

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.09.008

UV/H₂O₂氧化丙氨酸对氯化中二氯乙腈生成的影响

周冰洁¹, 陈 晗², 林 涛²

(1. 南京市给排水工程设计院有限公司, 江苏 南京 210036; 2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 采用水处理过程中常用的紫外/过氧化氢(UV/H₂O₂)高级氧化工艺对水中典型的氨基酸——丙氨酸进行预处理,研究了后氯化过程中代表性含氮消毒副产物二氯乙腈的生成情况。研究发现,UV/H₂O₂工艺中产生的羟基自由基对丙氨酸进行 α 碳氢抽取和氨基氢抽取,在20 min反应时间内主要生成3种产物:HN=C(CH₃)—COOH、CH₃—CH=NH和CH₃—C \equiv N,这3种产物相比丙氨酸具有更高的二氯乙腈生成势,因此强化了后氯化过程中二氯乙腈的生成。进一步研究UV/H₂O₂预处理时间、丙氨酸浓度、pH和水基质成分(HCO₃⁻、Cl⁻、NO₃⁻)对二氯乙腈生成势的影响,结果表明,随着UV/H₂O₂预处理时间从0增至30 min,二氯乙腈生成势先升高后降低,并在20 min时达到最大值;丙氨酸浓度的升高和pH的降低有利于二氯乙腈的生成;HCO₃⁻和Cl⁻的存在会抑制二氯乙腈的生成,而NO₃⁻对二氯乙腈的生成无明显影响。

关键词: 紫外/过氧化氢; 丙氨酸; 氯化; 二氯乙腈

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)09-0052-06

Effect of UV/H₂O₂ Oxidation of Alanine on Formation of Dichloroacetonitrile in Chlorination

ZHOU Bing-jie¹, CHEN Han², LIN Tao²

(1. Nanjing Water Supply and Drainage Engineering Design Institute Co. Ltd., Nanjing 210036, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: UV/H₂O₂ advanced oxidation process, which is widely applied in water treatment, was employed for pretreatment of alanine (a typical amino acid in water), and the formation of dichloroacetonitrile (a representative nitrogenous disinfection by-product) in post-chlorination process was investigated. The hydroxyl radicals produced in UV/H₂O₂ process degraded alanine through α -carbon hydrogen abstraction and amino hydrogen abstraction, and mainly three products were produced in 20 min: HN=C(CH₃)—COOH, CH₃—CH=NH and CH₃—C \equiv N. The three oxidation intermediates exhibited higher dichloroacetonitrile formation potential compared with that of alanine, thus enhanced the formation of dichloroacetonitrile during post-chlorination. The effects of UV/H₂O₂ pretreatment time, initial alanine concentration, pH and other components in water (e.g., HCO₃⁻, Cl⁻, and NO₃⁻) on the formation of dichloroacetonitrile were further investigated. When the UV/H₂O₂ pretreatment time was increased from 0 to 30 min, the formation potential of dichloroacetonitrile increased first and then decreased, and reached the maximum value at 20 min. The increase of alanine concentration and the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978238)

通信作者: 林涛 E-mail: hit_lintao@163.com

decrease of pH were beneficial to the formation of dichloroacetonitrile. The presence of HCO₃⁻ and Cl⁻ both inhibited the formation of dichloroacetonitrile, while the presence of NO₃⁻ had no significant effect on the formation of dichloroacetonitrile.

Key words: UV/H₂O₂; alanine; chlorination; dichloroacetonitrile

氨基酸是水体中常见的有机物,由于氨基酸分子结构中均含有氨基基团,其作为水处理过程中生成含氮消毒副产物的典型前体物受到广泛关注^[1]。水体中氨基酸总量可达到2.2~167 nmol/L^[2],主要有天冬氨酸、丙氨酸、色氨酸等,其中丙氨酸是浓度相对较高(通常可达到2 nmol/L)、结构最简单的一种氨基酸,由于其分子质量小,混凝、沉淀、过滤等常规水处理工艺难以将其有效去除^[3],此外,在氯化消毒过程中丙氨酸具有较高的含氮消毒副产物(特别是二氯乙腈)生成潜能^[1-2]。

紫外/过氧化氢(UV/H₂O₂)高级氧化技术作为一种高效去除水中难降解有机物的方法已被广泛应用^[4],该技术主要通过紫外辐照、过氧化氢氧化和产生的羟基自由基(·OH)氧化3种途径破坏难降解有机物的化学键,其中·OH具有较高的氧化还原电位($E_0=2.8\text{ V}$),对有机物的降解具有非选择性,因此能够氧化大多数有机物甚至将有机物完全矿化,·OH与有机物的反应方式主要有3种:电子转移、亲电加成和抽氢反应^[4]。由于高效的降解有机物性能,UV/H₂O₂工艺也被研究者们作为前处理技术降解有机物从而减轻含氮消毒副产物的生成潜能^[5],而丙氨酸作为水体中常见的氨基酸,其经UV/H₂O₂处理后对后续氯化消毒副产物(尤其是二氯乙腈)生成的影响仍未见报道。

鉴于此,笔者研究了UV/H₂O₂氧化丙氨酸对后氯化过程中二氯乙腈生成的影响,采用自由基检测和自由基淬灭实验明确了·OH氧化丙氨酸对二氯乙腈生成潜能的自由基介导机制;采用气相质谱检测结合密度泛函理论计算明确了·OH氧化丙氨酸的主要降解产物,并推导了丙氨酸经UV/H₂O₂氧化生成降解产物,降解产物再经氯化生成二氯乙腈的转化路径机理;同时,考察了UV/H₂O₂处理时间、丙氨酸初始浓度、反应pH和水基质(如HCO₃⁻、Cl⁻、NO₃⁻)等工艺参数和水环境因素对二氯乙腈生成的影响。

1 材料与方法

1.1 实验材料

二氯乙腈标准品、过氧化氢溶液(31%)、甲基叔丁基醚(色谱纯)、次氯酸钠溶液(有效氯为4.00%~4.99%)、丙氨酸购自Sigma-Aldrich公司;抗坏血酸(>99.0%)购自麦克林化学试剂有限公司,自旋捕获试剂5,5-二甲基-1-吡咯啉N-氧化物(DMPO)购自东京化学工业株式会社;其他化学药剂,如叔丁醇等均购自国药集团化学试剂有限公司。配制溶液的超纯水采用Millipore超纯水净化系统制备。

1.2 实验方法

1.2.1 实验装置

UV/H₂O₂实验装置如图1所示。箱体正中间安装低压紫外汞灯(10 W),箱内两侧为玻璃皿和磁力搅拌器,玻璃皿采用水循环系统控温在25℃。经测量,254 nm处的光通量(I_0)和有效路径(L)分别为 $6.37\times 10^{-7}\text{ Einstein}/(\text{s}\cdot\text{L})$ 和3.35 cm。

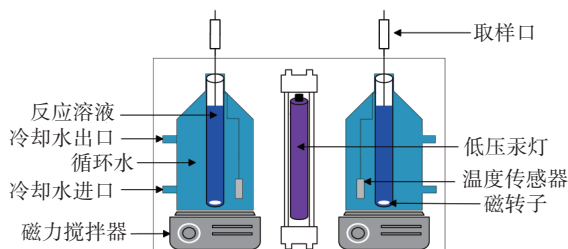


图1 UV/H₂O₂实验装置

Fig.1 Schematics of UV/H₂O₂ experimental setup

1.2.2 实验方案

实验开始前,将紫外灯管预热30 min以保证光源稳定输出。实验时,配制3 mg/L(以C计,下同)的丙氨酸溶液,并用0.1 mmol/L的硫酸和氢氧化钠调节溶液的pH至一定值。反应开始后,迅速加入200 μmol/L的过氧化氢溶液,并利用磁力搅拌器搅拌以混匀反应溶液。经紫外辐照20 min后取样,测定剩余过氧化氢的浓度,并加入当量的次氯酸钠去除剩余过氧化氢。随后将所取样品转移至50 mL无顶空螺旋盖琥珀玻璃瓶中,加入200 μmol/L的次氯酸钠

溶液后置于25℃暗箱中以进行二氯乙腈生成实验,经过24 h反应后采用抗坏血酸淬灭氯反应,并迅速测定二氯乙腈浓度。每组实验进行3次,结果取平均值。

1.3 分析项目与方法

二氯乙腈采用甲基叔丁基醚液液萃取,其浓度采用气相色谱(GC, Agilent 7890 B)检测,色谱柱型号为RTX-5(30 m×0.25 mm×0.25 μm);进样温度为200℃,柱温先以30℃保持10 min,再以14℃/min的速率升至72℃并保持1 min,然后以40℃/min的速率升至200℃并保持2 min;进样量为2 μL^[6]。过氧化氢浓度采用紫外分光光度计测定。丙氨酸降解产物采用气相色谱/质谱(GC/MS, 6890B-5977A, Agilent)鉴定,色谱柱型号为DB-5(60 m×0.25 mm×0.25 μm),柱温以5℃/min的速率从60℃升至220℃,注射器和检测器温度分别设为220℃和250℃,氮气流速为0.7 mL/min,质谱离子源温度保持在250℃^[7]。

反应自由能变(反应焓变)采用高斯09软件基于密度泛函理论计算^[8-9],首先设定M06-2X/6-31+G**方法对反应性物质的几何构型进行优化,基于优化结果采用M06-2X/6-311++G**方法计算单点能,计算过程中考虑溶剂效应,所有过渡态物质都有且仅有一个虚频,每个局部极小值都没有虚振动频率。

2 结果与讨论

2.1 不同前处理方法下二氯乙腈的生成情况

研究了丙氨酸在无前处理以及UV、H₂O₂和UV/H₂O₂前处理后氯化过程中二氯乙腈的生成情况。直接氯化丙氨酸时二氯乙腈的生成量为41.6 μg/L,丙氨酸经UV、H₂O₂和UV/H₂O₂前处理后氯化过程中二氯乙腈的生成量分别为36.4、39.5、74.3 μg/L,说明UV和H₂O₂单独前处理丙氨酸对二氯乙腈生成的影响不明显,但经UV/H₂O₂高级氧化工艺前处理丙氨酸后二氯乙腈的生成量显著增加,可能是由于自由基作用导致丙氨酸降解生成中间产物从而增加

了其氯化能力,最终强化了二氯乙腈的生成^[3]。

2.2 二氯乙腈的生成机理

针对UV/H₂O₂氧化丙氨酸对后氯化中二氯乙腈的强化生成现象,采用自由基检测、淬灭实验、气相质谱检测,结合前线轨道理论研究二氯乙腈的强化生成机理。利用电子自旋共振波谱检测技术,以DMPO为自由基捕获剂,H₂O₂氧化过程中未检出自由基,但UV/H₂O₂氧化过程中出现1:2:2:1峰,对应·OH的产生^[10]。由于叔丁醇能以(3.8~7.6)×10⁸ L/(mol·s)的二级反应速率与·OH反应^[11],采用200 mmol/L叔丁醇淬灭UV/H₂O₂反应中的·OH,研究了二氯乙腈的生成情况。叔丁醇淬灭·OH后二氯乙腈的生成量为43.4 μg/L,相较于不添加淬灭剂时的二氯乙腈生成量(74.3 μg/L)受到显著抑制,与单独氯化丙氨酸产生的二氯乙腈量(41.6 μg/L)相当,说明UV/H₂O₂氧化过程中产生的·OH诱导了丙氨酸产生中间产物,从而导致二氯乙腈生成量的增加。

为研究丙氨酸经UV/H₂O₂氧化生成的产物对后氯化中二氯乙腈生成的影响,采用气相质谱测定丙氨酸的降解产物,总离子色谱图见图2。出峰时间为5.976 min的物质是丙氨酸,另外检出3种主要产物,出峰时间分别为6.093、6.464和7.311 min,结构式依次为HN=C(CH₃)-COOH、CH₃-CH=NH和CH₃-C≡N,这与氨基酸经氯化后生成二氯乙腈的路径产物结构较为相似(见图3)^[12-13]。

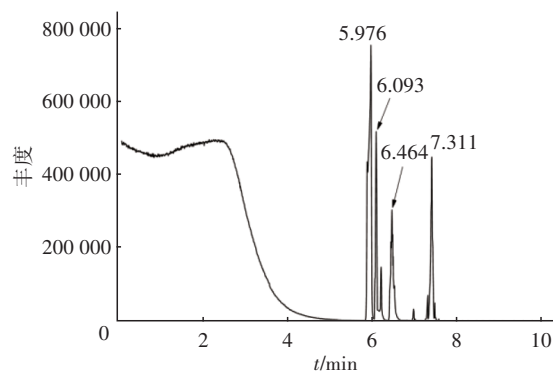


图2 总离子色谱图

Fig.2 Total ion chromatogram

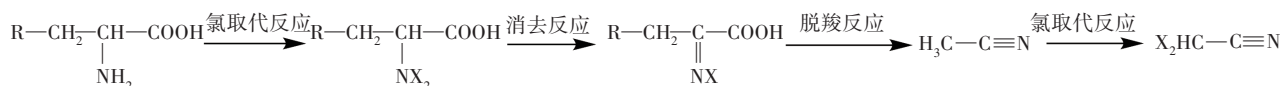


图3 氨基酸氯化生成二卤代腈的转化途径

Fig.3 Transformation pathways of amino acids chlorination to form dhalonitrile

3种主要产物的峰面积随UV/H₂O₂处理时间的变化如图4所示。随着反应时间从0增至20 min,3

种主要产物的含量均逐步升高,而随着反应时间进一步延长至30 min,3种主要产物的含量均缓慢降

低,说明UV/H₂O₂对丙氨酸氧化处理20 min时3种主要产物生成二氯乙腈的潜力最大。

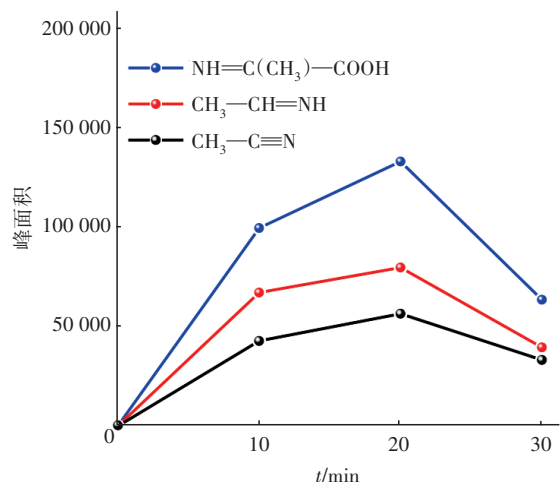


图4 主要产物的峰面积变化曲线

Fig.4 Evolution profiles of major products with reaction time

进一步利用密度泛函理论验证丙氨酸经 $\cdot\text{OH}$ 氧化生成 $\text{HN}=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{COOH}$ 、 $\text{CH}_3-\text{CH}=\text{NH}$ 和 $\text{CH}_3-\text{C}\equiv\text{N}$,随后经氯化反应生成二氯乙腈的能量可行性。据研究报道, $\cdot\text{OH}$ 主要以抽氢氧化方式降解丙氨酸, α 碳氢抽取产生 $\text{H}_2\text{NC}^+(\text{CH}_3)-\text{COOH}$ 瞬间转变为 $\text{HN}=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{COOH}$, β 碳氢抽取产生 $\text{H}_2\text{NCH}(\text{CH}_2)^+-\text{COOH}$ 瞬间脱羧为 $\text{H}_2\text{NCH}=\text{CH}_2$,氨基抽氢产生 $^+\text{NHCH}(\text{CH}_3)-\text{COOH}$ 瞬间脱羧转变为 $\text{HN}=\text{CH}-\text{CH}_3$ 和 $\text{CH}_3-\text{C}\equiv\text{N}$ ^[14]。由于从化学角度上 $\text{H}_2\text{NCH}=\text{CH}_2$ 不可能是二氯乙腈的前体物(二氯乙腈无碳碳双键),因此, β 碳氢抽取反应在此不作讨论。如图5(a)所示, $\cdot\text{OH}$ 对丙氨酸进行 α 碳氢抽取的活化能垒($\Delta^\ddagger G$)为40.25 kJ/mol, α 碳氢抽取反应、脱羧反应及氯取代反应的相对能变(反应焓变)均小于0,说明了丙氨酸经 $\cdot\text{OH}$ 氧化 α 碳氢抽取生成 $\text{HN}=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{COOH}$ 、 $\text{HN}=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{COOH}$ 脱羧生成 $\text{CH}_3-\text{C}\equiv\text{N}$ 以及 $\text{CH}_3-\text{C}\equiv\text{N}$ 氯取代生成二氯乙腈的反应历程的能量可行性;图5(b)是 $\cdot\text{OH}$ 对丙氨酸进行氨基氢抽取的反应, $\Delta^\ddagger G$ 为16.51 kJ/mol,与 α 碳氢抽取最终生成二氯乙腈的反应情形类似,氨基抽氢至最终生成二氯乙腈的每步反应的焓变也均小于0,说明了丙氨酸经 $\cdot\text{OH}$ 氧化氨基氢抽取和脱羧生成 $\text{CH}_3-\text{CH}=\text{NH}$ 、 $\text{CH}_3-\text{CH}=\text{NH}$ 消去生成 $\text{CH}_3-\text{C}\equiv\text{N}$ 以及 $\text{CH}_3-\text{C}\equiv\text{N}$ 氯取代生成二氯乙腈的反应历程的能量可行性。

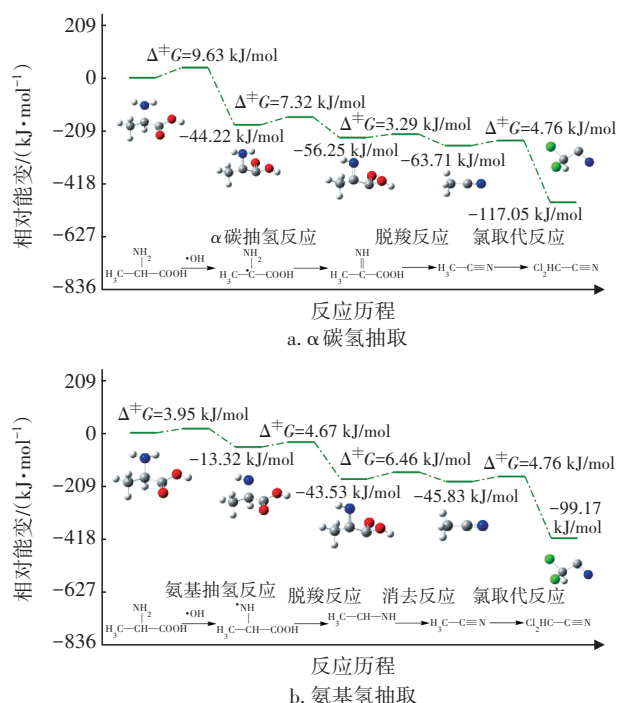


图5 丙氨酸至二氯乙腈的反应历程的吉布斯自由能变

Fig.5 Gibbs free energy change of reaction mechanism from alanine to dichloroacetonitrile

2.3 二氯乙腈生成的影响因素

2.3.1 UV/H₂O₂氧化时间的影响

控制丙氨酸初始浓度为3 mg/L、pH为7、H₂O₂浓度为200 $\mu\text{mol/L}$,研究UV/H₂O₂氧化时间(10、20、30 min)对后氯化过程中二氯乙腈生成的影响。结果显示,随着UV/H₂O₂氧化时间从10 min延长至20 min,二氯乙腈生成量从61.6 $\mu\text{g/L}$ 升至74.3 $\mu\text{g/L}$,但随着UV/H₂O₂氧化时间进一步延长至30 min,二氯乙腈生成量又降至50.5 $\mu\text{g/L}$ 。二氯乙腈生成量随UV/H₂O₂氧化时间的变化趋势与上述丙氨酸的3种降解产物的变化趋势一致,当UV/H₂O₂氧化时间在20 min内时,3种主要产物逐渐积累从而强化了二氯乙腈的生成;当UV/H₂O₂氧化时间超过20 min后,3种主要产物会被进一步降解和矿化而生成醛和氨等^[14],进而导致二氯乙腈生成量的降低。

2.3.2 丙氨酸浓度的影响

控制UV/H₂O₂氧化时间为20 min、pH为7、H₂O₂浓度为200 $\mu\text{mol/L}$,研究丙氨酸初始浓度(1、3和5 mg/L)对后氯化过程中二氯乙腈生成的影响。结果显示,随着丙氨酸初始浓度从1 mg/L升至5 mg/L,二氯乙腈的生成量从22.4 $\mu\text{g/L}$ 急剧增至93.7 $\mu\text{g/L}$,这是由于丙氨酸含量的升高引发了主要降解产物

的增多,进而增加了二氯乙腈的生成量。

2.3.3 pH的影响

由于自然水体的pH一般在5~9范围内,因此,控制UV/H₂O₂氧化时间为20 min、H₂O₂浓度为200 μmol/L、丙氨酸初始浓度为3 mg/L,研究pH(5、6、7、8、9)对后氯化过程中二氯乙腈生成的影响。当pH从5升至7时,二氯乙腈生成量从81.2 μg/L缓慢降至74.3 μg/L,但当pH继续升至9时,二氯乙腈生成量急剧降至32.8 μg/L。在酸性条件下,溶液中的H₂O₂分子非常稳定,所以当UV活化H₂O₂时产生的·OH量较稳定,因而二氯乙腈的生成量变化不明显;在碱性环境下,H₂O₂在紫外线的照射下易分解,因而产生·OH的速率受到抑制^[15],此外,H₂O₂的分解会产生非活性的过氧化氢阴离子(HO₂⁻),HO₂⁻同时也会快速淬灭·OH^[16],最终导致丙氨酸降解中间产物的减少,降低二氯乙腈生成量。另一方面,氯化过程中,HClO的酸度系数(pKa)为7.26,当pH<7时HClO占主导,当pH>7时ClO⁻占主导,HClO的氧化性强于ClO⁻,所以碱性条件抑制了氯化过程中二氯乙腈的生成^[3]。同时,碱性条件下二氯乙腈容易水解^[17],这也加剧了碱性条件下二氯乙腈含量的下降。

2.3.4 水基质的影响

水中通常含有HCO₃⁻、Cl⁻、NO₃⁻等基质成分,因此,控制UV/H₂O₂氧化时间为20 min、H₂O₂浓度为200 μmol/L、pH为7、丙氨酸初始浓度为3 mg/L,研究HCO₃⁻、Cl⁻、NO₃⁻分别存在的条件下(浓度均为1 mmol/L)对后氯化过程中二氯乙腈生成的影响。结果表明,在分别存在HCO₃⁻、Cl⁻和NO₃⁻的条件下,二氯乙腈生成量分别降低了34.8%、15.6%和4.7%。当体系中存在HCO₃⁻时,由于其水解将形成HCO₃⁻和CO₃²⁻共存的混合体系,HCO₃⁻和CO₃²⁻都会竞争·OH^[18],导致丙氨酸的降解及其主要产物的生成受到抑制,从而降低二氯乙腈的生成量;当存在Cl⁻时,Cl⁻和·OH反应会生成弱氧化性的ClOH[·]、HClOH[·]、Cl⁻、Cl₂[·]等自由基,有研究报道称,Cl⁻与·OH反应的主要产物为Cl₂[·],而Cl₂[·]的氧化还原电位($E_0=1.36$ V)显著低于·OH的氧化还原电位($E_0=2.8$ V),因此,Cl⁻主要通过·OH反应生成较弱的氧化自由基而减慢丙氨酸的降解或降低其主要降解产物的生成速率,最终减少二氯乙腈的生成量;当存在NO₃⁻时,NO₃⁻首先在紫外照射下迅速转变为NO₂⁻、亚硝酸根

自由基(NO₂[·])和氧原子自由基(O⁻),一方面O⁻与水反应形成·OH,另一方面NO₂⁻会淬灭·OH^[19],导致·OH处于动态平衡中,因而对丙氨酸的降解转化影响较小,进而对二氯乙腈生成量的影响较小。

3 结论

① UV/H₂O₂高级氧化工艺产生的·OH对丙氨酸进行α碳氢抽取和氨基氢抽取反应,主要生成3种产物:HN=C(CH₃)—COOH、CH₃—CH=NH和CH₃—C≡N,这3种产物在后续的氯化过程中会强化二氯乙腈的生成。

② 随着UV/H₂O₂氧化丙氨酸的时间从0增至30 min,二氯乙腈的生成潜能先升高后降低;随着丙氨酸浓度从1 mg/L增至5 mg/L,二氯乙腈的生成潜能一直升高;随着pH从5增至9,二氯乙腈的生成潜能先基本不变后急剧下降;水基质成分如HCO₃⁻和Cl⁻的存在会抑制二氯乙腈的生成,而NO₃⁻的存在对二氯乙腈的生成无明显影响。

③ 采用UV/H₂O₂高级氧化工艺处理含氨基酸的水体时,后氯化产生二氯乙腈等消毒副产物的风险值得关注。

参考文献:

- [1] LIN T, CHEN H, DING S X, *et al.* The fates of aromatic protein and soluble microbial product-like organics, as the precursors of dichloroacetone nitrile and dichloroacetamide, in drinking water advanced treatment processes [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2019, 5(8): 1478–1488.
- [2] BROSILLON S, LEMASLE M, RENAULT E, *et al.* Analysis and occurrence of odorous disinfection by-products from chlorination of amino acids in three different drinking water treatment plants and corresponding distribution networks [J]. *Chemosphere*, 2009, 77(8): 1035–1042.
- [3] 周石庆, 伍洋涛, 卜令君, 等. 丙氨酸在紫外/氯工艺中生成挥发性DBPs的潜能[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(12): 138–143.
ZHOU Shiqing, WU Yangtao, BU Lingjun, *et al.* Formation potentials of volatile disinfection byproducts from alanine during UV/chlorine process [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(12): 138–143 (in Chinese).
- [4] 杜振齐, 王永磊, 田立平, 等. UV/H₂O₂工艺降解饮用

- 水中有机微污染物研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2019, 34(4): 50-57.
- DU Zhenqi, WANG Yonglei, TIAN Liping, *et al.* Research process of degradation of organic micro-pollutants in drinking water by UV/H₂O₂ process [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2019, 34 (4): 50-57 (in Chinese).
- [5] DING S, WANG F, CHU W, *et al.* Using UV/H₂O₂ pre-oxidation combined with an optimised disinfection scenario to control CX3R-type disinfection by-product formation[J]. Water Research, 2019, 167: 115096.
- [6] ZHANG A, WANG F, CHU W, *et al.* Integrated control of CX₃R-type DBP formation by coupling thermally activated persulfate pre-oxidation and chloramination [J]. Water Research, 2019, 160: 304-312.
- [7] ADAMIEC J, ROSSNER J, VERLISEK J, *et al.* Minor strecker degradation products of phenylalanine and phenylglycine [J]. European Food Research and Technology, 2001, 212(2): 135-140.
- [8] LUO S, WEI Z S, DIONYSIOU D D, *et al.* Mechanistic insight into reactivity of sulfate radical with aromatic contaminants through single-electron transfer pathway [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 327: 1056-1065.
- [9] GUO K H, ZHENG S S, ZHANG X W, *et al.* Roles of bromine radicals and hydroxyl radicals in the degradation of micropollutants by the UV/bromine process [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(10): 6415-6426.
- [10] DING M M, CHEN W, XU H, *et al.* Novel α -Fe₂O₃/MXene nanocomposite as heterogeneous activator of peroxymonosulfate for the degradation of salicylic acid [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 382: 121064.
- [11] LING L, ZHANG D, FAN C, *et al.* A Fe(II)/citrate/UV/PMS process for carbamazepine degradation at a very low Fe(II)/PMS ratio and neutral pH: the mechanisms [J]. Water Research, 2017, 124: 446-453.
- [12] CHU W H, GAO N Y, DENG Y, *et al.* Precursors of dichloroacetamide, an emerging nitrogenous DBP formed during chlorination or chloramination [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(10): 3908-3912.
- [13] JIA A, WU C, DUAN Y. Precursors and factors affecting formation of haloacetonitriles and chloropicrin during chlor(am)ination of nitrogenous organic compounds in drinking water [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 308: 411-418.
- [14] YING L W, LIU Y, DONG W B, *et al.* Effect of bromide ions on the UV/H₂O₂ oxidation of alanine in aqueous solutions [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 285: 172-179.
- [15] ALEBOYEH A, MOUSSA Y, ALEBOYEH H. The effect of operational parameters on UV/H₂O₂ decolourisation of acid blue 74[J]. Dyes and Pigments, 2005, 66(2): 129-134.
- [16] JIRAROJ D, UNOB F, HAGEGE A. Degradation of Pb-EDTA complex by a H₂O₂/UV process [J]. Water Research, 2006, 40(1): 107-112.
- [17] GAO J N, PROULX F, RODRIGUEZ M J. Synergistic effects of quenching agents and pH on the stability of regulated and unregulated disinfection by-products for drinking water quality monitoring [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(2): 143.
- [18] 岳思阳, 张爱红, 谢鹏超, 等. 紫外/PS、紫外/H₂O₂降解2-MIB和土臭素对比[J]. 中国给水排水, 2016, 32(19): 6-9.
- YUE Siyang, ZHANG Aihong, XIE Pengchao, *et al.* Comparative study on UV/persulfate and UV/hydrogen peroxide for degradation of 2-MIB and geosmin [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(19): 6-9 (in Chinese).
- [19] KEEN O S, LOVE N G, LINDEN K G. The role of effluent nitrate in trace organic chemical oxidation during UV disinfection [J]. Water Research, 2012, 46(16): 5224-5234.

作者简介:周冰洁(1992-),女,江苏南京人,本科,工程师,主要从事市政及建筑给排水工程等方面的设计与应用工作。

E-mail:zbj1512305211@163.com

收稿日期:2021-04-29

修回日期:2021-05-25

(编辑:刘贵春)