

# 再生水消毒技术的水质要求与工艺评价

孙永利, 郑兴灿, 颜秀勤, 郭兴芳

(国家城市给水排水工程技术研究中心, 天津 300074)

**摘要:** 简要介绍了城市再生水水质对消毒效果的影响, 提出确保城市污水再生利用安全性所需的消毒前水质要求; 并结合城市再生水利用的实际情况, 提出城市再生水消毒效果的技术评价指标体系, 在此基础上提出了城市水消毒的组合消毒技术概念。

**关键词:** 消毒; UV 消毒; 臭氧消毒; 氯消毒

城市污水二级处理出水中的微生物一般黏附在悬浮固体上, 经过一定的深度处理后, 细菌的相对含量大幅度减少, 但其绝对值仍然很可观, 并可能存在病原菌。如果这些水作为人体直接或间接接触的城市景观用水、环境用水或杂用水, 就可能对健康造成一定的危害。为了确保再生水的卫生安全, 必须进行杀菌消毒, 以满足再生水标准中的细菌学指标要求。

## 1 消毒的前处理要求

### 1.1 污水水质对消毒效果的影响

城市污水处理厂二级或三级出水的许多水质参数对后续消毒性能具有一定的影响。目前已知的能影响消毒性能的污水特征主要包括颗粒性物质和溶解性物质的类型和浓度、有机化合物或还原性无机化合物的种类和浓度, 以及目标微生物微粒共生体的性质和程度等。表 1 是水质对 UV 消毒、氯消毒和臭氧消毒影响的总结。

表 1 污水水质对 UV 消毒、氯消毒和臭氧消毒影响的对比

污水水质	UV 消毒	氯消毒	臭氧消毒
氨	无影响或很小	与氯结合, 形成氯胺, 降低消毒效果	无影响或极低影响, 在高 pH 值下发生反应
BOD、COD 等	无影响或很小	BOD 和 COD 中含有的有机物能增大氯的需求量, 其干扰的程度主要取决于有机物的官能团和化学结构	BOD 和 COD 中含有的有机物能增大臭氧的需求量, 其干扰的程度主要取决于有机物的官能团和化学结构
硬度	影响能吸收 UV 射线的金属的溶解性, 导致碳酸盐在石英套管上沉积	无影响或很小	无影响或很小
腐殖质	UV 射线的强吸收体	降低氯的效率	影响臭氧分解速率和臭氧需求量
铁	UV 射线的强吸收体	无影响或很小	无影响或很小
亚硝酸盐	无影响或很小	被氯氧化	被臭氧氧化
硝酸盐	无影响或很小	无影响或很小	降低臭氧效率
pH	能影响金属和碳酸盐的溶解性	影响次氯酸和次氯酸根之间的分配比例	影响臭氧分解速率

TSS	UV 吸收体, 并对所嵌入细菌产生屏蔽	对内嵌细菌形成屏蔽	增大臭氧需求量, 并对内嵌细菌形成屏蔽
-----	---------------------	-----------	---------------------

只有化学消毒剂透过细胞壁, 或 UV 射线直接照射到细菌上时, 才能有效的破坏细菌, 而水中的浊度 (或悬浮固体) 能对细菌产生屏蔽作用, 因此水的浊度 (或悬浮固体浓度) 应该尽量低。当浊度 (悬浮物) 较高时, 为达到某一特定消毒指标所需的消毒剂用量也要提高; 而对于固定的浊度 (悬浮物), 存在一个相应的消毒极限, 当趋于消毒极限时, 即使消毒剂大幅度增加, 也很难进一步降低水体中微生物的含量。

另外, 污水的成分复杂, 其中的部分有机物、无机物和微生物, 尤其是一些工业成分对紫外线具有一定的吸收作用, 从而降低了水中紫外线的透射率。另外, 许多杂质会使石英套管表面结垢, 而这些污垢通过机械方法是难以去除的, 因此会降低紫外线透过灯管传输到水体中的能力, 也即降低紫外剂量, 从而影响系统的消毒性能。

而且, 污水中的部分物质能与所投加的化学试剂发生反应, 将消毒剂转化为不具备消毒能力的物质, 或消毒能力较差的物质, 这在一定程度上也会降低整体消毒能力。

## 1.2 污水消毒的基本水质要求

污水再生利用中三级处理的主要目的是增强病原体的去除能力, 附带去除其他有机或无机组分。污水二级处理或三级处理选用的工艺不同, 对污水中病原体微生物的灭活能力也不同。一般情况下, 各种污水二级或三级处理工艺中, 膜滤的病原体去除能力是最好的。

国外实验研究表明, 通过化学混凝 (沉淀) 过滤等单元处理工艺, 能去除 2 个数量级 (99%) 的脊髓灰质炎病毒。Noss 等人的研究说明, 如不投加混凝剂, 二级出水通过砂滤池或双层滤池过滤, 不能显著降低肠道病毒含量。以石灰作为混凝剂, pH 值达到 11~12 时会发生病毒灭活。反渗透能有效去除大多数病毒和所有较大的微生物。

为确保消毒的效果, 污水消毒前至少应达到表 2 规定的水质要求。

表 2 消毒前的基本污水水质要求

消毒方法 <sup>1</sup>	SS (mg/L)	BOD (mg/L)	浊度 (NTU)	氨 (mg/L)	pH
氯消毒	<20	<20	<10	见说明 <sup>2</sup>	6.0 ~ 9.0
二氧化氯	<20	<20	<10	无影响	6.0 ~ 10.0
臭氧消毒	<10	<20	<5	<1	6.0 ~ 9.0
UV 消毒	<10	<20	<5	无影响	无影响

<sup>1</sup> 不论采用哪种消毒方法, 如果希望得到更高的病原体去除效率 (即每 100 mL 污水中的埃希氏大肠菌浓度低于 10 个), 就必须确保消毒前污水的浊度小于 2 NTU。

<sup>2</sup> 氯消毒时如果存在氨, 就会发生氯胺反应, 其消毒能力低于氯化消毒; 然而, 这可以减小有毒副产品的生成量。因此, 所需氯的量与污水中氨的含量有很大关系。

资料来源: 《Disinfection of Treated Wastewater》

## 2 消毒效果的评价标准

再生水的消毒主要包括两个部分: 第一, 在进入输水管网前, 必须消除水中病原体的致病作用;

第二，水进入管网后，到达用水点之前，必须维持一定的消毒剂量，以防止可能出现的病原体危害或再生的危险。由于城市污水再生利用于城市杂用对管网末端有严格的余氯要求，因此一般应选用氯消毒或二氧化氯消毒技术，同时，在需要长距离管网输配水时，应选择具有后消毒功能的加氯消毒或二氧化氯消毒工艺，或进行技术组合，以保证再生水在管网停留的过程中不会出现微生物再次繁殖的危险。

通常可以采用以下指标对消毒效果进行评价：

- ① 生物灭活效率；
- ② 实用性；
- ③ 可靠性；
- ④ 投资与运行成本；
- ⑤ 环境影响；
- ⑥ 职业健康和安全。

根据以上指标对氯化消毒、二氧化氯消毒、臭氧消毒和 UV 消毒进行比较，结果见表 3。

**表 3 消毒方法的比较**

需考虑的因素		液氯消毒	二氧化氯	臭氧消毒	UV 消毒
需要的处理时间		30 min	≤30 min	5 ~ 10 min	30 ~ 60 s
投加量 <sup>a</sup> (mg/L)		2 ~ 20	5 ~ 10	1~3	30 ~ 40 <sup>b</sup>
对细菌的灭活效率		高	高	高	高
对病毒的灭活效率		中等偏下	中等	高	高
水质影响因素		受 pH、温度影响大	受 pH、温度影响大	受 pH 影响大、温度影响小	受 pH、温度影响小
技术的复杂程度		简单到中等	中等	复杂	简单到中等
经济性	运行费用	中等偏下	中等	中等偏上	中等偏下
	投资 (小规模到中等规模)	中等	中等	高	中偏下
	投资 (中等规模到大规模)	中偏下	中偏下	高	中偏上 <sup>1</sup>
	占地面积	大	较小	小	小
	维护工作量	大	较小	大	小
不利影响	运输过程中的安全	有	有	无	无
	现场的安全	相当大	中等	中等	较小
	对鱼类和大的无脊椎动物的毒害	有毒	有毒	无	无
	是否存在有毒的副产品	有	可能存在少量	有	无
	清洗产物的处置	无	无	无	有
	是否增加溶解性固体含量	是	是	否	否
	有无腐蚀性	有	有	有	无
高能量消耗	无	无	有	有	

有时 UV 消毒的成本要低于氯消毒或二氧化氯消毒，这主要是因为土建投资差别较大。氯消毒或二氧化氯消毒通常需要较长的接触时间，因此土建和征地费用要明显高于 UV 消毒。

<sup>a</sup> 各种药剂的投加量受所消毒水的水质、水量以及其他因素的影响较大。

<sup>b</sup> UV 投加量为其照射剂量，单位为 mW/cm<sup>2</sup>。

---

## 2.1 生物灭活效率及其可靠性

根据生物灭活效率和可靠性，如果人和/或牲畜接触处理后污水的风险很高，则最好选择微生物灭活效率较高的消毒方法。各种消毒方法对细菌一般具有较高的灭活效率，但对病毒的灭活效率则各有不同。从表 3 不难发现，氯消毒和二氧化氯消毒对病毒的灭活效果较臭氧和 UV 消毒差。

美国的研究历史已经证实氯化消毒对污水中的部分传染性微生物，例如隐孢子虫、贾第鞭毛虫和军团菌属等的效果不是很理想，Milwaukee 大规模的疾病感染事故的主要原因在于所使用的供水系统采用氯化工艺进行消毒。而 UV 消毒对这些微生物的灭活效率则较高。但是 UV 消毒也不是能去除所有病原体微生物，其中的部分抗药性微生物在较低的剂量下也能达到较高的灭活效率。因此对于不同的微生物灭活要求，应选择不同的消毒技术或工艺，如果经济可行，则有必要选择组合消毒技术。

## 2.2 职业健康和安全

根据职业健康和安全风险，污水氯化消毒产品的生产、运输、储存和处置过程中都带有一定的风险。但是，许多使用氯化消毒的污水处理厂的运行记录表明，现有的关于含氯化学品的储存和处置方面的条例能确保达到安全要求。

二氧化氯消毒虽然不存在消毒副产物问题，但气态和液态二氧化氯都不稳定，属易燃易爆品，受到冲击、摩擦或剧烈震荡，以及火星或照射时，可能引起爆炸分解，因此存在安全隐患。

对于操作人员而言，臭氧消毒的危险主要体现在所使用气体的强氧化性（同时也具有一定的毒性），以及臭氧发生器的高电压危险。

UV 消毒的主要风险是 UV 射线的照射以及 UV 灯处置时的汞问题。然而这些风险都是非常小的，随着 UV 技术的改进，这些风险将逐渐减小。

## 2.3 环境影响

在进行给定污水消毒方法的实际成本预测时，不论方案是否可行，都必须考虑人和环境的风险问题。

许多文献报道了含氯化学物质以及氯化副产物对水生环境的潜在毒理学影响问题。污水中的有机化合物能经氯化消毒转化为三卤甲烷、卤代乙酸等消毒副产物。部分水生生物对水中总余氯含量比较敏感，一些物种能忍受氯的最大值为 0.002 mg/L（新鲜水）和 0.01 mg/L（盐水）。同时，消毒副产品也可能在水生环境中积累。脱氯作用能去除残存的游离态或化合态氯，但不能有效的去除其它消毒副产品。总之，氯化消毒的出水排放到地表水体后，会对水生生态系统造成不利的影

响。如果处理后污水经氯化消毒后进行获益利用，而不是直接排放到地表水体，则其环境危害会大大降低。对于污水再利用而言，这是一种可以接受的消毒方法。必须说明的是，如果为防止微生物的再次繁殖，避免对后续输配和储存系统造成二次污染而需保持一定的余氯量，则最好选用氯化消毒或二氧化氯消毒。但是，必须控制再生水利用现场的余氯量不大于 1 mg/L。而且，即使含氯量小

---

于 1 mg/L, 有些作物也会受到伤害。因此, 当使用氯消毒的再生水进行灌溉时, 应考虑所灌溉作物的敏感性问题的。

污水中含有大量溴化物时, 也会与臭氧反应形成溴酸盐, 这也是受到控制的一种消毒副产物。。另外, 目前已经证实气态臭氧的腐蚀性和毒性对周围环境具有不利影响。而且具有较低的感知臭味阈值, 在极低的浓度下, 就能产生令人厌恶的臭味, 浓度增大至某程度后会对人体造成不利的影。

二氧化氯消毒一般不存在有毒副产品问题, 但其本身是一种有毒的化合物, 长时间接触含有二氧化氯的气溶胶, 可能会对肝、肾、中枢神经系统等造成损伤。

与其它消毒方法相比, UV 消毒的风险较低, 但所排放的出水容易发生光致化学反应和微生物种群的变异, 而且当需要进行长距离输水时, 管网中可能存在微生物再次繁殖的问题。

根据潜在环境成本的分析, UV 对环境的潜在风险较小, 其次为臭氧、二氧化氯和氯化消毒。危险等级的确定主要取决于消毒副产品生成的可能性以及出水排放到接纳水体时的潜在毒性。

## 2.4 投资和运行成本

就投资和运行成本而言, 氯化消毒是小型或中等规模处理厂长期消毒的经济措施, 而后是 UV 消毒和二氧化氯消毒, 成本最高的是臭氧消毒。综合成本的高低主要取决于处理厂的规模, 随着规模的降低, 年度成本增大。通常认为当处理水量小于 100 000 m<sup>3</sup>/d 时, 紫外消毒系统的投资小于氯消毒系统, 但如果有脱氯要求, 则处理水量小于 250 000 m<sup>3</sup>/d 时, 紫外线消毒系统比液氯消毒系统经济。以 40 000 m<sup>3</sup>/d 规模的污水处理厂计算, 各种污水消毒工艺的运行成本大致如下: 液氯消毒为 0.02 元/m<sup>3</sup>左右; 二氧化氯为 0.08 元/m<sup>3</sup>左右; 臭氧消毒为 0.10 元/m<sup>3</sup>左右; 紫外消毒为 0.016 元/m<sup>3</sup>左右。

## 3 城市水消毒的组合消毒技术

### 3.1 组合消毒技术的原理和作用

组合消毒技术主要是基于微生物对不同消毒技术的抵抗性和敏感性而提出的, 由于各种技术的消毒原理之间的差异, 对一种消毒技术具有抗药性的微生物可能很容易被其他消毒技术灭活, 因此当对各种消毒技术进行组合时, 能分别各自的优越性, 从而在很大程度上降低水或污水中的细菌总数。例如, 隐孢子虫、贾第鞭毛虫和军团菌属等抗氯微生物在极低的 UV 剂量下即可灭活, 而腺病毒等抗 UV 微生物则对氯化消毒非常敏感, 同时使用 UV 和氯消毒, 就能解决这几种微生物的灭活问题。另外, 将不具有后续消毒功能的 UV 消毒和臭氧消毒技术与具备后消毒能力的氯消毒、氯氨消毒或二氧化氯消毒进行组合, 也就解决了悬浮固体屏蔽微生物再次复活的问题。

### 3.2 组合消毒技术的优点

① 降低氯化消毒或臭氧消毒副产物的生成量。当氯化消毒或臭氧消毒与其他消毒技术进行组合时, 能很大程度上降低这些消毒剂的用量, 从而降低相关消毒副产品的生成量。

② 达到最低运行成本下的最佳微生物灭活效率。将两种或两种以上的技术进行组合, 使其中的消毒剂分别针对不同的微生物进行灭活, 这样就避免了使用单一技术进行消毒时, 为达到特定抗消

---

毒能力微生物灭活率而采取高投加剂量的问题。

③ 对各种目标微生物均能达到较高的去除效率。通过组合，选用适合的消毒技术处理不同目标微生物，这样对一种技术具有抗药性的微生物通过其他技术实现灭活目标。

④ 提供后消毒能力。将具备后消毒能力的消毒技术与不具备后消毒能力的消毒工艺进行组合，不仅能有效的对各种病原体微生物进行灭活，而且为不具备后消毒能力的消毒技术处理后水提供了更好的安全保障，同时也能控制管网中生物膜的生成和生长。

### 3.3 组合消毒技术应用中的限制因素

① 加大运行和控制的难度。由于需要对两种消毒技术和设备进行控制，必然会加大自控和运行维护的难度。

② 可能增大初期投资和运行成本。

#### 参考文献

- [1] Water Environment Federation. Wastewater Biology. Special publication, VA22314-1994 USA, 2000.
- [2] Feachem, R. G, D. J. Bradley, Sanitation and Disease-Health Aspects of Excreta and Wastewater Mangement. Published for the Work Bank, 1983.
- [3] USEPA Controlling Disinfection By-Products and Microbial Contaminants in Drinking Water. EPA/600/R-01/110, 2001.
- [4] Washington State Department of Health, Office of the Secretary. Washington State Department of Ecology. Water Reclamation and Reuse Standards. September 1997.
- [5] Commonwealth Of Massachusetts, Executive Office of Environmental Affairs, Department of Environmental Protection, Interim Guidelines on Reclaimed Water (revised), 2000.
- [6] EPA Victoria. Guidelines for Environmental Management. Disinfection of Treated Wastewater. Australia, ISBN 0 7306 7623 4. 2002.9.
- [7] 中国土木工程学会水工业分会. 2003 年水消毒技术国际研讨会论文集. 2003.9.
- [8] 国家城市给水排水工程技术研究中心. “十五” 国家科技攻关子课题 城市污水再生利用设计与 管理技术指南研究报告, 2003.12.