

• 水业导航 •

高度重视饮用水微生物学安全性 强化紫外线消毒技术研究与应用

清华大学环境学院 刘文君

1 充分认识保障饮用水微生物学安全性的重要性

饮用水微生物学安全性是与人民健康密切相关的重要问题。据世界卫生组织(WHO)数据,全世界有超过 12 亿人缺少安全的饮用水,每年有数百万人死于饮用不安全水而导致的疾病,其中大部分是儿童,主要原因是致病微生物感染。据统计,全球饮用水导致的公共卫生事件中由致病微生物感染的案例占 80% 以上,主要症状包括:腹泻、呕吐、发热等,严重症状包括肾衰竭和死亡。2000 年 5 月加拿大安大略省的一个小镇 Walkerton 由于饮用水受污染,而消毒系统又未起作用,导致 5 300 多人的小镇 2 300 多人住院,7 人死亡,在发达国家引起极大震惊。

我国传统上习惯饮开水,实际上等同采用加热消毒。因此水行业甚至部分知名专家都认为我国城镇供水行业微生物学安全性没问题(农村供水的消毒在我国刚起步,存在问题更多),对消毒的研究不够重视。遗憾的是 2009 年 7 月,内蒙古赤峰新城区九龙供水公司由于水源井在大雨中受污染,导致饮用水大肠杆菌和沙门氏菌超标,发生微生物感染事件,造成 4 322 入院检查,所幸无人死亡。为什么不喝生水也会感染呢?根据世界卫生组织的报告,饮用水中微生物进入人体有三个主要途径:①饮水;②气溶胶;③洗浴。其实还有一个渠道是凉拌食品。因此仅仅喝开水是绝对不够的。气溶胶在传播致病微生物中的作用在 2003 年 SARS 爆发事件中引起高度关注,但现在大家可能已经淡忘了当时的情形,小小的病毒搅得首都北京鸡犬不宁,整个中国损失巨大。

引起疾病的微生物种类繁多,总称为病原微生物,包括细菌、病毒和原虫等,其主要来源是人畜排泄物,近几年来也发现其他污染途径。

各病原微生物类群如下:

(1) 细菌类:包括痢疾杆菌、霍乱弧菌、伤寒杆菌、副伤寒杆菌、致病性大肠杆菌、土核巴斯得细菌、

结核杆菌、布鲁氏菌、钩端螺旋体、军团杆菌、空肠细菌、小肠结肠类氏菌等。

(2) 病毒类:包括肝炎病毒、骨髓灰质炎病毒、轮状病毒、埃柯卡病毒(呼肠孤病毒)、柯萨奇病毒、肠病毒、胃肠炎病毒、诺瓦克病毒、腺病毒等。

(3) 原虫和蠕虫类:包括溶组织阿米巴虫(又名痢疾内变形虫)、贾第鞭毛虫、隐孢子虫、血吸虫、绦虫、麦地那龙丝虫等。

对人体健康影响最大的病原微生物及其健康危害见表 1。

表 1 水中常见的病原微生物及其健康危害

病原体分类	名称	健康危害
细菌	志贺氏菌	痢疾、腹泻、出血性腹泻、呕吐、发热
	沙门氏菌	腹泻、恶心、呕吐、败血症、伤寒症
	埃希氏杆菌	腹泻、呕吐、恶心、头痛
	霍乱弧菌	腹泻、呕吐、死亡
	伤寒杆菌	腹痛、严重腹泻、头痛
	军团菌	军团病、肺炎、发烧、死亡
	耶尔森氏鼠疫杆菌	痢疾、腹泻、呕吐、发热、死亡
原生动物	兰伯氏贾第虫	痢疾、腹泻、
	隐孢子虫	痢疾、腹泻、死亡
	溶组织阿米巴虫	发烧内变形虫病
病毒	骨髓灰质炎病毒	发热、乏力、恶心、腹泻、小儿麻痹症
	柯萨奇病毒	气管炎、肺炎、脑膜炎、流行性眼结膜炎
	甲肝病毒	肝功能障碍、甲型肝炎
	腺病毒	呼吸道疾病、眼部感染
	轮状病毒	腹泻、呕吐、肠胃炎
	诺瓦克病毒	恶心、呕吐、发热、腹痛、腹泻
	呼肠孤病毒	痢疾、腹泻、呕吐、发烧
星状病毒	胃肠功能紊乱、急性肠炎	
蠕虫	蛔虫	蛔虫病
	钩虫	钩虫病
	蛲虫	蛲虫病
	鞭虫	鞭虫病
	绦虫	绦虫病

2 紫外线消毒发展背景

自 20 世纪初发现氯可以灭活水中的致病微生物后,氯消毒在给水处理中得到广泛应用,成为 20 世纪保护人类健康的重要技术进步之一。但是,随着社会的发展,传统的消毒方式面临新的严峻挑战。

首先是饮用水中存在抗氯性致病微生物。饮用水中不断发现新的病原微生物,如微小病毒、贾第鞭毛虫、军团菌和隐孢子虫等,越来越多的新型致病微生物对饮用者健康构成直接威胁,部分致病微生物具有抗氯性,其中隐孢子虫最“著名”,被 WHO 认定为对人体健康最具危害的原生动物。由隐孢子虫孢囊引起的疾病非常严重,其普遍的症状是腹泻、呕吐、低烧,类似流感的症状,而对免疫机能不健全的患者,如艾滋病患者、老人、儿童及其他免疫功能低下的疾病患者更为严重,容易导致死亡。上个世纪 90 年代以来,全世界爆发了多起由饮用水中隐孢子虫引起的公共安全事件。1993 年 4 月在美国威斯康辛州密尔沃基市(Milwaukee, Wisconsin)爆发了由隐孢子虫引起的水传染病,共 40.3 万人得病,4 000 余人住院治疗,112 人死亡。1994 年美国拉斯维加斯市也爆发了隐孢子虫病,导致 20 名艾滋病患者死亡。1996 年日本 Ogose 镇 Saitama 辖区 8 800 人由于隐孢子虫感染而导致腹泻等疾病。世界卫生组织和各个国家最新修订的饮用水水质标准都提高了对微生物学指标的要求,并将隐孢子虫和贾第鞭毛虫(俗称“两虫”)列入水质标准。我国的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)同样显著提高了对微生物学指标的要求,增加了贾第鞭毛虫和隐孢子虫的标准。由于这两种病原微生物具有很强的抗氯性,正常的消毒剂量无法对其有效地灭活,这对传统的氯消毒提出了严峻的挑战,而紫外线恰好对两虫有较好的控制作用。

其次是消毒副产物的问题。中国目前多数水源都受到不同程度的污染,加氯消毒后产生消毒副产物是个比较普遍存在的问题。部分消毒副产物对人体有一定的危害,如饮用水标准中规定的三卤甲烷、卤乙酸等是致癌物,特别是卤乙酸,由于沸点比较高,在烧开水过程中可能会浓缩。而且水消毒过程中产生的消毒副产物比饮用水水质标准中规定的副产物要多得多。紫外线在消毒剂量范围内则不产生

任何副产物。

第三是公共安全问题。消毒用的液氯有一定风险,在生产、运输、储存和使用过程中都有泄漏的风险,在我国近几年曾发生多起液氯泄漏事故,是首批重点监管的危险化学品。2005 年 3 月 29 日京沪高速淮安段,一辆运输液氯的槽罐车与一辆解放牌大货车相撞后翻倒,槽罐车上满载的约 32 吨液态氯气快速泄漏,最终导致 29 人死亡,436 名村民和抢救人员中毒住院治疗,门诊留治人员 1 560 人,10 500 多名村民被迫疏散转移,大量家畜、家禽死亡,农作物受损,造成直接经济损失 1 700 余万元。2006 年 7 月 9 日宁夏鑫尔特化学有限公司发生液氯泄漏事故,导致 160 多人不同程度中毒或受氯气刺激。2009 年 11 月,温州发生了液氯爆炸事故,造成 2 人死亡。如果采用紫外线或其组合消毒工艺,则可以减少或者避免使用氯消毒剂,降低公共安全事故发生可能性。因此北京、上海、广州、深圳等举办大型国际活动的城市都禁止用液氯消毒,而改用次氯酸钠等相对安全的化学消毒剂。美国曾报道液氯是恐怖分子最容易获得的危险品,一个液氯罐可以造成几万人的伤亡。而紫外线消毒系统则十分安全,对公共安全不构成潜在威胁。

由于紫外线具有消毒效果好,不产生副产物,没有公共安全风险,因此紫外线消毒技术近十年来得到极大发展。

3 紫外线消毒技术原理和消毒效果

3.1 紫外线消毒技术原理

紫外线按波长范围分为 A、B、C 三个波段和真空紫外线,A 波段 320~400 nm ,B 波段 275~320 nm ,C 波段 200~275 nm ,真空紫外线 100~200 nm。水消毒用的是 C 波段紫外线。光量子理论认为,光是物质运动的一种特殊形式,是一粒粒不连接的粒子流。每一份波长 253.7 nm 的紫外线光子具有 4.9 eV 的能量。微生物体受到紫外线照射后,吸取了紫外线的能量,实质是核酸对紫外线能量的吸收。核酸是一切生命体的基本物质和生命基础,分为核糖核酸(RNA)和脱氧核糖核酸(DNA)两大类,其共同点是由磷酸二脂键按嘌呤与嘧啶碱基配对的原则而连接起来的多核苷酸链。紫外线可使核酸突变、阻碍其复制、转录封锁及蛋白质的合成。因

为 DNA 在 254 nm 左右有最大的吸收率(如图 1 所示),所以紫外线对微生物具有非常好的灭活效果。

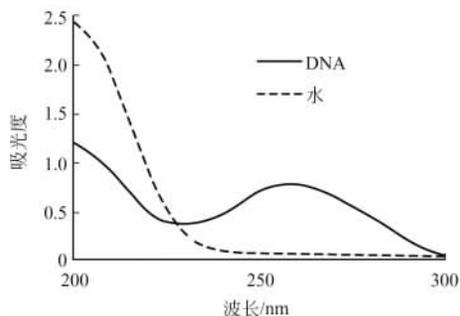


图 1 DNA 和水的吸光度

由于照射剂量的不同,紫外线对 DNA 的破坏形式也有所不同,主要有 3 种形式:

- (1) 相邻的嘧啶由共价键的形式形成嘧啶二聚体,这是紫外线对 DNA 最常见的破坏机理;
- (2) 由嘧啶的光解产物在 DNA 链上形成二聚体;
- (3) 蛋白质和 DNA 之间形成共价键交联。

经紫外线照射后,一些微生物会利用自身的酶修复紫外线对其 DNA 的损伤。修复的机制总体上分为光复活和暗修复。尽管会有微生物修复的现象出现,但是无论光复活及暗修复对紫外线技术在饮用水处理中应用的影响均很小,具体原因如下:

(1) 紫外线消毒后微生物的光复活在饮用水处理中可以忽略,原因是紫外线处理后的水储存在清水池并通过管道输送,因此没有光复活所需的光照条件。另外,通常水厂在紫外线后投加辅助的化学消毒剂来控制管网的微生物安全,也进一步有效地避免微生物的光复活。

(2) 对于微生物的暗修复,只要控制一定的紫外线剂量就会避免这种现象的发生。研究表明紫外线达到一定的剂量时暗修复可以完全避免。各国饮用水紫外线消毒标准剂量(包括我国)采用 40 mJ/cm^2 实际上已经考虑了控制微生物暗修复因素。

3.2 紫外线灯种类和参数

紫外线灯的种类很多,包括低压汞灯(LP),低压高强汞灯(LPOH),中压汞灯(MP),无电极汞灯(Electrode-less),金属卤化灯(Metal halide),脉冲紫外灯(Pulsed UV),准分子激光灯(Eximer)等等。其中,目前能够大规模应用于水处理工程中的紫外

线灯主要包括低压汞灯、低压高强汞灯和中压汞灯三种。低压和低压高强汞灯发射的是单一波段的波谱(253.7 nm),中压汞灯发射多波段波谱,这三种紫外灯的物理参数对比如表 2 所示。中压汞灯单根灯管功率较高,因此单根灯管的消毒能力更强,系统更节省占地;但其光电转化效率较低,且灯管使用寿命相对较短,因此水的处理成本更高。目前中压和低压高强汞灯在大规模的饮用水处理厂中应用都很广泛。

表 2 主要紫外灯物理参数

参数	低压	低压高强	中压
紫外线反射波长/nm	254	254	200~300
汞蒸汽压/Pa	0.93	0.18~1.6	40 000~4 000 000
工作温度/°C	40	60~100	600~900
输入功率密度/W/cm	0.5	1.5~10	50~250
杀菌功率密度/W/cm	0.2	0.5~3.5	5~30
光电转化效率/%	30~40	30~40	10~20
电弧长/cm	10~150	10~150	5~120
使用寿命/h	8 000~10 000	8 000~12 000	4 000~8 000

3.3 紫外线消毒对微生物的灭活效果

紫外线的杀菌效果取决于紫外线的辐射强度和照射时间的乘积,即辐照剂量,单位是 mJ/cm^2 。紫外线对大多数细菌、病毒和原生动物都具有良好的灭活效果(如表 3 所示)。对于水体中常见的大多数微生物以及抗氯的隐孢子虫和贾第鞭毛虫,紫外线对其 4 log 灭活的剂量都在 10 mJ/cm^2 以内。但是个别病毒对紫外线有较强的对抗性,例如,腺病毒达到 4 log 灭活率需要 160 mJ/cm^2 以上的剂量。有最新研究表明中压紫外和脉冲紫外可以更有效地灭活腺病毒。另外,关于紫外线对藻的灭活研究较少,且硅藻、蓝藻、绿藻的 1 log 灭活率所需的紫外线剂量均在 300 mJ/cm^2 以上(见表 3)。

人们对紫外线灭活水中的病原微生物进行了较多研究。但是由于试验条件不同,缺少规范的紫外线剂量确定方法,研究者往往得出不同的结论。总体上,紫外线对原生动物和细菌的灭活效果最好,而个别病毒(如腺病毒)对紫外线有较强的抗性。紫外线消毒与氯消毒对微生物的灭活特性正好相反,氯消毒对大多数的病毒和细菌灭活效果很好,但是对隐孢子虫和贾第鞭毛虫效果较差。因此,多种消毒方式的结合使用会显著地提高消毒安全性。

表3 紫外线对微生物的灭活作用

微生物	达到灭活率所需剂量/mJ/cm ²				紫外灯类型
	1 log	2 log	3 log	4 log	
大肠杆菌 ATCC 25922	4	6	—	—	低压
大肠杆菌 ATCC 11229	4	—	—	—	低压
大肠杆菌野生型	5	—	—	—	低压
大肠杆菌 O157:H7	1.5	2.8	4.1	5.6	低压
大肠杆菌 O157d	5	9	14	19	低压
大肠杆菌	5	9	14	18	低压
枯草芽孢杆菌 ATCC 6633	25	40	50	80	低压
梭状芽孢杆菌	45	95	145	—	低压
伤寒沙门菌	1.8~2.7	4.1~4.8	5.5~6.4	7.1~8.2	低压
肠炎沙门氏菌	5	7	9	10	低压
嗜肺军团菌	3	6	8	11	低压
弯曲杆菌	3	7	10	14	低压
耶尔森氏菌	3	7	10	13	低压
霍乱弧菌	2	4	7	9	低压
异养菌	5	5.7	—	—	低压
异养菌	—	—	5	—	中压
链球菌	9	16	23	30	低压
肠道细菌	2	—	—	—	低压
肠道细菌	2	—	—	—	中压
粪肠球菌	10	—	—	—	低压
痢疾志贺菌	0.5	1.2	2	3	低压
宋内志贺菌	3.2	4.9	6.5	8.2	低压
腺病毒 2 型	40	78	119	160	低压
腺病毒 40 型	50	109	167	226	低压
腺病毒 41 型	56	—	—	222	低压
腺病毒 40 型	56	111	167	—	低压
腺病毒 40 型	—	—	—	60	中压
腺病毒 40 型	—	—	—	40	脉冲
甲型肝炎病毒	4.1~5.5	8.2~14	12~22	16~30	低压
脊髓灰质炎病毒 1 型	4~6	7~14	14~23	21~30	低压
轮状病毒 SA11	7.1~9.1	15~19	23~26	31~36	低压
猫杯状病毒	6	16	26	36	低压
杯状病毒	10	21	31	41	低压
艾柯病毒 1 型	8	16.5	25	33	低压
柯萨奇病毒 B5	8	17	25	34	低压
鱼传染性胰脏坏死病毒	82	165	246	—	低压
大西洋庸蝶诺达病毒	35	70	104	—	低压
传染性鲑鱼贫血病毒	2.5	5	7.5	—	低压
MS2 噬菌体	20	—	—	—	低压
Φ174 噬菌体	20	—	—	—	低压
B40-8 噬菌体	10	—	—	—	低压
贾第鞭毛虫	—	<5	<10	<10	低压
贾第鞭毛虫	—	5	25	60	中压
隐孢子虫	3	4.9	6.4	7.9	低压
隐孢子虫	—	—	10	60	中压
棘阿米巴属	40	71	119	167	低压
硅藻	360~600	—	—	—	低压
绿藻	360~600	—	—	—	低压
蓝藻	300	—	—	—	低压

4 紫外线消毒技术的工程应用特点

欧洲是饮用水紫外线消毒技术的发源地。1906~1909年,法国马赛 200 m³/d 的水厂应用紫外线技术进行饮用水处理,成为全世界第一家应用紫外线消毒的水厂。此后,紫外线技术在欧洲迅速普及。目前,欧洲有超过 3 000 多个饮用水设施使用紫外线消毒,规模比较大的有荷兰的鹿特丹水厂(47 万 m³/d),俄罗斯的圣彼得堡水厂(86 万 m³/d),德国的 Styrum-Ost 水厂(19.2 万 m³/d)。在北美,由于新的饮用水标准对隐孢子虫、贾第鞭毛虫和消毒副产物的严格规定,紫外线技术得到了前所未有的重视。美国环保局(EPA)在研究证明了紫外线是控制隐孢子虫和贾第鞭毛虫最有效可行的技术后,迅速建立了紫外线技术在饮用水处理中的应用标准。美国 2006 年公布的第二阶段强化地表水处理法规(LT2ESWTR)中规定,饮用水处理过程中必须去除或灭活 3log 的贾第鞭毛虫,4 log 的病毒,4 log 的隐孢子虫。由于氯消毒对隐孢子虫几乎没有效果,LT2ESWTR 要求现有水厂使用过滤加紫外线或臭氧的消毒工艺,而新水厂则需使用过滤和多级组合式消毒工艺。目前,北美地区采用紫外线消毒的较大规模给水厂有美国芝加哥中湖水厂(18 万 m³/d)、西雅图水厂(68 万 m³/d)、温哥华 Victorial 水厂(51 万 m³/d),加拿大蒙特利尔水厂(300 万 m³/d)等。前文提到的加拿大安大略省 Walkerton 水厂在 2000 年发生致病微生物感染事件后也采用了紫外线消毒技术。在建的美国纽约自来水紫外线消毒系统处理能力为 836 万 m³/d,是目前世界上规模最大的饮用水紫外线消毒工程。据统计,2000 年美国大中型自来水厂没有采用紫外线消毒系统案例,但到 2006 年采用紫外线消毒的大中型自来水厂比例已经上升到 10%。近几年有更多的紫外线工程在建设中或已投入使用。紫外线技术应用于饮用水消毒工艺代表了目前国际上消毒技术的发展趋势。

我国第一个采用紫外线消毒的市政供水水厂是大庆东风水厂(5 万 m³/d),该系统原采用二氧化氯消毒,为减少运行费采用了国产紫外线消毒系统。但该系统缺少前期工艺可行性和后续的应用研究,因此未能提供有价值的的数据。自 2004 年以来清华大学及合作团队系统开展了饮用水紫外线消毒技术

的研究,并于2005年在广东东莞建立了紫外线消毒中试系统($500 \sim 600 \text{ m}^3/\text{d}$),一直运行至今。2007~2010年在北京第九水厂进行了 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 的中试研究。在充分研究的基础上,2009年7月建成了天津开发区净水厂三期紫外线消毒工程($15 \text{ 万 m}^3/\text{d}$)。该水厂是国内首家紫外线消毒与主体工艺同时设计、同时投入运行的净水厂。同时,为保障世博会供水安全,上海临江水厂改造过程中也增加了紫外线消毒系统($60 \text{ 万 m}^3/\text{d}$)。

紫外线消毒工艺在具有诸多优势的同时也有缺点,最主要的缺点是没有维持管网持续消毒的能力。目前欧洲和北美使用紫外线消毒技术存在一定的差别。在欧洲的荷兰、奥地利和德国等地的一些水厂,饮用水经紫外线消毒后直接进入供水管网,据统计,荷兰大部分水厂单独使用紫外线消毒,且管网末梢没有余氯。究其原因,欧洲的管网状况较好,管网系统相对较小,水中可生物同化有机碳较低,为了避免余氯在管网中产生消毒副产物,常单独采用紫外线消毒。另外一个原因是这些欧洲国家通常在纬度较高地区,水温常年较低,管网中微生物再生能力弱。而北美的饮用水相关法规规定在自来水中必须存在一定量的余氯,用来控制管网的二次污染问题。我国的情况与美国更相似。根据清华大学的研究成果,在生物可同化有机碳(AOC)低于 $20 \mu\text{g}/\text{L}$ 时紫外线后可以不加氯,AOC在 $50 \mu\text{g}/\text{L}$ 以上时需维持余氯在 $0.3 \text{ mg}/\text{L}$ 以上。国内采用地表水源的市政供水系统由于水中有机物含量比较高,因此紫外线需要与氯和氯胺组合使用以保证管网水质的微生物安全性。但采用地下水的村镇小规模供水系统则完全可能只采用紫外线消毒,特别是北方水温较低地区,前提是设计和设备一定要合格。十一五科技支撑计划的研究成果也完全证明了这一点。由于紫外线操作简单,维护管理方便,因此上述结论对我国村镇供水消毒系统的建设有重要指导意义。

紫外线与氯胺的组合工艺可以充分发挥二者消毒的优势,通过紫外线消毒保证出厂水的消毒效果,氯胺保障管网持续的消毒效率。与国内常用的氯与氯胺消毒系统相比,大幅度减少了消毒副产物,降低了遗传毒性,提高了消毒效率,特别是提高了对两

虫和抗氯性致病细菌的消毒效果。减少了氯的运输量。对采用次氯酸钠与氯胺组合消毒的水厂更有现实意义,因为有效氯投加量相同情况下次氯酸钠运输量比液氯高约十倍,如果采用紫外线代替次氯酸钠,可以显著减少次氯酸钠运输量。国内部分水源由于氨氮较高,所谓的自由氯消毒实际是氯胺消毒,大量研究结果表明我国饮用水消毒副产物没有预期的那么高也证实这一结论。由于同样加氯量条件下氯胺消毒效率是氯消毒效率的 $1/80 \sim 1/100$,因此导致实际消毒效果较差,管网中细菌大量繁殖,这也是我国龙头水不能直饮的原因之一。这种情况下采用紫外线消毒就可以弥补原水氨氮较高带来的消毒问题,保障供水的微生物安全性。部分城市原水中氨氮较低,由于管网较小,为避免采用加氨系统,因此一直采用游离氯消毒。这种情况下,采用紫外线后变成紫外线/氯复合消毒工艺,尽管紫外线消毒不能减少后续自由氯消毒的耗氯量,但由于紫外线消毒效率高,可以降低维持管网所需的余氯量,从而减少加氯量和消毒副产物。天津开发区三期紫外线工程采用的就是紫外线/氯复合消毒系统。

5 结语

保障饮用水微生物学安全性是饮用水安全供水的首要任务,消毒是承担这一任务的主体处理单元。要充分认识到提高消毒效率的重要性,坚持水质安全优先的原则。安全消毒技术需要平衡提高消毒效率、减少消毒副产物产生和保障消毒系统的安全性这三方面需求。紫外线与氯胺的组合消毒工艺是目前满足安全消毒技术各项要求的最佳消毒工艺。紫外线消毒在国内外得到了迅速发展,但仍然是一项新技术,需要投入更多的研发力量,对紫外线及其组合消毒技术的特点和优缺点充分研究,特别需要认真研究工程应用中已经和可能碰到的问题。同时也需要大力研发我国自己的饮用水紫外线消毒设备,更需要加强监管,避免不合格的紫外线设备进入饮用水市场,以免重复市政污水紫外线消毒中出现的市场混乱局面,损害紫外线消毒技术的推广应用。总之只要大家共同努力,正确认识紫外线消毒技术的优缺点,扬其长,避其短。紫外线消毒技术将有光明的应用前途。