

马来腈修饰的钡离子荧光传感器

孔春燕,赵宏睿,胡凯丽,崔雪娇,刘世楷,王广银,王芳,陈玉婷

(德州学院 化学化工学院,山东 德州 253023)

摘要:通过荧光发射光谱测试探讨了对氰基苯-马来腈希夫碱对不同金属离子的选择识别性能。系统的光学性质研究得知:在乙腈水溶液中,对氰基苯-马来腈希夫碱与 Ba^{2+} 以 1:1 的化学计量比络合后,其在 435 nm 位置最大荧光发射强度增加了 1.92 倍,并伴随 19 nm 红移到 454 nm,表明该化合物对 Ba^{2+} 具有明显的荧光检测信号响应,最低检测限为 $4.2 \mu M$;金属离子及酸性环境干扰实验显示对氰基苯-马来腈希夫碱具有良好的抗干扰性能。结果表明,对氰基苯-马来腈希夫碱可灵敏检测中性和酸性环境中 Ba^{2+} 的潜能。在实际样品中的应用表明,对氰基苯-马来腈希夫碱能有效地检测实际水样中的 Ba^{2+} 。

关键词:荧光传感器;马来腈;希夫碱;钡离子

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

Diaminomaleonitrile-based fluorescent probe for Ba^{2+}

KONG Chunyan, ZHAO Hongrui, HU Kaili, CUI Xuejiao,

LIU Shikai, WANG Guangyin, WANG Fang, CHEN Yuting

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Dezhou University, Dezhou, Shandong 253023, China)

Abstract: The *p*-cyanobenzaldehyde-diaminomaleonitrile-based Schiff compound was synthesized and its sensing properties to different metal ions were studied through the fluorescence emission spectroscopy. Systemic optical investigation showed that after the complexation of this compound with Ba^{2+} with a stoichiometric ratio of 1:1 in acetonitrile-water solution, the fluorescence emission intensity at 435 nm increased by 1.92 times, synchronously accompanied by red-shift of 19 nm to 454 nm, suggesting that it has obvious sensitive fluorescence response to Ba^{2+} , with a minimum detection limit of $4.2 \mu M$. Moreover, the metal ion and acid environment disturbance experiment displayed better anti-disturbance performance to this *p*-cyanobenzaldehyde-diaminomaleonitrile-based Schiff. These results endow *p*-cyanobenzaldehyde-diaminomaleonitrile-based Schiff compound the sensitive sensing ability to Ba^{2+} in neutral and acid environments. The application in actual samples shows that this compound exhibits excellent detection potential to Ba^{2+} in tap and river water.

Key words: fluorescent probe; diaminomaleonitrile; Schiff base; barium ion

随着社会的发展,金属离子污染问题已引起全球的共同关注,亦是我国经济和社会可持续发展所面临的问题之一。例如铅、镉、汞等金属在工业生产中具有广泛的应用,当以阳离子形式随工业废水排放到自然界后,对整个水系污染严重,给生态系统和人类生存环境造成巨大危害。与有机污染物不同,金属离子不能被降解,一旦被排放到环境中就很难自消除,且在食物链的生物放大作用下,可成千倍地富集,最后进入人体导致重金属中毒,对身体造成严重伤害。因此,工业废水金属离子的去除非常必要,发展高效、便捷的水中金属离

收稿日期:2021-06-01

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2020MB012);山东省大学生创新创业计划项目(S202010448028)

作者简介:孔春燕(1965—),女,山东德州人,教授,主要从事荧光分子探针的性能研究。

陈玉婷(1970—),女,山东济南人,教授,博士,主要从事荧光功能材料制备及性能研究,本文通信作者。

E-mail:ch_yt@126.com

子检测方法对化学化工、环境科学及生命科学等具有重要意义。

在诸多检测方法中,荧光检测已成为研究的热点之一^[1-2]。与其他分析测试技术相比,荧光分子探针具有选择性好、成本低、易操作等优点,且通常以独立的分子状态分散于被检测体系中并发出检测信号,在单分子水平上实现了原位、实时检测,分析结果灵敏、精确^[3-5]。基于不同的检测需求,人们已制备了数目众多、功能各异的荧光分子探针^[6-8]。但目前已报道的 Ba^{2+} 荧光分子探针较少^[9-10],开发灵敏、易于制备的检测 Ba^{2+} 的荧光分子探针是当前各监测领域的迫切需求。

在荧光分子探针构筑过程中,离子受体设计一般选择含较强配位能力的 N、O、S 等原子的基团作为金属离子结合位点,通过特定连接方式使其与信号基团桥连,得到灵敏检测金属离子性能的荧光分子探针^[11-13]。易于合成的亚胺($-\text{C}=\text{N}-$)基团具有较强的金属配位能力,与荧光基团连接后的 $p-\pi$ 共轭作用可增加荧光分子的共轭性;当 $-\text{C}=\text{N}-$ 基团中氮原子与金属离子配位后,可导致荧光分子共轭度变化,从而表现出灵敏的光谱信号变化^[14-15]。鉴于此,结合二氨基马来腈对金属离子较强的络合性能^[16-17],本实验用二氨基马来腈和对氰基苯甲醛合成氰基苯-马来腈希夫碱化合物,并探讨其对金属离子的荧光检测性能,特别是对 Ba^{2+} 的荧光“关-开”检测性能。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

所用试剂均为市售分析纯或化学纯,未经过进一步提纯;实验所用各种金属盐由上海国药试剂公司提供;核磁共振氢谱(hydrogen nuclear magnetic resonance, HNMR)用 Bruker DPX 400 MHz 核磁谱仪测试;元素分析用 Elementar Vavio El III 分析仪测试;红外光谱(infrared spectroscopy, IR)用傅立叶变换红外光谱仪测试;紫外吸收光谱用 U-4100 光谱仪完成;稳态荧光在日立 F-4500 荧光光度计上操作。试样在 1.00 cm 石英荧光杯中测量,所有实验均在 25 °C 下操作。

1.2 对氰基苯-马来腈希夫碱荧光分子探针的制备

将 2 mmol(0.216 g)的二氨基马来腈、2 mmol(0.262 g)对氰基苯甲醛放入盛有 20 mL 无水乙醇的圆底烧瓶后,升温至 75 °C 并继续反应 4 h;将反应所得混合物过滤、无水乙醇洗涤、真空干燥箱 40 °C 干燥后,得到对氰基苯-马来腈希夫碱分子,质量 360.8 mg,产率为 59%。元素分析: $\text{C}_{12}\text{H}_7\text{N}_5$ 理论值(%),C 65.15, H 3.19, N 31.66;实际测量值,C 65.26, H 3.23, N 31.46。IR (KBr), $\bar{\nu}/\text{cm}^{-1}$: 3 397, 3 292, 3 190, 2 237, 2 224, 2 208, 1 625, 1 606, 1 571, 1 397, 1381, 834, 546。¹HNMR (400 MHz): δ 8.32 (s, 1H), 8.27 (s, 2H), 8.25 (d, 2H, $J=4.8\text{Hz}$), 7.95 (d, 2H, $J=10.2\text{Hz}$)。

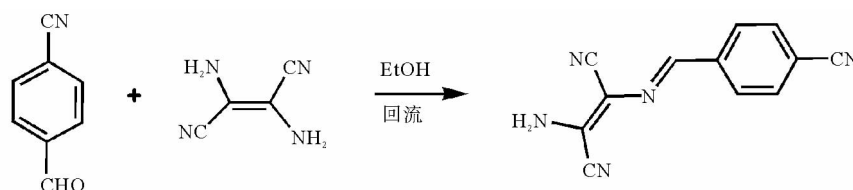


图 1 对氰基苯-马来腈希夫碱分子合成示意图

Fig. 1 Synthesis of *p*-cyanobenzaldehyde-diaminomaleonitrile-based Schiff compound

1.3 光谱实验溶液配制

称取 0.2 mmol 的对氰基苯-马来腈希夫碱,将其移入 10 mL 容量瓶后用 5% 水-乙腈混合溶剂定容配制成浓度为 2×10^{-3} M 的母液;准确称取一定量的 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CdCl}_2 \cdot 5/2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 CaCl_2 、 BaCl_2 、 NaCl 、 $\text{Mg}(\text{SO}_4)_2$ 、 AlCl_3 、 KCl 等金属盐溶于 5% 水-乙腈混合溶剂中,配成 2×10^{-3} M 的金属盐母液。根据紫外吸收光谱,确定氰基苯-马来腈希夫碱最适测试浓度为 40 μM ;量取 0.2 mL 2×10^{-3} M 马来腈希夫碱荧光分子的母液并置于 10 mL 容

量瓶中,根据不同比例量取一定量的金属盐溶液分别放入上述容量瓶中,用5%水-乙腈混合溶剂稀释至10 mL。20 min后测定所配溶液的紫外吸收及荧光发射光谱,研究对氰基苯-马来腈希夫碱对所测金属离子的光谱学响应。

2 结果与讨论

2.1 金属离子选择性

为了研究对氰基苯-马来腈希夫碱化合物对金属离子的选择识别特性,以 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ba^{2+} 、 Co^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等金属离子作为研究对象,分别测试了该化合物在浓度为 $40 \mu\text{M}$ 的5%水-乙腈混合溶剂中与10倍当量的不同金属离子混合后的荧光发射光谱性质。如图2所示,对氰基苯-马来腈希夫碱化合物在435 nm位置有一弱荧光发射峰;加入10倍当量的 Ba^{2+} 后,其在435 nm的荧光发射明显增加,发射强度增加到1.92倍,同时伴随着19 nm红移到454 nm;其他金属离子如 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Co^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等加入后,该化合物在435 nm处最大荧光发射基本没有变化。上述数据表明对氰基苯-马来腈希夫碱化合物对 Ba^{2+} 离子具有明显的荧光增强响应,具有荧光“关-开”型识别 Ba^{2+} 的潜能。

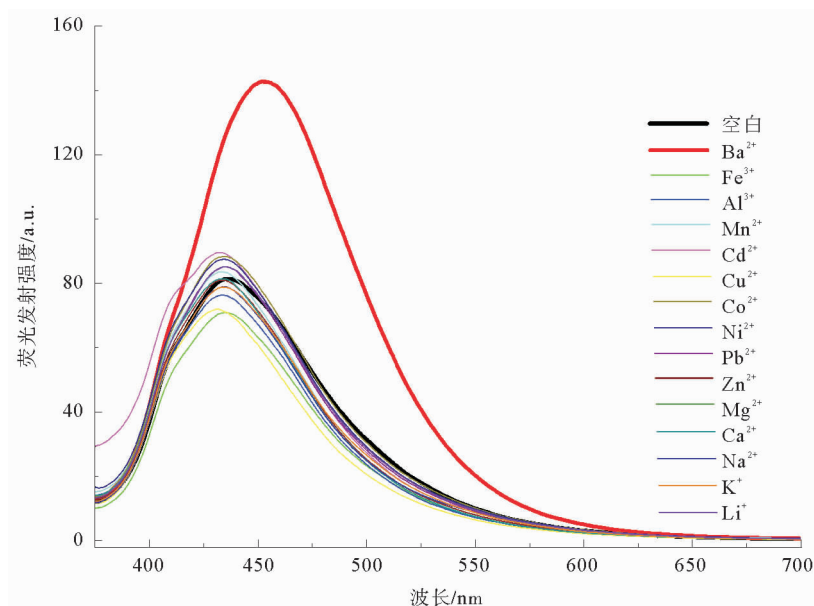


图2 对氰基苯-马来腈与不同金属离子作用后的荧光发射光谱

Fig. 2 Fluorescence emission of *p*-cyanobenzaldehyde-diaminomaleonitrile-based compound after adding different metal ions

2.2 光谱滴定实验

鉴于对氰基苯-马来腈化合物对 Ba^{2+} 的明显光谱学响应,在该化合物浓度为 $40 \mu\text{M}$ 的5%水-乙腈混合溶剂中分别加入不同浓度的 Ba^{2+} ,测试荧光发射光谱性质。如图3(a)所示:随着溶液中加入 Ba^{2+} 的量从0增加到10倍当量时(浓度从40增加到 $400 \mu\text{M}$),对氰基苯-马来腈在435 nm处最大荧光发射强度逐渐增强,并慢慢红移到454 nm;继续增加 Ba^{2+} 浓度至20倍当量,其荧光发射光谱基本不变。根据 Benesi-Hildebrand 方程,加入的 Ba^{2+} 在 $40 \sim 400 \mu\text{M}$ 范围内, $1/(F - F_{\min})$ 和 $1/[\text{Ba}^{2+}]$ 之间呈现良好的线性关系 ($y = 0.000352595 + 0.07731x, R^2 = 0.99935$), F 和 F_{\min} 分别为不同 Ba^{2+} 浓度和未加 Ba^{2+} 时的荧光强度, $y = 1/(F - F_{\min}), x = 1/[\text{Ba}^{2+}]$ 。表明对氰基苯-马来腈与 Ba^{2+} 之间可能为1:1络合关系,如图3(b)。此外,还进行了对氰基苯-马来腈和 Ba^{2+} 之间的荧光 Job's plot 实验,横坐标 $[\text{Ba}^{2+}]/([\text{Ba}^{2+}] + [\text{对氰基苯-马来腈化合物}])$ 为混合体系 Ba^{2+} 的摩尔分数,纵坐标为对氰基苯-马来腈在454 nm处荧光发射强度,如图3(c)。

由该图可清楚看到,在 Ba^{2+} 摩尔分数为 0.5 处荧光最强,再次证实了对氰基苯-马来腈与 Ba^{2+} 之间 1:1 的络合关系,显示了二者之间可能的络合方式,如图 3(d)^[18]。对氰基苯-马来腈分子中氨基、亚胺基团较强的金属络合能力,结合 Ba^{2+} 独特的电子结构特征,二者之间形成较稳定的配合物,抑制了对氰基苯-马来腈分子内转动等,导致其荧光发射增强。基于上述荧光滴定实验中对氰基苯-马来腈与 Ba^{2+} 线性关系,根据公式 $D=3\delta/k$ (δ 是空白溶液标准偏差,样本数 $n=3$; k 是探针荧光发射强度与 Ba^{2+} 浓度关系曲线的斜率),得出该探针化合物对 Ba^{2+} 的检测底限为 $4.2 \mu\text{M}$ ^[19-20],显示对氰基苯-马来腈对 Ba^{2+} 具有灵敏的检测潜能。

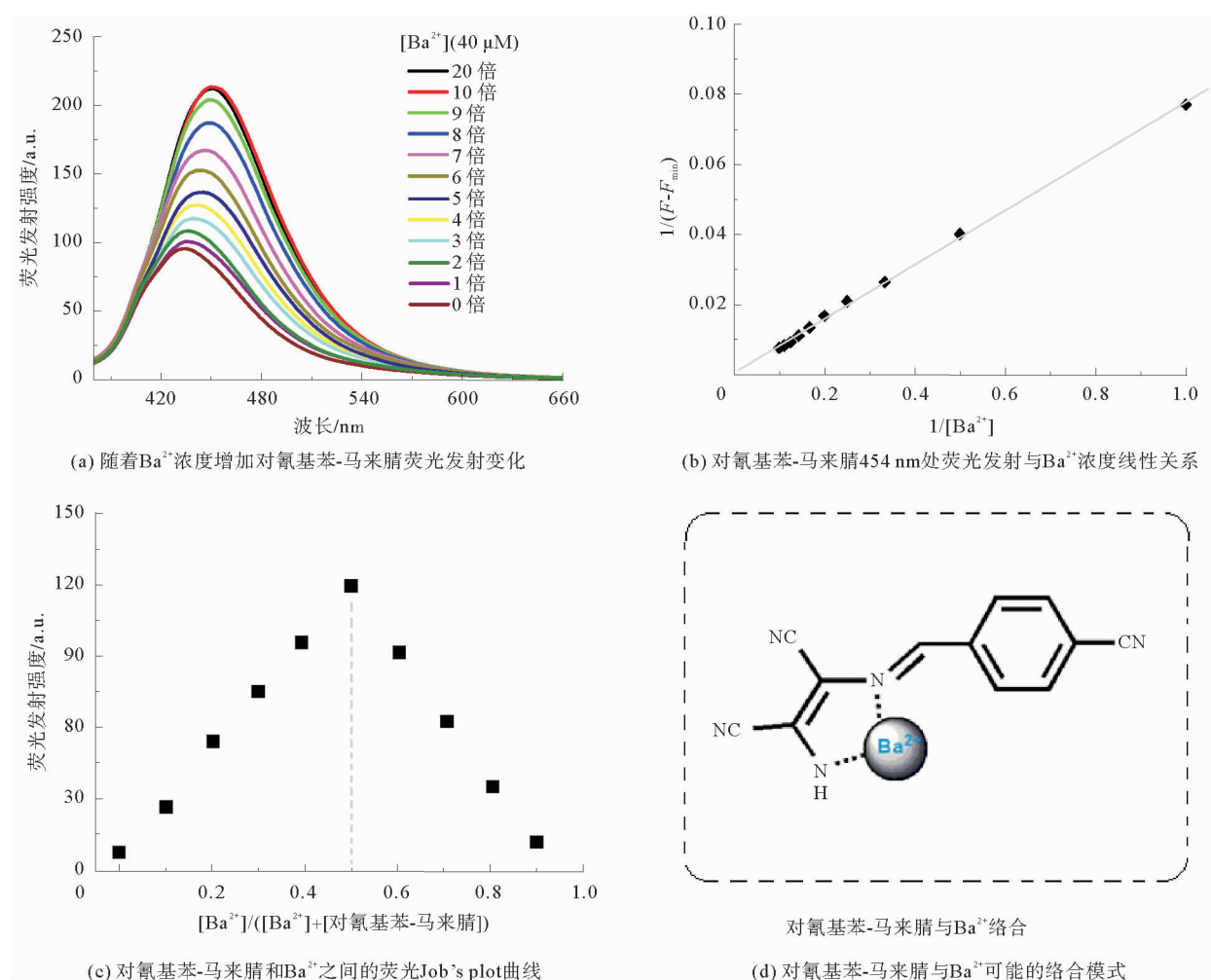


图 3 对氰基苯-马来腈与 Ba^{2+} 荧光滴定实验,荧光工作曲线及二者络合模式

Fig. 3 Fluorescence titration experiment of *p*-cyanobenzaldehyde-diaminomaleonitrile-based compound with Ba^{2+} , fluorescence Job's plot as well as the binding stoichiometry between this compound and Ba^{2+}

2.3 金属离子竞争实验

为了排除其他金属离子的干扰,在 5% 水-乙腈混合溶剂中,浓度为 $40 \mu\text{M}$ 的对氰基苯-马来腈中同时加入 10 倍当量的 Ba^{2+} 和其他不同金属离子,测试其荧光发射及紫外吸收光谱。如图 4 所示,马来腈希夫碱荧光分子中加入 10 倍当量的 Ba^{2+} 后,其在 454 nm 位置有一强的荧光发射;当把 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Co^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 等金属离子加入对氰基苯-马来腈- Ba^{2+} 混合体系后,其荧光发射光谱几乎没有变化,且混合体系的紫外吸收光谱也几乎没有变化,表明即使 Ba^{2+} 与其他金属离子共存时,对氰基苯-马来腈仍对 Ba^{2+} 表现出良好的选择检测性能。

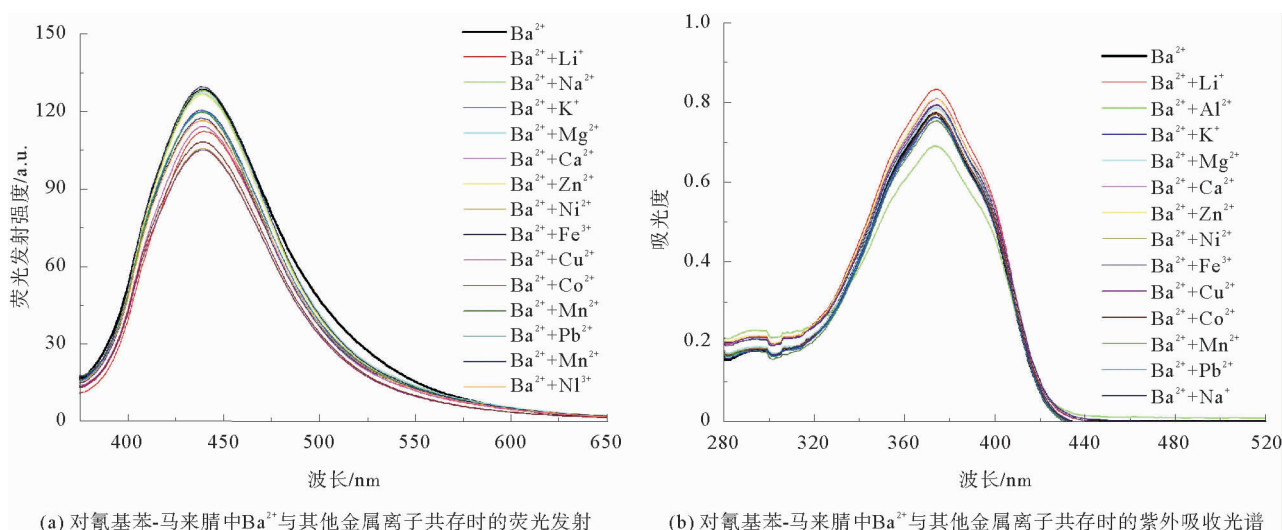


图 4 对氰基苯-马来腈中 Ba²⁺ 与其他金属离子共存时的光谱

Fig. 4 Optical properties of *p*-cyanobenzaldehyde-diaminomaleonitrile-based compound under the coexistence of Ba²⁺ with other metal ions

2.4 抗酸性光谱学研究

鉴于对氰基苯-马来腈化合物中含有对质子敏感的亚胺氮原子,研究了该化合物在浓度为 40 μM 的 5% 水-乙腈混合溶剂中分别加入不同当量比例 HCl 时的光谱学性质。如图 5(a)所示,随着加入 HCl 浓度增加,从 0 增到 10,甚至 500 倍当量(pH=7~4.8)时,对氰基苯-马来腈化合物荧光发射光谱没有明显变化。之后,对氰基苯-马来腈化合物中加入 10 倍 HCl 和 Ba²⁺ 时的荧光发射光谱,如图 5(b)所示,对氰基苯-马来腈化合物中加入 10 倍当量的 HCl 时,其荧光发射光谱基本没有变化;但对氰基苯-马来腈-HCl-Ba²⁺ (三者当量比 1:10:10)混合体系荧光增强且红移,与对氰基苯-马来腈-Ba²⁺ 混合体系荧光光谱类似,表明该化合物具有识别酸性环境(pH=4.8~7)下 Ba²⁺ 的潜能。

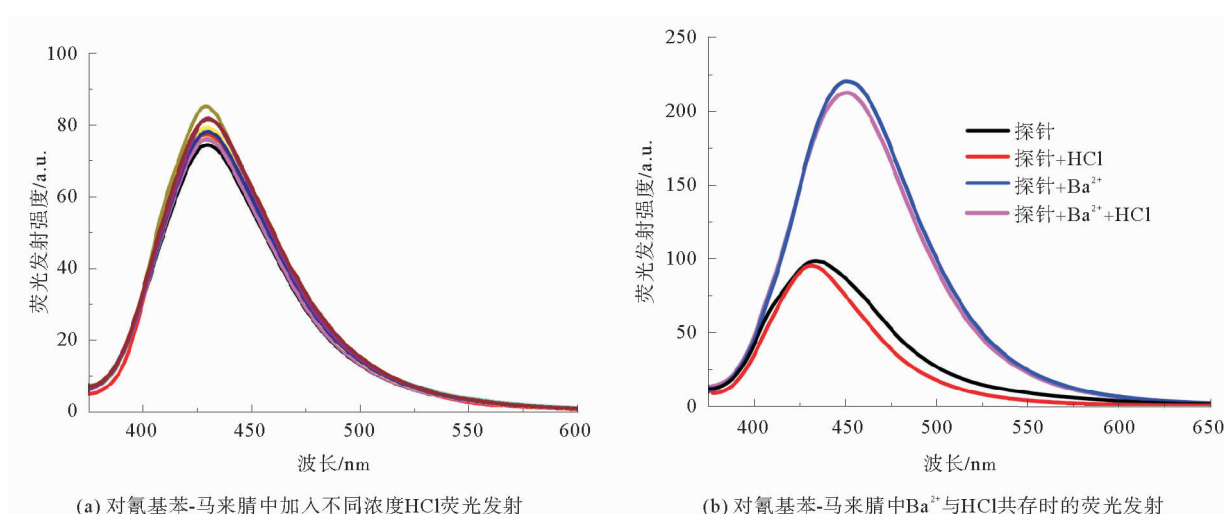


图 5 对氰基苯-马来腈在不同浓度 HCl 及 HCl 与 Ba²⁺ 共存时的荧光发射光谱

Fig. 5 Fluorescence changes of *p*-cyanobenzaldehyde-diaminomaleonitrile-based compound along with the increasing HCl or HCl-Ba²⁺ coexistence

3 实际水样检测

为了进一步探索对氰基苯-马来腈化合物在实际水样中对 Ba^{2+} 的应用潜力,采集了德城区域徒骇河和自来水 2 种实际水样,通过膜预处理除去悬浮物,并通过原子吸收光谱法确定所取水样中没有 Ba^{2+} ,然后在实际水样中加入不同量的 Ba^{2+} ,计算其回收率。结果如表 1 所示,对氰基苯-马来腈化合物对 Ba^{2+} 的回收率为 99%~102%,表明对氰基苯-马来腈化合物对实际水样中 Ba^{2+} 的分析检测具有较高的准确度及广泛的应用前景^[21]。

表 1 对氰基苯-马来腈对河水或自来水中钡离子实际检测性能

Tab. 1 Detection of *p*-cyanobenzaldehyde-diaminomaleonitrile-based compound for Ba^{2+} from river/tap water samples

水样	加入 Ba^{2+}/M	测出 Ba^{2+}/M	回收率/%	相对标准偏差 ^a /%
河水	—	—		
合成水 1 ^b	2.0×10^{-6}	$(2.03 \pm 0.02) \times 10^{-6}$	101.5	1.5
合成水 2 ^b	2.0×10^{-5}	$(2.02 \pm 0.06) \times 10^{-5}$	101	1.0
合成水 3 ^b	2.0×10^{-4}	$(2.01 \pm 0.05) \times 10^{-4}$	100.5	0.5
水样	加入 Ba^{2+}/M	测出 Ba^{2+}/M	回收率/%	相对标准偏差 ^a /%
自来水	—	—		
合成水 1 ^b	2.0×10^{-6}	$(2.02 \pm 0.10) \times 10^{-6}$	101	1.0
合成水 2 ^b	2.0×10^{-5}	$(2.04 \pm 0.06) \times 10^{-5}$	102	2.0
合成水 3 ^b	2.0×10^{-4}	$(1.98 \pm 0.05) \times 10^{-4}$	99	1.0

^a $n=3$; ^b加入 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Li^+ 、 Na^+ 及 K^+ ($10.00 \mu\text{M}$) 河水或自来水; 测试条件: $40 \mu\text{M}$ 对氰基苯-马来腈化合物在 CH_3CN -河水(或自来水)(体积比 19:1)混合溶剂。

4 结论

研究了对氰基苯-马来腈希夫碱荧光分子对不同金属离子的光谱学识别性能。通过详细的光谱学性质研究得知:对氰基苯-马来腈希夫碱中加入 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Co^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等金属离子时,其荧光发射光谱学性质基本不变; Ba^{2+} 存在时,该化合物荧光发射强度增加了 1.92 倍,同时发生了 19 nm 红移,表现出对 Ba^{2+} 良好的识别响应,检测底限为 $4.2 \mu\text{M}$;且 Ba^{2+} 在金属离子竞争及抗酸实验中具有出良好的竞争性。这些性质赋予对氰基苯-马来腈希夫碱灵敏检测中性及酸性环境中 Ba^{2+} 的潜能。实际样品中的应用表明,对氰基苯-马来腈希夫碱可有效地用于实际水样中 Ba^{2+} 的检测。

参考文献:

- [1] YAO S, XIONG Y, WEN H, et al. A multifunctional benzothiadiazole-based fluorescence sensor for Al^{3+} , Cr^{3+} and Fe^{3+} [J/OL]. CrystEngComm, 2021, 23(9): 1898-1905.
 - [2] PARK S, KWON N, LEE J, et al. Synthetic ratiometric fluorescent probes for detection of ions [J]. Chemical Society Reviews, 2020, 49: 143-179.
 - [3] GONG H H, CHENG Y P, ZHANG Y, et al. A novel fluorous effect induced fluorescence sensor for Cu(II) detection in the organic phase with high sensitivity [J/OL]. Materials Chemistry Frontiers, 2021. DOI: 10.1039/D1QM00307K.
 - [4] DENG F, LIU L, QIAO Q, et al. A general strategy to develop cell membrane fluorescent probes with location- and target-specific fluorogenicities: A case of a Zn^{2+} probe with cellular selectivity [J]. Chemical Communication, 2019, 55: 15045-15048.
 - [5] 胡斌, 张益, 朱琳, 等. 一种吡啶三唑修饰的香豆素类荧光探针用于 Cu^{2+} 的选择性识别 [J]. 无机化学学报, 2020, 36(7): 1375-1382.
- HU Bin, ZHANG Yi, ZHU Lin, et al. A pyridine triazole modified coumarin fluorescent sensor for selective detection of Cu^{2+}

- ions[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2020, 36(7): 1375-1382.
- [6] KOLANOWSKI J L, LIU F, NEW E J. Fluorescent probes for the simultaneous detection of multiple analytes in biology[J]. Chemical Society Reviews, 2018, 47: 195-208.
- [7] DONG H, WEI T, LIN Q, et al. 1,8-Naphthalimide-based fluorescent chemosensors: Recent advances and perspectives[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8(39): 13501-13529.
- [8] 罗伟杰, 赵波, 张仕祿, 等. 以9-蒽醛为荧光基团的吡啶衍生物荧光探针对 Fe^{3+} 和 Cu^{2+} 的检测[J]. 无机化学学报, 2021, 37(3): 421-430.
- LUO Weijie, ZHAO Bo, ZHANG Shilu, et al. Detection of Fe^{3+} and Cu^{2+} by fluorescence probe of pyrazoline derivatives with 9-anthraldehyde as fluorescent group[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2021, 37(3): 421-430.
- [9] 胡树振, 王雪花, 陈传峰. 基于新的亚胺蒽醌生色离子载体的选择性碱土金属离子传感器[J]. 高等学校化学学报, 2011, 32(9): 2133-2138.
- HU Shuzhen, WANG Xuehua, CHEN Chuanfeng, et al. Selective alkaline earth metal ions sensing based on new iminoanthraquinone chromoionophores[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2011, 32(9): 2133-2138.
- [10] QIU J, LI Z, WU A, et al. Colorimetric detection of Ba^{2+} , Cd^{2+} and Pb^{2+} based on a multifunctionalized Au NPs sensor[J]. The Analyst, 2019, 144(17): 5081-5089.
- [11] CHEN Y, PAN H, JIANG J, et al. A novel azacrown [N, S, O]-styryl-modified boron-phenylpyrrolin: Coordination-mode-transition-induced colorimetric and fluorescent OFF-ON-OFF chemosensor for quantifying Cu^{2+} [J]. European Journal of Inorganic Chemistry, 2017, 19: 5254-5259.
- [12] WU S, WANG T, LIU S. A highly selective turn-on fluorescent chemosensor for copper(II) ion[J]. Tetrahedron, 2010, 66: 9655-9658.
- [13] LAN H, LIU B, YI T, et al. Dual-channel fluorescence "turn on" probe for Cu^{2+} [J]. Sensors and Actuators B, 2012, 173: 811-816.
- [14] ZHANG J, ZHAO Z, SHANG H, et al. An easy-to-synthesize multi-photoresponse smart sensor for fast detecting Zn^{2+} and quantifying Fe^{3+} based on the enol/keto binding mode[J]. New Journal of Chemistry, 2019, 43(35): 14179-14189.
- [15] MATHIVANAN M, THARMALINGAM B, LIN C H, et al. ESIPT-active multi-color aggregation-induced emission features of triphenylamine-salicylaldehyde-based unsymmetrical azine family[J]. CrystEngComm, 2020, 22(2): 213-228.
- [16] 陈邦, 王少静, 宋战科, 等. 一种用于活细胞中检测 Zn^{2+} 的茶酚席夫碱类荧光探针[J]. 无机化学学报, 2017, 33(10): 1722-1730.
- CHEN Bang, WANG Shaojing, SONG Zhanke, et al. Naphthol-based Schiff base as a selective fluorescent probe for detecting Zn^{2+} in living cells[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2017, 33(10): 1722-1730.
- [17] YANG Y, GAO C, DONG D, et al. A pyrene-based fluorescent and colorimetric chemodosimeter for the detection of ClO^- ions[J]. Analytical Methods, 2016, 8(4): 805-809.
- [18] WANG F, LI C, CHEN Y, et al. A smart single molecular probe for $\text{Cu}^{2+}/\text{Fe}^{3+}/\text{Mg}^{2+}$ by three-emission behaviors[J/OL]. Dyes and Pigments, 2019, 171. DOI: 10.1016/j.dyepig.2019.107667.
- [19] SARKAR D, CHOWDHURY M, DAS P. Naphthalimide based fluorescent organic nanoparticles in selective sensing of Fe^{3+} and as a diagnostic probe for $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ transition[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2021, 9(2): 494-507.
- [20] 张成路, 孙越冬, 王静, 等. 高选择性检测 Hg^{2+} 的喹啉酮衍生物荧光探针的合成及应用[J]. 高等学校化学学报, 2020, 41(8): 1785-1791.
- ZHANG Chenglu, SUN Yuedong, WANG Jing, et al. Synthesis and application of quinolinone derivative fluorescent probe for high selective detection of Hg^{2+} [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2020, 41(8): 1785-1791.
- [21] HE W, LIU Z. A fluorescent sensor for Cu^{2+} and Fe^{3+} based on multiple mechanisms[J]. RSC Advances, 2016, 6(64): 59073-59080.

(责任编辑:吕海亮)