

技术总结

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.03.007

不同离子对 Dinoseb 氯化降解及消毒副产物生成的影响

李 冕^{1,2,3}, 杨 丹¹, 张天阳^{2,3}, 董正玉^{2,3}, 杨 智¹, 文双喜¹

(1. 贵阳学院 生物与环境工程学院, 贵州 贵阳 550005; 2. 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 3. 同济大学 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 以水体中常见的污染物地乐酚(Dinoseb)为研究对象,分析了水中4种不同离子(Br^- 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^-)背景浓度下Dinoseb氯化动力学及生成消毒副产物(DBPs)的情况。结果表明,4种离子对Dinoseb氯化反应的影响顺序为: $\text{Br}^- > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_2^- > \text{NO}_3^-$ 。产生的消毒副产物主要有三氯甲烷(CF)、三氯硝基甲烷(TCNM)、二氯乙腈(DCAN)、三氯丙酮(TCP)、二氯一溴甲烷(DCBM)等,其中TCNM浓度最高,Dinoseb是TCNM的典型前体物。当水中有 Br^- 存在时,Dinoseb降解反应非常复杂,降解速率不符合拟一级反应规律,还会产生大量溴代THMs,如二氯一溴甲烷(DCBM)、一氯二溴甲烷(DBCM)、三溴甲烷(TBM)等,它们的浓度均随着 Br^-/Cl_2 值的增加而迅速增加,浓度高低顺序为: $\text{DCBM} > \text{DBCM} > \text{TBM} > \text{CF}$ 。在相同pH值下,Dinoseb的氯化降解速率随着 Br^- 浓度的增大而增加;在相同 Br^- 浓度下,pH值越低,Dinoseb的氯化反应速率越快。与 Br^- 相比,pH值是更重要的氯化速率影响因素。当水体中有 NH_4^+ 存在时,TCNM产率会提高较多; NO_3^- 对Dinoseb的氯化反应有一定的抑制作用,各DBPs浓度都有降低; NO_2^- 可以被水中的次氯酸氧化成 NO_3^- ,消耗水中部分次氯酸,DBPs浓度总体都会降低。

关键词: 地乐酚; 氯化; 消毒副产物; 离子浓度; 动力学

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)03-0045-07

Effect of Different Ions on Chlorination Degradation of Dinoseb and Formation of Disinfection By-products

LI Mian^{1,2,3}, YANG Dan¹, ZHANG Tian-yang^{2,3}, DONG Zheng-yu^{2,3}, YANG Zhi¹,
WEN Shuang-xi¹

(1. College of Biological and Environmental Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment <Ministry of Education>, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Chlorination kinetics of dinoseb(a common pollutant in water bodies) and disinfection by-products (DBPs) formation were analyzed under background concentrations of four different ions (Br^- , NH_4^+ , NO_3^- and NO_2^-). The order of four ions influencing dinoseb chlorination reaction from

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07207004); 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合KY字[2018]295); 贵阳学院科研资金资助项目[GYU-KY-(2021)]

通信作者: 杨丹 E-mail: yangdanskyl@163.com

strong to weak was as follows: Br^- , NH_4^+ , NO_2^- and NO_3^- . The main DBPs generated were trichloromethane (CF), trichloronitromethane (TCNM), dichloroacetonitrile (DCAN), trichloroacetone (TCP), dichloromethane (DCBM), etc. Among them, the concentration of TCNM was the highest, and dinoseb was a typical precursor of TCNM. When Br^- existed in the water, the degradation reaction of dinoseb was very complex, and the degradation rate did not conform to pseudo-first-order reaction model. In addition, various bromination nitromethane emerged, such as DCBM, dibromochloromethane (DBCM) and tribromomethane (TBM). Their concentrations increased rapidly with the increase of Br^-/Cl_2 value, and the order of concentration from high to low was DCBM, DBCM, TBM and CF. The chlorination rate increased with the increase of Br^- concentration at the same pH. If the same initial dosages of Br^- were applied, the faster degradation rates of dinoseb were found at lower pH. Compared with Br^- , pH was a more important factor affecting the chlorination rate. When there was NH_4^+ in the water, the yield of TCNM increased greatly. NO_3^- had a certain inhibitory effect on chlorination of dinoseb, and the concentrations of DBPs were slightly reduced. NO_2^- could be oxidized to NO_3^- by HOCl, which consumed part of HOCl, and the concentrations of DBPs decreased overall.

Key words: dinoseb; chlorination; disinfection by-products; ion concentration; kinetics

近年来,随着经济和工业生产的发展,生活污水和工业废水不断排放,以及农业化肥、杀虫剂和除草剂的流失^[1],大量有机污染物进入水体,对地表水和地下水造成了严重的污染^[2],水源水中消毒副产物(DBPs)前体物含量增加^[3-4],严重威胁饮用水水质安全,引起了国际社会的广泛关注^[5-6]。地乐酚(Dinoseb, 2-异丁基-4,6-二硝基苯酚,又名二硝丁酚)就是这样一种广泛存在于水源水中的DBPs前体物^[7],它在水中性质稳定、抗酸碱、难于光分解和生物降解^[8],更为重要的是,地乐酚结构中含有硝基,属于硝基酚类物质^[9],在氯化过程中会产生多种毒性更强的含氮消毒副产物(N-DBPs),以三氯硝基甲烷(TCNM)浓度最高,已经被证明是TCNM的典型前体物^[10-11]。TCNM是卤代硝基甲烷(HNMs)的典型代表,由于其硝基基团具有很高的反应活性,会对胆固醇(CHO)细胞中的DNA造成严重的破坏,其细胞毒性和遗传毒性远超常规的消毒副产物,具有很强的致突变性,USEPA已将其列入优先控制消毒副产物的最高等级^[12]。另一方面,实际水体的成分复杂,存在多种离子,许多地区尤其是沿海地带的地表水和地下水中往往含有较多的 Br^- ^[13],人们过量的使用农药化肥等含氮物质导致水中的无机氮(包括 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^-)浓度在不断增加^[14],这些离子在饮用水氯化消毒过程中会严重影响着DBPs的生成。有研究表明, Br^- 可与氯反应生成氧化能力更强的HOBr,且以更快的速度与有

机物反应^[15],196种氯化消毒副产物中的28种是在 Br^- 存在时形成的^[16];另外,当水中无机氮浓度较高时,会和DBPs前体物反应生成大量N-DBPs,对人体健康造成较大的威胁^[17]。因此,研究TCNM典型前体物Dinoseb氯化消毒过程中,水中各离子对其氯化动力学及DBPs生成的影响,可以为控制DBPs及提高饮用水水质提供理论支撑和技术储备,具有极其重要的意义。

1 材料与方法

1.1 主要仪器和试剂

地乐酚购自德国Dr. Ehrenstorfer公司,纯度大于99%。消毒副产物标准样品三卤甲烷混标(THMs,包括三氯甲烷、三氯乙烷、四氯化碳、三氯乙烯、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、1,2-二溴乙烷、四氯乙烯、三溴甲烷和1,2-二溴-3-氯丙烷等10种物质)、其他N-DBPs与C-DBPs混标(主要含三氯乙腈、二氯乙腈、1,1-二氯丙酮、三氯硝基甲烷、1-溴-1-氯乙腈、1,1,1-三氯丙酮、二溴乙腈)均购自美国Sigma-Aldrich公司。

试验使用的氢氧化钠、磷酸二氢钾、碳酸钠、碳酸氢钠、溴化钾、氯化铵、硝酸钾、亚硝酸钠等均为优级和分析纯试剂。试验所用次氯酸钠溶液(6%的有效氯)购自于Sigma与国药集团化学试剂有限公司(上海),使用前次氯酸钠的有效氯含量均采用DPD-AES法标定。试验使用的有机溶剂甲基叔丁基醚(MTBE)、正戊烷、甲醇、乙腈等为色谱纯试剂,

购自 J. T. Baker(USA)。试验均采用超纯水配制溶液,超纯水由 Milli-Q 纯水机制备。

地乐酚(Dinoseb)浓度采用高效液相色谱法测定,所用仪器为岛津 LC22010AHT 液相色谱仪,采用 Waters XTerra C18 色谱柱(4.6 mm×250 mm,5 μm, Waters Inc, USA);HPLC 色谱条件如下:流量为 1.0 mL/min,流动相体积配比为甲醇:磷酸=80:20,检测波长为 265 nm,分析时间为 10 min。

三卤甲烷(THMs)采用 EPA502.1 方法检测,使用正戊烷为萃取剂;卤乙酸(HAAs)采用 EPA552.2 方法检测,采用酸化甲醇酯化,经 MTBE 萃取后进行分析;卤乙腈(HANs)、卤化丙酮(HAKs)、三氯硝基甲烷(TCNM)等采用 EPA552.1 方法测定,在饱和和无水硫酸钠存在的条件下经 MTBE 萃取后分析。THMs、HAAs 和其他消毒副产物均采用 GC-ECD 方法检测分析,仪器为岛津 GC2010,采用 HP5 毛细管柱(30 m×0.25 mm,0.25 μm)作为分离柱。

1.2 实验方法

① 不同 Br^- 背景浓度下 Dinoseb 的氯化动力学试验:采用超纯水配制 KBr 溶液,作为 Br^- 储备液,Dinoseb 初始浓度为 10.0 μmol/L,HOCl 初始浓度为 100.0 μmol/L(以 Cl_2 计,下同),控制 Br^-/Cl_2 值(物质的量之比,下同)分别为 0.005、0.01、0.05、0.1、0.2,在 pH 值分别为 5、7、9 的条件下研究 Dinoseb 的氯化降解情况,采用 10 mmol/L 的磷酸盐缓冲溶液($\text{KH}_2\text{PO}_4/\text{NaOH}$, pH 值为 5 和 7)和碳酸盐缓冲溶液($\text{NaHCO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$, pH 值为 9)控制体系的 pH 值。

② 不同 Br^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 NO_2^- 背景浓度下 Dinoseb 氯化生成 DBPs 的试验:采用超纯水配制 KBr、 NH_4Cl 、 KNO_3 、 NaNO_2 溶液,作为 Br^- 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 的储备液,Dinoseb 初始浓度为 10.0 μmol/L,HOCl 初始浓度为 200.0 μmol/L,控制各种离子与 Cl_2 的比值分别为 0、0.1、0.2、0.5、1、2、10,采用 10 mmol/L 的磷酸盐缓冲溶液,初始 pH 值为 7,反应温度控制在 25 °C,研究 Dinoseb 氯化生成 DBPs 的情况。

2 结果与讨论

2.1 不同 Br^- 浓度下 Dinoseb 的氯化动力学

当溶液中有溴离子存在时,溴离子会与 HOCl 反应生成 HOBr,HOBr 的氧化能力更强,与 Dinoseb 的反应也更复杂。控制反应体系的 pH 值分别为 9、

7、5,在不同 Br^-/Cl_2 值条件下,Dinoseb 的降解曲线如图 1 所示(3 种 pH 值条件下的降解曲线变化趋势一致,限于篇幅,仅列出 pH 值为 7 条件下的降解曲线)。可以明显看出,在相同 pH 值条件下,随着 Br^- 浓度的增大,Dinoseb 的降解速率不断加快,这说明反应生成的 HOBr 能更快地与 Dinoseb 发生反应,即 HOBr 是比 HOCl 更强的亲电子试剂,从而可以更有效地氧化 Dinoseb,这与其他物质的研究结果相一致^[18-19]。有 Br^- 存在时,Dinoseb 的氯化反应速率已经不符合拟一级反应规律,而呈现出更复杂的反应特征。当 $\text{Br}^-/\text{Cl}_2=0.1$ 时,对不同 pH 值下的数据作图,如图 1(b)所示。可以明显看出,加入溴离子后,Dinoseb 的氯化反应速率仍然是随着 pH 值的增大而降低,证明与溴离子相比,pH 值是更重要的影响因素。

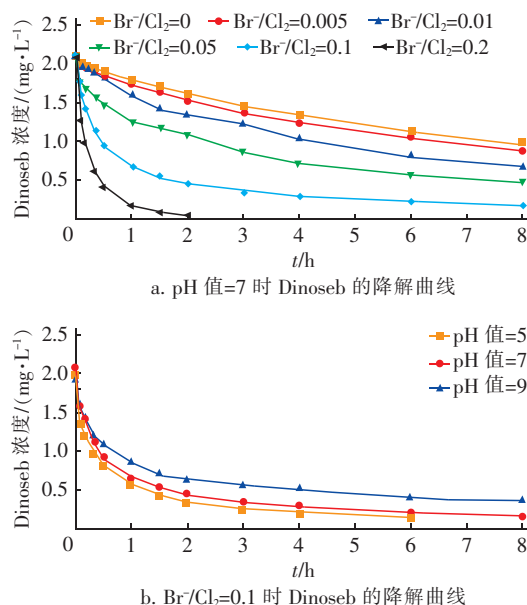


图 1 不同溴离子浓度和 pH 值下 Dinoseb 的降解规律

Fig.1 Degradation rule of dinoseb under different Br^- concentrations and pH values

2.2 不同 Br^- 浓度下 DBPs 的生成情况

不同 Br^- 背景浓度下 Dinoseb 氯化生成 DBPs 的情况如图 2 所示。从图 2(a)可以看出, Br^- 对 CF 和 TCNM 的产生有很大影响,CF 和 TCNM 的变化规律类似,都是随着 Br^-/Cl_2 值的增加而减少。TCNM 减少的速度较快,当 Br^-/Cl_2 值增大到一定程度时 TCNM 浓度变得非常低,例如当 $\text{Br}^-/\text{Cl}_2=0.05$ 时,TCNM 浓度仅为 0.062 79 μmol/L。当 Br^-/Cl_2 值继续增加时,TCNM 已经检测不出。而 CF 浓度随

Br^-/Cl_2 值的增加刚开始减少的速度较慢,后来逐渐加快,当 $\text{Br}^-/\text{Cl}_2 = 0.2$ 时降至 $0.0639 \mu\text{mol/L}$ 。TCNM/CF 值随 Br^-/Cl_2 值的增加先增大后迅速减小,当水中 Br^- 浓度较低时 TCNM 仍占优势,而当水中 Br^- 浓度较高时,CF 浓度相对较高。

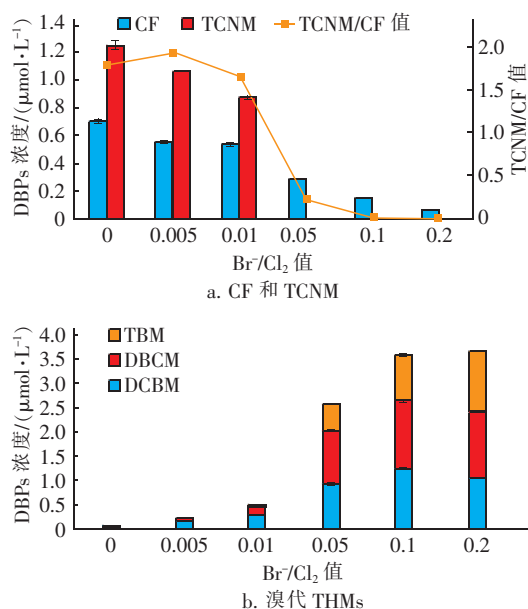


图2 不同 Br^- 浓度对 Dinoseb 氯化生成 DBPs 的影响

Fig.2 DBPs formation during chlorination of dinoseb under different Br^- concentrations

当溴离子存在时,会有大量溴代 THMs 生成,一溴二氯甲烷(DCBM)、一氯二溴甲烷(DBCM)、三溴甲烷(TBM)浓度随着 Br^-/Cl_2 值的增大而迅速增加,如图2(b)所示。这是因为虽然 HOCl/Cl 的氧化还原电位($E^0 = +1.630 \text{ V}$)高于 HOBr/Br ($E^0 = +1.331 \text{ V}$)^[20],但是 Br 原子与 Cl 原子相比具有更高的电子密度和较弱的键强,在与芳香族有机物进行取代反应时,Br 更容易释放电子、稳定碳阳离子从而生成三卤甲烷^[21]。当相同浓度的 HOBr 和 HOCl 混合液与 TOC 含量较高的水反应时,溴仿的生成速率比氯仿要快,且 HOBr 在水中的存留时间比 HOCl 要长,故溴取代反应优于氯取代反应,溴代 THMs 是优势产物,各种三卤甲烷浓度高低顺序: $\text{DCBM} > \text{DBCM} > \text{TBM} > \text{CF}$ 。

2.3 不同 NH_4^+ 浓度下 DBPs 的生成情况

不同 NH_4^+ 背景浓度下 Dinoseb 氯化生成 DBPs 的情况如图3所示。由于 NH_4^+ 会与 HOCl 反应生成氯胺,氯胺与氯相比是一种较弱的氧化剂,因此由

图3(a)可以明显看出 CF 浓度随着 $\text{NH}_4^+/\text{Cl}_2$ 值的增大而降低,当 $\text{NH}_4^+/\text{Cl}_2 > 1$ 时, NH_4^+ 和 HOCl 反应生成氧化能力更弱的二氯胺、三氯胺,此时 CF 浓度变得非常低;另外,反应中生成了大量的 TCNM,充分说明 Dinoseb 是 TCNM 的典型前体物,TCNM 浓度随着 $\text{NH}_4^+/\text{Cl}_2$ 值的增大而先升后降,当 $\text{NH}_4^+/\text{Cl}_2 = 0.5$ 时达到最高,这是由于一氯胺的氧化能力虽然较弱,但是 NH_4^+ 却给反应提供了充足的氮源,而当 $\text{NH}_4^+/\text{Cl}_2 > 1$ 时,由于二氯胺、三氯胺的氧化能力太弱,虽然有足够的氮源,但 TCNM 浓度同 CF 浓度一样迅速降低。另外,TCNM/CF 值始终大于 1,表明 TCNM 一直处于优势地位,当 $\text{NH}_4^+/\text{Cl}_2 < 1$ 时,TCNM/CF 值一直处于上升趋势,TCNM 浓度比 CF 浓度高出很多;当 $\text{NH}_4^+/\text{Cl}_2 = 1$ 时,TCNM 浓度是 CF 浓度的 10 倍;当 $\text{NH}_4^+/\text{Cl}_2 > 1$ 时,TCNM/CF 值略有降低,此时 TCNM 和 CF 的浓度虽然都很低,但是 TCNM 的优势依然非常明显,TCNM/CF 值维持在 8 左右。由此表明,水中有 NH_4^+ 存在时,TCNM 产率会提高很多,由于我国原水水质较差,所以很多水厂采用氯胺消毒,TCNM 的污染问题可能更为严重,对人体健康产生的影响也不容忽视。

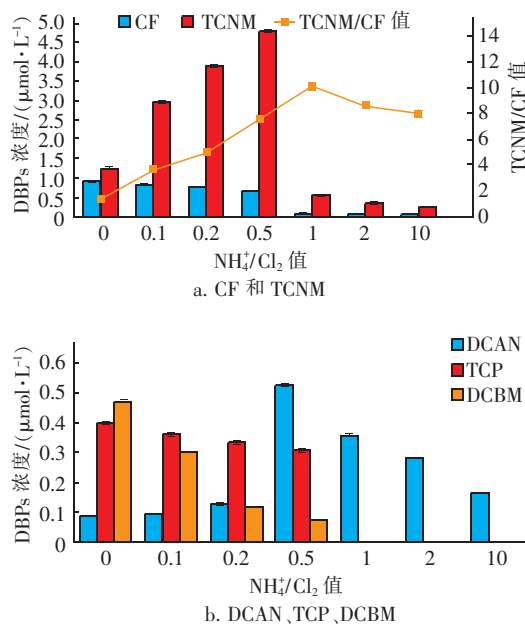


图3 不同 NH_4^+ 浓度对 Dinoseb 氯化生成 DBPs 的影响

Fig.3 DBPs formation during chlorination of dinoseb under different NH_4^+ concentrations

另外还检测出了3种产量非常微小的 DBPs,即二氯乙腈(DCAN)、三氯丙酮(TCP)和二氯一溴甲

烷(DCBM)。TCP 和 DCBM 浓度均随着 $\text{NH}_4^+/\text{Cl}_2$ 值的增大而降低,当 $\text{NH}_4^+/\text{Cl}_2 > 1$ 时,两者均未检出,这表明当水体中 NH_4^+ 浓度增大时,会导致氯氧化 Dinoseb 的能力降低。由于水体中会有一定浓度的 Br^- 存在,故检出了微量的 DCBM。DCAN 的变化规律比较明显,与 TCNM 类似,浓度随着 $\text{NH}_4^+/\text{Cl}_2$ 值的增大而先升高后降低,当 $\text{NH}_4^+/\text{Cl}_2 = 0.5$ 时达到最高,同 TCNM 生成规律一样,这是因为一氯胺的氧化能力虽然弱,但是 NH_4^+ 却给反应提供了充足的氮源。当 $\text{NH}_4^+/\text{Cl}_2 > 1$ 时,DCAN 浓度迅速降低,这是由于虽然氮源充足,但二氯胺和三氯胺的氧化能力比一氯胺弱。

2.4 不同 NO_3^- 浓度下 DBPs 的生成情况

不同 NO_3^- 背景浓度下 Dinoseb 氯化生成 DBPs 的情况如图 4 所示。

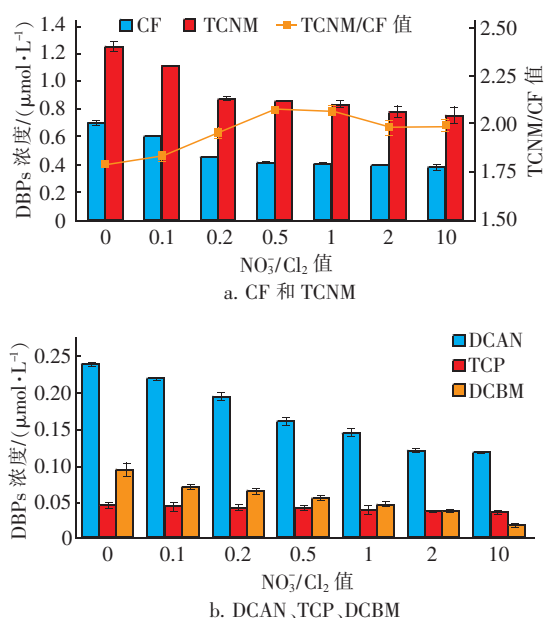


图 4 不同 NO_3^- 浓度对 Dinoseb 氯化生成 DBPs 的影响

Fig. 4 DBPs formation during chlorination of dinoseb under different NO_3^- concentrations

从图 4(a)可以看出, NO_3^- 对 CF 和 TCNM 浓度的影响不大。当水中加入 NO_3^- 后, CF 和 TCNM 的浓度都略有降低,随后基本上不再变化。这是因为 NO_3^- 虽不与次氯酸反应,但是可能对 Dinoseb 与次氯酸的反应有一定的抑制作用。TCNM/CF 值的变化虽然不大,但是 TCNM 仍占优势。其他消毒副产物的生成情况见图 4(b),共检测出了 3 种产量非常微小的 DBPs,即二氯乙腈(DCAN)、三氯丙酮

(TCP)和二氯一溴甲烷(DCBM),但是浓度变化幅度都不大,这表明它们的生成过程基本上不受 NO_3^- 影响。

2.5 不同 NO_2^- 浓度下 DBPs 的生成情况

不同 NO_2^- 背景浓度下 Dinoseb 氯化生成 DBPs 的情况如图 5 所示。

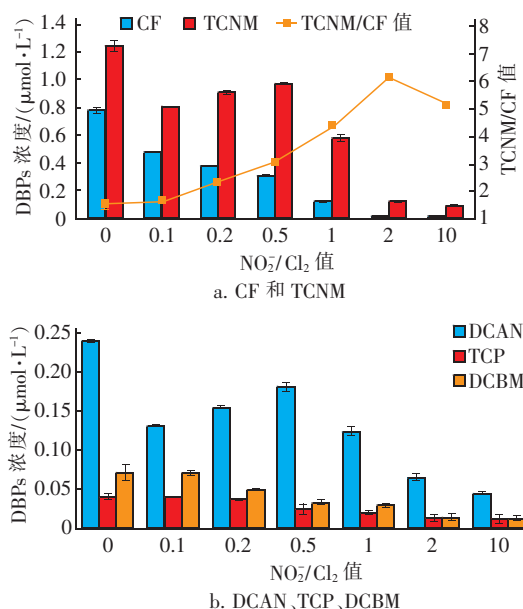


图 5 不同 NO_2^- 浓度对 Dinoseb 氯化生成 DBPs 的影响

Fig. 5 DBPs formation during chlorination of dinoseb under different NO_2^- concentrations

从图 5(a)可以明显看出, NO_2^- 对 CF 和 TCNM 浓度的影响较大,加 NO_2^- 后 CF 和 TCNM 的浓度总体都降低了,这是因为 NO_2^- 可以与水中的次氯酸反应生成 NO_3^- ,消耗了部分次氯酸,两者反应的理论物质的量之比为 1:1。另外,CF 浓度持续降低,而 TCNM 浓度在 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}_2$ 值比较小的时候还有一个小的升高的过程,这是因为 NO_2^- 给反应提供了氮源,而对 CF 则无影响,当 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}_2 > 1$ 时,次氯酸几乎全部被 NO_2^- 反应掉,故 CF 和 TCNM 的浓度都非常低。随着 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}_2$ 值的增大,TCNM/CF 值先升高后降低,在 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}_2 < 1$ 时,TCNM 是主要产物,当 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}_2 > 1$,TCNM/CF 值迅速降低,TCNM 仍占优势,但是浓度已经非常低了。其他消毒副产物的生成情况如图 5(b)所示,共检出 3 种产量非常微小的 DBPs,即二氯乙腈(DCAN)、三氯丙酮(TCP)和二氯一溴甲烷(DCBM)。随着 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}_2$ 值的增大,TCP 和 DCBM 浓度均略有降低,但是变化

不大,这是因为它们的生成过程基本不受 NO_2^- 影响;而 DCAN 浓度先升高后降低。

3 结论

① 当水中含有 Br^- 时,它会与氯反应生成氧化能力更强的 HOBr ,从而可以更有效地氧化 Dinoseb, Dinoseb 的氯化反应速率已经不符合拟一级反应规律,而呈现更复杂的反应特征。当 pH 值一定时,随着 Br^- 浓度的增大, Dinoseb 的降解速率不断加快;当 Br^-/Cl_2 值一定时, Dinoseb 的氯化反应速率随着 pH 值的增大而降低。与溴离子相比, pH 值是更重要的氯化反应速率影响因素。Dinoseb 是 TCNM 的典型前体物, Dinoseb 经氯化可以生成较高浓度的 TCNM, CF 和 TCNM 浓度均随 Br^-/Cl_2 值的增大而降低,并伴随大量的溴代 THMs 产生, DCBM、DBCM、TBM 的浓度均随着 Br^-/Cl_2 值的增大而迅速升高,各种三卤甲烷浓度高低顺序为: DCBM > DBCM > TBM > CF。

② 当水体中有 NH_4^+ 存在时,会生成氧化能力较弱的氯胺, CF、TCP 和 DCBM 浓度随着 $\text{NH}_4^+/\text{Cl}_2$ 值的增大而降低;但由于 NH_4^+ 提供了氮源, TCNM 和 DCAN 的产率会提高较多,随 NH_4^+ 浓度的增加先升高后降低。

③ NO_3^- 对 DBPs 的生成影响不大,初始所有 DBPs 浓度都略有降低,随后基本上不再变化; NO_3^- 虽不与次氯酸反应,但是可能对 Dinoseb 与次氯酸的反应有一定的抑制作用。

④ 当水体中存在 NO_2^- 时,会被次氯酸氧化生成 NO_3^- , 因此水体中加入 NO_2^- 后 DBPs 的浓度总体都有所降低;当 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}_2 > 1$ 时,次氯酸几乎全部被 NO_2^- 反应掉, DBPs 浓度都非常低。几种背景离子对 Dinoseb 氯化反应的影响大小顺序: $\text{Br}^- > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_2^- > \text{NO}_3^-$ 。

参考文献:

- [1] GORA S L, ANDREWS S A. Adsorption of natural organic matter and disinfection byproduct precursors from surface water onto TiO_2 nanoparticles: pH effects, isotherm modelling and implications for using TiO_2 for drinking water treatment[J]. *Chemosphere*, 2017, 174: 363–370.
- [2] 黄飘逸,徐斌,郭东良. 南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律[J]. 环境科

学, 2018, 39(3): 1046–1052.

HUANG Piaoyi, XU Bin, GUO Dongliang. Water quality in the Henan intake area of the South-to-North Water Diversion Project[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(3): 1046–1052 (in Chinese).

- [3] 田富箱,徐斌,秦朗,等. 不同预氧化剂对黄浦江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10): 3705–3711.

TIAN Fuxiang, XU Bin, QIN Lang, *et al.* Effect of different pre-oxidants on DBPs formation potential by chlorination and chloramination of Huangpu River raw water[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(10): 3705–3711 (in Chinese).

- [4] 荣蓉,徐斌,林琳,等. 微污染黄浦江水溶解性有机氮的分子组成特性分析[J]. 中国给水排水, 2013, 29(1): 1–5.

RONG Rong, XU Bin, LIN Lin, *et al.* Characterization of dissolved organic nitrogen in micro-polluted Huangpu River water[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(1): 1–5 (in Chinese).

- [5] BOND T, TEMPLETON M R, KAMAL, N H M, *et al.* Nitrogenous disinfection byproducts in English drinking water supply systems: occurrence, bromine substitution and correlation analysis[J]. *Water Research*, 2015, 85: 85–94.

- [6] 林琳,徐斌,覃操,等. 黄浦江原水 NDMA 前体物的组成规律及其在常规净水工艺中的削减特性[J]. 给水排水, 2013, 39(2): 61–65.

LIN Lin, XU Bin, QIN Cao, *et al.* Composition of NDMA precursors in Huangpu River and its removal characteristics in conventional water treatment processes[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2013, 39(2): 61–65 (in Chinese).

- [7] 李冕,徐斌,夏圣骥,等. 含氮消毒副产物卤代酰胺的生成特性与控制研究进展[J]. 中国给水排水, 2011, 27(14): 31–34.

LI Mian, XU Bin, XIA Shengji, *et al.* State-of-the-art of formation and control of nitrogenous disinfection byproducts: haloamides[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(14): 31–34 (in Chinese).

- [8] 陈英英,徐斌,李冕,等. 净水工艺对黄浦江水 TCNM 生成潜能的去除特性[J]. 中国给水排水, 2012, 28(15): 31–35.

CHEN Yingying, XU Bin, LI Mian, *et al.* Investigation of TCNM formation in treatment process of micro-polluted

- raw water from Huangpu River [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(15): 31–35 (in Chinese).
- [9] GUO Z B, LIN Y L, XU B, *et al.* Factors affecting THM, HAN and HNM formation during UV-chlor(am) ination of drinking water [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 306: 1180–1188.
- [10] QIN L, LIN Y L, XU B, *et al.* Kinetic models and pathways of ronidazole degradation by chlorination, UV irradiation and UV/chlorine processes [J]. Water Research, 2014, 65: 271–281.
- [11] CHANG H, CHEN C, WANG G, *et al.* Identification of potential nitrogenous organic precursors for C-, N-DBPs and characterization of their DBPs formation [J]. Water Research, 2011, 45(12): 3753–3764.
- [12] WANG Z, XU B, LIN Y L, *et al.* A comparison of iodinated trihalomethane formation from iodide and iopamidol in the presence of organic precursors during monochloramination [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 257: 292–298.
- [13] BOND T, TEMPLETON M R, GRAHAM N, *et al.* Precursors of nitrogenous disinfection by-products in drinking water—a critical review and analysis [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 235/236: 1–16.
- [14] Duirk S E, Lindell C, Cornelison C C, *et al.* Formation of toxic iodinated disinfection by-products from compounds used in medical imaging [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(16): 6845–6854.
- [15] JONES D B, SAGLAM A, SONG H, *et al.* The impact of bromide/iodide concentration and ratio on iodinated trihalomethane formation and speciation [J]. Water Research, 2012, 46(1): 11–20.
- [16] ZHANG T Y, XU B, HU C Y, *et al.* Degradation kinetics and chloropicrin formation during aqueous chlorination of dinoseb [J]. Chemosphere, 2013, 93: 2662–2668.
- [17] LI L, GAO N Y, DENG Y, *et al.* Characterization of intracellular & extracellular algae organic matters (AOM) of *Microcystic aeruginosa* and formation of AOM-associated disinfection byproducts and odor & taste compounds [J]. Water Research, 2012, 46(4): 1233–1240.
- [18] BOUGEARD C M M, GOSLAN E H, JEFFERSON B, *et al.* Comparison of the disinfection by-product formation potential of treated waters exposed to chlorine and monochloramine [J]. Water Research, 2010, 44(3): 729–740.
- [19] YANG X, SHEN Q Q, GUO W H, *et al.* Precursors and nitrogen origins of trichloronitromethane and dichloroacetonitrile during chlorination/chloramination [J]. Chemosphere, 2012, 88(1): 25–32.
- [20] CHUANG Y H, TUNG H H. Formation of trichloronitromethane and dichloroacetonitrile in natural waters: precursor characterization, kinetics and interpretation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 283: 218–226.
- [21] SHAH A D, MITCH W A. Halonitroalkanes, halonitriles, haloamides, and N-nitrosamines: a critical review of nitrogenous disinfection byproduct formation pathways [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(1): 119–131.

作者简介: 李冕 (1987–), 女, 湖北汉川人, 博士研究生, 副教授, 研究方向为水处理技术。

E-mail: limian198772@163.com

收稿日期: 2019–09–09

修回日期: 2019–10–11

(编辑: 刘贵春)

积极践行人与自然和谐共生理念
全面加强水生态文明建设