

## 安全消毒技术研究展望

周鸿 张晓健

清华大学环境工程与科学系 北京 100084

**摘要:** 本文对饮用水安全消毒技术研究的必要性进行了阐述, 总结了国内外在本方向的研究进展, 并对今后的发展趋势进行了展望。

### 1. 前言

饮用水微生物安全性是与人民健康休戚相关的问题。因为饮用水水源容易受到粪便和生活污水等的污染, 管网水在输送过程中也可能由于各种原因受到污染, 会使水中微生物增加, 其中的致病菌可能引起多种水致疾病(water-related disease), 如贾第虫病、隐孢子虫病、肝炎、脊髓灰质炎、细菌性痢疾等等, 一旦发作, 便会引起某个地区爆发性流行, 涉及人数多, 影响大。

给水处理工艺中的消毒环节就是为了降低微生物风险而设的。一般将灭活水中绝大部分病原体, 使水的微生物水平满足人类健康要求的技术称为消毒, 其含义为: 清除或杀灭病原微生物及其它有害微生物, 使其达到无害的程度。

一百多年来, 饮用水消毒为人类控制水致疾病、提高供水微生物安全性起到了至关重要的作用, 大大降低了水致疾病的发病率。除原虫包囊外, 良好的饮用水消毒完全能防止绝大多数水致传染病的传播。由于氯消毒在控制传染病的流行方面获得了无可非议的成效, 世界各国普遍用氯来消毒饮用水和处理后的污水。

然而, 随着研究的不断深入, 消毒可能造成的问题也逐渐引起了人们的注意。现代工农业的迅猛发展使人工合成的化学物质越来越多, 自然水体污染状况令人忧虑。水中的微量有机污染物虽然浓度很低(一般在  $\text{ng/L} \sim \text{mg/L}$  范围内), 仅占水中有机物总量的很小一部分(以总有机碳或高锰酸盐指数等综合指标计, 一般小于 10%), 但是种类繁多, 具有较高的致突变活性。而且这些物质在水中仅部分挥发散失, 无分解能力, 难降解, 常规水处理工艺不能有效地去除以溶解状态存在的微量有机污染物。汽车尾气排放的碳氢类污染物参与光化学反应产生光化学烟雾, 生成一些对人体有害的有机污染物, 随降雨等途径进入地表水体; 城市地表径流会将城市的一些有机污染物带入, 农田径流会将农药和化肥等成分引入水体。水土流失严重则使地表的腐殖物质随地面径流进入水体, 致使地表水中天然有机物浓度普遍偏高。进入水体的各种有机污染物(包括人工合成的和自然界存在的)在消毒过程中, 有可能和消毒剂发生反应生成消毒副产物。

从 1974 年发现氯消毒会产生具有致突变和致癌性的三氯甲烷以来, 国际饮用水界研究消毒副产物已经将近 40 年。大量流行病学调查证明, 长期饮用氯消毒的水会增加人们得癌症的危险。80 年代中期, 发现了另一类非挥发性的氯化消毒副产物卤乙酸(HAAs), 与低沸点的挥发性三卤甲烷相比, 具有沸点高、不可吹脱、致癌风险大的特点, 二氯乙酸(DCAA)和三氯乙酸(TCAA)的致癌风险分别是三氯甲烷的 50 倍和 100 倍。

另一方面, 消毒剂本身是具强氧化性的化学药剂, 对生物体肯定会造成某些不利影响, 不同消毒剂可能形成的影响是不同的。例如, 二氧化氯会抑制甲状腺素的分泌, 氯胺可能引起肝脏细胞有丝分裂形式异常, 氯会影响血清胆固醇的含量等等。

由此看来, 消毒技术在降低了饮用水微生物风险的同时, 由于消毒副产物的形成提高了饮用水的化学物风险, 消毒剂本身对饮用水的安全性也有一定的影响。要保证饮用水的微生物安全性和化学物安全性的统一, 研究安全的消毒技术成为必然, 即保证饮用水微生物安全性的同时尽量降低化学物风险。

### 2. 国内外消毒技术研究进展



## 2.1 寻求替代消毒剂及多种消毒剂结合使用

选择饮水消毒剂时应考虑六个因素<sup>[1]</sup>：①杀灭病原体的效果及其对生物膜的控制能力；②有没有剩余消毒剂及剩余消毒剂的稳定性；③对水质感官性状会造成什么影响；④消毒剂及消毒副产物的毒理学影响，如对人体健康可能造成的影响及预防或消除不利影响的可能性；⑤工程实践中控制和监测的难易程度；⑥经济和技术上的可行性。化学性质稳定、有一定的持续作用、毒副作用小、能有效控制生物膜、生成消毒副产物少的消毒剂是水处理工作者的理想选择。

70年代中期至80年代开始，普遍采用氯胺代替氯作为第二消毒剂维持配水管网中的消毒作用，因为氯胺形成的三卤甲烷量大大少于氯。之后，对二氧化氯、臭氧、紫外线等各种替代消毒剂的研究也逐渐展开。至今为止，对于不同消毒剂在实验室和现场条件下的消毒效果、消毒副产物的形成状况等问题都有了一定的了解。国内外的实验室研究和给水实践经验证明，采用氯胺、二氧化氯、臭氧、紫外线等消毒时，形成的副产物较氯消毒时少。组合消毒工艺常常能达到较好的效果。

**氯胺** 氯胺在水中衰减慢，分散性好，穿透生物膜能力较强；能很好地控制军团菌的生长，军团菌有时能从氯消毒后的水中恢复，但不能从氯胺消毒的水中恢复，可以减少90%的军团菌发病者<sup>[2]</sup>；引起的管网腐蚀少于连续氯消毒。其有效成分是一氯胺。

改变预先配制的氯胺溶液的pH值、氯氮的重量比和氯化物的浓度，研究这些因素对氯胺消毒过程中溶解性有机卤化物（DOX）、三卤甲烷（THMs）、卤乙酸（HAAs）和卤化腈（CNX）四类消毒副产物的形成特点。结果表明<sup>[3]</sup>，低pH值、高Cl<sub>2</sub>:N比的条件下，总指标DOX和具体的副产物指标DBPs均较高，且随pH值的升高和Cl<sub>2</sub>:N比的下降而降低；氯化物浓度的增加会提高溴代副产物和DOX的生成量。由于二卤乙酸的生成，氯胺消毒中卤乙酸的问题比三卤甲烷的问题更为突出；而且THMs、六种HAAs和卤化腈所占比例不到总溶解性有机卤化物的35%。所以，采用氯胺消毒的水厂在确定适宜的工艺条件时应该考虑DBPs和DOX两个指标，才能全面反映消毒副产物的状况。

**二氧化氯** <sup>[4]</sup> ClO<sub>2</sub>是较强的一种氧化剂，能氧化有机结合铁、锰，能有效地控制生物膜的蓄积，并能将附着在其上的细菌暴露在消毒剂前，有利于杀灭细菌。在饮用水条件下，不会形成氯酚。ClO<sub>2</sub>可以单独使用，也可以与其他消毒剂联合使用。例如，前处理中用ClO<sub>2</sub>作为主消毒剂和氧化剂，在滤后水中加氯或氯胺，既能防止THMs的形成，又能避免管网水中ClO<sub>2</sub>、ClO<sub>2</sub>和ClO<sub>3</sub>的总量过高，威胁用户健康。也可以采用氯作为主消毒剂，在滤后水中加ClO<sub>2</sub>，这种方法较单独使用ClO<sub>2</sub>的成本低，体现出ClO<sub>2</sub>的稳定性，而且可以防止氯臭。

值得注意的是，二氧化氯的消毒副产物ClO<sub>2</sub>和ClO<sub>3</sub>毒理学影响较大<sup>[5]</sup>，可能会抑制人体甲状腺素的分泌，引起胎儿小脑重量下降、神经行为作用迟缓或细胞数下降，还可能造成婴儿大脑重量下降、神经系统作用迟缓或皮肤增生。所以，采用二氧化氯消毒应该严格控制管网水中ClO<sub>2</sub>、ClO<sub>2</sub>和ClO<sub>3</sub>的含量。

**臭氧** 由于臭氧的强氧化作用、极优的消毒效果，欧美及加拿大的很多水厂都采用它作为消毒剂或替代氯应用于前处理中；相应的，对臭氧消毒的副产物研究也日渐深入。实验表明<sup>[6]</sup>，预臭氧化后氯消毒产生的THMs和HAAs都减少了。与没有预臭氧化的纯氯消毒过程相比，DBPs减少了28.3%，水中的致突变物质减少了54.7%。醛类是臭氧消毒的普遍副产物，如氯醛水合物；臭氧化会将一部分TOC转换为AOC，增加水的生物不稳定性。研究还发现，预臭氧化一氯化系统中氯醛水合物的生成较氯化消毒系统少。

因为臭氧不够稳定，容易自行分解，半衰期短，应就地生产使用；消毒设备复杂，对操作人员的技术水平要求高；投资大，电耗高；当水质水量变化时，调节投加量比较困难；在水中的溶解度低，尾气处理不当会形成空气污染；若作为最终消毒对水源及管网要求高。所以，以我国现有情况看，大量使用臭氧消毒的可行性不高。

**紫外线** 其主要优点是：处理后的水无色无味，不会产生有害副产物。但是其消毒效力受水中悬浮物含量影响大，无消毒余量，且消毒费用较高。目前我国的紫外线消毒一般用于少量水处理，如高级宾馆或饮料业。

**不同消毒剂比较** 下表列出某研究使用不同消毒剂组合工艺时消毒副产物浓度的变化情况<sup>[7]</sup>，可以看出

臭氧-氯胺工艺中产生的三卤甲烷、总有机卤化物（TOX）、卤乙酸、卤乙腈几乎都是下降的，百分比从7~98%不等，但对于卤化酮、三氯硝基甲烷、水合氯醛和氯化腈浓度的影响比较微弱。

实验项目及试验厂		氯消毒 改为臭氧-氯消毒		氯胺消毒 改为 臭氧-氯胺消毒			氯消毒 改为臭氧-氯胺消毒	
		A厂	D厂	B厂	C厂	D厂	B厂	D厂
		浓度的变化（以%计）	三卤甲烷	-40	+12	-96	-84	-23
总有机卤化物	-40		-7	-70	-59	-8	-81	-81
卤乙酸	-50		-13	-81	-65	-	-90	-90
卤乙腈	-36		-18	-96	-37	-16	-98	-92
醛	未测		+117	未测	+459	+340	未测	+67
浓度的变化(以mg/L计)	卤化酮	+0.2	+1.0	+0.14	+0.12	+0.68	-0.3	-0.6
	三氯硝基甲烷	+0.4	+0.3	-0.08	+0.16	+0.84	0	+0.8
	水合氯醛	+2.3	+8.8	-1.68	-0.34	+2.56	-9.4	-15.2
	氯化腈	未测	0	-0.2	+0.28	+1.4	-0.3	+2.9

二氧化氯-氯胺或二氧化氯-氯，氯-氯胺等组合对于降低消毒副产物浓度是很有效的，均有给水实践证明。

### 2.2 改变氯的投加量和投加点

一般地，在混合池、滤池和清水池等处投加消毒剂。消毒剂浓度越高，越容易形成消毒副产物。所以，今后应少用折点加氯处理受污染水源水。

**预氯化** 原水中的有机物会与消毒剂发生反应，而常规水处理工艺对于已经形成的许多副产物的去除率是很低的。所以，预氯化会大大提高出厂水中消毒副产物的浓度；取消预氯化或者降低预氯化时所采用的氯量，能有效降低消毒副产物的生成量。

**后氯化** 滤池后或者清水池中加氯是为了保证出厂水微生物安全性，出厂水余氯量通常在0.8~1.5mg/L左右。事实上，水中的有机物会在管网中继续与消毒剂反应，消毒副产物浓度会不断增加。当水厂远离城市，清水池停留时间较短，输水管线较长时，管网水消毒副产物浓度可能是出厂水的2~4倍。

**多点加氯** 降低后氯化量，在管网中某个或某些地方投加消毒剂，以满足管网水的消毒剂余量要求，保证微生物安全性。法国某配水管网建立了两个加氯站<sup>[8]</sup>，出厂水氯的浓度下降了1/3，仅为0.4~0.6mg/L，每个加氯站的投加量为0.25mg/L，就可以保证管网水余氯量要求，总三卤甲烷（TTHMs）量下降了20%。这种方法降低了整个管网的余氯量水平，工艺较简单，有效地减少了消毒副产物的形成。

### 2.3 不同给水工艺对消毒副产物及其前体物的去除作用

不同给水工艺对消毒副产物及其前体物的去除作用是不同的。一般认为，消毒副产物的前体物有天然有机物（NOM）和人工有机物两大类。前者主要包括腐殖酸和富里酸，后者的成分则极其复杂。饮用水处理中，NOM可以通过混凝、颗粒活性炭（GAC）吸附、膜滤或生物降解去除，也可以在氧化剂的作用下转化，如臭氧氧化或其他深度氧化工艺。掌握天然有机物的反应活性对于使DBPs的形成最少、鉴别NOM中哪些组分是去除的重点是非常关键的。鉴定不同天然有机物的组成，并采用不同消毒剂对有机物的不同组



分进行反应活性实验有助于优化水处理工艺。

**前体物特性研究<sup>[9]</sup>** 一般会根据Thurman等提出的方法先对原水中的有机物进行提取分离,采用树脂吸附层析法,利用不同组分的吸附特性将6个组分--疏水酸性物质、疏水中性物质、疏水碱性物质、亲水酸性物质、亲水中性物质、亲水碱性物质分离,然后利用不同化学分析仪器分析各部分的有机特性,如是否含羧酸或酚酸、紫外线吸收特性如何、是否含有芳香环等。最后,采用消毒剂对有机物(腐殖酸和富里酸等)或有机物的不同组分分别进行氯化,测定其三卤甲烷的形成潜能(THMFP)、卤乙酸形成潜能(HAAFP)及可同化有机卤代物形成潜能(AOXFP)并比较各部分的氯化活性。

**常规处理工艺** 常规水处理工艺对有机物的去除率一般在20~30%<sup>[10]</sup>,对已形成的消毒副产物的去除率比较低。不同原水中溶解性有机物质的各个组分所占比例不同,其消毒副产物形成潜能也不同。1999年,新泽西技术研究所的Marhaba Taha F.和Van Doanh以位于新泽西北部的某给水处理厂为研究对象<sup>[11]</sup>,发现原水有机物组分以亲水酸最多,常规水处理工艺对亲水中性物质、亲水酸和疏水酸的去除率较高,约为65%。对6种组分的氯化消毒副产物形成潜能(7天)进行研究,发现亲水酸是形成THM活性最强的前体物,疏水中性物质则是形成HAAs的主要前体物。各组分的形成潜能沿水工艺减小,尤其是经过混凝/沉淀之后,说明该给水工艺对前体物有一定的去除作用。

**去除消毒副产物或前体物的其它工艺** 活性炭能有效去除水中的 $\text{ClO}_2$ 、 $\text{ClO}_2^-$ 和 $\text{ClO}_3^-$ ,也能较好的去除卤乙酸,去除率可以达到50%。臭氧对已经形成的三氯甲烷没有去除作用,即使在臭氧投加量25mg/L、接触时间4~5分钟条件下,也不能有效分解之,但是对某些人工合成的有机物有较强的氧化去除作用,如苯并芘、二甲苯等<sup>[12]</sup>。臭氧-活性炭联用则可以充分发挥两者的功能,大大提高有机物及其副产物的去除率,可有效改善出水水质。

另外,铁盐对去除二氧化氯消毒的副产物有较好的效果,它能将有害的 $\text{ClO}_2^-$ 和 $\text{ClO}_3^-$ 转变成无害的 $\text{Cl}^-$ <sup>[13]</sup>。对于挥发性副产物,吹脱法是有效途径之一。光催化氧化、生物活性炭、膜等方法也是很有发展前途的工艺。

## 2.4 建立消毒剂衰减及消毒副产物形成数学模型

为了定量掌握消毒过程中消毒剂和消毒副产物的变化情况,研究者建立消毒剂衰减及消毒副产物形成的动力学模型,以预测消毒效果和消毒副产物的形成量。

1992年,Jafvert和Valentine提出了氯胺在水中的衰减模型;1996年,Ozekin等对该模型进行了完善。模型考虑了水溶液中氯和氨的一系列复杂反应,可以预测不同反应条件下氯胺自行分解的情况。为了验证模型对实际氯胺消毒的拟合程度,爱荷华大学Peter J. Vikesland等从5个原水差异很大的城市取水,在实验室向水样中投加氯胺进行了相关实验研究。

1999年,曼彻斯特大学市政与环境工程系John N. McClellan等在前人的研究基础上,考虑水源的实际情况(含多种有机物),将消毒反应理论与实践经验相结合,对经验模型进行改进,建立了一系列微分方程,可以定量描述氯衰减和氯化消毒副产物(三卤甲烷和卤乙酸)形成过程<sup>[14]</sup>。与经验模型相比,改进后模型的精确性和灵活性更好,预测不同种类的消毒副产物的形成过程时,只要添加一个分解因子就可以了。但是研究者认为,这只是建立饮用水中氯/副产物反应动力学的通用型理论模型的第一步,有待进一步完成的工作包括:实验研究溴化物对模型的影响;模拟其它副产物(包括THM和HAA中的三氯甲烷、二氯乙酸等等);对当前模型中被看作常数的快速反应进行深入研究;在直接测定参数(UV吸收度或TOC等)和反应性天然有机物质(NOM)浓度之间建立相关关系。

1997~2000年,曼彻斯特水资源Authority的Windsor Sung、Betsy Riley-Matthews等模拟了DBP(包括三卤甲烷和卤乙酸)的形成,建立了半经验模型,研究对象是未经过滤的地表水系统<sup>[15]</sup>。模型参数包括氢氧化物浓度、氯衰减动力学参数或已反应的氯浓度、254nm处的紫外线吸收率和藻类浓度。其中,将温度和pH值的影响综合考虑,用氢氧化物浓度表示,以反映氢氧根离子的浓度、说明碱催化水解的情况;UV254测定值是水中可反应天然有机物浓度的替代参数,与有机物的浓度有一定关系。由于不同给水工艺对DBPs的形成及形成速率的影响因素有不同程度的影响,为预测DBPs的浓度带来了一定的难度。

## 2.5 采用先进的测试手段对不同消毒剂所产生的消毒副产物进行鉴别和分析

**四种主要消毒剂** 1992~2000年,美国国家Exposure研究实验室S.D.Richardson等花了8年时间<sup>[16]</sup>,对四种最常用的消毒剂--氯、氯胺、二氧化氯和臭氧在实验室与腐殖质反应的产物、实际给水处理中的消毒副产物均进行全面研究。采用各种先进的仪器设备和分析方法(包括液相色谱-质谱联机分析、低压/高压气相色谱-质谱联机分析等),已经可以鉴定200多种消毒副产物,其中有许多是以前从来没有被报告过的。

研究表明,氯消毒会形成大量的卤化副产物;氯胺形成的卤化副产物类型和氯相同,但是其种类较氯少且浓度低于氯所产生的副产物;臭氧除生成二溴丙酮腈外不生成其他卤化副产物,如果水中溴化物浓度较高,则会形成二溴丙酮腈;在水中溴化物浓度很低的情况下,二氧化氯几乎不生成副产物,仅仅观察到两种卤化副产物。以Israel的饮用水为例,测定表明,一旦水中的溴化物浓度升高,会生成了一系列的溴代化合物,如1,1,3,3-四氯丙酮的溴代物1,1,3,3-四溴丙酮。1,1,3,3-四氯丙酮是水中没有溴化盐存在时二氧化氯消毒的副产物。四种消毒剂的非卤化副产物类型(如乙醛、羧酸等)则与已进行的众多研究获得的结果很一致。

Heller Grossman等发现,若以含溴化物较多的湖水为水源,氯胺消毒产生的CNBr、THMs和HANs都比氯消毒产生的少;二氧化氯产生的这些副产物更少。但Symons、Smith等研究者发现,氯胺形成的二卤代化合物(如二氯乙酸)与三卤代化合物(如THMs和三氯乙酸)相比,数量比较可观,值得引起注意。

不同DBPs的影响 使用不同消毒剂时,已知的各种DBPs对TOX、TOCl、TOBr生成量的贡献是不同的,在8.2~60%之间变化<sup>[17]</sup>。氯胺消毒过程中,TOCl的主要部分是由与NH<sub>2</sub>Cl的平衡中存在的极少量自由氯与腐殖质的反应形成的。TOBr和总醛的生成量与每种消毒剂的氧化-还原电位(势)直接相关;一般的,电位越高,生成的醛类物质和TOBr越多,氯胺、ClO<sub>2</sub>、Cl<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>的氧化-还原电位依次为1.13v、1.21v、1.29v、2.07v,生成的醛类物质和TOBr依次增加。

至今为止,已知不同消毒剂会形成的消毒副产物的主要种类如下表所示。

消毒剂	消毒副产物的主要种类
氯	氯仿、卤乙酸、卤化腈
氯胺	卤乙酸、氯化腈、溴化腈
二氧化氯	亚氯酸盐、氯酸盐、有机性副产物
臭氧	溴酸盐、醛类物质、酮类物质、羧酸、二溴丙酮腈

卤乙酸分析方法<sup>[18]</sup> 美国宾西法尼亚州立大学谢跃峰等采用液-液萃取、毛细管电泳法和直接紫外线检测相结合的方法分析卤乙酸,毛细管电泳法使直接确定饮用水水样中的卤乙酸浓度成为可能,无需对水样进行衍生化前处理。对九种卤乙酸(包括一卤乙酸、二卤乙酸和三卤乙酸)进行了分析,其中,一卤乙酸和二卤乙酸的检出限低于3mg/L,三卤乙酸的检出限在4.0~7.0mg/L范围内。除三溴乙酸以外,其它8种卤乙酸的加标回收率为74.8~107%,在美国标准方法要求的范围内(100±30%)。萃取与反萃取需要30~45分钟,毛细管电泳法所需时间为12分钟。进一步需要研究的问题有:①改善三卤乙酸出峰的对称性;②提高实验方法的灵敏;③简化样品萃取过程或使萃取过程自动化等。

### 3. 发展趋势

#### 3.1 法规建设日趋完善

以我国为例,新近颁布的“生活饮用水水质卫生规范”中,增加了一些新的消毒副产物的规定。虽然大部分设为非常规项目,毕竟规范中已经有了相关限定值。如:

亚氯酸盐 0.2mg / L(适用于二氧化氯消毒)、

一氯胺 3 mg / L、

三卤甲烷中每种化合物的实测浓度与其各自限值的比值之和不得超过 1、

溴仿 0.1mg / L、  
二溴一氯甲烷 0.1mg / L、  
一溴二氯甲烷 0.06mg / L、  
二氯乙酸 0.05mg/L、  
三氯乙酸 0.1mg / L、  
三氯乙醛（水合氯醛）0.01mg / L、

其中，三卤甲烷包括氯仿、溴仿、二溴一氯甲烷和一溴二氯甲烷共四种化合物。

这表明我国对消毒副产物问题和饮用水安全性问题的重视。

### 3.2 注重饮用水中污染物对人体健康影响的研究

用长期的动物实验确定不同消毒剂及其消毒副产物的毒性或对人体健康的不良影响是十分重要的工作，应该用有力的证据来尽量减少危害性评价中的不确定性。因为 DBPs 可能形成的健康影响包括致癌性、抑制个体的生长繁殖、对免疫系统的毒性及对神经系统的毒性影响等，问题很复杂，所以美国环保局（USEPA）、美国国家环境健康科学研究所和美国陆军部三方合作，正在努力建立一个关于 DBPs 对生物影响及其具体机理的全面的资料数据库。

### 3.3 综合比较各种消毒剂在形成副产物方面的特点

对于各种消毒剂所产生的副产物，尤其是氯化副产物的研究已经很多了，但是对这一领域的更深入的研究会不断发现新的副产物，今后应该将调查研究集中在识别多种处理方法所产生的副产物上。

### 3.4 研究给水工艺的优化组合，力图保证微生物安全性和化学物安全性的统一

对不同给水处理工艺的优化组合进行进一步研究，在保证饮用水微生物安全性的同时，尽量降低消毒副产物的生成量。

### 3.5 尝试使用更有效的参数，建立更接近于实际情况的动力学模型

由于不同模型采用的参数不同，所以其有效性和预测能力也有较大出入。引入哪些参数与实际情况最适合、最能反映消毒剂衰减和消毒副产物形成特点，都值得继续探索和研究。

## 参考文献

- [1] 蔡宏道主编. 现代环境卫生学.北京:人民卫生出版社, 1995
- [2] Kool, Jacob L.; Carpenter, Joseph C.; Fields, Barry S. Monochloramine and Legionnaires' disease .Source: Journal / American Water Works Association, 92 9 Sep 2000 p 88-96
- [3] Diehl, Alicia C. et al. DBP formation during chloramination Author Affiliation: Texas Natural Resource Conservation Commission Source: Journal / American Water Works Association 92 6 2000 p 76-90
- [4] Geo, Clifford White. Handbook of Chlorination and Alternative disinfectants. 3 rd edition. New York, 1998
- [5] Frank R. Spellman and Doanne Drinan. The Drinking Water Handbook. Lancaster, Pa.: Technomic Pub. Co.,2000
- [6] Disinfection by-products in water produced by ozonation and chlorination Hu, J.Y.; Wang, Z.S.; Ng, W.J.; Ong, S.L. Author Affiliation: Natl Univ of Singapore Source: Environmental Monitoring and Assessment 59 1 1999 Kluwer Academic Publishers p 81-93
- [7] 许葆玖, 安鼎年. 给水处理理论与设计.北京:中国建筑工业出版社,1992
- [8] Booster chlorination for managing disinfectant residuals Tryby, Michael E.; Boccelli, Dominic L.; Koechling, Margarete T.; Uber, James G.; Summers, R. Scott; Rossman, Lewis A. Source: Journal / American Water Works Association v 91 n 1 Jan 1999 American Water Works Assoc p 95-108
- [9] Huang, Winn-Jung; Yeh, Hsuan-Hsien. Effect of organic characteristics and bromide on disinfection by-products formation by chlorination. Journal of Environmental Science and Health, Part A: Environmental Science and Engineering & Toxic and Hazardous Substance Control v 32 n 8 Sep 1997 Marcel Dekker Inc p 2311-2336 1077-1204



- [10]刘文君.饮用水中可生物降解有机物和消毒副产物特性研究.清华大学博士论文.1999.
- [11] Variation of mass and disinfection by-product formation potential of dissolved organic matter fractions along a conventional surface water treatment plant Marhaba, Taha F.; Van, Doanh Author Affiliation: New Jersey Inst of Technology Source: Journal of Hazardous Materials 74 3 Jun 30 2000 Elsevier Science Publishers B.V. p 133-147.
- [12] 王占生, 刘文君.微污染源饮用水处理.北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [13] A.KATZ and N.NARKIS.Removal of chlorine dioxide disinfection by-products by ferrous salts. Environmental and Water Resources Engineering.v35 n1 p101-108,2001.
- [14] John N. McClellan et al. A Comprehensive Kinetic Model for Chlorine Decay and Chlorination By-Product Formation. Natural organic matter and disinfection by-products: characterization and control in drinking water / Sylvia E. Barrett, editor, Stuart W. Krasner, editor, Gary L. Amy, editor. Washington, D.C. : American Chemical Society, 2000.
- [15] Modeling DBP formation Sung, Windsor; Reilley-Matthews, Betsy; O'Day, D. Kelly; Horrigan, Kristin Author Affiliation: Massachusetts Water Resources Authority Source: Journal / American Water Works Association 92 5 2000 American Water Works Assoc p 53-63.
- [16] Richardson, S.D et al. Identification of new drinking water disinfection by-products from ozone, chlorine dioxide, chloramine, and chlorine. Water, Air and Soil Pollution 123 1 Oct 2000.
- [17]Xiangru Zhang et al. Characterization and Comparison of Disinfection By-Products of Four Major Disinfectants. Natural organic matter and disinfection by-products : characterization and control in drinking water / Sylvia E. Barrett, editor, Stuart W. Krasner, editor, Gary L. Amy, editor . Washington, D.C. : American Chemical Society, 2000.
- [18]Yuefeng Xie et al. Development of a Capillary Electrophoresis Method for Haloacetic Acids. Natural organic matter and disinfection by-products : characterization and control in drinking water / Sylvia E. Barrett, editor, Stuart W. Krasner, editor, Gary L. Amy, editor . Washington, D.C. : American Chemical Society, 2000
- [19]Sylvia E. Barrett et al. Natural Organic Matter and Disinfection By-products: Characterization and Control in Drinking Water-An Overview. Natural organic matter and disinfection by-products: characterization and control in drinking water / Sylvia E. Barrett, editor, Stuart W. Krasner, editor, Gary L. Amy, editor . Washington, D.C. : American Chemical Society, 2000.