

# 饮用水中溶解性有机氮类化合物的控制研究进展

李 伟, 徐 斌, 夏圣骥, 高乃云, 严 烈, 梁 闯  
(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:** 水中溶解性有机氮类化合物 (Dissolved Organic Nitrogen, DON) 是水中溶解性有机物 (DOM) 的重要组成部分。与溶解性有机碳化合物 (DOC) 性质相似, DON 可导致耗氯量增加、膜污染、产生消毒副产物等问题。尤为需要关注的是, DON 在氯化过程中将产生强致癌性的卤化硝基甲烷与亚硝胺化合物 (如 NDMA) 等, 对水质安全构成重大威胁。因此, 对水中溶解性有机氮的控制成为目前饮用水领域关注的新问题之一。系统介绍了原水中 DON 的含量、种类、分子组成、存在形式等, 同时对 DON 控制方法进行了阐述。鉴于 DON 含量较小、种类繁多、亲水性强, 常规净水工艺很难有效控制其浓度, 水厂可通过强化混凝、膜处理、吸附与氧化来改善对 DON 的去除效果。

**关键词:** 饮用水; 溶解性有机氮; 氯化消毒; 消毒副产物

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2009)08-0022-05

## Review on Characteristics and Control of Dissolved Organic Nitrogen in Drinking Water

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

**Abstract:** Dissolved organic nitrogen (DON) is a relatively important portion of dissolved organic matter (DOM) in the water. With the similar characteristics to DOC, the existence of DON can cause the increase in disinfectant demand, the membrane fouling and the production of disinfection by-products (DBPs). More attention should be focused on that carcinogenic nitrosamines (such as NDMA) and halonitromethanes are formed during chlorination and chloramination of DON. These N-DBPs show more serious threat to human health than typical DBPs such as THMs and HAAs. Thus, how to effectively control DON in drinking water process is becoming a new research hot point. The content, classification and molecular composition of DON in drinking water as well as the controlling methods are introduced. Since DON shows complicate component, low concentration and high hydrophilicity, it is difficult to effectively control its concentration by conventional treatment processes. In order to improve DON control, other effective technologies such as advanced oxidation processes (AOPs), enhanced coagulation, membrane technology can be employed in waterworks.

**Key words:** drinking water; DON; chlorination; DBPs

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

当前我国微污染原水普遍存在有机物含量超标、含氮化合物浓度高、水体有异味、色度偏高、藻类大量繁殖等问题,鉴于水中广泛存在的溶解性有机物(DOM)极易与氯发生卤化反应,生成三卤甲烷、卤乙酸、卤乙腈、MX等氯化消毒副产物,因此对微污染原水中有有机物的消除与控制一直以来是该领域持续关注的焦点。

由于普遍认为 DOM 是由含羧基、羟基、氨基、酰胺基等芳香族、脂肪族含氮化合物组成,因此国内外研究中常采用水中溶解性有机碳(DOC)来替代 DOM(DOC占 DOM的 30%~50%),而这往往忽视了水中另外一类重要的物质——溶解性有机氮化合物(DON)。DON在 DOM中同样占有相当的比例,其含量大致为 0.5%~10%<sup>[1]</sup>,主要包括 NH类、氨基类、腈类、嘌呤、嘧啶、硝基化合物等。由于 DON绝大部分物质本身对人体具有直接或间接的毒害作用,同时这些化合物的存在对饮用水处理可产生较大影响(如消耗氧化剂和消毒剂、产生更多的卤乙酸和三卤甲烷、造成膜污染等),因此对 DON的认识和控制已逐步成为饮用水领域新的研究内容,而其强致癌的氯化副产物卤化硝基甲烷(HNMs)与二甲氨基硝胺(包含 NDMA)的产生与去除也已成为国际近来关注的重要问题。

## 1 原水和饮用水中有机氮的含量与种类

### 1.1 水中的 DON 含量

地表水中的 DON主要来源于农业用水的排放、细菌代谢产生的可溶性微生物产物(SMPs)、藻类(如蓝绿藻等)的代谢产物及土壤中存在的有机氮。目前还不能直接测定 DON的含量,主要是通过以计算总溶解性氮(TDN)和凯氏氮(DN)的差值来实现。在地表水中 DON的浓度为 0.1~10 mg/L,平均约为 0.3 mg/L(以 N计,下同)<sup>[1]</sup>。目前,欧盟要求处理后水中 DON<1 mg/L。

天然水中的有机氮通常是总溶解性氮(TDN)的主要形式(可达 60%~69%),但在受人为影响的水域(如硝酸盐的排放)只占很小的比重。地表水中的 DON浓度主要受季节温度变化的影响。Lee和 Westerhoff等学者对美国 28座饮用水处理厂进行检测发现,2003年 5月—6月原水中的 DON浓度为 0.055~0.432 mg/L(平均为 0.202 mg/L),而 10月—11月 DON浓度为 0.020~0.415 mg/L(平均为 0.171 mg/L)<sup>[2]</sup>。该结果表明,DON浓度随水温变

化表现了一个大致的趋向。为了揭示与水温的相关性, Lee等在 2004年的 2月和 7月再次进行试验,结果表明原水中的 DON浓度(0.02~0.17 mg/L)随着水温(6~22 °C)的增加而增大( $r=0.77$ )<sup>[2]</sup>。

### 1.2 水中 DON 的典型分子结构组成

DON是由包含各种含氮官能团的一系列化合物组成,主要包含 NH类、氨基类、腈类、嘌呤、嘧啶、硝基化合物等。游离氨基酸代表了大量的低分子有机氮物质,既可以作为酸类也可以当作中性物质。氨基酸结合较大的 NOM分子(即合并或水解氨基酸)、杂环氮、多胺肽与生物分子物质(即 RNA和 DNA),代表了大部分的较大分子质量的有机氮。

分析结果表明,水中的 DON分子种类复杂,其中胺类( $-\text{NH}_2$ )、酰胺( $-\text{CONH}_2$ 或 $-\text{CONH}-\text{R}$ )、硝基( $-\text{NO}_2$ )和腈类( $-\text{CN}$ )均为亲水性官能团,较易溶于水。此外,氨基酸也是 DON的重要组成部分。研究表明,结合态氨基酸(DCAA)所占 DON比重(约为 4%)明显高于游离态(DEAA)(约为 3%)<sup>[3]</sup>。游离态的氨基酸具有分子质量小、种类繁多、亲水性好、不易去除的特点。

鉴于这些含氮有机物的典型官能团易与周围的水分子形成氢键,因而增强了 NOM的亲水性,同时由于其分子质量较小,故在饮用水常规处理中很难将其去除。有研究表明,混凝—沉淀—过滤—消毒常规工艺对 DON的去除率仅为 5%~10%,因此绝大部分 DON保留在出厂水中。随着越来越多的含氮消毒副产物(N-DBPs)在出厂水中被检测出来,且这些消毒副产物毒性更强,因此如何有效控制 DON以及 N-DBPs已成为目前饮用水领域关注的新的热点问题之一。

### 1.3 水中 DON 的分子质量分布特征

目前对 DON分子质量的测定主要有两种方法:一是测定连续分子质量分布,主要通过色谱法(GPC或 HPSEC);二是测定离散的分子质量,可采用超滤(UF)方法<sup>[4]</sup>。典型地表水中 DON分子质量的分布特性如表 1所示。

从表 1可以看出,地表水中的 DON成分较为复杂,其分子质量分布较广。绝大部分 DON分子质量为 1~50 ku,与水中的 DOC分子质量分布规律大致相似<sup>[5]</sup>。有研究表明,DON的平均分子质量比 DOM的高。一般认为,常规的混凝可去除分子质量>3 ku的有机物,而强化混凝则对分子质量为 500

~3 000 u 的有机物也有去除作用。鉴于低分子质量的 DON 所占比例较大,因此常规处理很难将其有效去除。从分子质量区间上分析,强化混凝是控制水中 DON 的有效手段之一。

表 1 典型地表水 DON 的分子质量分布特征

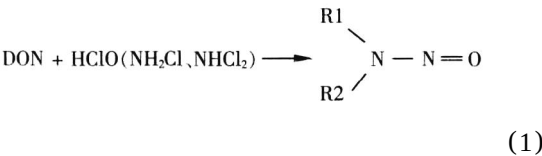
Tab 1 MW distribution of DON in typical surface water

| 研究对象 | MW 测定方法 | DON 测定方法                                 | 测定结果                                                                       |
|------|---------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 湖泊水  | UF      | 凯氏定氮和自动 phenate 法                        | 大部分 DON 分子质量为 1~50 ku,很少有分子质量 < 1 ku 和分子质量 > 50 ku 的 DON                   |
| 湖泊水  | UF      | 对冷冻干燥样品 N 分析                             | 高 MW 组分 (> 10 ku): C/N = 26.3~83.3;低 MW (< 10 ku): C/N = 47.6~142.9        |
| 河流水  | HPSEC   | TDN (湿式化学消解法)-亚硝酸盐 [N - (1 - 萘)乙二胺光度法]-铵 | 高 MW 组分 (> 30 ku): 6.5%~37%,平均为 20%;低 MW 组分 (720~3 700 u,平均为 2 300 u): 80% |
| 河流水  | UF      | 对冷冻干燥样品 N 分析                             | < 1 ku 的 DON: 27%, 1 ku~0.45 μm 的 DON: 57%, > 0.45 μm 的 DON: 16%           |

2 水中 DON 的氯化反应特性

在氯化消毒过程中,水解生成的强氧化性的 HCD 可有效穿透细胞壁杀灭细菌。但是当水中存在大量有机物时,会发生加成和取代作用而生成多种对人体有害的卤代和非卤代有毒有害有机物,即消毒副产物 (DBPs)。微污染原水中 DON 在自由氯和化合氯条件下可生成多种消毒副产物,其中 DON 与水中有机碳化合物的氯化反应一致,其氯化消毒副产物主要包括三卤甲烷 (THMs)、卤代乙酸 (HAAs)、卤代乙腈 (HANs)、3 - 氯 - 4 - (二氯甲基) - 5 - 羟基 - 2 - (5 氢) - 咪唑酮 (MX) 等。除常规副产物外,近些年来,DON 经氯化消毒生成的副产物还有亚硝胺类物质 (Nitrosamines),鉴于该物质具有更强的致癌特性,目前已成为该研究领域的前沿问题<sup>[6]</sup>。

氯化过程中亚硝胺类消毒副产物的生成反应方程见下式<sup>[7]</sup>:



目前已知的包含 NDMA 在内的亚硝胺主要有 7 种,其分子结构以及相应的物理化学性质分别如表

2 所示<sup>[8]</sup>。  
表 2 典型亚硝胺的某些分子特性

Tab 2 Physical and chemical characteristics of typical nitrosamines

| 亚硝胺种类 | 分子式                                              | 相对分子质量 | 辛醇-水分配系数 (log K <sub>OW</sub> ) | 20 °C 时水扩散性 (D <sub>NA</sub> ) / (10 <sup>6</sup> cm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ) | 25 °C 时亨利常数 / (10 <sup>5</sup> MPa · m <sup>3</sup> · mol <sup>-1</sup> ) | 10 <sup>-6</sup> 致癌风险浓度 / (ng · L <sup>-1</sup> ) |
|-------|--------------------------------------------------|--------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| NDMA  | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub> O   | 74     | - 0.57                          | 9.90                                                                                  | 1.20                                                                      | 3                                                 |
| NMEA  | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O   | 88     | 0.04                            | 8.68                                                                                  | 1.44                                                                      | 1.5                                               |
| NPYR  | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O   | 100    | - 0.19                          | 8.06                                                                                  | 0.012                                                                     | 15                                                |
| NDEA  | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O  | 102    | 0.48                            | 7.79                                                                                  | 3.63                                                                      | 1                                                 |
| NDBA  | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> N <sub>2</sub> O  | 158    | 2.63                            | 5.75                                                                                  | 316                                                                       | 3                                                 |
| NDPHA | C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O | 198    | 3.13                            | 5.76                                                                                  | 660                                                                       | —                                                 |
| NDPA  | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub> O  | 130    | 1.36                            | 6.57                                                                                  | 2.25                                                                      | 5                                                 |

由表 2 可以看出,与一般常规消毒副产物 (如三卤甲烷和卤乙酸) 相比,亚硝胺是一类分子质量较小的物质,相对分子质量最小是 74 (NDMA),最大的是 198 (NDPHA)。而从水扩散性看,亚硝胺的扩散系数为 5.75~9.90,要高于三卤甲烷 (约为 2.7~7.9) 以及卤乙酸 (2.2~7.6)<sup>[9,10]</sup>,表明亚硝胺的水溶性要好于常规消毒副产物。从辛醇-水分配系数看,亚硝胺普遍低于常规消毒副产物 (三卤甲烷、卤乙酸)<sup>[9,10]</sup>,这表明,亚硝胺的亲脂性要比常规消毒副产物低,而亲水性则要强于常规消毒副产物。亚硝胺的致癌风险明显高于三卤甲烷和卤乙酸 (10<sup>-6</sup> 致癌风险浓度:一氯二溴甲烷为 0.6 μg/L;三溴甲烷为 4 μg/L;三氯甲烷为 6 μg/L),因此必须引起足够的重视<sup>[11]</sup>。

鉴于亚硝胺具有比三卤甲烷、卤乙酸等更小的分子质量、更好的亲水性以及更大的危害,迫切需要提高对 DON 和亚硝胺的认识,同时也对今后给水处理提出了更高的要求。

3 饮用水中 DON 的控制技术

3.1 常规处理工艺对 DON 的去除效果

常规给水处理工艺包括混凝、沉淀、过滤、消毒,以去除浊度、色度和细菌、病毒为主。而其中对有机物去除起主要作用的是混凝工艺。通常情况下,常规处理工艺对原水中 DOC 的去除率大约为 30%<sup>[12]</sup>,大部分溶解性有机物仍存在于出厂水中,对居民饮水安全构成威胁。鉴于 DON 物质分子质量小、亲水性强,因此从理论上分析常规处理工艺很难将其去除。Lee 和 Westerhoff 对美国 28 家给水厂

的处理结果进行了统计,其结果如表 3所示。

表 3 常规处理工艺对 DON 的去除效果比较

Tab 3 DON removal in conventional treatment processes

| 处理工艺                      | 原水 DON 浓度<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) | DON 去除<br>率 /% |
|---------------------------|--------------------------------------|----------------|
| 常规混凝                      | 0. 2                                 | 9              |
| 投加阳离子聚合物进行混凝              | 0. 2                                 | 23 (平均值)       |
| 生物滤池 (不加 O <sub>3</sub> ) | 0. 2                                 | 16             |
| 生物滤池 (加 O <sub>3</sub> )  | 0. 2                                 | 34             |

结果发现:在原水 DON 浓度平均为 0. 2 mg/L 的条件下,常规处理工艺对 DON 的去除率仅为 9%,而采用无机混凝剂与阳离子聚合物助凝工艺对 DON 的去除率可达 23%。因此,采用聚合物和明矾的组合投加方式,可使 DON 的去除率提高 5% ~ 20%。与 DOC 去除效率相一致,常规的水处理工艺对 DON 的去除效果也同样非常有限<sup>[13]</sup>,因此开发新的强化处理工艺是今后的研究方向之一。

3. 2 膜技术控制水中 DON

由于 DON 分子含量低、成分复杂,极性、酸碱性差异明显,分子质量分布广,通常的膜处理工艺(微滤与超滤)对 DON 的去除效果不明显<sup>[14]</sup>,为了强化对 DON 的去除能力,通常采用和 PAC 工艺联合使用。Maria Tomaszewska 等人对欧洲 12 家水处理厂的 DON 去除效果进行了研究,这些水厂采用 PAC / UF 组合工艺,活性炭采用 CWZ 11 和 CWZ 30 两种型号,平均孔径分别为 2. 2 nm 和 2. 1 nm,工作压力为 0. 3 MPa,流量为 58 L / h。分别选取 PAC 投量为 50 ~ 100 mg / L 时进行试验,结果表明组合工艺对 DON 的总去除率提高了 45%<sup>[15]</sup>。分析其原因是 PAC 可吸附因分子质量过小而穿透超滤膜的 DON 小分子组分,同时也会减少污染物对膜的附着,因此组合工艺不但可以提高对 DON 的截留效果,还可以降低膜污染。

为了研究反渗透膜和纳滤膜对 DON 的去除机理和影响因素,Yeom in Yoon 等人考察了 6 种 RO 膜和 2 种 NF 膜对含有小分子质量的 DON 原水的去除效果,其中 RO 膜的孔径为 0. 33 ~ 0. 35 nm,正常压力为 1. 035 ~ 1. 550 kPa, NF 膜的孔径为 0. 43 ~ 0. 45 nm,正常压力为 518 ~ 690 kPa。结果表明,6 种 RO 膜对 DON 的平均去除率 (65%) 要高于 NF 膜 (50%)<sup>[16]</sup>。Yeom in Yoon 等人认为 DON 的分子质量大小是影响膜处理效果的主要因素,NF、RO 对

有机物的去除效果与  $r_{i,s} / r_p$  ( $r_{i,s}$  为溶质颗粒直径; $r_p$  为膜孔径) 比值有关,一般来说  $r_{i,s} / r_p > 0. 8$  时膜对 DON 的去除效果较好, $r_{i,s} / r_p < 0. 4$  时则 DON 不易被去除。除此之外,DON 的去除效果还与 DON 的结构有关,通常带电的、结构复杂的分子容易被去除<sup>[16]</sup>。采用膜技术对 DON 具有良好的去除效果,如何有效进一步提高 DON 的截留效率以及控制膜污染是今后研究的重点内容。

3. 3 氧化吸附法控制 DON

Licia Guzzella 等人以 Como 湖水为原水,通过对比试验检测了不同方法对水中溶解性有机氮的去除效果<sup>[17]</sup>,结果如表 4 所示。

表 4 几种氧化吸附工艺对 Como 湖水中 DON 的处理工艺比较

Tab 4 Results of several oxidation and adsorption processes for treatment of DON in water of Lake Como

| 控制技术        | 材料                                                           | 特性                                                                                                                                                                                                     | DON 的去<br>除率 /% |
|-------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 固相吸<br>附过程  | GAC                                                          | 表面积为 1 000 ~ 1 100 m <sup>2</sup> / g;<br>密度为 480 g / L; 平均颗粒粒<br>径为 0. 9 ~ 1. 1 mm                                                                                                                    | 约 16            |
|             | XAD - 4                                                      | 表面 积 ≥ 700 m <sup>2</sup> / g; 密度为<br>620 g / L; 粒径为 0. 3 ~ 1. 2 mm                                                                                                                                    | 约 13            |
|             | Ambersorb<br>563                                             | 表面积为 550 m <sup>2</sup> / g; 密度为<br>530 g / L; 粒径为 0. 25 ~ 0. 71<br>mm                                                                                                                                 | 约 9             |
| AOP         | O <sub>3</sub> / UV                                          | 反应器容积为 41 L, 泵流量为<br>900 L / h, UV 发射强度为<br>40 000 mV s / cm <sup>3</sup> , 氮气灯的频<br>率和波长分别为 50 Hz, 185 ~<br>254 nm, 臭氧量为 0. 4 mg / L,<br>高级氧化前先通入 2 mL / min<br>的 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (35%) | 5 ~ 13          |
|             | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / O <sub>3</sub><br>/ UV       |                                                                                                                                                                                                        |                 |
| AOP +<br>吸附 | O <sub>3</sub> / UV +<br>GAC                                 | —                                                                                                                                                                                                      | 18 ~ 24         |
|             | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / O <sub>3</sub> /<br>UV + GAC | —                                                                                                                                                                                                      |                 |

由表 4 可知,单独使用固相吸附过程或 AOP 并没有使水中的 DON 得到有效去除,然而两者的联合使用却能有效降低 DON 浓度。试验结果表明,AOP - GAC 联合处理工艺对 DON 的去除最为有效,且在 O<sub>3</sub> / UV 氧化工艺中投加 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 可明显改善去除效果。因此,研究者认为 AOP - GAC 组合工艺是处理 DON 的有效方法之一。

4 结论与展望

① 饮用水中的有机氮类化合物来源广泛,种

类繁多,并与水温、水文条件有很大的关系,随着对 DON 重视程度的提高, DON 的种类、结构特性及分子质量分布等将得到更深入的研究。

② DON 物质在氯化消毒过程中会生成具有强致癌性的卤化硝基甲烷和亚硝胺化合物等消毒副产物。但目前对其生成机理及控制方法尚没有足够的认识,鉴于 NDMA 的危害,对其进行有效控制必将成为日后研究的热点方向之一。

③ 饮用水中 DON 含量低,种类繁多,亲水性强,在常规工艺中很难有效控制其浓度,目前强化絮凝处理技术是应用最为广泛的方法,但面临去除效率不高的问题。应用膜处理技术可控制出厂水中的 DON 浓度,但存在膜污染、成本高等问题,限制了其推广应用。因此探索有效的 DON 控制方法,也是目前该领域发展的方向之一。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Westerhoff Paul, Mash Heath. Dissolved organic nitrogen in drinking water supplies: a review [ J ]. J Water S R T - Aqua, 2002, 51 ( 8 ): 415 - 448
- [ 2 ] Lee W, Westerhoff P, Esparza-Soto M. Occurrence and removal of dissolved organic nitrogen in US water treatment plants [ A ]. J Am Water Works Assoc, 2006, 98 ( 1 ): 102 - 110
- [ 3 ] Zhao Yuan-Yuan, Boyd J, HRUDEY S E, *et al*. Characterization of new nitrosamines in drinking water using liquid chromatography tandem mass spectrometry [ J ]. Environ Sci Technol, 2006, 40 ( 24 ): 7636 - 7641
- [ 4 ] Koukouraki E, Diamadopoulos E. THM formation during chlorination of treated municipal wastewater [ J ]. Water Sci Technol: Water Supply, 2002, 2 ( 3 ): 235 - 242
- [ 5 ] Sirivedhin T, Gray K A. Comparison of the disinfection by-product formation potentials between a wastewater effluent and surface waters [ J ]. Water Res, 2005, 39 ( 6 ): 1025 - 1036
- [ 6 ] Leenheer Jerry A, Dotson Aaron, Westerhoff Paul. Dissolved organic nitrogen fractionation [ J ]. Ann Environ Sci, 2007, 1 ( 2 ): 45 - 56
- [ 7 ] Yinan Q, Chii Shang, Lo Irene M C. Formation of haloacetic acids during monochlorination [ J ]. Water Res, 2004, 38 ( 9 ): 2375 - 2383
- [ 8 ] Schreiber IM, Mitch William A. Nitrosamine formation pathway revisited: the importance of chloramine speciation and dissolved oxygen [ J ]. Environ Sci Technol, 2006, 40 ( 19 ): 6007 - 6014
- [ 9 ] Choi J, Valentine R L. N-nitrosodimethylamine formation by free-chlorine-enhanced nitrosation of dimethylamine [ J ]. Environ Sci Technol, 2003, 37 ( 21 ): 4871 - 4876
- [ 10 ] Mitch W A, Sedlak D L. Formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) from dimethylamine during chlorination [ J ]. Environ Sci Technol, 2002, 36 ( 4 ): 588 - 595
- [ 11 ] Gopal K, Tripathy S S, Bersillon J L, *et al*. Chlorination byproducts, their toxicodynamics and removal from drinking water [ J ]. J Hazard Mater, 2007, 140 ( 1 - 2 ): 1 - 6
- [ 12 ] Wontae Lee, Westerhoff Paul. Dissolved organic nitrogen removal during water treatment by aluminum sulfate and cationic polymer coagulation [ J ]. Water Res, 2006, 40 ( 20 ): 3767 - 3774
- [ 13 ] Lee S, Lueptow R M. Toward a reverse osmosis membrane system for recycling space mission wastewater [ J ]. Life Support Biosph Sci, 2000, 7 ( 3 ): 251 - 261
- [ 14 ] Tomaszewska M, Mozia S. Removal of organic matter from water by PAC/UF system [ J ]. Water Res, 2002, 36 ( 16 ): 4137 - 4143
- [ 15 ] Lee S, Lueptow R M. Reverse osmosis filtration for space mission wastewater: membrane properties and operating conditions [ J ]. J Membr Sci, 2001, 182 ( 4 ): 77 - 90
- [ 16 ] Yeom in Yoon, Richard M Lueptow. Removal of organic contaminants by RO and NF membranes [ J ]. J Membr Sci, 2005, 261 ( 1 - 2 ): 76 - 86
- [ 17 ] Guzzella Licia, Feretti Donatella, Monarca Silvana. Advanced oxidation and adsorption technologies for organic micropollutant removal from lake water used as drinking-water supply [ J ]. Water Res, 2002, 36 ( 17 ): 4307 - 4318

电话: 13524542953

E-mail: tjwenwu@tongji.edu.cn

收稿日期: 2008 - 11 - 11