



TECHNOLOGIES OF WASTEWATER
TREATMENT TOWARDS CARBON NEUTRAL

污水处理碳中和运行技术

郝晓地 著



科学出版社

污水处理碳中和运行技术

Technologies of Wastewater Treatment towards Carbon Neutral

郝晓地 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

这是一部系统论述污水处理低碳运行与能源消耗自给自足(碳中和: carbon neutral)的技术专著。本书从污水处理与碳排放关系入手,介绍污水处理运行模拟优化技术所能带来的低碳运行效果;揭示污水处理过程耗能与产能之潜力;探讨剩余污泥转化能源关键问题与技术;阐释知识更新对污水处理低碳运行的作用;分析非传统能源(污水源热泵、微生物燃料/电解电池、太阳能与风能)作为潜在运行能源的可行性;举例说明国外污水处理厂碳中和运行的理念与实践;展望我国污水处理碳中和运行的未来憧憬。这部集作者潜心研究与当今世界前瞻理念及实践的专著体现出一种全新的学术思想,呈现给读者诸多实用技术与研发思路,代表着一种未来污水处理技术的发展方向。

本书理念超前、内容丰富、技术全面、案例翔实、文字通俗,可供从事污水处理、环境工程、能源工程、大气防治等专业的学者、工程技术人员、管理阶层以及大中专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

污水处理碳中和运行技术/郝晓地著. —北京:科学出版社,2014. 11
ISBN 978-7-03-042295-8

I. ①污… II. ①郝… III. ①污水处理-研究 IV. ①X703. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 248707 号

责任编辑:朱丽 杨新政 / 责任校对:彭涛 刘亚琦

责任印制:赵德静 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 11 月 第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 11 月 第一次印刷 印张:30 1/4 插页:1

字数:584 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

10年前我曾为郝晓地博士首部专著——《可持续污水-废物处理技术》作序。定向于资源与能源回收的可持续污水处理之概念20年前源于我们实验室,且在概念提出的前10年中郝博士对我们的可持续生物营养物去除(BNR)项目做了很多研究,这对我们发展革新技术帮助很大。

郝博士致力于可持续污水处理。在第一部介绍可持续污水处理理念、技术与应用的专著出版后,他在2011年又出版了一部有关磷回收的专著——《磷危机概观与磷回收技术》。自2001年回国后,他便开始了与BNR相关的磷回收研究。他也许不是第一位提出磷回收观点的专家,但是,10年前他确实在中国推动了这一举动。他有关磷回收的观点及呼吁曾在中国主流媒体上刊登。遗憾的是,很多专家和官员直到最近才意识到资源(水、营养物、化学物质)回收甚至比能源回收还重要。

我了解到,磷回收目前在中国已成为一个研究热点,甚至出现了从污水中回收全元素的提法。磷作为地球上一种非常有限的元素,应该比污水中任何其他元素更具回收价值和潜力。在磷回收研究上,我们之间合作紧密,共同发表过一些研究或观念性文章。例如,去年一篇观点性文章发表在《环境科学与技术》(*EST: Looking beyond struvite for P-recovery*. 2013, 47(10), 4965-4966)。

目前,郝博士已将他的研究注意力转向污水处理碳中和运行上,正准备出版又一部中文新书——《污水处理碳中和运行技术》,这个主题将是可持续污水处理的又一个国际热点研究。他的这次研究聚焦又选准了方向。不仅欧洲,而且连美国也在5年前开始了各自迈向碳中和运行的步伐,我们共同的目标是到2030年污水处理厂全面实现碳中和运行。为此,荷兰应用水研究基金(STOWA)早在2008年便在从污水处理厂回收能源、资源的主题上制定出一个全新的路线图——NEWs: 营养物(Nutrient)+能源(Energy)+再生水(Water)工厂(Factories)。我们最近在《科学》(*Science: Anticipating the next century of wastewater treatment: Advances in activated sludge sewage treatment can improve its energy use and resource recovery*. 2014, 344(6191), 1452-1453)上也发表一篇文章,表达了我们对于资源回收的关注和对未来污水处理厂的期待。

最近几天,我连续出席了哈尔滨一个国际水协会(IWA)-水领袖论坛、北京一个技术研讨会,并访问了清华大学、中国科学院和北京排水集团。好像从污水处理中回收能源与资源已变成一个中国炙热的主题!换句话说,中国已充分认识到可

持续的重要性。在北京的技术研讨会上,从中国专家和官员那里我听到一个术语——概念污水处理厂。我有一种直觉,中国想要成为实践可持续污水处理的全球领导者。当然,这是一个好消息,对这样一个泱泱大国也是一种大胆的尝试。我们应该祝福中国,也希望中国专家不仅为中国自身,也为世界找到一种解决问题的途径。

郝博士的旧作、新书无疑在为可持续污水处理和概念污水处理厂技术定向方面均能起到很大的帮助作用,因为许多欧洲理念、技术与应用在他的著作中均有介绍,甚至还包括了我们的 NEWs 框架。从郝博士的这些著作中,中国读者应该能够获得当今世界技术走向和研发焦点有价值的信息。

2015年1月,第三届水研究(Water Research)国际会议将在深圳举办。该会议两个主题之一可以为概念污水处理厂提供高水平学术交流平台。作为大会主席,我诚邀中国学者积极参会,展现他们各自有关概念污水处理厂的观点和技术,让这些观点与技术在全球学术界内予以讨论。

马克·梵·洛斯德莱特* 博士、教授

荷兰代尔夫特理工大学 Kluiver 生物技术实验室

2014年7月22日

于中国北京

* 荷兰皇家科学与艺术学院(KNAW)院士;国际水协会(IWA)战略委员会成员;国际顶级学术杂志 *Water Research* (《水研究》)总编。

获得的奖项与荣誉:1995年荷兰水资源创新奖;1998年荷兰环境创新奖;2007年DOW能源奖;2008年国际水协会(IWA)大奖;2010年苏黎世ETH荣誉博士;2010年荷兰骑士勋章;2012年新加坡李光耀水源大奖;2013年Simon Stevin大师奖;2014年荷兰国王亲自颁发的NWO杰出科学家Spinoza研究项目大奖(2.5百万欧元)。

Preface

I wrote the first preface for a book by Dr. Xiaodi Hao, *Sustainable Treatment Technologies of Wastewater-Wastes*, almost ten years ago. The concept of energy-effective and resource-recovery-oriented wastewater treatment was raised by our laboratory twenty years ago. During the first ten years of developing concepts, Dr. Hao contributed to our sustainable BNR programs and helped enormously in developing innovative technologies.

Dr. Hao is devoted to sustainable wastewater treatment. After his first book introduced the ideas, technologies and partial applications of sustainable wastewater treatment, he also edited and published a book in 2011, *Overview of Phosphorus Crisis and Technologies of Its Recovery*. Following his return to China from our laboratory in 2001, he began studying phosphorus recovery associated with BNR processes. Although he may not have been the first expert to raise the concept of phosphorus recovery, he has been responsible for pushing this activity forward in China for the last ten years. His ideas and appeals concerning phosphorus recovery have been published in several mainstream Chinese media. Regrettably, most experts and officials have only recently started to realize that resource recovery (water, nutrient and chemicals) is likely to be more important than energy recovery.

I understand that phosphorus recovery is nowadays a hot research topic in China with an emphasis on the recovery of all elements involved in wastewater. As a rare element, phosphorus should be prioritized in resource recovery over any other elements involved in wastewater. Dr. Hao and I have cooperated closely with each other in phosphorus recovery, and have published several research papers and viewpoint articles such as this one in *Environmental Science & Technology* (Looking beyond struvite for P-recovery. 2013, 47(10), 4965-4966).

Dr. Hao has recently turned his focus to the carbon-neutral operation of wastewater treatment plants (WWTPs), and is publishing a new Chinese book, *Technologies of Wastewater Treatment towards Carbon Neutral*, which is about another international hot topic of sustainable wastewater treatment in the near future. Again, his focus on this field is right on target. Both Europe and Ameri-

ca began making steps towards carbon-neutral operation of WWTPs five years ago, and it has been proposed that our goal on carbon-neutral operation be achieved by 2030. Indeed, the Dutch STOWA made a route map in 2008 for resource and energy recovery from WWTPs and raised a totally new concept about future WWTPs: NEWs (Nutrient + Energy + Water factories). The need for resource recovery was also recently expressed by a contribution of ours in *Science* (Anticipating the next century of wastewater treatment: Advances in activated sludge sewage treatment can improve its energy use and resource recovery. 2014, 344(6191), 1452-1453).

I recently attended the IWA-Water Leaders Summit in Harbin, took part in a seminar in Beijing and visited Tsinghua University, CAS and BDG. It seems that resource and energy recovery from wastewater has become a very popular theme in China and that China has fully realized the importance of sustainability. In the seminar in Beijing, the term “conceptual WWTPs”, was used by Chinese experts and officials. I believe that China wishes to become a leader in practicing sustainable wastewater treatment in the world. Of course, this is good news and also an adventurous attempt for such a large nation. We should bless China and hope that Chinese experts are able to find a way to solve this problem for China, and also for the world.

The books by Dr. Hao, old and new, are most helpful in orienting sustainable wastewater treatment and conceptual WWTPs, as many ideas, technologies and applications in Europe are introduced in them, including the concept of NEWs. From these books, Chinese readers can gain valuable information about what is happening worldwide.

Next January, the third conference of Water Research will be held in Shenzhen. One of two tracks on the conference will provide a high-level academic platform for conceptual WWTPs. As the conference chairman, I welcome Chinese experts presenting their ideas and technologies for future WWTPs at the WR conference to be discussed with the global research community.

Mark C. M. van Loosdrecht, Prof. Dr. Ir.
Kluyver Laboratory of Biotechnology
Delft University of Technology

July 22, 2014

Beijing, China

前 言

受同学、朋友的鼓动,2006年6月回国后首部专著——《可持续污水-废物处理技术》(中国建筑工业出版社,2006年6月出版)出版发行了。正是这部专著使当时名不见经传的自己逐渐走进国内学术界的视野,慢慢被一些人所注意到。与此同时,回国头几年“不开和”的尴尬局面也出现重大转机,一些大家趋之若鹜的国字号科研项目随之从无到有,从有到续。同行对这部专著的评价可以说全是正面和积极的,甚至上升到它代表着污水处理技术发展方向的高度。但也有一些专家、学者对书的技术引领作用肯定之余略带感叹:书的内容多少有些超前,恐怕是中国10年、20年后方可能考虑的技术。

记得自己有关从污水处理过程中回收磷的认识和观点早在10年前分别由《光明日报》、《人民日报》(内参)、《科技日报》、《中国环境报》等主流媒体报道后,曾被国家主管部门召集专家予以论证。在人们满脑子当时装的都是“水危机”、“油危机”的概念下,一下又冒出个“磷危机”的说法,这未免让他人有着一种一波未平一波又起的坏印象。虽然论证会我未参加,但听说与会专家对我所及的磷危机“狂言”论而未证、不置可否。

随后不到2年时间,国内学术界便陆陆续续开始了有关磷回收的研究,甚至有过之而无不及,更有人和盘提出了污水中全元素、全资源回收的说法,并迅速上升到国字号重大科研项目之列。由此可见,所谓“超前”不过是某些本来客观存在的事实或某种潜在的危机被某些人先看到和认识到罢了,随着时间推移大多数人也会慢慢看得到。受“磷”事启发,自己又先行一步,将磷危机单独作为专题,和他人合作了第二部专著——《磷危机概观与磷回收技术》(高等教育出版社,2011年8月出版),算是为同行们探个路吧。

视污水为资源与能源的载体,继而研发所谓可持续污水处理技术是欧洲20世纪90年代提出的理念。恰逢那时自己正在欧洲工作和学习,直接接触到了这种概念,并为之研发了一些相关技术。这种经历,以及回国后开始为国际顶级学术杂志——*Water Research*(《水研究》)审稿,作为区域副主编(Associate Editor,2007)和区域主编(Editor,2010)处理稿件等“业余”工作,着实让人有一种先睹为快的感觉,以至于有机会保持对国际水与污水处理技术发展动态与趋势的了解与更新。

在从污水中回收资源问题上,国际上普遍的注意力目前多集中于磷回收,而对污水中含量更多的氮的单独回收似乎并不多见,这是因为自然界客观存在的氮循环让我们无虞氮匮乏之缘故。再者,工业固氮(如合成氨)作用可能远比从污水中

回收氮来得简单和经济。所以,污水中的氮完全可以通过自净作用或污水处理脱氮方式(硝化/反硝化、厌氧氨氧化等)被转化为氮气(N_2)回归自然界氮循环。

在强调低碳经济的今天,污水中有机物(COD/BOD)作为含能物质其能量回收价值在国际上目前与磷回收一样,获得了空前的重视。为此,污水处理过程中产生的剩余污泥绝不应该成为污水处理的一种负担,它理应是污水处理运行中汲取内在能量的潜在源泉。厌氧消化污泥转化能源(甲烷)其实是老生常谈的应用技术,之所以不被大多数国人看好,主要是因为目前国内还没有相应的政策鼓励和经济扶持,导致了技术上可行而经济上无利可图的一种被动局面。如果能像欧洲国家一样,政府考量能源与环境综合效应,给予污泥转化能源以一定的经济补贴,这定会刺激污水处理行业付诸实际行动。

事实上,污水处理是一种“以能消能”、“污染转嫁”的过程,有将水污染演变为大气污染之嫌,因为污水处理会因能耗而排放大量二氧化碳(CO_2)。有鉴于此,几年前欧美学者已提出了污水处理也应向着“碳中和(carbon neutral)”目标发展的动议,以消除或完善污水处理与生俱来的这种碳排放缺陷。应对这一挑战,美国甚至已制定出到2030年时基本实现污水处理碳中和运行目标的宏伟蓝图。率先提出可持续污水处理概念的欧洲也不甘示弱,一些国家已开始在污水处理厂尝试碳中和运行的工程垂范。

污水处理碳中和目标的实质就是要实现能源的自给自足,完全不需要外部能量去处理污水。这样,也就没了因消耗外部能源而导致 CO_2 排放、污染大气的问题。显然,污水处理要实现碳中和目标,近在咫尺的能源当属剩余污泥。但是,剩余污泥中所含有机能量并不一定能完全满足污水处理运行的需要,因为产生的污泥量取决于原污水中有机物负荷,不能一概而论。这就需要寻找污泥之外的其他潜在能量来源。近年来发展起来的污水源热泵技术让我们看到了污水余温中所蕴藏的可观能量。除此之外,目前正在过热研发的微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)、微生物电解池(microbial electrolysis cell, MEC)等技术也为从污水有机物中直接获取能量带来了一线曙光。美国更有甚者,他们还提出,必要时还可利用太阳能和风能来满足污水处理碳中和运行这一既定目标。

污水处理碳中和运行目标对污水处理虽遍地开花,但对于技术水平却仍处于初级阶段的我国来说,好像比当年提及的磷危机概念还有些不切实际。但是,这似乎并非天方夜谭,因为最近一段时间国内已将上述回收资源与能源的理念一下上升为“概念”污水处理厂的实际行动。的确,这一理想和行动毕竟不是以我们的意志为转移的,是国际大势所趋。无数事实告诉我们,我们今天看不到、不相信的事情很快会在明天或后天呈现在我们面前。与其习惯被别人牵着走,不如我们察觉后自己先行一步。处于初级阶段的我国污水处理事业就好比一张还没涂有多少笔墨的纸张,只要能及时意识到欧美污水处理的今天便是我们的明天,我们便可一步

到位地去权衡问题。否则,逐步升级或到时推倒重来必然会给我们在经验、精力、经济方面带来不必要的三重损失。

基于这样的想法,自己又有了撰写一部有关污水处理碳中和运行技术专著的冲动。其实,自己回国后不仅撰文倡导以回收污水中资源与能源为目的的可持续污水处理技术,而且也身体力行,积极开展这方面的技术研发工作。在磷回收研究基本划上圆满句号(跃过鸟粪石聚焦磷回收: Looking beyond struvite for P-recovery. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(10): 4965-4966)之后,自己又将研究的主要精力投入到污水处理碳中和运行之上。

实际上,污水处理碳中和运行不仅局限于能源“开源”方面,工艺过程的“节流”措施亦不可忽视。换句话说,能源开源之前应首先从微观机理角度审视不同目标污染物去除过程对有机碳源(COD)消耗的协同效应,污染物不同化合物形态对氧(O_2)和碳源的不同需求,新工艺出现对 COD 与 O_2 需求削弱、甚至不用等作用。所有这些能量节流作用需借助日臻完善的数学模拟技术集成和演示综合效果,并及时运用于工艺设计、问题诊断及运行优化之中。只有这样,才能保证最低的运行能耗,也不至于让开源获得的能量再无谓浪费。

循着这样的技术思路,本书从介绍污水处理与碳排放关系(第 1 章)入手;首先介绍污水处理运行优化技术所能带来的低碳运行方式(第 2 章);接着分析并演示污水处理过程能耗与产能潜力(第 3 章);第 4 章重点对剩余污泥能源转化关键技术予以探讨;第 5 章内容涉及新工艺、新认识对污水处理低碳运行的作用;第 6 章简述污水源热泵技术、微生物燃料/电解电池、太阳能与风能技术作为潜在能源的可行性与可操作性;第 7 章举例说明国外污水处理厂碳中和运行的理念与实践;最后一章(第 8 章)将对污水处理碳中和运行的前景予以总结与展望。

本书内容是自己在这第一部专著后对有关污水处理低碳运行的系列研究,大部分章节内容已经以学术论文形式分别发表于国内核心学术期刊。虽然自己有着近水楼台先得月的方便学术条件,但也难免有眼拙之时。所以,还望有识之士甄别后给予及时指正。

本书以国家自然科学基金(51278025)为依托,并获得了北京应对气候变化研究和人才培养基地的出版资助(2014)。在书稿的整理、编辑、校对过程中还得到了研究生刘然彬同学的鼎力支持。在此,我由衷地表示深深的谢意!

郝晓地

2014 年 6 月 18 日

于北京建筑大学

目 录

序

Preface

前言

第 1 章 污水处理与碳排放	1
1.1 问题与挑战	1
1.1.1 污水处理与碳排放关系	1
1.1.2 污水处理碳中和运行挑战	3
1.2 污水处理低碳运行策略与技术导向	4
1.2.1 引言	4
1.2.2 污水处理与碳排放关系	5
1.2.3 污水处理低碳运行策略	6
1.2.4 实现低碳运行技术途径	8
1.2.5 低碳运行技术导向	12
参考文献	13
第 2 章 污水处理运行优化与低碳运行	15
2.1 污水处理厂原始数据可靠性评价方法	15
2.1.1 引言	15
2.1.2 试验方法与材料	16
2.1.3 小结	22
2.2 数学模拟应用中的污水水质(COD)特征化方法	22
2.2.1 引言	22
2.2.2 污水水质特征化分析方法	23
2.2.3 污水水质特征化实验	27
2.2.4 小结	29
2.3 生物营养物去除(BNR)工艺模型参数校正与验证方法	29
2.3.1 引言	29
2.3.2 试验系统与工艺模型	30
2.3.3 试验与模拟结果	32
2.3.4 模型校正	35
2.3.5 小结	38

2.4	污水处理运行问题诊断与工艺优化模拟演示	38
2.4.1	引言	38
2.4.2	运行状况初步模拟评价	39
2.4.3	工艺运行问题诊断	39
2.4.4	倒置 A ² /O 工艺的运行优化模拟分析	41
2.4.5	小结	46
2.5	制定脱氮除磷(BNR)工艺最佳运行策略:模拟预测并试验验证	46
2.5.1	模拟与试验方法	46
2.5.2	模拟预测与试验验证结果	50
2.5.3	讨论	52
2.5.4	小结	55
2.6	倒置 A ² /O 工艺运行工况静态模拟	56
2.6.1	引言	56
2.6.2	倒置 A ² /O 工艺模型建立	57
2.6.3	初步模拟、组分参数修正与模拟再验证	58
2.6.4	参数修正后的工艺模型验证	60
2.6.5	小结	61
2.7	倒置 A ² /O 工艺运行工况动态模拟	61
2.7.1	引言	61
2.7.2	物料平衡分析	62
2.7.3	动态模拟	66
2.7.4	日水量、水质监测试验	68
2.7.5	小结	69
2.8	数学模拟技术应用于二级污水处理工艺升级改造	69
2.8.1	引言	69
2.8.2	背景与任务	70
2.8.3	现存工艺模拟	71
2.8.4	升级工艺与构筑物	71
2.8.5	模拟辅助工艺设计	73
2.8.6	设备选型及布置	75
2.8.7	小结	76
2.9	模拟评价、优化大型污水处理厂升级改造方案	77
2.9.1	引言	77
2.9.2	改良 A ² /O 工艺改造方案	77
2.9.3	升级改造方案模拟评价	79

2.9.4	升级改造方案优化建议	82
2.9.5	建议优化方案及运行参数	84
2.9.6	小结	85
2.10	模拟评估大型市政污水处理厂超负荷运行能力	86
2.10.1	引言	86
2.10.2	工艺概况与超负荷运行	87
2.10.3	数学模拟方法	88
2.10.4	模拟结果与讨论	89
2.10.5	小结	96
2.11	污水处理运行数字化控制集成方法	97
2.11.1	引言	97
2.11.2	BNR 工艺	98
2.11.3	工艺运行控制策略及控制参数选择	99
2.11.4	在线监测→模拟预测→自动控制系统的构建	101
2.11.5	数字化自动控制系统集成、运行过程及运行效果	104
2.11.6	结语	107
	参考文献	107
第 3 章	污水处理过程耗能与产能潜力	112
3.1	反硝化除磷对污水处理低碳运行的实际贡献分析	112
3.1.1	反硝化除磷的节能减排作用	112
3.1.2	实例污水处理厂概述	113
3.1.3	模拟计算方法	113
3.1.4	模拟计算结果分析	115
3.1.5	小结	119
3.2	氧化沟在脱氮除磷方面功效与能效模拟评价	119
3.2.1	引言	119
3.2.2	工艺模型建立	120
3.2.3	功效模拟分析	122
3.2.4	运行优化模拟比较	123
3.2.5	工艺能效分析	125
3.2.6	小结	127
3.3	污水处理厂碳中和评价方法创建与案例分析	128
3.3.1	引言	128
3.3.2	模型建立	129
3.3.3	案例分析	135

3.3.4	结果分析与讨论	137
3.3.5	小结	139
	参考文献	140
第4章	剩余污泥转化能源关键技术	143
4.1	剩余污泥处理/处置方法全球概览	143
4.1.1	引言	143
4.1.2	西欧:控制填埋,鼓励返田,部分焚烧	144
4.1.3	中、东欧:消化为主,堆肥普遍	145
4.1.4	北美洲:严格管理	146
4.1.5	拉丁美洲:污泥量少,倾向农业使用	147
4.1.6	东亚:热干化、焚烧、填海转向堆肥、焚烧、灰分利用	147
4.1.7	东亚与中国:填埋、农业使用为主,机械脱水、消化为辅	148
4.1.8	非洲:除南非外分散式处理为主	149
4.1.9	大洋洲:主要填埋,研发新法	149
4.1.10	小结	150
4.2	剩余污泥减量技术评价及未来潜在技术展望	151
4.2.1	引言	151
4.2.2	污泥减量技术一般性评价	152
4.2.3	强化污泥消化及预处理技术	154
4.2.4	未来潜在的污泥减量技术展望	156
4.2.5	小结	158
4.3	剩余污泥转化能源瓶颈与突破技术	158
4.3.1	厌氧消化一般影响因素与工艺条件	159
4.3.2	污泥厌氧消化内在瓶颈与突破途径	161
4.3.3	污泥厌氧消化外部刺激手段	166
4.3.4	小结	168
4.4	剩余污泥预处理技术概览	168
4.4.1	引言	168
4.4.2	物理预处理方法	169
4.4.3	机械预处理方法	175
4.4.4	化学预处理方法	177
4.4.5	生物预处理	179
4.4.6	联合预处理方法	180
4.4.7	小结	182
4.5	剩余污泥中木质纤维素能源转化潜力分析	183

4.5.1	引言	183
4.5.2	木质纤维素化学结构	184
4.5.3	木质纤维素生物降解原理	186
4.5.4	木质纤维素能源转化技术途径	189
4.5.5	剩余污泥中木质纤维素能源转化技术策略	190
4.5.6	小结	193
4.6	剩余污泥中木质纤维素稳定并转化能源可行性分析	193
4.6.1	引言	193
4.6.2	剩余污泥中木质纤维素的来源	194
4.6.3	木质纤维素结构与生物降解性	195
4.6.4	剩余污泥预处理	197
4.6.5	木质纤维素预处理	197
4.6.6	强化剩余污泥预处理可行性分析	200
4.6.7	小结	201
4.7	预处理破稳污泥木质纤维素并厌氧降解实验研究	202
4.7.1	引言	202
4.7.2	实验材料与方法	203
4.7.3	结果与讨论	205
4.7.4	结论	209
4.8	污泥预处理逾越厌氧水解瓶颈产甲烷实验研究	209
4.8.1	引言	209
4.8.2	实验材料与方法	210
4.8.3	结果与讨论	212
4.8.4	结论	216
4.9	降解剩余污泥中木质纤维素微生物富集培养实验研究	217
4.9.1	引言	217
4.9.2	实验材料与方法	218
4.9.3	结果分析与讨论	222
4.9.4	结论	226
4.10	强化污泥中木质纤维素产甲烷实验研究	226
4.10.1	引言	226
4.10.2	实验材料与方法	227
4.10.3	结果分析与讨论	228
4.10.4	结论	237
4.11	铁腐蚀析氢强化甲烷产率实验研究	238

4.11.1	引言	238
4.11.2	材料与方法	239
4.11.3	结果与讨论	241
4.11.4	小结	248
	参考文献	248
第5章	新知识下的低碳工艺研发与优化	262
5.1	厌氧氨氧化技术工程化现状与展望	262
5.1.1	引言	262
5.1.2	从发现到应用	264
5.1.3	工程实例	266
5.1.4	应用前景展望	268
5.2	好氧颗粒污泥技术工程化进展	270
5.2.1	引言	270
5.2.2	从概念到技术	271
5.2.3	Nereda®工程应用实例	273
5.2.4	中国工程实例	276
5.2.5	应用前景	276
5.3	对强化生物除磷(EBPR)机理与工艺的认识误区	277
5.3.1	引言	277
5.3.2	强化生物除磷机理认识误区	277
5.3.3	强化生物除磷工艺认识误区	282
5.3.4	小结	286
5.4	低碳源污水生物除磷强化技术方式	287
5.4.1	引言	287
5.4.2	试验与模拟方法	288
5.4.3	结果与分析	290
5.4.4	讨论	293
5.4.5	结论	294
5.5	C/P比与磷回收对生物营养物去除系统的影响	294
5.5.1	引言	294
5.5.2	材料与方法	295
5.5.3	结果与分析	297
5.5.4	讨论	300
5.5.5	小结	302
5.6	控制BNR工艺厌氧释磷效果的因素	302

5.6.1	引言	302
5.6.2	实验方法与材料	303
5.6.3	结果	304
5.6.4	讨论	308
5.6.5	小结	309
5.7	控制 BNR 工艺好氧、反硝化除磷效果的因素	310
5.7.1	引言	310
5.7.2	实验方法与材料	310
5.7.3	结果	312
5.7.4	讨论	316
5.7.5	小结	317
5.8	侧流磷回收强化低碳源污水脱氮除磷效果模拟与试验	317
5.8.1	引言	317
5.8.2	模拟与试验方法	318
5.8.3	结果与讨论	321
5.8.4	小结	325
5.9	悬浮填料强化污水生物处理的实际作用	325
5.9.1	引言	325
5.9.2	自有课题试验结果	326
5.9.3	自有课题试验现象分析	327
5.9.4	其他悬浮填料试验效果	328
5.9.5	其他悬浮填料试验结果分析	330
5.9.6	小结	331
5.10	天然水体氮自净过程及硝化所需溶解氧源	331
5.10.1	简介	331
5.10.2	试验材料与方法	332
5.10.3	试验结果	334
5.10.4	讨论	338
5.10.5	小结	338
5.11	源分离技术国内外研发进展及应用现状	339
5.11.1	源分离技术背景	339
5.11.2	源分离及其优越性	340
5.11.3	源分离技术研发进展	341
5.11.4	源分离工程典型范例	344
5.11.5	尿液源分离技术展望	348