

## 微塑料对高铁酸盐氧化降解罗丹明 B 的影响

王钰婷,王芳芳,朱美燕,范子红

重庆工商大学 环境与资源学院,重庆 400067

**摘要:**目的 研究微塑料对高铁酸盐降解有机污染物的影响,以罗丹明 B 作为模拟污染物,分别研究了微塑料添加量、高铁酸盐使用量、罗丹明 B 初始浓度、pH、天然有机物、无机离子等因素,对微塑料在反应过程中的影响。方法 通过改变氧化体系的反应条件,研究反应体系中添加微塑料、不添加微塑料以及仅有微塑料存在的条件下,分析高铁酸盐对罗丹明 B 的去除率,探究微塑料在氧化反应体系中的作用原理。结果 微塑料参与了高铁酸盐降解罗丹明 B 的氧化反应,反应后微塑料的形貌发生了改变,由最开始的光滑无空隙变为粗糙呈明显蜂窝状,且表面吸附有高铁酸盐的氧化产物。在不同反应条件下,微塑料对高铁酸盐氧化降解罗丹明 B 都具有促进作用,且促进作用不仅表现为对罗丹明 B 的吸附作用,其中的机理有待探究。微塑料在反应体系中的作用效果受污染物底物浓度影响较大。结论 微塑料存在的反应体系罗丹明 B 的去除率高于没有微塑料存在的反应体系,说明微塑料可以促进高铁酸盐氧化降解罗丹明 B,提高罗丹明 B 的去除率。初步探究了微塑料在氧化体系中的作用影响,期望为实际污水处理中微塑料的去除治理的进一步研究提供理论支撑。

**关键词:**微塑料;高铁酸盐;罗丹明 B;氧化降解

中图分类号:X703 文献标识码:A doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0006.002

### The Influence of Microplastics on the Oxidative Degradation of Rhodamine B by Ferrate

WANG Yuting, WANG Fangfang, ZHU Meiyan, FAN Zihong

School of Environment and Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

**Abstract: Objective** This study investigated the influence of microplastics on the degradation of organic pollutants by ferrate. Rhodamine B was used as a simulated pollutant, and factors such as microplastic dosage, ferrate dosage, initial concentration of Rhodamine B, pH, natural organic matter, and inorganic ions were studied to explore the impact of microplastics in the reaction process. **Methods** By altering the reaction conditions of the oxidation system, the removal efficiency of Rhodamine B by ferrate was analyzed under different scenarios: with the addition of microplastics, without the addition of microplastics, and with the presence of microplastics only. The role of microplastics in the oxidation system was investigated. **Results** Microplastics participated in the oxidative degradation of Rhodamine B by ferrate, causing changes in the morphology of microplastics after the reaction. Initially smooth and devoid of any voids, the microplastics became rough and exhibited a distinct honeycomb structure, with adsorbed oxidized products of ferrate on their surface. Under different reaction conditions, microplastics had a promoting effect on the oxidative degradation of Rhodamine B by ferrate, not only through adsorption of Rhodamine B but also through other mechanisms that need to be explored. The effect of microplastics in the reaction system was greatly influenced by the concentration of the pollutant substrate.

收稿日期:2022-11-07 修回日期:2022-12-26 文章编号:1672-058X(2024)06-0013-07

作者简介:王钰婷(1998—),女,重庆九龙坡区人,硕士研究生,从事水污染控制与治理研究。

通讯作者:范子红(1983—),女,湖北襄阳人,博士,讲师,从事水污染控制与治理研究。Email:1134385582@qq.com.

引用格式:王钰婷,王芳芳,朱美燕,等.微塑料对高铁酸盐氧化降解罗丹明 B 的影响[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2024,41(6):13-19.

WANG Yuting, WANG Fangfang, ZHU Meiyan, et al. The influence of microplastics on the oxidative degradation of rhodamine B by ferrate[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(6): 13-19.

**Conclusion** The removal rate of rhodamine B in the reaction system with the presence of microplastics is higher than that in the reaction system without the presence of microplastics. This indicates that microplastics can enhance the oxidative degradation of Rhodamine B by ferrate and increase the removal rate of Rhodamine B. This study provides a preliminary exploration of the role and impact of microplastics in oxidative systems, offering theoretical support for further research on the removal and treatment of microplastics in practical wastewater treatment.

**Keywords:** microplastics; ferrate; Rhodamine B; oxidative degradation

## 1 引言

微塑料(Microplastics, MPs)是一种直径小于 5 mm 的塑料纤维、颗粒或薄膜,被广泛用于建筑、汽车制造、电子、农业等领域的高分子聚合物<sup>[1]</sup>。微塑料具有粒径小、比表面积大、疏水性强的特点,对有机污染物、重金属、病原微生物等有很强的亲和力。Rochman 等<sup>[2]</sup>指出,有机污染物在橡胶塑料上比玻璃塑料具有更高的吸附亲和力。邱强松等<sup>[3]</sup>研究了微塑料与四环素在水溶液中的吸附作用,微塑料 PS 和微塑料 PET 对四环素的最大吸附量分别为 0.31 mg/g 和 0.40 mg/g,说明微塑料与有机污染物的复合作用,由于微塑料具有较大比表面积和较高的疏水性,很容易吸附水环境中的有机物污染物,成为其载体。微塑料也会通过血液循环在组织和器官内富集。在肠道系统,会引起炎症、氧化应激和严重的肠道菌群失调。微塑料严重威胁到地球生命健康安全,成为世界上广泛关注的最严重环境问题之一。相关研究结果表明,与大尺寸微塑料相比,粒径小于 20  $\mu\text{m}$  微塑料具有更高的生殖毒性和神经毒性<sup>[4]</sup>。大部分微塑料相关的研究都是大于 100  $\mu\text{m}$  的微塑料,因此,对粒径小于 20  $\mu\text{m}$  的微塑料的研究很有必要。

微塑料在水厂中的含量很高。目前污水处理厂现有的处理工艺大多数都针对水质处理指标,并没有专门针对微塑料这一新兴污染物的去除环节,且因污水处理厂进水来源复杂、进出水都含有较多微塑料等特点,污水处理厂成为微塑料的重要来源和关键去除保障。污水处理厂的预处理、一级、二级和三级处理工艺对 MPs 的去除率分别为 6.0% ~ 58.6%、19.1% ~ 99.0%、-66.7% ~ 92.6% 和 -72.7% ~ 99.9%<sup>[5]</sup>。沉淀、过滤等工艺能轻易地去除粒径大于 20  $\mu\text{m}$  的微塑料,而对粒径小于 20  $\mu\text{m}$  的微塑料去除效率极低。虽然大颗粒微塑料数量沿流程逐渐减少,但小颗粒微塑料数量却不断升高,反冲洗、化学氧化等都会导致微塑料的老化与破碎,变成更小颗粒<sup>[6]</sup>。因此,小尺寸的微塑料(<20  $\mu\text{m}$ )的去除是污水处理厂去除的难点和重点。

高铁酸盐(Fe(VI))是近年来备受瞩目的新型高效

水处理剂,与其他水处理剂相比,它具有氧化还原电位较高,反应产物对环境无毒害以及絮凝作用较强等优势<sup>[7]</sup>。高铁酸盐的氧化性能受多种因素影响,如酸碱性等, Yang 等<sup>[8]</sup>通过研究高铁酸盐降解有机物产生的颗粒,发现酸碱度对高铁酸盐发挥氧化作用具有较大影响,氧化有机物的过程中存在羟基化途径、键断裂途径和偶联途径。高铁酸盐的降解率还受水体中共存物质的影响, Lim 等<sup>[9]</sup>将高铁酸钾用于同步去除三种重金属(Cu、Mn 和 Zn)和天然有机物(腐殖酸和黄腐酸),并提出 0.5 mM(以 Fe 为计量)高铁酸钾是去除 0.1 mM 重金属和 10 mg/L 天然有机物的最佳投量。说明高铁酸盐的氧化性能不止受酸碱性的影响,还会受水环境中存在的其他物质的影响。

微塑料是目前普遍关注的水质因素之一。实际水体环境复杂,高铁酸盐氧化降解微塑料的研究表明:水中的一些有机污染物,可以富集到  $\text{MP-Fe}_x\text{O}_x$  复合物中,并可以通过高铁酸盐氧化后的沉淀一起去除<sup>[10]</sup>,大多数研究侧重于研究高铁酸盐对微塑料的去除,而微塑料对高铁酸盐氧化性能的影响未见报道。因而通过一系列研究初步探究微塑料对高铁酸盐降解有机物的影响非常有必要,将微塑料这一类污染物合理运用于高铁酸盐治理污水的情况下,提高高铁酸盐体系的氧化能力,解决高铁酸盐在不同水环境下的短板,使其在实际生活中能有效处理自然污水,达到最佳处理效果。

## 2 材料和方法

### 2.1 材料

微塑料聚丙烯(PP, 10  $\mu\text{m}$ )、微塑料聚乙烯(PE, 10  $\mu\text{m}$ )、微塑料聚苯乙烯(PS, 10  $\mu\text{m}$ )均购自科信达;罗丹明 B(分析纯>98%)、高铁酸钾(分析纯,纯度>98%)、腐殖酸(黄腐殖酸 FA  $\geq 90\%$ )均购自上海阿拉丁生物化学科技公司。实验中所有溶液均由超纯水配置。

### 2.2 实验仪器

磁力搅拌器;PHS-3C 型 pH 计,上海雷磁仪器厂;UV1102 型紫外可见分光光度计,上海天美科学仪器有限公司;SU1510 型扫描电子显微镜,日本日立公司。

### 2.3 实验方法

取一定量(100 mg/L)微塑料加入 500 mL 的罗丹明 B 溶液中,磁力搅拌,使二者充分接触,30 min,取出 20 mL 混合液,过滤后测溶液中罗丹明 B 的吸光度。在剩下溶液中加入高铁酸盐用 0.45  $\mu\text{m}$  水相滤膜过滤后,采用紫外分光光度计在 554 nm 下测吸光度,分析混合溶液中的罗丹明 B 浓度,以检测微塑料表面吸附对罗丹明 B 的影响。再向罗丹明 B-微塑料混合溶液中加入一定体积的新鲜、离心和标准化的高铁酸钾溶液来引发氧化反应,反应 20 min 后取 20 mL 反应后溶液,采用 0.2 mL 50 mmol/L 硫代硫酸钠溶液猝灭氧化反应,用滤膜过滤分析样品罗丹明 B 的浓度。

### 2.4 分析方法

#### 2.4.1 高铁酸盐浓度

按下式计算制高铁酸盐溶液中的 6 价铁离子的实际浓度(6 价铁离子在 510 nm 处的摩尔吸收率( $\epsilon_{510\text{ nm}} = 1\ 150\ \text{M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ))。

$$C = 1\ 000 \times \frac{A}{1\ 150 \cdot l}$$

其中,  $C$  为 6 价铁离子的浓度 mmol/L (mM);  $A$  为 6 价铁离子在 510 nm 处的吸光度。

#### 2.4.2 罗丹明 B 去除率

根据朗博-比尔定律,可以通过测定溶液中的吸光度值从而计算出罗丹明 B 的去除率(脱色率)。其计算公式如下:

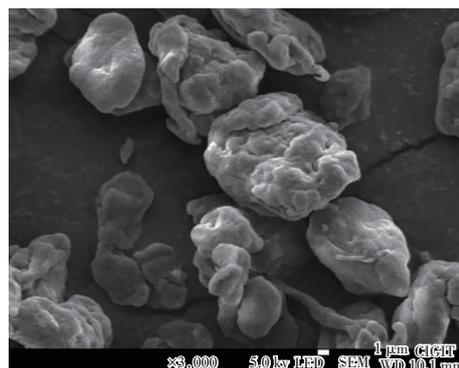
$$\text{去除率}(\%) = (C_0 - C_t) / C_0$$

其中,  $C_0$  为罗丹明 B 的初始吸光度值;  $C_t$  为第  $t$  时刻罗丹明 B 的吸光度值。

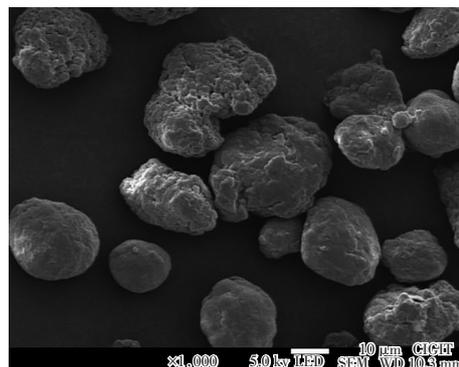
## 3 结果与讨论

### 3.1 PE 微塑料和铁离子表征

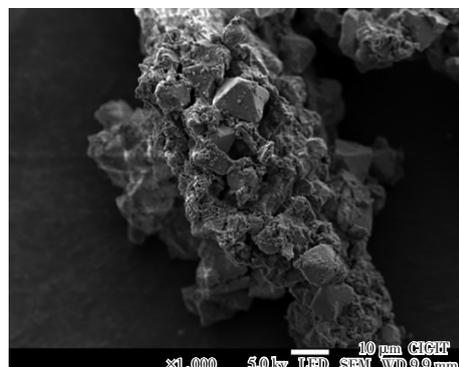
采用 SEM 表征微塑料表面形貌特征及其改变状况。初始微塑料(图 1(a))近似球形,表面光滑,无孔隙。与初始微塑料相比,在高铁酸盐反应体系中反应后的微塑料(图 1(b))形状和表面粗糙度均发生了不同程度的改变,粒径变小,形状呈现明显的蜂窝状、半蜂窝状。显而易见,形貌的改变是由高铁酸钾造成的,改变程度反映了污染物的降解程度,说明微塑料深度参与了高铁酸盐的氧化反应过程。铁离子(图 1(c))表面吸附有沉淀,且沉淀表面高低不平,非常粗糙。说明高铁酸盐还原产物  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  对溶液中的反应物或产物有吸附作用。



(a) PE



(b) 反应后 PE



(c) 铁离子

图 1 微塑料和铁离子 SEM 图谱(a-PE,b-反应后 PE,c-铁离子)

Fig. 1 SEM maps of microplastics and iron ions  
(a-PE, b-PE after reaction, c-iron ions)

### 3.2 不同类型微塑料的影响

不同类型微塑料对罗丹明 B 降解影响如图 2 所示,在没有高铁酸盐的体系中,罗丹明 B 有微量的去除,去除率分别为 3.62%、3.60%、3.81%,由于微塑料与罗丹明 B 之间不发生化学反应,故主要是由于微塑料吸附作用造成的。反应系统中存在 PE、PP 和 PS 时,罗丹明 B 的去除率分别是 89.82%、88.27%、87.60%,但是都略高于没有微塑料时的情况,因此,微塑料对高铁酸盐的氧化作用影响有待探究。相关研究表明:吸附剂的结晶度对吸附性能具有影响<sup>[11]</sup>, PE、

PP、PS 三种微塑料的结晶度大小为:PE> PP> PS,其中 PE 和 PP 是半结晶聚合物,PS 属于非晶态聚合物<sup>[12]</sup>。但不同类型微塑料对高铁酸盐降解效果的影响差异不显著,故后续均采用 PE 微塑料。

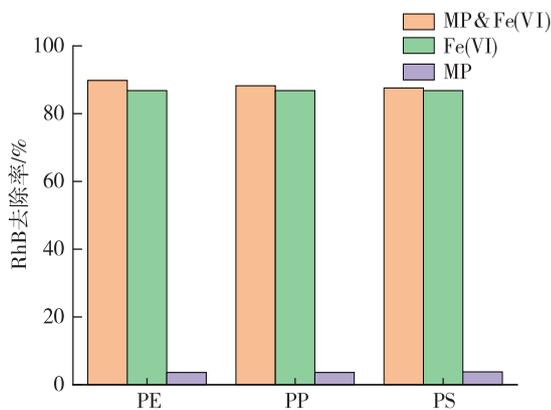


图 2 微塑料类型的影响

Fig. 2 Influence of the microplastic types

### 3.3 微塑料浓度的影响

由图 3 可知,随着微塑料浓度的增加,对罗丹明 B 的吸附去除效率缓慢增加,由 3.95% 增加至 7.76%,而高铁酸盐对罗丹明 B 的氧化去除率呈略微下降的趋势,微塑料浓度较低时 (<100 mg/L),表现出促进罗丹明 B 的降解的作用,大于 100 mg/L 的微塑料会抑制罗丹明 B 的降解。由于微塑料具有粒径小,比表面积大等特点,故微塑料浓度越高,吸附效果越好,而高浓度的微塑料存在时,罗丹明 B 的降解下降可能有两方面的原因,一方面微塑料阻碍了高铁酸盐的活性成分与有机物的接触机会,另一方面部分高铁酸盐被微塑料消耗。为了研究微塑料对高铁酸盐氧化促进作用,以下实验微塑料的浓度都设置为 100 mg/L。

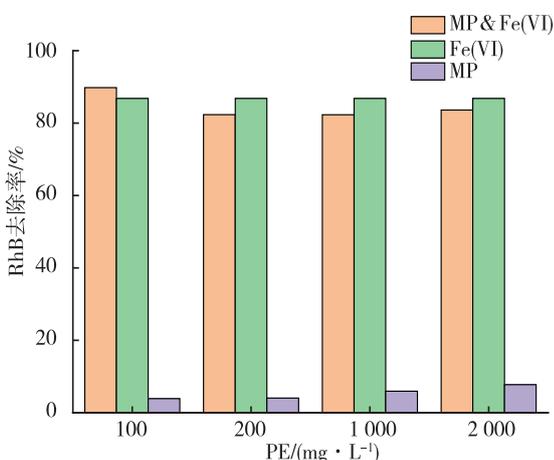


图 3 微塑料浓度的影响

Fig. 3 Influence of the microplastic concentrations

### 3.4 高铁酸盐浓度的影响

由图 4 可知,高铁酸盐的浓度与目标物的去除率呈正相关,即随着高铁酸盐的浓度不断上升,罗丹明 B 的去除率也随着增加。当高铁酸盐的浓度从 50  $\mu\text{g/L}$  提升至 150  $\mu\text{g/L}$  时,污染物罗丹明 B 的去除率由 36.03% 增加至 89.82%。由于高铁酸盐的浓度增加,导致  $\text{FeO}_4^{2-}$  的浓度充足,使得罗丹明 B 和  $\text{FeO}_4^{2-}$  之间的碰撞几率增加,从而导致罗丹明 B 的去除率增加。除此之外由高铁酸钾自身稳定性的性质可知,高铁酸钾的浓度越高,其稳定性越差,高铁酸盐的浓度较大,可以生成大量的  $\text{FeOOH}$  催化高铁酸盐的分解,这种情况下,高铁酸盐的浓度越大,生成的  $\text{FeOOH}$  越多,其稳定性越差<sup>[13]</sup>,自分解的速度也越快,从而使得对污染物的去除率增加<sup>[14]</sup>。在不同高铁酸盐浓度下,微塑料都对罗丹明 B 的去除有促进作用。微塑料促进罗丹明 B 的降解可能是由于微塑料将罗丹明 B 吸附到了其表面,或者微塑料激发了高铁酸盐氧化过程的自由基的产生或作用。

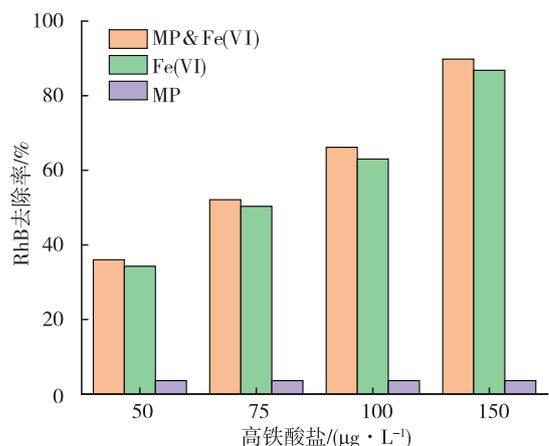


图 4 高铁酸盐浓度的影响

Fig. 4 Influence of the concentrations of ferrate

### 3.5 罗丹明 B 初始浓度的影响

由图 5 可知,在高铁酸盐和微塑料浓度一定的情况下,当罗丹明 B 的初始浓度从 10  $\mu\text{M}$  增加到 30  $\mu\text{M}$  时,其去除率逐渐降低,罗丹明 B 的去除率由 99.16% 降至 72.48%。在高铁酸钾用量相同的条件下,初始氧化剂的浓度不变,只增加反应体系中罗丹明 B 的初始浓度,单个氧化剂周围罗丹明 B 分子量数量相对增加,增加了氧化剂与罗丹明 B 接触并发生氧化反应的机会,罗丹明 B 降解总量增加。随着反应时间的增加,氧化剂被消耗,溶液中高铁酸根的浓度逐渐减少,罗丹明 B 的氧化降解反应逐渐减弱<sup>[15]</sup>。而在不同的污染物初

始浓度下,微塑料都对其降解有促进作用。根据吸附去除率与氧化吸附去除率的变化规律,可以推断微塑料在高铁酸盐氧化系统中的促进降解作用不仅仅是由吸附引起的,微塑料可能促进高铁酸盐的水解生成氧化活性物质,而其中机理有待探索。

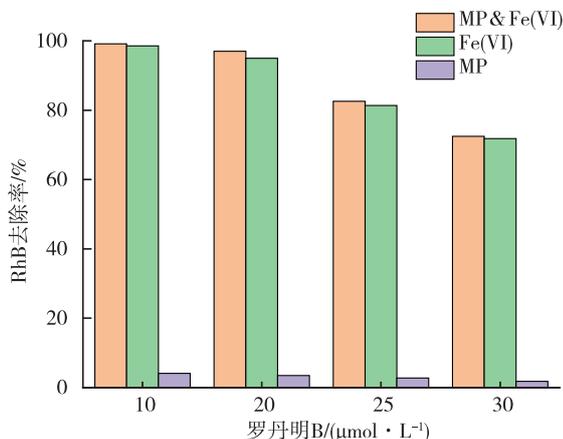


图 5 罗丹明 B 初始浓度的影响

Fig. 5 Influence of the initial Rhodamine B concentrations

### 3.6 初始 pH 值的影响

由图 6 可知, pH 值从 5 上升至 8 时,罗丹明 B 的去除率从 99.44% 降低至 74.75%,在 pH=5 时去除率达到最大值。根据 Sharma 等<sup>[16]</sup>的研究,当 pH<7 时,高铁酸盐主要以  $\text{H}_3\text{FeO}_4^{+}$ 、 $\text{H}_2\text{FeO}_4$  和  $\text{HFeO}_4^-$  形式存在,这 3 种离子稳定性较差,自分解速度快,但是氧化性能极强,可以快速地氧化罗丹明 B;而当 pH>7 时, $\text{FeO}_4^{2-}$  是高铁酸盐在水溶液中的主要存在形式,这种形态的离子稳定性好,自分解速度慢,但是氧化性能较差<sup>[6]</sup>,所以造成随着 pH 值的上升,污染物的去除率下降。但是在不同的 pH 条件下,仅有微塑料存在情况下,微塑料的吸附作用随着 pH 值的上升而升高,降解率由 2.89% 升至 3.5%,说明在不同的 pH 条件下,微塑料都表现为可以促进高铁酸盐降解有机物,弱碱性条件下更显著。

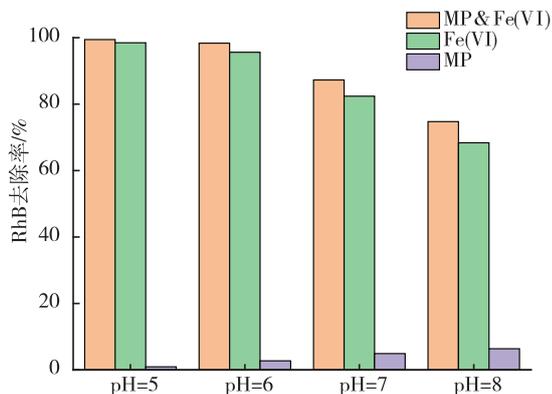


图 6 初始 pH 值的影响

Fig. 6 Influence of the initial pH values

### 3.7 天然有机物的影响

由图 7 可知,在没有微塑料的反应体系中,罗丹明 B 的去除率由 82.03% 降至 54.78%,天然有机物浓度越高,罗丹明 B 的降解率越低,说明天然有机物的存在抑制了罗丹明 B 降解反应。

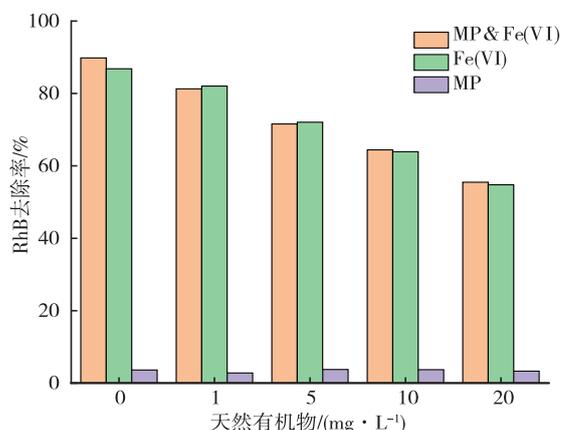


图 7 天然有机物浓度的影响

Fig. 7 Influence of natural organic matter concentrations

腐殖酸存在的情况下,高铁酸盐与腐殖酸快速反应,造成高铁酸盐与罗丹明 B 反应的浓度降低,从而导致罗丹明 B 的去除率降低,故而产生了明显的抑制作用。腐殖酸和罗丹明 B 除了在氧化阶段竞争反应以外,高铁酸盐自分解产生具有吸附能力的三价铁纳米颗粒的吸附阶段,未消耗的腐殖酸与罗丹明 B 之间产生的吸附竞争,导致吸附效率降低,从而导致罗丹明 B 的去除率降低。另外,腐殖酸中所含的大量官能团,如羧基,酚羟基,芳香族,烷基等,会以不同的机制与氧化剂和其他污染物发生反应<sup>[17]</sup>。天然有机物和罗丹明 B 形成竞争,干扰高铁酸盐氧化降解罗丹明 B,从而降低罗丹明 B 的去除率。同时,微塑料对天然有机物也具有吸附作用,干扰微塑料吸附降解罗丹明 B,微塑料的吸附极易达到饱和,故出现低浓度条件下,存在微塑料的反应体系的去除率低于没有微塑料存在的反应体系的去除率。

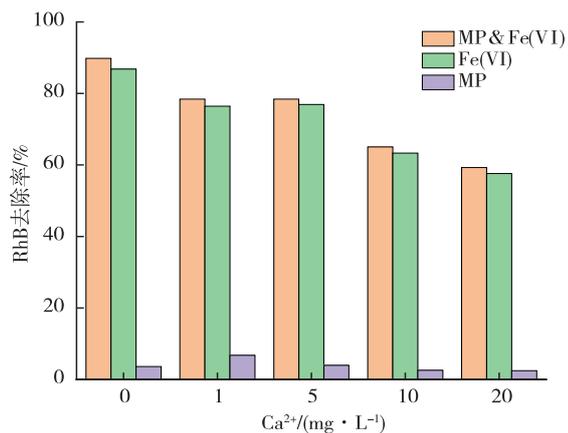
### 3.8 无机离子浓度的影响

许多文献报道了溶液中共存的其他离子对高铁酸钾的稳定性也有显著的影响。Mose<sup>[18]</sup>的研究表明高铁酸钾溶液中加入  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{BrO}_3^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{ClO}_3^-$ 、 $\text{ClO}_2^-$  会促进高铁酸钾的氧化性;而钙、镉、镁等金属离子及有机物的加入会加速高铁酸钾的分解,但是研究结论会因为研究环境的不同导致实验结论有所偏差。

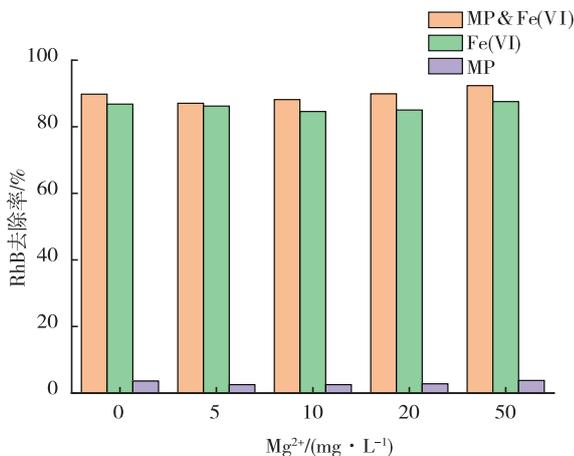
该实验考察自然水体及废水中较为常见的阴离子 ( $\text{SO}_4^{2-}$ )、阳离子 ( $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$ ) 对罗丹明 B 降解效果的影响。由图 8(a) 分析可以得出,当水中存在  $\text{Ca}^{2+}$  时,随

着  $\text{Ca}^{2+}$  浓度的增加,罗丹明 B 的去除率降低。根据 Ma<sup>[16]</sup> 的研究,在溶液中存在  $\text{Ca}^{2+}$  的情况下, $\text{Ca}^{2+}$  会促进高铁酸钾的自分解,使得高铁酸钾与罗丹明 B 的反应浓度降低,从而导致罗丹明 B 的去除率降低。

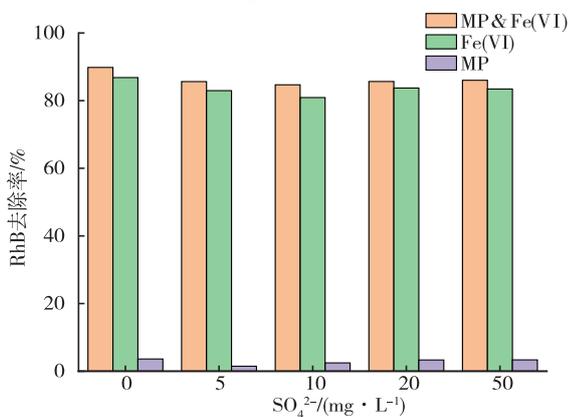
由图 8(b)和 8(c)可知, $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  对高铁酸盐氧化降解罗丹明 B 几乎没有影响,且仅存微塑料的条件下,微塑料对罗丹明 B 的吸附去除率波动为 0.3%~1%,影响不大。



(a)  $\text{Ca}^{2+}$  浓度的影响



(b)  $\text{Mg}^{2+}$  浓度的影响



(c)  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度的影响

图 8 无机离子的影响

Fig. 8 Influence of inorganic ions

## 4 结论

(1) 由于微塑料与罗丹明 B 之间不发生化学反应,故微塑料对罗丹明 B 的降解主要是吸附作用造成的。不同微塑料对高铁酸盐降解效果差异不大,但微塑料浓度的增加,可促进对罗丹明 B 的吸附降解率。

(2) 随着高铁酸盐浓度的增加,罗丹明 B 的去除率也随之增加,微塑料促进罗丹明 B 的吸附降解效果不变。但随着高铁酸盐的浓度不变,罗丹明 B 的浓度增加,去除率降低,微塑料对罗丹明 B 的吸附率也降低,说明底物浓度越高,微塑料越容易达到吸附饱和。

(3) 高铁酸盐降解罗丹明 B 受 pH 值影响较大,在酸性条件下降解效果最佳,弱碱性条件下,去除率降低。微塑料在不同 pH 条件下都表现为促进作用,但在弱碱性条件下降解效果最佳,酸性条件下,去除率降低。

(4) 微塑料对高铁酸盐降解罗丹明 B 的影响受天然有机物的影响较大。天然有机物和罗丹明 B 形成竞争,干扰高铁酸盐氧化降解罗丹明 B,从而降低罗丹明 B 的去除率,同时也干扰微塑料吸附降解罗丹明 B,微塑料的吸附极易达到饱和,故出现低浓度条件下,存在微塑料的反应体系的去除率低于没有微塑料存在的反应体系的去除率。

(5) 除了  $\text{Ca}^{2+}$  以外, $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  对高铁酸盐氧化降解罗丹明 B 几乎没有影响。 $\text{Ca}^{2+}$  的存在会促进高铁酸钾的自分解,使可用于与罗丹明 B 反应的氧化剂浓度降低,导致罗丹明 B 的去除率降低。

## 参考文献(References):

- [1] THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic? [J]. Science, 2004, 304 (5672): 838.
  - [2] ROCHMAN C M, HOH E, HENTSCHEL B T, et al. Long-term field measurement of sorption of organic contaminants to five types of plastic pellets: implications for plastic marine debris[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(3): 1646-1654.
  - [3] 邱强松, 邱程, 王龙, 等. 微塑料对四环素的吸附性能研究[J]. 绿色科技, 2023, 25(2): 182-185, 191.
- QIU Qiang-song, QIU Cheng, WANG Long, et al. Study on the adsorption performance of micro plastic on tetracycline[J].

- Journal of Green Science and Technology, 2023, 25(2): 182–185, 191.
- [4] YIN, KAI, WANG Y, et al. A comparative review of microplastics and nanoplastics: Toxicity hazards on digestive, reproductive and nervous system[J]. Science of The Total Environment[2024-10-12]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145758.
- [5] WANG Z, LIN T, CHEN W. Occurrence and removal of microplastics in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP) [J]. Science of the Total Environment, 2020, 700: 134520.
- [6] 孟祥茹, 贾汉东, 刘学军, 等. 高铁酸钾对偶氮及醌类染料的脱色作用[J]. 郑州大学学报(自然科学版), 2001, 33(3): 78–80.
- MENG Xiang-ru, JIA Han-dong, LIU Xue-jun, et al. Decolorization of azo dye and quinoid dye with potassium ferrate[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2001, 33(3): 78–80.
- [7] 姜洪泉, 于秀娟, 王鹏, 等. 高铁酸钾预氧化去除水中苯酚及其机理[J]. 中国给水排水, 2003, 19(S1): 47–48.
- JIANG Hong-quan, YU Xiu-juan, WANG Peng, et al. Removal of phenol from water by potassium ferrate pre-oxidation and its mechanism[J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(S1): 47–48.
- [8] YANG T, WANG L, LIU Y L, et al. Ferrate oxidation of bisphenol F and removal of oxidation products with ferrate resulted particles[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 383: 123167.
- [9] LIMM, KIM M J. Effectiveness of potassium ferrate ( $K_2FeO_4$ ) for simultaneous removal of heavy metals and natural organic matters from river water[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2010, 211(1): 313–322.
- [10] LIU R, CHEN Y, WU X, et al. Modifications to microplastics by potassium ferrate (VI): Impacts on sorption and sinking capability in water treatment[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(18): 53807–53816.
- [11] UBER T H, HÜFFER T, PLANITZ S, et al. Characterization of sorption properties of high-density polyethylene using the poly-parameter linear free-energy relationships[J]. Environmental Pollution, 2019, 248: 312–319.
- [12] 王毅. 水中微塑料(PS、PE、PP)对阿特拉津的吸附机制研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2021.
- WANG Yi. Study on the adsorption mechanism of atrazine by microplastics (PS, PE, PP) in water[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2021.
- [13] 杨卫华, 王建明, 曹江林, 等.  $K_2FeO_4$  在稀 KOH 溶液中的稳定性研究[J]. 化学学报, 2004, 62(19): 1951–1955.
- YANG Wei-hua, WANG Jian-ming, CAO Jiang-lina, et al. Stability of  $K_2FeO_4$  in dilute KOH solution[J]. Acta Chimica Sinica, 2004, 62(19): 1951–1955.
- [14] 莫桑.  $ZnSO_4$  活化高铁酸钾高效降解罗丹明 B 的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- MO Sang. Study on efficient degradation of Rhodamine B by  $ZnSO_4$  activated potassium ferrate[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [15] 王小娜. 高铁酸钾氧化降解卡马西平的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- WANG Xiao-na. Experimental study on oxidative degradation of carbamazepine by potassium ferrate[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [16] SHARMA V K, BURNETT C R, MILLERO F J. Dissociation constants of the monoprotic ferrate(VI) ion in NaCl media[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2001, 3(11): 2059–2062.
- [17] 李文轩, 王宁, 王洪波, 等. 腐殖酸对高铁酸盐去除水中污染物影响机制探讨[J]. 四川环境, 2023, 42(2): 317–321.
- LI Wen-xuan, WANG Ning, WANG Hong-bo, et al. Discussion on the influence mechanism of humic acid on the removal of pollutants from water by ferrate[J]. Sichuan Environment, 2023, 42(2): 317–321.
- [18] SCHREYER J M, OCKERMAN L T. Stability of ferrate(VI) ion in aqueous solution [J]. Analytical Chemistry, 1951, 23(9): 1312–1314.

责任编辑:陈芳