

书中介绍了美国对紫外线消毒技术在饮用水和再生水处理中应用的一些规范和做法,包括紫外线剂量、反应器设计、可靠性设计、监测和报警设计、现场试运行测试、运行控制、工程报告以及紫外线消毒验证协议等内容,对我国的工程技术人员和研究人员有较大的指导和参考价值,对促进紫外线消毒技术在我国的研究和应用必将起到推动作用。

图书在版编目 (CIP) 数据

饮用水与再生水紫外线消毒指南/美国国家水研究中心 (NWRI), 美国水协研究基金会 (AwwaRF) 编著; 深圳海川环境科技有限公司译; 加拿大特洁安技术公司 (Trojan Technologies) 审校. —北京: 化学工业出版社, 2006. 11

ISBN 978-7-5025-9697-2

I. 饮… II. ①美…②美…③深… III. ①饮用水-紫外线消毒法-指南 ②再生水-紫外线消毒法-指南
IV. TU991.2-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 136463 号

责任编辑: 徐娟

责任校对: 蒋宇

装帧设计: 张辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装订: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 9½ 字数 136 千字 2007 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

序 —

The National Water Research Institute (NWRI) of Fountain Valley, California, USA, and the Awwa Research Foundation (AwwaRF) of Denver, Colorado, USA, are pleased and honored that the 2003 NWRI/AwwaRF publication, *Ultraviolet Disinfection Guidelines for Drinking Water and Water Reuse*, Second Edition, was translated from English to Chinese for use in Asia.

NWRI and AwwaRF would like to express our deepest thanks to Oceanpower for their efforts in translating the Guidelines to Chinese. We also would like to acknowledge Trojan Technologies for reviewing the translation and Chemical Industry Press for publishing this version of the Guidelines.

These Guidelines are intended to provide guidance to regulatory authorities and water and wastewater agencies interested in using ultraviolet (UV) light for the disinfection of water and wastewater.

An inexpensive technology, UV can inactivate many waterborne pathogens, such as the intestinal parasite *Cryptosporidium*, from water. Water and wastewater utilities can also use UV disinfection in place of chlorination, which can produce chemical byproducts during water and wastewater treatment.

When the first edition of the UV Guidelines was published in 2000, it was the first of its kind in the world. Since then, the Guidelines have helped regulators, researchers, consultants, engineers, manufacturers, and operators by:

- Providing a common basis for evaluating and implementing UV disinfection technologies.
- Facilitating the design and commissioning of UV disinfection systems.
- Providing a methodology to validate UV disinfection performance.
- Providing a common ground for testing and validating UV equipment performance.

Our hope is that these UV Guidelines will be used for water and wastewater treatment applications in Asia to ensure high quality water and the protection of public health and the environment.



Jeffrey J. Mosher
Executive Director
National Water Research Institute
Fountain Valley, California USA
www.nwri-usa.org



Robert Renner
Executive Director
Awwa Research Foundation
Denver, Colorado USA
www.awwarf.org

序 二

消毒是水处理工艺中的重要组成部分，在控制水媒疾病的传播、保障人体健康方面起到了重要作用。自从人们发现氯可以灭活水传播致病微生物后，氯消毒在给水处理中得到广泛应用，成为 20 世纪保护人体健康的重要技术进步之一。但自 70 年代发现氯消毒会产生具有致癌作用的消毒副产物，以及后来不断发现水中新的病原微生物，而且部分致病微生物如贾第鞭毛虫、军团菌和隐孢子虫等有抗氯性，使人们对氯消毒工艺产生质疑。给水管网的生物稳定性是氯消毒的另外一个问题，很多研究证实，如果出厂水含有足够多的可生物降解有机物时，即使维持足够多的余氯，细菌仍然会在给水管网内再繁殖。这些问题对饮用水的安全性构成了严重威胁，因此对消毒工艺的改进成为十分紧迫的问题。

紫外线消毒技术的应用已经有比较长的历史，1910 年法国马赛一家自来水厂最先安装了一套紫外线消毒系统对饮用水进行消毒。由于其消毒机理是利用波长为 254nm 及其附近波长范围内的紫外线使微生物 DNA 的碱基对发生聚合、阻止蛋白质合成而使微生物不能繁殖，因此消毒是依靠纯物理作用的。与氯、二氧化氯和臭氧等化学消毒剂不同，在消毒过程中紫外线基本不会产生副产物。此外，紫外线还有其他一些优点。

(1) 紫外线消毒技术具有较高的杀菌效率。紫外线对细菌、病毒的杀菌作用一般在 1s 以内。常规的氯气、二氧化氯或者臭氧消毒，达到同样的杀菌效果一般需要 30min 甚至更长的接触时间。

(2) 高效杀菌广谱性。紫外线消毒的广谱性相当高。它对大多数致病原生物、细菌、病毒等都能高效率杀灭，特别是对一些于人类危害较大且有抗氯性的原生物类如隐孢子虫和贾第鞭毛虫等都能有效杀灭。自从 1993 年美国 MIWAUKEE 市暴发隐孢子虫病并致 57 人死亡、5 万多人住院以来，紫外线由于对隐孢子虫的特殊消毒效果而得到极大推广。有报道说，美国给水行业向来比较保守，新技术通常需要很长时间才能得到批准应用，但紫外线是历史上最快得到批准使用的新技术，从实验室证实对隐孢子虫的有效灭活到批准应用，只用了不到 5 年时间。

(3) 无二次污染。由于不加入任何化学药剂，因此它不会对水体和周围环境产生二次污染。氯消毒产生的卤代有机物，大多数对人体有“三致”作用。臭氧和二氧化氯也有产生对人体有害的副产物如溴酸盐和亚氯酸盐的风险。

(4) 运行安全、可靠。传统的消毒技术如采用液氯或臭氧，其消毒剂属于剧毒、易燃、易爆、腐蚀性的物质。这些物质的生产、运输、储藏和使用必须特别小心。紫外线消毒不腐蚀设备，运行安全、可靠，安装、维修简单。

(5) 运行维护简单、费用低。由于 20 世纪 90 年代对紫外线消毒核心技术的完善，紫外线消毒技术不仅消毒效率高，而且消毒运行维护简单，运行成本低，其运行费用与氯有可比性，比二氧化氯和臭氧要低。

(6) 占地面积小。因紫外线消毒需要的接触时间很短，通常在 5s 之内，因此占地面积很小，饮用水处理中紫外线消毒通常不需要特殊的土建工程，只需将紫外线设备直接装在管道上，而污水紫外线消毒的渠道也很小，基建费用较少。

当然与任何其他技术一样，紫外线消毒技术也存在一定的缺点，主要有以下几个方面。

(1) 无持久杀菌能力。化学消毒（氯、臭氧等）由于在水体中有残留消毒剂的存在，可长时间维持消毒效果。但紫外线消毒是物理消毒技术，消毒后没有持续消毒效果，因此如果单独使用无法保证水在输送过程中的微生物二次污染和再生长的问题。

(2) 水质条件如透光率、浊度及水中悬浮物（SS）对紫外线杀菌有较大影响，因此采用紫外线消毒要求对进水水质有较为严格的控制。

(3) 细菌复活。虽然在紫外剂量足够高的条件下，失活的病毒和细菌通常是不会复活的，但在紫外剂量不足的情况下，被紫外照射后失活的病毒和细菌可通过光的协助修复自身被破坏的组织（光修复），甚至可以无需光协助完成修复自身（暗修复），重新生长。

由于紫外线消毒在环保及人身安全方面的突出优点，欧洲及北美的许多国家将紫外线消毒列为用水终端（POU）及小型给水系统中的首选方法。尤其是发现自来水可能有隐孢子虫污染的风险后，美国已经将紫外消毒工艺作为自来水消毒的最佳技术之一写入供水法规。随着紫外线消毒技术研究的不断深入，紫外线消毒技术的缺点和不足将不断被克服，该技术在保障人体健康方面有非常好的应用前途。

我国 20 世纪 60 年代已经开始采用紫外线消毒技术。但在市政给水、污水和再生水处理中的大规模应用还是近几年的事，特别是 2003 年非典暴发以后，我国对水消毒的重视程度达到高潮。目前紫外线在污水处理中已经得到较多应

用，但给水和水回用的工程则比较少，因此经验也很显不足。2005 年我国颁布了第一部市政给排水紫外线消毒的国家标准——《城市给排水紫外线消毒设备》(GB/T 19837—2005)，并于 2006 年 1 月 1 日正式执行。尽管该标准还不是很完善，但对引导和规范我国市政水处理行业紫外线消毒技术发展和工程建设将起到一定的作用。目前我国还缺少紫外线消毒的相应研究、工程总结和技术标准，因此借鉴发达国家的经验十分必要。感谢深圳海川环境科技有限公司组织翻译了这本由美国国家水研究中心 (NWRI) 与美国水协研究基金会 (AwwaRF) 共同编著的《Ultraviolet Disinfection Guidelines for Drinking Water and Water Reuse (Second Edition)》，让更多的工程技术和研究人员有机会学习、了解美国对紫外线消毒技术在饮用水和再生水处理中应用的一些规范和做法。尽管本书写于 2003 年，其后美国也在不断做相应的修订，但本书关于紫外线技术的基本原则和概念并没有变化。因此，本书的出版对于我国紫外线技术研究和应用的健康发展将不无裨益。衷心祝愿广大读者从本书中受益。

清华大学环境科学与工程系
饮用水安全研究所所长
消毒研究中心主任
刘文君
2007 年 1 月
于清华园

序 三

上善若水。水善利万物而不争。21 世纪水资源正在变成一种宝贵的稀缺资源，水资源问题已不仅仅是资源问题，更成为关系到国家经济、社会可持续发展的重大战略问题。水安全问题受到了世界各国政府的高度关注，我国政府也高度重视水的安全，特别是城市供水的安全保障问题。“十一五”期间，“建设资源节约型、环境友好型社会”作为基本国策，被提到前所未有的高度。国务院《关于落实科学发展观加强环境保护的决定》提出要解决的七大突出环境问题中，饮水安全和重点流域治理排在首位。可以说，水是人类社会生存和发展的必要条件，没有水就没有人类社会的今天，没有水的安全，就没有人的健康，就没有社会的稳定和经济的可持续发展。

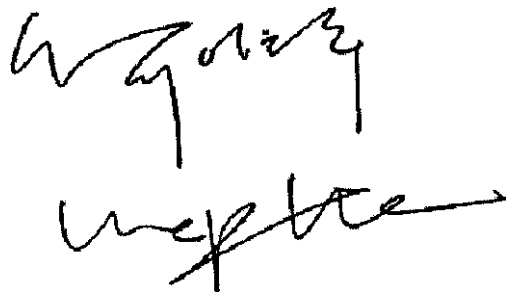
传统的氯消毒技术，不仅有难闻的气味，其产生的消毒副产物会对人产生“三致”作用，严重危害人体健康。紫外线消毒具有对环境无害、无需化学药剂、杀菌广谱性强等多种优势。作为城市供水中多屏障消毒的一个重要环节，紫外线消毒是一种健康、生态的消毒技术，并广泛应用于发达国家。

深圳海川环境科技有限公司作为一家以社会资源再生利用为目标，以国人健康为己任的公司，长期致力于紫外线的水消毒领域。作为美国水工业协会（AWWA）、中国环保产业协会的会员以及国际紫外协会（IUVA）的理事单位，海川环境科技有限公司提供从设计咨询到工程施工安装到项目融资的服务，并承担世界银行、亚洲发展银行、联合国工业发展组织等国际机构的系列专项资助项目，同时从事现代城市水处理与水环境课题研究与应用技术推广。

我国颁布的第一部市政给排水紫外线消毒的国家标准：《城市给排水紫外线消毒设备》（GB/T 19837—2005），并于 2006 年 1 月 1 日正式执行之后，海川环境科技有限公司组织翻译了这本《Ultraviolet Disinfection Guidelines for Drinking Water and Water Reuse (Second Edition)》。翻译此指南，希望能给紫外线水消毒行业提供参考指导，为中国水环保事业贡献出绵薄之力，也希望

能借此增强国人的环保意识。参加翻译的人员有何唯平、汤惠工、肖卫星、胡田甜、唐艳红、高嘉祺等。全书译文由加拿大特洁安技术公司（Trojan Technologies）Ted Mao 博士审校。

天下兴亡，匹夫有责。海川人愿与每一位国人携手，为构建和谐社会，实现人类与水环境的和谐而共同奋斗！

A handwritten signature in black ink, consisting of two lines of cursive script. The top line is more complex and angular, while the bottom line is smoother and more fluid.

2007 年 1 月

深圳海川环境科技有限公司

执行董事

前 言 一

本指南是 2000 年《饮用水与再生水紫外线消毒指南》的修订版。它主要是为那些在饮用水和再生水中使用紫外线消毒系统的州和联邦管理机构，或有意采用紫外线消毒的水厂提供指导。本指南不具有强制性，除非联邦、州、县或者当地权威部门将其作为法规颁布。尽管 NWRI 为该指南的编写提供了资金支持，但是不对工作报告的内容或出现在本指南中的意见或陈述负责。

本指南进一步声明如下。

- 本指南以保护公共健康的最基本要求为基础，鼓励研究（包括新的分析方法）、改进操作程序和新技术的发展。本指南不是一成不变的，当有新的知识可以应用时，指南便会重新修订。

- 当前，本指南在一定范围内适用，随着更多的科学与工程发现应用到实践中，可以预见在下一版指南中将涉及更多的内容及细节。

- 本指南是利用 MS-2 噬菌体作为灭活目标微生物来进行反应器的生物性能验证。目前也有人提出一些其他方法：包括多菌种生物验证有效剂量检测技术和紫外反应器不以 MS-2 噬菌体为目标微生物时对其他微生物灭活能力的确定。可以预见，随着更多科学依据的获得，本指南的下一版将会包含上述内容。

- 本指南没有明确指出用于饮用水消毒的灭活目标微生物和相应的灭活要求。紫外线设计剂量取决于灭活目标微生物的种类和紫外线消毒的前处理工艺。灭活目标微生物和灭活要求必须由法规部门做出规定。

- 本指南主要针对紫外线消毒系统的直接验证。虽然本指南认识到计算流体力学在分析和设计紫外线消毒系统中的重要性，但是没有允许利用计算流体力学进行性能计算。随着计算流体力学技术越来越标准化，下一版中可能会包括此技术。

- 最后，必须强调的是，本指南并不是规划和安装紫外线消毒系统的设计手册，紫外线消毒系统的最终设计仍然属于设计工程师和生产商的职责范畴。

前 言 二

本指南的最初版本是由美国国家水研究中心（NWRI）和加利福尼亚州卫生服务厅（DHS）组织相关专家编写的《加利福尼亚州再生水消毒指南及紫外线消毒研究需要的证明》（1993）。这个早期的版本在美国以及全世界发行了5000多册。后来，美国很多政府机构在验收再生水紫外线消毒项目时采用了这个指南。

2000年1月，NWRI及其相关协会组织了紫外线技术研讨会，以讨论自1993年版本发行后技术上有哪些进步和1993年版本所需做的修订，并出版了从《欧洲紫外线技术的应用情况》到《紫外线设备性能验证标准》方面的会议论文集。更重要的是，2000年紫外线技术研讨会主要集中讨论1993年版本所需的修订和补充。此次修订包括紫外线消毒技术在再生水和饮用水工艺上的应用。

研讨会之后，美国水协研究基金会（AwwaRF）协同美国国家水研究中心（NWRI）一起对1993年版本的指南做了修订。10个月后，NWRI和AwwaRF组织了一些国际上的专家组成工作组对1993年版的手册进行了修订。2000年12月，专家组的讨论成果《饮用水与再生水紫外线消毒指南》（2000年版）出版。

在2000年版指南的使用中发现有必要对其进行修订，所以一个由原作者组成的附属委员会在2002年对2000年版指南进行了修订。这一版的修订主要有：（1）从2000年版指南的使用经验中反映出其所需做的修改；（2）进一步阐明了指南应用的对象；（3）增加了对紫外线灯管储备的指导。这个附属委员会收集各方的观点并且对旧版本进行修订，修订后的版本再分发给各修订小组，再结合修订小组的意见正式编写了此版本。

下列机构和个人在《饮用水与再生水紫外线消毒指南》（第二版）中做出了重要贡献。

第二版编写附属委员会：

Richard H. Sakaji, Ph. D. , P. E. , *California Department of Health Services*

Fred Soroushian, P. E. , *CH2M Hill*

George Tchobanoglous, Ph. D. , P. E. , *University of California , Davis*

修改小组：

Ernest R. Blatchley III , Ph. D. , P. E. , *Purdue University*

Robert W. Emerick, Ph. D. , P. E. , *ECO: LOGIC engineering*

Thomas Hargy, *Clancy Environmental Consultants*

Oluf Hoyer, Ph. D. , *DVGW Test Laboratory for UV-Systems (Germany)*

Robert H. Hultquist, P. E. , *California Department of Health Services*

Albert Ilges, *American Water Works Association Research Foundation*

Ronald B. Linsky, *National Water Research Institute*

O. Karl Scheible, *HydroQuakal, Inc.*

Daniel C. Schmelling, Ph. D. , *United States Environmental Protection Agency*

编辑：

Gina Melin, *National Water Research Institute*

图形设计：

Tim Hogan, *Tim Hogan Graphics*

成员机构：

Boyle Engineering

Camp, Dresser & McKee, Inc.

Carollo Engineers

CH2M Hill

Ionics, Inc.

Kennedy/Jenks Consultants, Inc.

Malcolm Pirnie, Inc.

Montgomery Watson Harza

Parsons Engineering Science, Inc.

Robert Bein, William Frost & Associates

The Irvine Company

目 录

缩略词

单位缩写

第 1 章 饮用水紫外线消毒	1
1.1 介绍	1
1.1.1 紫外线消毒系统性能验证	1
1.1.2 饮用水紫外线消毒指南的组成	2
1.2 紫外线剂量	2
1.2.1 过滤后的地表水和地下水	3
1.2.2 未过滤的地表水	3
1.2.3 设计条件	4
1.3 反应器设计	4
1.3.1 水力限制	5
1.3.2 多级反应器布局的限制	6
1.3.3 清洗系统限制	6
1.4 可靠性设计	7
1.4.1 备用设备	7
1.4.2 进水水质可靠性	8
1.4.3 操作和维护	8
1.4.4 电力供应的可靠性	8
1.4.5 电气安全设计	9
1.4.6 抗震设计	9
1.5 监测和报警设计	9
1.5.1 连续监测	9
1.5.2 紫外线消毒系统	9
1.5.3 监测设备的验证和校准	10
1.5.4 报警	10
1.5.5 报警记录	12
1.6 现场试运行测试	12

1.7	性能监测	12
1.7.1	微生物取样	12
1.7.2	紫外线运行剂量监测	12
1.8	工程报告	13
1.8.1	工程报告的组成	13
1.9	参考文献	15
第2章	再生水紫外线消毒	16
2.1	介绍	16
2.1.1	紫外线消毒系统性能验证	17
2.1.2	再生水紫外线消毒指南的组成	17
2.2	紫外线剂量	17
2.2.1	介质过滤	18
2.2.2	膜过滤	18
2.2.3	反渗透	19
2.2.4	设计条件	20
2.3	反应器设计	20
2.3.1	水力条件	21
2.3.2	多级反应器布局的限制	22
2.3.3	清洗系统限制	22
2.4	可靠性设计	23
2.4.1	备用设备	23
2.4.2	进水水质可靠性	24
2.4.3	操作和维护	24
2.4.4	电力供应的可靠性	24
2.4.5	电气安全设计	25
2.4.6	抗震设计	25
2.5	监测和报警设计	25
2.5.1	连续监测	25
2.5.2	紫外线消毒系统	25
2.5.3	监测设备的验证和校准	26
2.5.4	报警	26
2.5.5	警报记录	27
2.6	现场试运行测试	28
2.7	性能监测	28
2.7.1	微生物采样	28

2.7.2	紫外线运行剂量监测	28
2.8	工程报告	29
2.8.1	工程报告的组成	29
2.9	参考文献	31
第3章	紫外线消毒验证协议	32
3.1	介绍	32
3.1.1	紫外线验证协议的组成	32
3.2	验证设施的要求和建立	33
3.2.1	平行光束仪	33
3.2.2	验证试验要求	34
3.2.3	紫外线反应器装置和文件	35
3.2.4	验证设施资格证明	36
3.3	微生物验证	37
3.3.1	平行光束仪的质量保证/质量控制 (QA/QC)	37
3.3.2	MS-2 噬菌体的检验和计数	38
3.3.3	质量保证和质量控制 (QA/QC)	39
3.3.4	MS-2 噬菌体接种液的制备	39
3.4	检验和取样要求	41
3.4.1	平行光束仪剂量	41
3.4.2	平行光束仪剂量-响应曲线	42
3.4.3	仪器校准	43
3.4.4	反应器评估和验证	43
3.4.5	验证的水质	43
3.4.6	反应器验证	44
3.4.7	样品采集和处理	45
3.4.8	灯管老化系数验证	45
3.4.9	清洗装置验证	45
3.4.10	流速分布	46
3.4.11	设备校准	46
3.5	数据分析和报告	46
3.5.1	紫外线反应器剂量	47
3.5.2	设备放大需考虑的因素	48
3.6	参考文献	50
术语表		52
附录	本书英文版	55

缩 略 词

ATCC	American Type Culture Collection
DHS	(加利福尼亚州) 卫生服务厅
EPA	美国环保局
GFI	接地故障中断线路
MF	微滤
MPN	最大可能数目
NF	纳滤
NTU	浊度单位
QA/QC	质量保证/质量控制
RO	反渗透
TSB	胰蛋白酶大豆肉汤
TSS	总悬浮物
UF	超滤
UPS	不间断的电力供应
UV	紫外线
WRC	再生水标准

单 位 缩 写

a. u. /cm	吸光度单位每厘米
cm	厘米
G	重力
g	克
g/L	克每升
gpm	加仑 ^① 每分
kW	千瓦
L	升
m	米
mg/L	毫克每升
mJ/cm ²	毫焦每平方厘米
mL	毫升
mm	毫米
mW/cm ²	毫瓦每平方厘米
mW · s/cm ²	毫瓦 · 秒每平方厘米
nm	纳米
pfu/mL	空斑形成单位每毫升
pfu/plate	空斑形成单位每皿
rpm	转每分
μm	微米

① 1 加仑 (美) = 3.78541L。

第 1 章 饮用水紫外线消毒

作者：

Robert W. Emerik

Thomas Hargy

Oluf Hoyer

Robert H. Hultquist

Richard H. Sakaji

O. Karl Scheible

Fred Soroushian

Georage Tchobanoglous

1.1 介绍

本指南将促进紫外线消毒系统满足前言所提及的可接受的最基本设计和试运行要求，并且提供一种验证紫外线消毒系统性能的方法。但是，本指南并不是基于对特定的灭活目标微生物和灭活剂量要求为出发点，所以，各法规部门将对确定灭活目标微生物及相应的紫外线剂量要求而负责。

紫外线消毒是一道使大量水生病原体灭活的有效屏障。在多屏障消毒工艺中，紫外线消毒可作为杀灭特殊病原体（如隐孢子虫和贾第鞭毛虫）的有效屏障，并有助于尽量降低消毒副产物。本指南应用于饮用水水源的消毒，包括过滤后的地表水、未过滤的地表水和地下水。对于过滤后的地表水，紫外线消毒的前处理工艺包括颗粒或合成介质过滤、膜过滤（微滤、超滤、纳滤和反渗透）、硅藻土过滤或慢砂滤。

1.1.1 紫外线消毒系统性能验证

本指南的目的在于为评估和应用紫外线消毒技术提供一个共同基准。作为最基本的要求，设备生产商要按照第 3 章的要求验证他们的设备性能^①。当验

① 本指南中所列出的性能验证的宗旨不包括光催化或深度氧化处理的紫外线应用。