

# 湖库水体中 DMP 在主要无机离子和 SDS 作用下的光降解行为模拟

牛明芬<sup>1</sup>, 兰心茹<sup>1,2</sup>, 马建<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所  
污染生态与环境工程重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要** 目的 探究近自然水体环境条件下无机离子和十二烷基硫酸钠(SDS)对邻苯二甲酸二甲酯(DMP)光降解的影响。方法 以辽宁省大伙房水库库区水体为参照,配置与自然水体组成近似的离子组成溶液、SDS 溶液及二者混合液,投入等量邻苯二甲酸二甲酯,利用人工光化学反应仪以自然可达最大紫外光强度照射,用高效液相色谱法测定各混合液中 DMP 质量浓度。结果 DMP 能在 $\cdot\text{NO}_2$  攻击机制下完全降解;SDS 由于氧阻碍和光源竞争,导致降解率降低至 69.7%;无机离子能通过促进氧化自由基生成,促进 DMP 降解,阴、阳离子的促进作用从大到小依次为: $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ;  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ 。无机离子和 SDS 共同存时, DMP 的降解率下降至 83.4%, SDS 对 DMP 光解的抑制作用大于无机离子的促进作用。结论 氧化自由基攻击氧化是水体中常见 DMP 降解机制,无机离子及 SDS 均能通过产生氧化自由基使 DMP 降解;SDS 能弱化无机离子的降解促进作用。采用光解法去除水中的 DMP 时,应着重考虑 SDS 对处理效果的影响。

**关键词** DMP;光降解;硝酸根离子;SDS;无机离子

中图分类号 TU99;X524

文献标志码 A

## Simulation on the Photodegradation Behavior of DMP under Major Inorganic Ions and SDS in Lake and Reservoir

NIU Mingfen<sup>1</sup>, LAN Xinru<sup>1,2</sup>, MA Jian<sup>2</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;  
2. Key Laboratory of Pollution Ecology and Environment Engineering, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China, 110016)

**Abstract:** The aim of this paper is to investigate the effects of inorganic ions and sodium dodecyl

收稿日期:2020-12-29

基金项目:国家重大科技专项(2018ZX07601);辽宁省教育厅科研项目(jytcy201819)

作者简介:牛明芬(1967—),女,教授,主要从事污染修复生态学方面研究。

benzene sulfonate (SDS) on the photodegradation of phthalates (PAEs) in a near natural water environment. The ionic composition solution, SDS solution, and their mixture were prepared with the water quality characteristics of Dahuofang Reservoir in Liaoning Province as a reference. The same amount of dimethyl phthalate (DMP) was put into these mixtures. Photodegradation experiments were performed in an artificial photochemical reactor. The irradiation light intensity was set at the maximum UV light intensity in nature. The concentration of DMP in each mixture was determined by high-performance liquid chromatography (HPLC). DMP could be completely degraded by  $\cdot\text{NO}_2$  attack. However the degradation rate could be reduced to 69.7% because of SDS competing light in the water. The degradation of DMP can be promoted by inorganic ions promoting the formation of oxidation free radicals. The promotion order of anions and cations are:  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ;  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , respectively. When inorganic ions and SDS coexist, the degradation rate of DMP was decreased to 83.4%. The inhibition of SDS on the photodegradation of DMP was greater than promotion of inorganic ions. Oxidative free radical attacking oxidation was a common degradation mechanism of DMP in water. Inorganic ions and SDS could degrade DMP by producing oxidative free radicals. SDS can weaken the degradation promotion of inorganic ions. The results of this experiment indicated that when using photolysis to remove DMP from water, the effect of SDS on the treatment effect should be considered.

**Key words:** DMP; photodegradation; nitrate ion; SDS; inorganic ion

邻苯二甲酸酯 (Phthalic Acid Esters, PAEs), 又称酞酸脂, 俗称塑化剂, 是塑料生产中的主要添加剂, 主要用于增加塑料和橡胶制品的可塑性、强度及韧性<sup>[1]</sup>。但它能干扰人的内分泌, 是具有毒性的“环境激素”<sup>[2-4]</sup>。我国生态环境部和美国国家环保局 (EPA) 已经将 PAEs 中的邻苯二甲酸二甲酯 (DMP) 列为优先控制污染物<sup>[5]</sup>。DMP 因溶解度较大, 流动性较强, 在环境中更易扩散, 所以成为主要控制对象<sup>[6]</sup>。硝酸根离子 ( $\text{NO}_3^-$ ) 是自然水体中氮的稳定存在形式,  $\text{NO}_3^-$  可以在紫外光的照射下转化成  $\cdot\text{NO}_2$  自由基,  $\cdot\text{NO}_2$  自由基攻击氧化 PAEs, 使 PAEs 得到降解<sup>[7-8]</sup>。十二烷基硫酸钠 (Sodium Dodecyl Sulfate, SDS) 是自然水体中常见的表面活性剂, 属于合成型阴离子表面活性剂, 主要被用于洗涤用品中, 具有乳化、去污、发泡等功能<sup>[9]</sup>。在以  $\cdot\text{NO}_2$  自由基氧化攻击为主要机制降解 DMP 时, SDS 中存在的疏水基能够影响氧气及其他气体的进入<sup>[10]</sup>, 可能影响  $\text{NO}_3^-$  转化成  $\cdot\text{NO}_2$  自由基, 同时 SDS 的烷基链状结构可能与邻苯二甲酸酯类物质光降解过程中产生的中间体邻苯二甲酸竞争紫

外光<sup>[11]</sup>, 进而影响 DMP 的降解, 因此 SDS 有可能成为 DMP 在  $\text{NO}_2$  自由基氧化攻击机下光降解的障碍因素, 但其作用效果尚不明确。近年来, 诸多学者主要围绕催化剂的种类、用量、溶液 pH、起始浓度、光照条件等方面研究对邻苯二甲酸酯类光降解的影响<sup>[12-14]</sup>, 但对自然水体条件下离子组合及 SDS 对塑化剂光降解产生的影响研究较少。为此, 笔者以辽宁省大伙房水库自然水体为参照, 分析近自然情况下, 湖库水体中塑化剂的主要降解规律。探究常见无机离子及 SDS 对 DMP 光降解的影响, 明确自然水体环境条件下, 主要无机离子及 SDS 在塑化剂光降解过程起到的作用。

## 1 实验

### 1.1 原水水质

原水取自辽宁省大伙房水库, 对水质进行检测, 发现水库水常年总氮超标, 且主要以硝酸盐氮 ( $\text{NO}_3^-$ ) 为主, 质量浓度可达 20 mg/L, 是典型的高硝酸盐类型水库。对水质进行 GC-MS 检测, 发现洗衣粉类 SDS 为水库水的主要 SDS 组成。

### 1.2 实验条件

仪器:1A-15C 型纯水机,北京亿利资源集团有限公司生产;UltiMate3000 型高效液相色谱仪,赛默飞世尔科技有限公司生产;

HF-GHX-V 型光化学反应仪,上海贺帆仪器有限公司生产;LS125 型紫外辐照计,深圳市林上科技有限公司生产,探头参数如表 1 所示。

表 1 紫外辐照计探头参数

Table 1 Probe parameters of ultraviolet irradiator

型号	长×宽×高/mm	波长/nm	紫外光强度/( $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	测量精度/%	取样速度/(次 $\cdot\text{s}^{-1}$ )
UVA-X1	39×32×15	260~400	0~200 000	±10	6

试剂:邻苯二甲酸二甲酯(DMP),分析纯,成都市科隆化学制品有限公司生产;硝酸钾、硝酸钠、硝酸钙、硫酸钾、氯化钾,分析纯,国药集团化学试剂有限公司生产;十二烷基硫酸钠(SDS),优级纯,北京沃凯生物科技有限公司生产。

DMP 测试色谱条件:Gemini C18 柱,柱长 250 mm,直径 4.6 mm;65% 的乙腈和 35% 水作为流动相,柱温 35℃,流速 1.2 mL/min,运行时间 5 min,检测波长 225 nm,进样量 20  $\mu\text{L}$ 。

### 1.3 实验方法

大伙房水库周边地区太阳光紫外辐射最大强度可达 4 373  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,笔者采用光化学反应仪模拟光降解环境,并通过控制反应器灯能量强度来搭建合理的光降解条件。经测定,当光化学反应仪汞灯输出强度为 500 W 时,在反应仪石英管处所获得的小于 400 nm 的紫外光平均强度为 4 237  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,近似于自然环境中可获得的紫外光强度最大值,反应仪模拟符合自然条件。光降解模拟实验时,将不同处理的样品装入 30 mL 的石英玻璃管中,管口用塞子封住以保证实验过程中液体质量不发生变化,通过仪器自带的磁力搅拌器使溶液始终处于均匀混合状态。

### 1.4 实验设计

1.4.1 SDS 对 $\cdot\text{NO}_2$ 自由基氧化攻击机制中 DMP 光降解影响的实验设计

配置质量浓度为 10 mg/L 的 DMP 溶液设为对照组溶液(CK);向对照组 DMP 溶液中分别单独添加与共同添加  $\text{NO}_3^-$  和 SDS 的降解物

(见表 2)。分别在 0 h、0.33 h、0.67 h、1 h、1.5 h、2 h、3 h、4 h、5 h、7 h、10 h、13 h、16 h、19 h、24 h、28 h、31 h 时刻对 CK 溶液和 3 种不同添加方式的溶液进行取样。

表 2 降解物的添加方式与浓度

Table 2 Adding method and concentration of degradation products

添加方式	$c(\text{NO}_3^-)$	$c(\text{SDS})$
单独添加	0.2	0
单独添加	0	0.2
共同添加	0.2	0.2

1.4.2 无机离子组合对 $\cdot\text{NO}_2$ 自由基氧化攻击机制中 DMP 光降解影响的实验设计

分别向纯水配置的质量浓度为 10 mg/L 的 DMP 溶液中单独添加  $\text{KNO}_3$ 、 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{K}_2\text{SO}_4$  和  $\text{KCl}$  5 种无机盐,以引入  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$ ,并分别用  $\text{KNO}_3$  来补充  $\text{NO}_3^-$ ,确保 5 组处理中的  $\text{NO}_3^-$  的物质的量浓度为 0.2 mmol/L,无机离子组合方式及添加浓度如表 3 所示。分别在 0 h、0.33 h、0.67 h、1 h、1.5 h、2 h、3 h、4 h、5 h、7 h、10 h、13 h、16 h、19 h、24 h、28 h、31 h 时刻对 5 组进行取样。

1.4.3 配置离子溶液及水库水中 DMP 光降解的实验设计

分别用纯水溶液和离子溶液配置 DMP 质量浓度为 10 mg/L 的反应液,并以这两种溶液为对照组(CK),再分别向这两种溶液中添加物质的量浓度为 0.2 mmol/L 的 SDS,

表3 无机离子组合方式及添加浓度

Table 3 Combination method and concentration of inorganic ions										mmol/L
第I组		第II组		第III组		第IV组		第V组		
$c(\text{KNO}_3)$	$c(\text{KNO}_3)$	$c(\text{KNO}_3)$	$c(\text{NaNO}_3)$	$c(\text{KNO}_3)$	$c(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2)$	$c(\text{KNO}_3)$	$c(\text{K}_2\text{SO}_4)$	$c(\text{KNO}_3)$	$c(\text{KCl})$	
0.1	0.1	0.1	0.1	0.07	0.07	0.2	0.2	0.2	0.2	

其中配置离子溶液是按照大伙房水库水体中主要离子组成比例来配置的模拟反应液,但由于水库水体成分十分复杂,所以配置的离子溶液浓度与实际情况有些许差异,库区水

及配置水体离子种类及质量浓度如表4所示。分别在0 h、1 h、3 h、5 h、7 h、10 h、13 h、16 h、19 h、24 h、28 h、31 h时刻对两种CK溶液和两种添加了SDS的溶液进行取样。

表4 大伙房水库水及配置离子溶中主要阴阳离子种类及质量浓度

Table 4 Types and concentrations of main anions and cations in Dahuofang Reservoir

溶液类型	$\rho(\text{Na}^+)$	$\rho(\text{K}^+)$	$\rho(\text{Ca}^{2+})$	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{NO}_3^-)$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$
库区水	6.6	3.3	22.9	3.7	22.7	28.7
配置水	8.0	5.0	14.0	8.9	27.9	24.9

2 实验结果与分析

2.1 SDS对·NO<sub>2</sub>氧化攻击机制下DMP光降解的影响

图1为在紫外光照条件下,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>与SDS对DMP光降解的影响。

明了·NO<sub>2</sub>自由基氧化攻击是模拟条件下DMP降解的主要机制。降解过程先期DMP质量浓度下降较快,随着反应的进行DMP的质量浓度下降逐渐缓慢,这主要是因为NO<sub>3</sub><sup>-</sup>分解产生的NO<sub>2</sub><sup>-</sup>又会与·OH发生反应而消耗部分·OH发生自抑制作用,进而会降低DMP的降解效率,抑制DMP的降解<sup>[15-17]</sup>。所以NO<sub>3</sub><sup>-</sup>对DMP的降解为NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的促进与抑制共同作用导致的,总体上以NO<sub>3</sub><sup>-</sup>促进作用为主。

单独添加SDS时,SDS也可促进DMP降解。原因是SDS为DMP的降解提供氢原子<sup>[18]</sup>,生成中间产物苯甲酸,进而分解成二氧化碳和水,促进DMP的降解,但其降解率远低于NO<sub>3</sub><sup>-</sup>对DMP的降解效率,31 h降解率仅为43.0% (见图2)。

同时添加NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和SDS时,溶液中DMP的质量浓度前期处于波动状态,31 h降解率为69.7%,高于单独添加SDS处理中DMP的降解率,而低于单独添加NO<sub>3</sub><sup>-</sup>处理中DMP的降解率,所以NO<sub>3</sub><sup>-</sup>促进了SDS溶液中DMP的降解,也可以说SDS抑制了NO<sub>3</sub><sup>-</sup>溶液中DMP的降解。究其原因,一方面是阴离子表面活性剂SDS对苯甲酸有静

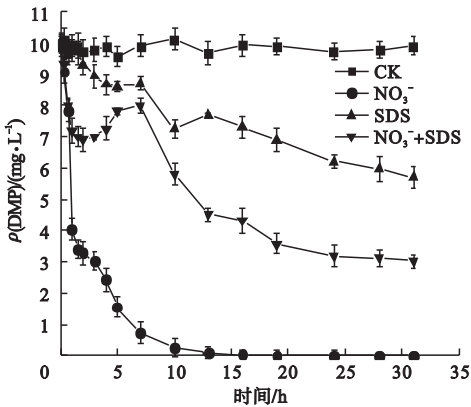


图1 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>与SDS对DMP光降解的影响

Fig.1 Effects of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and SDS on the photodegradation of DMP

从图1可知,对照溶液中DMP几乎不发生降解。添加NO<sub>3</sub><sup>-</sup>后DMP的降解起明显促进作用。主要原因是NO<sub>3</sub><sup>-</sup>在紫外光的照射下转变成NO<sub>3</sub><sup>-\*</sup>,进而NO<sub>3</sub><sup>-\*</sup>又会分解成·OH和·NO<sub>2</sub>,·OH和·NO<sub>2</sub>氧化DMP说

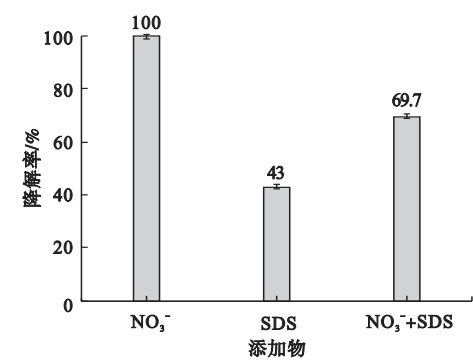


图2 反应31h DMP的降解率

**Fig. 2** Degradation rate of DMP at 31h of reaction  
电排斥作用<sup>[19]</sup>,抑制了DMP降解的中间产物苯甲酸的解离,从而抑制DMP的降解,随着反应的进行苯甲酸越来越多,静电排斥作用逐渐减弱,SDS的作用开始渐渐弱化,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>对DMP的降解开始起主导作用;另一方面,SDS中残留的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(SDS是由浓硫酸和月桂醇合成)有捕获·OH的能力,并且对紫外光有更强的吸收力<sup>[20-22]</sup>,因此干扰了NO<sub>3</sub><sup>-</sup>溶液中DMP的降解。

2.2 无机离子对·NO<sub>2</sub>氧化攻击机制下DMP光降解的影响

控制各处理组中参与反应的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>总量为0.2 mmol/L,添加无机离子后,DMP的降解趋势大体一致,但降解率在不同程度上有所降低(见图3)。

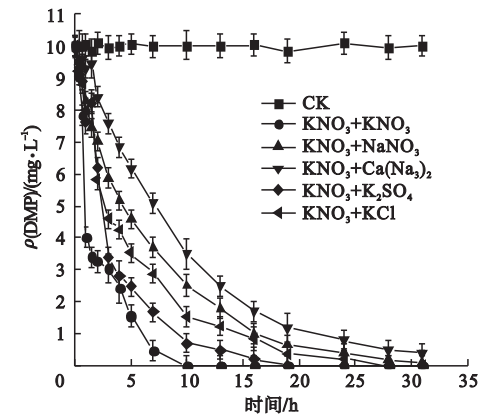


图3 阴阳离子溶液中DMP浓度变化

**Fig. 3** Change of DMP concentration in anion and cation solution  
与第I组KNO<sub>3</sub>/KNO<sub>3</sub>相比,第II组KNO<sub>3</sub>/NaNO<sub>3</sub>体系降解DMP的效率更低,

说明K<sup>+</sup>的促进作用要大于Na<sup>+</sup>,而第III组KNO<sub>3</sub>/Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>体系降解DMP的效率又低于第II组KNO<sub>3</sub>/NaNO<sub>3</sub>体系,说明Na<sup>+</sup>的促进作用大于Ca<sup>2+</sup>,因此3种阳离子分别与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>共存体系降解DMP能力由大至小的顺序为K<sup>+</sup>,Na<sup>+</sup>,Ca<sup>2+</sup>。与第I组KNO<sub>3</sub>/KNO<sub>3</sub>相比,第IV组KNO<sub>3</sub>/K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>体系降解DMP的效率更低,而第V组KNO<sub>3</sub>/KCl体系与第IV组KNO<sub>3</sub>/K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>体系相比,KNO<sub>3</sub>/KCl降解DMP的效率更低,所以3种阴离子分别与K<sup>+</sup>共存体系降解DMP的能力由大至小为NO<sub>3</sub><sup>-</sup>,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,Cl<sup>-</sup>。这可能与3种阴离子在紫外光照射下产生的氧化自由基的数量有关。

16 h 阴阳离子溶液中 DMP 的降解率如图4所示。从图中可以看出,16 h 各溶液中DMP的降解率由大至小依次为KNO<sub>3</sub>/KNO<sub>3</sub>、KNO<sub>3</sub>/K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、KNO<sub>3</sub>/KCl、KNO<sub>3</sub>/NaNO<sub>3</sub>、KNO<sub>3</sub>/Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>,由此推测,使DMP完全降解的时间也由短至长,依次为以上顺序。

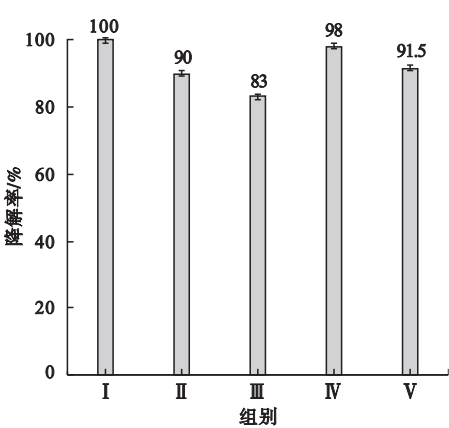


图4 16 h 处阴阳离子溶液中 DMP 的降解率

**Fig. 4** Degradation rate of DMP in anion and cation solution at 16h  
2.3 SDS对配置离子溶液库水中DMP光降解的影响

SDS对配置离子溶液中DMP光降解的影响及库水中DMP的降解如图5所示。从图5可以看出,当配置离子溶液中未添加SDS时,溶液中DMP的降解程度非常大,降



解率可达 98%,而当 SDS 与配置离子相结合时,溶液中 DMP 的降解率下降至 83%,SDS 抑制了离子溶液中 DMP 的降解。这与 SDS 的结构有关,SDS 结构分为两部分:烷基链和硫酸基,烷基链为疏水基,硫酸基为亲水基<sup>[18]</sup>,SDS 中疏水基的存在能够影响氧气及其他气体的进入<sup>[19]</sup>,进而影响 $\text{NO}_3^-$ 转化成 $\cdot\text{NO}_2$ 自由基,同时 SDS 的烷基链状结构具有吸收紫外光的能力,可与邻苯二甲酸酯类物质光降解过程中产生的中间体邻苯二甲酸<sup>[8]</sup>竞争紫外光,从而影响 DMP 的降解。

$\text{NO}_3^-$  和 SDS 时,降解率为 69.7%,由此可见 SDS 对 $\cdot\text{NO}_2$  氧化机制中的 DMP 的降解起抑制作用。一方面是加入的 SDS 与溶液中原有的 DMP 对紫外光有竞争,原本应作用于 DMP 上的紫外光,会分出一部分作用于 SDS,由此削弱了紫外光对 DMP 的降解作用;另一方面, $\cdot\text{NO}_2$  自由基是促进 DMP 降解的主要影响机制,SDS 的加入阻碍了 $\cdot\text{NO}_2$  自由基的生成,从而影响了 $\cdot\text{NO}_2$  自由基对 DMP 的降解效果。

(2) 水中常见无机离子在不同程度上均对 DMP 的降解起促进作用,阳离子对 DMP 降解的促进作用由大至小依次为  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ ;阴离子对 DMP 降解的促进作用由大至小依次为  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 。

(3) 配置离子溶液中,DMP 的降解效果很好,降解率可达 98%,加入 SDS 后,SDS 会削弱离子对 DMP 的促进作用,DMP 的降解率下降至 83%。可见,日常生活中应用广泛的表面活性剂 SDS 对水中潜在污染物 DMP 的降解具有抑制作用,因此在探究影响 PAEs 的光降解的影响因子时,可将 SDS 的抑制作用考虑其中,另外可通过减少 SDS 类产品的使用,来降低水中 DMP 的污染风险。

参考文献

[1] 陈波,林建国,陈清. 水环境中的邻苯二甲酸酯类污染物及其环境行为研究[J]. 环境科学与管理,2009,34(2):71-75.  
(CHEN Bo,LIN Jianguo,CHEN Qing. Research on contamination of phthalate esters in aqueous environment and its environmental behaviors [J]. Environmental science and management, 2009,34 (2):71-75.)  
[2] HAUSER R,MEEKER J D,DUTY S,et al. Altered semen quality in relation to urinary concentrations of phthalate monoester and oxidative metabolites [J]. Epidemiology, 2006,17(6):682-691.  
[3] WEZEL A P V, VLAARDINGEN P V, POSTHUMUS R. Environmental risk limits for two phthalates, with special emphasis on endocrine disruptive properties [J]. Ecotoxicology and environmental safty,2000, 46(3):305-321.  
[4] XU B,GAO N Y,CHENG H,et al. Oxidative degradation of dimethyl phthalate (DMP) by

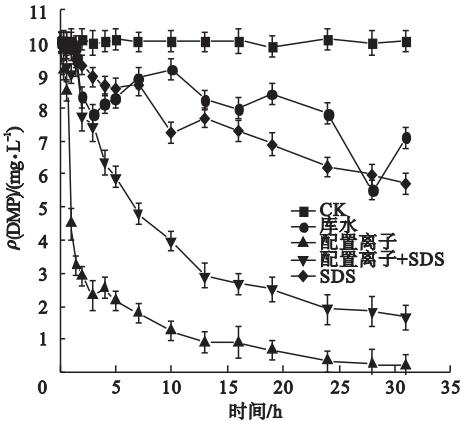


图5 SDS对配置离子溶液中DMP光降解的影响及库水中DMP的降解  
Fig.5 The effect of SDS on the photodegradation of DMP in ionic solution and the degradation of DMP in reservoir

对比大伙房水库水体与配置的离子溶液中DMP的降解情况表明,同一降解条件下,库水中DMP降解一直处于波动状态,且降解率小于配置离子溶液中DMP的降解率,这是由于自然水体中DMP的光降解不仅有无机离子的促进作用,还有其他较为复杂的有机成分发生类似于SDS对DMP降解的抑制作用。

3 结 论

(1) DMP溶液中仅添加 $\text{NO}_3^-$ 时,DMP的降解率最大,可达100%;而DMP溶液中仅添加SDS时,DMP虽然也有所降解,但降解率仅为43.0%;当DMP溶液中同时添加

- UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process [J]. Journal of hazardous materials, 2009, 162(2/3): 954–959.
- [5] WANG J, ZHAO X, WU W. Biodegradation of phthalic acid esters (PAEs) in soil bioaugmented with acclimated activated sludge [J]. Process biochemistry, 2004, 39(12): 1837–1841.
  - [6] DEFOE D L, HOLCOMBE G W, HAMMERMEISTER D E, et al. Solubility and toxicity of eight phthalate esters to four aquatic organisms [J]. Environmental toxicology & chemistry, 1990, 9(5): 623–636.
  - [7] HOPKINSON C S, CARPENTER E J, CAPONE D G. Nitrogen in the marine environment [J]. Estuaries, 1985, 8(1): 76–77.
  - [8] STUMM W, MORGAN J J. Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters [J]. Cram101 textbook outlines to accompany, 1995, 179(11): A277.
  - [9] AMBILY P S, JISHA M S. Metabolic profile of sodium dodecyl sulphate (SDS) biodegradation by pseudomonas aeruginosa (MTCC 10311). [J]. Journal of environmental biology, 2014, 35(5): 827–831.
  - [10] 罗思琪, 王美娜, 赵微微, 等. 表面活性剂与叶酸的相互作用及其对光氧化降解的影响[J]. 物理化学学报, 2019, 35(7): 766–774.  
(LUO Siqi, WANG Meina, ZHAO Weiwei, et al. Interaction between surfactants and folic acid and the effects of surfactants on the photodegradation of folic acid [J]. Acta phys chim sin, 2019, 35(7): 766–774.)
  - [11] 谷传涛, 王春英. 水体中邻苯二甲酸酯类的光催化降解研究进展[J]. 江西理工大学学报, 2015, 36(1): 12–18.  
(GU Chuantao, WANG Chunying. Advances in photocatalytic degradation research on PAEs in water [J]. Journal of Jiangxi university of science and technology, 2015, 36(1): 12–18.)
  - [12] 邹亚文, 张泽明, 张洪海, 等. 水体中3种常见邻苯二甲酸酯的光化学降解研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(8): 3012–3020.  
(ZOU Yawen, ZHANG Zeming, ZHANG Honghai, et al. Study on photochemical degradation of three kinds of phthalic acid esters in aqueous solution [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2018, 38(8): 3012–3020.)
  - [13] 陈文茜, 刘星佳. 邻苯二甲酸酯光催化降解影响分析[J]. 化工管理, 2015, 10(7): 178–178.  
(CHEN Wenxi, LIU Xingjia. Analysis of the effect of photocatalytic degradation of phthalates [J]. Chemical management, 2015, 10(7): 178–178.)
  - [14] 李亚峰, 刘莎, 杨曦. Ce-N-TiO<sub>2</sub>/AC 光催化剂催化氧化染料废水试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(5): 925–930.  
(LI Yafeng, LIU Sha, YANG Xi. Experimental study on Ce-N-TiO<sub>2</sub>/AC catalyst for catalytic oxidation of dye wastewater [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(5): 925–930.)
  - [15] ZAFIROU O C, TRUE M B. Nitrite photolysis in seawater by sunlight [J]. Marine chemistry, 1979, 8(1): 9–32.
  - [16] PENG J, WANG G, ZHANG D, et al. Photodegradation of nonylphenol in aqueous solution by simulated solar UV-irradiation; the comprehensive effect of nitrate, ferric ion and bicarbonate [J]. Journal of photochemistry and photobiology A: chemistry, 2016, 326: 9–15.
  - [17] 彭娜, 王开峰, 刘国光, 等. 模拟日光照射下水环境中普萘洛尔的光化学行为[J]. 环境化学, 2016, 35(1): 112–117.  
(PENG Na, WANG Kaifeng, LIU Guoguang, et al. Photodegradation of propranolol in aqueous environment under simulated sunlight [J]. Environmental chemistry, 2016, 35(1): 112–117.)
  - [18] 王政华. 阴离子表面活性剂(SDS)溶液中PCBs的光降解研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2002.  
(WANG Zhenghua. Photodegradation of PCBs in anionic surfactant (SDS) solution [D]. Changsha: Hunan University, 2002.)
  - [19] 蒋兵. 混合表面活性剂增溶洗脱PAHs的作用及机理研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2007.  
(JIANG Bing. Study on solubilization and washing of PAHs by mixed surfactants [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2007.)
  - [20] 黎展毅, 刘国光, 金小愉, 等. 表面活性剂对水溶液中萘普生光解行为的影响[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(3): 270–273.  
(LI Zhanyi, LIU Guoguang, JIN Xiaoyu, et al. Effect of surfactants on photo-degradation of naproxen in aqueous solution [J]. Environmental pollution & control, 2018, 40(3): 270–273.)
  - [21] 潘晶, 陈永强, 索艳丽, 等. 水质对UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>降解邻苯二甲酸二甲酯反应动力学的影响[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(3): 25–29.  
(PAN Jing, CHEN Yongqiang, SUO Yanli, et al. Effect of water quality on degrading dimethyl phthalate via UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> combination and its mechanism [J]. Journal of safety and environment, 2007, 7(3): 25–29.)
  - [22] 郑勋超. Ag-TiO<sub>2</sub>/浮石对二沉池出水深度处理的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2009.  
(ZHENG Xunchao. Study on advanced treatment of secondary effluents by Ag-TiO<sub>2</sub>/pumices [D]. Guangzhou: Ji'nan University, 2009.)

(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)