews*, **117**, 2203-2256. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00021>
- [2] Du, J., Hu, M., Fan, J. and Peng, X. (2012) Fluorescent Chemodosimeters Using “Mild” Chemical Events for the Detection of Small Anions and Cations in Biological and Environmental Media. *Chemical Society Reviews*, **41**, 4511-4535. <https://doi.org/10.1039/c2cs00004k>
- [3] Egorova, K.S. and Ananikov, V.P. (2017) Toxicity of Metal Compounds: Knowledge and Myths. *Organometallics*, **36**, 4071-4090. <https://doi.org/10.1021/acs.organomet.7b00605>
- [4] Aragay, G., Pons, J. and Merkoçi, A. (2011) Recent Trends in Macro-, Micro-, and Nanomaterial-Based Tools and Strategies for Heavy-Metal Detection. *Chemical Reviews*, **111**, 3433-3458. <https://doi.org/10.1021/cr100383r>
- [5] Pohl, P. (2009) Determination of Metal Content in Honey by Atomic Absorption and Emission Spectrometries. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **28**, 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2008.09.015>
- [6] Townsend, A.T., Miller, K.A., McLean, S. and Aldous, S. (1998) The Determination of Copper, Zinc, Cadmium and Lead in Urine by High Resolution ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **13**, 1213-1219. <https://doi.org/10.1039/a805021j>
- [7] Wang, Z.Z., Deguchi, Y., Yan, J.J. and Liu, J.P. (2013) Rapid Detection of Trace Heavy Metals using Laser Breakdown Time-of-Flight Mass Spectrometry. *Procedia Environmental Sciences*, **18**, 329-337. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.043>
- [8] Götz, A. and Heumann, K.G. (1987) Heavy Metal Trace Determination with a Compact Thermal Ionization Quadrupole Mass Spectrometer. Part 2. Analysis of Food Samples: Schwermetall-Spurenbestimmung Mit Einem Kompakten Thermionen-Quadrupol-Massenspektrometer. *Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie*, **326**, 118-122. <https://doi.org/10.1007/BF00468493>
- [9] Malik, L.A., Bashir, A., Qureashi, A. and Pandith, A.H. (2019) Detection and Removal of Heavy Metal Ions: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, **17**, 1495-1521. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00891-z>
- [10] Xu, Z., Xiao, Y., Qian, X., Cui, J. and Cui, D. (2005) Ratiometric and Selective Fluorescent Sensor for Cu^{II} Based on Internal Charge Transfer (ICT). *Organic Letters*, **7**, 889-892. <https://doi.org/10.1021/ol0473445>
- [11] Kepp, K.P. and Squitti, R. (2019) Copper Imbalance in Alzheimer's Disease: Convergence of the Chemistry and the Clinic. *Coordination Chemistry Reviews*, **397**, 168-187. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2019.06.018>
- [12] Wang, Z., Zhou, F., Gui, C., Wang, J., Zhao, Z., Qin, A. and Tang, B.Z. (2018) Selective and Sensitive Fluorescent Probes for Metal Ions Based on Aie Dots in Aqueous Media. *Journal of Materials Chemistry C*, **6**, 11261-11265. <https://doi.org/10.1039/C8TC03711F>
- [13] Sun, R., Wang, L., Jiang, C., Du, Z., Chen, S. and Wu, W. (2020) A Highly Efficient BODIPY Based Turn-off Fluorescent Probe for Detecting Cu²⁺. *Journal of Fluorescence*, **30**, 883-890. <https://doi.org/10.1007/s10895-020-02544-9>
- [14] Cao, D., Liu, Z., Verwilt, P., Koo, S., Jangjili, P., Kim, J.S. and Lin, W. (2019) Coumarin-Based Small-Molecule Fluorescent Chemosensors. *Chemical Reviews*, **119**, 10403-10519. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00145>
- [15] Okpala, C.O.R., Sardo, G., Vitale, S., Bono, G. and Arukwe, A. (2018) Hazardous Properties and Toxicological Update of Mercury: From Fish Food to Human Health Safety Perspective. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **58**, 1986-2001. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1291491>
- [16] Kim, K.-H., Kabir, E. and Jahan, S.A. (2016) A Review on the Distribution of Hg in the Environment and Its Human Health Impacts. *Journal of Hazardous Materials*, **306**, 376-385. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.11.031>
- [17] Tunsu, C. and Wickman, B. (2018) Effective Removal of Mercury from Aqueous Streams via Electrochemical Alloy Formation on Platinum. *Nature Communications*, **9**, Article No. 4876. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07300-z>
- [18] Yuan, B., Wang, D.-X., Zhu, L.-N., Lan, Y.-L., Cheng, M., Zhang, L.-M., Chu, J.-Q., Li, X.-Z. and Kong, D.-M. (2019) Dinuclear Hg^{II} Tetracarbene Complex-Triggered Aggregation-Induced Emission for Rapid and Selective Sensing of Hg²⁺ and Organomercury Species. *Chemical Science*, **10**, 4220-4226. <https://doi.org/10.1039/C8SC05714A>
- [19] Su, M., Liu, C., Zhang, Y., Rong, X., Wang, X., Li, X., Wang, K., Zhu, H. and Zhu, B. (2022) Rational Design of a Water-Soluble TICT-AIEE-Active Fluorescent Probe for Mercury Ion Detection. *Analytica Chimica Acta*, **1230**, Article ID: 340337. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.340337>
- [20] Xu, Z., Kim, G.-H., Han, S.J., Jou, M.J., Lee, C., Shin, I. and Yoon, J. (2009) An NBD-Based Colorimetric and Fluor-

- rescent Chemosensor for Zn²⁺ and Its Use for Detection of Intracellular Zinc Ions. *Tetrahedron*, **65**, 2307-2312. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2009.01.035>
- [21] Jurowski, K., Szewczyk, B., Nowak, G. and Piekoszewski, W. (2014) Biological Consequences of Zinc Deficiency in the Pathomechanisms of Selected Diseases. *JBIC Journal of Biological Inorganic Chemistry*, **19**, 1069-1079. <https://doi.org/10.1007/s00775-014-1139-0>
- [22] Frederickson, C.J., Koh, J.-Y. and Bush, A.I. (2005) The Neurobiology of Zinc in Health and Disease. *Nature Reviews Neuroscience*, **6**, 449-462. <https://doi.org/10.1038/nrn1671>
- [23] Singhal, D., Althagafi, I., Kumar, A., Yadav, S., Prasad, A.K. and Pratap, R. (2020) Thieno[3,2-c]Pyran: An ESIPT Based Fluorescence “Turn-on” Molecular Chemosensor with AIE Properties for the Selective Recognition of Zn²⁺ Ion. *New Journal of Chemistry*, **44**, 12019-12026. <https://doi.org/10.1039/D0NJ02236E>
- [24] Marambio-Jones, C. and Hoek, E.M.V. (2010) A Review of the Antibacterial Effects of Silver Nanomaterials and Potential Implications for Human Health and the Environment. *Journal of Nanoparticle Research*, **12**, 1531-1551. <https://doi.org/10.1007/s11051-010-9900-y>
- [25] Wang, J., Liu, A.-Y., Wu, B.-C., Wen, Q.-L., Pu, Z.-F., Zhao, R.-X., Ling, J. and Cao, Q. (2021) Highly Selective and Rapid Detection of Silver Ions by Using a “Turn on” Non-Fluorescent Cysteine Stabilized Gold Nanocluster Probe. *Analytical Methods*, **13**, 2099-2106. <https://doi.org/10.1039/D1AY00241D>
- [26] Gupta, A. and Kumar, N. (2016) A Review of Mechanisms for Fluorescent “Turn-on” Probesto Detect Al³⁺ Ions. *RSC Advances*, **6**, 106413-106434. <https://doi.org/10.1039/C6RA23682K>
- [27] Inan-Eroglu, E. and Ayaz, A. (2018) Is Aluminum Exposure a Risk Factor for Neurological Disorders? *Journal of Research in Medical Sciences*, **23**, Article No.51. https://doi.org/10.4103/jrms.JRMS_921_17
- [28] Hiremath, S.D., Gawas, R.U., Mascarenhas, S.C., Ganguly, A., Banerjee, M. and Chatterjee, A. (2019) A Water-Soluble AIE-Gen for Organic-Solvent-Free Detection and Wash-Free Imaging of Al³⁺ Ions and Subsequent Sensing of F⁻ Ions and DNA Tracking. *New Journal of Chemistry*, **43**, 5219-5227. <https://doi.org/10.1039/C9NJ00418A>
- [29] Lieu, P.T., Heiskala, M., Peterson, P.A. and Yang, Y. (2001) The Roles of Iron in Health and Disease. *Molecular Aspects of Medicine*, **22**, 1-87. [https://doi.org/10.1016/S0098-2997\(00\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S0098-2997(00)00006-6)
- [30] VanderMeulen, H. and Sholzberg, M. (2018) Iron Deficiency and Anemia in Patients with Inherited Bleeding Disorders. *Transfusion and Apheresis Science*, **57**, 735-738. <https://doi.org/10.1016/j.transci.2018.10.015>
- [31] Yu, J., Qiu, S., Zhang, K., Zhou, T., Ban, X., Duan, Y., Jia, D., Zhu, Q. and Zhang, T. (2022) A Novel Thermally-Activated Delayed Fluorescent Probe Based on Hydroxyl as Identify Group for Detection of Iron Ions. *Journal of Molecular Structure*, **1251**, Article ID: 132074. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.132074>