



国际环境工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

紫外光在水和废水处理中的应用

Ultraviolet Light in Water and Wastewater Sanitation

(比) Willy J. Masschelein 著

英文版 Rip G. Rice 编辑

中文版 张彭义 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际环境工程先进技术译丛

紫外光在水和废水 处理中的应用

(比) Willy J. Masschelein 著
英文版 Rip G. Rice 编辑
中文版 张彭义 译



机械工业出版社

本书将紫外光水处理技术的基本理论与应用实践融于一体,首先详尽地介绍了各种可用的紫外灯及其性能,为紫外灯的合理选择提供了理论指导;接着叙述了饮用水紫外光杀菌作用、影响因素以及紫外光消毒单元的设计和工程实例;然后,进一步介绍了基于紫外灯的高级氧化过程,包括紫外光和过氧化氢联合、紫外光和臭氧联合的过程;最后总结了紫外光在废水消毒中的应用,包括相关的法规、紫外光剂量、灯的选择以及可能出现的消毒副产物等问题。本书结构简明、层次清楚、篇幅不大,既有较强的理论性和科学性的叙述,又有实际工程实例,实用性强。

本书可作为高等院校和科研院所给排水、环境、化工、化学等专业的本科生、研究生、教师及研究人员的教学和研究参考用书,还可供环保、水务等行业的科技工作者、操作人员参考。

Ultraviolet Light in Water and Wastewater Sanitation/by Willy J. Masschelein, Rip G. Rice/ISBN: 978 - 1 - 56670 - 603 - 2.

Copyright©2002 by CRC Press LLC.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC. All rights reserved.

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis Sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

本书版权登记号:图字 01 - 2013 - 5756 号

图书在版编目(CIP)数据

紫外光在水和废水处理中的应用/(比)玛斯切雷恩
(Maschelein W. J.)著;张彭义译. —北京:机械工业出版社, 2013. 12

(国际环境工程先进技术译丛)

书名原文: Ultraviolet light in water and wastewater sanitation

ISBN 978 - 7 - 111 - 44617 - 0

I. ①紫… II. ①玛…②张… III. ①紫外线 - 应用 - 给水处理②紫外线 - 应用 - 废水处理 IV. ①TU991. 2②X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 257569 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:顾谦 责任编辑:顾谦

版式设计:常天培 责任校对:任秀丽

责任印制:张楠

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm × 239mm · 9.25 印张 · 176 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 44617 - 0

定价:49.90 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

译 者 序

近年来，紫外光消毒以及基于紫外光的高级氧化水处理技术的研究与应用越来越广泛。对于刚接触这项技术的研究者和操作人员来说，迫切需要一本入门书，能简明、扼要地介绍该项技术的基本原理与应用实践。同时，译者认为，掌握一些紫外灯、紫外光水处理应用的知识对于研究开发新型的紫外光技术与相关材料也会有所帮助。

本译作是本人几年前学习这方面知识时的产物，翻译后曾经提供给有关人员参考，得到了他们的鼓励。这次经机械工业出版社与 CRC 出版社联系，得到翻译与出版许可，得以正式出版，在此感谢顾谦编辑的支持和帮助。原书出版虽已有数年，但仍然觉得这是一本好书。本书篇幅不长，却融合了紫外光技术的理论知识与应用实践，详尽介绍了各种可用的紫外灯及其性能、紫外光在饮用水和废水消毒中的应用技术。相信本书的出版，对于紫外光水处理技术的研究与应用会有较大的推动作用。

由于本人的知识水平与精力有限，书中可能存在疏漏和不足之处，还望读者批评指正。

原 书 前 言

关于紫外光在水处理、公共卫生或相关领域中的应用，只有很少的书籍和资料有所涉及。可以参考的论著有：Ellis, 1941; Jagger, 1967; Guillerme, 1974; Kiefer, 1977; Phillips, 1983; Braun, 1986。也有一些紫外光应用于水处理方面的综述，如 Gelzhäuser, 1985; Masschelein, 1991, 1996。

另有一些综述性的文件（Jepson; 1973; U. S. Department of Commerce, 1979; Scheible, 1985; Golzhäuser, 1985; Masschelein, 1991, 1996; J. Water Supply-AQUA, 1992）。1997年水环境联合会（WEF）发布了一份关于消毒的摘要，其中对紫外光（主要应用于废水处理）进行了全面的阐释。

通过把动物感染程度当作评估方法进行实验，结果表明在水处理过程中使用紫外光照射能够显著降低隐孢子虫卵囊的生存活性。更多的细节可阅读第3章中的表9。这项发现使得紫外光技术在饮用水处理方法中占据了重要位置。

1999年，美国环境保护局（EPA）组织了一个研究饮用水紫外光消毒技术的研讨会 [U. S. EPA, 1999]。2000年12月，美国国家水研究中心（NWRI）和美国自来水厂协会研究基金会（AWWARF）联合发表了饮用水和水回用紫外光消毒指南 [NWRI, 2000]。

2001年6月，国际紫外线协会（IUVA）举办了第一次紫外线技术国际会议，这次会议的论文集 [IUVA, 2001] 中包含了多篇有关紫外光消毒饮用水处理技术的论文。此外，很多论文也对紫外光消毒水处理的应用做了描述。

本专著中的讨论不仅涵盖了消毒技术，还涉及如何消除难降解的微量污染物。当前并没有一本专著对紫外光水处理技术的基本知识、设计建议、效果评价和应用前景进行详尽的论述。因此，本书的目的是将紫外光水处理技术的基本知识和运行问题统一起来。

对于一些从事本领域工作的读者，可能某些章节有点冗长和理论化。在这种情况下，可以查阅本书附录。我们的目的还有对这项有趣的技术应用的基本原理进行具体说明，毕竟这项技术在水处理应用中仍被认为经验不足。

原书致谢

在 BERSON-UV 技术公司（荷兰）鼓励下，完成了原版的法语专著的写作，并由 *Technique de l' Eau*（水处理技术）出版。我十分感谢该公司对写作这本专著提供的帮助。

本书所包括的资料由作者个人提供，作者对此项新兴技术所表达的观点和事实声明承担责任。

最后，我非常感激我的长期伙伴 Rip G. Rice 博士对本书的英文版编辑提供的帮助。

Willy J. Masschelein

布鲁塞尔，比利时

目 录

译者序

原书前言

原书致谢

第 1 章 概述	1
1.1 历史：紫外光在饮用水处理中的应用	1
1.2 标准和法规现状	2
1.3 紫外光的定义：范围和天然来源	4
1.3.1 紫外光的定义	4
1.3.2 紫外光的范围	4
1.3.3 水的紫外光消毒	5
1.4 太阳辐射能	6
第 2 章 现有灯技术	8
2.1 简介	8
2.2 汞发射灯	9
2.2.1 过滤气体的作用：彭宁混合物	11
2.3 目前的商业化灯技术	11
2.3.1 低压汞灯技术	11
2.3.2 中压汞灯技术	11
2.3.3 高压汞灯	12
2.4 可得到的灯技术	12
2.4.1 低压汞灯技术	12
2.4.2 中压和高压汞灯技术	19
2.5 特殊灯技术	26
2.5.1 扁平灯技术	26
2.5.2 铟和钇掺杂灯	28
2.5.3 载气掺杂灯	28
2.6 选择灯技术的初步准则	33
2.6.1 低压汞灯	33
2.6.2 中压汞灯	34

2.6.3 特殊灯	34
2.7 紫外光发射效率和控制模式	34
2.7.1 灯壁和套管材料	34
2.7.2 光学材料的透射—反射率	35
2.7.3 沉积物（污泥）的沉淀	37
2.7.4 水的透射—反射率	38
2.7.5 辐射计	38
2.7.6 光学过滤器	39
2.7.7 光谱辐射计（光电池）	40
2.7.8 辐射测量学	43
2.8 发射光的区域分布	48
第3章 紫外光饮用水消毒	51
3.1 简介	51
3.2 杀菌作用	51
3.2.1 杀菌作用曲线	51
3.2.2 消毒机理	53
3.2.3 对蛋白质和氨基酸的潜在效应	56
3.2.4 灯的杀菌效果评价	58
3.3 剂量—效率概念	58
3.3.1 基本方程	58
3.3.2 确定致死剂量的方法	60
3.3.3 报道的 D_{10} 值	62
3.3.4 水温的影响	65
3.3.5 pH 值的影响	65
3.4 代表性测试生物	65
3.5 紫外光消毒时的竞争影响	66
3.5.1 饮用水组分的竞争吸收	66
3.5.2 操作参数	67
3.5.3 溶解性化合物的重要性	67
3.5.4 研究中使用人工光学干扰剂	68
3.6 多击、多点和逐步杀菌概念	70
3.7 反应器几何的设计参数	73
3.7.1 简介	73
3.7.2 单灯反应器	74
3.7.3 多灯反应器	79
3.8 紫外光水处理中的混合条件	84

8 紫外光在水和废水处理中的应用

3.8.1	基本原则	84
3.8.2	一般水力条件	85
3.8.3	流型测试	85
3.8.4	纵向或横向安装灯	86
3.9	效率的操作控制	88
3.9.1	直接控制	88
3.9.2	永久检测	88
3.9.3	长远控制	90
3.10	饮用水紫外光消毒单元初步设计问答	90
3.10.1	简介	90
3.10.2	需要说明的性能	91
3.10.3	资格证明与报价组成	91
3.11	例子	93
3.11.1	比利时 Spontin 的 Source du Pavillon	93
3.11.2	意大利皇宫	95
3.11.3	荷兰 Zwijndrecht	95
3.11.4	荷兰 Roosteren	96
3.11.5	法国 Méry-sur-Oise	97
第4章	紫外光在水环境卫生的光化学协同氧化过程中的应用	98
4.1	基本原理	98
4.1.1	简介	98
4.1.2	水处理有关的羟基自由基特征	100
4.1.3	水处理中羟基自由基的分析证据	102
4.1.4	水溶液中羟基自由基与有机物的反应	102
4.2	过氧化氢和紫外光联合	103
4.2.1	简介	103
4.2.2	硝酸根离子浓度的影响	106
4.2.3	报道的紫外光协同过氧化氢的氧化数据	107
4.3	水卫生中的臭氧和紫外光协同	109
4.3.1	紫外光辐射分解臭氧	109
4.3.2	实际证据	111
4.3.3	费用	111
4.3.4	紫外光辐射氧气或空气产生臭氧的技术	111
4.4	紫外光催化流程	113
4.5	紫外光协同氧化流程的初步设计规则	114
第5章	紫外光在废水卫生中的应用	116
5.1	处理后废水消毒的法规和指南	116

5.2 与紫外光消毒有关的出水的一般特征.....	118
5.3 废水紫外光消毒后的再生与光修复.....	120
5.4 废水消毒中应用的紫外光的剂量.....	122
5.5 废水消毒中灯技术的选择.....	124
5.6 毒性和消毒副产物的形成.....	125
5.7 废水紫外光消毒的初步结论.....	126
5.8 实例.....	126
第6章 总结论.....	127
附录 术语表.....	128
参考文献.....	130

第 1 章 概 述

虽然应用紫外光处理饮用水的方法已经成功的获得应用，但是其更广泛应用的关键问题仍被时常提及，主要有：

- 1) 缺乏明确确定的和普遍接受的设计准则；
- 2) 在处理后的水中没有永久的活性剩余试剂；
- 3) 怀疑可能形成光化学副产物；
- 4) 受辐射生物可能通过修复机理复活—再生；
- 5) 需要可操作的控制技术永久可靠。

本书的目的是分析这些关注点，并给出目前可应用于水处理的紫外光技术的广泛信息（集合基础知识和应用信息），这些技术包括：

- 1) 可得到的灯技术、评价标准和灯的选择；
- 2) 可应用的基本原理；
- 3) 消毒的性能标准；
- 4) 设计标准和方法；
- 5) 紫外光 + 氧化剂协同使用的展望；
- 6) 这一技术的功能要求和潜在的优点与不足。

1.1 历史：紫外光在饮用水处理中的应用

紫外光辐射可用于改善饮用水水质，目前消毒是紫外光辐射在水处理中的主要使用目的。这一技术在 20 世纪初由饮用水公司引入。

太阳光辐射能量的杀菌作用最先被 Downes 和 Blunt [1877] 报道。然而，太阳光中到达地球表面的紫外光部分仅限于 290nm 以上的波段。被称作“阴天 Boston 太阳光”（Boston sunlight on a cloudy day）的总强度为 $340\text{W}/\text{m}^2$ 。不过瞬时辐射取决于太阳高度，相差 2 ~ 100 倍。在纬度 30° ，高山地区总强度大约比海平面的高 50% [Kiefer, 1977]。此外，到达地球表面总太阳光强度只有不到 10% 是紫外光，这一比例对于水消毒的活性有限。所以，紫外光消毒本质上是用于水处理的技术过程。

第一个大规模的紫外光应用是 1906 ~ 1909 年在法国 Marseille 的 $200\text{m}^3/\text{d}$ 的饮用水处理 [Anon., 1910; Clemence, 1911]，之后是法国 Rouen 城市的地下水紫外光处理，然而出现了大量对比紫外光处理和过滤的讨论和辩论 [Anon.,

1911]。在第一次世界大战期间，紫外光在水卫生方面的应用被延迟。

美国第一个完全规模的紫外光应用在 1916 年，为肯塔基州的 Henderson 的 12000 名居民服务 [Smith, 1917]，其他应用出现在俄亥俄州的 Berea [1923]、堪萨斯州的 Horton [1923] 和俄亥俄州的 Perrysburg [1928]。紫外光在美国的应用可以参看早期的出版物 [Walden 和 Powell, 1911; von Recklinghausen, 1914; Spencer, 1917; Fair, 1920; Perkins 和 Welch, 1930]。

所有这些应用在 20 世纪 30 年代后期被搁置。不清楚确切原因，但估计主要原因是费用、设备维护及灯的老化（这在当时未进行充分评估）。氯消毒由于易于操作和更低的价格在当时更受偏爱。在 20 世纪 50 年代，紫外光技术又得到了发展。Kawabata 和 Harada [1959] 报道了必需的消毒剂量。

目前，欧洲有 3000 多个饮用水设施使用基于紫外光辐射的消毒。在比利时，第一个实际规模的应用于 1957 年和 1958 年安装在 Spontin 的一个叫 Sovet 的村庄，至今仍在运转（见第 3 章）。新的应用和技术仍在持续不断地检验和发展，欧洲的应用主要集中在饮用水或清洁水系统，包括制药和医药行业的超纯水；与美国和加拿大相反，其在废水中的应用还很少，不过正在进行变革。

至于饮用水，到 1980 年在美国应用紫外光的信息还是奇闻 [Malley, 1999]。美国环境保护署 1999 年地表水处理法规（SWTR）尚未指出紫外光是杀灭兰伯氏贾第虫的最佳可用技术，然而提出的地下水消毒法规（GWDR）[U. S. EPA, 2000] 包括了紫外光作为可能的技术。

自 1990 年开始，美国水工业联合会（AWWA）和 AWWA 研究基金（AWWARF）联合开展了研究工作。于 1998 年，已经证明紫外光是杀灭隐孢子虫的合适方法。

在 1986 年和 1996 年，国际臭氧联合会欧洲委员会组织了利用臭氧、紫外光以及臭氧和紫外光联合用于水卫生的会议 [Masschelein, 1986, 1996]。同样的议题也列在了 2000 年 IOA 的柏林会议中。目前，这些技术的应用处于主要发展期，可能更多的是在废水处理领域，而不是直接在饮用水领域，虽然直接处理源水变得十分有吸引力。

臭氧—紫外光发展后，人们正在紫外光—过氧化氢和催化剂—紫外光领域积极开展研究。虽然这些新技术仍局限于饮用水，但是其发展领域包括去除难降解的微量污染物（如杀草剂、有机氯化物和多环芳烃）、消毒和减少形成消毒副产物。

1.2 标准和法规现状

只有有限数量的正式法规涉及应用紫外光进行饮用水处理。目前，在欧洲，

只有奥地利正式要求公共供水消毒要进行 $450\text{J}/\text{m}^2$ 的 UV-C 辐射 [Austria Önorm, 2001]。

在德国,德国水处理制造者联合会 (FIGAWA) 发布了建议 [FIGAWA, 1987]。除了技术描述外,这些指南同时建议合适的最低紫外光剂量为 $250\text{J}/\text{m}^2$ 。

荷兰一个组织 (即 DVGW) 也发布了建议 [Arbeitsblatt W 29-4-1997], 制定了技术指南,特别是监测,规定了最低剂量 $400\text{J}/\text{m}^2$ 。DVGW 和德国标准研究所 (DIN) 正在做进一步的工作,德国的标准可能符合奥地利的要求。

目前尚没有关于紫外光水处理的 DIN 标准。一般的光化学目的,可参照 DIN-5031-10-1996: Strahlung sphysik im optischen Bereich und Lichttechnik。其他国家推荐的最低剂量要求是:挪威 $160\text{J}/\text{m}^2$; 法国 $250\text{J}/\text{m}^2$; 荷兰的 KIWA 也推荐 $250\text{J}/\text{m}^2$ 作为最低剂量。

目前欧洲标准委员会 (CEN) 尚没有开展紫外光饮用水处理的标准制定工作,然而不同国家组织正在开展评估 (例如德国 DVGW)。美国的一般推荐值是 $240\text{J}/\text{m}^2$ [Huff, 1965]。大多数欧洲国家 (包括比利时) 把这一值作为建议值。

对于船上饮用水的紫外光消毒也制定了相似的要求。1966 年美国卫生、教育和社会福利部 (DHEW) (目前为卫生和人类服务部) 提出了最低指南值为 $160\text{J}/\text{m}^2$ 。在消毒池的所有点 (也可参见 UKRegulation 29 (6) [1973] 和 Germany [1973] Vol. 2, Kap. 4 [1973]), 该应用假定是对清水消毒,已经过了浊度和色度处理。

美国国家卫生基金 (NSF)、美国国家标准研究所 (ANSI) 和 NSF 标准 55-1991 定义了两个准则:

1) 使用点—— $380\text{J}/\text{m}^2$ 的剂量对于病毒和细菌消毒是安全的,病毒去除达到 4 个对数 [标准同时要求反应器对有挑战性的细菌有效如酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) 或枯草芽胞杆菌 (*Bacillus subtilis*)]。

2) 进入点——城市处理和消毒过的水要求用 $160\text{J}/\text{m}^2$ 的剂量进行补充消毒。

美国环境保护署要求 $210\text{J}/\text{m}^2$ 和 $360\text{J}/\text{m}^2$ 的紫外光剂量以使得肝病毒 A (HAV) 削减 2 个和 3 个对数。美国大多数州要求符合前面提到的 ANSI 和 NSF 标准要求。例外的是新泽西州、宾夕法尼亚州、犹他州,它们规定 $160\text{J}/\text{m}^2$ 的剂量。有时要求紫外光消毒前要进行过滤。AWWA 建议小型的市政系统采用 $400\text{J}/\text{m}^2$ 的剂量直接使用紫外光。

欧盟指导 (The Council Directive) 91/271/欧洲经济共同体 (EEC) 没有清楚地要求紫外光为处理的一部分,当地政府可以根据水的当地回用制定要求。

1.3 紫外光的定义：范围和天然来源

1.3.1 紫外光的定义

紫外光是电磁波的一部分。历史上，光的本质是大量讨论的主题。牛顿（1642—1727年）提出了光的微粒说，而惠更斯（1629—1695年）提出了波动理论。概念的不同导致了19世纪大量的分析。波动理论被麦克斯韦（1831—1879年）的概念支持，后者发展了光的电磁理论，表明光是由电子和磁场矢量组成的，相互垂直。

当普朗克（1858—1947年）于1900年将光子与光波有关的概念相关及量化后，整个讨论画上了休止符。牛顿曾经表明白光可以被棱镜分解为可见的组分颜色，但是电磁波的可见部分只是很小的一部分（见图1）。

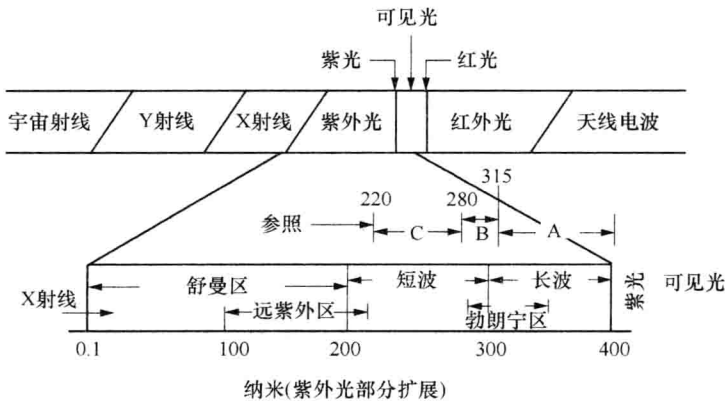


图1 电磁波的范围

1801年，Ritter利用太阳光与过滤器混合以消除可见光组分（也包括红外光和更高波段）的实验表明，还原银可以通过用比电磁光谱可见光部分更短的不可见光辐射氯化银得到。混合的一个方法是Wood玻璃，这是一种含镍和钴氧化物的玻璃，对可见光不透明，但能透过部分紫外线，这部分称做UV-A（见图1）。

1804年，Young建立了不可见光的干涉原理，用浸渍氯化银的纸检测。紫外光和可见光的相似本质（牛顿干涉）因此建立。这同时提供了表征波长的早期方法。

1.3.2 紫外光的范围

紫外光的电磁辐射范围为10~400nm，分成几个区域。不可见紫外光范围的

建立是从小于 400nm 开始的，作为第一阶段的证据，直到 320nm，因为没有光学玻璃能透过更低波长的光子。

1862 年，Stokes 能够用石英将对紫外光的觉察延伸到 183nm。从这个波长往下，已知氧气和氮气会吸收光。然而，Schumann 使用氟光学和将光谱仪放置在真空中将观察范围延伸到 120nm。20 世纪初，Lyman (1906, 1916, Gladstone 引用, 1955, p. 39) 使用光栅分析太阳光谱到 5.1nm。

以下的分类或多或少是经验性的，但是结合了历史上发现的不同紫外光范围，分别具有不同的化学和生理效应：

类型	范围/nm	描述
UV-A	315 ~ 400	300 ~ 400nm 范围，有时也称作近紫外光
UV-B	280 ~ 315	有时称作中紫外光
UV-C	200 ~ 280	这一范围在水消毒中将被更详细地考虑

200 ~ 300nm 的光也称作远紫外光，185 ~ 200nm 是没有类似的以人名定义的，在真空紫外光区域，一些区域按照其发现者命名，即

- 1) Schumann 区域：120 ~ 185nm；
- 2) Lyman 区域：50 ~ 120nm；
- 3) Millikan 区域：10 ~ 50nm。

10nm 以下，X 射线区域开始，而在更低波长 (0.1nm 以下)，则 γ 射线区域开始。

整个紫外光波长区域称作光化学波 (actinic waves)，也称作化学波 (chemical waves)，对应于更高频率的热波 (thermic waves)。光化学波涉及能够直接促使辐射分子发生化学变化的能量 (活化、离子化、分解等)，以及能相应地促进体系的生物变化。

过去主要的紫外光源是太阳能，需要考虑的实际限制是其波长最小到 295nm，因为大气过滤了更低的波长。使皮肤着色 (棕黑色) 具有最大作用的是 360nm 左右的光波。皮肤红斑效应最大的紫外光在 300nm 左右，第二大的是 250nm 左右 (见图 2)。

身体的不同部分暴露时具有不同的敏感性，但是最大效应总是遵循相同的模式。红斑是潜在的疾病因素，紫外光下工作的人员应有合适的防护措施，如眼镜和玻璃保护。

1.3.3 水的紫外光消毒

水的紫外光消毒主要用 UV-C 波段，所以光学设备需要尽可能透明。石英仍然是最好的选择。人们对 UV-B 的兴趣正在上升，因为其可以光解蛋白质和其他细胞物质 (详见第 3 章表 7 和第 4 章)。

6 紫外光在水和废水处理中的应用

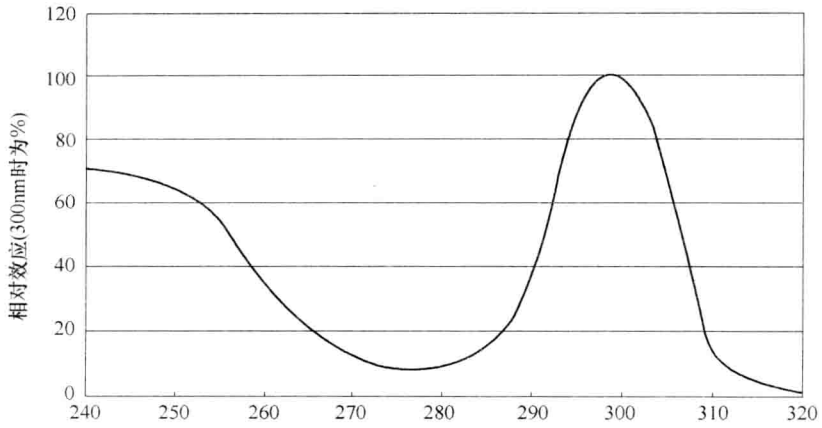


图2 1939年国际照明委员会 (Commission Internationale de l'Eclairage) 定义的标准红斑曲线

1.4 太阳辐射能

在很长一段时间里，太阳辐射能是唯一知道的地球上紫外光的来源。根据黑体理论紫外光的热发射如图3所示。

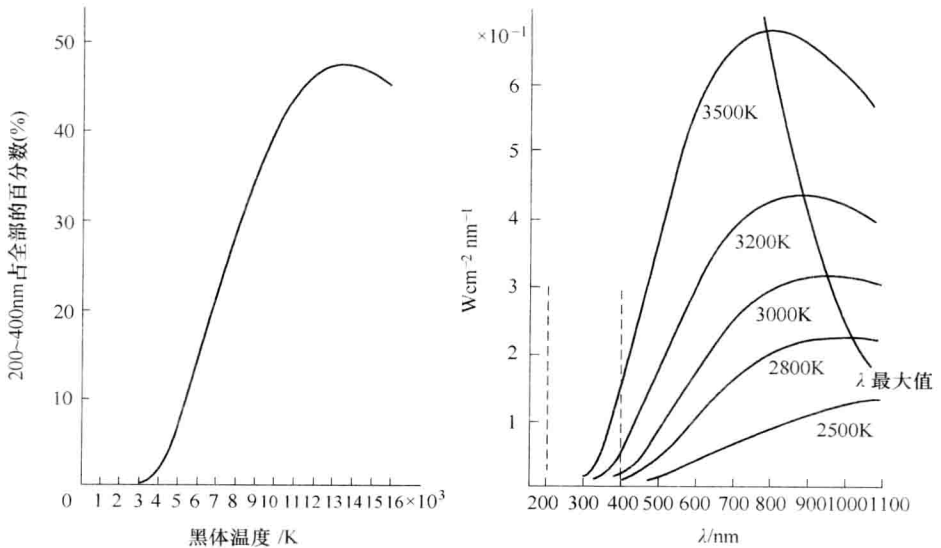


图3 根据黑体理论紫外光 (200 ~ 400nm) 的热发射

将此假设应用于太阳系，辐射功率大约是 4.1023kW ，相应的黑体温度约为 5870K 。在这样的条件下（见图4），部分太阳辐射在紫外光区域。地球所接收到的辐射能估计为 $1400\text{J}/\text{m}^2\text{s}$ ，太阳常数为 1374Wm^{-2} 。大多数发射的是紫外光（大约为 98% ），但是只有一小部分发射的紫外光被地球接收到。

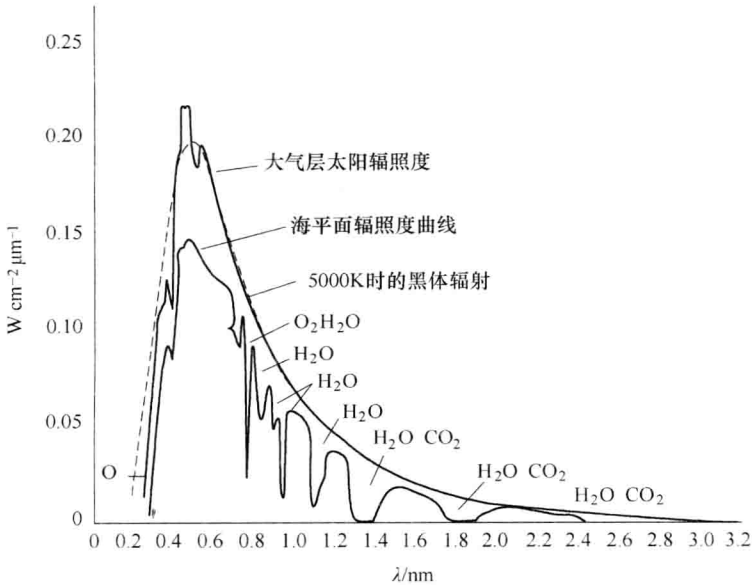


图4 根据黑体理论的热发射曲线

有两个基本机理出现：散射和吸收。瑞利散射更多地关注短波，因为它与 λ^{-4} 成正比。氮气和氧气吸收去除了全部真空紫外光。氧气吸收波长为 200nm 以下的光时产生臭氧，而臭氧本身吸收 $220 \sim 300\text{nm}$ 的紫外光时光分解。结果，UV-A 和一小部分 UV-B 构成到达地表的紫外光。臭氧吸收紫外光在水卫生中的应用将在第4章中进一步讨论。