



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 环境生物工程

陈欢林 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 环境生物工程

陈欢林 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

环境生物工程/陈欢林主编. —北京: 化学工业出版社, 2011. 6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-122-11472-3

I. 环… II. 陈… III. 环境生物学-高等学校-教材  
IV. X17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 106626 号

---

责任编辑: 赵玉清

文字编辑: 周 倜

责任校对: 边 涛

装帧设计: 杨 北

---

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: 北京市兴顺印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 21 字数 561 千字 2011 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 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: 38.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

科学技术与社会经济的飞速发展，伴随而来的生态环境日益恶化已从城市延伸到广大农村，从陆地生物圈扩展到大洋，乃至整个地球及其大气层，出现了一大批难以用传统技术处理的污染问题。人类无节制从地球获取资源与能源的时代成为过去，开发与推广更为有效地将污染物转化低毒、无毒，实现废弃物资源化处理的环境生物技术，对于生态系统的平衡、环境质量的改善、资源的可持续利用具有重要意义。

环境生物工程基于生物、生态与环境、化学工程学的发展，又具相互渗透与综合交叉性，是近 20 年来正在形成过程中的一门新兴学科。当今的环境生物工程尚处于其技术层面，主要包含三个层次：以当前大量应用或经过工艺改良与技术创新的生物处理与修复技术；以各类自然与人工的生态净化方法为主的生态系统平衡技术；以分子生物学与基因工程为基础的环境监测与污染控制技术。这三个层次的技术将在污染环境治理与修复、自然资源可持续利用、能源物质制备等方面发挥日益重要作用。鉴于环境生物技术正在发展之中，本教材内容重点以前两个层次为主。

本书初版《环境生物技术与工程》自 2003 年出版以来，作为相关专业本科与研究生的教材，深受师生的欢迎，收到不少建议与评价。随着环境生物技术迅速发展，为适应教学需求，我们在本版的章节编排上作了较大的调整。本版删去了有关生物监测与诊断、生物农药两章；在第 2 章中增加了湖泊、水库与河流水质评价模型的内容；从初版各章中抽出有关生物计量学内容，与主要元素循环合并成新的第 3 章；在生物脱硫章节中增加了有关抑硫与减蚀的内容；将初版原第十三章第六节地表水体污染的生态工程修复扩展成第 13 章生态塘与人工湿地。

本书各章编写分工是：陈欢林编写第 1 章，孙海翔、张林编写第 2 章，程丽华、张林编写第 3 章，沈江南、张林编写第 4 章，杨岳平、陈欢林编写第 5、6 章，程丽华编写第 7、8、9 章，附录，张林、孙海翔编写第 10 章，张芳编写第 11 章，张林、顾瑾编写第 12 章，陈欢林、罗安程编写第 13 章，张林编写第 14 章。全书由陈欢林统稿并作部分修改。本书基于《环境生物技术与工程》改写，仍然包含该书中所有作者的贡献。

本书中尚有一些图表与例题直接引自国内外论文或书籍，虽然每章后附有参考文献，但未能对应注明，望请原图、表、例题的作者谅解。

环境生物技术，尤其是环境生物工程，是一门正在发展中的、涉及面广的新兴学科，其内容十分丰富，由于编者知识水平有限，实践经验积累不多，本书的疏漏与不足之处，敬请广大读者批评指正。

陈欢林

2011 年 5 月 16 日于浙江大学求是园

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....             | 1  |
| 1.1 环境污染及其现状 .....                | 1  |
| 1.1.1 环境污染 .....                  | 1  |
| 1.1.2 环境污染的分类 .....               | 1  |
| 1.1.3 环境污染的特征 .....               | 3  |
| 1.1.4 环境污染的危害 .....               | 4  |
| 1.1.5 我国环境污染现状 .....              | 5  |
| 1.2 环境污染源及其优先污染物 .....            | 9  |
| 1.2.1 环境污染源 .....                 | 9  |
| 1.2.2 优先污染物 .....                 | 10 |
| 1.2.3 持久性污染物 .....                | 11 |
| 1.3 废水、废气质量指标与排放标准 .....          | 11 |
| 1.3.1 废气质量指标与排放标准 .....           | 11 |
| 1.3.2 废水水质指标与排放标准 .....           | 12 |
| 1.4 环境生物工程的基础与研究对象 .....          | 13 |
| 1.4.1 主要研究对象与目的 .....             | 13 |
| 1.4.2 主要研究内容 .....                | 13 |
| 习题 .....                          | 14 |
| 参考文献 .....                        | 14 |
| <b>第 2 章 环境微生物及其对环境的自净力</b> ..... | 15 |
| 2.1 环境中微生物的主要类群 .....             | 15 |
| 2.1.1 土壤微生物 .....                 | 15 |
| 2.1.2 微生物气溶胶 .....                | 18 |
| 2.1.3 水体微生物 .....                 | 20 |
| 2.1.4 极端微生物 .....                 | 21 |
| 2.2 环境微生物的生理特征 .....              | 23 |
| 2.2.1 微生物营养 .....                 | 23 |
| 2.2.2 微生物生长 .....                 | 25 |
| 2.2.3 微生物代谢 .....                 | 27 |
| 2.3 环境微生物的生态 .....                | 29 |
| 2.3.1 生态与生态平衡 .....               | 29 |
| 2.3.2 微生物生态系统 .....               | 30 |
| 2.3.3 微生物之间的相互关系 .....            | 31 |
| 2.4 微生物与污染环境的相互作用 .....           | 32 |
| 2.4.1 污染环境对微生物的影响 .....           | 32 |
| 2.4.2 微生物对环境污染的影响 .....           | 33 |
| 2.5 湖泊、水库与河流水质评价模型 .....          | 34 |
| 2.5.1 湖泊、水库水质富营养化模型 .....         | 34 |
| 2.5.2 湖泊、水库富营养化水平判别条件 .....       | 35 |
| 2.5.3 水库水环境预警评价模型 .....           | 36 |
| 2.5.4 河流水体的耗氧与复氧规律 .....          | 38 |
| 2.5.5 斯特里特-菲尔普斯模型 .....           | 39 |
| 习题 .....                          | 42 |
| 参考文献 .....                        | 43 |
| <b>第 3 章 主要元素循环与生物计量学基础</b> ..... | 44 |
| 3.1 主要元素的生态循环 .....               | 44 |
| 3.1.1 碳元素循环 .....                 | 44 |
| 3.1.2 氮素循环 .....                  | 45 |
| 3.1.3 硫元素循环 .....                 | 46 |
| 3.1.4 磷元素循环 .....                 | 48 |
| 3.2 微生物反应计量学基础 .....              | 49 |
| 3.2.1 微生物细胞的经验分子式 .....           | 49 |
| 3.2.2 电子供体及其特征 .....              | 50 |
| 3.3 微生物反应能量学基础 .....              | 52 |
| 3.3.1 电子与能量载体 .....               | 52 |
| 3.3.2 反应能量与细胞产率 .....             | 53 |
| 3.4 微生物反应动力学 .....                | 55 |
| 3.4.1 微生物反应动力学基础 .....            | 55 |
| 3.4.2 细胞培养过程动力学模型 .....           | 59 |
| 3.4.3 生物膜生化反应动力学模型 .....          | 61 |
| 习题 .....                          | 67 |
| 参考文献 .....                        | 68 |
| <b>第 4 章 污染物的生物降解基础</b> .....     | 70 |
| 4.1 污染物的生物可降解性 .....              | 70 |
| 4.2 微生物对污染物的作用 .....              | 72 |
| 4.2.1 微生物的共代谢作用 .....             | 72 |
| 4.2.2 微生物的解毒作用 .....              | 73 |

|                            |    |                          |    |
|----------------------------|----|--------------------------|----|
| 4.2.3 微生物的激活作用 .....       | 74 | 4.5.6 酰化 .....           | 82 |
| 4.2.4 微生物的吸着作用 .....       | 74 | 4.5.7 甲基化 .....          | 83 |
| 4.3 有机污染物的阈值和协同作用 .....    | 75 | 4.5.8 转化 .....           | 83 |
| 4.3.1 有机污染物的阈值 .....       | 75 | 4.5.9 二聚 .....           | 83 |
| 4.3.2 微量有机毒物的协同作用 .....    | 76 | 4.6 典型有机污染物的生物降解机理 ..... | 84 |
| 4.4 影响生物降解的因素 .....        | 76 | 4.6.1 卤代有机物的生物降解 .....   | 84 |
| 4.4.1 污染物种类对降解性影响 .....    | 76 | 4.6.2 芳香族化合物生物降解 .....   | 87 |
| 4.4.2 化学结构对生物降解的影响 .....   | 78 | 4.6.3 多环芳烃的降解 .....      | 89 |
| 4.4.3 环境条件对生物降解的影响 .....   | 78 | 4.6.4 邻苯二甲酸酯类的生物降解 ..... | 89 |
| 4.5 污染物的生物降解反应及其中间产物 ..... | 79 | 4.7 污染物的真菌降解 .....       | 90 |
| 4.5.1 水解 .....             | 79 | 4.7.1 依靠 LiP 的氧化 .....   | 91 |
| 4.5.2 氧化 .....             | 79 | 4.7.2 依赖 LiP 的还原 .....   | 91 |
| 4.5.3 碳羟基化 .....           | 80 | 习题 .....                 | 92 |
| 4.5.4 还原 .....             | 80 | 参考文献 .....               | 92 |
| 4.5.5 裂解 .....             | 80 |                          |    |

## 第 5 章 污水好氧生物处理 .....

|                                 |     |                        |     |
|---------------------------------|-----|------------------------|-----|
| 5.1 好氧生物处理及活性污泥工艺 .....         | 94  | 5.4.3 污泥回流比 .....      | 102 |
| 5.1.1 好氧生物处理原理 .....            | 94  | 5.4.4 剩余污泥量 .....      | 102 |
| 5.1.2 典型活性污泥处理法 .....           | 95  | 5.4.5 二沉池面积及有效水深 ..... | 102 |
| 5.2 曝气方式与曝气池结构 .....            | 96  | 5.4.6 污泥斗容积 .....      | 103 |
| 5.2.1 阶段曝气法 .....               | 96  | 5.5 曝气量及其曝气设备 .....    | 103 |
| 5.2.2 延时曝气法 .....               | 97  | 5.5.1 需氧量计算 .....      | 103 |
| 5.2.3 纯氧曝气法 .....               | 97  | 5.5.2 空气扩散器选定 .....    | 104 |
| 5.2.4 深井曝气法 .....               | 97  | 5.5.3 曝气设备选定 .....     | 106 |
| 5.2.5 曝气池结构型式 .....             | 97  | 5.5.4 曝气系统设计 .....     | 106 |
| 5.3 活性污泥设计参数 .....              | 98  | 5.6 污泥回流系统设计 .....     | 108 |
| 5.3.1 污泥的浓度 (MLSS) .....        | 98  | 5.6.1 污泥回流量 .....      | 108 |
| 5.3.2 污泥沉降比 (SV) .....          | 99  | 5.6.2 空气提升器选择与设计 ..... | 109 |
| 5.3.3 污泥容积指数 (SVI) .....        | 99  | 5.7 活性污泥处理工艺的发展 .....  | 112 |
| 5.3.4 污泥负荷与去除负荷 (F/M) .....     | 99  | 5.7.1 AB 法 .....       | 112 |
| 5.3.5 水力停留时间 ( $\theta$ ) ..... | 100 | 5.7.2 序批式活性污泥法 .....   | 115 |
| 5.4 活性污泥处理系统设计 .....            | 100 | 5.7.3 氧化沟 .....        | 118 |
| 5.4.1 曝气池容积 .....               | 100 | 习题 .....               | 123 |
| 5.4.2 泥龄 .....                  | 100 | 参考文献 .....             | 124 |

## 第 6 章 废水厌氧生物处理 .....

|                           |     |                          |     |
|---------------------------|-----|--------------------------|-----|
| 6.1 厌氧生物处理原理 .....        | 125 | 6.2.6 升流式厌氧流化床反应器 .....  | 135 |
| 6.1.1 厌氧消化的基本原理 .....     | 125 | 6.2.7 内循环厌氧反应器 .....     | 141 |
| 6.1.2 厌氧生物处理的主要影响因素 ..... | 126 | 6.3 厌氧生物处理工艺设计 .....     | 142 |
| 6.2 厌氧生物反应器的种类 .....      | 127 | 6.3.1 厌氧水解工艺原理 .....     | 142 |
| 6.2.1 普通厌氧消化池 .....       | 127 | 6.3.2 厌氧水解反应器设计 .....    | 143 |
| 6.2.2 厌氧接触工艺 .....        | 129 | 6.4 厌氧过程的生物降解与转化估算 ..... | 143 |
| 6.2.3 两相厌氧生物反应器 .....     | 132 | 习题 .....                 | 146 |
| 6.2.4 厌氧生物滤池 .....        | 133 | 参考文献 .....               | 146 |
| 6.2.5 厌氧膨胀与流化床反应器 .....   | 135 |                          |     |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| <b>第 7 章 废水生物脱氮除磷</b>     | 147 |
| 7.1 水中氮、磷的危害              | 147 |
| 7.2 废水微生物脱氮               | 147 |
| 7.2.1 微生物脱氮原理及动力学模型       | 148 |
| 7.2.2 脱氮工艺                | 149 |
| 7.2.3 工艺选择及其设计计算          | 152 |
| 7.2.4 影响脱氮的因素             | 152 |
| 7.3 废水微生物除磷               | 154 |
| 7.3.1 微生物除磷原理及动力学模型       | 154 |
| 7.3.2 典型的除磷工艺             | 158 |
| 7.3.3 工艺选择及设计计算           | 159 |
| 7.3.4 影响除磷的因素             | 161 |
| 7.4 废水的同步脱氮除磷工艺           | 163 |
| 7.4.1 废水的同步脱氮除磷工艺         | 163 |
| 7.4.2 废水同步脱氮除磷技术的应用       | 165 |
| 7.5 磷的生物回收新技术             | 166 |
| 7.5.1 鸟粪石沉淀磷回收技术          | 166 |
| 7.5.2 丝状聚磷菌上浮富集技术         | 166 |
| 7.5.3 铁还原菌回收磷技术           | 166 |
| 7.5.4 硝酸氮-磷酸钙沉淀回收磷技术      | 166 |
| 7.5.5 其他的回收磷技术            | 167 |
| 习题                        | 167 |
| 参考文献                      | 167 |
| <b>第 8 章 生物膜及其反应器</b>     | 169 |
| 8.1 生物膜及其形成               | 169 |
| 8.1.1 生物膜的定义              | 169 |
| 8.1.2 生物膜载体               | 169 |
| 8.1.3 微生物的附着固定            | 170 |
| 8.1.4 生物膜的形成              | 170 |
| 8.2 生物膜结构与特性              | 171 |
| 8.2.1 生物膜结构               | 171 |
| 8.2.2 生物膜重量               | 172 |
| 8.2.3 生物膜厚度               | 172 |
| 8.2.4 生物膜活性               | 172 |
| 8.2.5 生物膜的废水净化作用          | 172 |
| 8.3 生物膜反应器种类              | 172 |
| 8.3.1 生物膜反应器分类            | 172 |
| 8.3.2 生物滤池                | 173 |
| 8.3.3 生物转盘                | 175 |
| 8.3.4 生物接触氧化池             | 176 |
| 8.3.5 生物流化床               | 177 |
| 8.4 典型膜生物反应器设计计算          | 179 |
| 8.4.1 生物滤池的设计计算           | 179 |
| 8.4.2 生物转盘的设计             | 184 |
| 8.4.3 生物接触氧化池的设计计算        | 186 |
| 8.4.4 两相生物流化床设计计算         | 187 |
| 8.5 其他新型生物膜反应器及其工艺        | 189 |
| 8.5.1 三相生物流化床             | 189 |
| 8.5.2 厌氧生物膜膨胀床            | 190 |
| 8.5.3 移动床生物膜反应器           | 191 |
| 8.5.4 生物膜/悬浮生长级联工艺        | 191 |
| 习题                        | 192 |
| 参考文献                      | 193 |
| <b>第 9 章 膜生物反应器技术</b>     | 194 |
| 9.1 膜与膜技术基础               | 194 |
| 9.1.1 膜过滤过程               | 194 |
| 9.1.2 膜的种类                | 194 |
| 9.1.3 常用膜材料               | 195 |
| 9.1.4 膜组件                 | 196 |
| 9.2 膜生物反应器及其性能比较          | 197 |
| 9.2.1 膜生物反应器基本特征          | 197 |
| 9.2.2 膜生物反应器的种类           | 197 |
| 9.2.3 曝气 MBR              | 198 |
| 9.2.4 萃取 MBR              | 199 |
| 9.2.5 脱氮 MBR              | 199 |
| 9.2.6 两类典型 MBR            | 200 |
| 9.3 膜生物反应器设计基础与优化条件       | 200 |
| 9.3.1 MBR 中有机物的降解动力学      | 200 |
| 9.3.2 MBR 过程的优化模型         | 201 |
| 9.3.3 MBR 优化操作条件的定性分析     | 204 |
| 9.4 典型膜生物反应器组合工艺          | 205 |
| 9.4.1 普通膜生物反应器工艺          | 205 |
| 9.4.2 以脱氮除磷为主的 MBR 污水处理工艺 | 205 |
| 9.5 其他影响膜过滤过程的因素          | 206 |
| 9.5.1 膜材料与膜孔结构对通量的影响      | 206 |
| 9.5.2 过程的操作条件的影响          | 207 |
| 9.5.3 物料对通量的影响            | 207 |
| 9.6 膜污染的形成机制              | 207 |
| 9.6.1 形成膜污染的主要因素          | 207 |
| 9.6.2 膜表面的吸附性能            | 208 |
| 9.6.3 膜表面-污染物界面吸附能变化      | 209 |
| 9.7 膜污染的防治与清洗             | 210 |
| 9.7.1 膜污染的物理、化学与生物清洗      |     |

|                                           |            |                                          |     |
|-------------------------------------------|------------|------------------------------------------|-----|
| 方法 .....                                  | 210        | 9.7.4 清洗过程程序设计基础 .....                   | 213 |
| 9.7.2 清洗剂种类及其作用机理 .....                   | 211        | 习题 .....                                 | 214 |
| 9.7.3 减缓膜污染的操作方法 .....                    | 212        | 参考文献 .....                               | 214 |
| <b>第 10 章 生物脱硫与抑硫减蚀 .....</b>             | <b>216</b> |                                          |     |
| 10.1 硫的存在形式 .....                         | 216        | 10.5 硫酸盐还原作用机理 .....                     | 228 |
| 10.1.1 煤中硫的存在形式 .....                     | 216        | 10.5.1 硫酸盐还原与 ATP 合成 .....               | 228 |
| 10.1.2 石油中硫的存在形式 .....                    | 217        | 10.5.2 SRB 的生长机制 .....                   | 229 |
| 10.1.3 废水中硫的存在形式 .....                    | 217        | 10.5.3 SRB 的歧化功能 .....                   | 229 |
| 10.2 脱硫与还原微生物 .....                       | 218        | 10.6 SRB 的废水脱硫反应器技术 .....                | 230 |
| 10.2.1 煤炭脱硫微生物 .....                      | 218        | 10.6.1 SRB 的厌氧消化作用 .....                 | 230 |
| 10.2.2 石油脱硫微生物 .....                      | 219        | 10.6.2 SRB 的竞争性抑制作用 .....                | 230 |
| 10.2.3 其他脱硫微生物 .....                      | 219        | 10.6.3 反硝化抑制 SRB 的作用 .....               | 232 |
| 10.2.4 硫酸盐还原菌 .....                       | 220        | 10.6.4 基质对 SRB 的抑制作用 .....               | 232 |
| 10.3 微生物脱硫途径及机理 .....                     | 221        | 10.6.5 反应器类型对 SRB 竞争性影响 .....            | 233 |
| 10.3.1 无机硫脱除途径 .....                      | 221        | 10.6.6 污泥类型对 SRB 竞争性影响 .....             | 233 |
| 10.3.2 有机硫脱除途径 .....                      | 221        | 10.7 SRB 的腐蚀与抑蚀机制 .....                  | 234 |
| 10.3.3 生物降解有机硫的机理 .....                   | 223        | 10.7.1 SRB 的腐蚀机制 .....                   | 234 |
| 10.3.4 生物脱硫的动力学模型 .....                   | 224        | 10.7.2 抑蚀微生物特性 .....                     | 235 |
| 10.4 生物脱硫反应器及其工艺 .....                    | 226        | 习题 .....                                 | 236 |
| 10.4.1 生物脱硫反应器 .....                      | 226        | 参考文献 .....                               | 236 |
| 10.4.2 生物脱硫反应工艺 .....                     | 227        |                                          |     |
| <b>第 11 章 废气生物脱除与转化 .....</b>             | <b>238</b> |                                          |     |
| 11.1 CO <sub>2</sub> 的生物脱除固定与转化 .....     | 238        | 11.2.2 生物净化方法 .....                      | 247 |
| 11.1.1 高等植物对 CO <sub>2</sub> 的生物固定 .....  | 238        | 11.2.3 生物反应器的设计参数 .....                  | 250 |
| 11.1.2 藻类对 CO <sub>2</sub> 的生物固定 .....    | 240        | 11.2.4 影响生物反应器的因素 .....                  | 250 |
| 11.1.3 光合细菌对 CO <sub>2</sub> 的生物固定 .....  | 242        | 11.3 氮氧化物的生物净化 .....                     | 251 |
| 11.1.4 其他自养微生物对 CO <sub>2</sub> 的固定 ..... | 243        | 11.3.1 氮氧化物的来源及其危害 .....                 | 251 |
| 11.1.5 酶对 CO <sub>2</sub> 的固定 .....       | 243        | 11.3.2 处理 NO <sub>x</sub> 的微生物和装置 .....  | 251 |
| 11.1.6 CO <sub>2</sub> 光生物反应器 .....       | 244        | 11.3.3 国内外去除 NO <sub>x</sub> 的研究进展 ..... | 251 |
| 11.2 挥发性有机化合物 (VOC) 废气的生物净化 .....         | 246        | 习题 .....                                 | 253 |
| 11.2.1 VOC 的生物净化特点 .....                  | 246        | 参考文献 .....                               | 253 |
| <b>第 12 章 毒物的生物富集与吸附 .....</b>            | <b>255</b> |                                          |     |
| 12.1 生物富集与积累 .....                        | 255        | 12.3.2 有机毒物的仿生富集 .....                   | 264 |
| 12.1.1 生物富集系数 .....                       | 255        | 12.4 重金属离子的生物吸附 .....                    | 266 |
| 12.1.2 生物富集系数的估算方法 .....                  | 256        | 12.4.1 重金属离子生物吸附剂 .....                  | 267 |
| 12.1.3 正辛醇-水分配系数测定 .....                  | 257        | 12.4.2 重金属离子的生物吸附机理 .....                | 268 |
| 12.1.4 正辛醇-水分配系数估算 .....                  | 257        | 12.4.3 重金属离子的生物富集工艺 .....                | 271 |
| 12.2 生物富集机理及模型 .....                      | 261        | 12.5 其他有害物质的生物富集 .....                   | 272 |
| 12.2.1 水生生物的生物富集模型 .....                  | 261        | 12.5.1 放射性物质的生物富集 .....                  | 272 |
| 12.2.2 浮游植物生物富集模型 .....                   | 262        | 12.5.2 微量元素的生物富集 .....                   | 272 |
| 12.2.3 生物体内的富集与积累机制 .....                 | 263        | 习题 .....                                 | 272 |
| 12.3 有机毒物的生物富集 .....                      | 264        | 参考文献 .....                               | 273 |
| 12.3.1 有机毒物的毒性 .....                      | 264        |                                          |     |



|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>第 13 章 生态塘与人工湿地</b> .....                                     | 275 |
| 13.1 生态塘分类与作用机理 .....                                            | 275 |
| 13.1.1 稳定塘的种类 .....                                              | 276 |
| 13.1.2 稳定塘的特点 .....                                              | 276 |
| 13.1.3 稳定塘的作用机理 .....                                            | 277 |
| 13.2 几种典型塘的设计 .....                                              | 278 |
| 13.2.1 好氧塘的设计 .....                                              | 278 |
| 13.2.2 兼性塘设计 .....                                               | 279 |
| 13.2.3 曝气塘设计 .....                                               | 280 |
| 13.3 人工湿地的构型与污水净化机制 .....                                        | 282 |
| 13.3.1 人工湿地构成与湿地类型 .....                                         | 282 |
| 13.3.2 人工湿地的污水净化机制 .....                                         | 285 |
| 13.3.3 人工湿地的净化水质原理 .....                                         | 286 |
| 13.4 人工湿地的设计与计算 .....                                            | 287 |
| 13.4.1 湿地负荷与面积确定 .....                                           | 287 |
| 13.4.2 湿地的水力系统计算 .....                                           | 289 |
| 13.5 湿地系统布局、防渗与管理 .....                                          | 290 |
| 13.5.1 湿地的分区与布局 .....                                            | 290 |
| 13.5.2 湿地床的防渗 .....                                              | 290 |
| 13.5.3 湿地的管理 .....                                               | 290 |
| 习题 .....                                                         | 292 |
| 参考文献 .....                                                       | 292 |
| <b>第 14 章 污染环境的生物修复</b> .....                                    | 293 |
| 14.1 生物修复的基本概念 .....                                             | 293 |
| 14.1.1 生物修复的对象与生物修复剂 .....                                       | 293 |
| 14.1.2 典型的生物修复剂及其作用 .....                                        | 293 |
| 14.1.3 污染环境修复剂的相互作用 .....                                        | 296 |
| 14.1.4 生物修复的方式与特点 .....                                          | 297 |
| 14.1.5 影响生物修复的因素 .....                                           | 298 |
| 14.2 原位生物修复技术 .....                                              | 299 |
| 14.2.1 原位修复的特点 .....                                             | 299 |
| 14.2.2 原位生物修复的方法 .....                                           | 299 |
| 14.2.3 原位生物修复设计的工程问题 .....                                       | 300 |
| 14.2.4 修复过程的物料平衡计算 .....                                         | 302 |
| 14.3 异位生物修复及其生物反应器 .....                                         | 303 |
| 14.3.1 异位生物修复方法 .....                                            | 303 |
| 14.3.2 异位修复生物反应器及其修复工艺 .....                                     | 304 |
| 14.3.3 原位-异位联合修复技术 .....                                         | 306 |
| 14.4 污染土壤修复方式与蚯蚓反应器 .....                                        | 306 |
| 14.4.1 土壤污染的生物修复基础 .....                                         | 306 |
| 14.4.2 土壤污染的生物修复 .....                                           | 306 |
| 14.4.3 蚯蚓生物反应器 .....                                             | 309 |
| 14.5 生物修复存在问题及潜在解决方法 .....                                       | 310 |
| 14.5.1 微生物修复 .....                                               | 310 |
| 14.5.2 植物修复存在的问题 .....                                           | 311 |
| 14.5.3 生物修复的潜在发展技术 .....                                         | 311 |
| 习题 .....                                                         | 311 |
| 参考文献 .....                                                       | 311 |
| <b>附录一 美国 127 种优先污染物中英文对照</b> .....                              | 313 |
| <b>附录二 67 种（类）危及人体和生物的内分泌干扰物</b> （美国 USEPA 在 1998 年 8 月公布） ..... | 315 |
| <b>附录三 一些常见组分的 COD 质量当量</b> .....                                | 317 |
| <b>附录四 部分有机物和无机物半反应及其吉布斯标准自由能</b> .....                          | 318 |
| <b>附录五 有机化合物的环境性质</b> .....                                      | 320 |
| <b>附录六 各种有机化合物的生物浓缩因子</b> .....                                  | 325 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 环境污染及其现状

### 1.1.1 环境污染

人类对环境污染问题的认识和重视是通过一系列的灾难性事故发生后开始的，20 世纪 30~40 年代英国的烟雾事件，是导致 1948 年英国公共卫生法颁布的直接原因，这是历史上对环境污染的第一个立法文件。随后是 1957 年的罗马条约（Treaty of Rome），提出了维护、保护和改善环境，致力于保护公民健康，谨慎并理性地利用资源，以及完善处理环境问题。到了 50~60 年代，由于工业发展速度加快，除了频繁发生的烟雾事件外，在日本又发生了更为严重的水俣病、哮喘病、骨痛病和米糠油污染等公害事件，震惊了世界。

工业化国家强烈意识到，在世界范围内严格控制废物排放、预防环境污染、减少公害事件发生以及保护生态环境平衡的重要性和必要性。1969 年，美国首先颁布了国家环境政策条例（US National Environmental Policy Act），并于 1970 年建立美国环境保护署（EPA）；1972 年提出斯德哥尔摩宣言（Stockholm Declaration）。在 1977 年至 1982 年间，美国通过了关于清洁空气、清洁水及有害废弃物方面的法令；1987 年蒙特利尔草案（Montreal Protocol）会议以后，又颁布了有关污染控制（Control of Pollution Act）、水资源利用（Water Resources Act）、水产业（Water Industries Act）、水污染（Federal Water Pollution Act）、生物多样性（Convention on Biodiversity）等方面一系列法规或条例；1991 年的荷兰马斯特里赫特义务条约（Treaty of Maastricht Obligation）进一步补充了 Rome 条约的内容；1994 年则签署了海上污染条约（Maritime Pollution Treaty）。

所谓环境指的是“存在的空气、水和土壤，以及包括建筑物内的空气和另外地面或地下的自然或人工结构中的空气及其组成要素”；而污染则是“任何对环境中生存的人或其他生命有机体产生危害的物质释放到环境中的行为”。由此可以进一步定义环境污染是“由于自然或人为的活动引起某些物理、化学和生物等有毒或有害因素进入环境，在数量或强度上超出了环境的自净能力，并在环境中扩散、迁移、转化，使环境和它的组成要素，如大气、水体、土壤等发生改变，扰乱或破坏了环境生态平衡，进而使环境系统状态与功能变差，最终影响人类及其他生物正常生存和发展的环境不协调现象”。

在通常情况下，环境污染主要指人类活动所导致的环境质量下降并影响人类正常生存和发展的现象。因此在实际的环境管理工作中，通常以环境质量标准为尺度，来衡量环境是否发生污染以及所受污染的程度。由于世界范围内不同国家或地区在社会、经济、技术等方面的差异，所制定和使用的环境质量标准有所不同，因而对环境污染的评定也有所差异。

### 1.1.2 环境污染的分类

环境污染的类型和形式见表 1-1。

表 1-1 环境污染的类型和形式

| 污 染 类 型 | 污 染 形 式                       |
|---------|-------------------------------|
| 污染物性质   | 生理性污染、物理性污染、化学性污染和生物性污染       |
| 污染物形态   | 废气污染、废水污染、固体废物污染、噪声污染和辐射污染    |
| 被污染的客体  | 大气污染、水体污染、土壤污染、食品污染等多个客体同时被污染 |
| 污染原因    | 生产污染、生活污染、农业污染和交通污染           |
| 污染程度    | 轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染           |
| 污染影响范围  | 室内污染、点源污染、面源污染、区域污染和全球污染      |

污染物是多种多样的，按照以上方法分类，污染物可进一步细分。如生物性污染可包括病原微生物、寄生虫和各种有害植物、有害昆虫、鼠类等动物尸体；化学性污染可分为有害气体（二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、硫化氢、氟化氢等）、重金属（汞、镉、铅等）、有机和无机化合物、农药及高分子等几大类；物理性污染则包括噪声、电磁辐射、电离辐射及热污染等；混合性污染指的是多种污染物同时进入环境，造成污染物组分复杂、处理难度极大的污染现象。

在 30 年以前，生物性污染是主要的。近 20 年来，随着工业生产和科技的发展，化学性、物理性和放射性污染已成为重要的污染源。

1.1.2.1 大气污染

大气污染是指有害、有毒气体和悬浮尘粒进入大气中，其浓度超过了大气环境的容量，致使大气质量恶化，对人类及动、植物产生直接或间接危害的现象。大气污染物主要来源于工业、厂矿、交通运输、火山爆发和核爆炸等排出的有害、有毒废气，以及过度使用农药，致使农药飘入大气所造成的。现已知大气污染物约有 1500 种以上，其中排放量大的有烟尘、粉尘、二氧化硫、一氧化碳、氮氧化合物、挥发性有机物、碳氢化合物、铅蒸气等近 200 种，对人类和环境影响较大。根据能源结构不同和污染源的性质，可将大气污染物分成四种类型。

(1) 煤炭型 由煤炭燃烧产生的物质污染大气，主要有烟气、灰尘、硫化物、氧化物等，是我国主要的大气污染源。

(2) 石油型 由使用、生产石油和石油化工产品中，油燃烧后排放出大量废气造成的污染。污染物主要有氮氧化物、碳氢化物及其进一步反应所生成的化合物等。目前汽车尾气排放已成为主要污染源。

(3) 混合型 由煤炭和石油加工过程中产生的废气以及各种工业、工艺生产和加工过程中产生的有害、有毒的混合污染物。

(4) 特殊型 由事故性泄漏或人为排出毒害气体，造成局部区域的大气污染，主要污染物有易挥发性有机物（VOC）、氯气、酸雾、硫化氢、汞及其他金属蒸气等。

1.1.2.2 水体污染

人类在生产、生活过程中产生的有害、有毒物质进入水体，其容量超过了水体的自净能力，引起水质恶化，降低水的使用价值，造成对环境、人体和其他生物的危害现象，称之水体污染。按照污染物的性质，可把污染水体分成生理性、物理性、化学性和生物性四类。

(1) 生理性污染 指污染物排入天然水体后引起感官性状的恶化，也称感官性污染，常以嗅觉、味觉、外观、透明度等感官性质为衡量指标。

(2) 物理性污染 指污染物使水体某些物理特性发生变化，如水泡沫和油膜的形成，浑浊或悬浮现象产生，颜色、水温变化等。衡量指标为浑浊度、色度、悬浮物质量、电导率、温度等物性参数。

- (3) 化学性污染 指污染物使水体化学性质发生改变，如有机物分解、酸碱度变化、水体硬度增高、有毒物质浓度超标等。衡量指标有生化需氧量、化学需氧量、溶解氧、pH 值、硬度以及某些毒物含量。
- (4) 生物性污染 指水体被有害微生物、寄生虫等病原体或能引起人类过敏反应的变应原等污染，造成水体恶化，并会使人及动物感染或传染，导致直接或间接危害人类健康的一种污染。主要以大肠杆菌及细菌数等为衡量指标。
- 水体污染种类及典型污染物见表 1-2。

表 1-2 水体污染种类及典型污染物

| 污染种类   | 典型污染物                      | 原因与危害                           |
|--------|----------------------------|---------------------------------|
| 悬浮固体物质 | 烟尘、粉尘等                     | 易被吸入呼吸系统                        |
| 无机物    | 汞、铬、镉、铅等，氰化物、氮、磷、酸、碱、盐类等   | 重金属易被水生生物富集，由食物链途径放大进入人体        |
| 有机物    | 苯类、酚类、多氯联苯、农药及杀虫剂、生活污水等    | 不易降解，会长期存在水体中，进入食物链             |
| 水体富营养化 | 工业废水、农田排水，以及生活污水中所含的氮、磷、钾等 | 促使水草、藻类等植物过度繁殖，降低水体中溶解氧含量，恶化水质  |
| 热污染    | 核、电工业用冷却水                  | 将大量热能带入水体，使水温升高、水生动植物繁殖加快、耗氧量增大 |
| 油污染    | 原油                         | 采油与运输过程中的事故性泄漏和扩散、炼化厂废油水排入形成油膜  |
| 放射性污染  | 核爆炸裂变或衰变产物                 | 核试验等散落的放射性物质进入水体                |
| 生物性污染  | 病毒、细菌、真菌、寄生虫等              | 病原体污染                           |

1.1.2.3 土壤污染

土壤污染是指污染物在土壤中的累积浓度超过土壤环境容量，引起土壤质量恶化的现象。土壤污染源主要来自化肥与农药的使用、污水灌溉、废渣侵蚀，以及大气、水质污染的间接影响等污染。为了防治病、虫、草害，大量使用化学农药，效果显著，但长期使用某些易残留量的农药会造成严重的土壤污染。

污染土壤会使植物生理功能失调，农作物生长发育不良，还会通过食物链的不断积累和浓缩，危害人体健康。如长期施用氮肥，会造成土壤板结，破坏土壤结构，同时会使作物积累大量硝酸盐，放出有毒的二氧化氮和四氧化氮气体；如施用过量磷肥，会引起土壤中缺铁、锌等元素，磷却被固定成非有效状态。由于农药的大量施入，还直接破坏土壤微生态的平衡，农药在抑制病虫害同时也导致土壤生物的死亡，污染严重时，土壤中蚯蚓的死亡率可高达 90%，同时也降低土壤微生物群落数和土壤酶活性，从而降低土壤肥力。土壤污染物还可从森林、农田、草原等流入水域，污染水体。

1.1.3 环境污染的特征

环境质量，一般指在一个具体的环境内，环境的总体或环境的某些要素，对人群的生存和繁衍以及经济发展的适宜程度，是反映人群的具体要求而形成的对环境评定的一种概念。

造成环境污染的有毒、有害污染物主要来自于工农业生产过程中形成的废水、废气、废渣，人类生活垃圾、人畜粪尿，以及空气中各种致病菌、病毒和能引起人们皮肤过敏的花粉、真菌孢子等。污染物一般通过三条途径传播与扩散，危害人类。其一是污染大气，如工业废气、汽车尾气、生活油烟气排入空气中，致病菌、病毒、寄生虫等微生物，以及花粉、真菌孢子、种子絮状物、螨类等生物污染物，飘浮于空气中，借助于人的呼吸，黏附、渗透进入人体；其二是污染水体，如工业过程中的化学物质、生活污水与有毒废弃物等过量排入

水体,超过水体的自净能力,以致直接危害水生生物,并通过饮用或食物链途径进入人体;其三是污染土壤,如工业过程中的三致毒物、过量农药、带病原体人畜粪尿等残留在土壤,超量部分被农作物吸收富集,通过食用等方式进入人体。

一般情况下,环境污染有以下几个特征。

(1) 污染的广泛性 污染物可通过气体扩散和水体流动,快速传播与蔓延,某些污染物可造成大气、水体、土壤、食物等全面污染,危及人类及其他生物。可在较短时间内造成一个城市、一个地区甚至全球性的危害。不仅影响范围具有扩展性,而且危及对象具有广泛性。

(2) 危害的长期性 人类健康与其生活环境质量的优劣密切相关,在劣质环境中生存,人们终生不断地受着污染物的作用。不少污染物在环境中的半衰期很长,需较长时间的环境自净,某些甚至不能自净,对人类的危害具有长期性。如甲基汞、六价铬等,一旦进入水体,就很难消除;而被 DDT 污染的土壤,转化其 50% 需要花 4~30 年的时间。

(3) 作用的复杂性 某些化学物质其浓度虽然不是很高,但由于种类繁多,成分复杂,在环境中常会参与物理、化学、光合、生化等反应,甚至会产生多种协同作用,增加其对环境的危害性。如  $\text{SO}_2$  和硫酸形成气溶胶,其毒性远比两种物质单独存在时大得多;又如某些重金属离子在水体中迁移、转化过程中,会通过食物链的生物富集与放大作用,最后蓄积到人体内,对人类健康造成严重危害。

(4) 影响的多样性 污染物一般通过污染大气、水体、土壤、动植物和食物进入人体,也有直接作用于人体产生危害。某些污染物会对人体产生瞬时的局部刺激和腐蚀作用,也能使全身中毒;有些污染物则在人体中会有一段潜伏期,在若干年后才出现性状突变或癌变等;也有一些既有近期危害,又可能通过遗传途径,直到子代表达,产生畸胎,危及下一代。

(5) 治理的困难性 环境污染一旦形成,处理代价不小,而且治理难度增大。如重金属离子、多氯联苯、有机氯农药、合成洗涤剂、合成塑料添加剂、放射性物质等在环境中半衰期长,难以转化与自然降解,治理难度很大。如湖泊一旦被汞污染,要恢复原状,不但需要花费巨大的人力与资源,更需要耗费长达 40~100 年的时间。

#### 1.1.4 环境污染的危害

严重的环境污染叫做环境破坏或称之为公害,由公害诱发和引起的疾病称为公害病。由于环境污染,造成在短期内大量人群发病和死亡的事件,叫公害事件。历史上著名的世界“八大公害事件”如表 1-3 所示。

近 30 年来,重大的公害事件时有发生。如美国和加拿大的五大湖区水资源的核电站的热污染给生态平衡带来新的问题。在 20 世纪 70 年代中期建有 16 座核电站,这些电站每天向湖区排放大量冷却水,水温比湖水高  $15^\circ\text{C}$ ,水量超过密西西比河的流量,湖中鱼类不能适应突然的温度变化,繁殖受到影响,并由此带来长期历史形成的特定食物链结构瓦解,湖泊生态系统失去平衡,生物量大减的后果。1976 年意大利米兰附近的 Seveso 农药厂爆炸,产生大量化学物质而形成含二噁英(dioxin)的云,二噁英水平达到  $5.6 \times 10^{-9}$ ,造成约 70000 头动物死伤,至少 183 例氯痤疮。1984 年 12 月 3 日印度博帕尔(Bhopal)一家美国联合碳化物跨国公司的农药厂发生毒气泄漏事件,装有 45t 液态剧毒的甲基异氰酸甲酯(methylisocyanate)的储气罐阀门损坏,毒气大量外泄,1h 后浓厚的毒雾密布了整个城市上空,仅在几天内,造成 2500 人死亡,3000 多人重度中毒,整个事件中约有 12.5 万人受害,有 10 万人左右患双目失明和反应迟钝等终身残疾。越南战争期间,美国军方在越南南方 1/10 土地上喷洒了 2000 万加仑<sup>①</sup>的落叶剂(橙剂)(一种由 2,4-D 和 4,5-T 两种有机氯

① 1 美加仑 (USgal) = 3.78541L。

农药的混合物,其中含有 $10 \times 10^{-6}$ 的二噁英杂质),约3000个村庄受害,至少有200万~400万越南人的健康受影响,后来的调查结果表明,1000名喷洒橙剂的飞行员,其精液质量差于普通人,其妻多生男孩,流产与新生缺陷儿发生率高。1986年前苏联切尔诺贝里(Chernobyl)核电站爆炸,当场死亡30余人,所造成的危害至今尚存在。1989年3月埃克森公司的瓦尔迪兹(Exxon Valdez)号油轮在阿拉斯加的威廉王子海峡(Prince William Sound)触礁,导致26.2万桶原油泄漏,漏油污染大片海岸,造成不少海洋动物、植物死亡。2002年11月,巴哈马威望号油轮在西班牙海岸沉没,漏出燃料油7.7万吨,污染海岸280km,致使3万个相关行业生计受到影响。据报道,沉船每天向大西洋排出125t燃油,要排清所有燃油,需长达39个月。2010年上半年英国壳牌石油公司在墨西哥海湾的油井漏油事件,其漏油时间之长,危害之大堪称世界之最。

表 1-3 历史上著名的世界“八大公害事件”

| 事件       | 时间             | 地点          | 危害                                                           | 原因                                        |
|----------|----------------|-------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 马斯河谷烟雾   | 1930年12月1~5日   | 比利时马斯河谷     | 一周内死亡60多人,数千人患呼吸道疾病                                          | 工业区密集,大量排放有害气体,并在近地面层积累,导致该地区气候反常,雾层浓厚    |
| 多诺拉烟雾    | 1948年10月26~31日 | 美国多诺拉       | 全镇43%(5911人)的人发病,患者出现胸闷、干咳、头痛、腹痛、呕吐及眼病,死亡17人                 | 工厂密集,排放大量有害气体并积累在近地面层,加上该地区连续几天出现大雾天气     |
| 洛杉矶光化学烟雾 | 1952年12月       | 美国洛杉矶       | 造成400余人65岁以上老人死亡                                             | 大量排放碳氧化合物、氮氧化物及四乙基铅等有害气体,在光照作用下,生成光化学烟雾   |
| 伦敦烟雾     | 1952年12月5~8日   | 英国伦敦        | 4d内死亡近4000人,事后2个月中陆续死亡8000多人                                 | 居民燃烧烟煤取暖,以及工业废气及二氧化硫等的大量排放                |
| 九州水俣病    | 1950~1972年     | 日本九州水俣镇     | 被确认为水俣病患者2842人,死亡964人,受害居民1万余                                | 长期食用被甲基汞和汞废水污染的水产品等                       |
| 四日哮喘病    | 1961~1972年     | 日本四日市       | 到1972年,患者增至800余人,整个日本高达6000人                                 | 冶炼和工业燃油产生大量废气,致使居民出现支气管炎、哮喘、肺气肿及肺癌等呼吸道疾病  |
| 神通川河骨痛病  | 1955~1961年     | 日本神通川河流域    | 1963~1968年骨痛病患者258人,死亡128人                                   | 炼锌、炼铝厂排出大量含镉废水,污染河水、土壤及农作物,长期食用含镉河水和稻米等所致 |
| 大牟田米糠油污染 | 1968年3月        | 日本北九州、爱知县一带 | 几十万只火鸡突然死亡;患者达5000人,实际受害达13000多人;后来发生中国台湾油症事件,近2000人中毒,53人死亡 | 粮食加工厂在生产米糠油时,混入多氯联苯,人及家禽食用污染的米糠油而中毒发病     |

### 1.1.5 我国环境污染现状

#### 1.1.5.1 水资源污染

我国的废水、污水排放总量极大,约占世界的10%以上,而国民生产总值约占世界的3%,即单位产值废水、污水排放量为世界平均数的3倍。整理近30年来环保总局发布的《中国环境状况公报》历年的废水、污水排放总量,得如表1-4所示数据;而新华网快讯的

《第一次全国污染源普查公报》发布，2007 年度全国废水排放总量已高达 2092.81 亿吨，为《中国环境状况公报》公布数据（556.8 亿吨）的 3 倍还多；2009 年全国化学需氧量（COD）排放总量达 1277.5 万吨，仍高居世界第一。

表 1-4 近 30 年我国废水、污水及其 COD 的年排放量 亿吨

| 年度          | 排放总量         | 工业废水排放量 | 生活污水排放量      | COD 排放量 |
|-------------|--------------|---------|--------------|---------|
| 1980        | 315.0        | —       | —            |         |
| 1996        | 450.0        | 300.0   | 150.0        |         |
| 1997        | 416.0        | 227.0   | 189.0        |         |
| 1998        | 395.0        | 191.1   | 193.9        |         |
| 2000        | 428.5        |         | 227.7        |         |
| 2001        | 380.0        | 152.0   | 228.0        |         |
| 2002        | 631.0        | —       | —            |         |
| 2003        | 680.0        | 453.3   | 226.7        |         |
| 2005        | 524.5        | —       | —            | 0.1414  |
| 2006        | 536.8        | 240.2   | 296.6        | 0.1428  |
| 2007        | <b>556.8</b> |         | <b>310.2</b> |         |
| 2008        | <b>571.7</b> |         | <b>330.0</b> |         |
| <b>2009</b> | <b>589.2</b> |         |              | 0.1278  |

据环保总局发布的《中国环境状况公报》称，全国近 14 万公里河流的水质，近 40% 的河水受到严重污染；全国七大河水系中 41% 水质为劣 V 类；全国 131 条流经城市的河流中，严重污染有 36 条，重度污染 21 条，中度污染 38 条。作为我国北方重要水源的黄河，其近 40% 干流河段为 V 类水质，基本没有水体功能；长江的污染面积也在不断扩大，其六成干流河水目前已遭污染，超过Ⅲ类水的断面已达 38%，比 8 年前上升 20.5%；淮河至今仍然是一条受污染最严重的河流，在 2000km 的河段中，79.7% 的河段不符合渔业用水标准，32% 的河段不符合灌溉用水标准。

当江河被污染的同时，与其紧密相连的湖泊也深受其害，我国滇池、太湖均为劣 V 类水质，巢湖为 V 类水体，富营养化的水体导致三个湖泊不同程度地发生蓝藻的大规模爆发，尤其以滇池为最。武汉 38 个湖泊污染负荷远远超过其水环境容量，其中劣 V 类水质的湖泊占 32 个。作为最少污染的云南两大湖泊之一的抚仙湖，目前的水质也开始急剧降低。

建设部有关领导称，到 2030 年，中国人口将达到 16 亿左右，人均水资源占有量将由目前的 2220m<sup>3</sup> 降到 1760m<sup>3</sup>，进入联合国有关组织确定的中度缺水型国家的行列。

1.1.5.2 大气污染

随着现代工业化的发展，厂矿、交通运输等排入大气的有害有毒物质的种类越来越多，其中排放量大，对人类和环境的影响较大的约有 100 多种，主要有颗粒物、含硫化合物、碳氧化合物、易挥发性有机物以及温室气体如 CO<sub>2</sub>、氮氧化合物等几大类。全国近年废气中主要污染物排放量见表 1-5。

表 1-5 全国近年废气中主要污染物排放量

| 年 度    | 二氧化硫排放量/万吨 |       |        | 烟尘排放量/万吨 |       |        | 工业粉尘<br>排放量/万吨 |
|--------|------------|-------|--------|----------|-------|--------|----------------|
|        | 工业         | 生活    | 合计     | 工业       | 生活    | 合计     |                |
| 2006 年 | 2234.8     | 354   | 2588.8 | 864.5    | 224.3 | 1088.8 | 808.4          |
| 2007 年 | 2140       | 328.1 | 2468.1 | 771.1    | 215.5 | 986.6  | 698.7          |
| 2008 年 | 1991.3     | 329.9 | 2321.2 | 670.7    | 230.9 | 901.6  | 584.9          |

(1) 颗粒物 我国城市降尘污染十分严重，2009 年，我国烟尘排放量为 847.2 万吨，

工业粉尘排放量为 523.6 万吨。虽然相比前几年已有所改善，但大部分城市的总悬浮颗粒物 (STP) 仍然超过世界卫生组织的标准 ( $90\mu\text{g}/\text{m}^3$ )，我国 STP 的一级标准为  $150\mu\text{g}/\text{m}^3$  以下，能达到该标准的仅有厦门、北海、海口、珠海等极少数沿海城市。

(2) 二氧化硫 自 1993 年以来，我国  $\text{SO}_2$  年排放量以 100 万吨的速度递增，1995 年达 2370 万吨；近 10 年来仍然超过 2000 万吨，如 2003 年为 2100 万吨，2005 年为 2549 万吨；2009 年，高达 2214 万吨，位居世界第一，超过环境容量的 33%。目前我国半数以上城市二氧化硫年均浓度超过国家二级标准 ( $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ )。大气层中二氧化硫极易转化成硫酸，是形成酸雨的主要成分。

(3) 碳氧化合物 碳氧化合物有  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  两种，其中  $\text{CO}_2$  被公认为温室气体，因此这里的碳氧化合物主要指一氧化碳。 $\text{CO}$  是大气中存在最多且分布最广的污染物，由碳不完全燃烧产生，人为产生的  $\text{CO}$  约有 70% 来自机动车的尾气排放。 $\text{CO}$  虽能在一定条件下转化为  $\text{CO}_2$ ，但转化率很低，因此可在空气里滞留 2~3 年。目前  $\text{CO}$  占世界总毒气排放量的 1/3，有的国家已占 1/2，成为城市大气中数量最多、累积性极强的毒气。我国近几年来开始对空气中  $\text{CO}$  的浓度进行测试报道，在一般情况下，空气中一氧化碳低于  $5\times 10^{-6}$ ，但在城市运输繁忙的地方  $\text{CO}$  浓度可达  $50\times 10^{-6}$ ，也发现瞬间浓度高达  $150\times 10^{-6}$  的情况。当空气中  $\text{CO}$  浓度达到 1% 时，人会在 2min 内死亡。需要指出的是，虽然  $\text{CO}$  的排放量也很大，但全球的浓度并未增加，可能与自然界中的碳循环有关。

(4) 易挥发性有机物 易挥发性有机物 (VOC) 是指沸点在  $50\sim 260^\circ\text{C}$ 、室温下饱和蒸气压超过 133.32Pa 的有机化合物。按照美国环境保护局 (EPA) 的分类方法，VOC 是指  $25^\circ\text{C}$  时蒸气压在 0.1~380mmHg<sup>①</sup> 的有机化合物。大气中的 VOC 有的直接由污染源排放而来，有的则是由一次污染物经过大气化学反应产生的中间产物或二次污染物。

从 20 世纪 90 年代以来，VOC 已成为最严重的大气污染物之一。美国 1997 年 VOC 的释放总量及污染源释放比率情况如表 1-6 所列。我国虽未统计 VOC 的释放总量，但其数量级与美国相近。我国 VOC 的储存与运输过程的释放量约占 10%，高于美国；用作溶剂的苯、甲苯、乙苯、二甲苯等苯类物和苯酚、间甲酚等酚类物的 VOC 释放比例也高于美国；近几年来随着机动车辆快速增加，VOC 的排放比例有明显提高。

表 1-6 美国 1997 年 VOC 释放总量及污染源释放比率

| 污染源        | 排放总量<br>/(万吨/年) | 排放百分率<br>/% | 污染源        | 排放总量<br>/(万吨/年) | 排放百分率<br>/% |
|------------|-----------------|-------------|------------|-----------------|-------------|
| 居民柴木燃烧     | 52.7            | 2.74        | 废物处置和循环利用  | 44.9            | 2.34        |
| 化学及其联合过程   | 46.1            | 2.40        | 机动车        | 766.0           | 39.86       |
| 石油及其相关工业   | 53.8            | 2.80        | 森林火灾和废木料燃烧 | 76.7            | 3.99        |
| 其他工业过程     | 45.8            | 2.38        | 所有其他资源     | 49.6            | 2.58        |
| 溶剂利用       | 648.3           | 33.74       |            |                 |             |
| VOC 的储存与运输 | 137.7           | 7.17        | 总量         | 1921.6          | 100.00      |

(5) 温室气体 自然界中温室气体主要指的是  $\text{CO}_2$ 、氟里昂、甲烷、氧化氮。这些气体引起温室效应的比率分别为 57%、25%、12% 和 6%。这类气体在大气中的浓度、寿命等如表 1-7 所示。

由于化石燃料的使用，世界在过去的 200 年来，在大气中的  $\text{CO}_2$  浓度由  $280\times 10^{-6}$  上升到现在的  $389\times 10^{-6}$ ，每年上升率高于 0.5%。如果不加控制，到 2075 年，全球气温将上升  $1.5\sim 4.5^\circ\text{C}$ 。因此，降低大气中的  $\text{CO}_2$ ，已成为世界刻不容缓的大事。2009 年度世界

① 1mmHg=133.322Pa。



CO<sub>2</sub> 排放总量前十位的国家及年排放量见表 1-8。

表 1-7 温室气体在大气中的浓度与寿命

| 气体种类                                          | 非城市对流层<br>/ $\times 10^{-6}$ | 大气中年增加<br>浓度/% | 在大气中的<br>寿命/年 | 主要去除过程                                           |
|-----------------------------------------------|------------------------------|----------------|---------------|--------------------------------------------------|
| CO <sub>2</sub>                               | 351.0                        | 0.4            | 25            | 海洋容纳<br>化学转化为 CO <sub>2</sub> 和 H <sub>2</sub> O |
| CH <sub>4</sub>                               | 1.7                          | 1              | 10            |                                                  |
| N <sub>2</sub> O                              | 0.31                         | 0.3            | 150           |                                                  |
| CFCl <sub>3</sub>                             | $2.6 \times 10^{-4}$         | 5              | 70            | 光解反应成氯和氯化氢,再沉淀去除                                 |
| CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>               | $4.4 \times 10^{-5}$         | 5              | 120           | 光解反应成氯和氯化氢,再沉淀去除                                 |
| C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> F <sub>3</sub> | $3.2 \times 10^{-5}$         | 10             | 90            | 光解反应成氯和氯化氢,再沉淀去除                                 |

表 1-8 2009 年度世界 CO<sub>2</sub> 排放总量前十位的国家及年排放量

| 国 家                    | 中国 | 美国 | 俄罗斯 | 印度   | 日本    | 德国  | 加拿大 | 英国   | 韩国   | 伊朗   |
|------------------------|----|----|-----|------|-------|-----|-----|------|------|------|
| CO <sub>2</sub> 排放量/亿吨 | 60 | 59 | 17  | 12.9 | 12.47 | 8.6 | 6.1 | 5.86 | 5.14 | 4.71 |

2008 年 7 月八国集团领导人就温室气体长期减排目标达成一致,与《联合国气候变化框架公约》其他缔约国共同实现,到 2050 年将全球温室气体排放量减少一半的长期目标。

众所周知,大气中的氟里昂(CFC)、氮氧化物会减弱臭氧层,以致有更多的紫外线照射到地面,还会阻止太阳辐射从地面的反射作用,使地球逐渐变暖。大气中氮氧化物主要来源于机动车辆的行驶过程中。

大气中的氟里昂(CFC)主要来自大量空调的使用。1987 年签署的 Montreal 协议要求发达国家到 1997 年停止使用 CFC,而发展中国家到 2007 年停止使用 CFC。然而由于 CFC 的半衰期很长(50~400 年),因而这种禁止的短期效应并不明显,我国虽也在这方面作出努力,但效果不佳。

由于我国近几年机动车数量的急增,尾气排放标准过低,氮氧化物污染急剧上升,全国氮氧化物平均浓度  $46\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,60%以上北方城市和 50%以上的南方城市,氮氧化物指数已超过二氧化硫,开始从煤烟型污染转向尾气型污染。

1.1.5.3 土壤污染

土壤与大气和水并列为人类环境的三大要素,而几乎所有的污染都会进入土壤,其中使用化肥、农药、灌溉污水是直接造成土壤污染的主要原因之一,此外抗生素、病原菌等也成为土地污染的来源。

由于呈现出污染从城市向农村转移的态势,农村环境生活污染加剧,面源污染加重,导致我国土壤污染面积急剧扩大。

我国农药按年生产量约为 35 万吨,主要为杀虫剂(约 72%),其农药附着在植物体上的只有 18%~20%,落到地面的高达 40%~60%,飘浮在大气中的占 5%~30%,由此可知,农药约有 70% 进入水体与土壤环境。近几年来大量使用有机磷农药,其毒性虽比有机氯要小,但容易引起急性神经中毒,对人畜的后遗症也尚不清楚。

化肥大量的施入又加剧了水体富营养化,更为突出的是导致土壤中氮(N)素含量过高,而使 N、P、K 含量比例失调,N 与微量元素之间的平衡被破坏。目前我国中、低等肥力的土壤面积已高达 78%。

重金属与类金属及其化合物等的分子稳定,不易分解,其残留期至少 2.5~5 年,长的可达 10~15 年之久,却易被各种生物富集,对高等动物有剧毒,易引起畸胎和癌症。

1.1.5.4 固体废弃物污染

据报道,全国工业固体废弃物逐年增加(如表 1-9 所示),到 2009 年已达 20 亿吨,综合利用率达到 60%以上,但尚有很大提高空间。