

高铁酸钾去除水中莫西沙星的效果及荧光特性研究

马辰明¹ 陈福庆² 王吉¹ 单锐³ 王宁^{1*}

1. 山东建筑大学市政与环境工程学院 资源与环境创新研究院, 中国·山东 济南 250101

2. 国锦城投工程咨询(山东)有限公司, 中国·山东 济南 250101

3. 中国科学院广州能源研究所, 中国·广东 广州 510640

摘要: 本研究采用荧光分光光度计, 探究 pH 对莫西沙星荧光强度的影响, 以及不同反应条件下高铁酸钾去除莫西沙星效果及荧光强度变化的影响。结果显示, 莫西沙星在酸性条件下荧光弱、碱性强。高铁酸钾 2 分钟内就可快速去除莫西沙星, 降低其荧光强度。本研究为水中莫西沙星去除及环境快速检测提供依据。

关键词: 高铁酸钾; 莫西沙星; 高级氧化法; 荧光强度

Study on the removal effect and fluorescence characteristics of moxifloxacin from water by potassium ferrate

Ma Chenming¹, Chen Fuqing², Wang Ji¹, Shan Rui³, Wang Ning^{1*}

1. Institute of Resources and Environmental Innovation, School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, China Shandong Jinan 250101

2. Guojincheng Investment Consulting (Shandong) Co., Ltd., China Shandong Jinan 250101

3. Guangzhou Institute of Energy, Chinese Academy of Sciences, China, Guangdong Guangzhou 510640

Abstract: In this study, fluorescence spectrophotometer was used to explore the effect of pH on the fluorescence intensity of moxifloxacin, and the effect of potassium ferrate on the removal of moxifloxacin and the change of fluorescence intensity under different reaction conditions. The results show that moxifloxacin has weak fluorescence and strong alkalinity under acidic conditions. Potassium ferrate can quickly remove moxifloxacin within 2 minutes, reducing its fluorescence intensity. This study provides a basis for the removal of moxifloxacin from water and rapid environmental detection.

Keywords: Potassium ferrate; Moxifloxacin; Advanced oxidation method; Fluorescence intensity

0 引言

莫西沙星是第四代氟喹诺酮类抗生素 (Fluoroquinolones, FQs) 的典型代表^[1]。根据中国医药工业信息中心药物数据库 PDB 系统显示, 2019~2023 年我国医院莫西沙星的用药金额占氟喹诺酮类的三分之一以上, 特别在 2019、2020 年达到半数以上, 并且销售数量逐年上涨。位居氟喹诺酮类药物第一是增速最快的抗生素用药之一。

近年来, FQs 的无节制使用引发了严重的环境问题。FQs 在人和动物体内难以完全代谢其活性成分及代谢产物随排泄物进入环境, 对土壤和地下水造成污染^[2]。高铁酸钾作为多功能绿色水处理材料^[3], 在抗生素去除方面表现显著效果, 作为一种强氧化剂, 能有效去除水中氟喹诺酮类抗生素, 例如依诺沙星、氧氟沙星等^[4]。然而, 环境中 FQS 含量极低, 需借助高精密仪器检测, 存在检测周期长、成本高的问题。有研究通过荧光分光光度计对莫西沙星进行检测^[5], 该方法检测效率高、成本低, 在快速检测

中具有显著优势。

本研究以莫西沙星为研究对象, 以荧光分光光度计作为检测方法, 探究高铁酸钾去除莫西沙星过程中莫西沙星的荧光变化特性, 为高铁酸钾去除莫西沙星以及莫西沙星在环境中的快速检测提供可行性依据。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

1.1.1 实验仪器

CP114 型电子天平 (上海鼎拓实业有限公司); MY 3000-6 型六联定时搅拌机 (深圳市中润水工业技术发展有限公司); F-7000 型荧光分光光度计 (日本 HITACHI 公司); PHS-3C 型雷磁 pH 计 (上海仪电科学仪器有限公司)。

1.1.2 实验试剂

高铁酸钾 (实验室自制); 莫西沙星 ($C_{21}H_{24}FN_3O_4$, 上海麦克林生化科技股份有限公司); 磷酸氢二钠 (AR,

天津市科密欧化学试剂有限公司)；硼酸(AR，国药集团化学试剂有限公司)

1.2 实验方法

在不同条件下制得样品，将样品稀释 10 倍，取适量溶液置于 1cm 四面透光比色皿中，使用三维荧光分光光度计进行光谱扫描。以扫描的纯水三维荧光光谱作为空白。

1.3 参数设定

激发波长范围是 200~450 nm，发射波长范围是 250~550 nm，狭缝宽度均为 5 nm，扫描速度为 1200 nm/min，夹缝电压为 700 V。

2 结果与讨论

2.1 莫西沙星的荧光特性

从图 1 中可以看出，莫西沙星存在一个较强的荧光峰和一个较弱的荧光峰，较强的荧光峰位于 $E_x/E_m = 280 \sim 290 \text{ nm} / 455 \sim 475 \text{ nm}$ 范围，较弱的荧光峰位于 $E_x/E_m = 330 \sim 350 \text{ nm} / 455 \sim 475 \text{ nm}$ 范围，并且在 $E_m = 466 \text{ nm}$ 时，莫西沙星的荧光强度最大，与其他相关研究结果对比，这与 Kamruzzaman^[6] 研究结果相近。比较实验条件等信息，发现荧光分光光度计型号、参数设定等条件不一致。有的研究认为增大狭缝宽度对信号强度提升是有利的，但降低了光谱分辨率^[7]。光谱仪型号的差异、参数设定的不同可能是导致研究结果不一致的原因。

2.2 不同 pH 下莫西沙星的荧光特性

由于荧光强度变化比较灵敏，特别是 pH 对荧光强度变化的影响巨大。因此固定 $E_x = 288 \text{ nm}$ ，对不同 pH 的 E_m 进行扫描，如图 2 所示，酸性条件下，荧光强度较低，碱性条件下，荧光强度突然增大，这与 JA Ocaña^[8] 研究结果一致。这是因为在酸性条件下，莫西沙星分子中的氨基等基团可能会发生质子化，使分子的电子云分布发生改变，不利于 $\pi - \pi$ 跃迁，从而导致荧光强度较低。而在碱性条件下，分子的电荷状态发生变化，可能形成了更有利于 $\pi - \pi$ 跃迁的结构，使得更多的分子能够从基态跃迁到激发态，并且辐射跃迁概率增大，进而荧光强度突然增大。因此后续实验样品检测之前统一控制样品 $\text{pH} = 9$ 。

2.3 不同反应条件下莫西沙星的去除效果及其荧光变化

由图 3 可知，莫西沙星的荧光强度在反应时间 10 分钟内急剧下降，表明高铁酸钾对其去除效果显著。这得益于高铁酸钾的强氧化性，能迅速与莫西沙星分子发生氧化反应。前 2 分钟荧光强度降幅最大，因反应初期高铁酸钾浓度高，与莫西沙星充分接触反应快；随反应进行，高铁

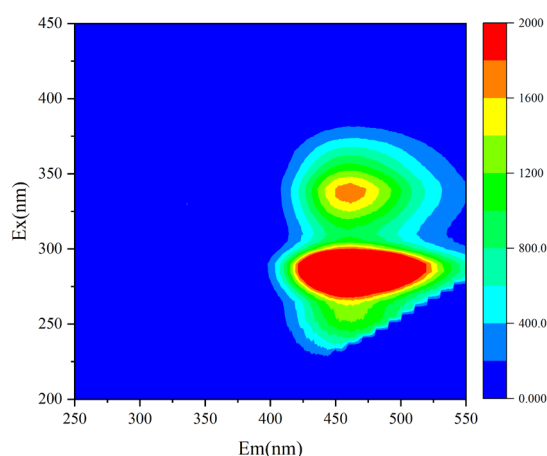


图1 莫西沙星三维荧光光谱图

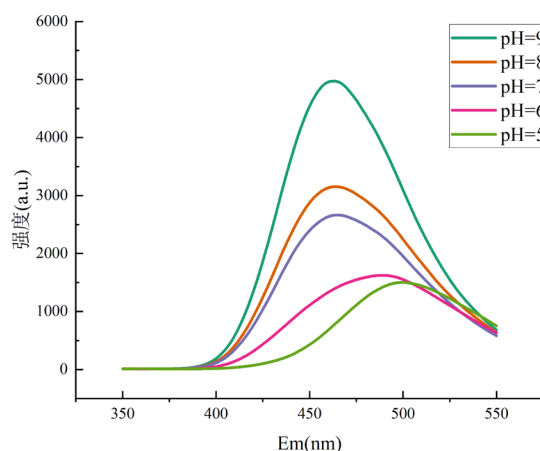


图2 不同pH下莫西沙星的发射光谱

酸钾浓度降低，反应速率下降。此外，莫西沙星的氧化产物可能被高铁酸钾进一步氧化，形成连续反应，影响反应进程^[9]。由图 4 可知，随着高铁酸钾投加量的增加，莫西沙星的整体荧光强度都得到了有效降低，可见高铁酸钾能够有效地对莫西沙星进行去除。并且在低浓度高铁酸钾下就能表现出对莫西沙星优异的去除效果。这种高效性源于高铁酸钾中 + 6 价铁的强氧化性，其可直接破坏莫西沙星分子的共轭结构，使其发色基团失活，从而导致荧光强度显著降低。

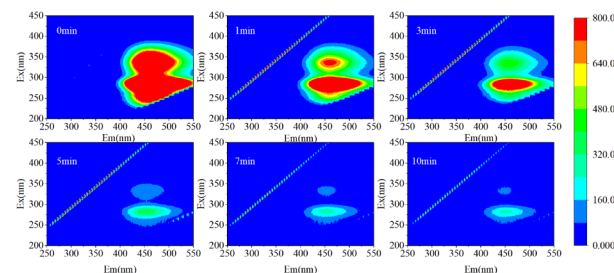


图3 不同反应时间下莫西沙星三维荧光光谱图

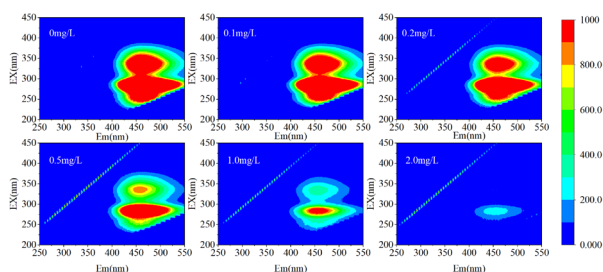


图4 不同高铁酸钾投加量下莫西沙星的三维荧光光谱图

3 结语

本研究通过三维荧光光谱技术,系统考察了高铁酸钾去除莫西沙星过程中的荧光特性及影响因素。结果表明:莫西沙星存在两个特征荧光峰,位于EX/EM=280~290 nm/455~475 nm(强峰)和330~350 nm/455~475 nm(弱峰),其荧光强度受pH影响显著,碱性条件下的荧光强度远大于酸性条件下。高铁酸钾对莫西沙星的去除呈现快速反应的特征,10分钟内荧光强度急剧下降,其中前2分钟反应速率最快,并且低浓度高铁酸钾就能表现出对莫西沙星优异的去除效果。本研究为高铁酸钾去除莫西沙星的实际应用及环境中低浓度莫西沙星的快速检测提供了关键数据支撑。

参考文献:

[1] 朱琳,杨文静,尤立蕊. 头孢曲松钠联合阿奇霉素与莫西沙星治疗老年社区获得性肺炎的临床效果及安全性

比较[J]. 临床合理用药,2025,18(12):69-72.

[2] Ahmed I A, Hussein H S, Za A L, et al.Green Synthesis of Fe-Cu Bimetallic Supported on Alginate-Limestone Nanocomposite for the Removal of Drugs from Contaminated Water[J].Polymers (Basel),2023, 15 (5).

[3] 李文轩. 基于三维荧光光谱分析高铁酸钾氧化絮凝腐殖酸以及三卤甲烷抑制研究[D].2023.

[4] 王嘉琪. Fe (VI) 及 UV/Fe (VI) 、UV/Fe (VI) /H₂O₂ 氧化技术对氟喹诺酮类抗生素的降解机制研究 [D].2023.

[5] 姜坤好. 混合胶束—浊点萃取荧光分光光度法检测氟喹诺酮类抗生素的研究[D].2019.

[6] Kamruzzaman M, Alam A-M, Lee S H, et al.Spectrofluorimetric study of the interaction between europium(III) and moxifloxacin in micellar solution and its analytical application[J].Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,2012, 86: 375-380.

[7] 周秋璇,徐庆锋,张勇. 几种常见的影响荧光光谱测试的因素[J]. 分析仪器,2012(01):82-84.

[8] Ocaña J A, Barrag á n F J, Callej ó n M.Spectrofluorimetric determination of moxifloxacin in tablets, human urine and serum[J].Analyst,2000, 125 (12): 2322-5.

[9] 杜甜甜. 高铁酸钾氧化造影剂(碘海醇)的效果及机理试验研究[D].2021.