

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.08.002

大气液相中对苯二甲酸与氯自由基的光转化反应

何 函¹, 朱承驻^{1,2}, 吴文娟¹, 董林昌¹, 杨 悦¹

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 大气环境与污染控制工程研究所, 安徽 合肥 230009)

摘 要:文章研究对苯二甲酸(TPA)与氯自由基在大气液相中的光化学转化机理,利用 355 nm 激光闪光光解实验探究瞬态物种的生长和衰减动力学,反应产物由气相色谱-质谱联用技术进行分析。激光闪光光解实验测得 $\text{Cl}\cdot$ 、 $\text{Cl}_2\cdot^-$ 与 TPA 反应的二级速率常数分别为 4.04×10^{10} 、 5.49×10^6 L/(mol·s)。TPA 与氯自由基的反应产物主要有对苯醌、2-硝基对苯二甲酸、对氯苯甲酸、2-氯对苯二甲酸和 2,6-二氯对苯二甲酸,结合激光闪光光解实验可知,TPA 的光转化有形成 Cl-加合物、脱羧和硝化 3 种反应途径。

关键词:对苯二甲酸(TPA);氯自由基;大气液相;激光闪光光解;光转化反应

中图分类号:X131.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)08-1016-06

Photochemical transformation of terephthalic acid and chlorine radicals in atmospheric liquid phase

HE Han¹, ZHU Chengzhu^{1,2}, WU Wenjuan¹, DONG Linchang¹, YANG Yue¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Atmospheric Environment and Pollution Control, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract:In this work, the photochemical transformation mechanism between terephthalic acid(TPA) and chlorine radicals in the atmospheric liquid phase was investigated. The growth and decay kinetics of the transient species were examined using 355 nm laser flash photolysis experiments, and the reaction products were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry(GC-MS) technique. Through the laser flash photolysis experiments, the secondary rate constants for the reaction of $\text{Cl}\cdot$ and $\text{Cl}_2\cdot^-$ with TPA were measured to be 4.04×10^{10} L/(mol·s) and 5.49×10^6 L/(mol·s), respectively. The products of reaction were mainly p-benzoquinone, 2-nitro-terephthalic acid, p-chlorobenzoic acid, 2-chloro-terephthalic acid, and 2,6-dichloro-terephthalic acid. Based on the laser flash photolysis experiments, it was found that the photoconversion of TPA involved three reaction pathways: formation of Cl-adducts, decarboxylation, and nitration.

Key words:terephthalic acid(TPA); chlorine radicals; atmospheric liquid phase; laser flash photolysis; photochemical transformation

对苯二甲酸(TPA)是一种重要的有机原料,常用于各类聚合物的生成,例如聚对苯二甲酸乙二醇酯和聚对苯二甲酸丁酯的合成^[1]。TPA 还用于合成家禽饲料添加剂、药物、香料、生物塑料和其他有机化合物^[2]。文献[3]在挪威降雨中检

测到 TPA,质量浓度范围在 50~300 ng/L 之间。TPA 质量浓度低于 15 mg/L 时表现出无毒行为,摄入高于此值的情况下可能影响人类的生殖和发育系统,还可引起动物的基因突变和肾功能障碍^[4]。

收稿日期:2024-04-24;修回日期:2024-05-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(22376049)

作者简介:何 函(2000—),女,安徽安庆人,合肥工业大学硕士生;

朱承驻(1967—),男,安徽太湖人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:czhu@hfut.edu.cn.

近年来,大气液相化学已成为研究热点之一^[5-6]。TPA 具有低挥发性和一定的溶解性,易溶于云、雾、雨滴、露和湿气溶胶表面水层等大气液相环境中。氯自由基是对流层大气液相化学中最重要的参与者之一^[7],可以影响大气液相的氧化能力和自由基循环,因此可以显著改变大气液相成分^[8-9]。目前研究较多的是将氯自由基作为氧化剂来降解污染物及其中间产物^[8],文献^[10]探讨水体中对硝基苯酚、苯胺和 TPA 等与活性氯自由基发生氧化还原反应,且主要为提高其在废水中的降解效率^[11]。关于大气液相中 TPA 与活性氯自由基的光转化反应机理的研究很少,因此,进一步深入研究 TPA 与氯自由基的光转化机制具有重要意义。

本文选取在大气液相中较为常见的 TPA 为目标污染物,采用激光闪光光解技术研究了在 355 nm 激光作用下 TPA 与氯自由基的反应中间产物和这些中间产物的生长与衰减规律,并结合产物分析对其可能转化途径进行探讨,以期为大气模型研究提供准确的物理化学参数,也可为我国城市大气污染防治与控制提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 化学试剂与药品

TPA、氯化钠、无水硫酸铜、二氯甲烷(色谱纯)均购于国药集团化学试剂有限公司,除二氯甲烷外,其他试剂纯度均大于 99%;亚硝酸钠购于上海苏懿化学试剂有限公司;叔丁醇(*t*-BuOH)(纯度大于 99%)购于天津市光复精细化工研究所;实验所用气体高纯氧和高纯氮纯度均大于 99.999%,均购于南京上元工业气体厂;实验用水均采用超纯水机制备,实验温度为室温。

1.2 激光闪光光解

激光闪光光解仪由 LP920 激光闪光分解系统(英国爱丁堡仪器公司)和 Nd:YAG 激光器组成。采用脉冲激光(波长为 355 nm、激光脉冲 4~6 ns,激光能量为(30±5) mJ/pulse)激活活性氯自由基, Xe920 氙灯(450 W)为探测光源,激光束与探测光束在石英试管中垂直交叉。由 Tektronix TDS 3012B 示波器记录光信号的变化,输出并保存到计算机。为尽量减少潜在副产物对瞬态反应的影响,每次激光扫描前,必须用新的样品溶液。

1.3 分析方法

紫外-可见(ultraviolet visible, UV-vis)吸收光谱用岛津 UV-1750 吸收光谱仪进行记录。采

用气相色谱-质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)对 TPA 的光转化产物进行鉴定,利用 HP-5MS 毛细管柱(长度为 30 m、内径为 0.25 mm、膜厚为 0.25 μm)进行气相色谱分离,载气为氦气,流速为 1 mL/min,进样温度为 280 °C,初始温度为 40 °C,保持 2 min,以 15 °C/min 的速度升高至 280 °C,并保持 10 min。

2 结果与讨论

2.1 TPA 的 UV-vis 吸收光谱分析

纯 TPA 溶液与 1×10^{-2} mol/L NaCl、 5×10^{-3} mol/L NaNO₂(pH 值为 1.5)混合溶液暗反应和浓度为 1×10^{-5} mol/L 的纯 TPA 溶液的 UV-vis 吸收光谱图如图 1 所示。亚硝酸(HONO)的解离常数 pK_a 为 3.3,在 pH 值为 1.5 的 NaNO₂ 溶液中, HONO 为主要的存在形式,其吸光率在波长为 300~400 nm 范围内表现出强烈吸收^[12]。本实验中 TPA 与混合溶液在 pH 值为 1.5 的条件下含有 HONO。TPA 与混合溶液在黑暗条件下反应前、后对比显示, TPA 与 HONO 不发生反应。TPA 纯溶液在波长大于 310 nm 的范围内没有吸收,因此 TPA 不能被 355 nm 激光直接激发,而是通过 HONO 光解产生的氯自由基进行光化学转化^[8]。

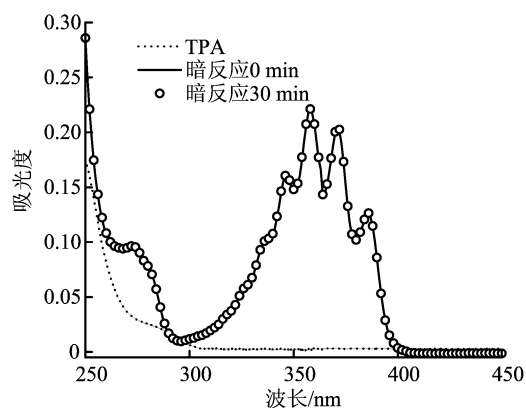


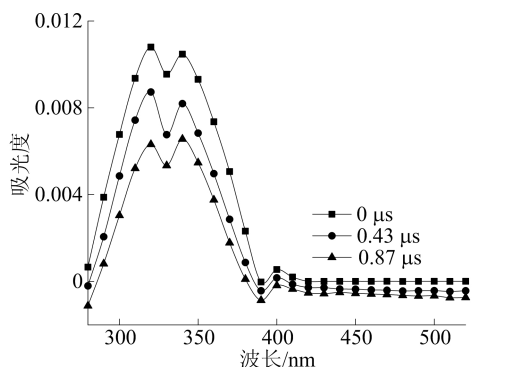
图 1 TPA 纯溶液和混合溶液暗反应的 UV-vis 吸收光谱图

2.2 355 nm 激光闪光光解实验分析

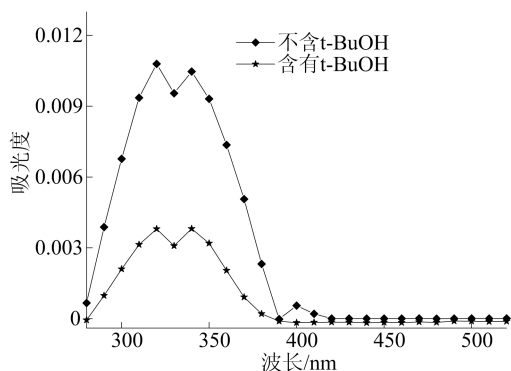
2.2.1 瞬态物种的归属

使用 355 nm 激光闪光光解仪对 TPA 与氯和 HONO 的混合溶液(pH 值为 1.5)进行光解,瞬态吸收光谱图如图 2 所示。由图 2 可知,位于 280~390 nm 波段间有 2 个吸收峰,分别是 320、340 nm。另外,混合溶液在 400 nm 处有少许吸收。*t*-BuOH 可以有效猝灭氯自由基,向混合溶液中加入 10 mmol/L 的 *t*-BuOH, 320、340 nm 处的吸光度下

降了 60%~70%，实验结果表明这 2 处的吸光度与氯自由基有关联。文献[13]通过 245 nm 激光闪光光解氯丙酮溶液得到 $\text{Cl}\cdot$ 的吸收峰在 320 nm 处左右。而文献[14]利用脉冲辐射得到的 $\text{Cl}_2\cdot^-$ 的最大吸收峰位于 340 nm 处。因此，可以将实验所得的 320、340 nm 处的瞬态物种归属于 $\text{Cl}\cdot$ 和 $\text{Cl}_2\cdot^-$ 。



(a) 激光闪光光解 TPA 与混合溶液的瞬态吸收光谱



(b) 加入叔丁醇猝灭时的瞬态吸收光谱

图 2 激光闪光光解瞬态吸收光谱图

混合溶液在 400 nm 处有少许吸收，故对其在 400 nm 处的生成与衰减进行动力学分析，如图 3 所示。

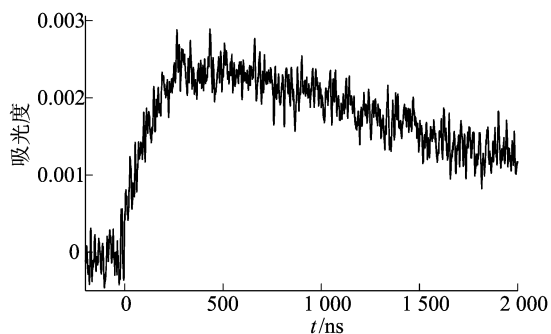
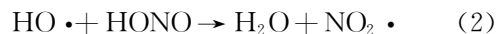
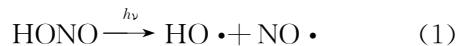


图 3 瞬态物种在 400 nm 处的轨迹动力学分析

400 nm 处的瞬态物种的动力学研究表明，一级生成速率常数为 $k_{\text{growth}} = 5.58 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ，一级

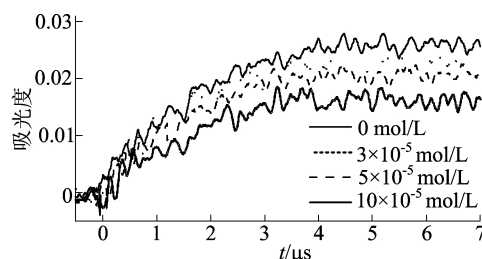
衰减速率常数为 $k_{\text{decay}} = 2.75 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ ，这与文献[15]在单独光解 HONO 时 400 nm 处测得的 $k_{\text{growth}} = 4.9 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 和 $k_{\text{decay}} = 3.4 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 基本一致，可以将 400 nm 处瞬态物种归属于 $\text{NO}_2\cdot$ ，其生成途径为：



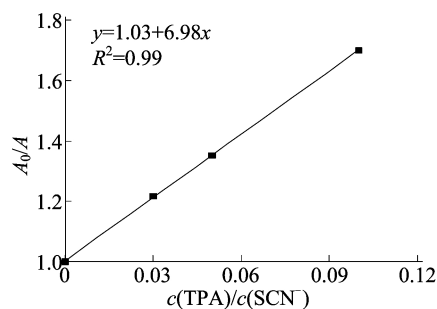
$\text{NO}_2\cdot$ 来源于 $\text{HO}\cdot$ 和 HONO 的作用，溶液中高浓度的 Cl^- 能有效清除 $\text{HO}\cdot$ ，但并不能使 $\text{HO}\cdot$ 完全转化，仍有少量的 $\text{HO}\cdot$ 能与 HONO 反应生成 $\text{NO}_2\cdot$ 。

2.2.2 $\text{Cl}\cdot/\text{Cl}_2\cdot^-$ 的动力学分析

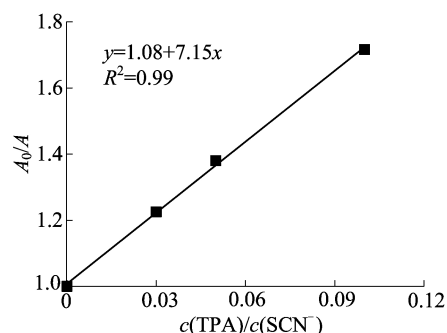
利用竞争动力学方法测量 TPA 与 $\text{Cl}\cdot$ 反应的二级速率常数。选取 SCN^- 作为 TPA 与 $\text{Cl}\cdot$ 反应的竞争参考物，通过 $\text{Cl}\cdot$ 与 SCN^- 的反应产物 $(\text{SCN})_2\cdot^-$ 吸光度值随 TPA 浓度的变化来测量 TPA 与 $\text{Cl}\cdot$ 的二级反应速率常数，如图 4 所示。



(a) N_2 条件下 472 nm 处生成动力学



(b) N_2 条件下竞争动力学关系



(c) O_2 条件下竞争动力学关系

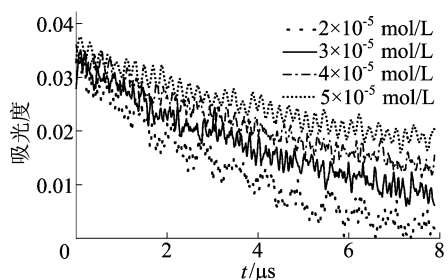
图 4 TPA 与 SCN^- 的竞争动力学关系

SCN⁻ 竞争动力学方程式为:

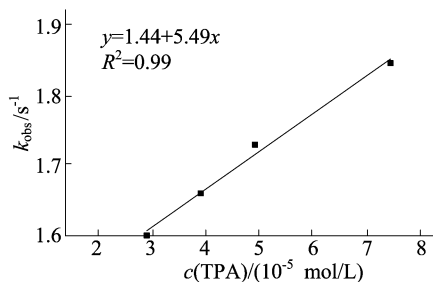
$$\frac{A_0}{A} = \frac{k_{Cl\cdot-TPA}c(TPA)}{\left(k_{Cl\cdot-SCN^-} + \frac{k_X}{c(SCN^-)}\right)c(SCN^-)} + 1 \quad (3)$$

其中: $c(TPA)$ 和 $c(SCN^-)$ 分别为 TPA 和 SCN^- 的浓度; A 为 $(SCN)_2 \cdot ^-$ 在 472 nm 处的吸光度值; A_0 为不添加污染物时 $(SCN)_2 \cdot ^-$ 的吸光度值; $k_{Cl\cdot-TPA}$ 为 $Cl \cdot$ 与 TPA 反应的二级反应速率常数; $k_{Cl\cdot-SCN^-}$ 为 $Cl \cdot$ 与 SCN^- 的二级反应速率常数($5.3 \times 10^9 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{s})$)^[15]; k_X 为 $Cl \cdot$ 与溶液中其他物质反应的一级速率常数。可计算出 N_2 和 O_2 条件下 $Cl \cdot$ 与 TPA 的二级反应速率常数分别为 4.04×10^{10} 、 $4.15 \times 10^{10} \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{s})$, 大于苯甲酸与 $Cl \cdot$ 的二级反应速率常数 $1.8 \times 10^{10} \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{mol})$ ^[16]。由于 TPA 苯环上含有 2 个羧基, 比苯甲酸与 $Cl \cdot$ 的二级反应速率要快。

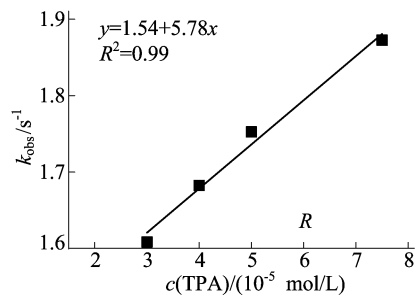
对 340 nm 处瞬态物种进行动力学分析可以发现其衰减遵循准一级动力学, 如图 5 所示。



(a) N_2 条件下 340 nm 处的衰减轨迹



(b) N_2 条件下中衰减动力学关系



(c) O_2 条件下中衰减动力学关系

图 5 TPA 与 $Cl_2 \cdot ^-$ 的衰减动力学关系

通过对 $Cl_2 \cdot ^-$ 的一级衰减速率与 TPA 浓度

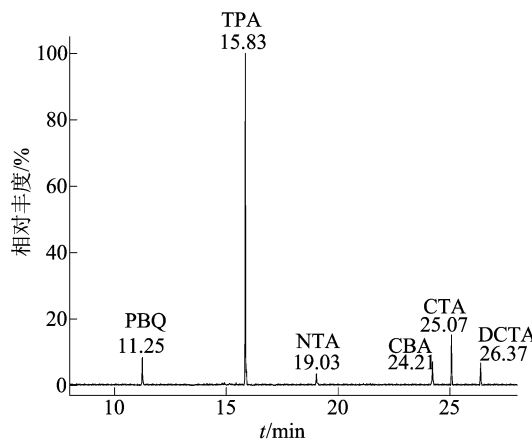
的线性关系进行拟合可得氮气和氧气条件下 TPA 与 $Cl_2 \cdot ^-$ 二级反应速率常数分别为 5.49×10^6 、 $5.78 \times 10^6 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{s})$ 。与文献[17]测得的 $6 \times 10^6 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{s})$ 较为接近。

2.3 产物分析

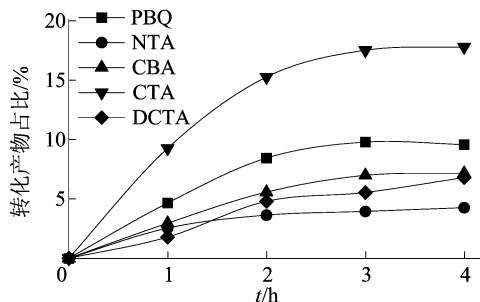
本文采用紫外稳态光源照射混合溶液($5 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ TPA、 $1 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ NaCl 和 $5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ $NaNO_2$, pH 值为 1.5) 1~4 h。将所得的样品用 CH_2Cl_2 萃取 3 次, 然后用无水硫酸铜在不透光的环境中干燥萃取后的有机相静置 12 h, 最后将干燥后的有机相用旋转蒸发器浓缩至 1 mL。用 GCMS 对反应产物进行分析, TPA 反应产物总离子电流 (total ion chromatogram, TIC) 色谱图和反应产物随时间的变化如图 6 所示。

由图 6a 可知, 通过各个色谱峰相对应的色谱图与 NIST 标准质谱库比对可知, 得到的反应产物有对苯醌 (PBQ)、2-硝基对苯二甲酸 (NTA)、对氯苯甲酸 (CBA)、2-氯对苯二甲酸 (CTA) 和 2, 6-二氯对苯二甲酸 (DCTA)。

由图 6b 可知, 所有的产物占比随着反应的进行呈现增长趋势, 转化产物占比为各产物与 TPA 的浓度比值 (即峰面积比值)^[18]。



(a) TPA 与氯混合溶液反应产物的 TIC 色谱图



(b) 反应产物随时间的演化曲线

图 6 TPA 与氯混合溶液的反应产物分析

TPA 与氯自由基光转化的可能途径如图 7 所示。文献[19]通过时间分辨红外光谱法揭示了 Cl 能够加成到萘分子上,形成萘-Cl 加合物,并最终生成氯代萘。基于以上研究,可以推测在 $\text{Cl}\cdot$ 与 TPA 的反应中,产物 CTA 主要是由 Cl-TPA 加合物形成的。而 DCTA 可能是通过 CTA 进一步与氯自由基形成加合物而产生的。DCTA 在反应进行 1 h 后浓度显著上升,这一现象验证了此推测,即 DCTA 是由一次氯代产物(CTA)进一步反应生成的,而不是直接由 TPA 生成。这种分步反应机制很好地解释了 DCTA 浓度随时间的变化。

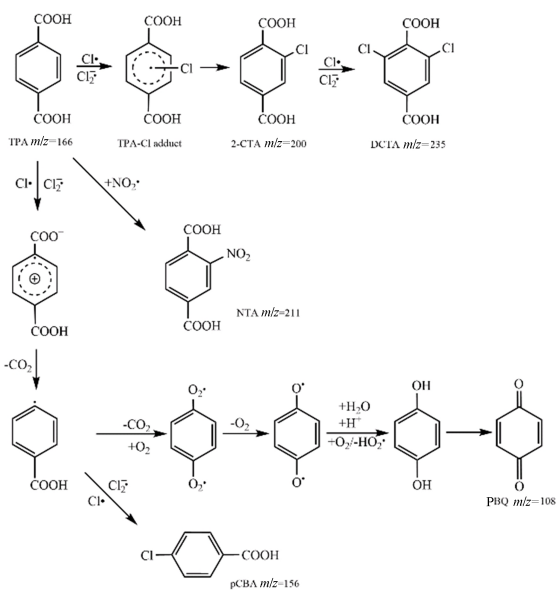


图 7 TPA 与氯自由基的光化学转化机反应制

文献[20]表明甲苯在硝化反应中能够同时生成邻硝基甲苯、间硝基甲苯、对硝基甲苯 3 种同分异构体。在此前的瞬态实验中观察到在反应体系中产生少量的 $\text{NO}_2\cdot$ 自由基,可以推测反应产物中 NTA 的生成与 $\text{NO}_2\cdot$ 自由基的存在有着密切的关联。基于瞬态实验结果和理论分析,推测 NTA 可能是通过 $\text{NO}_2\cdot$ 自由基攻击苯甲酸羧基邻位而产生的硝化产物。由于溶液中 $\text{NO}_2\cdot$ 的含量较低,产物中 NTA 的占比也较低。文献[21]研究发现肉桂酸、吡啶羧酸和苯并呋喃酸等多种芳香羧酸可以在卤素自由基的作用下发生脱羧氯化反应。因此,TPA 在氯自由基的作用下脱去一个羧基,随后与 $\text{Cl}\cdot$ 、 $\text{Cl}_2\cdot^-$ 发生相互作用,生成 CBA。另一方面,脱羧后的中间产物在氧气的作用下会发生双分子歧化反应,进一步生成对苯醌[22]。

3 结 论

本文采用 355 nm 激光闪光光解研究 TPA 与 $\text{Cl}\cdot$ / $\text{Cl}_2\cdot^-$ 反应的动力学以及光化学转化机理,通过 SCN^- 竞争动力学和自由基衰减动力学测得 $\text{Cl}\cdot$ 和 $\text{Cl}_2\cdot^-$ 与 TPA 反应的二级速率常数分别为 4.04×10^{10} 、 5.49×10^6 L/(mol · s)。TPA 的光转化反应有 $\text{Cl}\cdot$ / $\text{Cl}_2\cdot^-$ 攻击苯环形成 CTA 和 DCTA、在 $\text{Cl}\cdot$ / $\text{Cl}_2\cdot^-$ 的作用下脱羧基产生 CBA 和 PBQ 通过硝化反应生成 NTA 3 种途径,其中 $\text{Cl}\cdot$ / $\text{Cl}_2\cdot^-$ 攻击苯环产生 Cl^- 加合物是其转化途径。

[参 考 文 献]

- [1] LAPA H M, MARTINS L M. *p*-Xylene oxidation to terephthalic acid; new trends [J]. *Molecules*, 2023, 28(4): 1922.
- [2] YASTREBOVA O V, MALYSHEVA A A, PLOTNIKOVA E G. Halotolerant terephthalic acid-degrading bacteria of the genus glutamicibacter [J]. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2022, 58(5): 590-597.
- [3] LUNDE G, GETHER J, GJOS N, et al. Organic micropollutants in precipitation in Norway [J]. *Atmospheric Environment*, 1977, 11(11): 1007-1014.
- [4] DAI G, CUI L, SONG L, et al. Terephthalic acid occupational exposure and its effect on organ functions in fiber workers [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2005, 20(1): 209-214.
- [5] ABUHAIDAR R, DUFLLOT D, TOUBIN C. Theoretical characterization of the kinetics of the multiphase ozonolysis of an aqueous maleic acid droplet [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2023, 58(4): 337-355.
- [6] XU K, LIU Y, LI C, et al. Enhanced secondary organic aerosol formation during dust episodes by photochemical reactions in the winter in Wuhan [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 133: 70-82.
- [7] SONI M, SANDER R, SAHU L K, et al. Comprehensive multiphase chlorine chemistry in the box model CAABA/MECCA: implications for atmospheric oxidative capacity [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, 23(23): 15165-15180.
- [8] WOJNÁROVITS L, TAKÁCS E. Rate constants of dichloride radical anion reactions with molecules of environmental interest in aqueous solution; a review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(31): 41552-41575.
- [9] ZHOU H, XIAO D. Role of NOM in the photolysis of chlorine and the formation of reactive species in the solar/chlorine system [J]. *ACS Omega*, 2022, 7(9): 7769-7776.
- [10] WU L, HU X. Photochlorination of aniline in Fe^{3+} -containing saline water under simulated solar light irradiation

- [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 9(6): 558-563.
- [11] XIA D, YE L, HUANG P, et al. Effect of semiconductor materials on anaerobic methanogenesis of terephthalic acid: promotion and inhibition mechanisms [J]. *AICHE Journal*, 2023, 70(2): e18305.
- [12] LEI Y, ZHU C Z, LU J, et al. Photochemical transformation of dimethyl phthalate (DMP) with $N(III)$ ($H_2ONO^+/HONO/NO_2^-$) in the atmospheric aqueous environment [J]. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2020, 17: 332-341.
- [13] BUXTON G V, BYDDER M, SALMON G A, et al. The reactivity of chlorine atoms in aqueous solution. Part III. The reactions of $Cl \cdot$ with solutes [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2000, 2(2): 237-245.
- [14] ADAMS D J, BARLOW S, BUXTON G V, et al. Evaluation of the stability constant of $Cl_2 \cdot^-$ in neutral aqueous solution [J]. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, 1995, 91(18): 3303-3305.
- [15] LEI Y, ZHU C, LU J, et al. Photochemical oxidation of di-n-butyl phthalate in atmospheric hydrometeors by hydroxyl radicals from nitrous acid [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(31): 31091-31100.
- [16] LEI Y, CHENG S, LUO N, et al. Rate constants and mechanisms of the reactions of $Cl \cdot$ and $Cl_2 \cdot^-$ with trace organic contaminants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(19): 11170-11182.
- [17] HASEGAWA K, NETA P. Rate constants and mechanisms of reaction of chloride ($Cl_2 \cdot^-$) radicals [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 2002, 82(8): 854-857.
- [18] ZHU M, LU J, ZHAO Y, et al. Photochemical reactions between superoxide ions and 2,4,6-trichlorophenol in atmospheric aqueous environments [J]. *Chemosphere*, 2021, 279: 130537.
- [19] IWATA K, HAMAGUCHI H O. Mechanism of the photochemical reaction between anthracene and carbon tetrachloride studied by time-resolved infrared spectroscopy [J]. *Journal of Molecular Structure*, 1997, 413/414: 101-106.
- [20] SONG J, CUI Y, WANG Y, et al. Accurate determination of the kinetics of toluene nitration in a liquid-liquid micro-flow system [J]. *Journal of Flow Chemistry*, 2023, 13(3): 311-323.
- [21] YUAN X, YAO J F, TANG Z Y. Decarboxylative fluorination of electron-rich heteroaromatic carboxylic acids with selectfluor [J]. *Organic Letters*, 2017, 19(6): 1410-1413.
- [22] ZHU C, OUYANG B, WANG J, et al. Photochemistry in the mixed aqueous solution of nitrobenzene and nitrous acid as initiated by the 355 nm UV light [J]. *Chemosphere*, 2007, 67(5): 855-861.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 1015 页)

- [13] MINAKATA D, KAMATH D, MAETZOLD S. Mechanistic insight into the reactivity of chlorine-derived radicals in the aqueous-phase UV-chlorine advanced oxidation process: quantum mechanical calculations [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(12): 6918-6926.
- [14] YANG Y, PIGNATELLO J J, MA J, et al. Comparison of halide impacts on the efficiency of contaminant degradation by sulfate and hydroxyl radical-based advanced oxidation processes (AOPs) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(4): 2344-2351.
- [15] NIE M, YAN C, XIONG X, et al. Degradation of chloramphenicol using a combination system of simulated solar light, Fe^{2+} and persulfate [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 348: 455-463.
- [16] GHAUCH A, BAALBAKI A, AMASHA M, et al. Contribution of persulfate in UV-254nm activated systems for complete degradation of chloramphenicol antibiotic in water [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 317: 1012-1025.
- [17] 张壮. 高铁酸钾联合硫代硫酸钠氧化降解氯霉素的影响因素及其机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
- [18] NIE M, YANG Y, ZHANG Z, et al. Degradation of chloramphenicol by thermally activated persulfate in aqueous solution [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 246: 373-382.
- [19] CSAY T, RÁCZ G, TAKÁCS E, et al. Radiation induced degradation of pharmaceutical residues in water: chloramphenicol [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2012, 81(9): 1489-1494.
- [20] WU L, YAN X, YANG L, et al. Simultaneous efficient degradation and dechlorination of chloramphenicol using UV/sulfite reduction: mechanisms and product toxicity [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 452: 139161-139172.

(责任编辑 吴 亮)