



# Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment

Integration of Adsorption and Biological Treatment

# 吸附生化耦合水处理技术 原理与应用

(土) 费尔汉·切森 厄兹古尔·阿克塔斯 著  
Ferhan Çeçen Özgür Aktaş

曹效鑫 张潇源 卢先春 等译

非外借



化学工业出版社



# Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment

Integration of Adsorption and Biological Treatment

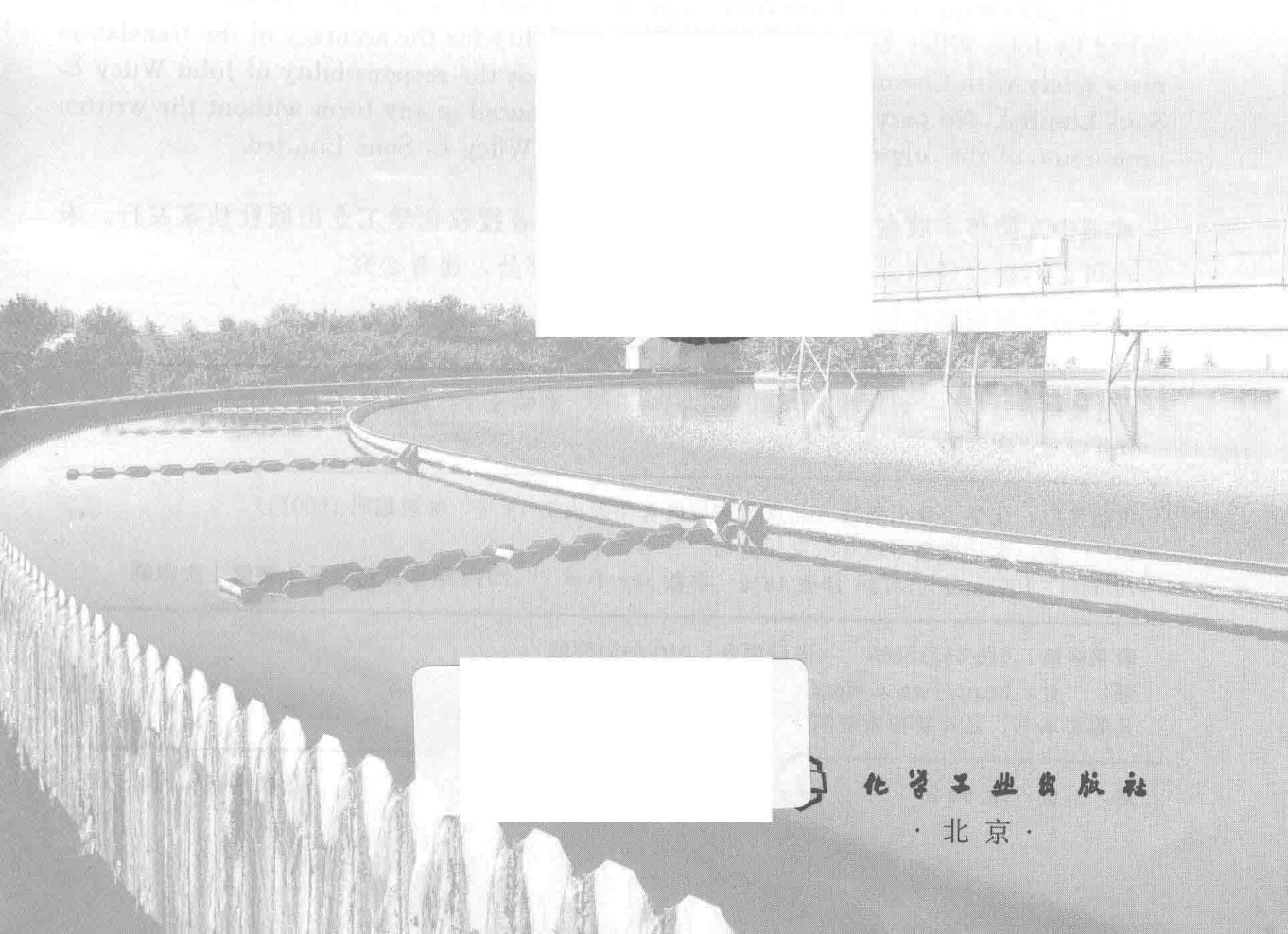
## 吸附生化耦合水处理技术 原理与应用

(土) 费尔汉·切森 厄兹古尔·阿克塔斯 著

Ferhan Çeçen

Özgür Aktaş

曹效鑫 张潇源 卢先春 等译



化学工业出版社

· 北京 ·

本书共十二章，内容包括水和废水处理：活性炭吸附历史回顾及其与生物工艺的耦合，水和废水处理中活性炭吸附基础，活性炭吸附与生化降解耦合废水处理工艺，活性炭对特殊污染物和废水的生物处理：小试和中试研究，活性炭吸附耦合生化处理工程案例，吸附生物降解耦合工艺污水处理模型，生物处理工艺中活性炭生物再生，给水处理中活性炭吸附生物降解耦合技术，BAC 过滤对 NOM、营养元素和微污染物的去除，给水处理厂 BAC 滤池应用实例，给水处理中的 BAC 过滤模型，结论与展望。

本书具有较强的技术性和可操作性，可供从事给水处理、污水处理等工程技术人员和科研人员参考，也可供高等学校环境工程、市政工程及相关专业师生参阅。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

吸附生化耦合水处理技术：原理与应用/(土) 费尔汉·切森，(土) 厄兹古尔·阿克塔斯著；曹效鑫等译．—北京：化学工业出版社，2019.3

书名原文：Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment：Integration of Adsorption and Biological Treatment  
ISBN 978-7-122-33865-5

I. ①吸… II. ①费…②厄…③曹… III. ①吸附法-水处理 IV. ①TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 025547 号

Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment Integration of Adsorption and Biological Treatment, by Ferhan Çeçen and Özgür Aktaş  
ISBN 978-3-527-32471-2

Copyright © 2012 Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Chemical Industry Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

本书中文简体字版由 John Wiley & Sons Limited 授权化学工业出版社独家发行。未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分，违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号：01-2018-8293

---

责任编辑：刘 婧 刘兴春  
责任校对：宋 玮

装帧设计：刘丽华

---

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 装：大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 18¼ 字数 398 千字 2019 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询：010-64518888 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：98.00 元

版权所有 违者必究

# 《吸附生化耦合水处理技术:原理与应用》

## 翻译人员

曹效鑫 张潇源 卢先春 长英夫 鞠庆玲  
冯 硕 姜 艳 靳 昕 李郑坤 胡 瑜  
陈 磊 滕济林 杨庆峰 王哲晓 庞洪涛

# 序一

随着我国环境保护事业的发展和生态文明建设的推进，我国污染防控和环境管理思路正在发生重大变化，这为先进环境技术的开发和应用提供了良好的契机。功能材料是环境技术的核心之一，炭材料及吸附技术由于其对污染物的富集分离性和良好的生物相容性，发挥着不可替代的关键作用。我本人比较关注的膜-生物反应器领域，为了控制膜污染和促进难降解污染物去除，投加活性炭对污泥混合液进行调控，就是一个非常有效的工程手段。

本外文专著着眼于吸附与生化的耦合，覆盖污水和给水，总结了过去几十年该领域的研究和工程实践的成果，书中不仅讨论了活性炭的选型，吸附生化耦合技术对污染物的去除效果、强化机理，还花了很大的篇幅探讨了数学模型，介绍了相关的工程案例，资料丰富翔实。另外本书在书写体例上，各章节之间既有一定的逻辑关联又相对独立，便于读者根据自己的需要进行翻阅查找。总体来讲，本书是一本很有价值的参考书。

译者团队是在吸附生化耦合领域非常活跃的科技工作者，不仅在水处理领域，在废气处理方面也有非常骄人的业绩。他们既具有扎实的理论功底，又具有丰富的实践经验，是一个典型的“产学研”组合团队。他们利用业余时间开展翻译工作，提高业务水平，十分值得鼓励。相信本专著的翻译出版对于吸附生化耦合水处理领域的知识传播和技术进步会发挥积极的推动作用。

董霞

2019年2月于清华大学

## 序二

近年来由于石墨烯和石墨炔的发现，纳米碳材料研究重新受到了全球学术界、工程界的广泛关注。而以活性炭为代表的多孔碳是一种典型的新型碳材料，历史悠久，在环境污染治理中发挥着非常重要的作用。

《吸附生化耦合水处理技术：原理与应用》系统介绍了吸附强化生化处理技术的科学理论知识和工程应用实例。第一部分为活性炭的基础知识，主要介绍了碳材料的结构、性能和制备工艺，以及影响吸附热力学动力学的工艺参数；第二部分主要为废水处理的工程与应用问题，特别是在化工废水、垃圾渗滤液中的应用实例；第三部分是给水处理中的工程和应用问题，涉及消毒副产物的控制等。

我的专业背景是碳材料，十几年前曾做过将多孔碳材料用于环境污染控制技术方面的研究工作，与清华大学环境学院的一些老师都有合作。曹效鑫博士长期从事吸附强化技术的工程实践工作，他经常找我一起探讨相关技术性问题，印象特别深刻的是他们几年前在煤化工废水处理中提出的褐煤活性焦吸附生化耦合技术思路。应该说，这是在环境工程界中非常早地认识到碳材料孔结构与目标污染物的匹配性问题并应用于工程实践的成功案例。他组织了一支队伍开展该专著的翻译工作，付出了很多的努力和心血，也取得了丰硕的成果。

期待该专著顺利出版，为我国环保事业的发展做出积极的贡献。

清华大学材料学院



zhonghong huang

# 前 言

## 本书的写作目的

本书的主题“吸附生化耦合水处理技术”，即利用活性炭的吸附作用强化生化处理效果，是一项非常有效的处理技术。

在教学研究的过程中，一方面，我发现关于纯吸附或者纯生化的书籍很多，但关于两者结合的专著却还是空白。同时我也发现即使是在水处理的著作中，关于粉末活性炭处理技术（PACT）和生物活性炭（BAC）详细论述的章节也寥寥无几。但是另一方面，关于 PACT 和 BAC 工艺，学术期刊上发表了很多非常有价值的成果，这些文章对工艺的方方面面都进行了探讨，遗憾的是，到目前为止还没有一部关于吸附和生化耦合技术的综合性专著。因此，最初为了我自己研究的便利，我萌发了撰写这么一部书的想法，并得到了 Özgür Aktaş（本书的共同作者）的支持。我们写这部书最直接的目的就是为读者呈现一部关于 PACT 和 BAC 目前研究成果的合集。

在本书的撰写过程中，我们做了细致的文献调研，从 20 世纪 70 年代到现在，文献时间跨度 40 年。正因为如此，本书涉及的范围也非常广，讨论了吸附生化耦合技术在水处理流程中的位置、污染物的去除过程、去除效果强化的机理、该系统可去除的污染物种类以及该工艺的其他优势。需要强调的是，要想深入地理解这一耦合过程，只关注去除效果和去除机理是远远不够的。因此本书还花了很大的篇幅探讨该技术的数学模型，包括 PAC 悬浮生长体系和 GAC 附着生长体系。应该说，从污染物去除过程和模型建立两个角度来分析会更加全面和深刻。

作为一本专业书籍，本书主要面向的是有环境科学与技术背景的读者，尤其是应具备吸附和生化处理相关的知识储备，准备从事相关工作的研究人员或工程技术人员。当然，本书的部分章节也可以作为化工或环境专业研究生的教材或参考书。

希望本书能给学术界和工程界的读者带来一些帮助。对于主要从事机理研究的学术界而言，本书关于该技术在工程中的应用的相关章节可能会引起您的关注。对于主要关注效果的工程师而言，本书可以给出一个全面、系统的机理上的解释。对于从事活性炭相关研究和实践的读者来讲，本书也会是一个有益的参考资料。

## 本书的结构

第 1 章简述了活性炭的发展历史及其在水和废水处理领域的应用，并简要介绍了吸附生化耦合处理技术。

第2章为导论，介绍了吸附原理和吸附系统在水处理和废水处理中的应用。由于现有文献对吸附基本原理已经做了非常翔实的论述，因此本章重点介绍了吸附反应器的基础知识，这些反应器在吸附生化耦合系统中也是非常重要的。

第3章到第7章主要研究在废水处理过程中活性炭吸附生化耦合处理工艺。

第3章论述了活性炭在生物废水处理中的耦合应用。本章首先重点介绍了在废水处理过程中从吸附到并行吸附和生物去除的进程，对该耦合工艺的主要机制进行了详细阐述。在此基础上，讨论了该耦合系统在有机物质去除、挥发性污染物去除、硝化、反硝化、厌氧消化等多个工艺过程的优势。本章还讨论了活性炭对生物污泥的影响。根据基本机理，讨论了目前将活性炭吸附和生物去除的优点集成在一个工艺单元中的两个基本过程：悬浮式生长 PACT 工艺和附生式 BAC 过程。另外，本章还涉及了膜生物反应器 (MBR) 与活性炭的耦合工艺。

第4章着重探讨了活性炭在生物去除污染物中的作用，主要是实验室和中试规模研究的结果。本章重点介绍了在各种类型废水，如工业废水和垃圾渗滤液中污染物以及某些特定化合物的去除效果，这些废水含有许多抑制性的、有毒的、缓慢降解或不可生物降解的污染物。

继第4章之后，第5章介绍了在实际废水处理中 PACT 和 BAC 的应用案例。

第6章讨论了吸附和生物耦合处理系统的建模。鉴于吸附和生物去除之间的相互作用非常复杂，本章从传质、生物降解和吸附过程的相关背景知识入手，分别论述了附着生长 (BAC 工艺) 和悬浮生长 (PACT 工艺) 两种耦合过程的数学模型。

第7章涉及活性炭的生物再生，这是所有耦合系统中非常重要的现象。生物再生被定义为微生物对活性炭的吸附能力的恢复过程，以提供进一步的吸附。本章对颗粒活性炭 (GAC) 和粉末活性炭 (PAC) 生物再生的各个方面以及生物再生的机理模型进行了全面分析。

本书的第二部分，第8~11章主要针对饮用水处理，重点讨论了活性炭吸附与生物耦合工艺的应用。

第8章阐述了在水处理中采用生物工艺的基本原理，重点介绍了生物活性炭 (BAC) 过滤的发展和作用。讨论了天然有机物 (NOM) 在给水处理中的重要性。本章还详细介绍了臭氧氧化的重要性，臭氧氧化是在 BAC 过滤之前常用的处理步骤。讨论了原水和臭氧水的吸附和生物降解潜力，这些特性对后续的 BAC 过滤有很大影响。

第9章介绍了 BAC 过滤过程中 NOM、营养物质以及各种有机和无机微污染物的去除。从污染物去除机理和去除效果两个角度进行了论述。本章还介绍了 BAC 过滤器的生物量的特性和测定以及成品水的安全性。

第10章讨论了 BAC 过滤技术在给水中的工程应用。本章首先讨论了影响水在管网中生物稳定性的相关因素。本章介绍了多个实际水处理厂的案例，列出了相关有机和无机污染物能够去除的程度。

第11章讨论了给水处理中 BAC 过滤的建模。由于第6章已经详细讨论了传质、生物降解和吸附的基本原理，本章仅涉及与给水处理有关的具体问题。本章概述了给水生物过滤模型，及其用于 NOM 和微污染物去除的情况。

第 12 章是结论与展望，回顾了本书中讨论的一些重要问题，并指出了在水和废水处理耦合系统中需要进一步研究的方向。

### 对读者的建议

本书试图将每一章视为一个相对独立的主题，同时又不损害整个主题的统一。因此，几乎所有的章节都经常需要对其他章节进行交叉引用。但考虑到并非所有章节都是每个读者所必需的，因此提出以下阅读建议。

如果读者只想简单了解下水和废水处理过程中吸附技术的一般概念和历史演进过程，也许看第 1 章就足够了。

第 2 章介绍了吸附的基本原理以及吸附剂在水和废水领域的应用。它可以独立于其他章节来阅读，非常适合只对吸附感兴趣，而不太关心生物过程的读者。

第 3 章是理解后续各章的关键，强烈建议对耦合吸附和生物去除的机制和协同作用感兴趣的读者对其进行认真阅读。

读者如果只对废水处理感兴趣，并且专注于耦合吸附和生物去除的操作和实践方面，则只需阅读第 2~5 章。

为了进一步了解耦合吸附和生物去除的机理和数学模型，建议读者参阅第 6 章和第 7 章，分别讨论耦合系统的建模和活性炭的生物再生。

对给水处理过程中活性炭吸附与生物过程有兴趣的读者可参阅第 8~11 章。当然，对这些读者来说，首先阅读第 3 章是很有必要的。

第 8 章提供了给水处理中 BAC 过滤的一般信息，第 9 章则进一步进行了论述。对 BAC 过滤的实际应用感兴趣的读者应参阅第 10 章，对给水的 BAC 过滤的数学公式感兴趣的读者可认真阅读第 11 章，并与第 6 章进行对照阅读。

Ferhan Çeçen

# 目 录

1 水和废水处理：活性炭吸附历史回顾及其与生物工艺的耦合 .....	1
1.1 活性炭的历史 .....	1
1.2 活性炭的应用概述 .....	2
1.3 活性炭在环境污染领域的应用 .....	3
1.3.1 活性炭在给水处理中的应用 .....	3
1.3.2 活性炭在污水处理中的应用 .....	4
1.3.3 活性炭在其他污染治理中的应用 .....	4
1.3.4 吸附生化耦合技术在水处理中的应用 .....	5
1.3.5 耦合技术对其他污染物的强化去除 .....	6
参考文献 .....	7
2 水和废水处理中活性炭吸附基础 .....	9
2.1 活性炭 .....	9
2.1.1 活性炭制备 .....	9
2.1.2 活性炭特性 .....	10
2.1.3 活性炭种类 .....	11
2.2 吸附 .....	11
2.2.1 吸附类型 .....	12
2.2.2 吸附影响因素 .....	13
2.2.3 吸附动力学 .....	15
2.2.4 吸附平衡和吸附等温线 .....	17
2.2.5 单组分/多组分吸附 .....	19
2.3 水和废水处理中的活性炭吸附反应器 .....	21
2.3.1 PAC 吸附器 .....	21
2.3.2 GAC 吸附器 .....	21
2.4 活性炭再生与活化 .....	27
参考文献 .....	28

<b>3 活性炭吸附与生化降解耦合废水处理工艺</b> .....	31
3.1 二级与三级处理：生化、吸附单体工艺向耦合工艺的发展 .....	31
3.1.1 活性炭在二级处理工艺中的应用 .....	32
3.1.2 活性炭在三级处理工艺中的应用 .....	33
3.2 吸附和生化去除耦合作用机理 .....	34
3.2.1 有机物的主要去除机理 .....	34
3.2.2 有机物/生物质/活性炭间的主要反应 .....	39
3.2.3 污染物特性对其表现及去除的影响 .....	43
3.3 颗粒活性炭 (GAC) 与废水生物处理技术的耦合 .....	44
3.3.1 GAC 反应器在废水处理中的地位 .....	44
3.3.2 GAC 反应器的生物活性 .....	44
3.3.3 GAC 向 BAC 的转化 .....	45
3.3.4 BAC 反应器中的主要反应进程 .....	47
3.3.5 BAC 反应器的种类 .....	48
3.4 PAC 与废水生物处理技术的耦合 .....	49
3.4.1 一级连续流好氧 PACT <sup>®</sup> 工艺 .....	49
3.4.2 序批式 PACT 工艺 .....	52
3.4.3 厌氧 PACT 工艺 .....	53
3.5 PAC/GAC 膜生物工艺 .....	53
3.5.1 膜生物反应器 (MBR) .....	53
3.5.2 PAC-MBR 工艺 .....	53
3.5.3 生物膜 GAC 过滤工艺——BioMAC 工艺 .....	54
3.6 耦合工艺的特色 .....	54
3.6.1 活性炭强化有机碳的去除 .....	55
3.6.2 活性炭强化硝化作用 .....	55
3.6.3 活性炭强化反硝化作用 .....	57
3.6.4 活性炭对无机物的作用 .....	57
3.6.5 活性炭强化厌氧处理效果 .....	57
3.6.6 活性炭生物污泥的特点 .....	58
3.6.7 PAC 对膜生物反应器的作用 .....	58
3.7 PACT 和 BAC 污泥的再生 .....	61
参考文献 .....	62
<b>4 活性炭对特殊污染物和废水的生物处理：小试和中试研究</b> .....	69
4.1 工业废水的处理 .....	69
4.1.1 制药废水的处理 .....	69
4.1.2 造纸及纸浆废水的处理 .....	70

4.1.3	炼油及石油化工废水的处理	71
4.1.4	纺织废水的处理	72
4.1.5	其他工业废水的处理	72
4.2	特殊化合物的去除	75
4.2.1	挥发性有机物 (VOCs) 的去除	75
4.2.2	酚类化合物的去除	77
4.2.3	药品和内分泌干扰物 (EDC) 的去除	79
4.2.4	杀虫剂和多氯联苯 (PCBs) 的去除	79
4.2.5	优先控制污染物的去除	80
4.2.6	染料去除	80
4.2.7	二级处理出水中有机污染物的去除	80
4.2.8	其他化合物的去除	81
4.3	垃圾渗滤液处理	82
4.3.1	PACT 工艺处理渗滤液	83
4.3.2	PAC-MBR 工艺处理渗滤液	85
4.3.3	BAC 工艺处理渗滤液	86
	参考文献	87
<b>5</b>	<b>活性炭吸附耦合生化处理工程案例</b>	<b>94</b>
5.1	PACT 工程案例	94
5.1.1	PACT 处理工业废水	95
5.1.2	PACT 处理生活与工业混合废水	100
5.1.3	PACT 处理垃圾渗滤液	101
5.1.4	PACT 处理受污染地下水	102
5.1.5	PACT 生活污水深度处理	102
5.1.6	PACT 处理受污染雨水	103
5.2	BAC 工程案例——以回用为目的的 BAC 过滤工艺	103
5.2.1	回用于农业灌溉	103
5.2.2	回用于饮用	104
5.2.3	回用于非饮用目的的其他用途	104
	参考文献	105
<b>6</b>	<b>吸附生物降解耦合工艺污水处理模型</b>	<b>107</b>
6.1	生物活性的 GAC 吸附剂模型	107
6.1.1	引言	107
6.1.2	炭颗粒表面生物膜的传质反应过程	107
6.1.3	与基本工艺相关的吸附生物降解耦合的优点	114
6.1.4	GAC/BAC 反应器模型方法	116

6.1.5	包括吸附和生物降解的 BAC 反应器模型 .....	127
6.2	PACT 工艺的模型 .....	130
6.2.1	PACT 工艺中的质量平衡 .....	130
6.2.2	PACT 工艺中 PAC 质量平衡 .....	131
6.2.3	PACT 工艺中基质去除模型 .....	133
	参考文献 .....	136
7	生物处理工艺中活性炭生物再生 .....	139
7.1	生物再生机理 .....	139
7.1.1	基于浓度梯度的生物再生 .....	139
7.1.2	基于胞外酶反应的生物再生 .....	140
7.1.3	基于微生物驯化的生物再生 .....	142
7.2	离线生物再生 .....	142
7.3	PACT 和 BAC 系统中的同步生物再生 .....	143
7.4	吸附可逆性对生物再生效果的影响 .....	144
7.5	其他影响生物再生的因素 .....	145
7.5.1	生物降解能力 .....	146
7.5.2	基质的化学性质 .....	147
7.5.3	活性炭粒径 .....	147
7.5.4	活性炭的孔隙度 .....	148
7.5.5	活性炭的活化方式 .....	148
7.5.6	活性炭的物理表面性质 .....	148
7.5.7	脱附动力学 .....	149
7.5.8	活性炭与基质的接触时间 .....	149
7.5.9	浓度梯度和活性炭饱和度 .....	150
7.5.10	生物浓度 .....	150
7.5.11	溶解氧浓度 .....	151
7.5.12	微生物种类 .....	151
7.5.13	微生物代谢产物 .....	151
7.5.14	多种底物的存在 .....	152
7.6	生物再生效果的测定 .....	153
7.6.1	评估吸附再生的程度 .....	154
7.6.2	吸附等温线法 .....	155
7.6.3	吸附容量法 .....	156
7.6.4	溶剂萃取直接测量法 .....	156
7.6.5	吸附生物降解对比分析法 .....	156
7.6.6	生物降解产物法 .....	157
7.6.7	好氧呼吸测量法 .....	157

7.6.8	SEM 检测	158
7.7	厌氧/缺氧系统中的生物再生	159
7.8	活性炭生物再生模型	159
7.8.1	同步生物再生模型	160
7.8.2	单组分系统生物再生模型	160
7.8.3	多组分系统生物再生模型	166
7.8.4	离线生物再生模型	167
7.8.5	生物再生动力学模型	167
	参考文献	168
<b>8</b>	<b>给水处理中活性炭吸附生物降解耦合技术</b>	<b>175</b>
8.1	引言	175
8.2	水处理生化过程原理	175
8.3	水处理中有机物的重要性	176
8.3.1	采用有机碳表示有机物	176
8.3.2	测定天然有机物中的可生物降解组分	177
8.3.3	不可生物降解溶解性有机碳 (non-BDOC 或 NBDOC)	179
8.3.4	依据分子大小和化学性质分离天然有机物	179
8.4	传统水处理对 NOM 的去除	180
8.4.1	NOM 去除理论	180
8.4.2	NOM 去除程度	181
8.5	给水处理中的活性炭技术	181
8.5.1	粉末活性炭(PAC)的投加	181
8.5.2	颗粒活性炭(GAC)过滤	182
8.6	生物活性炭(BAC)过滤	182
8.6.1	BAC 过滤的历史	182
8.6.2	臭氧与 BAC 联合	184
8.6.3	BAC 在水厂中的应用情况	184
8.7	水的吸附和生物降解性	184
8.7.1	原水 NOM	184
8.7.2	臭氧对 NOM 特性的影响	185
8.7.3	水中有机物吸附性能和生物降解性能的确定	187
	参考文献	192
<b>9</b>	<b>BAC 过滤对 NOM、营养元素和微污染物的去除</b>	<b>196</b>
9.1	有机物去除	196
9.1.1	主要机理	196
9.1.2	穿透曲线	196

9.1.3	BAC 滤池的生物再生 .....	201
9.2	BAC 过滤效果的主要影响因素 .....	202
9.2.1	GAC 与其他滤料的比较 .....	202
9.2.2	GAC 的类型 .....	202
9.2.3	空床接触时间 (EBCT) 和水力负荷 (HLR) .....	203
9.2.4	滤池反冲洗 .....	204
9.2.5	温度 .....	204
9.2.6	残留氧化剂 .....	204
9.3	BAC 滤池的运行效果: 有机物去除 .....	205
9.4	BAC 滤池的运行效果: 营养物去除 .....	210
9.4.1	BAC 滤池内的硝化作用 .....	210
9.4.2	BAC 滤池内的反硝化 .....	211
9.5	BAC 滤池对有机微污染物的去除 .....	212
9.5.1	水中的有机微污染物 .....	212
9.5.2	本底 NOM 和有机微污染物的竞争 .....	212
9.5.3	有机微污染物在预载 GAC 中的吸附 .....	213
9.5.4	GAC 特性对吸附的影响 .....	213
9.5.5	BAC 过滤对有机微污染物的吸附和生物降解 .....	214
9.5.6	BAC 过滤对消毒副产物及前驱物的去除 .....	217
9.6	BAC 滤池对离子污染物的去除 .....	219
9.6.1	硝酸盐去除 .....	219
9.6.2	溴酸盐去除 .....	219
9.6.3	高氯酸盐去除 .....	221
9.7	PAC 和 GAC 在生物膜工艺中的集成 .....	222
9.7.1	直接投加 PAC 至膜生物反应器 .....	222
9.7.2	BAC 过滤后接膜生物反应器 .....	222
9.8	GAC 用于地下水生物修复 .....	223
9.9	BAC 滤池中的生物特性 .....	223
9.9.1	BAC 滤池的微生物生态学 .....	223
9.9.2	BAC 滤池内的生物膜生长控制 .....	224
9.9.3	BAC 滤池内生物量和生物活性的确定 .....	224
9.9.4	采用传统技术和分子生物学技术测定微生物 .....	225
9.9.5	出水的微生物安全性 .....	226
	参考文献 .....	227
10	给水处理厂 BAC 滤池应用实例 .....	236
10.1	BDOC 和 AOC 作为配水管网生物再生潜能指标的限值 .....	236
10.2	BAC 过滤工程案例 .....	236

10.2.1	德国 Mülheim 水厂 .....	236
10.2.2	荷兰阿姆斯特丹 Leiden 水厂 .....	237
10.2.3	法国巴黎郊区水厂 .....	238
10.2.4	加拿大魁北克 Ste Rose 水厂 .....	238
10.2.5	瑞士 Zürich-Lengg 水厂 .....	239
10.2.6	荷兰阿姆斯特丹 Weesperkarspel 水厂 .....	239
10.2.7	澳大利亚维多利亚州 3 座水厂 .....	241
10.3	评价臭氧和 BAC 过滤的新方法 .....	241
10.4	水源为地下水的 BAC 工程实例 .....	242
	参考文献 .....	243
<b>11</b>	<b>给水处理中的 BAC 过滤模型 .....</b>	<b>245</b>
11.1	基质去除和生物膜形成 .....	245
11.2	BAC 过滤模型 .....	246
11.2.1	侧重滤池内生物降解过程的模型 .....	247
11.2.2	吸附和生物降解工艺集成模型 .....	253
11.2.3	微污染物去除模型描述 .....	256
	参考文献 .....	258
<b>12</b>	<b>结论与展望 .....</b>	<b>261</b>
12.1	PACT 和 BAC 在污水和给水处理中的应用综述 .....	261
12.2	去除机理和微污染物消除的研究前景 .....	262
12.2.1	污水处理 .....	262
12.2.2	给水处理 .....	264
12.3	活性炭生物再生的研究前景 .....	265
12.3.1	活性炭类型的重要性 .....	265
12.3.2	活性炭生物再生 .....	266
12.3.3	BAC 物化再生 .....	267
	缩略语表 .....	269
	致谢 .....	274
	索引 .....	275

# 1

## 水和废水处理：活性炭吸附历史回顾及其与生物工艺的耦合

### 1.1 活性炭的历史

一般认为，活性炭是一种拥有发达孔结构和较大表面积的无定型炭材料<sup>[1]</sup>。在加工过程中，非炭的杂质被去除，表面呈氧化态。尽管现在活性炭的使用被认为是理所当然的，其实它从产生到被广泛认可还是经历了很长时间。

一方面，现代的活性炭技术应用时间并不长；而另一方面，人类使用活性炭的历史可追溯到远古时期。最早使用活性炭的人是记载于公元前 3750 年的埃及人和苏美尔人<sup>[2]</sup>，当时人们使用木炭作为青铜冶炼的还原剂、炊事燃料和药材<sup>[3]</sup>。公元 1550 年前，埃及的纸莎草纸首次记载了人们用木炭来吸附去除腐烂木头产生的异味。古希腊人把木炭当作缓解食物中毒的药物<sup>[4]</sup>。木炭吸附了细菌释放的毒素，从而减轻了细菌对人体的毒害。

公元 450 年前的印度史料记载，人们使用砂和木炭来过滤净化饮用水。对腓尼基商船残骸的考古研究表明，当时人们已经使用炭化过的木桶来装水以保持饮用水的清洁<sup>[4]</sup>。在希波克拉底（希腊名医，公元前 460~公元前 370 年）时代和老普林尼（公元 23~79 年）时代，木炭已作药用了<sup>[5]</sup>。公元前 157 年，木质和骨质的炭被作为药材治病。公元 200 年，一篇关于处理水的梵文文献提到，推荐将存放在铜质水桶中的水先用煤过滤然后再日光曝晒，这可能是目前为止关于水消毒方法最早的文献了<sup>[6]</sup>。

在 15 世纪的哥伦布时代，水手们发现将木桶内壁用火烧黑再装水，水质会保持更久。在那个时代，人们的这些做法主要来自于经验，并没有任何关于原理的探讨。炭吸附理论直到 18 世纪之后才逐渐被人类所认识。

18 世纪，人们用木头和兽骨制炭，并将其用于液体处理。Scheele 于 1773 年在气体处理过程中发现了木炭的独特吸附作用。1786 年，Lowitz 进行了液体脱色实验，首次对木炭的液相吸附脱色能力进行了系统考察<sup>[7]</sup>。当时制糖工业正在寻找一种更为有效的糖浆脱色方法，但木炭的孔不够发达，不能满足糖脱色的需求。1794 年，一家英国制糖公司找到了一种可以满足糖脱色的制炭方法。这种方法一直被严格保密直到 1812 年申报了专利<sup>[2]</sup>。1805 年开始，法国的大型制糖工厂开始使用木炭脱色，到 1808 年欧洲所有的糖脱色都使用木炭。