

曾进,郑若男,凌云芝,等. 三角形银纳米片可视化快速检测高锰酸根[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2025, 40(1): 102-108. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.01.013

ZENG J, ZHENG R N, LING Y Z, et al. Visual and Rapid Detection of Permanganate Ions Using Triangular Silver Nanosheets [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40(1):102-108. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.01.013

三角形银纳米片可视化快速检测高锰酸根

曾进,郑若男,凌云芝,龙云飞*

(湖南科技大学 化学化工学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:在聚乙烯吡咯烷酮和柠檬酸三钠稳定剂存在下,利用化学还原法,将硝酸银还原合成了三角形银纳米片(T-AgNP).用透射电子显微镜(TEM)、紫外-可见分光光度计等仪器对合成的T-AgNP进行了表征.基于 MnO_4^- 对T-AgNP在1 min内就能快速刻蚀的特性,并导致T-AgNP的紫外-可见吸收光谱的最大吸收波长发生变化,且其最大吸收波长变化量($\Delta\lambda$)与 MnO_4^- 浓度($1.0\times 10^{-7}\sim 2.0\times 10^{-6}$ mol/L)之间呈现良好的线性关系,基于此,构建了一种快速检测 MnO_4^- 浓度的方法.该方法检测 MnO_4^- 的检出限(LOD)可达 3.3×10^{-8} mol/L,应用于水样品加标回收检测回收率为91.00%,说明其能应用于水样中 MnO_4^- 的快速检测.同时,基于检测体系的 MnO_4^- 浓度在 $2.0\times 10^{-7}\sim 2.0\times 10^{-6}$ mol/L时,T-AgNPs体系的颜色变化规律与其浓度之间可以用肉眼来区分,基于此建立了一种可视化半定量检测 MnO_4^- 的快速分析方法.

关键词:高锰酸根;银纳米片;可视化检测

中图分类号:TQ016

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2025)01-0102-07

Visual and Rapid Detection of Permanganate Ions Using Triangular Silver Nanosheets

ZENG Jin, ZHENG Ruonan, LING Yunzhi, LONG Yunfei

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In the presence of certain stabilizers including polyvinylpyrrolidone and trisodium citrate, triangular silver nanosheets (T-AgNP) are synthesized by chemical reduction of silver nitrate. The synthesized T-AgNP is characterized using instruments, such as transmission electron microscopy (TEM) and UV visible spectrophotometer. Based on the fast etching property of MnO_4^- on T-AgNP within 1 minute, which leads to the changes for maximum absorption wavelength of its UV-visible absorption spectrum, there is a good linear relationship between the maximum absorption wavelength change ($\Delta\lambda$) and the concentration of MnO_4^- . Thus, a fast detection method for MnO_4^- is constructed, and the linear range is of $1.0\times 10^{-7}\sim 2.0\times 10^{-6}$ mol/L with a detection limit (LOD) of 3.3×10^{-8} mol/L. The recovery of this method applied to water sample spiking detection is 91.00%, indicating that it can be applied to the rapid detection of MnO_4^- in water samples. Meanwhile, when the concentration of MnO_4^- in the range of $2.0\times 10^{-7}\sim 2.0\times 10^{-6}$ mol/L, the color difference of T-AgNPs system can be distinguished by naked eyes. Based on the color change, a visual semi-quantitative detection method for MnO_4^- has been established with fast detection features.

Keywords: permanganate; silver nanosheets; visual detection

收稿日期:2024-06-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21275047)

*通信作者, E-mail: l_yunfei927@163.com

贵金属纳米材料具有较好的稳定性、低毒、丰富的颜色特征和广阔的应用前景,深受世界各国化学家的瞩目^[1-4].其中,银纳米材料因其良好的化学稳定性、合成成本低、颜色与其粒径间存在良好的相关性等优点,在化学分析检测等领域有着广泛的应用.银纳米材料包括银纳米片、银纳米簇、银纳米粒子、银纳米棒等,其中,基于物质对银纳米片直接刻蚀和保护作用,可实现可视化检测一些离子和有机小分子物质等.大量试验结果表明:不同形貌的银纳米片颜色各异,诸如其可以呈现为深红、墨绿、淡黄、蓝色等,由于不同形貌的银纳米片的应用也各有差别,所以科学家们对合成不同形貌的银纳米片的方法进行了广泛研究. JIN 等^[5]报道了合成银纳米片的方法后,研究者们相继开发了许多银纳米片的合成方法,主要包括化学还原法^[6]、配体辅助法^[7]、生物合成法^[8]、微波法^[9]、超声波法^[10]、模板法^[11]等.就其形貌而言,合成的银纳米片有三角形、六边形等.同时,基于其紫外-可见吸收光谱性质与其形貌和尺寸有良好的依赖关系,成功建立了许多可视化检测方法.如三角形银纳米片(T-AgNP)呈现蓝色,它具有独特的三角形结构,包含3个具有较高化学活性的“角”,其结构容易被一些化学物质破坏,导致形貌发生变化,颜色也随之改变.侯新彦^[12]基于铜催化抗坏血酸氧化产生的自由基引起T-AgNP的紫外-可见吸收光谱的变化,成功检测了痕量铜离子.也有学者利用T-AgNP作为显色探针,应用于可视化检测 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 以及小分子尿酸等^[13].

高锰酸根(MnO_4^-)由于具有强氧化性,尤其在酸性条件下更为明显,所以 MnO_4^- 常作为消毒剂,在农业、水产养殖、污水处理等领域得到广泛应用,但是过度使用导致的 MnO_4^- 残余却不利于环境保护^[14-16].所以,含过量 MnO_4^- 的水质排放成为工业、农业等行业的主要关注点,开发简便快速检测水体系中的 MnO_4^- 含量的方法具有重要的研究意义.目前常用的检测 MnO_4^- 的方法主要有分光光度法、荧光分光光度法、电化学法等^[17-24].例如,郭峤志等^[21]基于 MnO_4^- 对发黄光的碳点(Y-CDs)的荧光猝灭现象实现了对它的检测;王宁等^[14]用氮掺杂荧光碳点检测 MnO_4^- 含量,并探讨了其与 MnO_4^- 相互作用的机制,建立了能应用在水样中 MnO_4^- 含量的检测方法;顾翔等^[22]用水热法合成的具有发蓝光性质的碳点为探针,成功检测 MnO_4^- 的含量;HAZRA等^[23]基于阳离子聚合物为探针,用于检测水中的 MnO_4^- 含量;韩冰雁等^[24]将金纳米簇(AuNCs)与沸石咪唑酯骨架-8(ZIF-8)复合得到的纳米复合物(AuNCs/ZIF-8),并将其作为荧光探针,成功应用于 MnO_4^- 的检测;朱建涛等^[25]采用水热法制备了以5-氨基水杨酸为前驱体的氮掺杂碳量子点(N-CQDs),并成功用于测定 MnO_4^- .

以上检测 MnO_4^- 的方法或多或少存在一定的局限性,如有些方法耗时长,有些方法使用的探针合成过程时间长、成本高等.所以,开发快速简易的检测 MnO_4^- 的分析方法具有重要意义.本研究旨在开发一种基于不同浓度的 MnO_4^- 对T-AgNP的紫外-可见吸收光谱的波长变化不同,以实现快速、灵敏的可视化检测,并探索了其应用在水样品中的潜在应用价值.

1 主要的试剂与使用的仪器

1.1 主要的试剂

聚乙烯吡咯烷酮(PVP,平均分子量为58 000;Aladdin Chemistry Co.);柠檬酸三钠(汕头市西陇化工厂); NaBH_4 (国药集团化学试剂有限公司); AgNO_3 (汕头市西陇化工厂);30%过氧化氢(西陇化工股份有限公司);缓冲溶液由伯瑞坦-罗宾森(Britton-Robinson,简称为BR)是由三酸混合溶液(硼酸、醋酸和磷酸,浓度均为0.04 mol/L)与不同量的氢氧化钠溶液(浓度为0.2 mol/L)混合而成;所用试剂的纯度均为分析纯及以上,二次蒸馏水为实验用水.

1.2 主要使用的仪器

电子分析天平(美国NJ),主要应用于称量所用化学物质的质量;普析TU2010型紫外-可见分光光度计(北京普析分析仪器有限公司),用于测定体系的紫外-可见吸收光谱;石英比色皿的规格为 $1 \times 1 \text{ cm}^2$,主要作为紫外-可见分光光度计配套器皿;Tecnai G20型透射电子显微镜(TEM,美国FEI公司),主要用于测定合成的T-AgNP形貌;KQ2200DE型超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司),用于清洗所用的一些玻璃器皿;DF-101B型集热式恒温磁力搅拌器(巩义市予华仪器有限责任公司),用于搅拌合成过程中的溶液.

2 试验过程

参考侯新彦^[12]的 T-AgNP 的合成方法,以 AgNO_3 为原料,合成了 T-AgNP,并通过透射电子显微镜(TEM),紫外-可见吸收光谱等技术对该 T-AgNP 进行了相关的表征.基于 MnO_4^- 对 T-AgNP 的刻蚀,导致其紫外-可见吸收光谱的最大吸收波长的变化,构建了一种快速、灵敏地检测 MnO_4^- 的可视化方法,并且将其应用于实际水样中微量 MnO_4^- 的测定.

2.1 溶液的配制与准备

$5.0 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ AgNO_3 溶液配制:用分析天平称取 2.123 4 g 的 AgNO_3 固体,在 250 mL 容量瓶中配制成浓度为 $5.0 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ 的 AgNO_3 溶液;柠檬酸三钠溶液配制:用分析天平称取 5.514 4 g 柠檬酸三钠固体,用 250 mL 容量瓶配制成浓度为 $7.5 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ 溶液;PVP 溶液配制:用分析天平称取 0.125 g PVP 固体,配制成质量浓度为 0.5 mg/mL 的 PVP 溶液; NaBH_4 溶液配制:用分析天平称取 NaBH_4 固体 0.197 0 g,用 50 mL 容量瓶中配制成 0.1 mol/L 的 NaBH_4 溶液;过氧化氢(30%)直接取用;高锰酸钾的浓度用草酸标定后稀释成 $1.0 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 的 KMnO_4 溶液备用.以此溶液为母液,加入适量的二次蒸馏水,再稀释到合适的浓度备用.

2.2 银纳米片的制备

银纳米片的制备方法,主要参考侯新彦^[12]的试验方法,采用化学合成法,以硝酸银、硼氢化钠、PVP、柠檬酸三钠、30% H_2O_2 等为原料,快速合成了具有蓝色的 T-AgNP.其合成步骤:向 100 mL 三角锥形瓶中先放入磁转子,再加入 49.5 mL 纯净水,并将锥形瓶置于磁力搅拌器上,在不断搅拌状态下,向锥形瓶中依次加入浓度为 $5.0 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ 硝酸银溶液 100 μL 、浓度为 $7.5 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ 的柠檬酸三钠溶液 1.0 mL、浓度为 30% 的过氧化氢溶液 120 μL 、浓度为 0.5 mg/mL 的 PVP 溶液 8.0 mL 以及新配置浓度为 0.1 mol/L 的 NaBH_4 溶液 0.5 mL,此时,体系呈浅黄色,经过 45 min 左右的反应后,溶液颜色从浅黄到深黄色,之后由深黄会快速变为深红色、墨绿色并最终稳定为蓝色.

3 结果与讨论

3.1 银纳米片的 TEM 表征

图 1(a)是合成的 T-AgNP 的 TEM 表征图,结果表明:大多 T-AgNP 呈现为三角形,其分散性良好.用粒径统计分析软件统计其粒径大小如图 1(b),结果显示:T-AgNP 的平均边长为 27.57 nm,粒径分布较为均匀.说明合成的 T-AgNP 是成功的.

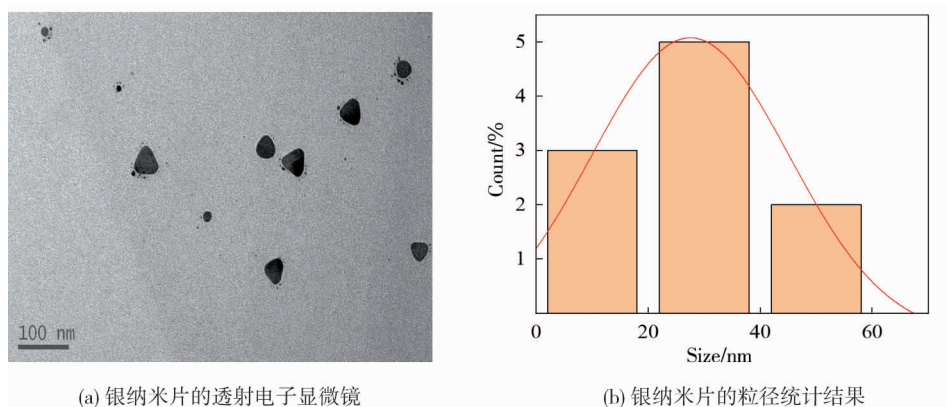


图 1 银纳米片的透射电子显微镜表征结果

3.2 银纳米片与高锰酸根相互作用的光谱表征

在 PVP、柠檬酸三钠等物质存在的体系中,银纳米片保持稳定,PVP、柠檬酸三钠等物质可以对其起到稳定剂的作用.用紫外-可见分光光度计对合成的 T-AgNP 的紫外-可见吸收光谱进行了检测,得到的吸收光谱与文献^[12]相符,说明 T-AgNP 的合成是成功的.T-AgNP 颗粒中不同位置被稳定剂(PVP、柠檬酸三钠)保护的度不同.通常稳定剂对 T-AgNP 的 3 个角上位置保护作用较弱,导致其 Ag 原子容易与其他物

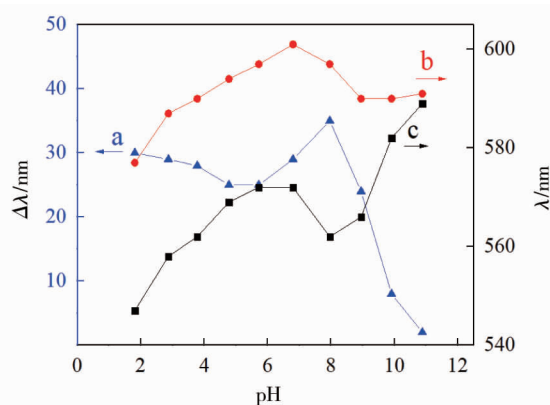
质反应^[12].

进一步研究表明:将配制好的含一定浓度的 MnO_4^- 溶液加入新合成的 T-AgNP 体系中,可以观察到体系的颜色会发生变化,导致 T-AgNP 的最大吸收波长发生蓝移.如图 2 所示, T-AgNP 吸收光谱中的最大吸收波长为 607 nm(图 2 中的光谱曲线 a),但在 T-AgNP 体系中加入 MnO_4^- (浓度为 $2.0 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$) 后, T-AgNP 最大吸收峰位置蓝移至 567 nm(图 2 中的光谱曲线 b).说明 MnO_4^- 能刻蚀 T-AgNP,溶液也由蓝色变为蓝紫色.其刻蚀原理如反应(1).

3.3 银纳米片与高锰酸根反应条件的优化

3.3.1 反应体系的最佳 pH

本研究结果表明:检测体系的 pH 对 T-AgNP 与 MnO_4^- 反应的速度和对测定 MnO_4^- 的信号响应有影响.结果如图 3 所示,曲线 a 为 T-AgNP 体系与 T-AgNP/ MnO_4^- 体系的紫外-可见吸收光谱最大吸收波长之差 $\Delta\lambda$,曲线 b 为单纯的 T-AgNP 体系的紫外-可见吸收光谱的最大吸收波长,曲线 c 为 T-AgNP/ MnO_4^- 体系的紫外-可见吸收光谱的最大吸收波长.可以发现, T-AgNP 溶液本身的最大吸收波长随 pH 的变化会发生变化,在酸性条件下,其吸收波长随 pH 减小而减小,这可能与表面被氧化的银(Ag_2O)能溶解于酸中有关,在接近中性,如 $\text{pH}=7.96$ 时,其吸收光谱的最大吸收波长最大,超过中性后,碱性越强,其吸收光谱的最大吸收波长也随 pH 增大而减小,这可能是由于测定体系中加入 BR 缓冲溶液,其中的醋酸在强碱性介质中主要以醋酸根离子形式存在,能与 T-AgNP 表面被溶液中溶解的氧气氧化生成的氧化银结合,成为溶于水的醋酸银转移到水中,导致其有一定的被刻蚀和吸收光谱的最大吸收波长的蓝移. T-AgNP 体系的吸收光谱与 T-AgNP/ MnO_4^- 体系吸收光谱的最大吸收波长的变化量 $\Delta\lambda$,随溶液 pH 值在 1.81~10.88 改变而改变,当反应体系 pH 值为 7.96 时, $\Delta\lambda$ 最大,基于以上的试验结果,最终选择 pH 为 7.96 作为检测 MnO_4^- 的最佳 pH 条件.



曲线 a--T-AgNP 体系与 T-AgNP/ MnO_4^- 体系的紫外-可见吸收光谱最大吸收波长之差 $\Delta\lambda$;曲线 b--单纯的 T-AgNP 体系的紫外-可见吸收光谱的最大吸收波长;曲线 c--T-AgNP/ MnO_4^- 体系的紫外-可见吸收光谱的最大吸收波长

图 3 检测体系的 pH 对 T-AgNP 与 MnO_4^- 反应的速度和对测定 MnO_4^- 的信号响应的影响(BR 缓冲溶液的 pH 分别控制为 1.81, 2.87, 3.78, 4.78, 5.72, 6.80, 7.96, 8.95, 9.91 和 10.88)

3.3.2 反应的最佳温度

图 4 是 T-AgNP 检测 MnO_4^- 的最佳温度选择的结果,结果表明:在不同温度下, T-AgNP 被 MnO_4^- 刻蚀后导致的紫外-可见吸收光谱的最大吸收波长的变化量不同(图 4 的光谱曲线 c),探索了温度分别为 4, 25, 50, 70 $^{\circ}\text{C}$ 下 T-AgNP 检测 MnO_4^- 的波长变化.试验结果表明:在 4 $^{\circ}\text{C}$ 和 25 $^{\circ}\text{C}$ 下,波长变化量较大且基本接近;在 50, 70 $^{\circ}\text{C}$ 下,由于 T-AgNP 体系自身的最大吸收波长随温度升高,其吸收光谱的最大吸收波长会发生蓝移,说明温度升高时 T-AgNP 本身的稳定性受到了影响,由于 4 $^{\circ}\text{C}$ 低于室温 25 $^{\circ}\text{C}$,测定时需要用

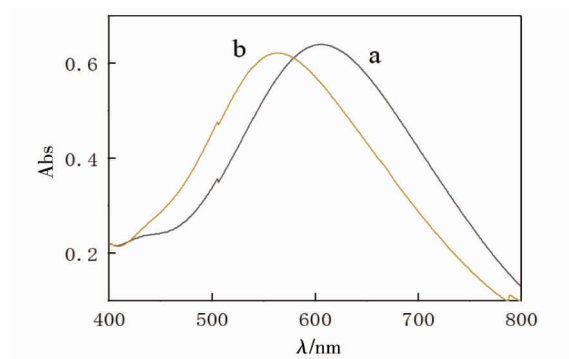
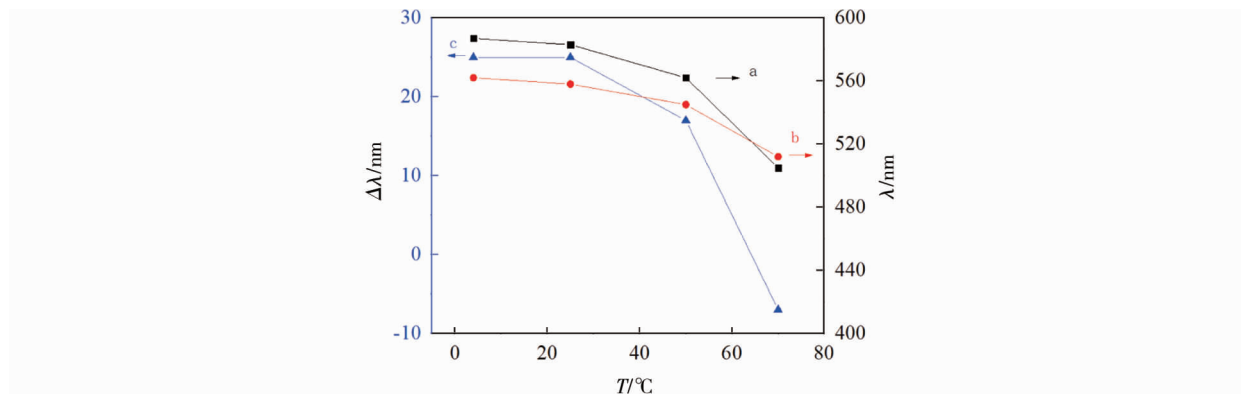


图 2 T-AgNP 在加入 MnO_4^- 前(曲线 a)、后(曲线 b)紫外-可见吸收光谱

冰块调节控制,且难以控制温度恒定,考虑到检测 MnO_4^- 的灵敏度和便利性,最终选择检测 MnO_4^- 的最佳温度为室温 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下进行。

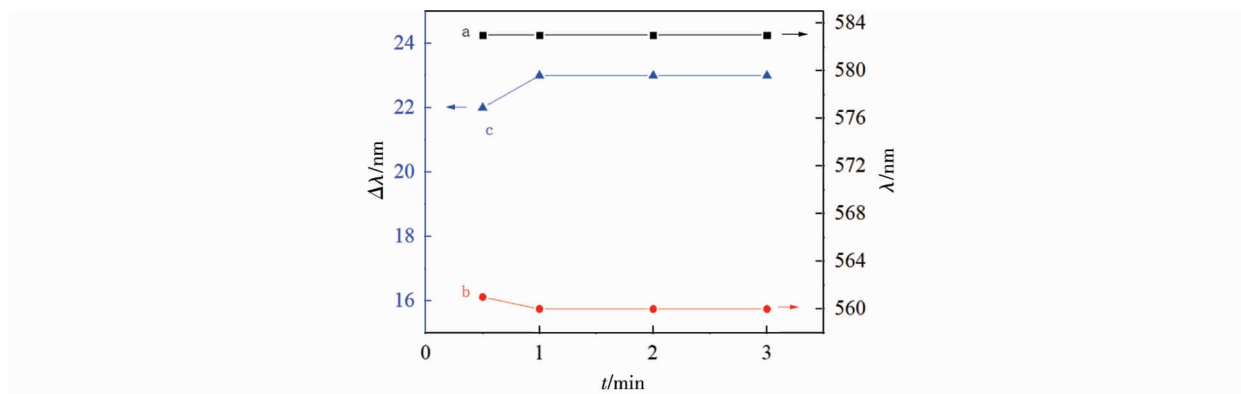


曲线 a--T-AgNP 的最大吸收波长;曲线 b--T-AgNP/ MnO_4^- 混合体系的最大吸收波长;曲线 c-- $\Delta\lambda$

图 4 T-AgNP 体系及 T-AgNP/ MnO_4^- 体系的最大吸收波长差 $\Delta\lambda$ 与不同反应温度间的关系,反应温度分别为 4, 25, 50, 70 $^\circ\text{C}$

3.3.3 反应的最佳时间

MnO_4^- 与 T-AgNP 的反应时间对检测 MnO_4^- 的灵敏度有一定影响.研究结果如图 5 所示,结果表明: MnO_4^- 与 T-AgNP 反应 1 min 后,T-AgNP/ MnO_4^- 体系的吸收光谱的最大波长不再改变(图 5 曲线 b),反应 1 min 的波长变化量已经达到最大值(图 5 曲线 c).说明 MnO_4^- 与 T-AgNP 反应在 1.0 min 范围内就能反应完全,因此,最终选择 MnO_4^- 与 T-AgNP 反应时间为 1.0 min 后进行测定。



曲线 a--T-AgNP 的最大吸收波长;曲线 b--T-AgNP/ MnO_4^- 混合体系的最大吸收波长;曲线 c-- $\Delta\lambda$

图 5 T-AgNP 体系及 T-AgNP/ MnO_4^- 体系的最大吸收波长差 $\Delta\lambda$ 与不同反应时间之间的关系

3.3.4 其他物质对高锰酸根检测的影响

在上述探索的 MnO_4^- 与 T-AgNP 的最佳反应条件下,探索 21 种其他物质,包括 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, KClO_4 , KCl , KBrO_3 , NaH_2PO_4 , Na_2HPO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, NiSO_4 , NaCl , CdSO_4 , CuSO_4 , BaCl_2 , ZnSO_4 , MnSO_4 , 葡萄糖, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, HgCl_2 , NH_4SCN , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, H_2O_2 , CaCl_2 对 MnO_4^- 检测的影响,结果见图 6.结果表明:其他物质包括一些具有氧化性的物质 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, KBrO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, H_2O_2 等与 T-AgNP 作用后,其吸收光谱的最大吸收波长改变较小,说明 T-AgNP 用于检测 MnO_4^- 的选择性较好。

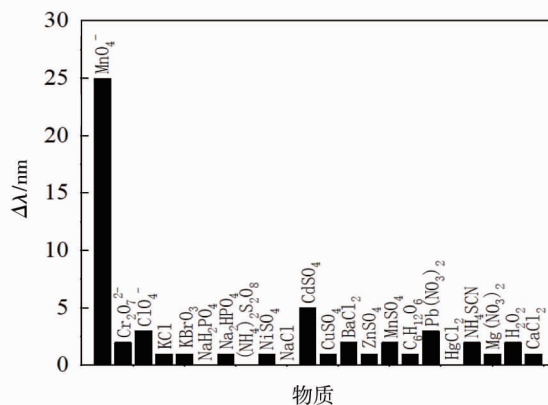


图 6 T-AgNP 与不同物质反应后最大吸收波长变化($\Delta\lambda$)的变化

3.3.5 线性关系与样品检测

在最佳条件下,T-AgNP/MnO₄⁻混合液的紫外-可见吸收光谱的最大吸收波长随 MnO₄⁻浓度增加而逐渐蓝移(如图 7(a)所示),且波长移动值($\Delta\lambda$)与 MnO₄⁻浓度($1.0\times10^{-7}\sim2.0\times10^{-6}$ mol/L)之间成正比(如图 7(b)所示),线性回归方程为 $\Delta\lambda=-1.03+20.31c$ ($c,\mu\text{mol/L},r=0.9987,n=5$),相关系数为 0.998 7. 对应图 7 中曲线 a~曲线 e,图 7 中 MnO₄⁻在 $1.0\times10^{-7}\sim2.0\times10^{-6}$ mol/L 范围内可视化效果较好.为了比较本测定方法与其他方法的优势,表 1 中列出了该方法与其他方法的检测核心数据(包括检测方法、检出限、线性范围等)的差异.可以发现,所建立的分光光度法,较文献的荧光分析方法更为简单,且检出限为 0.033 $\mu\text{mol/L}$,比其他荧光法均低,说明方法的灵敏度更高.

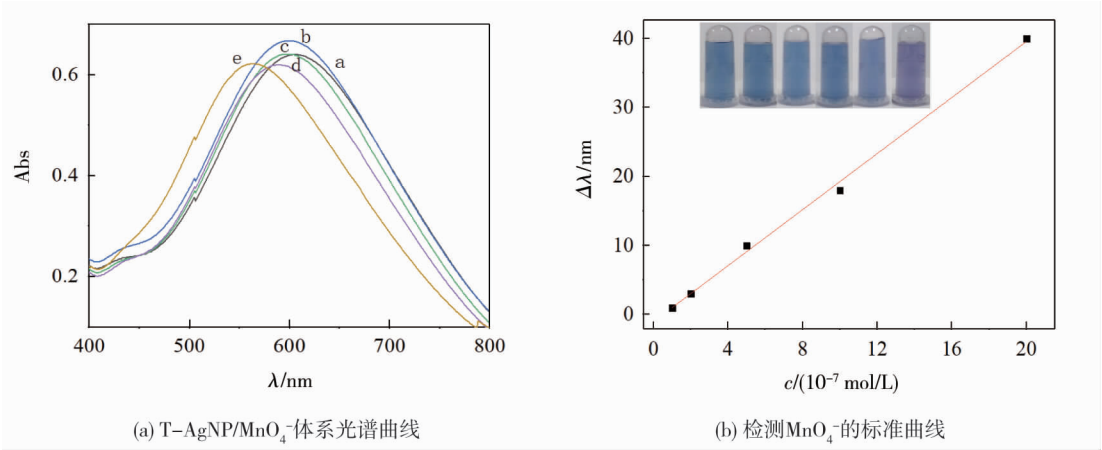


图 7 T-AgNP/MnO₄⁻体系光谱曲线(a),检测 MnO₄⁻的标准曲线(b)和颜色变化(b中插图,从左至右 MnO₄⁻浓度分别为 0, 0.10, 0.20, 0.50, 1.00, 2.00 $\mu\text{mol/L}$)

表 1 本工作测定 MnO₄⁻的灵敏度与相关文献的比较

探针	检测方法	检出限/($\mu\text{mol/L}$)	线性范围/($\mu\text{mol/L}$)	参考文献
碳点	荧光法	0.150	3.30~256.00	[14]
黄光碳点	荧光法	0.630	2.5~125.0	[21]
碳点	荧光法	0.044	0.060~1.200	[22]
Polyelectrolytes	荧光法	0.200	未给出	[23]
金纳米簇	荧光法	0.640	1~30	[24]
碳量子点	荧光法	0.140	0~14	[25]
三角形银纳米片	分光光度法	0.033	0.1~2.0	本工作

参考上述测得的标准曲线,在最佳检测条件下检测了自来水样品,样品中加标测定结果表 2.结果表明:自来水样品中未检测出 MnO₄⁻的含量,样品 3 次加标回收试验的平均加标回收率为 91%,相对误差小于 10%.说明该方法应用实际水样品中 MnO₄⁻的检测有一定的可行性.

另外,T-AgNP/ MnO₄⁻体系的颜色随 MnO₄⁻的浓度而变化(图 7b 中插图),当 MnO₄⁻浓度在 $2.0\times10^{-7}\sim2.0\times10^{-6}$ mol/L 内,T-AgNP 的颜色变化可以用肉眼直接观察,基于此可以建立一种在 $2.0\times10^{-7}\sim2.0\times10^{-6}$ mol/L检测 MnO₄⁻浓度简便的半定量可视化检测方法.

表 2 样品水中 MnO₄⁻的检测结果

样品	检测值或加标量/($\mu\text{mol/L}$)	平均值/($\mu\text{mol/L}$)	回收率/%	相对标准偏差/%
自来水	未检出	未检出	/	/
	0.91			
自来水+1.0 $\mu\text{mol/L}$ MnO ₄ ⁻	0.89	0.91	91.00	1.53
	0.92			

4 结论

1) 利用 MnO₄⁻能腐蚀 T-AgNP,导致 T-AgNP 体系的颜色变化和紫外-可见吸收光谱最大吸收波长蓝

移,且其波长的蓝移程度($\Delta\lambda$)与 MnO_4^- 的浓度呈现明显的线性关系,基于此建立了一种检测 MnO_4^- 浓度的光谱定量检测方法.

2) 当 MnO_4^- 浓度在 $2.0 \times 10^{-7} \sim 2.0 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$ 浓度范围内,体系的颜色变化能用肉眼分辨,基于此建立了一种可视化半定量检测 MnO_4^- 的方法.该方法简单、快速且灵敏度高,在实际水样品中 MnO_4^- 含量检测方面具有良好的应用前景.

参考文献:

- [1] 刘智妍. 银纳米片的制备及形貌演化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [2] 段君元, 章桥新, 王一龙, 等. 边长为微米级的银纳米片的简易合成与形成机理[J]. 物理化学学报, 2009, 25(7): 1405–1408.
- [3] GAO C, LU Z, LIU Y, et al. Highly Stable Silver Nanoplates for Surface Plasmon Resonance Biosensing[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, 51(23): 5629–5633.
- [4] Liz-Marzén LM. Nanometals: Formation and color[J]. *Materials Today*, 2004, 7(2): 26–31.
- [5] JIN R C, CAO Y W, MIRKIN C A, et al. Photoinduced conversion of silver nanospheres to nanoprisms[J]. *Science*, 2001, 294(5548): 1901–1903.
- [6] HE X, ZHAO X J, CHEN Y X, et al. The evidence for synthesis of truncated triangular silver nanoplates in the presence of CTAB[J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(4): 380–384.
- [7] CHEN S H, FAN Z Y, CARROLL D L. Silver Nanodisk: Synthesis, Characterization and Self-Assembly[J]. *MRS Online Proceedings Library*, 2003: 351–356.
- [8] KLAUS T, JOERGER R, OLSSON E, et al. Silver-based crystalline nanoparticles, microbially fabricated[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(24): 13611–13614.
- [9] HE R, QIAN X F, YIN J, et al. Preparation of polychrome silver nanoparticles in different solvents[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2002, 12(12): 3783–3786.
- [10] LIU J J, HU M G, SONG Y, et al. A novel strategy to prepare silver nanoparticles by ethanol-induced shape conversion of silver dendrites from modified galvanic replacement[J]. *Synthetic Metals*, 2014, 187: 185–192.
- [11] YENER D O, SINDEL J, RANDALL C A, et al. Synthesis of nanosized silver platelets in octylamine–water bilayer systems[J]. *Langmuir*, 2002, 18(22): 8692–8699.
- [12] 侯新彦. 三角形银纳米片在可视化检测中的应用研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014.
- [13] 谭远航. 基于银纳米三角片的光谱分析法在重金属离子和尿酸分析中的应用研究[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [14] 王宁, 石璟, 张育露, 等. 氮掺杂碳点荧光探针检测高锰酸根[J]. *分析试验室*, 2020, 39(6): 706–710.
- [15] SHI J L, XU P, WANG X G, et al. A dual-responsive luminescent terbium(III) chain for selective sensing of Fe^{3+} and MnO_4^- ions[J]. *Zeitschrift Für Anorganische und Allgemeine Chemie*, 2018, 644(23): 1598–1606.
- [16] ZHAO X X, QIN Z B, LI Y H, et al. Two luminescent cobalt(II) coordination polymers for selective sensing of MnO_4^- in water[J]. *Transition Metal Chemistry*, 2018, 43(7): 597–604.
- [17] 傅妍芳, 邓金花, 蔡淑珍, 等. 水中锰的快速检测方法的研究[J]. *广东化工*, 2010, 37(5): 200.
- [18] HU Q, LIU L F, SUN H J, et al. An ultra-selective fluorescence method with enhanced sensitivity for the determination of manganese(VII) in food stuffs using carbon quantum dots as nanoprobe[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2020, 88: 103447.
- [19] DENG P, LU L Q, CAO W C, et al. Phosphorescence detection of manganese(VII) based on Mn-doped ZnS quantum dots[J]. *Spectrochimica Acta Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2017, 173: 578–583.
- [20] QIU B, XUE L L, WU Y P, et al. Mechanism study on inorganic oxidants induced inhibition of $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ electrochemiluminescence and its application for sensitive determination of some inorganic oxidants[J]. *Talanta*, 2011, 85(1): 339–344.
- [21] 郭峤志, 孟雅婷, 焦媛, 等. 用于高锰酸根非标记检测的黄光碳点的制备及其性能研究[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2023, 46(5): 1169–1176.
- [22] 顾翔, 张烨彬, 杨小丽, 等. 基于碳点对 MnO_4^- 的传感效应研究[J]. *泉州师范学院学报*, 2021, 39(6): 67–72.
- [23] HAZRA A, GHOSH C, BANERJEE F, et al. Highly efficient main-chain cationic polyelectrolytes for selective sensing of permanganate, perrhenate, and heparin[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(11): 6540–6551.
- [24] 韩冰雁, 闫琴, 辛泽, 等. 定位在 ZIF-8 表面的金纳米簇以提高其荧光强度及检测高锰酸根离子的选择性[J]. *分析化学*, 2020, 48(8): 1025–1032.
- [25] 朱建涛, 温嵩, 韩伟, 等. 基于 5-氨基水杨酸的碳量子点用于测定高锰酸根[J]. *分析实验室*, 2024, 43(3): 425–432.