

康春莉, 唐晓剑, 郭平, 等. 2009 H_2O_2 存在条件下冰相中苯酚的光化学转化 [J]. 环境科学学报, 29(5): 1036-1041

Kang C L, Tang X J, Guo P, et al. 2009 Photoconversion of phenol in ice in the presence of H_2O_2 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(5): 1036-1041

H_2O_2 存在条件下冰相中苯酚的光化学转化

康春莉*, 唐晓剑, 郭平, 高红杰, 彭菲

吉林大学环境与资源学院, 长春 130012

收稿日期: 2008-07-07 修回日期: 2008-12-03 录用日期: 2009-03-26

摘要: 研究了在 125W 高压汞灯照射下, 低温 (-14~-12°C) 反应装置中 H_2O_2 存在条件下冰相中苯酚的光转化反应, 考察了冰相中苯酚光转化的影响因素以及光转化动力学过程. 结果表明, 冰相中苯酚光转化速率随着光强和 H_2O_2 初始浓度的增加而加快, 随着苯酚初始浓度的增加而减慢; 强酸条件促进了苯酚的光转化; 苯酚的光解速率符合一级动力学模式. 苯酚光解产物的 GC-MS 和 LC-MS 分析表明, 苯酚在光解过程中主要发生了羟基化反应和偶联反应.

关键词: 苯酚; 光转化; 过氧化氢; 冰

文章编号: 0253-2468(2009)05-1036-06 中图分类号: X131 文献标识码: A

Photoconversion of phenol in ice in the presence of H_2O_2

KANG Chunli, TANG Xiaojian, GUO Ping, GAO Hongjie, PENG Fei

College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130012

Received 7 July 2008; received in revised form 3 December 2008; accepted 26 March 2009

Abstract Using a 125W high-pressure mercury lamp as light source, the photoconversion reaction of phenol was studied at low temperature (-14~-12°C), when H_2O_2 was present in the water ice. The optimal conditions and dynamics of the photoconversion of phenol in water ice were investigated. The results show that the photoconversion rate of phenol increases rapidly with the initial concentration of H_2O_2 and light intensity, but decreases with the initial concentration of phenol. Stronger acid conditions facilitate the photoconversion of phenol. The photoconversion course follows first-order kinetics. The photoproducts detected by GC-MS and LC-MS indicate that hydroxylation and coupling reactions occurred in the course of photoconversion.

Keywords phenol; photoconversion; H_2O_2 ; ice

1 引言 (Introduction)

光化学作用是环境中污染物迁移转化的重要途径. 目前, 关于大气、水和土壤中有有机污染物光化学作用的研究较多, 而有关以固态冰为媒介的有机污染物光化学作用的研究却较少. 实际上, 由于冰的特殊性质, 光化学作用是有机污染物在冰雪环境中最重要的转化途径. 对冰相中有有机污染物的光化学作用进行深入研究具有重要的意义 (Dubowski et al., 2000; Klin et al., 2002; Jana et al., 2003).

过氧化氢 (H_2O_2) 是一种强氧化剂, 它普遍存在于大气和水中. 近年来, 人们发现在南极冰核和积雪表面也存在着 H_2O_2 . Chu (2005) 和 Jacobi (2006) 的研究结果表明, 在极地雪和人造雪中, 太阳光分

解 H_2O_2 是 $\cdot OH$ 产生的重要途径, 而 $\cdot OH$ 与有机污染物的光化学反应有着密切的关系. 目前, 国内外许多学者的研究表明, $\cdot OH$ 对大气以及水环境中有机污染物的光转化均有着重要的促进作用 (A sin et al., 1999; Haizy et al., 2000; 吴祖成等, 2001; 邓南圣等, 2003; 白杨, 2004). 但是, 冰相中 H_2O_2 的存在对有机污染物光转化的影响的研究还较少. 而这方面的研究对于全面了解冰雪环境中有机物光化学转化的过程及机理有着重要的理论和实际意义 (Klin et al., 2000, 2001; Huntley et al., 1998; King et al., 2005; Francea et al., 2007). 为此, 本文拟通过室内模拟实验系统研究环境中的重要污染物苯酚在 H_2O_2 存在下在固态冰相中光化学反应的影响因素, 利用 GC-MS 和 LC-MS 分析苯酚的光解

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 20577014)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 20577014)

作者简介: 康春莉 (1963-), 女, 教授; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: Kangchunli2002@163.com

Biography: KANG Chunli (1963-), female professor. * Corresponding author. E-mail: Kangchunli2002@163.com

产物并探讨反应机理. 旨在全面了解苯酚在实际环境中的迁移转化规律, 为冰雪污染的潜在环境风险提供理论依据.

2 材料及方法 (Materials and methods)

2.1 化学试剂

苯酚 (Phenol)、过氧化氢 (H_2O_2)、氢氧化钠 (NaOH)、盐酸 (HCl) 购买于天津光复精细化工研究所或北京化工试剂厂, 以上试剂均为分析纯; 实验所用溶液均由自制蒸馏水配制; 甲醇 (methanol) 为色谱纯, 购买于 Tedia 公司.

2.2 实验仪器

主要仪器包括 GC-MS (美国 Agilent 公司)、LC-MS (美国 Agilent 公司)、高效液相色谱仪 (美国 Waters 公司)、125W 荧光高压汞灯 (上海飞利浦亚明照明有限公司)、125W 高压汞灯镇流器 (上海亚明灯泡厂有限公司)、自制石英管 (直径 15mm × 150mm)、ST-92 型照度计 (北京师范大学光电仪器厂)、HS6150D 超声波清洗器 (天津市恒奥科技发展有限公司).

2.3 实验方法

1) 配制苯酚浓度为 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 H_2O_2 浓度为 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的混合溶液 500mL. 将溶液分装于 20 个石英试管中 (15mm × 150mm, 每管装 12mL), 置于 -20°C 冰柜中冷冻至完全结冰.

2) 实验采用自制的环状反应装置, 反应装置内温度为 ($-14 \sim -12^\circ\text{C}$), 将 125W 高压汞灯 (光强为 23000k) 竖直置于环的中心处 (环的内径为 11cm), 冰冻后的样品垂直置于环上; 然后对样品进行光照, 照射时间为 4h 每隔 20min 取样 1 次, 每次取出 2 个样品作为平行样. 样品在室温 (16°C) 条件下融化后利用高效液相色谱仪检测苯酚的浓度. 光转化反应的效率采用苯酚的转化率 (η) 来衡量:

$$\eta = [(C_0 - C_t) / C_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中, η 为苯酚的转化率, C_0 为光照前样品溶液中苯酚的浓度, C_t 为光照 t 时间后样品溶液中苯酚的浓度.

3) 光照 4h 的样品融化后, 溶液中有固体物质析出, 离心分离. 离心后的上清液经 $0.22 \mu\text{m}$ 的微孔滤膜过滤后, 利用 LC-MS 分析测定滤液中的产物; 离心后的沉淀经清洗、干燥后用甲醇溶解, 利用 GC-MS 和 LC-MS 分析测定甲醇溶液中的产物.

2.4 分析方法

苯酚浓度分析采用 Waters 1525 高效液相色谱仪配以 2487 高灵敏度双通道紫外检测器进行分析, 色谱柱为 Symmetry[®] 5 μm 反相 C18 柱, 3.9mm ×

150mm, 流速为 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 流动相为甲醇/水 = 70/30 (体积比), 检测波长为 270nm, 进样量为 20 μL .

GC-MS 分析条件: 色谱柱 HP-5, 60m × 250 μm × 0.32 μm ; 升温程序: 50°C 保持 3min, 再以 $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度升至 260°C , 保持 15min, 进样量 1 μL , 分流比为 20:1.

LC-MS 分析条件: 色谱柱 Aichrom[®] 5 μm 反相 C18 柱, 4.6mm × 250mm, 流速 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 流动相为甲醇/水 = 70/30 (体积比), 检测波长为 190~400nm, 进样量为 10 μL .

3 结果 (Results)

3.1 光暗反应对照实验

由图 1 可知, 在暗反应中冰相中苯酚浓度基本不变化. 在仅有紫外光照射的条件下, 反应 240min 时冰相中苯酚转化率可达 41.7%; 而在有紫外光和 H_2O_2 共存的条件下, 冰相中苯酚的转化率增大, 在 240min 时苯酚转化率为 90.9%.

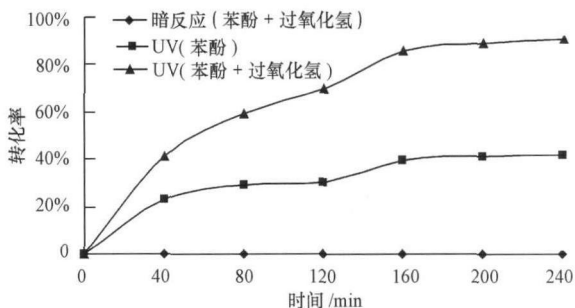


图 1 光暗反应对照实验 ($[\text{phenol}]_0 = 0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 6.09$, $\text{light intensity} = 23000 \text{ k}$)

Fig 1 Conversion of phenol under dark and light conditions

3.2 不同因素对冰相中苯酚光转化的影响

溶液中苯酚初始浓度、 H_2O_2 初始浓度、溶液初始 pH 值以及光照强度对冰相中苯酚光化学转化的影响分别如图 2~图 5 所示. 由图 2~图 4 可知, 冰相中苯酚光转化率随着冰相中苯酚初始浓度的增加而减小, 当苯酚初始浓度由 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $3.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 苯酚的 120min 光转化率由 98.1% 降低到 22.6%; 冰相中苯酚的光转化率随着冰相中 H_2O_2 初始浓度的增加而增大, 当 H_2O_2 初始浓度由 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $3.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 苯酚的 120min 光转化率由 47.2% 增大到 88.4%; 冰相中苯酚的光转化率随着光照强度的增加而增加, 在 120min 时, 23000k 光强作用下苯酚的转化率为 69.9%, 而 10100k 光强作用下苯酚的转化率仅为

28.7%。由图5可知,在酸性条件下,当pH值在2.46~6.09范围内时,pH值越小,苯酚转化率越高;当pH值为2.46时,冰相中苯酚的转化率最高。在碱性条件下,就所考察的pH=8.75和pH=10.23两种pH值条件来看,pH值越大,苯酚转化率

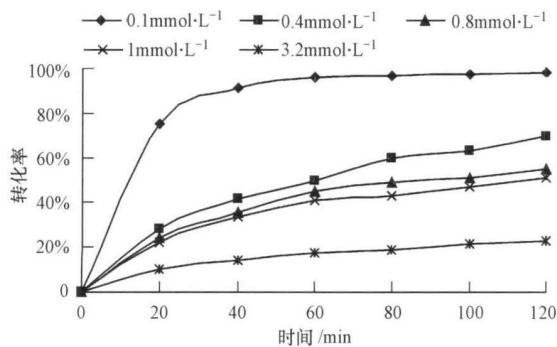


图2 冰相中苯酚初始浓度的影响 ($[H_2O_2]_0 = 1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH = 6.09, light intensity = 23000lx)

Fig. 2 Effects of the initial concentration of phenol

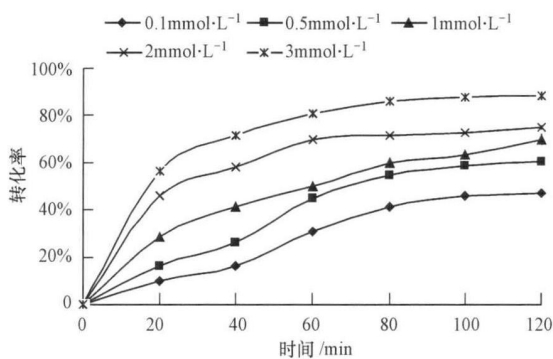


图3 冰相中 H_2O_2 初始浓度的影响 ($[phenol]_0 = 0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH = 6.09, light intensity = 23000lx)

Fig. 3 Effects of the initial concentration of H_2O_2 on the conversion of phenol

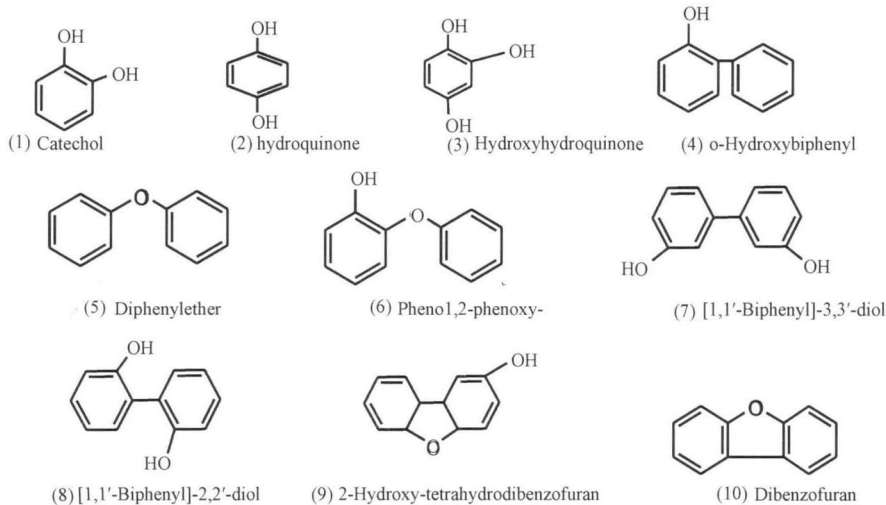


图6 中间产物结构式

越低;当pH值为10.23时,冰相中苯酚的转化率最低。

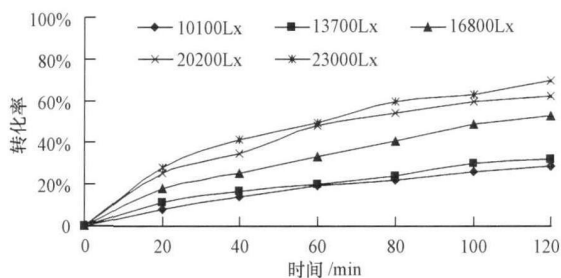


图4 光强对冰相中苯酚转化的影响 ($[phenol]_0 = 0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $[H_2O_2]_0 = 1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH = 6.09)

Fig. 4 Effect of the light intensity on the conversion of phenol

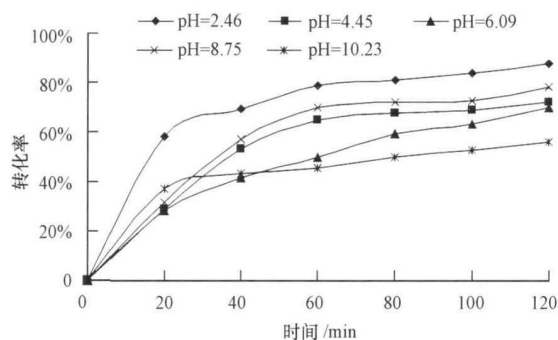


图5 pH值对冰相中苯酚光转化的影响 ($[phenol]_0 = 0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $[H_2O_2]_0 = 1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, light intensity = 23000lx)

Fig. 5 Effects of pH on the conversion of phenol

3.3 中间产物的测定

中间产物经GC-MS和LC-MS分析,共鉴定出14种中间产物(图6),另有4种分子量较高的产物尚无法确认。其中,经滤膜过滤后的滤液经LC-MS

分析, 得到产物 (1) ~ (3)、(6) ~ (8); 甲醇溶解液经 GC-MS 分析, 得到产物 (4) ~ (10); 甲醇溶解液经 LC-MS 分析, 得到产物 (4) ~ (8)。

4 讨论 (Discussion)

4.1 冰相中苯酚的光解特征

光强随冰层厚度的衰减规律一般符合 Bouguer-Lambert 公式:

$$I(d) = I(d') e^{-k(\lambda)(d-d')} \quad (2)$$

式中, $I(d)$ 和 $I(d')$ 分别为冰层厚度 d (m) 和 d' (m) 处的光强 (cd), $k(\lambda)$ 为光衰减系数; 在本实验条件下, 测得光线穿过装有冰冻样品的石英试管和穿过空的石英试管后的光强一样。这表明光在冰冻样品中具有很好的穿透性, 冰本身对光的吸收可以忽略不计。

由于冰相中的苯酚在暗处浓度基本不变化 (图 1), 说明在本实验条件下, 结冰过程以及冰融化过程中苯酚的损失可以忽略不计。紫外光照射下冰相中苯酚浓度的减少说明苯酚可以发生直接光解; 而在有紫外光和 H₂O₂ 共存的条件下, 冰相中苯酚的转化率进一步增大, 这是由于此时 H₂O₂ 经过光解能够产生 $\cdot\text{OH}$ 自由基活性基团, 从而加速了苯酚在冰相中的反应, 促进了冰相中苯酚的光转化。由此可见, 冰相中紫外光和 H₂O₂ 常见的协同效应在冰相中也是存在的。

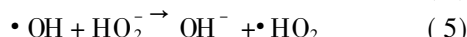
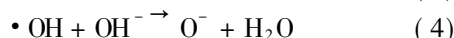
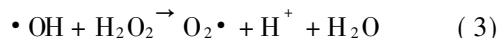
4.2 冰相中苯酚光解的影响因素及光解动力学规律

冰相中的光化学反应同样也涉及到自由基等活性基团的参与, 因此, 能够导致活性基团增加的因素都会促进冰相中苯酚的光转化。

冰相中 H₂O₂ 初始浓度的增加, 可以使得反应体系产生更多的 $\cdot\text{OH}$ 自由基, 从而加速了反应的进行; 而光强的增大, 可以提供更多的能量促进 H₂O₂

发生光解产生 $\cdot\text{OH}$ 自由基, 从而也加速了苯酚的光解。由于在光强一定的条件下, 光化学反应体系中所能产生的活性物种的数量一般是固定的, 因而随着苯酚浓度的增大, 能够与单位数量的苯酚发生反应的活性物种的数量减少, 从而导致苯酚光解转化率降低。

pH 值对冰相中苯酚光转化率的影响可以用反应 (3) ~ (5) (Asim *et al.*, 1999; Buxton *et al.*, 1988) 来描述。



由图 4 可知, 在酸性条件下冰相中苯酚的光转化率较高。由反应 (3) 可知, 当 H⁺ 增加, 反应 (3) 向逆反应方向移动, 体系中 $\cdot\text{OH}$ 的量增多, 故酸性条件促进了苯酚的转化; 当 pH 值为 2.46 时, 冰相中苯酚的转化率最高。李绍峰等 (2004) 在研究 UV/H₂O₂ 作用下水溶液中苯酚的光降解时也发现, 溶液酸性越强, 苯酚光解越快。在强碱性条件下, 反应 (4) 起着重要作用, 当 OH⁻ 增加, 反应 (4) 向正反应方向移动, 体系中 $\cdot\text{OH}$ 的量减少, 故强碱性条件抑制了苯酚的转化; 当反应 pH 值为 10.23 时, 冰相中苯酚的转化率最低。此外, 在弱碱性条件下, 反应 (5) 可能起着重要作用。由反应 (5) 可知, 当 OH⁻ 增加, 反应 (5) 向逆反应方向移动, 体系中 $\cdot\text{OH}$ 的量增多, 因而弱碱性条件可以促进苯酚的转化。在 pH 值为 4.45 和 8.75 时, 体系中产生的 $\cdot\text{OH}$ 的量可能相差不多, 因而使得苯酚的转化率相差不多。

对图 2 中的曲线按照一级动力学方程进行拟合。结果表明, 苯酚在冰相中的光转化动力学过程符合一级动力学方程 (表 1)。

表 1 不同初始浓度条件下苯酚冰相光化学反应速率方程

Table 1 Kinetic parameters obtained from experimental runs at different initial concentrations

初始浓度 C_0 / (mmol L ⁻¹)	一级反应动力学方程	表观反应速率常数 k ln min ⁻¹	半衰期 $t_{1/2}$ ln min	可决系数 R^2
0.09	$\ln C_0 / C_t = 2.5255t + 0.0875$	2.5255	0.274	0.996
0.36	$\ln C_0 / C_t = 0.8050t + 0.1200$	0.8050	0.862	0.937
0.73	$\ln C_0 / C_t = 0.3660t + 0.0270$	0.3660	1.894	0.984
1.91	$\ln C_0 / C_t = 0.2522t + 0.0882$	0.2522	2.748	0.924
2.73	$\ln C_0 / C_t = 0.0964t + 0.0502$	0.0964	7.190	0.929

冰相中 H₂O₂ 存在下苯酚的光转化速率随光强、H₂O₂ 初始浓度的增长而增长, 随苯酚初始浓度的增

加而降低; 这与 Pouloupos (2006) 和 Alnazy (2000) 对水相中 H₂O₂ 存在条件下苯酚光解的规律相同。

4.3 H_2O_2 存在条件下冰相中苯酚光转化机理探讨

HO (1987)和白杨 (2004)的研究表明,在UV/ H_2O_2 存在条件下苯酚水溶液光转化反应的中间产物为邻苯二酚、间苯二酚、对苯二酚、苯醌、1,2,3-苯三酚和1,2,4-苯三酚.这些产物的结构中只含有一个苯环,而本实验所得到的中间产物既包括含有一个苯环的产物,也包括含有2个苯环的产物.冰晶表面层又称为准液层(叶招莲等,2008),在准液层中冰晶的结构变得无序,类似液态的水.目前人们普遍认为冰相中污染物的光化学作用主要发生在准液层(Jana *et al.*, 2003; Kahan *et al.*, 2007;

Dubowski *et al.*, 2002). Chu (2005)研究发现 H_2O_2 的光解就发生在准液层.因此,冰相中污染物的光化学作用途径与水相既有相似之处,又有所不同.准液层的存在对 $\cdot OH$ 自由基的产生和传递起着重要作用.

产物分析结果表明,冰相中的 H_2O_2 和苯酚被光激发产生了 $\cdot OH$ 自由基、苯自由基和苯氧自由基. $\cdot OH$ 自由基进攻苯环不同的位置,产生了邻、对位苯二酚和1,2,4-苯三酚;苯自由基或苯氧自由基的进一步反应导致了双环化合物的形成.苯酚在冰相中光化学反应机理如图7所示.

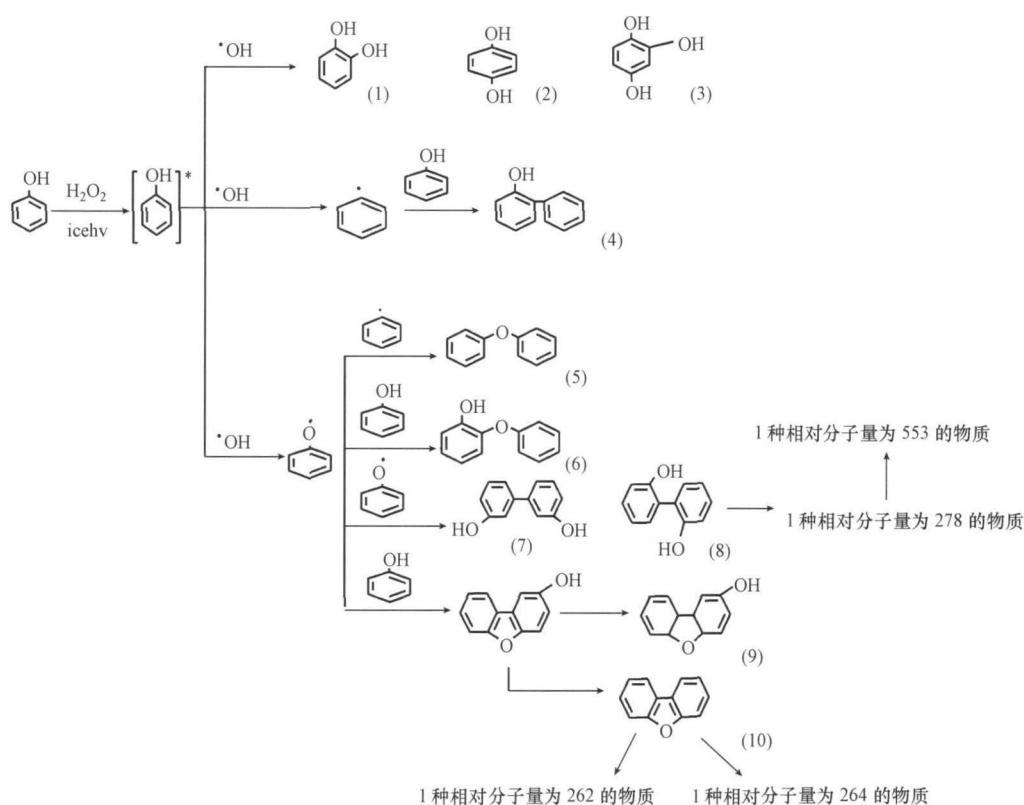


图 7 H_2O_2 存在条件下苯酚在冰相中光转化机理

Fig. 7 The photoconversion mechanism of phenol in ice in the presence of H_2O_2

5 结论 (Conclusions)

1) 在 H_2O_2 存在条件下,冰相中苯酚的光转化速率随光强、 H_2O_2 初始浓度的增长而增长,随苯酚初始浓度的增加而降低;强酸性条件能够促进冰相中苯酚的光转化.

2) 利用GC-MS和LC-MS分析检测出冰相中苯酚光转化产物为邻苯二酚、对苯二酚、1,2,4-苯三酚、2-羟基联苯、联苯醚、2-苯氧基苯酚、[1,1'-二苯基]-3,3'-二酚、[1,1'-二苯基]-2,2'-二酚、2-羟基-二

苯并四氢呋喃、二苯并呋喃. H_2O_2 存在条件下冰相中苯酚光转化过程主要是发生了羟基化以及偶联反应.

参考文献 (References):

- Alnaizy R, Akgeman A. 2000. Advanced oxidation of phenolic compounds[J]. *Advances in Environmental Research* 4: 233-244.
Asin K D, Basab C, Sekhar B *et al.* 1999. Estimation of $\cdot OH$ radical reaction rate constants for phenol and chlorinated phenols using UV/ H_2O_2 photo-oxidation[J]. *Journal of Hazardous Materials B*, 64: 91-104.

- 白杨. 2004 H_2O_2 在苯酚降解过程中的作用研究[J]. 化学通报, 2: 154—159
- Bai Y. 2004 Study on the function of H_2O_2 during the phenol degrading process [J]. Chemistry Bulletin, 2: 154—159 (in Chinese)
- Buxton G V, Greenstock C L, Helman W P, *et al* 1988 Critical review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals (OH/O_2^-) in aqueous solutions [J]. J Phys Chem Refer Data, 17: 513—886
- Chu L, Anastasio C. 2005 Formation of hydroxyl radical from the photolysis of frozen hydrogen peroxide [J]. J Phys Chem A, 109 (28): 6264—6271
- 邓南圣, 吴峰. 2003. 环境光化学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 101—111
- Deng N S, Wu F. 2003. Environmental Photochemical [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 101—111 (in Chinese)
- Dubowski Y, Colussi A J, Boxe G, *et al* 2002. Monotonic increase of nitrite yields in the photolysis of nitrate in ice and water between 238 and 294 K [J]. J Phys Chem A, 106: 6967—6971
- Dubowski Y, Hoffmann M R. 2000. Photochemical transformations in ice: implications for the fate of chemical species [J]. Geophys Res Lett, 27(20): 3321—3324
- France J L, King M D, Lee-Taylor J. 2007. Hydroxyl (OH) radical production rates in snowpacks from photolysis of hydrogen peroxide (H_2O_2) and nitrate (NO_3^-) [J]. Atmospheric Environment, 41: 5502—5509
- Ho P C, Kuczkowski S T. (Ed.) 1987. In Management of hazardous and toxic waters wastes in the process industries [M]. New York: Elsevier, 185—190
- Huntley D R, Grimm F A, Vaughn T E, *et al* 1998. Adsorption and photochemical reactions of chlorinated hydrocarbons on ice surfaces [J]. Abstr Pap Chem Am Soc (Part 1), 211: 183—184
- Jacobi H W, Amor T, Quansah E. 2006. Investigation of the photochemical decomposition of nitrate, hydrogen peroxide and formaldehyde in artificial snow [J]. J Photochem Photobiol A-Chem, 179(3): 330—338
- Jana K, Petr K, Jan N, *et al* 2003. Environmental ice photochemistry: monochlorophenols [J]. Environ Sci Technol, 37(8): 1568—1574
- Kahan T F, Donaldson D J. 2007. Photolysis of polycyclic aromatic hydrocarbons on water and ice surfaces [J]. J Phys Chem A, 111: 1277—1285
- King M D, France J L, Fisher F N, *et al* 2005. Measurement and modelling of UV radiation penetration and photolysis rates of nitrate and hydrogen peroxide in Antarctic sea ice: An estimate of the production rate of hydroxyl radicals in first-year sea ice [J]. J Photochem Photobiol A-Chem, 176: 39—49
- King P, Ansongova A, Del F D, *et al* 2000. Photochemistry of chlorobenzene in ice [J]. Tetrahedron Lett, 41: 7785—7789
- King P, Del Favero D, Ansongova A, *et al* 2001. Photodegradation of halobenzenes in water ice [J]. Environ Sci Pollut Res, 8: 195—200
- King P, Holoubek I. 2002. Ice (photo) chemistry: ice as a medium for long-term (photo) chemical transformations—environmental implications [J]. Chemosphere, 46(8): 1201—1210
- 李绍峰, 孙连鹏, 黄君礼. 2004. UV/H_2O_2 降解酚类物质动力学研究 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 43(3): 99—102
- Li S F, Sun L P, Huang J L. 2004. A study on oxidizing kinetics of phenols by UV/H_2O_2 system [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 43(3): 99—102 (in Chinese)
- Poulopoulos S G, Arvanitakis E, Philippopoulos C J. 2006. Photochemical treatment of phenol aqueous solutions using ultraviolet radiation and hydrogen peroxide [J]. J Hazard Mater B, 129: 64—68
- 吴祖成, 李伟. 2001. UV/H_2O_2 系统光催化氧化降解苯酚废水 [J]. 化工学报, 52(3): 277—280
- Wu Z C, Li W. 2001. Treatment of phenol containing wastewater using UV/H_2O_2 systems. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 52(3): 277—280 (in Chinese)
- 叶招莲, 何锦丛, 侯惠奇. 2008. 污染物在冰晶中的光化学研究进展 [J]. 环境化学, 27(4): 409—415
- Ye Z L, He J C, Hou H Q. 2008. A review on photochemistry of pollutants in ice [J]. Environmental Chemistry, 27(4): 409—415 (in Chinese)