

文章编号: 1673-3193(2024)06-0852-07

## 5, 10, 15, 20-四(五氟苯基)卟啉聚集体 荧光增强检测 Fe<sup>3+</sup>

伍嘉翔<sup>1</sup>, 谢龙<sup>1</sup>, 耿广威<sup>2</sup>, 宋豪非<sup>3</sup>

(1. 中北大学 化学与化工学院, 山西 太原 030051; 2. 河南牧业经济学院 理学部, 河南 郑州 450046;  
3. 河南牧业经济学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450046)

**摘要:** 以再沉淀法, 使用四氢呋喃作为良溶剂溶解5, 10, 15, 20-四(五氟苯基)卟啉(TPPP), 水作为不良溶剂诱导组装, 于常温下构筑了TPPP聚集体, 对其形貌结构及发光性质进行了表征。研究发现该聚集体在Fe<sup>3+</sup>存在的情况下, 荧光会明显增强, 因此该聚集体可作为荧光探针来检测Fe<sup>3+</sup>离子。通过检测, 确定了在5.0×10<sup>-8</sup>~5.18×10<sup>-6</sup> mol/L的Fe<sup>3+</sup>浓度范围内, 荧光探针荧光强度与Fe<sup>3+</sup>浓度之间呈线性关系, R<sup>2</sup>=0.993 56, 并计算得到了检出限为2.97×10<sup>-8</sup> mol/L。此外, TPPP聚集体荧光探针在检测Fe<sup>3+</sup>时具有较好的选择性和抗干扰性。最后通过纯净水、自来水、矿泉水的加标实验证明其具有良好的可行性, 加标回收率在95.02%~104.73%之间。

**关键词:** 卟啉; 自组装; 聚集诱导发光; 荧光探针; Fe<sup>3+</sup>

**中图分类号:** O631.2<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.06.014

**引用格式:** 伍嘉翔, 谢龙, 耿广威, 等. 5, 10, 15, 20-四(五氟苯基)卟啉聚集体荧光增强检测Fe<sup>3+</sup>[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(6): 852-858.

WU Jiexiang, XIE Long, GENG Guangwei, et al. 5, 10, 15, 20-tetrakis(pentafluorophenyl) porphine (TPPP) aggregate for the fluorescence-enhanced detection of Fe<sup>3+</sup>[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2024, 45(6): 852-858.

## 5, 10, 15, 20-Tetrakis (Pentafluorophenyl) Porphine (TPPP) Aggregate for the Fluorescence-Enhanced Detection of Fe<sup>3+</sup>

WU Jiexiang<sup>1</sup>, XIE Long<sup>1</sup>, GENG Guangwei<sup>2</sup>, SONG Haofei<sup>3</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
2. Department of Science, Henan University of Animal Husbandry & Economy, Zhengzhou 450046, China;  
3. School of Food and Biological Engineering, Henan University of Animal Husbandry & Economy, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** TPPP aggregates were constructed by reprecipitation method at room temperature using tetrahydrofuran as a good solvent to dissolve 5, 10, 15, 20-tetrakis(pentafluorophenyl) porphine (TPPP) and water as a bad solvent to induce the assembly, and their morphological structure and luminescent properties were characterized. It is found that the fluorescence of the aggregate is significantly enhanced in the presence of Fe<sup>3+</sup>, so the aggregate can be used as a fluorescent probe to detect Fe<sup>3+</sup> ions. Through detection, it is determined that there is a linear relationship between the fluorescence intensity of the probe and

收稿日期: 2023-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(22002035)

作者简介: 伍嘉翔(1999-), 男, 硕士生, 主要从事非金属卟啉超分子的研究。

通信作者: 谢龙(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事高分子纳米材料的合成及应用的研究。E-mail: xielong@nuc.edu.cn。

the concentration of Fe<sup>3+</sup> in the range of  $5.0 \times 10^{-8}$  to  $5.18 \times 10^{-6}$  mol/L with  $R^2=0.99356$  and the detection limit is calculated to be  $2.97 \times 10^{-8}$  mol/L. In addition, TPPP aggregate fluorescent probe has good selectivity and anti-interference in the detection of Fe<sup>3+</sup>. Finally, it is verified that it has good feasibility in the spiking experiments of pure water, tap water, and mineral water, the recovery rate of spiking is between 95.02% and 104.73%.

**Key words:** porphyrin; self-assembly; aggregation-induced emission; fluorescent probe; Fe<sup>3+</sup>

## 0 引言

超分子自组装是构筑基元通过非共价作用自发聚集形成结构有序并具有特定功能的超分子聚集体的过程。自组装过程的研究和应用涉及到民生、国防和科技等诸多领域,其中涉及到的自组装单元的种类也颇多<sup>[1-4]</sup>。卟啉(porphyrin)是一类母体为卟吩,外环有取代基的大分子杂环化合物,具有 18 个  $\pi$  电子的共轭结构,其母体卟吩由次甲基桥(=CH-)连接 4 个吡咯环构成。若卟吩环外的 H 被取代基所取代,则形成卟啉。卟啉被称为“生命之染料(the pigments of life)”,是构筑纳米结构最出色的组装基元之一<sup>[5-6]</sup>。Lee 等<sup>[7]</sup>在高温下实现了窄分散卟啉纳米线的合成。Guo 等<sup>[8]</sup>组装出形态依赖于中心金属离子的不同的超分子纳米结构,其可用于电子器件修饰。Wang 等<sup>[9]</sup>组装得到了具有光催化活性的纳米线和纳米八面体。Li 等<sup>[10]</sup>得到了具有球形、纤维状和片状形态的卟啉超分子纳米组件,其可作为水净化的可见光激发光催化剂。对于卟啉聚集体的研究主要集中于构筑、电子器件修饰、光催化等,而使用非金属卟啉聚集体作为荧光探针检测 Fe<sup>3+</sup>的研究比较少。

聚集诱导发光(Aggregation-Induced Emission, AIE)是具有 AIE 效应的材料在分散态下发光微弱甚至不发光,聚集后发光显著增强的现象。AIE 现象的发现和研究表明为荧光材料和光学领域的发展带来了新的机会。因为 AIE 材料在聚集状态下具有高荧光量子产率、优异的光稳定性和热稳定性等特点,所以它们在很多领域都具有重要的应用价值<sup>[11-14]</sup>。

铁(Fe)作为生物体不可缺少的金属元素之一,在氧摄取、氧代谢和电子转移等过程中发挥着重要作用,人体铁元素超标或缺乏都会影响人体健康,足见铁元素检测之重要性。目前多种检测方法,如化学分析法、电化学分析法、质谱分析法、荧光传感分析法等都可实现铁离子检测,其

中荧光传感分析法简单、快速、灵敏<sup>[15-16]</sup>。徐衡<sup>[17]</sup>等以 8-氨基喹啉为原料,经过重氮化、还原、酰化等步骤制备了 3 种噁二唑酮类化合物。这 3 种化合物可作为 Fe<sup>3+</sup> 荧光探针,其检测范围分别为  $2.0 \times 10^{-5} \sim 5.2 \times 10^{-4}$ ,  $1.0 \times 10^{-5} \sim 7.6 \times 10^{-4}$ ,  $1.0 \times 10^{-5} \sim 4.0 \times 10^{-4}$  mol/L,检出限分别为  $8.70 \times 10^{-6}$ ,  $1.64 \times 10^{-6}$ ,  $1.01 \times 10^{-6}$  mol/L。巩宇玄等<sup>[18]</sup>以香豆素和胍合成得到了新型荧光探针 L2 (3-氨基胍-(7-二乙基氨基-香豆素)), L2 可作为 Fe<sup>3+</sup> 荧光探针,其检测范围为  $1.2 \times 10^{-6} \sim 3.2 \times 10^{-6}$  mol/L,检测限为  $5.77 \times 10^{-7}$  mol/L。王冬梅<sup>[19]</sup>使用水热法合成了 ScF<sub>3</sub>: Ce<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup> 晶体,这种材料可作为 Fe<sup>3+</sup> 荧光探针,其检测范围为  $1.0 \times 10^{-5} \sim 8.0 \times 10^{-5}$  mol/L,检出限为  $1.52 \times 10^{-6}$  mol/L。周小丽等<sup>[20]</sup>利用含氮的三羟甲基氨基甲烷并采用水热法制备得到了氮掺杂碳点(N-CDs),其可作为 Fe<sup>3+</sup> 荧光探针,其检测范围为  $1.0 \times 10^{-7} \sim 8.0 \times 10^{-5}$  mol/L,检测限为  $6.1 \times 10^{-7}$  mol/L。当前,大多数制备 Fe<sup>3+</sup> 荧光探针的方法,实验条件要求高,制备方法相对复杂、费时,且 Fe<sup>3+</sup> 荧光探针多是荧光猝灭检测,因此亟待探究简单、温和、快速、新颖的 Fe<sup>3+</sup> 荧光探针制备方法。

本文利用再沉淀法,在常温下一步构筑了立方形貌的 TPPP 聚集体,相较于单体分子,聚集体呈现出很强的 AIE 效应,并研究了将其作为 Fe<sup>3+</sup> 荧光探针的相关性能。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

5, 10, 15, 20-四(五氟苯基)卟啉(质量分数 95%)、CoCl<sub>2</sub>(质量分数 99.7%)购于上海麦克林生化科技股份有限公司;四氢呋喃,分析纯,购于天津市永大化学试剂有限公司;FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O、ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O、BaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O、CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O,均为分析纯,购于天津市大茂化学试剂厂;Zr(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·

4H<sub>2</sub>O, 分析纯, 购于西亚试剂; Cs<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 分析纯, 购于罗恩试剂; KCl, 分析纯, 购于天津市风船化学试剂科技有限公司; Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 分析纯, 购于西陇科学股份有限公司; ScCl<sub>3</sub>(质量分数99.9%), 购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司; La(C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>2</sub>)<sub>3</sub>·4H<sub>2</sub>O(质量分数99.9%), 购于罗恩试剂; 实验用水均为去离子水。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 TPPP 聚集体溶液制备

室温下, 取0.0020 g TPPP加入5 mL四氢呋喃中, 得到TPPP(4.1×10<sup>-4</sup> mol/L)四氢呋喃溶液; 取0.3 mL TPPP(4.1×10<sup>-4</sup> mol/L)四氢呋喃溶液, 加入0.6 mL四氢呋喃, 再取8.1 mL去离子水, 加入上述吡啶溶液当中, 超声震荡30 s, 得到TPPP聚集体溶液, 即配即用。

### 1.3.2 Fe<sup>3+</sup>检测

室温下, 取3 mL TPPP聚集体溶液, 固定激发波长λ<sub>ex</sub>=450 nm, 测定其发射光谱, 以发射波长λ<sub>em</sub>=451 nm处的荧光强度I<sub>0</sub>作为对照, 之后加入不同浓度Fe<sup>3+</sup>溶液, 摇匀后, 使用相同激发波长测定其发射光谱, 取发射波长λ<sub>em</sub>=451 nm处的荧光强度I, 计算荧光增强倍率<sup>[21]</sup>

$$\Delta I = \frac{(I - I_0)}{I_0}, \quad (1)$$

并计算拟合曲线<sup>[22]</sup>

$$\Delta I = C + K_{sv} \times c_{Fe^{3+}}, \quad (2)$$

最后计算检出限<sup>[23]</sup>

$$\eta_{LOD} = \frac{3\sigma}{S}, \quad (3)$$

式中: C为干扰信号的常数项; K<sub>sv</sub>为ΔI对c<sub>Fe<sup>3+</sup></sub>的敏感比例常数; c<sub>Fe<sup>3+</sup></sub>为Fe<sup>3+</sup>浓度; σ为空白样品的标准偏差; S为由式(2)得到的拟合曲线的斜率。

## 1.3 样品表征

使用荧光光谱仪(F98, 上海棱光技术有限公司)测试样品的发光性能, 发射光谱的激发波长为450 nm, 检测波长为300~700 nm, 三维荧光光谱(EEM)的激发波长为200~900 nm, 发射波长为200~900 nm; 使用发射电子显微镜(SEM, S-4800, 日本日立公司)测试样品的微观形貌, 电压为10 kV; 使用紫外-可见分光光度计(TU-1901, 北京普析通用仪器有限责任公司)测试样品的紫外-可见吸收光谱。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SEM表征

为了证明制得了TPPP聚集体, 进行了SEM测试, 测试结果如图1所示, TPPP聚集体呈现出边长为100~400 nm左右的结晶性较好的立方体结构, 这与其他研究结果相似<sup>[24]</sup>。SEM结果证明, TPPP聚集体制备成功。

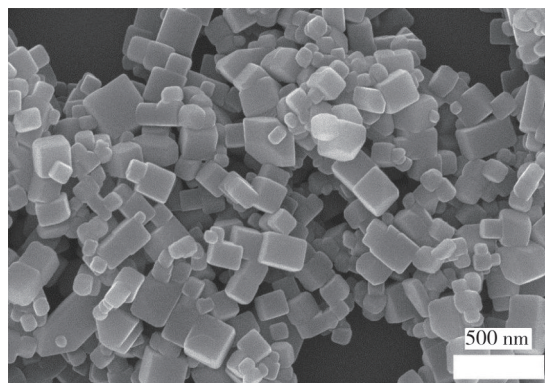


图1 TPPP聚集体的SEM图像

Fig.1 SEM image of TPPP aggregate

### 2.2 UV-vis表征

为了证明制得了TPPP聚集体, 进行了UV-vis测试, 测试结果如图2所示。可以看出, TPPP经过组装后, 其S带吸收峰由408 nm红移至460 nm处, Q带变窄, 其4个吸收峰发生红移, 分别由502 nm红移至520 nm处, 533 nm处红移至545 nm处, 580 nm红移至595 nm处, 636 nm处红移至655 nm处。

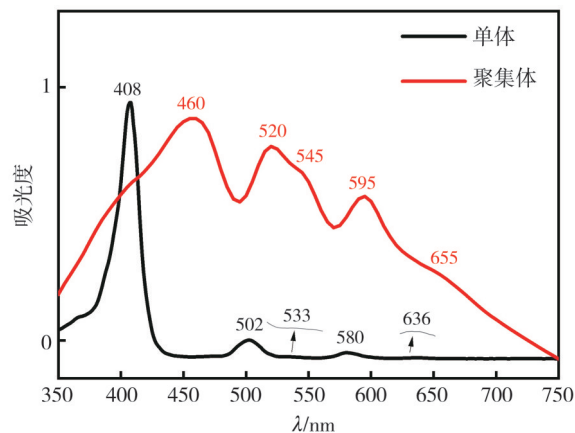


图2 TPPP单体和聚集体的紫外图谱

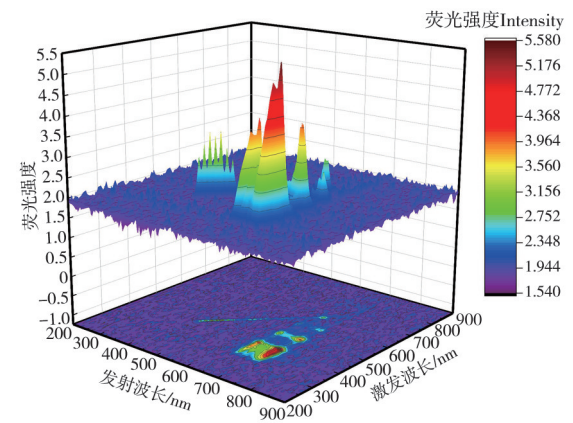
Fig.2 UV image of TPPP monomer and TPPP aggregate

组装后, 分子间排列方式发生变化, 可能发生J-型聚集, 其电子云分布和能级结构产生改变。

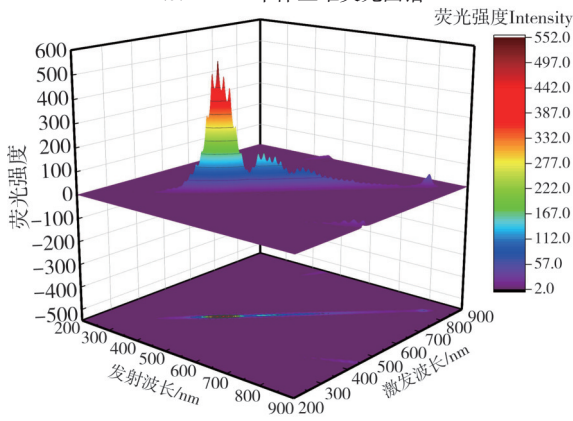
同时,其电子跃迁能量降低,从而使得S带和Q带的吸收峰发生红移。UV-vis结果证明TPPP聚集体制备成功。

### 2.3 EEM表征

为了研究TPPP聚集体的荧光性能,进行了EEM测试,结果如图3所示。对比聚集前、后样品的荧光强度可以看到聚集体的荧光信号增加了2个数量级,说明TPPP单体组装为TPPP聚集体后产生了明显的AIE效应<sup>[25]</sup>。TPPP聚集体在激发波长λ<sub>ex</sub>为450 nm,发射波长λ<sub>em</sub>为451 nm处的荧光强度较大,所以后续离子识别实验采用此最佳条件。



(a) TPPP单体三维荧光图谱



(b) TPPP聚集体三维荧光图谱

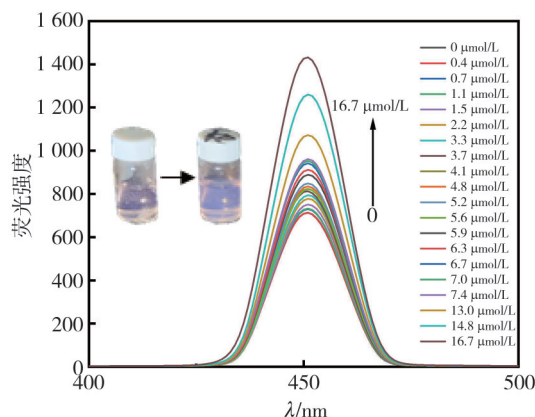
图3 TPPP单体和聚集体的三维荧光图谱

Fig. 3 EEM of TPPP monomer and TPPP aggregate

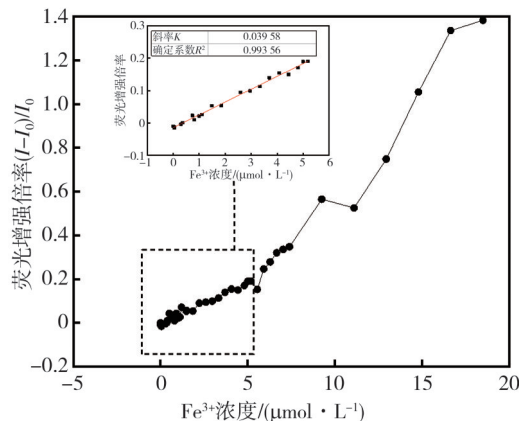
### 2.4 TPPP聚集体检测Fe<sup>3+</sup>浓度的分析

通过测试向TPPP聚集体溶液中加入不同浓度Fe<sup>3+</sup>后的荧光发射光谱(λ<sub>ex</sub>=450 nm),得到TPPP聚集体溶液检测Fe<sup>3+</sup>浓度的工作曲线如图4所示。可以看出,在5.0×10<sup>-8</sup>~5.18×10<sup>-6</sup> mol/L Fe<sup>3+</sup>浓度范围内,TPPP聚集体溶液的荧光强度伴随Fe<sup>3+</sup>浓度的增加而增强。将Fe<sup>3+</sup>浓度与TPPP聚集体溶液荧光强度(λ<sub>em</sub>=451 nm)代

入式(1)、(2)中,得到TPPP聚集体溶液检测Fe<sup>3+</sup>浓度的线性拟合曲线如图4(b)所示,其中ΔI=-0.014 37+0.039 58×c<sub>Fe<sup>3+</sup></sub>,其相关系数R<sup>2</sup>=0.993 56,在Fe<sup>3+</sup>浓度范围5.0×10<sup>-8</sup>~5.18×10<sup>-6</sup> mol/L内表现出良好的线性关系,其他范围可能受酸度变化影响没有呈线性关系。由式(3)可得TPPP聚集体溶液检测Fe<sup>3+</sup>的检出限为0.029 72 μmol/L,而中国生活饮用水卫生标准(GB 5749-2022)限制铁≤0.3 mg/L即5.4 μmol/L,本文检出限远低于国标,证明该材料检测Fe<sup>3+</sup>具有很高的灵敏度。



(a) Fe<sup>3+</sup>浓度对TPPP聚集体荧光光谱的影响(左为未加入Fe<sup>3+</sup>的TPPP聚集体溶液,右为加入Fe<sup>3+</sup>后的TPPP聚集体溶液)



(b) 荧光增强倍率和Fe<sup>3+</sup>浓度的线性拟合图

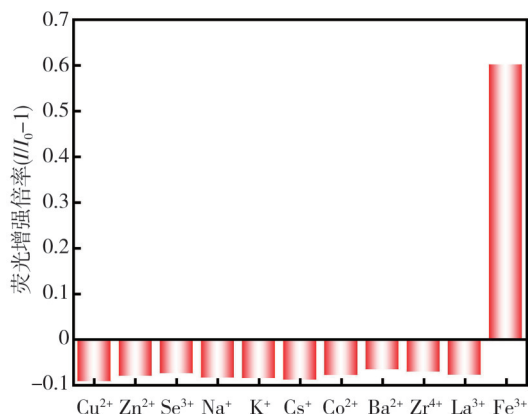
图4 Fe<sup>3+</sup>浓度对TPPP聚集体荧光强度的影响及荧光增强倍率与Fe<sup>3+</sup>浓度的线性拟合图

Fig. 4 Effect of Fe<sup>3+</sup> concentrations on fluorescence spectra of the TPPP aggregate solution and the plots of the values at 450 nm versus the concentrations of Fe<sup>3+</sup>

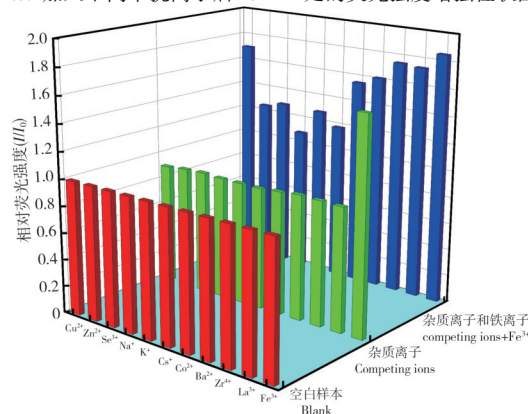
### 2.5 TPPP聚集体检测Fe<sup>3+</sup>的选择性和抗干扰性分析

为分析TPPP聚集体检测Fe<sup>3+</sup>时,其他金属离子的干扰,挑选常见金属离子(Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Sc<sup>3+</sup>、

$\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cs}^+$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Zr}^{4+}$ 、 $\text{La}^{3+}$ )进行了干扰实验。将0.3 mL浓度为 $1 \times 10^{-4}$  mol/L的不同金属离子溶液与0.3 mL相同浓度的 $\text{Fe}^{3+}$ 溶液分别加入3 mL TPPP 聚集体溶液中,测试荧光强度,测试结果如图5(a)所示。可以看出,11份 TPPP 聚集体溶液中分别加入 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Sc}^{3+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cs}^+$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Zr}^{4+}$ 、 $\text{La}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ ,只有加入 $\text{Fe}^{3+}$ 的 TPPP 聚集体溶液荧光强度增大,其余皆减小(可能由聚集体浓度降低导致),证明该材料检测 $\text{Fe}^{3+}$ 时具有选择性。再加入0.3 mL浓度为 $1 \times 10^{-4}$  mol/L的 $\text{Fe}^{3+}$ 溶液,测试荧光强度,测试结果如图5(b)所示,接上述操作再加入 $\text{Fe}^{3+}$ , TPPP 聚集体溶液荧光强度皆相对增大,证明该材料检测 $\text{Fe}^{3+}$ 时具有较好的抗干扰性。



(a) 加入不同干扰离子后451 nm处的荧光强度增强柱状图



(b) 加入不同干扰离子后再加入 $\text{Fe}^{3+}$ 后451 nm处的相对荧光强度柱状图

图5 TPPP聚集体溶液检测 $\text{Fe}^{3+}$ 的选择性和抗干扰性

Fig. 5 Selectivity and immunity to interference in the detection of  $\text{Fe}^{3+}$  by TPPP aggregate solutions

## 2.6 TPPP聚集体检测不同水样的 $\text{Fe}^{3+}$ 的可行性分析

为分析 TPPP 聚集体溶液检测 $\text{Fe}^{3+}$ 浓度的工作曲线用于检测实际样品的可行性,选取纯净

水、矿泉水、自来水为不同实际样品,进行加标回收实验,每个水样平行测定4次。将0.3 mL含有 $3.70 \mu\text{mol/L}$   $\text{Fe}^{3+}$ 的不同实际样品加入3 mL TPPP 聚集体溶液中,测定其荧光强度,代入式(1)中,将所得的 $\Delta I$ 代入工作曲线中,取得其 $\text{Fe}^{3+}$ 测量值,计算其回收率、相对标准偏差。 $\text{Fe}^{3+}$ 测量值与 $\text{Fe}^{3+}$ 加标量的比值即为回收率。相对标准偏差RSD的计算公式为

$$R_{\text{RSD}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \times 100\%, \quad (4)$$

式中: $x$ 为 $\text{Fe}^{3+}$ 的测量值。

如表1所示,使用上述方法检测 $\text{Fe}^{3+}$ 的加标回收率在95.02%~104.73%之间,相对标准偏差在1.58%~4.02%之间,加标量与测量值之间无显著差异,证明 TPPP 聚集体作为荧光探针检测实际水样中的 $\text{Fe}^{3+}$ 具有可行性。

表1 不同水样中 $\text{Fe}^{3+}$ 的检测

Tab. 1 Determination of  $\text{Fe}^{3+}$  in different water samples

参数	纯净水			
	1	2	3	4
$\text{Fe}^{3+}$ 加标量/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	3.70	3.70	3.70	3.70
$\text{Fe}^{3+}$ 测量值/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	3.78	3.69	3.83	3.81
回收率/%	102.12	99.80	103.40	102.99
相对标准偏差RSD/%	1.58			
参数	矿泉水			
	1	2	3	4
$\text{Fe}^{3+}$ 加标量/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	3.70	3.70	3.70	3.70
$\text{Fe}^{3+}$ 测量值/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	3.87	3.73	3.62	3.58
回收率/%	104.73	100.69	97.87	96.70
相对标准偏差RSD/%	3.57			
参数	自来水			
	1	2	3	4
$\text{Fe}^{3+}$ 加标量/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	3.70	3.70	3.70	3.70
$\text{Fe}^{3+}$ 测量值/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	3.87	3.74	3.67	3.52
回收率/%	104.64	101.20	99.13	95.02
相对标准偏差RSD/%	4.02			

## 3 结论

本文以四氢呋喃作为良溶剂溶解 TPPP,水作为不良溶剂加入 TPPP 四氢呋喃溶液中,在常温下以再沉淀法一步构筑了边长为100~400 nm左右的立方体结构 TPPP 聚集体,着重研究将其作为 $\text{Fe}^{3+}$ 荧光探针时的灵敏度、选择性、抗干扰性和可行性。确定其检测范围为 $5.0 \times 10^{-8} \sim 5.18 \times 10^{-6}$  mol/L,检出限为 $2.97 \times 10^{-8}$  mol/L。以纯净水、矿泉水、自来水作为水样进行了加标

回收实验,加标回收率在 95.02%~104.73% 之间,相对标准偏差在 1.58%~4.02% 之间。研究结果证明本文构筑的 TPPP 聚集体适用于实际水样的 Fe<sup>3+</sup> 检测,可为非金属卟啉在金属离子荧光探针方面的应用提供借鉴。

### 参考文献:

- [1] 夏琳,邱桂学. 化学科学的研究新领域——超分子化学[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2007, 5(1): 33-37.  
XIA Lin, QIU Guixue. New field of chemistry science research — supramolecular chemistry [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2007, 5(1): 33-37. (in Chinese)
- [2] 王后臣,周利,刘洋,等. 超分子聚集体构筑单元的分子设计及其自组装研究进展[J]. 应用化学, 2021, 38(6): 615-621.  
WANG Houchen, ZHOU Li, LIU Yang, et al. Research progress on the molecular designs of building blocks for supramolecular aggregates and self-assemblies[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2021, 38(6): 615-621. (in Chinese)
- [3] 方正平,张玉红. 超分子聚合物的研究进展[J]. 胶体与聚合物, 2017, 35(4): 181-184.  
FANG Zhengping, ZHANG Yuhong. Research progress of supramolecular polymers [J]. Chinese Journal of Colloid & Polymer, 2017, 35(4): 181-184. (in Chinese)
- [4] 焦怡君. 超分子聚合物的构筑[J]. 中国高新技术, 2018, 21(14): 79-81.
- [5] 韩倩,李伦凯,匡光荣,等. 卟啉及其衍生物的研究进展[J]. 化学传感器, 2021, 41(1): 9-19.  
HAN Qian, LI Lunkai, KUANG Guangrong, et al. Research development of porphyrin and its derivatives [J]. Chemical Sensors, 2021, 41(1): 9-19. (in Chinese)
- [6] 王亮,钟永,孙嘉杰,等. 卟啉可控自组装及其应用[J]. 中国科学(化学), 2022, 52(8): 1239-1252.  
WANG Liang, ZHONG Yong, SUN Jiajie, et al. Controllable self-assembly of porphyrins and their applications [J]. Scientia Sinica Chimica, 2022, 52(8): 1239-1252. (in Chinese)
- [7] LEE S J, HUPP J T, NGUYEN S T. Growth of narrowly dispersed porphyrin nanowires and their hierarchical assembly into macroscopic columns[J]. Journal of the American Chemical Society, 2008, 130(30): 9632-9633.
- [8] GUO P, ZHAO G, CHEN P, et al. Porphyrin nano-assemblies via surfactant-assisted assembly and single nanofiber nanoelectronic sensors for high-performance H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> vapor sensing [J]. ACS Nano, 2014, 8(4): 3402-3411.
- [9] WANG J, ZHONG Y, WANG L, et al. Morphology-controlled synthesis and metalation of porphyrin nanoparticles with enhanced photocatalytic performance [J]. Nano Letters, 2016, 16(10): 6523-6528.
- [10] LI P, XU G, WANG N, et al. 0D, 1D, and 2D supramolecular nanoassemblies of a porphyrin: Controllable assembly, and dimensionality-dependent catalytic performances [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(18): 2100367-2100380.
- [11] 张双,秦安军,孙景志,等. 聚集诱导发光机理研究[J]. 化学进展, 2011, 23(4): 623-636.  
ZHANG Shuang, QIN Anjun, SUN Jingzhi, et al. Mechanism study of aggregation-induced emission[J]. Progress in Chemistry, 2011, 23(4): 623-636. (in Chinese)
- [12] YU Y, JIA H, LIU Y, et al. Recent progress in Type I aggregation-induced emission photosensitizers for photodynamic therapy [J]. Molecules, 2022, 28(1): 332-355.
- [13] ZHANG Y, LI G, LI J, et al. A novel BODIPY-based nano-photosensitizer with aggregation-induced emission for cancer photodynamic therapy [J]. Journal of Innovative Optical Health Sciences, 2022, 15(6): 40-52.
- [14] ZHANG Z, BAI Q, MANANDHAR E, et al. Supramolecular cuboctahedra with aggregation-induced emission enhancement and external binding ability [J]. Chemical Science, 2022, 13(20): 5999-6007.
- [15] 李岩,霍军生. 微量元素铁与人体健康[J]. 肥料与健康, 2022, 49(6): 25-27.  
LI Yan, HUO Junsheng. Trace element iron and human health [J]. Fertilizer & Health, 2022, 49(6): 25-27. (in Chinese)
- [16] 张春燕,罗建新,喻桂朋,等. 用于铁离子检测的荧光传感材料研究进展[J]. 化学通报, 2019, 82(9): 771-778.  
ZHANG Chunyan, LUO Jianxin, YU Guipeng, et al. Progress in fluorescent sensing materials for ferric ion detection [J]. Chemistry Bulletin, 2019, 82(9): 771-778. (in Chinese)
- [17] 徐衡,杨萍,桂乃成,等. 基于喹啉基的噁二唑酮类荧光探针合成及对 Fe<sup>3+</sup> 的识别[J]. 发光学报, 2022,

- 43(10): 1636-1644.
- XU Heng, YANG Ping, GUI Naicheng, et al. Synthesis of oxadiazolidone fluorescent probes based on quinoline group and recognition of  $\text{Fe}^{3+}$  ions[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2022, 43(10): 1636-1644. (in Chinese)
- [18] 巩宇玄, 张慧, 俞天智, 等. 基于香豆素与胍的荧光探针的合成及对  $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  的识别研究(英文)[J]. 化学通报, 2023, 86(4): 469-475.
- GONG Yuxuan, ZHANG Hui, YU Tianzhi, et al. Novel improved fluorescent probes based on coumarin and guanidine for the detection of  $\text{Co}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{3+}$  [J]. Chemistry Bulletin, 2023, 86(4): 469-475. (in Chinese)
- [19] 王冬梅. 稀土荧光探针材料的制备、性质及其在  $\text{Fe}^{3+}$  检测中的应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
- [20] 周小丽, 徐敬尧. 氮掺杂碳点的制备及其在  $\text{Fe}^{3+}$  检测中的应用[J]. 化工技术与开发, 2023, 52(10): 22-27.
- ZHOU Xiaoli, XU Jingyao. Preparation of nitrogen doped carbon dots and its application for iron ions detection[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2023, 52(10): 22-27. (in Chinese)
- [21] WANG Q, KE W, LOU H, et al. A novel fluorescent metal-organic framework based on porphyrin and AIE for ultra-high sensitivity and selectivity detection of  $\text{Pb}^{2+}$  ions in aqueous solution [J]. Dyes and Pigments, 2021, 196: 109802.
- [22] 王智毅, 王冬梅, 胡珊珊, 等.  $\text{SrF}_2: \text{Tb}^{3+}$  的水热合成及其对  $\text{Fe}^{3+}$  离子检测研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2023, 36(6): 35-40.
- WANG Zhiyi, WANG Dongmei, HU Shanshan, et al. Hydrothermal synthesis of  $\text{SrF}_2: \text{Tb}^{3+}$  for selective detection of  $\text{Fe}^{3+}$  ions [J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2023, 36(6): 35-40. (in Chinese)
- [23] WANG D, LIANG Y, WANG Z, et al. Hydrothermal synthesis of  $\text{Eu}^{3+}$ -doped  $\text{BaMoO}_4$  fluorescent probe for the selective detection of  $\text{Fe}^{3+}$  ions [J]. New Journal of Chemistry, 2022, 46(35): 16951-16958.
- [24] GENG G, CHEN P, GUAN B, et al. Shape-controlled metal-free catalysts: Facet-sensitive catalytic activity induced by the arrangement pattern of non-covalent supramolecular chains [J]. ACS Nano, 2017, 11(5): 4866-4876.
- [25] 胡蓉, 辛德华, 秦安军, 等. 聚集诱导发光聚合物 [J]. 高分子学报, 2018, 28(2): 132-144.
- HU Rong, XIN Dehua, QIN Anjun, et al. Polymers with aggregation-induced emission characteristics [J]. Acta Polymerica Sinica, 2018, 28(2): 132-144. (in Chinese)