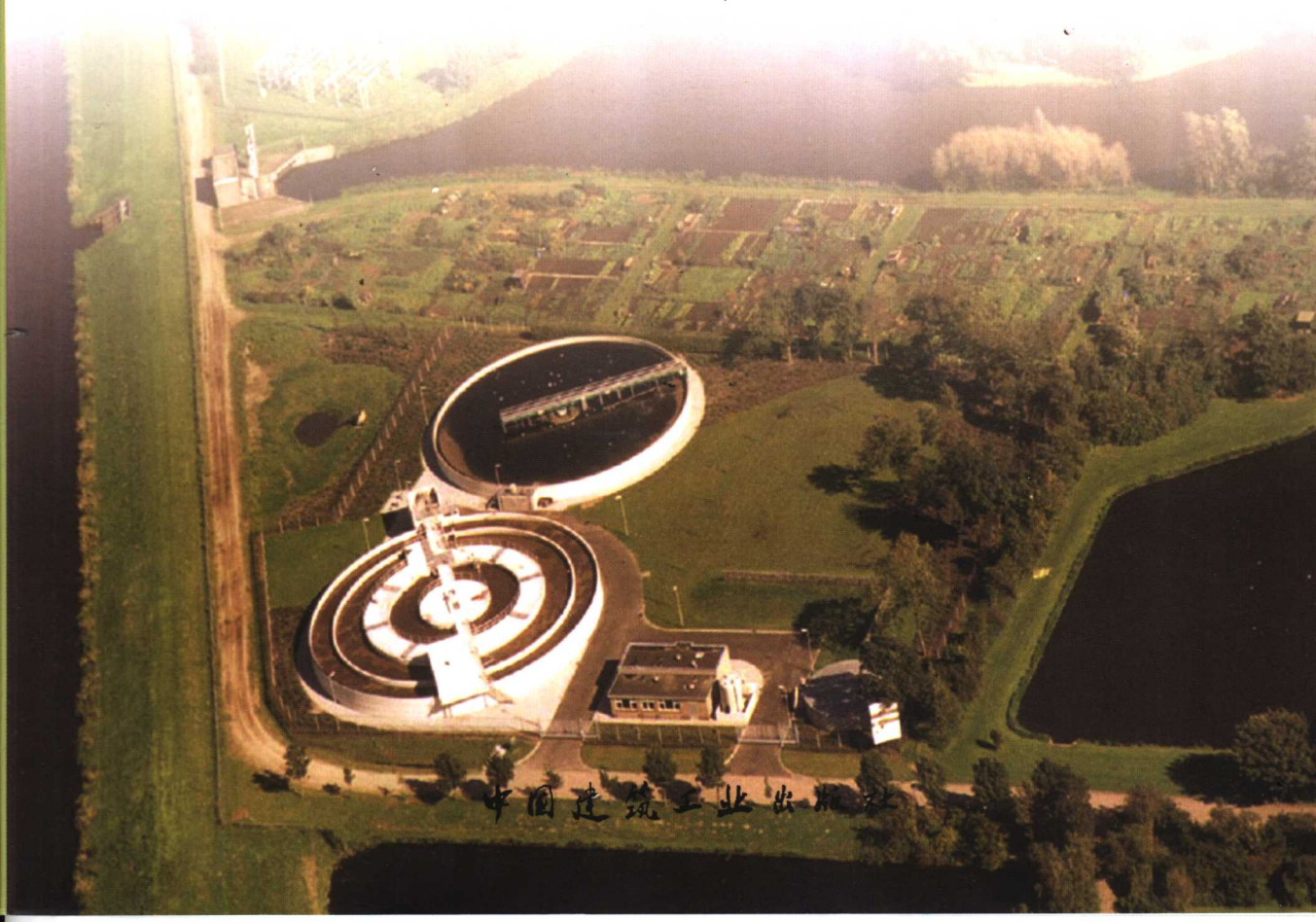


# 可持续 污水-废物处理技术

Sustainable Treatment Technologies of Wastewater-Wastes

■ 郝晓地 著



中国建筑工业出版社

# 可持续污水-废物处理技术

---

Sustainable Treatment Technologies of Wastewater-Wastes

郝晓地 著

中国建筑工业出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

可持续污水 - 废物处理技术 / 郝晓地著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2006  
ISBN 7 - 112 - 08271 - 4

I. 可... II. 郝... III. 污水处理 IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 033938 号

责任编辑: 于 莉 田启铭

责任设计: 赵 力

责任校对: 张树梅 王金珠

**可持续污水 - 废物处理技术**

Sustainable Treatment Technologies of Wastewater-Wastes

郝晓地 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京嘉泰利德公司制版

北京建筑工业出版社印刷

\*

开本: 787 × 960 毫米 1/16 印张: 32<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 字数: 552 千字

2006 年 6 月第一版 2006 年 6 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 56.00 元

ISBN 7 - 112 - 08271 - 4

(14225)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

## Preface

Conventional wastewater-waste treatment processes consume energy for aeration for COD oxidation and nitrification, and thereby result in considerable loss of chemical energy by COD oxidation (about 14 MJ/kg COD as metabolic heat) and CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere. Moreover, COD requirement for denitrification and biological phosphate removal and sludge production are also key problems for conventional processes. Facing increasingly stricter effluent standards, wastewater treatment plants (WWTPs) will cause more energy and organic carbon consumption and thus higher CO<sub>2</sub> emissions and larger sludge production if conventional processes have to be used.

Today, water problems have to be solved in a more integrated and innovative way and sustainability has become a major concern. Therefore, developing more sustainable processes is becoming essential. What is pursued in sustainable processes is to minimize COD oxidation, CO<sub>2</sub> emissions and sludge production, recovery of phosphate, and finally effluents recycle. In fact, the effluents resulting from tertiary treatment have a good quality to be recycled. For this reason, developing sustainable biological nutrient removal (BNR) processes can almost simultaneously contribute to two key water problems: i) deterioration on quality, and ii) shortage on quantity. This is like killing two birds with one stone.

Sustainable development has become a global theme. Under this theme, industrial, agricultural and municipal sectors should develop so-called sustainable technologies.

Ten years ago, we raised a concept towards more sustainable wastewater-wastes treatment technologies and developed some appropriate technologies. As a visiting scholar and a PhD candidate, Mr. Hao Xiaodi contributed to our sustainable BNR programs and helped to develop such innovative technologies. Mr. Hao accomplished and successfully defended his PhD thesis within so short a two-year period in our laboratory, which indicated he fully understood not only the connotation of sustainable wastewater-wastes treatment technologies but also did better in the research and development of this area.

Now, Dr. Hao intends to publish his Chinese academic book, “Sustainable Treatment Technologies of Wastewater-Wastes”, which, I think, must be an efficient way to let Chinese experts, engineers and even managers understand European sustainable concepts and technologies.

I had two academic visiting experiences in China. China gave me a strong impression on the incompatibility of its economic development and environmental pollution. I understand that the central government of China has fully realized this problem and is converting its attention of economic development to “scientific development” followed by “recycled economy”. In this aspect, European ideas and technologies should happen to hold the same views of Chinese. In fact, I found that there had been a lot of European wastewater treatment processes introduced in China. If China could learn from European experiences and lessons in economic development and environmental protection in time, China can avoid the way of “economic development first and pollution control latter”.

No doubt, Dr. Hao’s academic book, “Sustainable Treatment Technologies of Wastewater-Wastes”, is useful in the Chinese time of “scientific development and innovation” and/or “recycle economy”, which not only raises concepts and theories but

also gives technical guides and practical processes. If China could make foreign things serve it, it must get twice the result with half the effort. I wish Dr. Hao's book to have such a function even though I cannot understand Chinese at all. I believe that Dr. Hao's Chinese description in his understanding with sustainable ideas and technologies is much better than his English description.

In the season of the Chinese Spring Festival, I wish Chinese readers to have a happy new year!



M. C. M van Loosdrecht, prof. ir. dr.  
The Kluyver Laboratory of Biotechnology  
Delft University of Technology

January 29, 2006  
Delft, the Netherlands

# 序 一

传统污水-废物生物处理工艺 COD 氧化及硝化因需要曝气而消耗能量，因此，在氧化 COD 的过程中损失大量的化学能（每 kg COD 约含  $14 \times 10^6$  J 代谢热），并导致大量  $\text{CO}_2$  释放大气。进而言之，反硝化和生物除磷对 COD 的需求与剩余污泥也是传统工艺比较突出的问题。面对日益严格的出水排放标准，如果仍以传统工艺应对问题，污水处理厂将会消耗更多的能量和有机碳源，同时排放更多的  $\text{CO}_2$ ，并产生大量的剩余污泥。

当今，水的问题必须以一种综合又新颖的方式加以解决。在此方面，水的可持续发展已成为首要的考虑。因此，发展具有可持续性的工艺便显得十分必要。可持续性工艺所追求的目标为：最少的 COD 氧化，最低的  $\text{CO}_2$  排放，最小的污泥产量，回收磷，最后使处理水回用。事实上，来自三级处理的出水水质足以满足回用水标准。正因如此，发展可持续性生物营养物去除工艺（BNR）能够同时解决两个关键的水问题：1）水质恶化；2）水资源短缺。这实际上相当于一石两鸟的作用。

可持续发展已成为世界性主题。在这一主题下，工业、农业、市政部门应该发展所谓的可持续性技术。十年前，我们首先提出了可持续污水/废物处理技术的概念，并为之发展了一些相应技术。作为一位访问学者和博士研究生，郝晓地先生在我们实验室工作期间对我们提出的可持续性生物营养物去除工艺做出了相当的贡献，并帮助我们发展了一些新颖技术。郝先生在我们实验室短短两年时间里便完成博士论文并成功答辩表明，他不仅完全理解了可持续污水/废物处理技术的内涵，而且在这一领域的研发工作亦表现突出。

现在，郝博士打算出版他的中文学术著作，“可持续污水/废物处理技术”。我认为，这对中国专家学者、工程技术人员、技术管理人员及时了解欧洲的可持续工艺概念与技术是一种捷径。

我曾有过两次学术访问中国的经历。中国在经济发展与环境污染方面的不相适应给我留下了深刻的印象。我理解，中国政府已充分认识到了这一问题的严重性，正将她的经济发展注意力转向“科学发展”，并倡导“循环经济”。在此方面，欧洲的概念和技术应该说与中国的目标不谋而合。事实上，我发现在中国已有很多欧洲污水处理工艺目前正在应用。如果中国在经济发展与环境保护方面及时从欧洲汲取经验与教训，中国应该可以避免走“首先发展经济，然后再治理污染”的路子。

无疑，郝博士的学术论著，“可持续污水-废物处理技术”，在中国目前提倡“科学发展与创新科研”及“循环经济”的形势下是十分有用的。这本书不仅提出了概念与理论，同时也指出了技术发展方向，并描述了实际工艺。如果中国在环境保护方面能够做到“洋为中用”，这将是事半功倍的事情。虽然我一点也不懂中文，但我希望郝博士的著作具有这样一种作用。我认为，郝博士用中文描述他所理解的可持续概念与技术比他用英文描述的更为准确。

在中国新春佳节来临之际，我祝中国读者新年快乐！



马克·梵·洛斯德莱特 博士、教授

2006年1月29日于

荷兰代尔夫特理工大学 Kluyver 生物技术实验室

荷兰代尔夫特

---

马克·梵·洛斯德莱特，荷兰皇家科学院（KNAW）院士；国际水协（IWA）战略委员会主要成员，生物营养物质去除（脱氮除磷）专家组主席、生物膜工艺专家组主席、活性污泥工艺数学模型工作组核心成员、生物膜工艺数学模型工作组负责人、《Water Research》（水研究）责任编辑。



## 序 二

传统的污水生物处理技术虽然能够有效地去除 COD、N、P 等污染物，但在处理过程中要消耗较多的能源和资源。污水中的 COD 是一种潜在的绿色能源，所以，对于以去除 COD 为目的的二级生物处理工艺来说，实际上等于“以能消能”。再者，传统的污水生物处理技术往往是以单纯地消除所谓污染物，即净化水质为目标，一般并不考虑由于耗能所带来的 CO<sub>2</sub> 释放问题。因此，传统的污水处理的后果往往是在水质得到净化的同时，因 CO<sub>2</sub> 这种能够产生温室效应的气体排放而导致大气污染。这就使传统的污水处理技术在实质上不可避免地带有将水污染转嫁于大气污染之嫌。显然，如果以综合环境质量标准作为考量的基础，则通过传统的污水处理技术所取得的环境效益不能说是适宜的。

在全球普遍强调可持续发展战略的今天，对污水处理同样也应该考虑可持续技术研发问题。从可持续发展的角度来看，污水应该首先被看作是能源与资源的载体，而不应将其再视作为污染物。例如，污水本身是一种可以重复利用的水资源，污水中的 COD 是一种含能物质，污水中的磷是一种可以回收再生的潜在磷资源，污水的温度也是一种可以加以利用的能源……因此，可持续污水处理技术应该是变单纯的“处理”为有意识的“回收”。进而言之，可持续污水处理所采用的技术本身也应该具有能量与资源消耗量最低的特点。所以说，可持续污水处理技术应当具有两个层次的涵义，一是回收污水中蕴藏的能源和资源，二是处理技术本身能源和资源的消耗量是最低的。只有这样，才能保证污水处理与生态环境和谐统一，使污水处理走上可持续发展的良性轨道。

实现可持续污水处理首先需要我们转变观念，改变我们以往强调污水资源化

那种不惜消耗能源和资源将污水中所谓的“污染物”去除殆尽后再加以利用的传统思路。换句话说，传统观念中将再生水视为“主”产品的思路在可持续处理技术的框架下应看作是“副”产品，因为将污水中 COD、N、P 等所谓“污染物”作为主产品加以回收之后，污水自然也就得到了充分净化，完全可以达到回用的目的。

基于上述考虑，作者郝晓地同志在他即将出版的专著“可持续污水/废物处理技术”中，将欧洲可持续污水处理技术的理念、思路、技术以及他本人的学术研究成果汇集成书，在书中高度概括了当今世界最新的可持续技术研发动态。“洋为中用”历来是我国环境保护技术中普遍采用的策略与方法，毕竟西方发达国家在这一领域比我们先行一步。在我国目前强调科学发展观的今天，建设节约型社会以及发展循环经济已被提到十分重要的战略地位，这就需要我们环境保护工作者应与时俱进，及时引进和吸收西方发达国家一切有利于我国朝着既定目标前进的新生事物。郝晓地同志的这本专著无论从理念、思路到技术在我国可持续污水处理领域均称得上是奠基之作，从开篇到结尾均使我有一种耳目一新之感。

郝晓地同志作为我的硕士研究生早在 20 年前，已显示出他对科学研究和环境保护事业的热爱与追求。毕业后尽管他在国内工作单位所处的研究环境与条件十分有限，但他丝毫没有放松对他所热爱专业的更高目标的追求。借几次欧洲学术访问与合作研究之际，他的研究成果非常显著，已有 20 余篇学术论文在《Water Research》（《水研究》，英国）、《Biotechnology and Bioengineering》（《生物技术与生物工程》，美国）、《Journal of Environmental Engineering》（《环境工程》，美国）等国际著名学术刊物上发表。他在荷兰代尔夫特理工大学（TU Delft）国际著名的 Kluyver 生物技术实验室合作研究期间所取得的有关可持续生物营养物去除的学术成就异常突出，仅用 2 年时间便完成了一般人需要 4 年才能

完成的博士论文并取得博士学位，令欧洲人对中国人的学术表现刮目相看。所有这些情况足以说明郝晓地同志在这一领域的研究水平与能力。

纵观全书，透视着作者郝晓地同志具有较宽的国际学术视野和较高的学术站位。该书不仅介绍了欧洲可持续污水处理技术的发展现状与未来走向，更重要的是它体现出一种全新的技术思想。

我能够成为本书的首批读者，并为之作序，感到十分荣幸。

深信本书的出版能为我国可持续污水处理技术指明发展方向和工艺研发的目标。



2006年初春于哈尔滨

---

张自杰，我国给水排水工程界著名元老；经久不衰的畅销书——《排水工程》（下册，高等学校推荐教材、建设部“九五”重点教材）主编。

# 前 言

在全球普遍倡导可持续发展理念影响下，我国已将建设节约型社会和走循环经济道路的经济发展模式摆到了极高的战略位置。资源与能源的日益匮乏使得人们不断反思传统污水/废物处理技术，继而产生了发展可持续污水/废物处理技术的思想与行动。与传统观念不同，可持续污水处理技术首先将污水视为资源与能源的载体，其次强调以回收为目的的可持续技术本身资源与能源消耗量应最低。

基于这样一种技术思想，本书首先对传统污水处理技术中存在的弊端一一作了剖析。在此基础上，提出了发展可持续污水/废物处理技术的基本思路，并指出了相应技术发展方向。在突出有机物（COD/BOD）能源化、磷/硫（P/S）资源化、污泥内源减量化、营养物质（N、P）生态化、异常现象最小化、应用技术空间化、技术集成无害化、技术研发速度化、运行管理数字化、管理体制最优化的技术框架下，将当今世界已有、在研、概念技术集成一体呈现给读者。

本书主要根据作者近年来国内外研究成果并参考大量国际相关学术文献汇集而成。本书并非单纯介绍技术，主要是体现一种新学术思想下的国际技术发展动态。目前，国内外许多热点研究问题和方向，如亚硝化（SHARON）、厌氧氨氧化（ANAMMOX）、反硝化除磷、反硝化除硫、磷回收、硫回收、产氢（ $H_2$ ）/产甲烷（ $CH_4$ ）、零排放海水淡化、生态卫生、颗粒化污泥技术、污泥膨胀控制技术、污泥内源减量化技术、生态循环技术、数学模拟技术等，在本书中均有涉及。

## 缩略语英中文对照表

A/B	Adsorption/Biodegradation	吸附/生物降解法
A <sub>2</sub> N	Anaerobic-Anoxic-Nitrification	厌氧-缺氧-硝化系统：双污泥反硝化除磷系统
AF	Anaerobic Filtration	厌氧滤池
AFC	Alkaline Fuel Cell	碱性燃料电池
ANAMMOX	Anaerobic Ammonium Oxidation	厌氧氨（氮）氧化
APGs	Annual Performance Goals	年执行目标
APMs	Annual Performance Measures	年执行措施
AQUASIM		水系统模拟软件
ASM1	Activated Sludge Model No1	活性污泥 1 号模型
ASM2	Activated Sludge Model No2	活性污泥 2 号模型
ASM3	Activated Sludge Model No3	活性污泥 3 号模型
ATU	烯丙基硫脲	硝化抑制剂
BABE	Biological Augmentation Batch Enhanced	生物强化/间歇富集
BAP	Biomass Associated Product	生物体相关产物
BAS	Biofilm Aeration Suspended-Bed	生物膜气提悬浮床
BCFS <sup>®</sup>	Biologische-Chemische-Fosfaat-Stikstof verwijdering	生物/化学除磷脱氮工艺
BFB	Biofilm Fluid Bed	生物膜流化床
Bio-P Removal		生物磷去除
BNR	Biological Nutrient Removal	生物营养物去除

- BOD Biochemical Oxygen Demand 生物化学需氧量
- BOT Build Operation Transfer 建设、运行、转让：项目建设融资的一种方式
- CANON Completely Autotrophic Nitrogen removal Over Nitrite 完全自养脱氮工艺
- CIRCOX 内循环型气提反应器
- CSLM Confocal Scanning Laser Microscopy 激光共焦扫描显微镜
- COD Chemical Oxygen Demand 化学需氧量
- CSTR Complete Stirred Tank Reactor 完全混合式反应器
- CWSRF Clean Water State Revolving Fund 国家清洁用水周转基金
- DPB Denitrifying Phosphorus-removing Bacteria 反硝化除磷细菌
- DWSRF Drinking Water State Revolving Fund 安全饮用水周转基金
- EBPR Enhanced Biological Phosphate Removal 强化生物除磷
- Ecosan Ecological Sanitation 生态卫生
- EGSB Expanded Granular Sludge Bed 颗粒状厌氧污泥膨胀床
- EPS Extracellular Polymetric Substances 胞外聚糖
- FC Fuel Cell 燃料电池
- FGD Fule Gas Desulfurization 燃烧尾气脱硫技术
- FISH Fluorescence In Situ Hybridization 荧光原位杂交技术
- FWS Fish and Wildlife Service 美国鱼类及野生动植物保护协会
- GAOs Glycogen Accumulating non-poly-phosphate Organisms 糖原聚合细菌
- GIS Geographic Information System 地理信息系统
- GPRA Government Performance and Results Act 政府执行与效果评价法
- HMO Heterotrophic Micro-organisms 异养微生物
- HRT Hydraulic Retention Time 水力停留时间
- IC Inter Circulation 内循环反应器
- IWA International Water Association 国际水协
- MAP  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$  六水磷酸氨镁 (鸟粪石)
- MCFC Molten Carbonate Fuel Cell 熔融碳酸盐燃料电池
- MF Micro-Filtration 微滤
- MLSS Mixed Liquor Suspended Solids 混合液悬浮固体
- MLVSS Mixed Liquor Volatile Suspended Solids 混合液挥发性悬浮固体

## 14 可持续污水 - 废物处理技术

- MPB Methane Production Bacteria 产甲烷细菌
- MPRSA Marine Protection, Research, and Sanctuaries Act 海洋保护、研究和禁猎法
- MSW Municipal Solid Waste 市政固体废弃物
- MYPs Multi-Year Plans 多年发展计划
- NPDES National Pollutant Discharge Elimination System 国家污染物排放削减体系
- OCFO Office of the Chief Financial Officer 首席财政官办公室
- OGWDW the Office of Ground Water and Drinking Water 环保署水源及饮用水管理部
- OHO Ordinary Heterotrophic Organisms 常规异养微生物
- OSP Office of Science Policy 科研政策办公室
- OWM Office of Wastewater Management 污水管理部
- PAFC Phosphoric Acid Fuel Cell 磷酸燃料电池
- PAOs Phosphate Accumulating Organisms 聚磷菌
- PCD Programmed Cell Death 程序化细胞死亡
- PCR Polymerase Chain Reaction 聚合酶链反应
- PE Photosynthetic Efficiency 光合作用效率
- PEMFC Proton Exchange Membrane Fuel Cell 质子交换膜燃料电池
- PFR Plug Flow Reactor 推流式反应器
- PHA poly-Hydroxyalkanoate 聚- $\beta$ -羟基-链烷酸酯: 细胞聚合物
- PHB poly-Hydroxybutyrate 聚- $\beta$ -羟基-丁酸酯: 细胞聚合物
- PHV poly-Hydroxyvalerate 聚- $\beta$ -羟基-戊酸酯: 细胞聚合物
- PWSS Public Water System Supervision 公共供水系统管理计划
- RAC Risk Assessment Council 危险评估委员会
- RARE Regional Applied Research Effort 区域科研成果报告
- RBCOD 易生物降解底物
- RO Reverse Osmosis 反渗透法
- RSP Regional Science Program 区域研发计划
- SBR Sequence Batch Reactor 序批式反应器
- SDWA Safe Drinking Water Act 安全饮用水法

SHARON	Single Reactor for High Ammonium Removal Over Nitrite	中温亚硝化
SMP	Soluble Microbial Products	溶解性微生物产物
SND	Simultaneous Nitrification/Denitrification	同步硝化/反硝化
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	固体氧化物燃料电池
SOLEPUR	猪粪尿土壤净化系统	
SPC	Science Policy Council	科研政策委员会
SRB	Sulfate Reducing Bacteria	硫酸盐还原菌
SRF	State Revolving Fund	国家周转基金
SRT	Sludge Retention Time	固体停留时间(污泥龄)
SV	Settling Velocity	污泥沉降比
SVI	Sludge Volume Index	污泥体积指数
TN	Total Nitrogen	总氮
TP	Total Phosphorus	总磷
TS	Total Sulfur	总硫化物
TS	Total Solids Content	总固含量
TUD	TU Delft	代尔夫特理工大学(荷兰)
UAP	Utilization Associated Products	底物利用相关产物
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Bed	升流式厌氧污泥床
UCT	University of Cape Town	开普敦大学(南非)
UF	Ultra-Filtration	超滤
UIC	Underground Storage Tanks	地下填埋控制计划
USEPA	United States Environmental Protection Agency	美国环境保护署
VFAs	Volatile Fatty Acids	挥发性有机酸
WATS	Wastewater Aerobic/anaerobic Transformations in Sewers	下水道污水在好氧/厌氧条件下的转化模型
WCED	World Commission on Environment and Development	世界环境与发展委员会
WHO	World Health Organization	世界卫生组织
WQC	Water Quality Criterion	水质标准
WQS	Water Quality Standard	水质规范



## 14 可持续污水 - 废物处理技术

- MPB Methane Production Bacteria 产甲烷细菌
- MPRSA Marine Protection, Research, and Sanctuaries Act 海洋保护、研究和禁猎法
- MSW Municipal Solid Waste 市政固体废弃物
- MYPs Multi-Year Plans 多年发展计划
- NPDES National Pollutant Discharge Elimination System 国家污染物排放削减体系
- OCFO Office of the Chief Financial Officer 首席财政官办公室
- OGWDW the Office of Ground Water and Drinking Water 环保署水源及饮用水管理部
- OHO Ordinary Heterotrophic Organisms 常规异养微生物
- OSP Office of Science Policy 科研政策办公室
- OWM Office of Wastewater Management 污水管理部
- PAFC Phosphoric Acid Fuel Cell 磷酸燃料电池
- PAOs Phosphate Accumulating Organisms 聚磷菌
- PCD Programmed Cell Death 程序化细胞死亡
- PCR Polymerase Chain Reaction 聚合酶链反应
- PE Photosynthetic Efficiency 光合作用效率
- PEMFC Proton Exchange Membrane Fuel Cell 质子交换膜燃料电池
- PFR Plug Flow Reactor 推流式反应器
- PHA poly-Hydroxyalkanoate 聚- $\beta$ -羟基-链烷酸酯: 细胞聚合物
- PHB poly-Hydroxybutyrate 聚- $\beta$ -羟基-丁酸酯: 细胞聚合物
- PHV poly-Hydroxyvalerate 聚- $\beta$ -羟基-戊酸酯: 细胞聚合物
- PWSS Public Water System Supervision 公共供水系统管理计划
- RAC Risk Assessment Council 危险评估委员会
- RARE Regional Applied Research Effort 区域科研成果报告
- RBCOD 易生物降解底物
- RO Reverse Osmosis 反渗透法
- RSP Regional Science Program 区域研发计划
- SBR Sequence Batch Reactor 序批式反应器
- SDWA Safe Drinking Water Act 安全饮用水法