

沈德中
编著

污染环境
的

生物修复



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

污染环境生物修复

沈德中 编著

化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

污染环境的生物修复/沈德中编著. —北京: 化学工业出版社, 2002.3
ISBN 7-5025-3439-3

I. 污… II. 沈… III. 生物防治 (环境污染)
IV. X505

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 004409 号

污染环境的生物修复

沈德中 编著

责任编辑: 郎红旗 孟 嘉

责任校对: 郑 捷

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 23¼ 字数 570 千字

2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3439-3/X·115

定 价: 45.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

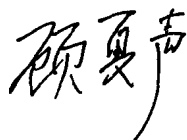
序

生物处理从19世纪末英国使用生物滤池处理生活污水算起，已经有一个多世纪了。在这一个多世纪中，生物处理技术有了很大的发展，从生物滤池法到活性污泥法、厌氧消化法、流化床法等，各种方法层出不穷，处理的废水也从生活污水扩大到工业有害有毒废水甚至重金属废水。生物处理还可以用于处理固体有机废物和废气。这些说明，生物特别是微生物，在废物的降解和转化过程中发挥着强大的作用。生物处理具有投资少、运行费用低、最终产物少等优点，是废物处理中首选的方法。

随着工业化的发展，污染问题越来越突出，人们对环境保护、污染治理提出了新的要求，不但要集中治理工厂、生活区产生的污染，还要治理由于生产和事故等原因造成的地下水、海洋和土壤的污染。这使生物处理又一次发挥其强大的作用，这就是人们常称的生物修复技术。生物修复技术与生物处理技术一脉相承，但是由于受地点、浓度和工程条件的限制，生物修复技术更为复杂，处理的结果有很多不确定性。这就需要工程技术人员、科学工作者深入地研究和总结其中的规律，发现其中的奥秘。

生物修复是在环境工程领域刚刚兴起的一门新技术。如果从1989年的美国阿拉斯加原油溢油事故治理开始算起，生物修复只有十几年的历史。在这十几年中，研究与实践空前活跃。中国农业大学资源环境学院沈德中教授近十年来一直关注生物修复技术的发展，从事这方面的教学与科研工作，他在教学和科研之余编写了这本书。主要从环境微生物学的角度讨论了生物修复的原理、方法和程序，涉及生物修复研究应用的一些重要问题。这本书的出版，将对迫切需要了解当今生物修复理论、方法和发展趋势的科学研究工作者、工程技术人员和大专院校师生很有裨益，并会对我国环境工程和环境微生物学科的发展起到促进作用。

是以为序。



中国工程院 院士
清华大学环境科学与工程系 教授

二〇〇一年十月十日

前 言

“生物修复”(bioremediation)名词的出现也不过只有十几年的历史,但是生物修复技术的应用发展非常快。生物修复已经成为环境保护领域技术发展的重要生长点。

污染物进入土壤、地下水和水环境以后,对人类健康和生态系统的安全构成潜在威胁,治理起来难度极大,费用高昂,但是又必须治理。于是人们想到生物技术,利用生物的降解和转化作用来清除存在于环境中的污染物。

最早大规模应用生物修复技术的是在美国阿拉斯加(1989年)。油轮搁浅以后造成3.8万吨原油的泄漏,当地采用了多种物理的、化学的和生物的方法治理原油污染。实践证明,其中以生物方法最为有效。在投入了特殊的氮、磷营养盐以后,促进了土著石油降解菌的生长和繁殖,加速了油污的降解。其后,生物修复又应用在地下水、土壤等环境的污染治理上,使生物修复的领域逐渐扩大。应该说,最初的生物修复主要是利用细菌用于治理石油、有机溶剂、多环芳烃、农药之类的有机污染。但是,随着这些年来生物修复技术的飞速发展,生物修复的内涵不断丰富。除了传统的生物修复以外,还发展起来了真菌修复(mycoremediation)、植物修复(phytoremediation)以及无机污染物的生物修复等。

我国的生物修复处于刚刚起步阶段,在过去的十年中主要是跟踪国际生物修复技术的发展。随着人们对污染问题认识的提高,国家各项制度的完善,国家和企业对污染治理投入的增加,在今后的十年内我国的生物修复水平会有很大的提高。随着我国综合国力的增强、对污染治理要求的提高以及治理手段的改进,在今后的30~50年内,我国生物修复技术将会有广泛的应用和质的飞跃。

生物修复是一个跨学科领域,需要有化学、微生物学、生物化学、毒理学、工程学、土壤学、水文地质学、植物学等方面的综合知识,需要有环境化学、环境微生物学、环境工程、环境医学和生物技术等方面的专家的通力合作。本书的出版,以期抛砖引玉,希望有更多、更好的生物修复的著作问世。

本书作为生物修复原理和应用的导论书籍,考虑到不同知识背景读者的需要,从污染物和微生物的基本知识入手,介绍污染物在环境中降解的基本过程及其影响因素,以及生物修复工程的方法和步骤,包括生物修复技术的一般方法和特殊方法,以使读者对生物修复的原理、发展、应用和问题有明晰和透彻的了解。

本书第1章概述污染物的种类、污染物的降解和转化、生物修复的特点和类型。第2章介绍与生物修复有关的微生物学的基础知识,包括微生物生长、营养、酶学和生态学等内容。第3章讨论微生物对污染物的作用及其毒理效应,包括共代谢、去毒和激活。第4章讨论污染物对生物降解的作用,包括化学结构特性及其在环境中的生物有效性(bioavailability)对生物降解的影响。第5章讨论环境因子对污染物生物降解的影响。第6章讨论典型有机污染物的生物降解。第7章讨论与生物修复有关的微生物技术问题,包括微生物的驯化、接种和基因工程菌。第8章到第11章涉及生物修复工程技术的一般问题。其中第8章为环境载体的特性与现场调查和评价,第9章为实施生物修复之前的可处理性研究(treatability study),第10章为原位生物修复(*in situ* bioremediation),第11章为异位生物修复(*ex situ*

bioremediation)。从第 12 章起涉及生物修复的一些特殊问题：第 12 章为海洋生物修复，第 13 章为无机污染物的生物修复，第 14 章为真菌生物修复，第 15 章为植物生物修复。在本书的后面分别列出书中出现的化学品商品名和缩写（英汉对照）、微生物名称（拉汉对照）以及国家危险废物名录作为本书附录，供读者阅读时参考。

在近十年来，生物修复技术有了很大的发展，要想在这本书中包括生物修复的所有内容是困难的。本书只选取了生物修复的理论和实践中的一些重要问题，所述内容多是国外的一些研究和实践，国内所做的研究工作反映不多，因为有许多工作尚在进行之中。据作者所知，我国已开始在城市河段治理和水产养殖环境运用生物修复技术，可望形成有我国特色的成果。可以相信，在大好的形势下，我国科技工作者和环保工作者会在不久的将来在生物修复领域作出出色的成绩来。

作者

二〇〇一年十月一日

目 录

1 绪论	1
1.1 环境中的化学污染物	1
1.1.1 化学品的数量	1
1.1.2 环境污染的来源	3
1.1.3 环境污染物的转归	4
1.2 优先污染物	6
1.2.1 优先污染物的特点	6
1.2.2 世界各国公布的优先污染物	6
1.2.3 我国严格控制的环境污染物	7
1.3 污染物的生物降解和生物转化	10
1.3.1 有关术语	10
1.3.2 生物降解和生物转化的特点	11
1.4 污染环境的生物修复	12
1.4.1 污染环境的修复	12
1.4.2 生物修复的概念、优点和局限性	12
1.4.3 生物修复的发展	14
1.4.4 生物修复和生物处理的异同	14
1.4.5 生物修复三原则	14
1.5 生物修复的类型	15
1.5.1 生物修复技术的分类	15
1.5.2 生物修复的形式	16
1.5.2.1 原位生物修复技术	16
1.5.2.2 异位生物修复技术	17
1.6 生物修复项目的可行性研究	20
1.7 有关生物修复的信息源	21
参考文献	24
2 微生物系统	26
2.1 微生物的营养	26
2.1.1 微生物的营养类型	26
2.1.2 微生物的营养要求	27
2.2 微生物的生长	28
2.2.1 碳的同化	28
2.2.2 微生物生长曲线	29
2.2.3 微生物生长的数学表达式	30
2.2.4 影响微生物生长的物理环境条件	32

2.2.5	微生物生长的阈值	33
2.3	有机物分解代谢与产能	35
2.3.1	生物氧化的三种不同方式	35
2.3.2	有机物分解的代谢途径与产能	36
2.4	微生物酶	39
2.4.1	酶的组成	39
2.4.2	酶的特性	40
2.4.3	酶反应动力学—— Michaelis-Menten 方程	40
2.4.4	抑制剂对酶催化的影响	42
2.4.5	微生物酶的活动	43
2.5	微生物生态	44
2.5.1	微生物种群之间的相互作用	44
2.5.2	相互作用群体生长的数学表达式	46
	参考文献	47
3	微生物对污染物的作用	48
3.1	微生物的降解作用	48
3.1.1	降解微生物	48
3.1.2	基质代谢的生理过程	49
3.1.3	污染物生物降解的动力学	51
3.1.3.1	幂指数定律	51
3.1.3.2	双曲线定律	53
3.2	共代谢	53
3.2.1	共代谢基质与共代谢微生物	54
3.2.2	混合菌株作用	55
3.2.3	共代谢的原因	55
3.2.4	与共代谢相关的酶	56
3.2.5	共代谢的环境意义	58
3.3	微生物的去毒作用	59
3.4	微生物的激活作用	61
3.4.1	激活反应	62
3.4.2	激活作用类型	66
3.4.2.1	典型激活	66
3.4.2.2	缓解	66
3.4.2.3	生物毒性谱的变化	67
	参考文献	68
4	化学结构特性与生物降解	70
4.1	化学结构对生物降解性的影响	70
4.1.1	一般规律	70
4.1.2	化学品的生物降解性预测	73
4.2	抗生物降解物	75

4.2.1	抗生物降解分子的种类及其来源	75
4.2.2	抗生物降解机制	78
4.3	化学品的生物有效性与生物降解	80
4.3.1	化学品的溶解度和辛醇-水分配系数	80
4.3.2	非水相液体的生物降解	82
4.3.2.1	非水相液体的微生物降解	83
4.3.2.2	影响非水相液体生物降解的因素	85
4.3.2.3	微生物利用非水相液体的机制	86
4.3.3	吸着作用	88
4.3.3.1	吸着和吸着化学	88
4.3.3.2	吸着基质的有效性变化	89
4.3.3.3	吸着化合物的利用	91
4.3.3.4	动力学	92
4.3.3.5	刺激效应	92
4.3.4	陈化、隔离和络合	93
4.3.4.1	化学品的隔离	93
4.3.4.2	隔离与陈化	94
4.3.4.3	络合的基质	96
	参考文献	97
5	环境条件与生物降解	101
5.1	非生物因子对生物降解的影响	101
5.1.1	物理化学因子	101
5.1.2	养分供应	102
5.1.3	氧气供应	104
5.1.4	多种基质作用	104
5.2	生物因子对生物降解的影响	106
5.2.1	协同	106
5.2.2	捕食	108
	参考文献	108
6	典型有机化合物的生物降解	111
6.1	脂烃类的降解	111
6.1.1	链烃的降解	111
6.1.2	环烷烃的降解	114
6.2	苯系物的降解	114
6.2.1	苯的好氧降解	115
6.2.2	甲苯、乙苯和二甲苯的好氧降解	116
6.2.3	苯系物的厌氧降解	116
6.3	多环芳烃的降解	118
6.3.1	多环芳烃的降解途径	119
6.3.2	多环芳烃的好氧微生物代谢	120

6.3.3	多环芳烃的厌氧微生物代谢	124
6.4	卤代脂肪烃的降解	125
6.4.1	卤代脂肪烃作为生长基质利用	125
6.4.2	卤代脂肪烃的好氧和厌氧降解	126
6.4.3	脱卤反应机制	127
6.4.4	典型卤代脂肪烃的降解	128
6.5	卤代芳烃及其衍生物降解	130
6.5.1	氯代苯甲酸的降解	131
6.5.2	氯代苯类的降解	132
6.5.3	多氯联苯的降解	133
6.5.4	氯酚类的降解	134
6.5.5	二苯并二噁英和二苯并呋喃类及其卤代物的降解	136
6.6	含氮芳香烃类的降解	137
6.6.1	硝基芳香烃类的降解	137
6.6.1.1	硝基芳香烃类降解菌	138
6.6.1.2	硝基芳香烃类基质的降解性	138
6.6.1.3	硝基芳香烃的降解途径	138
6.6.1.4	TNT的降解	140
6.6.2	苯胺类的降解	141
6.6.3	偶氮染料的降解	142
6.7	表面活性剂的降解	143
6.8	农药的降解	145
6.8.1	卤代脂肪烃类农药	145
6.8.2	氯代环烷烃类农药	146
6.8.3	卤代芳香烃类农药	146
6.8.4	氯代环戊二烯类农药	147
6.8.5	氯代苯氧羧酸类农药	147
6.8.6	酰胺类农药	148
6.8.7	氨基甲酸酯类农药	149
6.8.8	拟除虫菊酯类农药	150
6.8.9	有机磷类农药	150
6.8.10	其他农药	151
6.9	邻苯二甲酸酯类的降解	152
6.9.1	邻苯二甲酸酯类的生物降解特点	152
6.9.2	邻苯二甲酸酯类的生物降解途径	153
	参考文献	154
7	微生物系统的人工调控	157
7.1	微生物的驯化	157
7.1.1	驯化及其在污染物处理中的应用	157
7.1.2	驯化的后效应	158

7.1.3	农药加速降解	158
7.1.4	影响驯化的因素	159
7.1.5	产生驯化期的原因	159
7.2	菌株接种	163
7.2.1	接种的目的	163
7.2.2	菌株的富集和分离	163
7.2.2.1	一般降解菌的富集和分离	163
7.2.2.2	异生素降解菌富集和分离的困难及其解决办法	164
7.2.2.3	异生素降解菌富集和分离技术	165
7.2.2.4	共代谢基质降解菌的富集与分离	167
7.2.2.5	共生菌的富集和分离	167
7.2.2.6	“加速进化”与富集分离	168
7.2.3	接种试验的成功案例	170
7.2.3.1	土壤	170
7.2.3.2	其他环境	171
7.2.4	接种失败的原因	171
7.3	基因工程菌	174
7.3.1	遗传信息的表达	174
7.3.2	染色体与质粒	175
7.3.3	基因重组	176
7.3.3.1	多质粒菌株构建	176
7.3.3.2	基因工程菌的构建	177
7.3.3.3	用质粒介导转移染色体基因构建工程菌	178
7.3.3.4	基因工程菌的应用	178
7.3.4	原生质体融合	179
	参考文献	180
8	环境载体特性和现场评价	182
8.1	环境载体的特性	182
8.1.1	土壤的组成与特性	182
8.1.1.1	土壤的物理和化学组成	183
8.1.1.2	土壤的特性	194
8.1.2	沉积物	196
8.1.3	地下水	197
8.1.3.1	地下水的种类与特征	197
8.1.3.2	地下水运动的基本特征	198
8.2	现场调查与评价	201
8.2.1	现场调查	201
8.2.2	生物过程评价	202
8.2.3	原位生物修复评价	206
8.2.4	过程控制评价	209

参考文献	212
9 生物修复的可处理性研究	214
9.1 可处理性研究的总体目标	214
9.2 实验设计	214
9.2.1 设计的基础	214
9.2.2 制订方案	215
9.3 方法学和费用	218
9.3.1 仪器设备	219
9.3.2 方案	220
9.4 试验方案举例	223
参考文献	226
10 原位生物修复	227
10.1 水力学控制	227
10.2 亚表层供给系统	228
10.2.1 重力注入	229
10.2.2 强制注入	230
10.2.3 回收系统	230
10.2.4 注入井和回收井的构造	231
10.3 阻塞控制	233
10.3.1 悬浮固体阻塞	233
10.3.2 生物阻塞	234
10.3.3 化学阻塞	235
10.4 原位氧源	236
10.4.1 井孔通气	237
10.4.2 含氧水的注入	237
10.4.3 过氧化氢的注入	237
10.5 原位共代谢	238
10.6 生物通气	238
10.6.1 应用	239
10.6.2 设计	240
10.6.3 氧源的费用和选择	241
10.6.4 现场监测	242
10.7 处理过程各种物料需要量计算	243
10.7.1 电子受体和营养物的需要量	243
10.7.2 平衡氧化还原反应	243
10.7.3 电子受体和营养物的供给速率以及降解速率	246
10.7.4 生物通气的降解速率和供氧速率	247
10.8 我国原位生物修复的研究与实践	248
参考文献	251
11 异位固相和泥浆相生物修复	253

11.1	设计因素	253
11.1.1	传质	253
11.1.2	物料的处置	255
11.2	土地耕作	256
11.2.1	土地耕作的设计和运行	257
11.2.2	应用	258
11.3	堆制处理	259
11.3.1	过程描述	259
11.3.2	堆制系统	260
11.3.3	处理过程控制	261
11.3.4	应用	262
11.4	泥浆相处理	262
11.4.1	泥浆相处理的优点	262
11.4.2	泥浆生物反应器	263
11.5	我国异位生物修复的研究	264
	参考文献	267
12	海洋石油污染的生物修复	268
12.1	海洋石油污染	268
12.1.1	石油的组成	268
12.1.2	石油污染的来源	269
12.1.3	海洋石油污染的分布与存在形态	269
12.1.4	石油污染的危害	270
12.1.5	海洋石油的转归	270
12.2	海洋石油污染的微生物作用	273
12.2.1	海洋石油污染环境的微生物区系	273
12.2.2	微生物对石油的摄取	274
12.2.3	石油污染的生物降解	275
12.3	海洋石油污染的生物修复	276
12.3.1	加强生物降解的方法	276
12.3.2	生物修复实例——Valdez油船在阿拉斯加溢油	278
	参考文献	279
13	无机污染的生物修复	280
13.1	无机污染物的修复	280
13.2	无机污染物的生物积累和生物吸着	282
13.2.1	生物积累和生物吸着的作用方式	282
13.2.2	生物积累作用的实际应用	285
13.3	生物氧化和还原	286
13.3.1	直接还原——酶作用	286
13.3.2	间接还原——硫化物沉淀	287
13.3.3	氧化作用	287

13.4	甲基化和去甲基化	287
13.4.1	金属甲基化	287
13.4.2	去甲基化	288
13.5	金属-有机络合和配位体的降解	289
13.5.1	金属-有机络合作用	290
13.5.2	配位体降解	290
13.6	典型无机污染的生物修复潜力	290
13.6.1	铬	291
13.6.2	汞	291
13.6.3	铀	291
13.6.4	硒	292
13.6.5	砷	292
13.6.6	硝酸盐和氟	292
	参考文献	293
14	真菌的降解作用与生物修复	295
14.1	真菌的降解作用	295
14.2	木质素及其降解菌	296
14.2.1	木质素的结构与生物降解特点	296
14.2.2	木质素降解菌	297
14.2.3	白腐菌	298
14.3	白腐菌的木质素降解酶	300
14.3.1	黄孢原毛平革菌和其他真菌的木质素降解酶	300
14.3.2	过氧化物酶的反应机制	301
14.3.3	过氧化物酶产生的调节	303
14.4	白腐菌对有毒化学品的降解	304
14.4.1	多环芳烃	305
14.4.2	氯酚	305
14.4.3	多氯联苯	306
14.4.4	农药	306
14.4.5	炸药	308
14.5	白腐菌在污染治理中的应用	309
14.5.1	水处理	309
14.5.2	土壤处理研究	309
	参考文献	310
15	污染土壤的植物修复	311
15.1	植物修复的特点	311
15.2	污染物的植物提取	312
15.3	植物挥发	314
15.4	土壤污染物的植物稳定化	314
15.5	有机污染物的植物降解	315

15.5.1 有机污染物的直接吸收和降解	316
15.5.2 酶的作用	316
15.5.3 根际的生物降解	317
15.6 放射性污染的修复	317
15.7 植物修复实例	318
15.8 结语	319
参考文献	319
附录1 国家危险废物名录	321
附录2 英汉对照化学品商品名和缩略语	331
附录3 拉汉对照微生物名称	336
索引	340
后记	356

1 绪 论

随着人口的迅速增长、工农业生产的迅速发展和人民生活水平的不断提高，人类对化学品的依赖程度越来越高，化学品构成的潜在危险越来越大。化学品在生产、使用、储存、运输、装卸和处置等过程中都会有大量的物质释放到空气、水体和土壤中，污染着我们呼吸的空气和饮用水源，污染着作物生长的土壤和各种生物的生活环境，对人类的生活和健康以及各种生态系统构成直接和间接的威胁。

为了有效地控制化学污染，在从 20 世纪 60 年代末、70 年代初开始的 30 多年中，总结出了如下所述三条最基本的措施，或者说建立三条防线，以防治环境污染。

① 更新技术、改进工艺，减少污染物产生的总量，即清洁生产的方法。例如停止使用难降解的有机氯农药，停止使用难降解的带多分支结构的烷基苯磺酸钠而使用较容易分解的直链型或少分支的烷基苯磺酸钠。

② 对从工厂、矿山、农场和居民区排出的废水和污水进行集中处理，处理后再排放到环境中。这是对污染物处理普遍采用的方法，是传统的比较成熟的方法，其中最常用最有效的方法是生物处理法。

③ 对已经进入环境中的分散污染物进行处理，由于处理难度大，投入费用高，所以主要治理的对象是有毒污染物。这是在最近十几年以来迅速发展起来的，称作修复技术。通常是通过生物修复的方法去除环境中的污染物，特别是有机污染物。

毫无疑问，第三道防线是本书讨论的主要内容。

为了能使读者了解污染环境生物修复问题的全貌，在本章将简要讨论如下问题：

- 环境中的有毒污染物及其来源和转归；
- 生物修复的重点污染物；
- 生物修复的理论基础——污染物生物降解和转化；
- 污染环境生物修复的概念、特点和类型；
- 污染环境生物修复的工作程序。

1.1 环境中的化学污染物

化学污染物有的来自自然界，有的来自人类的生产和生活活动，但主要来自后者。

1.1.1 化学品的数量

化学品种类繁多，至今全世界已知的化学品已超过 1000 万种。全球化学品的工业生产规模近年来急剧增长。据 UNEP 1990 年的报告 (IRPTC)，每天在使用的合成化学品有 70000 种，包括许多药品和农药；每年大约有 500~1000 种新化学品进入市场，其中 79% 在商业流通中缺乏有关毒性影响的资料。每年约有 3~4 亿吨有毒有害废物进入环境。“有毒化学品”是指进入环境后通过环境蓄积、生物积累、生物转化或化学反应等方式损害健康和环境，或者通过接触对人体具有严重危害和具有潜在危险的化学品（引自我国政府《化学品首次进口及有毒化学品进出口环境管理规定》）。

环境中有毒化学品范围相当广泛。无机物有重元素和卤素化合物等，有机物包括农药、

化工原料和有机溶剂等种类繁多的化学品。其中，重元素、农药、多环芳烃 (PAHs)、多氯联苯 (PCBs) 及其同族物多氯二苯并二噁英 (PCDDs) 与多氯二苯并呋喃 (PCDFs) 等具有很大的生物积累潜力。据估计 OECD (经合组织) 国家每人每年产生有害物质平均为 12 ~ 60kg。世界上有超过 1 亿的人口暴露在重元素逐渐上升的有毒环境中，至少数百万人遭受症状不明显的金属中毒 (庞叔薇和徐晓白, 1994)。表 1-1 列举了几种典型的重元素向大气、水和土壤的释放量 (Nriagu, 1988)。

表 1-1 几种典型重元素的全球释放量

元 素	环境释放量/(kt/a)			元 素	环境释放量/(kt/a)		
	大气	水	土壤		大气	水	土壤
As	18.8	41	82	Ni	56	113	325
Cd	7.6	9.4	22	Pb	332	138	796
Cr	30	142	896	Sb	3.5	18	26
Cu	35	112	954	Se	3.8	41	41
Hg	3.8	4.6	8.3	Sn	6.4	—	—
In	0.02	—	—	Tl	5.1	—	—
Mn	38	262	1670	V	86	12	12
Mo	3.3	11	88	Zn	132	226	1372

人类每日接触几百种合成有机化学品，大气传输被认为是 PCBs 全球分布的主要方式，人体对它的接触主要通过少量的食物污染。人类活动大大增加 PAHs 进入环境的数量，在土壤、大气、沉积物与水中都可检测到 PAHs，各种消费品与食物中也有 PAHs。多氯二苯并二噁英 (PCDDs) 和多氯二苯并呋喃 (PCDFs) 到处存在，在空气、土壤、肉、奶、鱼、蔬菜等介质中及人体、生物样品中已检出痕量 PCDDs 及 PCDFs，其中包括毒性极高的 2,3,7,8-四氯二苯并对二噁英 (TCDD)。

我国是发展中国家，与发达国家相比，化学工业生产虽有一定的差距，但生产的化学品也有约 4 万多种。近年来化工产品产值占全国工业总产值的 8% ~ 9%，化工产品产值为 2800 亿元 (1999 年统计)。此外，我国每年还进口相当数量的化学品，1999 年进口额为 250 亿美元。表 1-2 列举了我国 1999 年一些有机化学品的产量 (《中国化工年鉴》编辑部, 2001)。生产和进口的这些化学品，除农药绝大多数进入环境以外，其他的化学品虽然只有很少一部分进入环境，但已足以造成对生态系统的威胁。和这些生产的化学品一起进入环境的，还有许多是杂质、中间产物以及处理后转化的化学品，它们在环境中经历了光解、水解、微生物降解和甲基化等过程，所形成的化学物质更为复杂多样，潜在危险性极大。

表 1-2 我国典型有机化学品的产量 (1999 年)

种 类	产量/万吨	种 类	产量/万吨	种 类	产量/万吨
乙烯	434.8	烷基苯	3.1	2-萘酚	2.2
丙烯	394.7	对苯二甲酸	113.1	对硝基酚钠	0.3
丁二烯	53.4	萘	8.6	硝基苯	12.8
乙二醇	84.4	蒽	0.3	对硝基氯苯	3.9
苯	25.4	三氯甲烷	3.6	苯胺	13.6
甲苯	50.9	四氯化碳	2.9	邻苯二甲酸二丁酯	8.5
二甲苯	58.2	氯苯	19.0	邻苯二甲酸二辛酯	13.9
乙苯	7.0	苯酚	20.6	丙烯腈	16.6