

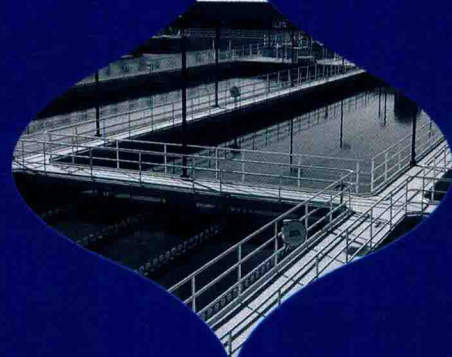
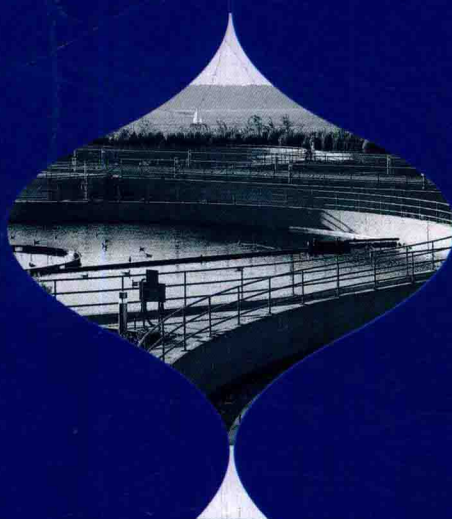
Municipal Nutrient
Removal Technologies
Reference Document
(Volume One-Technical
Report)

城市污水 脱氮除磷 处理技术导则

[美]

Shin Joh Kang
凯文·奥姆斯特德
克丝丽塔·塔卡斯
詹姆斯·柯林斯
编著

许光明
陈俊
郑璐
吴光学
译



工业出版社

城市污水脱氮除磷处理 技术导则

Municipal Nutrient Removal
Technologies Reference Document
(Volume One-Technical Report)

【美】Shin Joh Kang 凯文·奥姆斯特德 克丝丽塔·塔卡斯 詹姆斯·柯林斯 编著
许光明 陈俊 郑璐 吴光学 译



中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2015-6462

图书在版编目 (CIP) 数据

城市污水脱氮除磷处理技术导则 / (美) Shin Joh Kang等编著; 许光明等译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017.10

ISBN 978-7-112-21121-0

I. ①城… II. ①S… ②许… III. ①城市污水处理—反硝化作用②城市污水处理—降磷 IV. ①X703

中国版本图书馆CIP数据核字 (2017) 第208560号

Municipal Nutrient Removal Technologies Reference Document

(Volume One-Technical Report)

Shin Joh Kang, Principal Author

Kevin Olmstead, Author

Krista Takacs, Author

James Collins, Author

EPA 832-R-08-006

©2008, Shin Joh Kang, Kevin Olmstead, Krista Takacs, James Collins

Environmental Protection Agency, U.S.A.

Chinese Translation Copyright © China Architecture & Building Press 2018

China Architecture & Building Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese edition. This edition is authorized for sale throughout the world. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文翻译版由作者授权中国建筑工业出版社独家出版, 并在全世界销售。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。

责任编辑: 杜洁 孙书妍

责任校对: 李欣慰 王 烨

城市污水脱氮除磷处理技术导则

【美】Shin Joh Kang 凯文·奥姆斯特德 克丝丽塔·塔卡斯 詹姆斯·柯林斯 编著
许光明 陈俊 郑璐 吴光学 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京锋尚制版有限公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 16 字数: 262千字

2018年2月第一版 2018年2月第一次印刷

定价: 72.00元

ISBN 978-7-112-21121-0

(30663)

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)

中文版前言

近年来，虽然我国污水处理率不断提高，但是由氮磷污染引起的水体富营养问题依然日益严重，因此对于城镇污水处理厂污染物的排放标准中氮磷的排放提出了更高的标准和要求。对污水生物脱氮除磷的机理、影响因素及工艺特点等方面的研究，以及工程应用，是我国当前污水处理的重点，同时未来的发展要求不仅仅局限于具有较高的氮磷去除效果，而且也要求处理系统的运行稳定、可靠、控制调节灵活、投资和运行费用低。

该书对脱氮除磷工艺与过程控制的基本理论、典型工艺和实际应用等内容进行了较系统的归纳和总结，涉及美国营养物去除的简史，常用的生物和物理化学法营养物去除技术的详细资料及有关新兴除磷工艺和侧流脱氮工艺的初步资料，9个实际生产的案例研究，多种可用于现有设施改造和扩建的营养物去除技术的整体成本估算资料和工艺升级需要考虑的系列因素和方法，并通过大量的试验和实践数据、工程案例，重点论述了脱氮除磷新理论、新技术以及过程控制理论与方法，还列举了城市污水处理提标改造工程中脱氮除磷工艺的具体应用实例，包括案例项目的背景、前期准备工作、工艺方案选择和流程确定、主要技术特色、经济与效益分析、改进措施与实际成效等不同层面，对我国科研人员、设计工程师更加深入地认识脱氮除磷工艺，并发挥其优势具有很好的借鉴作用。

《城市污水脱氮除磷处理技术导则》的中译本由许光明负责统稿，陈俊，郑璐和吴光学负责对本书的翻译、审阅和详细修改以及最后定稿。常州排水管理处的陈波、戴界红、吕贞、张飞雁、陈霆莉、董阳、黄一澄、刘磊、李一新、茆永晶、徐旻、杨云安、朱艳参加了部分初译稿的核对工作。在此对所有参加翻译工作人员的辛勤劳动表示衷心的感谢。

许光明 常州市排水管理处

陈俊 常州市排水管理处

郑璐 常州市排水管理处

吴光学 清华大学深圳研究生院

2016年9月 于常州

序言

美国国家环境保护局（EPA）由美国国会主管，旨在保护国家土地、大气和水资源。根据环境法相关条例，环保局致力于制定和实施各种行动，实现人类活动和生态系统承载力之间的平衡，以支持和维持人类的可持续发展。为实现此目标，污水管理办公室（OWM）提供信息和技术支持，以解决当前面临的环境问题，并构建保护未来公众健康和环境所必需的知识库。本书根据Tetra Tech股份有限公司与EPA签署的协议而编制，介绍并综述此领域内的技术发展状况；此外，本书将随本领域的最新技术发展而作定期修订。除非额外注明，文中所涉及信息、资料、访谈及数据都由Tetra Tech公司负责。虽然当前存在很多被证明是经济高效的营养物质去除技术或改良技术但是本书中所选择的案例均具有一定的针对性。这些案例能够涵盖至少一年全面运行数据和性能数据，提供详细资本及运行维护成本明细，以及整个案例周期内的完备数据。未来本书将持续更新，以进一步补充新的技术应用案例。其中一些涉及新兴技术的案例，还没有实际工程应用方面的数据支持，主要由技术或者设备供应商提供。有些经济成本数据来自技术估算，不是实际工程成本。因此还需进一步努力收集最新的技术发展和案例信息，从而对技术、成本、性能进行充分评价。

文中所涉及的商标名称、特定供应商或产品，并不代表EPA或联邦政府实际或暗示的推荐、优选或认可。提出的结果、结论、用途或实践并不代表EPA的观点或政策。

使用说明

EPA提供此书的目的是提供关于营养物去除技术和实践的最新进展。本书的明确目标——提供资料，帮助地方决策者及地区和州管理者为市政污水处理设施规划经济高效的营养物去除项目。该书提供了关于改造或扩建现有设施的技术、案例研究、投资和O&M成本方面的关键资料。

第1章介绍了美国营养物去除的简史，奠定了详细介绍目前营养物去除实践和成本状况的基础。

第2章包括常用的生物和物理化学法营养物去除技术的详细资料及有关新兴除磷工艺和侧流脱氮工艺的初步资料。它提供了生物和物理化学处理技术的详细技术资料与成本资料。技术资料包括40多种市政污水脱氮、除磷或脱氮除磷处理技术的详细工艺说明及操作工艺参数。这些资料还包括有关工艺性能和美国及加拿大30家污水处理厂自愿提供的污水处理厂实际运行的可靠数据。这种深入全面的分析有助于决策者评估特定设施的生产性能数据。

第3章提供了9个不同生产规模案例研究的集成信息。案例研究的各设施包含了寒冷气候和温暖气候地区的各种技术，深度探讨了如何成功设计和运行工艺，以及如何详细分析工艺成本的关键因素。

第4章包含了多种可用于现有设施改造和扩建的营养物去除技术的整体成本估算资料。成本估算的准确性取决于评估过程中所提供数据的详细程度。如果成本估算是基于成本曲线或类似设施和技术的成本，很少考虑到当地条件，则成本估算的准确率仅在50%之内。如果开展了更详细的研究，例如土壤钻孔、初步工程设计图及草案规范，则这种估算将更为准确。

第5章提出了工艺升级所需要考虑的系列因素和方法，包括预测将来的处理负荷，评估现有处理能力，编制包括所有回流、返回负荷和负荷的物料衡算，构建包括污水处理厂运行灵活性以应对未来不确定性的扩建和升级所需的方案，评估可行的替代方案，以及对推荐的方案的选择。第5章还给出了能够达到出水氮、磷或氮和磷目标浓度范围的技术列表，以及基于设计及运行和成本因素，识别和评估可行技术时应考虑的技术选择因素。

缩略语

| | |
|-------------------|---------------|
| Al ³ | 硫酸铝（或明矾） |
| ANAMMOX | 厌氧氨氧化 |
| ASCE | 美国土木工程师学会 |
| A/O | 缺氧/好氧 |
| A ² /O | 厌氧/缺氧/好氧 |
| AS | 活性污泥 |
| AT 3 | 3段式曝气工艺 |
| BABE | 间歇式生物强化 |
| BAF | 曝气生物滤池 |
| BAR | 生物强化再曝气 |
| BASIN | 生物膜活性污泥新型硝化 |
| BNR | 生物脱氮 |
| BOD | 生化需氧量 |
| BOD/TKN | 生化需氧量与总凯氏氮之比 |
| BOD/TP | 生化需氧量与总磷之比 |
| BPR | 生物除磷 |
| CANON | 基于亚硝酸盐的完全自养脱氮 |
| CAS | 循环活性污泥 |
| CBOD | 碳生化需氧量 |
| COD | 化学需氧量 |
| COV | 变异系数 |
| CWSRF | 清洁水州循环基金 |
| DAF | 溶气浮选装置 |
| DO | 溶解氧 |
| DON | 溶解有机氮 |
| EBPR | 强化生物除磷 |
| ENR | 《工程新闻记录》 |
| EPA | 美国国家环境保护局 |

| | |
|---------------------------------|----------------------|
| FeCl ₃ | 氯化铁 |
| FFS | 固定膜系统 |
| GAO | 聚糖菌 |
| GPD | 加仑/d |
| HDWK | 渠首 |
| HCO ₃ ⁻ | 碳酸氢盐 |
| H ₂ CO ₃ | 碳酸 |
| HRT | 水力停留时间 |
| IFAS | 集成固定膜活性污泥 |
| I&C | 仪表和控制 |
| kWh/年 | 千瓦时/年 |
| MAUREEN | 主流自养循环强化脱氮 |
| MBBR | 移动床生物膜反应器 |
| MBR | 膜生物反应器 |
| MG | 百万加仑 |
| MGD | 百万加仑/天 |
| mg/L | 毫克每升 (相当于百万分之几) |
| LE | 改良Ludzack-Ettinger工艺 |
| MLSS | 混合液悬浮固体 |
| MW | 分子量 |
| N ₂ | 氮气 |
| NH ₃ -N | 氨氮 |
| NL | 无限值 |
| NO ₃ ⁻ -N | 硝酸盐氮 |
| NPDES | 国家污染物排放削减制度 |
| OLAND | 限氧好氧硝化-反硝化 |
| ORP | 氧化还原电势 |
| O&M | 操作和维护 |
| PAO | 聚磷菌 |
| PID | 交替式氧化沟 |

| | |
|-------------------------------|----------------|
| PLC | 可编程逻辑控制器 |
| PO ₄ ³⁻ | 磷酸盐 |
| POTW | 国有污水处理厂 |
| RAS | 回流活性污泥 |
| rbCOD | 易生物降解碳需氧量 |
| rDON | 难去除溶解性有机氮 |
| SCADA | 监控与数据采集 |
| SBR | 序批式间歇反应器 |
| SE | 二级出水 |
| SND | 同时硝化和反硝化 |
| SF | 潜流 |
| SHARON | 亚硝酸盐法单反应器高活性除氮 |
| SRT | 污泥停留时间 |
| TMDL | 最大日负荷总量 |
| TKN | 总凯氏氮 |
| TN | 总氮 |
| TP | 总磷 |
| TRPA | 塔霍湖区域规划局 |
| TSS | 总悬浮固体 |
| UCT | 开普敦大学工艺 |
| UV | 紫外线 |
| VFA | 挥发性脂肪酸 |
| VIP | 弗吉尼亚州创新工艺 |
| VSS | 挥发性悬浮固体 |
| WAS | 剩余活性污泥 |
| WEF | 水环境联合会 |
| WERF | 水环境研究基金会 |
| WQBEL | 基于水质的出水限值 |
| WWTP | 污水处理厂 |

目录

| | |
|----------------------------|-----------|
| 摘要 | 1 |
| 第1章 前言和历史 | 25 |
| 1.1 概述 | 25 |
| 1.2 美国脱氮除磷的背景 | 25 |
| 1.2.1 塔霍湖 | 27 |
| 1.2.2 五大湖 | 28 |
| 1.2.3 奥科宽水库和切萨皮克湾 | 30 |
| 1.3 NPDES许可证 | 31 |
| 1.3.1 基于水域的许可和水质交易 | 32 |
| 1.4 本章参考文献 | 33 |
| 第2章 处理技术 | 37 |
| 2.1 概述 | 37 |
| 2.2 脱氮工艺 | 37 |
| 2.2.1 污水中氮的形态 | 37 |
| 2.2.2 脱氮影响因素 | 39 |
| 2.2.3 脱氮技术 | 44 |
| 2.3 除磷工艺 | 60 |
| 2.3.1 生物除磷 | 60 |
| 2.3.2 化学除磷 | 64 |
| 2.3.3 除磷技术 | 67 |
| 2.4 脱氮除磷工艺 | 79 |
| 2.4.1 脱氮除磷的影响因素 | 79 |
| 2.4.2 脱氮除磷技术 | 80 |
| 2.5 生产性营养物去除工艺案例 | 87 |
| 2.5.1 脱氮矩阵和变异性数据 | 87 |
| 2.5.2 除磷矩阵和变异性数据 | 97 |
| 2.5.3 组合脱氮除磷矩阵和变异性数据 | 104 |

| | | |
|-------|-----------------------------|-----|
| 2.6 | 总结 | 106 |
| 2.6.1 | 性能和变异性 | 107 |
| 2.6.2 | 脱氮技术 | 107 |
| 2.6.3 | 除磷技术 | 107 |
| 2.6.4 | 组合脱氮除磷技术 | 110 |
| 2.7 | 本章参考文献 | 110 |
| 附件 | 数据提供地点 | 118 |
| | | |
| 第3章 | 案例研究和可靠性因素 | 121 |
| 3.1 | 前言和概述 | 121 |
| 3.1.1 | 案例研究处理厂的许可限值 | 121 |
| 3.2 | 案例研究总结 | 125 |
| 3.2.1 | 低浓度限值 (3mg/L或更低TN) TN和TP的去除 | 125 |
| 3.2.2 | 中等浓度限值 (3~6mg/L) TN和TP的去除 | 134 |
| 3.2.3 | 磷可降至低浓度 (小于0.1mg/L) | 142 |
| 3.3 | 可靠性因素 | 147 |
| 3.3.1 | 污水特性 | 147 |
| 3.3.2 | 发酵罐与VFAs生成 | 148 |
| 3.3.3 | 生物反应器设计与工艺参数 | 149 |
| 3.3.4 | 二级污泥浓缩 | 150 |
| 3.3.5 | 污泥消化 | 150 |
| 3.3.6 | 返回流量和负荷 | 150 |
| 3.3.7 | 雨天流量管理 | 151 |
| 3.3.8 | 三级滤池 | 152 |
| 3.3.9 | 三级澄清池 | 152 |
| 3.4 | 成本因素 | 156 |
| 3.4.1 | 资本成本 | 156 |
| 3.4.2 | 运行和维护成本 | 157 |
| 3.4.3 | 单位成本 | 158 |
| 3.5 | 总结 | 162 |
| 3.5.1 | 排放限值 | 162 |

| | | |
|------------|---------------|------------|
| 3.5.2 | 除磷 | 162 |
| 3.5.3 | 脱氮 | 164 |
| 3.5.4 | 资本成本和O&M成本 | 166 |
| 3.6 | 本章参考文献 | 167 |
| 第4章 | 成本因素 | 169 |
| 4.1 | 改良现有设施 | 169 |
| 4.1.1 | 文献综述 | 169 |
| 4.1.2 | 案例研究 | 171 |
| 4.2 | 改造工艺成本模型 | 173 |
| 4.2.1 | CAPDETWorks | 173 |
| 4.2.2 | 除磷工艺改造方案 | 177 |
| 4.2.3 | 脱氮工艺改造方案 | 181 |
| 4.2.4 | 脱氮除磷组合方案 | 184 |
| 4.3 | 扩建工艺成本模型 | 186 |
| 4.3.1 | 除磷技术 | 187 |
| 4.3.2 | 脱氮技术 | 191 |
| 4.3.3 | 脱氮除磷组合方案 | 196 |
| 4.4 | 成本因素讨论 | 200 |
| 4.5 | 总结 | 201 |
| 4.6 | 本章参考文献 | 202 |
| 第5章 | 升级现有设施 | 203 |
| 5.1 | 常规升级方法 | 203 |
| 5.1.1 | 成功标准 | 203 |
| 5.1.2 | 设施规划 | 204 |
| 5.2 | 可用技术 | 204 |
| 5.3 | 技术选择标准 | 212 |
| 5.3.1 | 脱氮 | 214 |
| 5.3.2 | 除磷处理厂因素 | 217 |
| 5.3.3 | 处理厂脱氮除磷因素 | 219 |

| | | |
|-------|---------------|-----|
| 5.4 | 营养物去除的设计和运行因素 | 220 |
| 5.4.1 | 进水特性 | 222 |
| 5.4.2 | 快速碳源的来源 | 224 |
| 5.4.3 | 雨天流量的影响 | 225 |
| 5.4.4 | 污泥处理工艺管理 | 226 |
| 5.4.5 | 返回负荷 | 227 |
| 5.4.6 | SCADA要求和传感器 | 230 |
| 5.4.7 | 人员配备要求 | 230 |
| 5.4.8 | 培训需求 | 230 |
| 5.4.9 | 中试试验 | 231 |
| 5.5 | 最终工艺选择 | 231 |
| 5.6 | 总结 | 233 |
| 5.7 | 本章参考文献 | 235 |

图

| | | |
|--------|----------------------|----|
| 图2-1 | 上向流生物滤池 | 45 |
| 图2-2 | 反硝化滤池工艺 | 46 |
| 图2-3 | 改良Ludzack-Ettinger工艺 | 47 |
| 图2-4 | 循环曝气活性污泥工艺 | 47 |
| 图2-5 | 4段巴登福工艺 | 48 |
| 图2-6 | 氧化沟工艺 | 49 |
| 图2-7 | 集成固定膜活性污泥工艺 | 51 |
| 图2-8 | 移动床生物膜反应器工艺 | 52 |
| 图2-9 | MBR工艺 | 53 |
| 图2-10 | 分段进水活性污泥工艺 | 54 |
| 图2-11 | Biodenitro工艺 | 55 |
| 图2-12 | Schreiber逆流曝气工艺 | 56 |
| 图2-13 | 序批式间歇反应器 | 57 |
| 图2-13A | InNitri工艺 | 58 |
| 图2-13B | BABE工艺 | 59 |
| 图2-13C | SHARON工艺 | 59 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 图2-13D | ANAMMOX工艺 | 60 |
| 图2-14 | 发酵工艺 | 68 |
| 图2-15 | A/O (Phoredox) 工艺 | 68 |
| 图2-16 | 具备厌氧区的氧化沟 | 69 |
| 图2-17 | 化学除磷/过滤工艺 | 70 |
| 图2-18 | Parkson Dynasand D2高级过滤系统 | 75 |
| 图2-19 | CoMag工艺 | 77 |
| 图2-20 | Blue-PRO工艺 | 78 |
| 图2-21 | 美国Filter Trident工艺 | 78 |
| 图2-22 | A ² O工艺 | 81 |
| 图2-23 | 5段改良巴登福工艺 | 82 |
| 图2-24 | UCT工艺 | 83 |
| 图2-25 | 改良UCT工艺 | 83 |
| 图2-26 | VIP工艺 | 84 |
| 图2-27 | JHB工艺 | 85 |
| 图2-28 | Biodenipho (交替式氧化沟) 工艺 | 86 |
| 图2-29 | Blue Plains工艺 | 86 |
| 图2-30 | Westbank工艺 (不列颠哥伦比亚省基洛纳) | 87 |
| 图2-31 | TN月平均频率曲线: 低浓度去除 | 91 |
| 图2-32 | 同心氧化沟 | 93 |
| 图2-33 | TN月平均频率曲线: 中等范围去除 | 94 |
| 图2-34 | NH ₃ -N月平均频率曲线 | 96 |
| 图2-35 | TP月平均频率曲线: 低浓度去除 | 98 |
| 图2-36 | TP去除月平均频率曲线: 中等浓度去除 | 103 |
| 图3-1 | 西布兰奇污水处理厂: TP月频率曲线 | 126 |
| 图3-2 | 西布兰奇污水处理厂: NH ₃ -N月频率曲线 | 127 |
| 图3-3 | 西布兰奇污水处理厂: TN月频率曲线 | 127 |
| 图3-4 | 佛罗里达州利县: TP月频率曲线 | 128 |
| 图3-5 | 佛罗里达州利县: TN月频率曲线 | 129 |
| 图3-6 | 北卡罗来纳州约翰斯顿县: TP月平均频率曲线 | 130 |
| 图3-7 | 北卡罗来纳州约翰斯顿县: NH ₃ -N月平均频率曲线 | 131 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 图3-8 | 北卡罗来纳州约翰斯顿县: TN月平均频率曲线 | 131 |
| 图3-9 | 佛罗里达州克利尔沃特马歇尔街高级污水处理厂: TP月平均频率曲线 | 133 |
| 图3-10 | 佛罗里达州克利尔沃特马歇尔街高级污水处理厂: NH ₃ -N月平均频率曲线 | 133 |
| 图3-11 | 佛罗里达州克利尔沃特马歇尔街高级污水处理厂: TN月平均频率曲线 | 134 |
| 图3-12 | 北卡罗来纳州北凯里: TP月平均频率曲线 | 135 |
| 图3-13 | 北卡罗来纳州北凯里: NH ₃ -N月平均频率曲线 | 135 |
| 图3-14 | 北卡罗来纳州北凯里: TN月平均频率曲线 | 136 |
| 图3-15 | 不列颠哥伦比亚省基洛纳: TP月平均频率曲线 | 137 |
| 图3-16 | 不列颠哥伦比亚省基洛纳: NH ₃ -N月平均频率曲线 | 138 |
| 图3-17 | 不列颠哥伦比亚省基洛纳: TN月平均频率曲线 | 138 |
| 图3-18 | 弗吉尼亚州费尔法克斯县Noman M. Cole污染控制厂: TP月平均频率曲线 | 140 |
| 图3-19 | 弗吉尼亚州费尔法克斯县, Noman M. Cole污染控制厂: NH ₃ -N月平均频率曲线 | 141 |
| 图3-20 | 弗吉尼亚州费尔法克斯县, Noman M. Cole污染控制厂: TN月平均频率曲线 | 141 |
| 图3-21 | 内华达州拉斯维加斯, 克拉克县废水回收厂: TP月平均频率曲线 | 143 |
| 图3-22 | 内华达州拉斯维加斯, 克拉克县废水回收厂: TN月平均频率曲线 | 143 |
| 图3-23 | 内华达州拉斯维加斯, 克拉克县废水回收厂: TN月平均频率曲线 | 144 |
| 图3-24 | 蒙大拿州卡利斯佩尔: TP月平均频率曲线 | 145 |
| 图3-25 | 蒙大拿州卡利斯佩尔: NH ₃ -N月平均频率曲线 | 145 |
| 图3-26 | 蒙大拿州卡利斯佩尔: TN月平均频率曲线 | 146 |
| 图4-1 | 除磷工艺改造方案的O&M成本 | 179 |
| 图4-2 | 除磷工艺改造方案的资本成本 | 180 |
| 图4-3 | 除磷工艺改造方案的生命周期成本 | 180 |

| | | |
|-------|----------------------------|-----|
| 图4-4 | 脱氮工艺改造方案的资本成本 | 182 |
| 图4-5 | 脱氮工艺改造方案的O&M成本 | 183 |
| 图4-6 | 脱氮工艺改造方案的生命周期成本 | 183 |
| 图4-7 | 脱氮除磷工艺改造方案的投资成本 | 185 |
| 图4-8 | 脱氮除磷工艺改造方案的O&M成本 | 185 |
| 图4-9 | 脱氮除磷工艺改造方案的生命周期成本 | 186 |
| 图4-10 | 除磷工艺扩建方案的O&M成本 | 188 |
| 图4-11 | 除磷工艺扩建方案的投资成本 | 189 |
| 图4-12 | 除磷工艺扩建方案的生命周期成本 | 190 |
| 图4-13 | 1MGD除磷工艺扩建方案总O&M成本的分项比例 | 191 |
| 图4-14 | 10MGD除磷工艺扩建方案总O&M成本的分项比例 | 191 |
| 图4-15 | 脱氮工艺扩建方案的投资成本 | 193 |
| 图4-16 | 脱氮工艺扩建方案的O&M成本 | 194 |
| 图4-17 | 脱氮工艺扩建方案的生命周期成本 | 195 |
| 图4-18 | 1MGD脱氮工艺扩建方案总O&M成本的分项比例 | 195 |
| 图4-19 | 10MGD脱氮工艺扩建方案总O&M成本的分项比例 | 196 |
| 图4-20 | 脱氮除磷工艺扩建方案的资本成本 | 198 |
| 图4-21 | 脱氮除磷工艺扩建方案的O&M成本 | 198 |
| 图4-22 | 脱氮除磷工艺扩建方案的生命周期成本 | 199 |
| 图4-23 | 1MGD脱氮除磷工艺扩建方案总O&M成本的分项比例 | 199 |
| 图4-24 | 10MGD脱氮除磷工艺扩建方案总O&M成本的分项比例 | 200 |

表

| | | |
|-------|---------------------|-----|
| 表ES-1 | 改造技术的成本估算 | 13 |
| 表ES-2 | 10MGD扩建技术的成本估算 | 19 |
| 表2-1 | 工艺性能数据：脱氮——处理厂出水 | 89 |
| 表2-2 | 图2-31中案例研究设施详细的曲线资料 | 91 |
| 表2-3 | 图2-33中案例研究设施详细的曲线资料 | 95 |
| 表2-4 | 图2-34中案例研究设施详细的曲线资料 | 96 |
| 表2-5 | 工艺性能数据：除磷——处理厂出水 | 99 |
| 表2-6 | 图2-35中案例研究设施详细的曲线资料 | 101 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 表2-7 | 图2-36中案例研究设施详细的曲线资料 | 104 |
| 表2-8 | 工艺性能数据：脱氮除磷——处理厂出水 | 108 |
| 表3-1 | 排放许可限值和性能数据总结 | 122 |
| 表3-2 | 加拿大与美国许可限值的统计学对比 | 125 |
| 表3-3 | 弗吉尼亚州费尔法克斯县污水特性月变化 | 147 |
| 表3-4 | 案例研究设施的处理工艺 | 153 |
| 表3-5 | 案例研究污水处理厂的成本 | 160 |
| 表4-1 | 马里兰州、康涅狄格州及其他地方的升级成本 | 170 |
| 表4-2 | 案例研究的升级成本 | 172 |
| 表4-3 | CAPDETWorks估值中使用的成本因素 | 174 |
| 表4-4 | 佛罗里达州克利尔沃特和蒙大拿州卡利斯佩尔 CAPDETWorks与实际成本的对比 | 175 |
| 表4-5 | 成本模型污水参数 | 176 |
| 表4-6 | 除磷方案的工艺参数 | 178 |
| 表4-7 | 脱氮方案的工艺参数 | 181 |
| 表4-8 | 脱氮方案的工艺参数 | 184 |
| 表4-9 | 除磷方案的工艺参数 | 187 |
| 表4-10 | 脱氮方案的工艺参数 | 192 |
| 表4-11 | 脱磷除磷组合方案的工艺参数 | 196 |
| 表5-1 | 工艺列表：TP | 205 |
| 表5-2 | 工艺列表：NH ₃ -N | 206 |
| 表5-3 | 工艺列表：TN | 206 |
| 表5-4 | 工艺列表：TN和TP | 207 |
| 表5-5 | 技术选择矩阵：脱氮 | 209 |
| 表5-6 | 技术选择矩阵：除磷 | 210 |
| 表5-7 | 技术选择矩阵：脱氮除磷 | 211 |
| 表5-8 | 决策矩阵例1 | 232 |
| 表5-9 | 决策矩阵例2 | 233 |