

扑热息痛在硝酸根溶液中的光解研究

刘钰, 杨曦*, 高颖

(南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093)

摘要:以中压汞灯为光源模拟阳光, 研究了环境浓度范围内的硝酸根溶液中扑热息痛(paracetamol)的光解; 探讨了 pH 值、硝酸根浓度以及天然水体中广泛存在的腐殖质、碳酸盐等因素对扑热息痛间接光解的影响. 结果表明, 扑热息痛的光解符合一级动力学, 提高硝酸根浓度, 其光解速率可由 $0.79 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ 增至 $8.90 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$. 提高体系 pH 值, 加入碳酸氢根或高浓度的 Suwannee 河富里酸(SRFA)会促进扑热息痛的间接光解; 而加入 Nordic 湖腐殖酸(NOHA)或低浓度的 SRFA 产生抑制作用. 采用分子探针方法鉴定了硝酸根在光照过程中产生的羟基自由基. 利用 GC/MS 技术鉴定了扑热息痛的光解产物, 探讨了扑热息痛在硝酸根体系中可能的光解反应历程.

关键词:扑热息痛; 硝酸根; 光降解; 羟基自由基

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)06-1274-06

Photodegradation of Paracetamol in Nitrate Solution

LIU Yu, YANG Xi, GAO Ying

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The photodegradation of paracetamol in nitrate solutions in the range of environmental concentration was studied using mercury lamp with middle pressure as simulated solar source. Experiments were carried out to study the influences of pH value, nitrate concentration and the substances such as humic substance, bicarbonate, which are popular in natural water, on the photodegradation of paracetamol in nitrate solutions. The results demonstrate that the photodegradation of paracetamol follows a pseudo-first-order kinetics and the photodegradation rate increases rapidly with increasing initial concentration of nitrate. The first order constant increases with the increase of pH and the concentration of bicarbonate. When SRFA concentration is more than 10 mg/L, the presence of SRFA stimulates the photodegradation of paracetamol. The addition of NOHA decreases the photodegradation rate of paracetamol. Hydroxyl radical is found in the reaction solutions using methanol and isopropanol as its molecular probes. We identified the photodegradation products of paracetamol in the presence of nitrate with GC/MS methods. The photodegradation pathways of paracetamol are also discussed.

Key words: paracetamol; nitrate; photodegradation; hydroxyl radical

扑热息痛是一种常用的解热镇痛药, 是我国原料药产量最大的药物品种之一, 在天然水体中的浓度可达 $6 \sim 10 \mu\text{g/L}$ ^[1,2]. 由于具有肝毒性和其他副作用, 扑热息痛已经作为潜在的环境污染物受到了环境学界的关注^[3]. 目前, 国内外对扑热息痛的研究多集中于生物降解和高级氧化处理技术^[4,5], 对于其在天然水环境中可能发生的各种光化学转化机制缺乏必要的研究.

硝酸根广泛存在于水环境^[6], 具有光化学活性, 阳光辐射下可光解生成氮氧自由基和羟基自由基等活性中间体, 引发芳香族有机物的硝化、亚硝化和氧化反应, 对有机污染物的环境归趋和生态风险具有重要影响^[7].

除了硝酸根, 天然水体中还普遍存在着其他可以影响有机污染物光化学行为的物质. 其中, 腐殖质是天然水体中最主要的有机物之一, 环境浓度以碳计可达 $0.3 \sim 30 \text{ mg/L}$ ^[8], 在溶解有机质(DOM)中所占比重可高达 90%^[9]. 碳酸盐是天然水体中普遍存

在的无机盐类, 环境浓度可达 $0.4 \sim 4.4 \text{ mmol/L}$ ^[10]. 近年研究主要集中于腐殖质、碳酸氢根和碳酸根与环境中光激发生成的羟基自由基等活性中间体的作用机制, 探讨相关物质对有机污染物在天然水体中间接光解的重要影响^[8,11~13].

本实验对扑热息痛在硝酸根溶液中的光解行为进行了研究, 鉴定了体系中的活性中间体和扑热息痛的光解产物, 探讨了羟基自由基在扑热息痛光解过程中的重要作用, 并提出了扑热息痛在硝酸根溶液中可能的光解途径.

1 材料与方法

1.1 试剂

Paracetamol, 色谱纯, Sigma 公司; SRFA、NOHA,

收稿日期: 2006-08-10; 修订日期: 2006-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578074, 20207004)

作者简介: 刘钰(1982~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境化学, E-mail: dusu4340086@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: yangxi@nju.edu.cn

购自国际腐殖质协会(IHSS);BSTFA [*N*, *O*-bis(trimethylsilyl) trifluoroacetamide], Supelco 公司;乙腈, 色谱纯, Tedia 公司;其余试剂均为分析纯.

1.2 实验方法

1.2.1 扑热息痛的直接光解

将 pH 值分别为 6.8、7.0、9.2、10.3 的 20 μmol/L 扑热息痛溶液置于 NDC-2 型光化学反应器(南京大学与南京长宁无线电厂联合研制)的 50 mL 石英试管中,以 500 W 中压汞灯(北京电光源研究所,峰值: 365.7 nm, 波长范围: 260 ~ 570 nm)为光源,置于 Pyrex 玻璃(滤去 280 nm 以下的紫外光)柱形水套中.光照一定时间后取样,用 Agilent 1100 HPLC 分析. HPLC 分析条件为: Discovery C₁₈ 柱(5 μm, 150 mm × 4.5 mm);柱温为 30℃,流速为 0.6 mL·min⁻¹,流动相为甲醇/水 = 50/50;检测波长为 248 nm.

1.2.2 扑热息痛在硝酸根溶液中的光解

配置 20 μmol/L 扑热息痛与不同浓度硝酸根的混合溶液以及 pH 值分别为 6.8、7.0、9.2、10.3 的 20 μmol/L 扑热息痛与 4 mmol/L 硝酸根混合溶液,进行光解实验,一定时间后采样, HPLC 测定扑热息痛浓度.

1.2.3 腐殖质、碳酸氢根对扑热息痛间接光解的影响

向 20 μmol/L 扑热息痛与 4 mmol/L 硝酸根的混合溶液中分别加入不同浓度的 SRFA、NOHA 和碳酸氢钠;将 3 份含有 20 μmol/L 扑热息痛、4 mmol/L 硝酸根和 4 mmol/L 碳酸氢钠混合溶液的 pH 值调整为 6.0、8.2、10.3, 然后进行光解实验,一定时间后采样, HPLC 测定扑热息痛浓度.

1.2.4 羟基自由基的鉴定

配置 3 份 20 μmol/L 扑热息痛与 4 mmol/L 硝酸根的混合溶液,其中 2 份中分别含有 10 mmol/L 甲醇和 10 mmol/L 异丙醇,进行光解实验,一定时间后采样, HPLC 测定扑热息痛的浓度.

1.2.5 硝酸根溶液中扑热息痛光解产物的鉴定

将 0.1 mmol/L 扑热息痛和 10 mmol/L 硝酸钠溶液光解 12 h. 用等体积乙酸乙酯萃取 2 次, 旋转蒸发至干. 将固体溶解于 2 mL 乙腈中, 加入 0.5 mL BSTFA, 50℃ 水浴恒温 30 min, 进行衍生化. 用氮气吹扫浓缩至 0.5 mL, 进行 GC/MS 测定. GC/MS 条件: 英国 Micromass 公司 GC-TOF 色质联用仪, 采用 DB-5 柱. 程序升温: 60℃, 保持 2 min, 以 5 °C/min 的速率升至 280℃. 载气为 He; 进样量为 1 μL; 离子源为 EI, 70 eV.

2 结果与讨论

2.1 扑热息痛的直接光解

扑热息痛的直接光解与 pH 密切相关. 在 pH 为 6.8 时, 扑热息痛的 5 h 光解率仅为 3.9%; 随着 pH 的升高, 其光解率不断提高; 当 pH 为 10.3 时, 其 5 h 光解率增至 31.9%. 这是由于 pH 升高使得扑热息痛中的酚羟基失去质子的能力增强, 失去质子后, 紫外吸收红移^[14], 使其能够更多地吸收 290 nm 以上的紫外光.

2.2 扑热息痛在硝酸根溶液中的间接光解

2.2.1 硝酸根浓度对间接光解的影响

研究表明, 扑热息痛在硝酸根中的光解反应均符合一级动力学规律, 随着硝酸根浓度的增加, 其光解速率迅速提高(见表 1, *n* 为样本数, 下同). 这是硝酸根受光激发后生成的羟基自由基等活性中间体参与反应的结果^[7].

表 1 pH = 7.0 时扑热息痛在硝酸根溶液中的光解(*n* = 8)

硝酸根浓度 /mmol·L ⁻¹	5 h 光解率 /%	<i>K</i> × 10 ³ /min ⁻¹	半衰期 /min	<i>R</i>
0.8	25.9	0.79	878	0.936
1.6	37.3	1.32	525	0.961
4.0	83.1	5.74	120	0.993
8.0	100	8.90	77	0.994

2.2.2 pH 值对间接光解的影响

实验证明, 相同硝酸根浓度条件下, 随着溶液 pH 值增大, 扑热息痛的光解速率不断加快. 在 pH 值为 7.0 的纯水和 pH 值为 6.8、9.2、10.3 的缓冲体系中, 速率常数分别为 0.006 58、0.005 40、0.011 84 和 0.012 11 min⁻¹ (*n* = 8, *R* > 0.98). 这是因为随着溶液 pH 值升高, 扑热息痛(*pK_a* = 9.4)^[15] 更多地以离子形态存在, 酚羟基上氧原子的负电荷增加了苯环的电子云密度, 有利于具有较强亲电性的羟基进攻而发生光化学转化^[14].

2.2.3 腐殖质对间接光解的影响

腐殖酸(HOHA)和富里酸(SRFA)对扑热息痛在硝酸根溶液中光降解影响结果如图 1、2 所示. 结果表明, 加入 NOHA 对扑热息痛的间接光解有抑制作用, 且抑制作用与 NOHA 的浓度成正比. 这可归因于 NOHA 自身光反应的消光效应^[11] 或 NOHA 对硝酸根体系产生的羟基的淬灭效应. 对于 SRFA, 在加入量比较低时, 表现为抑制作用. 这可能与 SRFA 分子与硝酸根竞争吸收光子, 减少了能激发硝酸根活性的

光子通量^[11]以及 SRFA 对体系中羟基的淬灭效应有关^[12].而在 SRFA 加入量比较大时,会对扑热息痛降解产生促进作用.这可能与大量的 SRFA 分子受激发生成一系列活性中间体参与扑热息痛降解有关^[11];此时硝酸根的作用可能处于次要地位.当 SRFA 加入量为 10 mg/L 时,混合体系的降解效果与硝酸根体系相近.这可能是上述 SRFA 对扑热息痛降解的 2 种效应综合作用的结果.

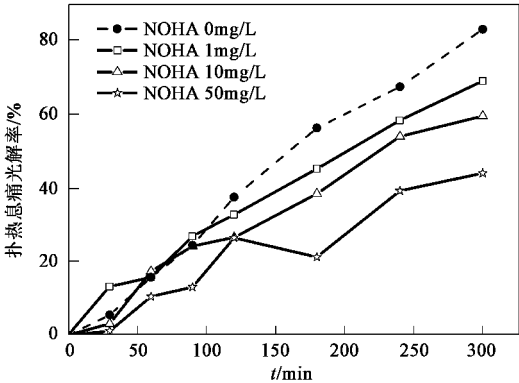


图 1 NOHA 对扑热息痛光解的影响

Fig.1 Effect of NOHA on photolysis of paracetamol

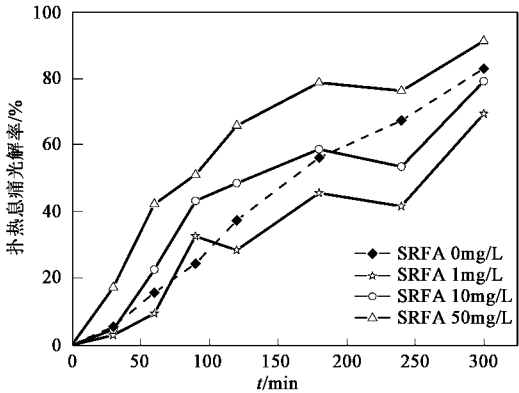


图 2 SRFA 对扑热息痛光解的影响

Fig.2 Effect of SRFA on photolysis of paracetamol

2.2.4 碳酸氢根对间接光解的影响

在相同的硝酸根体系中加入不同浓度的碳酸氢根对扑热息痛光降解的影响见图 3.在含有 0、1、4、8 mmol/L 碳酸氢根的体系中,扑热息痛的降解率分别为 83.1%、90.6%、98.2% 和 100%.可见,加入碳酸氢根对扑热息痛的降解有促进作用.这可能是由体系中羟基自由基激发生成的碳酸氢根自由基及其经过一系列转化形成的,可以快速氧化酚类化合物^[16]的碳酸根自由基参与反应的结果.

不同 pH 值条件下,相同的扑热息痛、硝酸根以

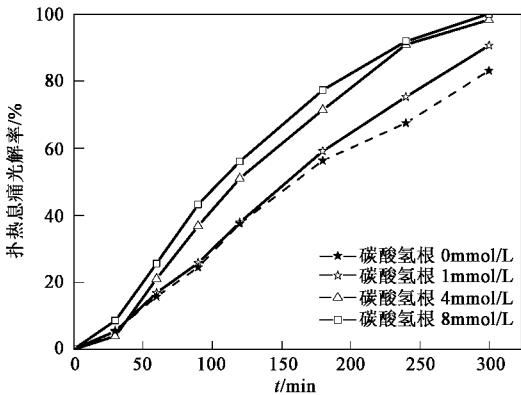


图 3 碳酸氢根对扑热息痛光解的影响

Fig.3 Effect of bicarbonate on photolysis of paracetamol

及碳酸氢钠浓度的体系中,扑热息痛的降解速率(K)与不加入氢碳酸根时降解速率(K_c)的对照见表 2.结果表明,在不同 pH 条件下加入同样数量的碳酸氢根,对扑热息痛的光解都有明显的促进作用;而且随着体系 pH 值的上升,其促进作用不断加强.这是因为在较高 pH 值条件下,相关离子主要以碳酸根的形态存在(见表 3)^[13];而由羟基引发的碳酸根自由基生成速率约为碳酸氢根自由基的 46 倍^[17],自由基生成效率的提高使得体系的降解能力得到增强.

表 2 不同 pH 条件下碳酸氢根对扑热息痛光解的影响¹⁾($n = 8$)

Table 2 Effect of bicarbonate on the photolysis of paracetamol at different pH($n = 8$)

pH	$K \times 10^3$ /min ⁻¹	R	$K_c \times 10^3$ /min ⁻¹	R	$\Delta K \times 10^3$ /min
6.0	4.11	0.993	4.05	0.994	0.06
8.2	13.13	0.973	11.60	0.985	1.53
10.3	14.16	0.972	12.11	0.978	2.05

1) $\Delta K = K - K_c$.

表 3 pH=6、8、10 时蒸馏水中的碳酸盐形态/ $\%$ ^[13]

Table 3 Inorganic carbon speciation at pH 6, 8, 10 in distilled water/ $\%$

形态	pH 6	pH 8	pH 10
CO ₂	43.9	0.7	0.000 7
碳酸氢根	56.0	90.3	9.1
碳酸根	0.06	9.0	90.9

2.3 分子探针法鉴定羟基自由基($\cdot OH$)

甲醇、异丙醇作为 $\cdot OH$ 典型的淬灭剂,与羟基的反应常数分别为 $0.97 \times 10^9 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $1.9 \times 10^9 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$ ^[17].实验结果(见图 4)表明,不含甲醇、异丙醇的体系,扑热息痛在硝酸根溶液中的 5 h 降解率为 83.1%,而在含有过量甲醇与异丙醇的体

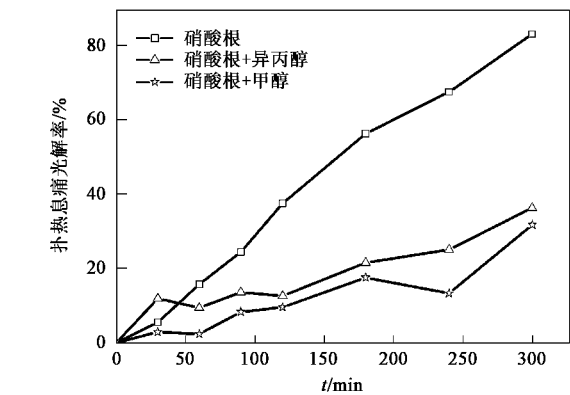


图 4 甲醇与异丙醇对扑热息痛在硝酸根溶液中光解的淬灭效应

Fig.4 Quenching effect of methanol and isopropanol on photolysis of paracetamol in the nitrate solution

表 4 扑热息痛在硝酸根溶液中光解产物的结构推测

Table 4 Proposed products of paracetamol in nitrate solution

编号	t_R/min	m/z (丰度)	硅烷化后的分子量	推测的结构
I	9.481	191(20), 190(18), 148(15), 147(100), 117(77), 75(28), 73(67)	234	
II	9.876	205(13), 177(14), 148(16), 147(100), 75(9), 73(59), 66(11)	220	
III	15.654	218(30), 205(89), 147(100), 133(23), 117(37), 103(33), 73(94)	308	
IV	16.515	247(16), 180(7), 149(8), 148(15), 147(100), 75(16), 73(30)	262	
V	18.778	255(19), 254(80), 241(9), 240(22), 239(100), 112(10), 73(20)	254	
VI	27.086	224(15), 223(83), 208(25), 182(17), 181(100), 166(81), 73(21)	223	
VII	30.088	311(100), 296(47), 270(17), 269(72), 254(31), 253(50), 73(34)	311	
VIII	31.135	311(100), 296(50), 270(18), 269(76), 254(35), 253(56), 73(30)	311	

苯二酚等 3 种产物.这与文献[3]中报道的扑热息痛羟基化(氧化)机理一致.GC/MS 的 TIC 谱图表明,产物Ⅶ是第一阶段反应的主要产物,这可能与扑热息痛分子中羟基邻位的电子分布有利于和羟基发生亲电取代有关.

由于羟基等活性物质的作用,中间产物对苯二酚(产物 V)会被继续降解,生成 I、II、IV 等开环产

系中,扑热息痛仅降解了 31.8% 和 36.3%,表明硝酸根溶液在光照条件下生成了羟基自由基,并在扑热息痛的降解过程中占主导作用.

2.4 扑热息痛在硝酸根溶液中光解产物鉴定

扑热息痛光降解的产物大多为带羟基的化合物,极性较强,沸点高,不易气化,较难在气相色谱上直接进样分析.为了便于分析,利用 BSTFA 进行硅烷衍生化.将产物的质谱信息与标准谱库和文献[3]对照,推测了扑热息痛在硝酸根溶液中间接光解的主要产物,其结构见表 4.

2.5 扑热息痛在硝酸根溶液中的光解历程探讨

硝酸根光解生成的羟基分别与扑热息痛(VI)分子苯环中羟基的邻、间、对位置发生作用,生成对

物,其间可能经历了苯醌(A)的生成及其氧化开环的过程.Bremner 等人的研究表明,对苯二酚在羟基的作用下会生成苯醌(A)及顺丁烯二酸(B)等开环产物,而且顺丁烯二酸(B)可以被进一步氧化^[18].已有文献报道了顺丁烯二酸(B)可以在催化氧化的条件下生成产物 I^[19];在臭氧氧化条件下生成产物 II^[20];在污染物电化学处理技术中生成产物 IV^[21],

与本研究的实验结果一致(见图 5)。

此外,中间产物Ⅶ、Ⅷ在羟基的作用下,会被进一步降解,生成产物Ⅲ。Skoumal 等人的研究表明,产物Ⅷ在臭氧氧化的条件下会生成丙醇二酸^[20],生成的丙醇二酸可能就是产物Ⅷ被氧化为甘油醇(产物Ⅲ)后,被进一步氧化的结果。

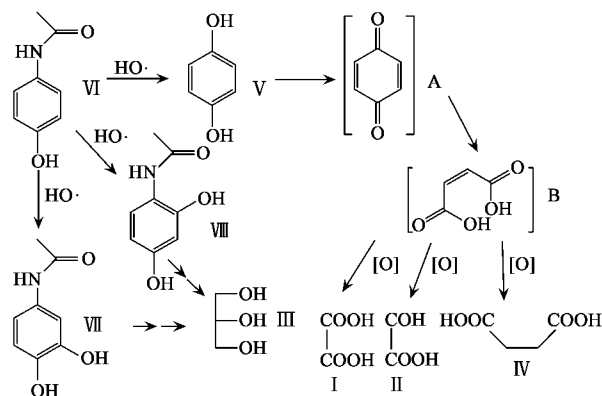


图 5 扑热息痛在硝酸根溶液中可能的光解途径

Fig.5 Possible photolysis pathways of paracetamol in nitrate solution

3 结论

(1)在中性 pH 条件下,扑热息痛的直接光解非常缓慢;当 pH 值升高时,其光解效率有所提高。

(2)扑热息痛在硝酸根溶液中的光解符合一级反应动力学.提高 pH 值和硝酸根浓度有利于扑热息痛的光解。

(3)NOHA 和低浓度的 SRFA 会抑制扑热息痛在硝酸根溶液中的间接光解.碳酸氢根或高浓度的 SRFA 对扑热息痛的间接光解有促进作用;随着 pH 值的升高,碳酸氢根的促进作用得到加强.这说明天然水体中的各种光活性成分与硝酸根共存时会产生协同效应和/或拮抗效应,从而影响扑热息痛的光解过程。

(4)硝酸根溶液在光照条件下会生成活性很强的羟基自由基,可以作用于扑热息痛分子中苯环的不同位置,生成一系列中间产物;这些中间产物可以被继续氧化,形成一些分子量较小的氧化产物。

参考文献:

[1] Ternes T A. Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers[J]. *Water Research*, 1998, **32**(11): 3245 ~ 3260.
[2] Kolpin D W, Furlong E T, Meyer M T, *et al.* Pharmaceuticals, hormones and other organic wastewater contaminants in U. S. streams, 1999 ~ 2000: A national reconnaissance[J]. *Environ Sci Technol*, 2002, **36**(6): 1202 ~ 1211.

[3] Vogna D, Marotta R, Napolitano A, *et al.* Advanced oxidation chemistry of paracetamol UV/H₂O₂-induced hydroxylation/degradation pathways and ¹⁵N-aided inventory of nitrogenous breakdown products[J]. *Journal of Organic Chemistry*, 2002, **67**(17): 6143 ~ 6151.
[4] 徐根良,官宝红. 扑热息痛废水治理技术初步研究[J]. *水处理技术*, 1999, **25**(3): 178 ~ 182.
[5] Andreozzia R, Caprioa V, Marottaa R, *et al.* Paracetamol oxidation from aqueous solutions by means of ozonation and H₂O₂/UV system[J]. *Water Research*, 2003, **37**(5): 993 ~ 1004.
[6] Squillace P J, Scott J C, Moran M J, *et al.* VOCs, pesticides, nitrate, and their mixtures in groundwater used for drinking water in the United States[J]. *Environ Sci Technol*, 2002, **36**(9): 1923 ~ 1930.
[7] Brezonik P L, Fulkerson-Brekken J. Nitrate-induced photolysis in natural waters: Controls on concentrations of hydroxyl radical photo-intermediates by natural scavenging agents[J]. *Environ Sci Technol*, 1998, **32**(19): 3004 ~ 3010.
[8] Lam M W, Tantuco K, Mabury S A. PhotoFate: A new approach in accounting for the contribution of indirect photolysis of pesticides and pharmaceuticals in surface waters[J]. *Environ Sci Technol*, 2003, **37**(5): 899 ~ 907.
[9] Corin N, Backlund P, Kulovaara M. Degradation products formed during UV-irradiation of humic waters[J]. *Chemosphere*, 1996, **33**(2): 245 ~ 255.
[10] Huang, J, Mabury, S A. Steady-state concentrations of carbonate radicals in field water[J]. *Environ Toxicol Chem*, 2000, **19**(9): 2181 ~ 2188.
[11] Zhan M J, Yang X, Xian Q M, *et al.* Photosensitized degradation of bisphenol A involving reactive oxygen species in the presence of humic substances[J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(3): 378 ~ 386.
[12] Goldstone J V, Pullin M J, Bertilsson S, *et al.* Reactions of hydroxyl radical with humic substances: Bleaching, mineralization, and production of bioavailable carbon substrates[J]. *Environ Sci Technol*, 2002, **36**(3): 364 ~ 372.
[13] Bouillon R C, Miller W L. Photodegradation of dimethyl sulfide (DMS) in natural waters: Laboratory assessment of the nitrate-photolysis-induced DMS oxidation[J]. *Environ Sci Technol*, 2005, **39**(24): 9471 ~ 9477.
[14] Schwarzenbach R P, Gschwend P M, Imboden D M, 著,王连生,等译. 环境有机化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 411 ~ 460.
[15] Jones O A H, Voulvoulis N, Lester J N. Aquatic environmental assessment of the top 25 English prescription pharmaceuticals[J]. *Water Research*, 2002, **36**(20): 5013 ~ 5022.
[16] Larson R A, Zepp R G. Reactivity of the carbonate radical with aniline derivatives[J]. *Environ Toxicol Chem*, 1998, **7**(4): 265 ~ 274.
[17] Buxton G V, Greenstock C L, Helman W P, *et al.* Critical review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}/\cdot\text{O}^-$) in aqueous solution[J]. *J Phys Chem Ref Data*, 1988, **17**(2): 513 ~ 886.

[18]

Bremner D H, Burgess A E, Houlemare D, *et al.* Phenol degradation using hydroxyl radicals generated from zero-valent iron and hydrogen peroxide[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2006, **63**(1): 15 ~ 19.

[19]

Santos A, Yustos P, Quintanilla A, *et al.* Route of the catalytic oxidation of phenol in aqueous phase[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2002, **39**(2): 97 ~ 113.

[20]

Skoumal M, Cabot P L, Centellas C, *et al.* Mineralization of paracetamol by ozonation catalyzed with Fe²⁺, Cu²⁺ and UVA light [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2006, **66**(3 ~ 4): 228 ~ 240.

[21]

Houk L L, Johnson S K, Feng J, *et al.* Electrochemical incineration of benzoquinone in aqueous media using a quaternary metal oxide electrode in the absence of a soluble supporting electrolyte[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1998, **28**(11): 1167 ~ 1177.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过 8000 字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1,1.1,1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:
期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页~止页.
图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页~止页.
会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页~止页.
学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.
报告:作者.论文名[R].出版地.出版单位,出版年.
专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.
11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.对未刊稿件一般不退,请作者自留底稿.
12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102;010-62849343;传真:010-62849343;E-mail: hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn