

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.05.005

紫外/氯胺工艺中含氮消毒副产物的生成机制解析

张欣然^{1,2,3}, 董双石¹, 翟家欣⁴, 任鹏飞⁵

(1. 吉林大学 地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130021; 2. 中山大学 环境科学与工程学院, 广东 广州 510275; 3. 中山大学深圳研究院, 广东 深圳 518000; 4. 广州市环境保护科学研究院, 广东 广州 510620; 5. 广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510001)

摘要: 针对紫外/氯胺工艺在水处理过程中存在的高毒性含氮消毒副产物生成风险,考察了典型含氮消毒副产物二氯乙腈的生成行为和机制,并提出了控制策略。结果表明,相比单独氯胺体系,紫外/氯胺体系可使3种氨基酸的二氯乙腈生成量下降26.6%~46.7%,但会显著促进15种酚类物质的二氯乙腈生成势;两种工艺中3种腐殖质的二氯乙腈生成量基本相当。氮同位素(¹⁵N)溯源分析表明,紫外/氯胺体系处理氨基酸时生成的¹⁵N-二氯乙腈占总二氯乙腈的70%以上,说明氯胺是二氯乙腈的重要氮源,而非水中含氮有机质;并证明了紫外/氯胺体系中的二氯乙腈主要通过“醛途径”生成。以酪氨酸为例,鉴定得到了一系列醛类和腈类中间产物,进而解析了紫外/氯胺体系中二氯乙腈的生成路径。在紫外/氯胺工艺的实际工程应用中,建议对酚含量较高的水体进行预处理,并尽量延长紫外/氯胺处理时间、缩短后氯胺接触时间、调节pH为碱性条件,以减少二氯乙腈的生成。

关键词: 紫外/氯胺工艺; 含氮消毒副产物; 氮同位素示踪; 二氯乙腈

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)05-0031-07

Formation Mechanisms of Nitrogenous Disinfection By-products in UV/Chloramine Process

ZHANG Xin-ran^{1,2,3}, DONG Shuang-shi¹, ZHAI Jia-xin⁴, REN Peng-fei⁵

(1. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment <Ministry of Education>, Jilin University, Changchun 130021, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Shenzhen Research Institute of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518000, China; 4. Guangzhou Research Institute of Environmental Protection, Guangzhou 510620, China; 5. Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute, Guangzhou 510001, China)

Abstract: In view of the high toxicity of nitrogenous disinfection by-products in UV/chloramine process, the formation behavior and mechanism of dichloroacetonitrile (a typical nitrogenous disinfection by-product) was investigated, and the control strategy was proposed. Compared with chloramine system, the UV/chloramine system reduced the dichloroacetonitrile production of three amino acids by 26.6%–

基金项目: 深圳市科技计划项目(JCYJ20210324140812034); 国家自然科学基金资助项目(51808156); 地下水资源与环境教育部重点实验室开放课题(202005005KF); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2019A1515011664); 中央高校基本科研业务费专项(20lgzd22)

通信作者: 任鹏飞 E-mail: pengfeiren84@163.com

46.7%, but significantly promoted the dichloroacetonitrile production of fifteen phenolic substances. The dichloroacetonitrile production of three humic substances in the two processes was basically the same. The nitrogen isotope (^{15}N) tracing showed that the ^{15}N -dichloroacetonitrile formed in the UV/chloramine system accounted for more than 70% of the total dichloroacetonitrile during the treatment of three amino acids, indicating that chloramine was an important precursor of dichloroacetonitrile, rather than nitrogenous organics in water. The results also proved that dichloroacetonitrile in the UV/chloramine system was mainly produced through the “aldehyde pathway”. A series of aldehyde and nitrile intermediates were identified by using tyrosine as a representative compound, and then the formation pathway of dichloroacetonitrile in UV/chloramine system was analyzed. In the practical engineering application of UV/chloramine process, it is recommended to pretreat the water with high phenol content, prolong the reaction time as far as possible, shorten the contact time of post-chloramination and adjust the pH to alkaline condition, so as to reduce the formation of dichloroacetonitrile.

Key words: UV/chloramine process; nitrogenous disinfection by-product; nitrogen isotope tracer; dichloroacetonitrile

紫外/氯胺工艺是一种新型高级氧化技术,已在多种水处理情境中得到应用^[1]。例如,紫外/氯胺工艺能有效降解有机微污染物(扑热氢醇、四环素、三氯生和布洛芬等)^[2-4];另外,紫外/氯胺工艺也会被用来处理含氮水体^[5]和游泳池水^[6]等。同时,紫外/氯胺联合消毒是一种重要的多屏障消毒方法^[7]。在紫外/氯胺工艺中氯胺光解会产生羟基自由基、氯自由基和含氮自由基。由于紫外/氯胺工艺能有效降解和去除水中化学污染物和微生物,其在水处理中受到越来越多的关注。

然而,紫外/氯胺工艺具有生成毒性消毒副产物的风险,威胁生态环境和人类健康^[8-9]。如何控制消毒副产物的生成,成为饮用水安全保障领域的研究重点和难点^[10-11]。前期研究发现,氯胺消毒会生成高毒性含氮消毒副产物,如卤乙腈、卤代乙酰胺和卤代硝基甲烷等^[12]。其中,卤乙腈是最为常见的含氮消毒副产物,其细胞毒性和基因毒性比三卤甲烷和卤乙酸等常规消毒副产物高1~2个数量级^[13]。二氯乙腈(DCAN)占卤乙腈总量的50%以上,在饮用水中的检出率高,已受到广泛关注。氨基酸是重要的二氯乙腈前体物,包括天冬氨酸、色氨酸、丙氨酸和天冬酰胺等^[14]。同时,腐殖质在水体中含量高且成分复杂,是潜在的二氯乙腈前体物。但是,现有研究主要集中在氯(胺)消毒中的二氯乙腈生成行为方面,对紫外/氯胺工艺中的二氯乙腈生成情况知之甚少。在自由基和紫外辐照的双重作用下,紫外/

氯胺工艺中二氯乙腈的生成规律与传统氯胺消毒存在显著差异。

考虑到紫外/氯胺工艺的应用潜力,研究紫外/氯胺工艺及其后氯胺化过程中二氯乙腈的生成行为和控制策略至关重要。为此,笔者进行了以下研究:①以氨基酸、腐殖质和酚类化合物为研究对象,比较单独氯胺和紫外/氯胺及其后氯胺化工艺中的二氯乙腈生成规律;②利用氮同位素示踪法,追溯紫外/氯胺工艺中二氯乙腈的氮来源;③揭示紫外/氯胺及其后氯胺化过程中二氯乙腈的生成路径;④提出紫外/氯胺工艺中二氯乙腈生成的控制策略。

1 材料与方法

1.1 试验材料

次氯酸钠、氯化铵购自西格玛公司;3种氨基酸(天冬酰胺、天冬氨酸、酪氨酸)和15种酚类物质购自百灵威公司;天然有机物(SRNOM、UMNOM和PLFA)购自国际腐殖质协会;二氯乙腈标准品、内标物1,2-二溴丙烷、萃取剂叔丁基甲基醚购自美国Supelco公司;其他试剂均购自阿拉丁公司。

一氯胺溶液的制备方法:按照氯和氮的物质的量之比为1:1.03的比例将次氯酸钠溶液滴入到 ^{15}N 标记的氯化铵溶液中,用磁力搅拌器搅拌30 min。反应后溶液中的自由氯浓度低于检测限,则证明自由氯全部转化为一氯胺。一氯胺溶液现配现用。

1.2 试验装置与方法

试验装置如图1所示,单色紫外低压汞灯波长

为 254 nm, 辐射强度为 2.56×10^{-7} Einstein/(L·s)。紫外光装置下方正中间放置石英反应器(直径为 7 cm, 容积为 100 mL), 石英反应器置于磁力搅拌器上。采用碘化物-碘酸盐法测得溶液中的平均辐照通量为 0.33 mW/cm^2 。紫外辐照 5、10、20 和 30 min, 相应的紫外剂量分别为 99、198、396 和 594 mJ/cm^2 。试验水样中含有一定浓度的氨基酸(0.1 mmol/L)、腐殖质(10 mg/L , 以碳计)或酚类化合物(0.1 mmol/L)。反应前用稀硫酸或氢氧化钠调节溶液 pH 为 7.5, 部分试验将 pH 调整到 6.5 和 8.5, 试验水样中没有加入 pH 缓冲液, 反应前后的 pH 变化较小。紫外/氯胺试验中, 将一氯胺加入溶液中同时进行紫外辐照, 并利用磁力搅拌器使溶液混合均匀。对于单独氯胺试验, 则关闭紫外汞灯, 并保持其他操作过程不变。本研究中的氯胺投加量略高于实际消毒工艺, 以确保整个紫外/氯胺和后氯胺化反应体系的氯胺浓度充足, 体现二氯乙腈的总体生成趋势。后氯胺化过程不进行额外补氯, 样品在常温(22°C)避光处放置 0~24 h。样品用抗坏血酸淬灭余氯, 萃取后测定二氯乙腈浓度。每项试验均进行两次, 取两次的平均值作为试验结果。

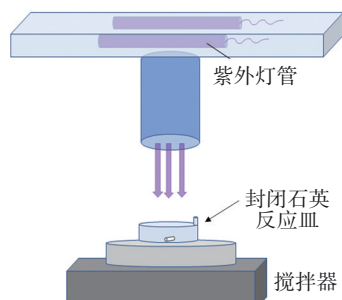


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematics of experimental apparatus

1.3 样品检测方法

自由氯浓度采用哈希余氯仪测定; 一氯胺储备液浓度采用可见-紫外分光光度法标定, 一氯胺在 245 nm 波长处的摩尔吸光系数为 $445 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$; 二氯乙腈浓度采用气相色谱质谱联用仪(GC-MS, 7890A, Agilent)测定, 并配备 Agilent DB-1701 ($30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm}$) 分离柱, 载气为氮气, 二氯乙腈的检测限为 $0.2 \mu\text{g/L}$; 在氮源调查中, 氮 14-二氯乙腈(^{14}N -DCAN)和氮 15-二氯乙腈(^{15}N -DCAN)通过检测离子碎片 m/z 74 和 m/z 75 区分, 根据特征碎片的峰面积和标准曲线确定 ^{14}N -DCAN 和 ^{15}N -DCAN 浓度^[15]。

2 结果与讨论

2.1 紫外/氯胺体系中二氯乙腈的生成情况

2.1.1 氨基酸的二氯乙腈生成及氮溯源

3 种典型氨基酸在单独氯胺和紫外/氯胺体系中的二氯乙腈生成情况如图 2 所示。

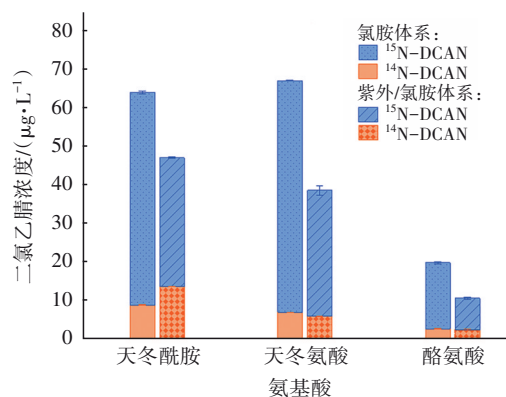


图2 3种典型氨基酸在单独氯胺和紫外/氯胺体系中的二氯乙腈生成情况

Fig.2 Formation of DCAN from three amino acids in chloramine system and UV/chloramine system

氨基酸初始浓度为 0.1 mmol/L , 一氯胺投加量为 1 mmol/L (以 Cl_2 计, 下同), pH 为 7.5, 单独氯胺或紫外/氯胺处理 30 min 后进行 24 h 后氯胺化处理。单独氯胺和紫外/氯胺处理 30 min 后, 氯胺浓度分别为 67.5 和 49.7 mg/L (以 Cl_2 计, 下同); 且氨基酸前体物未完全降解, 去除率为 28%~57%。后氯胺化反应 24 h 后天冬酰胺和天冬氨酸的二氯乙腈生成量相近, 分别为 63.9 和 $66.9 \mu\text{g/L}$; 相比之下, 酪氨酸的二氯乙腈生成量较低 ($19.7 \mu\text{g/L}$), 说明含芳香环氨基酸的二氯乙腈生成量小于脂肪型氨基酸。在紫外/氯胺体系中, 天冬酰胺、天冬氨酸和酪氨酸的二氯乙腈生成量分别为 46.9、38.5 和 $10.5 \mu\text{g/L}$, 可见二氯乙腈生成量与氨基酸分子结构有关, 天冬酰胺含有两个氨基酸基团, 其二氯乙腈生成量最高, 天冬氨酸和酪氨酸均含有一个氨基酸基团, 但脂肪族天冬氨酸的二氯乙腈生成量高于含芳香环的酪氨酸。与单独氯胺体系相比, 紫外/氯胺体系中天冬酰胺、天冬氨酸和酪氨酸的二氯乙腈生成量分别下降了 26.6%、42.5% 和 46.7%, 说明两种体系的二氯乙腈生成路径不同, 紫外/氯胺降解氨基酸后生成的二氯乙腈前体物较少, 使得后氯胺化过程中二氯乙腈的生成量下降。同时, 氨基酸在单独氯胺和紫外/氯胺处理中也会生成其他含氮消毒副产物。例如,

单独氯胺体系中3种氨基酸的三氯硝基甲烷生成量差异不大(5.8~7.3 $\mu\text{g/L}$),而紫外/氯胺体系中天冬酰胺、天冬氨酸和酪氨酸的三氯硝基甲烷生成量分别为10.4、8.5、1.3 $\mu\text{g/L}$ 。3种氨基酸的三氯硝基甲烷生成量显著低于二氯乙腈生成量。

利用氮同位素示踪法,进一步追溯二氯乙腈的氮来源,如图2所示。其中, ^{15}N -DCAN表示二氯乙腈的氮元素源自一氯胺,通过一氯胺与醛类中间产物生成,称为“醛途径”^[16]。在单独氯胺和紫外/氯胺体系中 ^{15}N -DCAN占比均大于70%,且单独氯胺体系中 ^{15}N -DCAN的占比(86.3%~89.7%)略高于紫外/氯胺体系(71.0%~84.9%)。可见,氨基酸生成二氯乙腈主要通过“醛途径”,紫外/氯胺工艺抑制二氯乙腈生成主要是抑制“醛途径”的二氯乙腈生成。

2.1.2 天然有机质的二氯乙腈生成及氮溯源

3种典型腐殖质(SRNOM、UMNOM和PLFA)在单独氯胺和紫外/氯胺体系中的二氯乙腈生成情况及二氯乙腈中氮的来源如图3所示。一氯胺投加量为0.4 mmol/L, pH为7.5,单独氯胺或紫外/氯胺处理30 min后进行24 h后氯胺化处理。

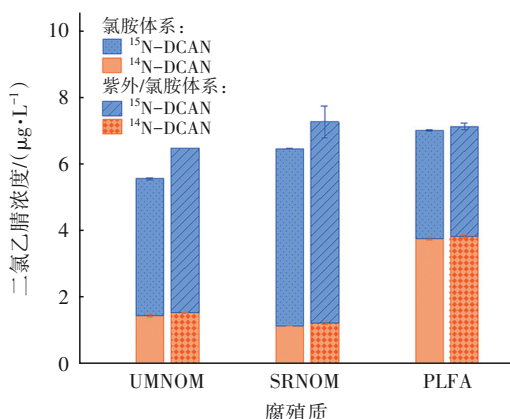


图3 典型腐殖质在单独氯胺和紫外/氯胺体系中的二氯乙腈生成情况

Fig.3 Formation of DCAN from humic substances in chloramine system and UV/chloramine system

单独氯胺和紫外/氯胺处理30 min后,氯胺浓度分别为21.4、28.0 mg/L。3种腐殖质在单独氯胺体系中的二氯乙腈生成量为5.6~7.0 $\mu\text{g/L}$;相比之下,3种腐殖质在紫外/氯胺体系中的二氯乙腈生成量略有升高,为6.5~7.3 $\mu\text{g/L}$,增长率在1.7%~16.5%之间,说明紫外/氯胺体系在一定程度上促进了腐殖酸的二氯乙腈生成。需要说明的是,紫外/氯胺处理

30 min后并未检测到二氯乙腈,因此紫外/氯胺反应过程中主要生成二氯乙腈前体物,这些前体物在后氯胺化阶段生成二氯乙腈。单独氯胺和紫外/氯胺体系中二氯乙腈的氮源占比情况基本相同。以紫外/氯胺体系为例,UMNOM和SRNOM生成的二氯乙腈均以 ^{15}N -DCAN为主(76.3%和83.2%),而PLFA生成的二氯乙腈中 ^{15}N -DCAN仅占46.3%。这些结果说明,UMNOM和SRNOM主要通过“醛途径”生成二氯乙腈,而PLFA则通过“脱羧途径”和“醛途径”两种途径共同生成二氯乙腈。Yang等^[14]发现 ^{15}N -DCAN在二氯乙腈总量中的占比与腐殖质的总有机碳/总有机氮(DOC/DON)比值呈正相关性,本试验结果也符合上述规律。

2.1.3 酚类物质的二氯乙腈生成情况

进一步选取15种典型酚类物质,对比单独氯胺和紫外/氯胺工艺的二氯乙腈生成情况,如图4所示。酚类物质的初始浓度为0.1 mmol/L,一氯胺投加量为1 mmol/L, pH为7.5,单独氯胺或紫外/氯胺处理30 min后进行24 h后氯胺化处理。除氨基苯酚外,其他酚类物质均不含氮元素,因为未进行氮同位素标记,二氯乙腈中的氮均源自氯胺。

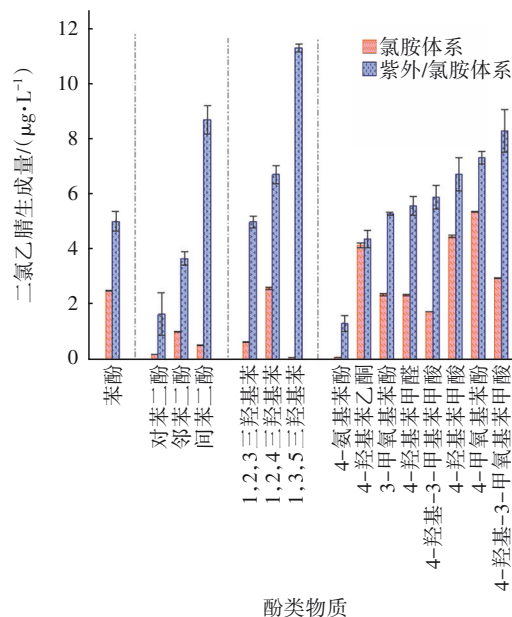


图4 典型酚类物质在单独氯胺和紫外/氯胺体系中的二氯乙腈生成情况

Fig.4 Formation of DCAN from typical phenolics in chloramine system and UV/chloramine system

酚类前体物在紫外/氯胺处理30 min后均未完全降解,其去除率为19%~85%。紫外/氯胺体系中

酚类物质的二氯乙腈生成量差异较大,在1.3~11.3 $\mu\text{g/L}$ 之间。值得注意的是,紫外/氯胺体系的二氯乙腈生成量显著高于单独氯胺体系,增长幅度为5.35%~1570.4%。紫外/氯胺体系对不同酚类化合物的二氯乙腈生成量影响与取代基位置有显著关系,含有间位取代基(如间苯二酚、1,3,5-三羟基苯等)的酚类物质的二氯乙腈生成量最高。另外,取代基带电基团(如吸电子基团、供电子基团)也会对紫外/氯胺体系中二氯乙腈的生成产生一定影响,这里不进行细致分析。同样,紫外/氯胺体系也促进了酚类物质生成三氯硝基甲烷。相比单独氯胺体系,紫外/氯胺体系的三氯硝基甲烷生成量增加了1.27~14.8倍^[16]。总体而言,紫外/氯胺体系显著促进了酚类物质的二氯乙腈生成势,酚类物质是极其重要的二氯乙腈前体物,其有效去除将有助于控制二氯乙腈的生成。

2.2 紫外/氯胺体系中二氯乙腈的生成路径

由于氨基酸和酚类物质均为二氯乙腈的前体物质,选取带有酚类官能团和氨基酸官能团的酪氨酸为模型物质,研究紫外/氯胺体系中二氯乙腈的生成路径及机制。二氯乙腈的生成主要有“脱羧途径”和“醛途径”两种^[16]。“脱羧途径”中氯胺分子上的氯取代氨基上的氢,生成氯代氨基酸,随后发生脱氯和脱羧反应生成碳氮双键化合物($\text{R}-\text{CH}=\text{NH}$ 或 $\text{R}-\text{CH}=\text{NCl}$),再转化为二氯乙腈。“脱羧途径”中二氯乙腈的氮来源于含氮前体物。碳氮双键化合物进一步水解生成醛类物质($\text{R}-\text{CHO}$),醛类物质与氯胺反应生成腈类中间体,然后转化为二氯乙腈。不含氮有机物可通过“醛途径”生成二氯乙腈。利用高效气相色谱-质谱/质谱分析仪,初步鉴定出了两种醛类中间产物 TP-136 ($\text{C}_8\text{H}_8\text{O}_2$) 和 TP-122 ($\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_2$) 以及两种腈类中间产物 TP-133 ($\text{C}_8\text{H}_7\text{NO}$) 和 TP-167 ($\text{C}_8\text{H}_6\text{ClNO}$),进而推演出二氯乙腈的生成路径,如图5所示。酪氨酸氨基上的氢原子首先被氯取代生成一氯代或二氯代氨基酸,在紫外光作用下 N—Cl 键断裂,从而生成 $\text{Cl}\cdot$ 和氨基自由基中间体。 $\text{Cl}\cdot$ 与中间体反应或转化为 $\text{Cl}_2^{\cdot-}$,而氨基自由基中间体通过 1,2-H 转移和 β 断裂转化为以碳为中心的自由基中间产物。这些中间产物进一步转化为亚胺类中间体和醛类中间体,这些中间体在含氮自由基作用下进一步转化为腈类中间体。这些醛类和腈类中间产物在后续氯胺化反应中生成二

氯乙腈。另外,醛类中间产物也可以在硝化剂(含氮自由基)作用下生成硝化酚类中间产物,在后续氯胺化过程中发生开环、水解和氯化反应,最终转化为二氯乙腈^[16]。氮同位素示踪结果显示,¹⁵N-DCAN 占总二氯乙腈的70%以上(见图2),说明二氯乙腈生成的醛类中间产物占主导地位,二氯乙腈主要通过“醛途径”生成。

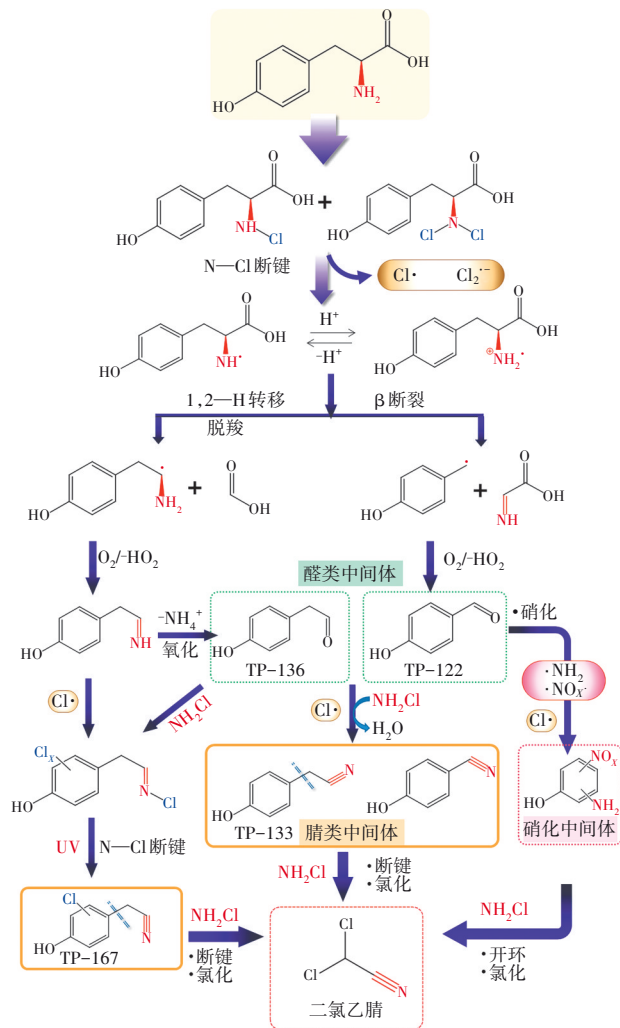


图5 紫外/氯胺体系中酪氨酸生成二氯乙腈的路径

Fig.5 Formation pathways of DCAN from tyrosine in UV/chloramine system

2.3 紫外/氯胺体系中二氯乙腈的控制策略

为了获得适合的二氯乙腈控制策略,进一步开展了工艺条件影响的研究。由于天冬酰胺的二氯乙腈生成量较高,以天冬酰胺为代表性物质开展研究,其初始浓度为0.1 mmol/L,氯胺投加量为1 mmol/L,与前面研究一致。紫外/氯胺处理时间(5~30 min)对二氯乙腈生成势的影响如图6(a)所示,

pH为7.5,后氯胺化时间为24 h。随着紫外/氯胺处理时间从5 min延长至30 min,二氯乙腈生成量从69.2 $\mu\text{g/L}$ 降至46.9 $\mu\text{g/L}$ 。从二氯乙腈的氮来源来看,紫外/氯胺处理时间延长显著降低了 ^{15}N -DCAN的生成量,而对 ^{14}N -DCAN的影响并不明显,说明紫外/氯胺抑制了“醛途径”生成二氯乙腈。为研究后氯胺化时间对二氯乙腈生成的影响,在pH为7.5条件下先采用紫外/氯胺对天冬酰胺处理30 min,然后再氯胺化1~24 h,结果如图6(b)所示。随着后氯胺化时间的延长,二氯乙腈生成量显著增加。后氯胺化1 h时二氯乙腈浓度低于检测限;后氯胺化5 h后,二氯乙腈的生成量随着后氯胺化时间的延长而显著增加。另外, ^{15}N -DCAN在后氯胺化1~2 h已生成,而 ^{14}N -DCAN则在2~5 h后氯胺化阶段生成,再次说明“醛途径”的主导地位。

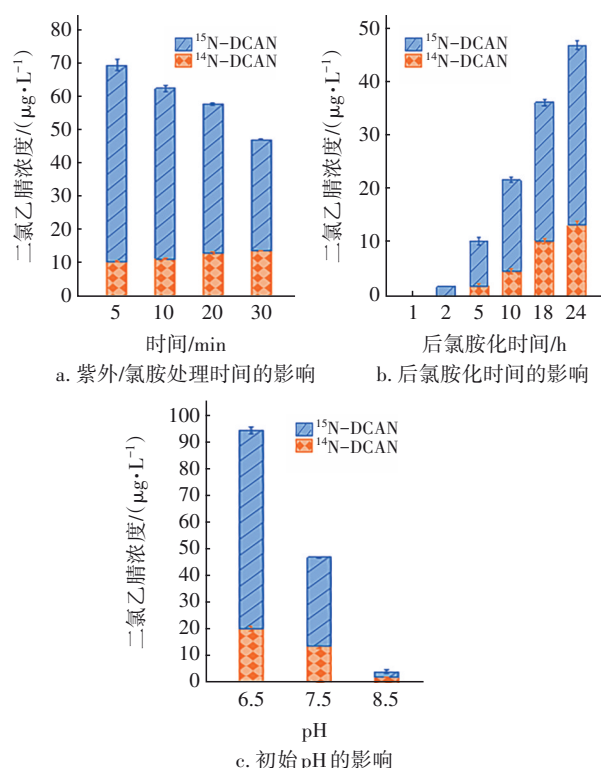


图6 紫外/氯胺工艺中不同参数对天冬酰胺生成二氯乙腈的影响

Fig.6 Effect of different parameters on formation of DCAN from asparagine in UV/chloramine process

图6(c)为初始pH条件对二氯乙腈生成的影响,紫外/氯胺处理30 min、后氯胺化24 h。在pH为6.5条件下二氯乙腈的生成量为94.6 $\mu\text{g/L}$,而在pH为8.5条件下二氯乙腈的生成量仅为4.0 $\mu\text{g/L}$,pH

为6.5时二氯乙腈的生成量比pH为8.0时高出22.6倍。可见pH显著影响紫外/氯胺体系的二氯乙腈生成,提高反应体系的pH能显著抑制紫外/氯胺体系中二氯乙腈的生成。碱性环境抑制二氯乙腈生成的主要原因是,二氯乙腈在碱性环境下发生水解作用,并且碱性环境下一氯胺的光解速率也显著降低,使得自由基量子产率降低,从而抑制了二氯乙腈前体物的生成^[16]。总体来说,延长紫外/氯胺反应时间、缩短后氯胺化时间、调节pH为碱性能降低二氯乙腈的生成量,是较为有效的二氯乙腈控制策略。另外,通过预氧化或活性炭过滤等预处理降低氨基酸和酚类物质等二氯乙腈前体物的浓度水平,也是重要的二氯乙腈控制策略。

3 结论

相比单独氯胺体系,紫外/氯胺体系能降低氨基酸的二氯乙腈生成量,但会促进酚类物质生成二氯乙腈,对于腐殖质类物质的二氯乙腈生成影响不明显。利用氮同位素示踪技术证明,一氯胺是二氯乙腈中氮的重要来源,水中溶解性有机氮对二氯乙腈生成的贡献较少。醛类中间产物是重要的二氯乙腈前体物,紫外/氯胺工艺中二氯乙腈主要通过“醛途径”生成,并提出了二氯乙腈的生成路径。总体而言,紫外/氯胺是一种新型高级氧化工艺,但其自由基产率相对较低,对污染物去除具有一定的选择性。对于富含酚类的水体,采用紫外/氯胺工艺会导致二氯乙腈等消毒副产物生成风险的提升。因此,在紫外/氯胺工艺应用过程中,可采用活性炭吸附、二氧化氯预氧化等预处理方式降低水中酚类物质的浓度水平,并通过延长紫外/氯胺处理时间、降低后氯胺接触时间、调节pH为碱性等方式,降低净水过程中的消毒副产物生成风险。

参考文献:

- [1] 刘汝鹏,郝玉友,罗从伟,等. 紫外/一氯胺降解水中氯霉素的性能与机理研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(9): 51-56.
LIU Rupeng, HAO Yuyou, LUO Congwei, et al. Performance and mechanism of chloramphenicol degradation in aqueous solution by ultraviolet/monochloroamine [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(9): 51-56 (in Chinese).
- [2] WANG P, BU L J, WU Y T, et al. Mechanistic insights

- into paracetamol transformation in UV/NH₂Cl process: experimental and theoretical study [J]. *Water Research*, 2021, 194: 116938.
- [3] SUN P Z, MENG T, WANG Z J, *et al.* Degradation of organic micropollutants in UV/NH₂Cl advanced oxidation process [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(15): 9024–9033.
- [4] WU Z H, CHEN C Y, ZHU B Z, *et al.* Reactive nitrogen species are also involved in the transformation of micropollutants by the UV/monochloramine process [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(19): 11142–11152.
- [5] ZHANG X R, REN P F, LI W G, *et al.* Synergistic removal of ammonium by monochloramine photolysis [J]. *Water Research*, 2019, 152: 226–233.
- [6] YANG Q, GUO Y, XU J, *et al.* Photolysis of N-chlorourea and its effect on urea removal in a combined pre-chlorination and UV₂₅₄ process [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 411: 125111.
- [7] 周大农. 北京市第十水厂处理工艺的选择 [J]. *中国给水排水*, 2015, 31(6): 12–15.
ZHOU Danong. Selection of treatment process in Beijing No. 10 Waterworks [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(6): 12–15 (in Chinese).
- [8] CHEN C Y, DU Y, ZHOU Y J, *et al.* Formation of nitro(so) and chlorinated products and toxicity alteration during the UV/monochloramine treatment of phenol [J]. *Water Research*, 2021, 194: 116914.
- [9] 鲁金凤, 王斌, 廖洋, 等. 水环境中残留抗生素的消毒副产物问题最新研究进展 [J]. *中国给水排水*, 2020, 36(4): 6–12.
LU Jinfeng, WANG Bin, LIAO Yang, *et al.* Latest research progress on the disinfection by-products of residual antibiotics in water environment [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(4): 6–12 (in Chinese).
- [10] 彭嘉栋, 钟宇, 叶挺进, 等. 不同饮用水处理工艺中消毒副产物的生成潜能 [J]. *中国给水排水*, 2020, 36(9): 35–43.
PENG Jiadong, ZHONG Yu, YE Tingjin, *et al.* Disinfection by-products formation potential in different drinking water treatment processes [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(9): 35–43 (in Chinese).
- [11] NIHEMAITI M, LE ROUX J, HOPPE-JONES C, *et al.* Formation of haloacetonitriles, haloacetamides, and nitrogenous heterocyclic byproducts by chloramination of phenolic compounds [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(1): 655–663.
- [12] PLEWA M J, WAGNER E D, JAZWIERSKA P, *et al.* Halonitromethane drinking water disinfection byproducts: chemical characterization and mammalian cell cytotoxicity and genotoxicity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(1): 62–68.
- [13] BOND T, HUANG J, TEMPLETON M R, *et al.* Occurrence and control of nitrogenous disinfection by-products in drinking water—a review [J]. *Water Research*, 2011, 45(15): 4341–4354.
- [14] YANG X, SHANG C, SHEN Q Q, *et al.* Nitrogen origins and the role of ozonation in the formation of haloacetonitriles and halonitromethanes in chlorine water treatment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(23): 12832–12838.
- [15] 翟家欣, 张欣然, 杨欣. 新型含氮消毒副产物的生成机制及毒性研究进展 [J]. *生态毒理学报*, 2020, 15(1): 17–33.
ZHAI Jiaxin, ZHANG Xinran, YANG Xin. Research overview on formation mechanism and toxicity for emerging nitrogenous disinfection byproducts [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, 15(1): 17–33 (in Chinese).
- [16] ZHANG X R, ZHAI J X, LEI Y, *et al.* Enhanced formation of trichloronitromethane precursors during UV/monochloramine treatment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 422: 126813.

作者简介:张欣然(1986–),女,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,主要从事饮用水高级氧化、消毒副产物控制等研究工作。

E-mail:zhangxinr@mail.sysu.edu.cn

收稿日期:2021-08-16

修回日期:2021-10-08

(编辑:刘贵春)