

氯化消毒副产物 NDMA 的生成与控制研究进展

梁 闯, 徐 斌, 高乃云, 张超杰, 严 烈, 李 伟
(同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要: NDMA (N-Nitrosodimethylamine) 是水处理领域新近发现的一种氯化消毒副产物, 由于其具有检出率高、致癌风险大、难以有效去除等特性, 已成为国际关注的重要水质问题之一。饮用水中的 NDMA 主要产生于氯化消毒过程, 尤为严重的是氯胺消毒过程, 而臭氧和过氧化氢氧化基本不产生 NDMA。NDMA 为亲水性小分子有机物, 常规处理和深度处理均难于有效去除, 而且管网中的浓度显著高于出厂水。目前控制饮用水中 NDMA 的常用方法是紫外线照射, 但能耗较高。其他方法如延长自由氯接触时间和采用高铁酸盐预氧化、反渗透、臭氧/过氧化氢高级氧化工艺等也可以不同程度地控制 NDMA 及其前体物。

关键词: 饮用水消毒; 消毒副产物; NDMA; 生成机理; 检测方法; 控制手段

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2008)22-0006-06

Review on Formation and Control of Chlorination Disinfection By-product NDMA during Water Treatment

LIANG Chuang, XU Bin, GAO Nai-yun, ZHANG Chao-jie, YAN Lie, LI Wei
(State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University, Shanghai
200092, China)

Abstract: N-nitrosodimethylamine (NDMA) is a newly detected disinfection by-product occurring in the chlorinated drinking water. Since NDMA shows wide occurrence, high carcinogenicity risk and limited removal effect in water treatment, it has become one of crucial water quality issues of international concern. NDMA in drinking water is mainly produced during chlorination disinfection, especially chloramine disinfection, and it is not produced in the disinfection by AOP using ozone/hydrogen peroxide. Due to hydrophilicity and specific structure with low molecule weight, NDMA can not be effectively removed by both conventional water treatment processes and advanced treatment technology. Its concentration in distribution pipeline is significantly higher than that in the finished water. Currently, UV photolysis is an effective method to decompose NDMA in drinking water, with high energy consumption. Other methods, such as extending the contact time of free chlorine, pre-oxidation with ferrate, reverse osmosis, AOP using ozone/hydrogen peroxide, also can be used to control NDMA and its precursors to certain extent in water treatment.

Key words: disinfection of drinking water; disinfection by-product; NDMA; formation mechanism; detection method; control means

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50708066); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2008AA06Z302); 国家科技支撑计划重点资助项目 (2006BAJ08B06, 2006BAJ08B09)

氯化消毒是国内外饮用水处理厂普遍采用的消毒方式,具有经济、高效的特点,并能够在输水管网中保持余氯以防止病原微生物的再度繁殖,因此是防止水传播疾病、保障饮水生物安全的重要屏障。由于消毒过程中次氯酸和 Cl_2 具有较强的氧化能力,可同时氧化水中的大量有机物,因此自 20 世纪 70 年代开始,人们发现经氯消毒后出厂水中往往会有一些有害副产物,例如三卤甲烷、卤代乙酸、卤乙腈、MX 等,这些物质对人体具有显著的“三致”作用。近来在美国和加拿大等地的饮用水中广泛地检测出了一种新的氯化消毒副产物——二甲基亚硝胺($\text{N-Nitrosodimethylamine}$, NDMA),尤为严重的是采用化合氯消毒的水厂,甚至采用离子交换工艺的水厂中也检测出了该物质^[1]。国际癌症研究所(IARC)通过动物实验充分证明了该物质对人体的致癌能力,并将致癌等级定为 2B。美国 EPA 也将其列为 200 种致癌物质之一,其致癌等级为 2 级,在暴露浓度仅为 0.7 ng/L 条件下,理论致癌风险系数可达到 10^{-6} 。与发达国家的原水水质相比,我国部分城市原水中有有机物、氮和磷含量高且广泛采用化合氯消毒,因此饮用水中 NDMA 危害可能更为严重。如何有效控制和去除水中 NDMA 已成为国际饮用水处理领域关注的新问题,同时也是为确保饮用水安全而亟待解决的问题之一^[2]。

1 出厂水中 NDMA 的检测与分析

1.1 NDMA 的测定方法

NDMA 是亚硝胺类化合物中的一种,直到 1956 年 John Bames 和 Peter Magee 通过实验发现 NDMA 对小白鼠有致癌作用,人们才对该类物质的研究逐渐感兴趣^[3]。NDMA 是一种工业生产副产物,例如在橡胶制造业、制革业、杀虫剂生产业、食品行业和印染业的排出废物中发现了该物质,在香烟中也检测到了该物质。

饮用水中 NDMA 的浓度通常在 ng/L 水平,检测如此痕量的物质需要先萃取富集,然后通过 GC/MS 进行分离和定量。2004 年,美国 EPA 公布了饮用水中亚硝胺类物质的检测方法^[4]:固相萃取/毛细管气相色谱/化学电离源质谱。该方法分析 NDMA 时采用 NDMA-d6 为内标物,其检测限(DL)为 0.28 ng/L ,LCMRL (Lowest Concentration Minimum Reporting Level)为 1.6 ng/L ,对其他 7 种亚硝胺的 LCMRL 为 $1.2 \sim 2.1 \text{ ng/L}$ 。加拿大安大略省环境部

(OME)于同一年公布了检测饮用水中亚硝胺的两种新方法,其中一种是针对于 NDMA 的检测(OME 2004a),固相萃取采用 Ambersorb 572 作为吸附剂,用二氯甲烷进行洗提。通过气相色谱和高分辨质谱法完成分离和定量,同样采用 NDMA-d6 进行同位素稀释,其检测限为 0.4 ng/L ,报告检测限(RDL)为 1.0 ng/L 。另一种方法用于检测其他几种亚硝胺(OME 2004b)。近来,美国和加拿大的研究机构提出了 LC/MS/MS 的分析方法,该方法对饮用水中热稳定/不稳定亚硝胺类物质均可检测^[5],能够检测出饮用水中低于 ng/L 水平的 9 种亚硝胺,该方法的检测限为 $0.1 \sim 10.6 \text{ ng/L}$,9 种亚硝胺的平均回收率为 $41\% \sim 111\%$ 。

1.2 NDMA 在水厂的检出情况

饮用水中的 NDMA 最早于 1989 年在加拿大安大略省 Ohsweken 区的一座采用氯胺消毒的自来水厂中被发现,接着在其他几座采用相同消毒工艺的水厂中也检测到了 NDMA。目前在美国、加拿大以及欧洲等水厂都有 NDMA 检出的报道。

1994 年—1996 年研究人员从加拿大安大略省的 100 座水厂中抽取 313 份出厂水水样,结果发现有 40 座水厂的出厂水中 NDMA 的浓度超过检测限(1 ng/L),平均浓度为 2.7 ng/L ,最高浓度出现在采用预混合聚胺 明矾絮凝剂的出厂水中,其中在 Huntsville 水厂的出厂水中检测出 NDMA 高达 40 ng/L ^[6]。在取自采用预混合聚胺 明矾絮凝剂的水厂 20 份水样中均检测出了 NDMA,平均浓度高达 12 ng/L ,而其余没有采用预混合聚胺 明矾絮凝剂的水厂的 293 份水样中 NDMA 的平均浓度只有 2 ng/L 。安大略省环境部(OME)于 1994 年—2002 年期间调查了当地 179 座水厂的 NDMA 含量,其中 21 座采用氯胺消毒,157 座采用自由氯消毒,1 座采用臭氧和自由氯消毒,结果发现,绝大多数原水中的 NDMA 低于检测限($<1 \text{ ng/L}$),而单独采用自由氯和氯胺消毒均能产生一定浓度的 NDMA。氯胺消毒时 NDMA 平均浓度明显高于自由氯消毒方式,而臭氧+自由氯方式消毒基本不产生 NDMA。尤为需要关注的是采用自由氯和氯胺消毒工艺的出厂水中 NDMA 最高浓度分别为 40 ng/L 和 65 ng/L ,而且配水管网平均浓度显著高于出厂水。Charnois 于 2004 年选取加拿大 Alberta 地区的一系列水样做了分析实验,也得出了相似的结论。该地区水厂采用氯胺

和紫外线消毒,原水中 NDMA 浓度低于检测限 (0.4 ~ 1.6 ng/L),但出厂水中 NDMA 浓度为 67 ng/L,配水管网中更是高达 160 ng/L,进一步研究证实,配水管网中 NDMA 浓度远高于出厂水中浓度^[7]。

美国加利福尼亚公共卫生服务局 (CDHS) 于 2001 年调查了饮用水中 NDMA 的含量。结果发现,在所调查的 20 座采用氯胺消毒的水厂中有 3 座出厂水的 NDMA 浓度 > 10 ng/L,而只采用自由氯消毒的 8 座水厂的出厂水中 NDMA 浓度 < 5 ng/L。

由于对饮用水中 NDMA 的研究尚处于起步阶段,目前世界上尚未有任何国家和世界性组织在水质标准中规定了 NDMA 的最大允许浓度标准 (MCL),但鉴于 NDMA 的高致癌性,美国加利福尼亚州和加拿大安大略省规定过渡性卫生标准分别为 10 ng/L 和 9 ng/L^[8]。

2 NDMA 的生成机理

目前研究认为,在饮用水处理中 NDMA 的生成机理主要有两种:①亚硝化机制;②UDMH 氧化机制。除此之外,采用离子交换树脂或聚合物絮凝剂也会导致 NDMA 的生成。

2.1 亚硝化机制

早期研究认为 NDMA 的生成源于含氮有机化合物的亚硝化作用 (nitrosation),首先亚硝酸盐经酸化作用生成亚硝酸酰基阳离子 (NO^+),然后 NO^+ 同诸如二甲胺 (DMA) 之类的胺基化合物反应生成 NDMA。在上述反应中,亚硝酸盐的质子化作用与二甲胺的去质子反应对 pH 的要求是矛盾的,二者平衡的结果是亚硝化反应在酸性环境中进行得最快,尤其是在 pH 值接近 3.4 的情况下。

亚硝化机制可用来解释缘何 NDMA 在腌制的肉制品、香烟、麦芽饮料和油炸食品中可以检测得到^[9]。尽管亚硝化反应在中性和碱性环境下进行得很慢,但一些研究结果表明光化反应、甲醛和棕黄酸能够催化该反应。Choi 和 Valentine 认为自由氯可以极大地提高二甲胺经亚硝化作用生成 NDMA 的反应速度,并认为自由氯将亚硝酸盐氧化为硝酸盐的过程中会生成中间产物四氧化二氮 (N_2O_4),而该物质具有很高的亚硝化活性^[10]。

2.2 UDMH 氧化机制

有研究认为次氯酸盐、铜离子、过氧化氢和氧气可将不对称二甲肼 (UDMH) 氧化为 NDMA。由于 UDMH 被氧化即可生成 NDMA,因此可设想任何产

生 UDMH 的氯化工艺均可导致 NDMA 的生成。Mitch 和 Sedlak^[11] 及 Choi 和 Valentine^[12] 通过实验表明 UDMH 氧化机制可用于解释饮用水氯胺消毒时 NDMA 的生成情况,其产生机制如图 1 所示。

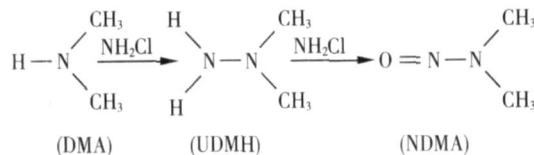


图 1 NDMA 的 UDMH 生成机制

Fig 1 Formation mechanism of NDMA from UDMH

由图 1 可以看出,首先是一氯胺同 DMA 反应生成 UDMH,随后 UDMH 被一氯胺或其他存在于水中的氧化剂迅速氧化,但该反应生成 NDMA 的产率很低 (< 1%)^[11]。由于第一步反应 UDMH 的生成速度较慢,所以 NDMA 的生成速度很慢,反应可持续几天时间,这同以往调查时发现配水管网中 NDMA 浓度远高于出厂水浓度的结果是一致的。进一步研究表明,UDMH 的氧化反应受 pH 的影响很大,并且在接近中性 pH 的条件下反应速度最快^[9]。

2.3 其他机制

在饮用水处理工艺中溴离子是一种常见的痕量组分,它可迅速被自由氯和一氯胺氧化,在过量氨存在的情况下,次氯酸盐加入到水中会迅速生成溴胺。溴胺与氯胺具有相似的化学性质,但反应活性高于后者,更易于同二甲胺反应生成 NDMA,这与 Choi 和 Valentine 发现溴化物对 NDMA 的生成具有催化作用的结果是符合的^[13]。

采用带有季铵官能团的阴离子交换树脂处理工艺时也会生成 NDMA,主要原因是水中剩余自由氯或氯胺同树脂上的官能团发生反应造成的。但 Najm 和 Trussell 发现阴离子交换树脂放在蒸馏水中也会浸出一定浓度的 NDMA (经 4 h 接触后可达 60 ng/L),并且存在 1 mg/L 亚硝酸盐的情况下该浓度值会加倍^[14]。这表明可能存在不同于 UDMH 氧化机制的新的 NDMA 生成机理。

此外,含有二甲胺官能团的聚合物 (例如 DADMAC) 同高浓度自由氯反应时也会生成 NDMA^[14]。但在饮用水处理中的常规剂量范围内,自由氯同聚合物反应生成的 NDMA 通常低于检测限 (1 ng/L)。Najm 和 Trussell 的研究也表明,在常规水处理条件下,DADMAC 同自由氯接触后生成的 NDMA < 2 ng/L。与此相反,Wilczak 的研究结果表明,处理工艺中

采用 DADMAC 聚合物和氯胺消毒会生成一定浓度的 NDMA,并且其浓度随着 DADMAC 投量的增加而增大^[15]。

2.4 NDMA 生成的前体物种类

迄今为止,二甲胺(DMA)是被许多研究证实的最有效的 NDMA 前体物,但仅仅 DMA 还不足以说明水处理中 NDMA 的生成情况^[16]。Fiddler 在早期研究中发现,自然水体中的季铵化合物和叔胺化合物可通过亚硝化机制生成 NDMA。Mitch 和 Sedlak 认为采用一氯胺消毒时,含有二甲胺官能团的脂肪族叔胺化合物(例如三甲胺和二甲乙醇胺)可看作 NDMA 的前体物,但反应产率低于二甲胺(大约只有 DMA 产率的 1/2),这可解释为生成 NDMA 前需要先断开碳氮键^[11];进一步研究发现,一甲胺(伯胺)、四甲胺(季铵)、二甲基氨基化合物、氨基酸、氨基糖和蛋白质不能生成可检测的 NDMA。

一些结构上很复杂的胺类或含胺化合物由于可能释放出二甲胺,因此也可能是 NDMA 前体物。Braubacher 发现,二硫代氨基甲酸酯类杀菌剂由于含有可水解的二甲胺官能团,因此也是一种较好的 NDMA 前体物^[17]。水处理中常用的含有胺的阴离子交换树脂和聚合体絮凝剂也被认为是可能的 NDMA 前体物^[17]。

3 饮用水中 NDMA 的控制方法

在饮用水处理中,NDMA 是一种二次污染物,即是由水源水中的某些化合物与消毒剂反应的产物,所以可通过两种途径控制饮用水中 NDMA 的浓度:

①设法去除 NDMA 的前体物或采用其他消毒工艺避免其产生;②NDMA 产生后设法将其降解。

3.1 水厂工艺的调控

Alberta 大学的研究人员调查了北美两座水厂中 NDMA 的含量^[18]。A 水厂消毒工艺为:氯气、中压紫外线照射、氨水。其中氨水加入之前自由氯接触时间和紫外线照射时间不超过 30 s。B 水厂采用氯消毒,自由氯接触 2~4 h 后加入氨水。调查结果表明,A 水厂配水管网内 NDMA 最高浓度为 180 ng/L,并且自来水在管网内的停留时间越长,NDMA 浓度越高。B 水厂的配水管网内 NDMA 最高浓度 ≤ 5 ng/L。

研究人员分别采用 A、B 两水厂的消毒工艺对 A、B 两水厂的原水同时进行处理,结果 A 厂中 NDMA 最高浓度为 (15 ± 0.7) ng/L, B 厂中 NDMA 最

高浓度 < 3 ng/L。分别采用 A、B 两水厂的消毒工艺对 A、B 两水厂的未消毒处理水的处理结果表明,A 厂中 NDMA 最高浓度为 (51 ± 8.3) ng/L, B 厂中 NDMA 最高浓度为 (4 ± 1.2) ng/L。

由上述研究结果可知,加入氨水之前延长自由氯接触时间可以减少饮用水中 NDMA 的浓度。鉴于此,研究人员把 A 水厂消毒工艺中的自由氯接触时间延长到 2 h,其他条件不变,结论是加氨水之前延长自由氯接触时间可以有效地降低 NDMA 的浓度^[19]。

3.2 氧化工艺对 NDMA 及其前体物的去除

① 紫外分解 NDMA

到目前为止,去除 NDMA 最常用的方法是紫外线照射(UV)。NDMA 被紫外线光解的产物主要有二甲胺和亚硝酸盐。

在对 NDMA 的降解方面,中压 UV 灯比低压 UV 灯要经济得多,但采用 UV 工艺去除 NDMA 费用太高,去除 90% 的 NDMA 大约需要 $1\,000\text{ mJ}/\text{cm}^2$ 的 UV 剂量,而该值是灭活病毒和细菌所需 UV 剂量的 10 倍^[20]。在北美已经有一些中压 UV 装置被用于处理受到工业源 NDMA 污染的地下水^[20]。在 UV 工艺中若加入过氧化氢(H_2O_2),则 H_2O_2 在 UV 的照射下能分解出 $\cdot\text{OH}$,进而把亚硝酸盐氧化为硝酸盐,二甲胺也会被部分降解。因此,采用 UV/ H_2O_2 工艺去除 NDMA 时,主要的降解产物是硝酸盐并且产生的二甲胺浓度远远低于直接用 UV 光解时的浓度。

② 臭氧及其联用工艺控制 NDMA

韩国学者在实验室内测出了 NDMA 分别同臭氧和 $\cdot\text{OH}$ 反应的速率常数^[8]。单独采用臭氧的试验结果表明, $\text{pH} = 7$ 时 NDMA 的氧化率为 13%,而当 pH 值增至 8 时该数值上升到 55%。加入过氧化氢并且 pH 值分别为 7 和 8 时,NDMA 的氧化率大约为 85%。

采用臭氧去除 NDMA 的主要问题是效率太低, $160\text{ }\mu\text{mol/L}$ (7.7 mg/L) 的臭氧对 NDMA 的氧化率 $< 25\%$;而在高级氧化工艺($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$)中, $160\sim 320\text{ }\mu\text{mol/L}$ 的臭氧 ($[\text{O}_3]_0/[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 2$) 对 NDMA 的氧化率可达到 50%~75%。

③ 高铁酸盐控制 NDMA 前体物及生成潜能

首尔国立大学研究了高铁酸盐对 NDMA 前体物及生成潜能的控制效果^[21]。在采用高铁酸盐 Fe

(VI)预氧化降低 NDMA 生成潜能的试验中发现: NDMA 前体物的浓度为 0.1 mmol/L 时,根据前体物种类的不同,氧化前 NDMA 的生成潜能为 $300\sim 6200\text{ nmol/L}$,其中 DMA、3-二甲胺甲基-咪唑(DMAI)和 4-二甲胺安替比林(DMAP)均具有较高的生成潜能,分别为 3000 、 6200 和 4400 nmol/L 。高铁酸盐 Fe(VI) 可以很有效地降低 NDMA 的生成潜能,经 10 s 的反应时间后,二甲基二硫代氨基甲酸盐(DMDC)、二甲基氨基苯(DMAB)、DMAI 和 DMAP 的 NDMA 生成潜能降低 $89\%\sim 99\%$;经 30 min 的氧化反应后,除了二甲胺,所有前体物的生成潜能均被彻底去除($>95\%$),而二甲胺的 NDMA 生成潜能只降低 13% ,尽管此时二甲胺已被彻底转化。这同时表明了二甲胺被高铁酸盐氧化后的产物也是 NDMA 的前体物。

3.3 吸附法去除水中 NDMA

有些学者研究了各种吸附剂对 NDMA 的去除效果,取地下水,掺入 $100\text{ }\mu\text{g/L}$ 的 NDMA。选用的吸附剂包括: F400(煤质活性炭)、CSC(果壳质活性炭)、Ambersorb572 和 563(碳质活性炭)、XAD-7(大孔树脂)和一系列经过/未经过铜、铁和镍预处理改性的沸石。结果表明,沸石和 XAD-7 的去除效果不好($<20\%$),其余几种吸附剂按去除率由高到低排列如下: A572 > CSC > A563 > F400。

当 NDMA 的平衡浓度分别为 100 和 $500\text{ }\mu\text{g/L}$ 时,活性炭对 NDMA 的吸附能力很低。NDMA 是一种亲水化合物,这导致 NDMA 不易被活性炭和其他吸附剂所吸附^[22]。

3.4 膜处理去除 NDMA

NDMA 分子非常小,除反渗透技术外,超滤与纳滤等膜处理方法基本对 NDMA 没有去除效果。美国斯坦福大学研究了几种反渗透膜对包括 NDMA 在内的 7 种烷基亚硝胺的去除效果^[23]。在去离子水中的试验表明,分子质量越大,拦截效果越好,反渗透膜对 NDMA 的去除率可达到 $56\%\sim 70\%$ 。在膜表面涂上嵌段聚醚酰胺树脂(PEBAX)后,ESPA3 膜对 NDMA 的去除率下降了 11% ,但是使 LFC3 和 BW30 两种膜对 NDMA 的去除率分别增加了 6% 和 15% 。向 ESPA3 膜中加入 170 g/m^2 的藻酸盐后,该膜对 NDMA 的去除率下降了 18% 。溶液中加入 100 mmol/L 的 NaCl 后 NDMA 的去除率下降 15% ;将去离子水酸化至 $\text{pH}=3$ 时,膜对 NDMA 的去除率

下降了 5% ,而当 pH 值增加到 10 时去除率没有太大的改变。

4 结论与展望

① NDMA 是目前饮用水安全领域关注的重要水质问题之一。在北美和欧洲的出厂水和管网水中广泛检出该物质,尤为严重的是采用氯胺消毒方式的水厂。鉴于我国部分地区水源水中有机物和溶解性氮含量较高,自来水厂普遍采用化合氯消毒的方式,出厂水和管网水中可能存在较高浓度的 NDMA。

② NDMA 的生成机制复杂,目前主要包括亚硝化机制和 UDMH 氧化机制,但尚未有相关理论完全能解释氯化消毒过程中其产生规律。

③ NDMA 分子结构简单,亲水性强,常规和深度处理工艺均难于有效控制其浓度;高级氧化工艺均对 NDMA 具有一定的去除效果,紫外降解是最有效的去除方法,但这些方法普遍存在效能偏低的问题;NDMA 的活性炭吸附容量低,反渗透工艺仅有 $56\%\sim 70\%$ 的去除效果。因此探索高效的 NDMA 去除方法,是目前该领域发展的方向之一。

④ 通过水厂工艺调节和工艺强化(高铁酸盐)可有效控制 NDMA 的生成,因此通过控制 NDMA 前体物的方法来控制 NDMA 的产生,也是今后该领域的研究重点。

参考文献:

- [1] Choi J, Valentine R L. Formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) from reaction of monochloramine: a new disinfection by-product[J]. Water Res, 2002, 36(4): 817-824.
- [2] Richardson S D, Plewa M J. Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research[J]. Mutation Res, 2007, 636(1-3): 178-242.
- [3] Przenyslaw, Andrzejewski. The hazard of N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation during water disinfection with strong oxidants[J]. Desalination, 2005, 176(1-3): 37-45.
- [4] EPA/600/R-05/054, Determination of nitrosamines in drinking water by solid phase extraction and capillary column gas chromatography with large volume injection and chemical ionization tandem mass spectrometry (MS/MS) [S].

- [5] Yuan Yuan Zhao, Jessica Boyd Characterization of new nitrosamines in drinking water using liquid chromatography tandem mass spectrometry[J]. Environ Sci Technol, 2006, 40 (24): 7636 - 7641.
- [6] WHO. N-nitrosodimethylamine [R]. Geneva: Concise International Chemical Assessment Document 38, WHO, 2002
- [7] Charnois J W A, Arend M W, Friese K L, *et al* Detecting N-nitrosamines in drinking water at nanogram per litre levels using ammonia positive chemical ionization [J]. Environ Sci Technol, 2004, 38 (21): 4835 - 4841.
- [8] Changha Lee, Jeyong Yoon, Urs Von Gunten Oxidative degradation of N-nitrosodimethylamine by conventional ozonation and the advanced oxidation process ozone/hydrogen peroxide [J]. Water Res, 2007, 41 (3): 581 - 590.
- [9] Mitch W A, Sharp J O, Trussell R R, *et al* N-nitrosodimethylamine (NDMA) as a drinking water contaminant: a review [J]. Environ Sci Technol, 2003b, 20 (5): 389 - 404
- [10] Choi J, Valentine R L. N-nitrosodimethylamine formation by free-chlorine-enhanced nitrosation of dimethylamine [J]. Environ Sci Technol, 2003b, 37 (21): 4871 - 4876
- [11] Mitch W A, Sedlak D L. Formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) from dimethylamine during chlorination [J]. Environ Sci Technol, 2002b, 36 (4): 588 - 595.
- [12] Choi J, Valentine R L. Formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) from reaction of monochloramine: a new disinfection by-product [J]. Water Res, 2002a, 36 (4): 817 - 824.
- [13] Choi J H, Valentine R L. Formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) in chloraminated model waters [A]. International Water Association 2nd World Water Congress [C]. Berlin: International Water Association, 2002
- [14] Najm I, Trussell R R. NDMA formation in water and wastewater [J]. J AWWA, 2001, 93 (2): 92 - 99.
- [15] Wilczak A, Assadi-Rad A, Lai H H, *et al* Formation of NDMA in chloraminated water coagulated with DADMAC cationic polymer [A]. Proceedings American Water Works Association Annual Conference [C]. USA: AWWA, 2003
- [16] Mitch W A, Sedlak D L. Fate of N-nitrosodimethylamine (NDMA) precursors during municipal wastewater treatment [A]. Proceedings American Water Works Association Annual Conference [C]. USA: AWWA, 2003
- [17] Brubacher C M, Andrews S A, Werker A G NDMA formation from wastewater treatment processes for water reuse: stage 1 results [A]. Proceedings American Water Works Association Annual Conference [C]. USA: Anaheim, California, 2003
- [18] Charnois Jeffrey W A, Hrudey Steve E. Breakpoint chlorination and free-chlorine contact time: implications for drinking water N-nitrosodimethylamine concentrations [J]. Water Res, 2007, 41 (3): 674 - 682.
- [19] Schreiber IM, Mitch W A. Influence of the order of reagent addition on NDMA formation during chloramination [J]. Environ Sci Technol, 2005, 39 (10): 3811 - 3818.
- [20] Shapless C M, Linden K G. Experimental and model comparisons of low- and medium-pressure Hg lamps for the direct and H₂O₂ assisted UV photodegradation of N-nitrosodimethylamine in simulated drinking water [J]. Environ Sci Technol, 2003, 37 (9): 1933 - 1940.
- [21] Chang Ha Lee, Yun Ho Lee, Carsten Schmidt Oxidation of Suspected N-nitrosodimethylamine (NDMA) precursors by ferrate (VI): kinetics and effect on the NDMA formation potential of natural waters [J]. Water Res, 2008, 42 (1 - 2): 433 - 441.
- [22] Kommneni S, Ela W P, A mold R G, *et al* NDMA treatment by sequential GAC adsorption and Fenton-driven destruction [J]. Environ Eng Sci, 2003, 20 (4): 361 - 373.
- [23] Eva Steinfeld-Darling, Marco Zedda, Megan H. Evaluating the impacts of membrane type, coating, fouling, chemical properties and water chemistry on reverse osmosis rejection of seven nitrosoalkylamines, including NDMA [J]. Water Res, 2007, 41 (17): 3959 - 3967.

电话: (021) 65982691

E - mail: tjwenwu@mail.tongji.edu.cn

收稿日期: 2008 - 04 - 25