



氮污染环境治理 技术原理与工程

[墨西哥] 佛朗希斯克·赛文茨 编著

王荣昌 译

中国建筑工业出版社

氮污染环境治理技术 原理与工程

[墨西哥] 佛朗希斯克·赛文茨 编著
王荣昌 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2011-2001号

图书在版编目（CIP）数据

氮污染环境治理技术原理与工程 /（墨）赛文茨编著，王荣昌译.

北京：中国建筑工业出版社，2013.4

ISBN 978-7-112-15203-2

I. ①氮… II. ①赛… ②王… III. ①氧化氮—空气污染控制
IV. ①X511.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 041501 号

本书全面阐述了无机和有机含氮化合物在不同环境中的污染过程，论述了氮素污染对生态学、毒理学、经济学方面的效应以及对公众健康的影响，介绍了污水生物脱氮工艺的基本原理，系统总结了目前用于氮污染治理和氮素回收的主要技术的基本原理、工艺控制 and 设计标准，并给出了相应的工程应用实例。本书深入浅出，技术理论与工程实际相结合，有助于读者深入理解氮污染治理技术的基本原理和工艺关键，特别对于一些新型技术的工程应用具有很高的参考价值 and 借鉴作用。本书可作为高等院校环境科学与工程相关专业的参考书，也适于从事环境保护和环境科学研究工作的专业人员阅读。

Environmental Technologies to Treat Nitrogen Pollution

Copyright © 2009 IWA Publishing

Chinese Translation Copyright © 2013 China Architecture & Building Press

All rights reserved.

本书经 IWA Publishing 授权我社翻译出版

* * *

责任编辑：于莉 孙炼

责任设计：赵明霞

责任校对：陈晶晶 关健

氮污染环境治理技术原理与工程
[墨西哥] 佛朗希斯克·赛文茨 编著
王荣昌 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京西郊百万庄）

各地新华书店、建筑书店经销

华鲁印联（北京）科贸有限公司制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：18½ 字数：460 千字

2013 年 5 月第一版 2013 年 5 月第一次印刷

定价：68.00 元

ISBN 978-7-112-15203-2

(23179)

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）

前 言

目前氮素的生产每年呈递增趋势，这主要归因于农业生产的需求，但化石燃料能源的消耗也在其中发挥着重要作用。除了高密度农业和化石燃料燃烧所造成的氮素污染之外，需要不同含氮化合物的工业过程也是氮素污染的重要来源之一。例如：铵作为原料用于生产多种产品，如：尼龙、塑料、树脂、胶水、动物饲料添加剂以及炸药等。人类活动所造成的氮循环的加速为全球人口的持续增长提供了条件，比如提供给人类足够的食物和燃料等。然而，人们对氮循环的理解，已经从如何促进食物和燃料的生产，转变为认识到氮循环加速对环境系统的破坏。另外，全球氮素的生产与营养性氮素需求之间存在区域性的不平衡。实际上，在某些地区氮素被用来生产出过量食物的同时，也造成了许多环境污染问题。而其他一些地区却缺乏足够的氮素来满足成千上万人口对热量基本的需求。

因此，近年来人们提出两种氮素管理模式。第一种模式是在产生高浓度含氮污染物的行业推行高效的氮去除技术，同时其他配套的污染防治措施也要跟上，特别是对一些难降解含氮化合物的污染防治应引起足够的重视，如：偶氮燃料、硝基芳烃和芳香胺等，因为这些污染物对公众健康和生态环境有着超常的影响。第二种模式是把氮素作为一种重要的营养物质，从高含氮工业废水中得到充分的回收，并将回收的产品用于氮素需求高的行业，如：高密度集约化农业生产等。

本书全面阐述了无机和有机含氮化合物在不同环境中的污染过程，还论述了氮素污染对生态学、毒理学、经济学方面的效应以及对公众健康的影响（第1章）。本书还介绍了污水生物脱氮工艺的基本原理，如：硝化作用（第2章）、反硝化作用（第3章）和厌氧氨氧化作用（第4章）等。本书还介绍了针对几种不同污水的生物脱氮处理工艺的设计标准，如：市政污水（第5章）、高浓度含氮污水，如污泥消化上清液（第6章）、垃圾渗滤液（第8章）等。本书还介绍了含氮化合物难降解工业废水脱氮处理的设计标准，如：制革废水、爆炸物废水和制药废水等（第7章）。本书第9章重点介绍了利用鸟粪石从高浓度含氮废水中回收氮素的原理、过程控制参数以及应用案例。第10章介绍了利用离子交换去除受污染水体中氨氮时需要考虑的主要因

素。第 11 章阐述了从工业烟道废气中去除含氮污染物的各种处理系统。另外，从工业废水中同时去除含氮和含硫污染物的不同处理技术在本书的第 12 章有详细介绍。最后，本书第 13 章介绍了利用好氧颗粒污泥进行污水脱氮的技术及其应用实例。

本书中的所有内容全部为业内知名专家根据多年的研究经验编写，根据从市政或工业废水中去除或回收含氮化合物的一些工艺过程的应用案例研究中会得到基本原理、控制参数和设计标准。

在此我想对各位满怀热情和严谨的参与此次编写工作的编者表示感谢，编者们对这本书高品质的贡献给我留下了深刻的印象，谢谢你们的巨大努力。

最后，我想把这本书献给我的妻子，Liz，还有我的孩子们，Eliot、Alfonso 和 Román。谢谢你们每天对我的支持与鼓励，你们的爱丰富了我的人生。

Francisco J. Cervantes

墨西哥圣路易斯波托西州；2009 年 1 月

译者序

人类通过燃烧化石燃料、生产使用氮肥及其他含氮产品等活动，改变了全球生态系统中的氮循环，造成了生态环境的氮污染，因此，研究经济高效的氮污染治理技术，对于促进经济社会的可持续发展，具有重要的理论意义和实际应用价值。

学术专著《氮污染治理技术原理与工程》是国际水协会多名专家，根据多年的研究经验总结编写。本书全面阐述了无机和有机含氮化合物在不同环境中的污染过程，论述了氮素污染对生态学、毒理学、经济学方面的效应以及对公众健康的影响，介绍了污水生物脱氮工艺的基本原理，如：硝化作用、反硝化作用和厌氧氨氧化作用等。系统总结了目前用于氮污染治理和氮素回收的主要技术的基本原理、工艺控制和设计标准，并给出了相应的工程应用实例。本书的特色是深入浅出，技术理论与工程实际相结合，有助于读者深入理解氮污染治理技术的基本原理和工艺关键，特别对于一些新型技术，如：厌氧氨氧化、好氧颗粒污泥等的工程应用具有很高的参考价值 and 借鉴作用。

希望本书在中国的翻译出版能推动我国氮污染治理理论与技术的发展。本书由王荣昌译，参加本书翻译校对工作的还有课题组的研究生肖帆、王亚楠、司书鹏、戴双林、唐云飞、沈冰洁、王紫嫣、欧阳琛、郑翔等。国家自然科学基金委（50908164）、国家科技支撑计划（2012BAJ21B01）和上海市科委科技创新行动计划（12231205303）为本翻译工作提供了资助。在此，谨向国际水协会出版公司、各位原著作者和中国建筑工业出版社于莉女士的支持与帮助表示感谢。

王荣昌
2012年8月于上海

目 录

1	氮污染物的人为来源及其对环境和公共健康的影响	1
1.1	前言	1
1.2	氮污染物的主要人为来源	2
1.2.1	无机氮污染	2
1.2.2	有机氮污染	3
1.3	氮污染的影响	3
1.3.1	生态效应	3
1.3.1.1	淡水生态系统的酸化	3
1.3.1.2	水生生态系统的富营养化	4
1.3.2	毒理效应	6
1.3.3	对人类健康的影响	8
1.3.4	对人类经济的影响	9
1.4	防止氮污染的方法	9
1.4.1	末端治理技术	10
1.4.2	清洁生产	11
1.4.3	工业生态学	11
	参考文献	12
2	硝化过程原理	16
2.1	前言	16
2.2	硝化过程的生物化学机理	16
2.2.1	氨氧化过程	16
2.2.2	亚硝酸盐氧化过程	17
2.2.3	包括生物合成的方程	17
2.3	硝化过程的微生物学机理	17
2.3.1	氨氧化细菌 (AOB)	17

2.3.2	亚硝酸盐氧化细菌 (NOB)	18
2.4	硝化过程的影响因素	19
2.4.1	温度	19
2.4.2	pH	20
2.4.3	氨氮和游离氨的浓度	20
2.4.4	溶解氧浓度	21
2.4.5	抑制性物质	21
2.5	硝化过程的数学模型	22
2.5.1	传统一步硝化模型	22
2.5.2	两步硝化模型	23
2.5.3	包括抑制作用的高级模型	23
	参考文献	26
3	反硝化过程原理	28
3.1	前言	28
3.2	反硝化过程	29
3.2.1	反硝化过程的微生物学机理	29
3.2.2	反硝化过程的生物化学机理	30
3.2.2.1	硝酸盐 (NO_3^-) 还原成亚硝酸盐 (NO_2^-)	31
3.2.2.2	亚硝酸盐 (NO_2^-) 还原成一氧化氮 (NO)	31
3.2.2.3	一氧化氮 (NO) 还原成一氧化二氮 (N_2O)	32
3.2.2.4	一氧化二氮 (N_2O) 还原成氮气 (N_2)	32
3.2.2.5	反硝化酶的遗传控制	33
3.2.3	反硝化过程的生理学机理	34
3.2.3.1	氧气的影响	35
3.2.3.2	氮氧化物的影响	35
3.2.3.3	pH 和温度的影响	35
3.2.3.4	C/N 比的影响	36
3.2.3.5	不同的电子供体	37
3.2.4	反硝化过程的数学模型	39
	参考文献	41
4	厌氧氨氧化过程	46
4.1	厌氧氨氧化的发现及其化学计量学	46
4.2	热力学参数和动力学参数	47
4.3	生物化学机理	48
4.4	微生物学机理	49
4.5	影响因素	50

4.5.1	温度	50
4.5.2	pH	51
4.5.3	基质和产物浓度	52
4.5.4	氧气	53
4.5.5	抑制性物质	53
4.5.6	剪切力	55
4.6	厌氧氨氧化的特定分析技术	55
4.6.1	检测	55
4.6.2	厌氧氨氧化活性测定	56
4.6.2.1	基于液相的测定方法	56
4.6.2.2	基于气相的测定方法	57
4.7	数学模型	57
4.7.1	试验数据的数学模拟	59
4.7.2	缺乏试验数据的数学模拟	59
4.7.2.1	主要参数	59
4.7.2.2	COD 的影响	59
4.7.2.3	生物膜脱落	60
	参考文献	60
5	去除市政污水中氮元素的环境技术	65
5.1	前言	65
5.2	悬浮生长微生物处理工艺	65
5.2.1	反应器型式及处理过程的基本概念	65
5.2.1.1	多池活性污泥工艺	65
5.2.1.2	交替曝气式活性污泥工艺	66
5.2.1.3	序批式间歇反应器 (SBR)	67
5.2.2	主要工艺及其设计原则	67
5.2.2.1	硝化和好氧区体积	67
5.2.2.2	需氧量	69
5.2.2.3	出水反硝化	70
5.3	生物膜工艺	71
5.3.1	反应器型式及处理过程的基本概念	71
5.3.1.1	生物滤池	71
5.3.1.2	生物转盘法 (RBC)	72
5.3.1.3	浸没式生物滤池	72
5.3.1.4	生物移动床 (MBBR)	73
5.3.1.5	混合工艺	73
5.3.2	设计原则	73

5.3.2.1 生物滤池	73
5.3.2.2 生物转盘法 (RBC)	74
5.3.2.3 浸没式生物滤池	74
5.3.2.4 生物流化床 (MBBR)	75
5.3.2.5 混合工艺	76
5.3.3 案例: 丹麦 Frederikshavn 中心污水处理厂	77
参考文献	79
6 高浓度含氮废水脱氮环境技术	81
6.1 前言	81
6.2 高氮废水的类型	82
6.2.1 污泥中温消化上清液	82
6.2.2 高固体含量的高温污泥消化液	83
6.2.3 垃圾填埋场渗滤液	83
6.2.4 某些 (农业) 工业废水	84
6.3 反应器型式及处理过程的基本概念	84
6.3.1 物理-化学处理方法	84
6.3.2 生物处理方法	85
6.4 设计原则	89
6.4.1 SBR 活性污泥工艺的设计要点	89
6.4.2 悬浮生长型完全混合活性污泥工艺的设计要点	90
6.4.3 附着生长型移动床生物膜工艺的设计要点	90
6.5 案例分析	91
6.5.1 案例: DEMON [®] 除氮工艺	91
6.5.2 案例: 生物膜除氮工艺 (Hattingen)	92
6.5.3 案例: AT-3 生物强化工艺	94
参考文献	95
7 去除污水中难降解氮污染物的环境技术	97
7.1 前言	97
7.2 纺织废水	97
7.2.1 序言	97
7.2.2 排放纺织废水导致的环境问题	99
7.2.2.1 生物富集作用	99
7.2.2.2 染料的毒性	100
7.2.3 纺织废水的特征	100
7.2.4 纺织废水处理技术	102
7.2.4.1 废水生物处理系统	102

7.2.4.2	废水非生物处理系统	114
7.2.5	案例：纺织废水生物处理技术	116
7.2.5.1	简述	116
7.2.5.2	污水处理厂工艺及其运行	116
7.3	含爆炸物废水处理	118
7.3.1	序言	118
7.3.2	含爆炸物废水的特征	118
7.3.2.1	爆炸物	119
7.3.2.2	推进剂	120
7.3.2.3	烟火装置	120
7.3.3	含爆炸物废水的处理技术	120
7.3.3.1	吸附法	120
7.3.3.2	高级氧化工艺 (AOPs)	121
7.3.3.3	化学还原法	122
7.3.3.4	生物处理工艺	122
7.3.4	案例：含爆炸物废水的生物处理工艺	123
7.3.4.1	简述	123
7.3.4.2	中试处理厂的构成及运行状况	123
7.3.4.3	成本比较	124
7.4	制药废水	124
7.4.1	序言	124
7.4.2	生物处理工艺	126
	参考文献	128
8	渗滤液脱氮环境技术	135
8.1	前言	135
8.2	含氮渗滤液的来源	135
8.3	脱氮技术	137
8.4	生物处理工艺	138
8.4.1	硝化-反硝化过程工艺	139
8.4.1.1	SBR	141
8.4.1.2	氧化塘	141
8.4.1.3	膜生物反应器	142
8.4.1.4	反硝化工艺	142
8.4.1.5	生物膜工艺	143
8.4.2	亚硝化-反亚硝化工艺	145
8.4.3	亚硝化-厌氧氨氧化工艺	145
8.5	物化处理工艺	146

8.5.1 离子交换工艺	146
8.5.2 氨吹脱工艺	147
8.5.3 鸟粪石沉淀工艺	148
8.5.4 膜分离工艺	149
8.5.5 氧化工艺	150
8.6 湿地及其他自然处理系统	152
8.7 原位修复应用	154
8.8 案例分析	155
8.8.1 SBR 和芦苇床组合处理工艺	156
8.8.2 硝化曝气塘和 GAC 组合处理工艺	157
8.8.3 MBR 和 RO 组合处理工艺	159
参考文献	160
9 鸟粪石回收氮技术	168
9.1 前言	168
9.2 鸟粪石的形成	168
9.2.1 历史简介	168
9.2.2 鸟粪石沉淀处理高氮废水的可行性	169
9.3 工艺机理	170
9.3.1 鸟粪石的溶解度	170
9.3.2 鸟粪石的沉淀	173
9.4 工艺参数	174
9.4.1 pH 的影响	174
9.4.2 温度的影响	175
9.4.3 TSS 的影响	176
9.4.4 污水化学组成的影响	176
9.4.4.1 离子浓度	176
9.4.4.2 鸟粪石沉淀的不同阶段	179
9.4.4.3 其他逆反应离子的存在	179
9.5 鸟粪石的质量	180
9.5.1 鸟粪石的成分	180
9.5.2 鸟粪石与氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 的结合	181
9.5.3 鸟粪石晶体大小	183
9.6 经济因素	184
9.7 主要技术关键	184
9.7.1 总体考虑因素	184
9.7.2 案例分析——REM - NUT [®]	184
9.7.3 致谢	186

参考文献	186
10 离子交换除氮技术	191
10.1 前言	191
10.2 离子交换材料	191
10.2.1 沸石作为离子交换剂	193
10.2.2 沸石的结构、性质和分类	193
10.3 离子交换	195
10.3.1 离子交换原理	195
10.4 平衡研究	196
10.5 动态离子交换	199
10.6 工艺运行特性和介质离子交换容量	200
10.6.1 穿透浓度	201
10.6.2 接触时间	201
10.6.3 溶液强度	202
10.6.3.1 最终出水处理	202
10.6.3.2 污泥消化液处理	204
10.6.4 再生	204
10.7 总结	205
10.8 致谢	206
参考文献	206
11 工业烟道废气脱氮技术	209
11.1 前言	209
11.1.1 NO_x 的来源	209
11.1.2 氮氧化物的去除	211
11.2 化学去除 NO_x 技术	212
11.2.1 选择性催化还原	212
11.2.2 电化学去除 NO_x 技术	212
11.3 生物去除 NO_x 技术	213
11.3.1 硝化	213
11.3.2 反硝化	214
11.3.3 藻类去除氧化氮技术	215
11.3.4 NO 去除技术的评估	215
11.4 生物转鼓过滤法的概念	216
11.4.1 水溶性 Fe(II) EDTA^{2-} 溶液法用于烟道废气脱氮	217
11.4.2 一氧化氮 (NO) 的铁还原	217
11.4.2.1 Fe(II) EDTA^{2-} 作为电子供体	217

11.4.2.2	Fe (II) EDTA ²⁻ 与酶的相互作用	219
11.4.3	生物转鼓过滤反应器的再生能力：铁还原	220
	参考文献	221
12	自养反硝化去除污水中氮源和硫源污染物	225
12.1	前言	225
12.1.1	自养反硝化的基本概念	225
12.1.2	基于硫的反硝化	226
12.1.3	应用及其局限性	227
12.2	氮源和硫源污染物的工业来源	228
12.2.1	含有氮源和硫源污染物的工业废水	228
12.2.2	含硝酸盐和硫废水同步处理的可行性	231
12.3	自养反硝化的微生物机理	232
12.3.1	反硝化微生物	232
12.3.2	自养反硝化菌	232
12.4	自养反硝化的生化机理	234
12.4.1	基因、酶和代谢途径	234
12.4.1.1	氮氧化物还原过程	234
12.4.1.2	硫的氧化过程	235
12.4.2	自养反硝化过程	236
12.4.3	自养反硝化的热力学	238
12.5	自养反硝化的动力学	239
12.5.1	自养反硝化动力学的注意事项	239
12.5.2	生物膜动力学模型（硫-石灰填充床反应器）	240
12.5.3	活性污泥动力学模型（硫代硫酸盐或者硫酸盐作为电子供体）	243
12.6	自养反硝化系统的运行特性	244
12.6.1	自养条件下反硝化系统的性能	244
12.6.2	混合营养条件下反硝化系统的性能	244
12.6.3	设计原则	247
12.6.3.1	UASB 和 EGSB 系统	247
12.6.3.2	流化床反应器	248
12.6.3.3	完全混合系统	249
12.6.4	案例分析：自养反硝化去除炼油废水中的硫酸盐	250
12.6.4.1	简述	250
12.6.4.2	中试装置的构成和运行特性	250
12.6.4.3	生产性应用及其效益分析	251
12.7	自养反硝化反应器的关键运行参数	251
12.7.1	电子供体的类型和浓度	251

12.7.2	氮和硫的负荷率	252
12.7.3	HRT	252
12.7.4	温度	253
12.7.5	pH	253
12.7.6	传质限制	254
12.7.7	S/N 比	255
12.7.8	C/N 比	255
12.8	总结	257
	参考文献	257
13	好氧颗粒污泥脱氮系统	263
13.1	前言	263
13.2	好氧颗粒污泥的基础知识	264
13.2.1	反应器类型	264
13.2.2	操作条件	264
13.2.2.1	基质组成	265
13.2.2.2	饱-饥阈	265
13.2.2.3	水力剪切力	265
13.2.2.4	短的沉降时间	266
13.3	好氧颗粒污泥脱氮	267
13.3.1	好氧颗粒污泥中的生物过程	267
13.3.2	颗粒污泥的特性	267
13.4	好氧颗粒污泥脱氮影响因素	269
13.4.1	溶解氧浓度	269
13.4.2	有机物组成	269
13.4.3	pH	270
13.4.4	碱度(碳酸氢根)	270
13.4.5	温度	270
13.5	好氧颗粒内微生物群落的分布	271
13.6	好氧颗粒污泥的数学模型	272
13.7	工业应用	275
13.7.1	好氧颗粒污泥的实验室研究	275
13.7.2	好氧颗粒污泥的中试研究	276
	参考文献	277

1

氮污染物的人为来源及其对环境和公共健康的影响

F. J. Cervantes

1.1 前言

Vitousek 等人 (1997) 认为人类正在通过燃烧化石燃料、生产氮肥、耕种固氮豆类和其他无节制的行动来改变全球的氮循环 (见图 1-1)。由这些人类活动造成的氮循环加速确实已经满足了人类对人口持续增加的基本要求, 例如提供足够的粮食。不过, Galloway 等人 (2008) 认为人们对氮循环的认识也从如何提高粮食产量提升到了关心农业产量的剧增对环境系统的损害。

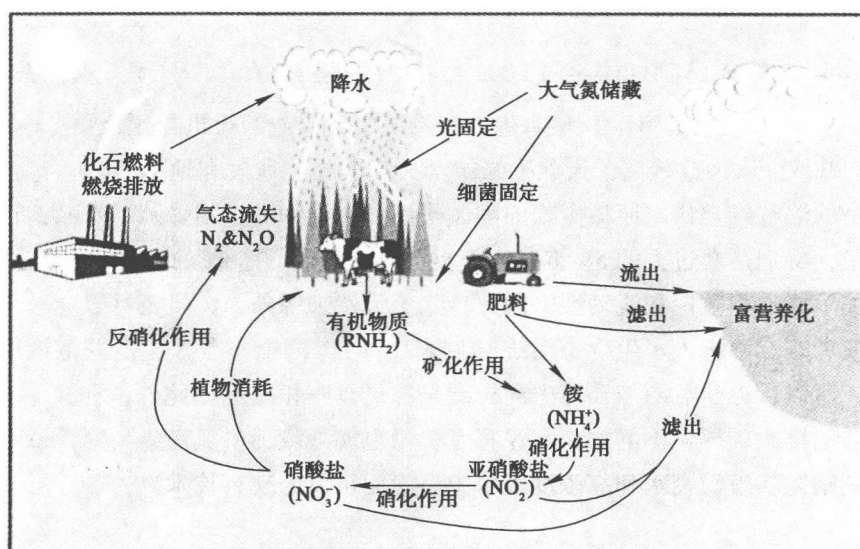


图 1-1 氮循环中的人为和自然过程 (Pidwirny, 2006)

此外, 全球因营养目的而产生的氮素需求与许多地区的氮产量并不相符。Vitousek 等人 (1997)、Galloway 等人 (2004) 以及 Jin 等人 (2005) 认为事实上, 在很多地区, 氮创造了过量的食物和逐渐盛行的不健康的饮食习惯, 同时也导致了大量

环境问题。与此相反的是，Sanchez 和 Swaminathan（1995）认为，世界上其他地区有几百万人口缺少足够的氮来满足最基本的热量需求。

氮产量每年都在上升，主要来自于农业生产活动，但是化石燃料的燃烧也起了重要作用。从 1860 年到 1995 年能源和粮食产量的总量和人均量都平稳地增长；氮素产量也从 1860 年的大约 15TgN 增长到了 1995 年的 156TgN。Galloway 等人（2008）研究发现这种变化无疑是巨大的，并且氮产量进一步从 1995 年的 156TgN/年增长到 2005 年的 187TgN/年，主要是因为在这段时期中，谷物和肉类产量分别增长了 20% 和 26%。

Galloway 等人（2008）认为氮污染除了与集约型农业和化石燃料燃烧有关外，另外一个重要的污染来源是一些需要各种不同含氮化合物的工业。例如，氨作为原料可以被制成各种各样的产品，如尼龙、塑料、树脂、胶合物、三聚氰胺、动物/鱼/虾饲料添加剂以及爆炸物。Prud'homme（2007）研究发现在 2005 年大约 23TgN 被用于不同的化学品生产，但是我们对这些工业活动中产生的氮的最终命运却知之甚少。

本章主要关注那些通过有机或者无机氮化合物对水环境造成污染的人类活动。氮污染造成的主要的生态、毒理学、经济以及对公众健康的影响也将予以说明。最后，本章将介绍防止氮污染的不同策略。

1.2 氮污染物的主要人为来源

1.2.1 无机氮污染

Wetzel（2001）与 Rabalais（2002）认为铵根离子（ NH_4^+ ）、亚硝酸根离子（ NO_2^- ）、硝酸根离子（ NO_3^- ）是水生生态系统中最普遍的无机氮化合物。Camargo 和 Alonso（2006）认为这些离子天然上来源于大气沉降、地表和地下径流、富含氮的地质沉积物的溶解以及特定原核生物的固氮作用和有机物的生物降解。然而，在过去的两个世纪，特别是在过去的 50 年里，人类已大大改变了全球的氮循环，从而在很大范围增加了氮的有效性和流动性。因此，除了天然来源外，无机氮可以通过人类活动的点源或者非点源进入水生生态系统（见表 1-1）。由于非点源比点源范围更大、更难控制，所以认为非点源与环境中无机碳来源更具有相关性。此外，Smil（2001）认为人类活动排放到环境中的颗粒态氮和有机氮也能导致无机氮污染。第 5 章和第 6 章将会分别阐述从市政废水和高浓度废水中去除无机氮的现有技术。

水生生态系统中无机氮的主要人为来源 表 1-1

点源	非点源
1. 牲畜（牛、猪、鸡）养殖废水	1. 广泛种植的固氮农作物以及随后氮的转移
2. 水产养殖（鱼、小虾、大虾）的氮源排放	2. 动物粪肥和无机氮肥的使用以及随后的农田径流
3. 市政污水处理厂出水（包括未经污水处理厂三级处理的污水）	3. 流经火灾后的草原和森林的径流
4. 工业废水的排放	4. 来自下水道和无污水设施地区的城市径流