



世纪高等教育环境科学与工程类系列教材



环境修复工程

赵景联 刘萍萍 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS


配套教师课件

21 世纪高等教育环境科学与工程类系列教材

环境修复工程

主编 赵景联 刘萍萍

参编 沈振兴



机械工业出版社

本书系统论述了环境修复的基本原理与工程技术,全面介绍了受污染土壤、污染水体、污染大气和固体废物污染的各种环境修复工程。全书共13章,包括绪论、污染土壤环境修复工程概论、污染土壤的物理修复工程、污染土壤的化学修复工程、污染土壤的植物修复工程、污染土壤的微生物修复工程、污染土壤的生态修复工程、污染水环境修复工程概论、污染湖泊水库水环境修复工程、污染河流水环境修复工程、污染地下水环境修复工程、污染大气环境修复工程、固体废物污染环境修复工程。

本书可作为高等院校环境类专业相关课程的教材,也可作为其他专业相关课程的教学参考书,还可作为环境保护、生命科学、土壤学、水文学的研究人员及工程设计人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

环境修复工程/赵景联,刘萍萍主编. —北京:机械工业出版社, 2020.3

21世纪高等教育环境科学与工程类系列教材
ISBN 978-7-111-64455-2

I. ①环… II. ①赵… ②刘… III. ①生态恢复-高等学校-教材
IV. ①X171.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第005057号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:马军平 责任编辑:马军平 臧程程

责任校对:张玉静 封面设计:张静

责任印制:张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2020年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·31印张·766千字

标准书号:ISBN 978-7-111-64455-2

定价:79.00元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

机工教育服务网:www.cmpedu.com

前言

人类文明自诞生之日起，就面临着环境问题的困扰与挑战。环境问题与人类的生存与发展息息相关，该问题处理得妥当与否，直接关系到文明的走向与最终命运。

环境问题虽然自古有之，但农业文明时代人类对自然的开发和改造规模相对较小，环境与发展的矛盾尚未激化。工业革命以来，人类生产力水平发生了翻天覆地的变革与飞跃。现代工业文明像一把双刃剑，人类在享受其带来的便利与高效之时，也不得不面对环境问题因之而愈加严重的事实。高速发展的科学技术赋予了人类前所未有的改造环境的能力，也冲毁了人类在大自然面前的最后一点矜持与敬畏。在发展高于一切的浮躁情绪中，被科技武装起来的人类无视环境的承载能力，随心所欲地对其进行盲目的干扰与破坏。如此一来，环境矛盾日渐尖锐，影响范围不断扩大，危害程度更是愈发严重。

污染是环境问题中的重要组成部分，也是对人类影响最直接的一方面。中国作为发展中国家，在经济腾飞的起步阶段面临相当的发展压力，对于环境问题特别是污染的考虑以往比较欠缺。事实上，我国目前的环境污染情况非常严重，环境形势十分严峻。据统计，目前我国20%以上的耕地受到重金属、有机物和化学品的污染，由此造成每年出产的含污染粮食多达1200万t。土地横遭厄运之时，水体也未能幸免。我国75%以上的湖泊、90%以上的城市河流、50%以上的地下水都受到不同程度的污染。从长江到黄河，从西南的滇池到东北的松花江，从东部的淮河到西部的渭河等，城市与工业企业排放的污染物都在源源不断地涌入其中。一泓碧水已经难觅，苍苍蒹葭生于其中的图景更是幻灭为诗文中残存的意象。秋水之上的蔚蓝长空，也在工业废气的“熏陶”下褪去了其原本的色彩。我国一些主要城市的大气污染物浓度远远超过国际标准，雾霾的天空已经成为许多城市人习以为常的体验。急剧增加的固体废物产量，将一座座现代城市化为垃圾包围中的火山口，不断向外喷发新的废物，卡尔维诺笔下的利奥尼亚，已然是如今城市的写实画面。环境污染严重影响着我国的生态环境和人民身体健康，已成为限制我国社会经济可持续发展的重大障碍之一。

污染物是引起环境恶化的最根本原因之一，解决环境问题的关键是对污染物的控制与处理。污染预防工程着眼于从源头上遏制排放；传统的环境工程（即“三废”治理工程）则侧重于将污染物通过转化或再利用的方法进行消减。以上两种方法在污染控制上发挥着重要的作用，但对于已经遭受污染的环境却无能为力。实际上，工业污染物大多具有严重的毒性，且不易降解，在环境中性质稳定，毒性持久并具有累积效应。对已污染环境的治理，同预防与遏制一样重要。环境修复工程正是针对这方面的需求发展起来的。污染预防工程、传统的环境工程和污染环境的修复工程分别属于污染物控制的产前、产中和产后三个环节，三者共同构成污染物控制的全过程体系，是可持续发展在环境方面的重要体现。

环境修复工程是一门介于基础学科与工程应用学科之间的新兴边缘学科，也是当今环境

科学与工程研究的热点领域。该学科主要研究如何对被污染环境采取物理、化学与生物学技术措施,使存在于环境中的污染物质浓度减少、毒性降低乃至完全无害化,从而将环境部分或全部恢复到原始状态。自 20 世纪末以来,环境修复科学与工程技术发展甚为迅速,国内众多高等院校都将环境修复作为环境科学与工程专业的主干必修课程。

为适应现代教学和科学技术发展的需要,及时反映环境修复研究的新进展,近期环境污染修复的新技术和工程案例等,培养合格的环保事业人才,并为学生后续学习和科研工作打下良好、扎实的基础,结合西安交通大学 2017 年度研究生教育改革项目研究成果,编写了本书。

本书由西安交通大学赵景联教授、刘萍萍博士主持编写,沈振兴教授参与编写。研究生袁晓声、张益菱、任华蕊、马牧笛、马倩参与了资料的整理和图表绘制,在此表示感谢。

本书在编写过程中参考了大量相关领域的著作,我们尊重资料作者的工作成果,在每一章后均列出引文出处以明示读者。在此,编者向参考文献的作者致以诚挚的谢意!

由于环境修复工程是一门新兴学科,可供参考的图书资料尚比较匮乏。限于编者的水平,书中难免有不完善之处,恳请读者予以批评指正。

赵景联

于西安交通大学

目录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 环境概述	1
1.2 环境问题	3
1.3 环境修复概述	11
思考题	15
参考文献	16
第2章 污染土壤环境修复工程概论	17
2.1 土壤概述	17
2.2 土壤污染	24
2.3 污染土壤环境修复	33
思考题	35
参考文献	36
第3章 污染土壤的物理修复工程	37
3.1 物理修复概述	37
3.2 物理分离修复	38
3.3 土壤蒸气浸提修复	45
3.4 土壤电动力学修复	58
3.5 土壤固化/稳定化修复	71
3.6 土壤玻璃化修复	79
3.7 土壤热力学修复	81
3.8 土壤热解吸修复	85
3.9 土壤水泥窑协同处置	98
3.10 土壤冰冻修复	101
思考题	103
参考文献	103
第4章 污染土壤的化学修复工程	104
4.1 化学修复概述	104
4.2 土壤性能改良修复	106
4.3 化学淋洗修复	108
4.4 化学氧化修复	123
4.5 化学还原与还原脱氯修复	133
4.6 溶剂浸提修复	140
思考题	143
参考文献	143
第5章 污染土壤的植物修复工程	145
5.1 植物修复概述	145
5.2 植物对污染物的修复原理	147
5.3 影响植物修复的环境因子	152
5.4 有机污染物的植物修复	154
5.5 重金属的植物修复	155
5.6 放射性核素及富营养化物的植物修复	161
5.7 植物修复技术	162
思考题	168
参考文献	168
第6章 污染土壤的微生物修复工程	170
6.1 微生物修复概述	170
6.2 微生物修复机理	176
6.3 微生物修复生态学原理	194
6.4 影响生物修复的污染物特性	202
6.5 污染土壤的微生物修复工程	216
思考题	227
参考文献	227
第7章 污染土壤的生态修复工程	228
7.1 生态工程概述	228
7.2 生态工程修复	231
7.3 生态阻隔阻控工程	244
思考题	262
参考文献	263
第8章 污染水环境修复工程概论	264
8.1 水环境与水污染	264
8.2 水环境修复	270
8.3 水环境修复工程	272
思考题	275



参考文献	275	11.7 污染地下水循环井修复	394
第9章 污染湖泊水库水环境修复工程	276	11.8 污染地下水多相抽提修复	397
9.1 湖泊水库水环境	276	11.9 污染地下水微生物修复	404
9.2 污染湖泊水库水环境修复概述	289	11.10 污染地下水化学氧化修复	417
9.3 污染湖泊水库环境修复工程	293	11.11 污染地下水可渗透反应屏障修复	432
思考题	309	思考题	445
参考文献	309	参考文献	445
第10章 污染河流水环境修复工程	311	第12章 污染大气环境修复工程	447
10.1 河流水环境	311	12.1 污染大气的的环境修复	447
10.2 河流的主要环境问题	316	12.2 污染大气的植物修复	448
10.3 河流水环境修复	328	12.3 污染大气的微生物修复	457
10.4 河流水环境修复工程	331	12.4 污染大气的天然无机矿物材料 修复	464
思考题	362	思考题	466
参考文献	363	参考文献	466
第11章 污染地下水环境修复工程	364	第13章 固体废物污染环境修复工程	468
11.1 地下水的基本特征与污染	364	13.1 固体废物概述	468
11.2 污染地下水环境修复	374	13.2 固体废物污染的环境修复	470
11.3 地下水污染控制	375	思考题	485
11.4 污染地下水抽取处理修复	378	参考文献	486
11.5 污染地下水气体抽提修复	386		
11.6 污染地下水空气吹脱修复	391		

绪论

1.1 环境概述

1.1.1 环境的概念

“环境 (Environment)”是一个应用广泛的名词或术语，它的含义和内容极其丰富，又随各种具体状况而不同。从哲学上来说，环境是一个相对于主体而言的客体，它与其主体相互依存，它的内容随着主体的不同而不同。在不同的学科中，环境一词的科学定义也不尽相同，其差异源于主体的界定。对于环境科学而言，“环境”的定义是：“以人类社会为主体的外部世界的总体。”这里所说的外部世界主要指：人类已经认识到的，直接或间接影响人类生存与社会发展的周围事物。它既包括未经人类改造的自然界众多要素，如阳光、空气、陆地（山地、平原等）、土壤、水体（河流、湖泊、海洋等）、天然森林和草原、野生生物等；又包括经过人类社会加工改造的自然界，如城市、村落、水库、港口、公路、铁路、空港、园林等。它既包括这些物质性的要素，又包括由这些要素所构成的系统及其所呈现出的状态。目前，还有一类为适应某些方面工作的需要，而给“环境”下的定义，它们大多出现在世界各国颁布的环境保护法规中。例如，《中华人民共和国环境保护法》中规定：“本法所称环境，是指影响人类生存和发展的各种天然的和经过人工改造的自然因素的总体，包括大气、水、海洋、土地、矿藏、森林、草原、野生生物、自然遗迹、人文遗迹、自然保护区、风景名胜区、城市和乡村等。”这是一种把环境中应当保护的要素或对象界定为环境的一种工作定义，其目的是从实际工作的需要出发，对环境一词的法律适用对象或适用范围做出规定，以保证法律的准确实施。

1.1.2 环境的分类

环境是一个非常复杂的体系，目前尚未形成统一的分类方法。一般按照环境的主体、环境的范围、环境要素、人类对环境的利用或环境的功能进行分类。

(1) 按照环境的主体来分 此种分类目前有两种体系。一种是以人或人类作为主体，其他生命物体和非生命物质都被视为环境要素，即环境就指人类生存的环境，或称人类环境 (Human environment)。在环境科学中，大多数人采用这种分类法。另一种是以生物体 (界) 作为环境的主体，不把人以外的生物看成环境要素。在生态学中，往往采用这种分类法。

(2) 按照环境的范围大小来分 此种分类比较简单。如把环境分为特定空间环境(如航空、航天的密封舱环境等)、车间环境(劳动环境)、生活区环境(如居室环境、院落环境等)、城市环境、区域环境(如流域环境、行政区域环境等)、全球环境和星际环境等。

(3) 按照环境要素来分 此种分类则比较复杂。如按环境要素的属性可分成自然环境(Natural environment)和社会环境(Social environment)两类。目前地球上的自然环境,虽然由于人类活动而产生了巨大变化,但仍按自然的规律发展着。在自然环境中,按其主要的环境组成要素,可再分为大气环境、水环境(如海洋环境、湖泊环境等)、土壤环境、生物环境(如森林环境、草原环境等)、地质环境等。社会环境是人类社会在长期的发展中,为了不断提高人类的物质和文化生活而创造出来的。社会环境常按人类对环境的利用或环境的功能再进行下一级的分类,分为聚落环境(如院落环境、村落环境、城市环境)、生产环境(如工厂环境、矿山环境、农场环境、林场环境、果园环境等)、交通环境(如机场环境、港口环境)、文化环境(如学校及文化教育区、文物古迹保护区、风景游览区和自然保护区)等。

1.1.3 环境的基本特性

环境的基本特性(Environmental characteristics)可概括为以下五个方面:

(1) 环境的整体性(Integrity of the environment) 环境是一个系统。自然环境的各要素间相互联系、相互制约。局部地区的污染或破坏,总会对其他地区造成影响和危害。所以人类的生存环境及其保护,从整体上看是没有地区界线、省界和国界的。

(2) 环境资源的有限性(Limitations of environmental resources) 环境是资源,但这种资源不是无限的。环境中的自然资源可分为非再生资源 and 再生资源两大类,前者指一些矿产资源,如铁、煤炭等。这类资源随着人类的开采其储量不断减少。生物属再生资源,如森林生态系统的树木被砍伐后还可以再生。水域生态系统中只要捕获量适度并保证生存环境不被破坏,就可以源源不断地向人类提供鱼类等各种水产品;但由于受各种因素(如生存条件、繁衍速度、人类获取的强度等)所制约,在具体时空范围内,对人类来说各类资源都不可能是无限的。水是可以循环的,也属再生资源,但因其大部分的循环更替周期太长,加之区域分布不均匀和季节降水差异性大,淡水资源已出现危机。就是洁净的新鲜空气也并非取之不尽的。

(3) 环境的区域性(Regional characteristics of the environment) 这是自然环境的基本特征。由于纬度的差异,地球接受的太阳辐射能不同,热量从赤道向两极递减,形成了不同的气候带。即便是同一纬度,因地形高度的不同,也会出现地带性差异,一般说来,距海平面一定高度内,地形每升高100m,气温下降 $0.5\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 。经度也有地带性差异,这是由地球内在因素造成的,如受海、陆分布格局和大气环流特点的影响,我国就形成了自东南沿海的湿润地区向西北内陆的半湿润地区、半干旱和干旱地区的有规律的变化。不同区域自然环境的这种多样性和差异性具有特别重要的生态学意义,它是自然资源多样性的基础和保证。因此,保护生态环境的多样性不仅保护了自然环境的整体性,也为自然资源的永续利用提供了基本的物质保证。

(4) 环境的变动性和稳定性(Volatility and stability of the environment) 环境的变动性是指环境要素的状态和功能始终处于不断的变化中。从大的时间尺度看,今天人类的生存环境与早期人类的生存环境有很大的差别;从小的时间尺度看,我们生活的区域环境的变化更是



显而易见的。因此，环境的变动性就是自然的、人为的或两者共同作用的结果。但在一定的时间尺度或条件下，环境又有相对稳定的特性。所谓环境的稳定性，其实质就是环境系统对超出一定强度的干扰的自我调节，使环境在结构或功能上基本无变化或变化后得以恢复。环境的稳定性和变动性是相辅相成的，变动是绝对的，稳定是相对的：没有变动性，环境系统的功能就无法实现，生物的进化和生物的多样性就不会存在，社会的进步就不能实现。但没有环境的稳定性，环境的结构和功能就不会存在，环境的整体功能就无法实现。

(5) 危害作用的时滞性 (The harmful effects of time lag) 自然环境一旦被破坏或被污染，许多影响的后果是潜在、深刻和长期的，例如，一片森林被砍伐后，对区域气候的明显影响能被人们立即和直接感受到。而对于由此而引发的其他许多影响，一是不能很快地反映出来，如水土流失将会加剧；二是对其影响的范围和放大程度还很难认识清楚，如生物多样性的改变等；三是恢复时间较长。污染的危害也是如此，日本汞污染引发的水俣病是污染排放后 20 年才显现出来的。污染危害的这种时滞性，一是由于污染物在生态系统各类生物中的吸收、转化、迁移和积累需要时间；二是与污染物的化学性质有关，如半衰期的长短、化学物质的寿命等。人类合成的用作制冷剂的氟氯碳化物 (CFCs) 类化学物质，是能破坏臭氧层的化学制剂，它们的存留期平均在 90 年左右。这意味着，即使人类现在停止使用，这些污染物还将在大气层中存在很长一段时间，并将继续对臭氧层构成破坏。

20 世纪 80 年代开始，对环境的资源功能的认识有了很大进步，人们开始认识到环境价值的存在。到 20 世纪 90 年代，环境资源价值性的研究成为环境科学的热点，是现代环境科学的一个重要标志。它的意义首先在于，人们承认了环境资源并非是取之不尽、用之不竭的，树立了珍惜资源的意识，促进了科学技术的发展；其次，认识到了良好的生态环境条件是社会经济发展的必要条件，增强了环境保护的意识。

1.2 环境问题

1.2.1 环境问题的概念

环境问题 (Environmental problems) 就其范围大小而论，可从广义和狭义两个方面理解。从广义理解，由自然力或人力引起生态平衡破坏，最后直接或间接影响人类的生存和发展的一切客观存在的问题，都是环境问题；从狭义理解，环境问题是指出于人类的生产和生活活动，使自然生态系统失去平衡，反过来影响人类生存和发展的一切问题。

最初人们对环境问题的认识只局限在环境污染或公害的方面，因此那时把环境污染 (Environmental pollution) 等同于环境问题，把地震、水、旱、风灾等认为是自然灾害 (Natural hazard)。近几十年来，自然灾害发生的频率及受灾的人数都在增加。以水灾为例，全世界 20 世纪 60 年代平均每年受水灾人数达 244 万人，而 70 年代则为 1540 万人，即受水灾人数增加 4.3 倍。1998 年夏季，中国南方出现罕见的多雨天气，持续不断的大雨以逼人的气势铺天盖地地压向长江，使长江无须喘息之机地经历了自 1954 年以来最大的洪水。加上东北的松花江、嫩江泛滥，包括受灾最重的江西、湖南、湖北、黑龙江四省，共有 29 个省、市、自治区都遭受了这场无妄之灾，受灾人数上亿，近 500 万所房屋倒塌，2000 万 hm^2 土地被淹，经济损失达 1600 多亿元人民币。2013 年“雾霾 (Fog haze)”成为中国年度关键

词。这一年的1月，4次雾霾过程笼罩30个省（区、市）。这些都是由人类活动引起的自然灾害，进而也都是环境问题。

1.2.2 环境问题分类

从引起环境问题的根源考虑，可以将环境问题分为两类。由自然力引起的为原生环境问题，又称为第一环境问题（Primary environmental problems），它主要指火山活动、地震、台风、洪涝、干旱、滑坡等自然灾害问题。对于这类环境问题，目前人类的抵御能力还很脆弱。由人类活动引起的为次生环境问题，也称为第二环境问题（Secondary environmental problems），它又可分为环境污染（Environmental pollution）和生态环境破坏（Ecological environmental destruction）两类。

环境污染是指人类活动产生并排入环境的污染物或污染因素超过了环境容量（Environmental capacity）和环境自净能力（Self-purification ability of environment），使环境的组成或状态发生了改变，环境质量恶化，从而影响和破坏了人类正常的生产和生活。如工业“三废”排放引起的大气、水体、土壤污染。

生态环境破坏是指人类开发利用自然环境和自然资源的活动超过了环境的自我调节能力，使环境质量恶化或自然资源枯竭，影响和破坏了生物正常的发展和演化，以及可更新自然资源的持续利用。如砍伐森林引起的土地沙漠化、水土流失、一些动植物物种灭绝等。

有时把污染和生态破坏统称为环境破坏，有的国家则统称为环境公害（Environmental hazards）。环境问题的分类如图1-1所示。

原生和次生两类环境问题都是相对的。它们常常相互影响，重叠发生，形成所谓的复合效应。例如，大面积毁坏森林可导致降雨量减少；大量排放CO₂可使温室效应加剧，使地球气温升高、干旱加剧。目前，人类对第一类环境问题尚不能有效防治，只能侧重于监测和预报。

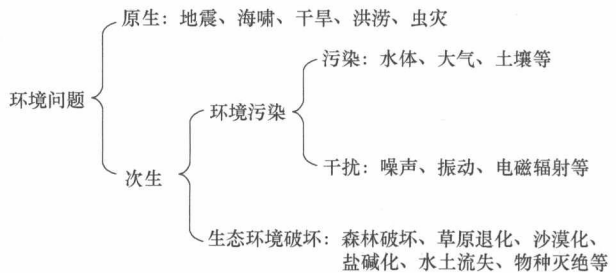


图 1-1 环境问题的分类

1.2.3 环境问题产生与发展

环境问题是伴随着人类的出现、生产力的发展和人类文明的进步而产生的，并从小范围、低程度危害，发展到大范围、对人类生存环境造成不容忽视的危害，即由轻度污染、轻度破坏、轻度危害向重度污染、重度破坏、重度危害方向发展。依据环境问题产生的先后和轻重程度，环境问题的产生和发展大致可分为生态环境的早期破坏与环境问题的产生，“公害”加剧与城市环境问题的产生，全球环境恶化与当代环境问题的产生三个阶段。

（1）生态环境的早期破坏与环境问题的产生阶段 这个阶段从人类出现开始直到工业革命，与后两个阶段相比，是一个漫长的时期。但总的说来，这一阶段的人类活动对环境的影响还是局部的，没有达到影响整个生物圈的程度。

（2）“公害加剧”与城市环境问题的产生阶段 这个阶段从工业革命开始到20世纪80年代发现南极上空的臭氧洞为止。工业革命（从农业占优势的经济向工业占优势的经济



迅速过渡)是世界史上一个新时期的起点,此后的环境问题也开始出现新的特点并日益复杂化和全球化。这一阶段的环境问题与工业和城市同步发展,同时伴随着严重的生态破坏。著名的“八大公害事件”大多发生在这一阶段,见表 1-1。

表 1-1 世界著名八大公害事件

事件和地点	时间	概况	主要原因
马斯河谷事件 比利时马斯河谷工业区	1930 年 12 月初	出现逆温、浓雾,工厂排出有害气体在近地层积累,一周内约 60 多人死亡	刺激性化学物质损害呼吸道
多诺拉事件 美国工业区	1948 年 10 月底	受反气旋逆温控制,污染物积累不散,4 天内死亡约 17 人,病 5900 人	主要为 SO ₂ 及其氧化产物损害呼吸系统
伦敦烟雾事件 英国伦敦	1952 年 12 月初	浓雾不散,尘埃质量浓度为 4.46mg/cm ³ ,SO ₂ 质量分数为 1.34 × 10 ⁻⁶ ,3 天内死亡 4000 人	尘埃中的 Fe ₂ O ₃ 等金属化合物催化 SO ₂ 转化成硫酸烟雾
洛杉矶光化学烟雾 美国洛杉矶	1946~1955 年	城市保有汽车 250 万辆,耗油 1600 万 L/d,1955 年事件中,65 岁以上的老人死亡约 400 人,刺激眼睛,损害呼吸系统	HCN、NO _x 、CO 等汽车排放物在日光下形成以 O ₃ 为主,并伴有醛类、过氧硝酸酯等的污染物
水俣事件 日本熊本县水俣市	1953~1956 年	动物与人出现语言、动作、视觉等异常,死 60 余人,病约 300 人	化工厂排出含汞废水,无机汞转化为有机汞,主要是甲基汞,通过食物链转移、浓缩
痛痛病事件 日本富山县神通川下游	1955~1972 年	矿山废水污染河水,居民骨损害、肾损害,疼痛,死 81 人,患者 130 余人	铅锌冶炼厂排出的含镉废水,污染稻米,危害人群
四日市哮喘事件 日本四日市	1961~1972 年	日本著名的石油城,哮喘发病率高,患者 800 余人	降尘酸性强,SO ₂ 含量高,导致呼吸系统受损
米糠油事件 日本北九州爱知县	1968 年	食用米糠油后中毒,死 16 人,患者 5000 余人	生产米糠油过程中,多氯联苯作为脱臭工艺中的热载体混入米糠油中

(3) 全球环境恶化与当代环境问题的产生阶段 从 1984 年英国科学家发现、1985 年美国科学家证实南极上空出现的“臭氧洞”(Ozone hole)开始,人类环境问题发展到当代环境问题阶段。这一阶段环境问题主要集中在酸雨(Acid rain)、臭氧层(Ozone layer)破坏和全球变暖(Greenhouse effect)三大全球性大气环境问题上。与此同时,发展中国家的城市环境问题和生态破坏、一些国家的贫困化愈演愈烈,水资源短缺在全球范围内普遍发生,其他资源(包括能源)也相继出现将要耗尽的信号。环境污染与公害发生的频率越来越高、强度越来越大,表 1-2 列出了近 40 年来发生的严重公害事件。

表 1-2 近 40 年来发生的严重公害事件

事件	发生时间	发生地点	产生危害	产生原因
阿摩柯卡的斯油轮泄漏	1978 年 3 月	法国西北部布列塔尼半岛	藻类、湖间带动物、海鸟灭绝	油轮触礁,2.2 × 10 ⁵ t 原油入海
三里岛核电站泄漏	1979 年 3 月	美国宾夕法尼亚州	直接损失超过 10 亿美元	核电站反应堆严重失水

(续)

事件	发生时间	发生地点	产生危害	产生原因
威尔士饮用水污染	1985年1月	英国威尔士州	200万居民饮用水污染, 44%的人中毒	化工公司将酚排入迪河
墨西哥油库爆炸	1984年11月	墨西哥	4200人受伤, 400人死亡, 10万人被疏散	石油公司油库爆炸
博帕尔农药泄漏	1984年12月	印度中央邦博帕尔市	2万人严重中毒, 1408人死亡	45t异氰酸甲酯泄漏
切尔诺贝利核电站泄漏	1986年4月	苏联乌克兰	203人受伤, 31人死亡, 直接经济损失30亿美元	4号反应堆机房爆炸
莱茵河污染	1986年11月	瑞士巴塞尔市	事故段生物绝迹, 160km内鱼类死亡, 480km内的水不能饮用	化学公司仓库起火, 30t硫、磷、汞等剧毒物进入河流
莫农格希拉河污染	1988年11月	美国	沿岸100万居民生活受到严重影响	石油公司油罐爆炸, $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 原油进入河流
“埃克森·瓦尔迪兹”号油轮泄漏	1989年3月	美国阿拉斯加	海域严重污染	漏油 $4.2 \times 10^4 \text{ t}$

为了解决环境恶化这个全球性的问题, 1992年6月3日至14日, 联合国环境与发展大会在巴西的里约热内卢举行。会议通过了《里约宣言》和《21世纪议程》两个纲领性文件以及关于森林问题的原则性声明。这是联合国成立以来规模最大、级别最高、影响最为深远的一次国际会议。它标志着人类在环境和发展领域自觉行动的开始, 可持续发展已经成为人类的共识。人类开始学习掌握自己的发展命运, 摒弃了那种不考虑资源、不顾及环境的生产技术和发展模式。

1.2.4 全球环境问题

当前人类所面临的主要问题是人口问题、资源问题、生态破坏问题和环境污染问题。它们之间相互关联、相互影响, 成为当今世界环境科学所关注的主要问题。

1. 人口问题

人口的急剧增加可以认为是当前环境的首要问题。近百年来, 世界人口的增长速度达到了人类历史上的最高峰, 预计2025年人口将达80亿。人类生产消费活动需要大量的自然资源来支持, 随着人口增加、生产生活规模的扩大, 一方面所需要的资源急剧增多; 另一方面排出的废物量也相应剧增, 因而加重了环境污染。地球上一切资源都是有限的, 特别是土地资源, 不仅总面积有限, 而且还是不可迁移的和不可重叠利用的。这样, 有限的资源, 必将限定地球上的人口数量。如果人口数量急剧增加, 超过了地球环境的合理承载能力, 则必造成生态破坏和环境污染。所以, 从环境保护和合理利用环境以及持续发展的角度来看, 根据人类各个阶段的科学技术水平, 计划和控制相应的人口数量, 是保护环境持续发展的主要措施。

2. 资源问题

资源问题是当今人类发展所面临的另一个主要问题。众所周知, 自然资源是人类生存发



展所不可缺少的物质依托和条件，然而，随着全球人口数量的增长和经济的发展，对资源的需求与日俱增，人类正受到某些资源短缺或耗竭的严重挑战。全球资源匮乏和危机主要表现在：土地资源在不断减少和退化，森林面积在不断缩小，淡水资源出现严重不足，生物物种在减少，某些矿产资源濒临枯竭等。

土地资源损失，尤其是可耕地资源损失，已成为全球性的问题，发展中国家尤为严重。目前，人类开发利用的耕地和牧场，由于各种原因正在不断减少或退化，而全球可供开发利用的后备资源已很少，许多地区已经近于枯竭。随着世界人口数量的快速增长，人均占有的土地资源在迅速下降，这对人类的生存构成了严重威胁。据联合国环境规划署的资料，1975—2000年全球有 $3 \times 10^6 \text{ km}^2$ 耕地被侵蚀，另有 $3.1 \times 10^7 \text{ km}^2$ 被新的城镇和公路占用。由此可见，土地资源问题的严重性。

世界森林资源的总量在减少。历史上森林植被变化最大的是温带地区。自从大约8000年前开始农业开垦以来，温带落叶林已减少了33%左右。近几十年中，世界毁林事件主要集中于热带地区，热带森林面积正以前所未有的速度在减少。据估计，1981—1990年全世界每年平均损失森林面积达 $1.69 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，每年再植森林约 $1.05 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。所以森林资源减少的形势仍是严峻的。

目前，世界上有43个国家和地区缺水，占全球陆地面积的60%。约有20亿人用水紧张，10亿人得不到良好的饮用水。此外，严重的水污染更加剧了水资源的紧张程度。水资源短缺已成为许多国家经济发展的障碍和全世界普遍关注的问题。当前，水资源正面临着水资源短缺和用水量持续增长的矛盾。正如联合国早在1977年所发出的警告：“水不久将成为一项严重的社会危机，石油危机之后下一个危机是水。”

3. 生态破坏问题

全球性的生态破坏主要包括：土地退化、水土流失、土地沙漠化、生物物种消失等。

土地退化(Land degradation)是当代最为严重的生态环境问题之一，它正在削弱人类赖以生存和发展的基础。土地退化的根本原因在于人口增长、农业生产规模扩大和强度增加、过度放牧以及人为破坏植被，从而导致水土流失、土地沙漠化、土地贫瘠化和土地盐碱化。

水土流失(Water and soil loss)是当今世界上一个普遍存在的生态环境问题。据最新估计，全世界现有水土流失面积 $2.5 \times 10^7 \text{ km}^2$ ，占全球陆地面积的16.8%，每年流失的土壤高达 $2.57 \times 10^{10} \text{ t}$ 。目前，世界水土流失区主要分布于干旱、半干旱和半湿润地区。

土地沙漠化(Land desertification)是指非沙漠地区出现的以风沙活动、沙丘起伏为主要标志的沙漠景观的环境退化过程。目前全球有 $3.6 \times 10^7 \text{ km}^2$ 干旱土地受到沙漠化的直接危害，占全球干旱土地的70%。沙漠化的扩展使可利用土地面积缩小，土地产出减少，降低了养育人口的能力，成为影响全球生态环境的重大问题。

生物物种消失(Biological species disappear)是全球普遍关注的重大生态环境问题。物种濒危和灭绝一直呈发展趋势，而且越到近代，物种灭绝的速度越快。

4. 环境污染问题

环境污染作为全球性的重要环境问题，主要指的是温室气体过量排放造成的气候变化、广泛的大气污染和酸雨、臭氧层破坏、有毒有害化学物质的污染危害及其越境转移、海洋污染等。

由于人类生产活动的规模空前扩大，向大气层排放了大量温室气体(如 CO_2 、 CH_4 、

N_2O 、 O_3 等), 导致大气微量成分的改变, 从而引起温室效应增强, 并造成全球气候变化。

处于大气平流层中的臭氧层是地球的一个保护层, 它能阻止过量的紫外线到达地球表面, 以保护地球生命免遭过量紫外线的伤害。然而, 自 1958 年以来, 发现高空臭氧有减少趋势, 20 世纪 70 年代以来, 这种趋势更为明显。1985 年在南极上空首次观察到臭氧减少现象, 并称其为“臭氧空洞”。后来又报道在北极上空也出现臭氧空洞。多年来的研究表明, 平流层臭氧含量减少 10%, 地球表面的紫外线强度将增加 20%, 这将对人类和生物产生严重危害。造成臭氧层破坏的主要原因, 是人类向大气中排放的某些痕量气体(如氯化亚氮、四氯化碳、甲烷和氯氟烷烃等)能与臭氧起化学反应, 以致消耗臭氧层中臭氧。

酸雨导致的环境酸化是 20 世纪最大的环境污染问题之一。随着人口数量的快速增长和工业化进程, 酸雨和环境酸化问题一直呈发展趋势, 影响地域逐渐扩大, 由局地问题发展成为跨国问题, 由工业化国家扩大到发展中国家。现在, 世界酸雨主要集中在欧洲、北美和中国西南部三个地区。酸雨主要是由人类排入大气中的 NO_x 和 SO_2 的影响所形成的。

海洋污染是目前海洋环境面临的最重大问题。海洋污染主要发生在受人类活动影响广泛的沿岸海域。据估计, 输入海洋的污染物, 有 40% 是通过河流输入的, 30% 是由空气输入的, 海运和海上倾倒各占 10% 左右。海洋污染引起浅海或半封闭海域中氮、磷等营养物聚集, 促使浮游生物过量繁殖, 以致发生赤潮。因此, 赤潮的广泛发生可以看作是世界海洋污染广泛、污染加重和海洋环境质量退化的一个突出特征。

1.2.5 我国的环境问题

我国正处于迅速推进工业化和城市化的发展阶段, 对自然资源的开发强度不断加大, 加之采取粗放型的增长方式, 技术水平和管理水平较落后, 污染物排放量不断增加。从全国总的情况来看, 我国的环境污染仍在加剧, 环境形势不容乐观。

我国是发展中国家的一员, 工业化程度总体水平不高。近些年来, 在改革开放进程中, 我国政府逐步改变了单项突击、片面追求产量和产值的传统战略倾向, 确定了“注重效益, 提高质量, 协调发展, 稳定增长”的经济指导方针; 提出了“经济社会与环境保护协调发展”的战略思想, 大大促进了我国的经济。如按可比价格计算, 1991—2015 年, 国内生产总值年均增长速度为 9.6%, 在供给侧结构性改革扎实推进, 质量效益实现新提高, 经济结构不断优化背景下, 2017 年仍增长 6.9%, 远远高于同期美国 3.4% 和 2.2% 的速度。因此, 当前我国的环境建设和环境问题, 与其他发展中国家具有许多共同点, 同时又有其自身的特点。用一句话概括, 我国环境保护工作成就很大, 但城市水、气、声、渣的环境污染和自然生态的破坏仍相当严重, 不容忽视。

1. 生态环境问题

(1) 森林生态功能仍然较弱 经过 40 多年的努力, 我国的森林覆盖率, 据第三次全国森林资源清查, 已增加到 13.4%, 林地面积达 12867 万 hm^2 , 但由于历史和自然条件的限制, 我国森林生态功能仍然较弱, 人均林地面积仅 0.11 hm^2 , 只有世界人均水平的 11.3%, 人均占有森林蓄积量约 8.4 m^3 , 只有世界人均水平的 10.9%。因此, 森林资源的供求矛盾仍将十分突出。

(2) 草原退化与减少的状况难以根本改变 长期以来, 由于不合理开垦, 过度放牧, 重用轻养, 使本处于干旱、半干旱地区的草原生态系统, 遭受严重破坏而失去平衡, 造成生



产能力下降,产草减少和质量衰退。目前,全国退化草原面积已达 8700 万 hm^2 。草原生态建设的投资大,周期长,见效慢,而工农业的发展又将占用大量草地。此外,草原生产力明显受气候因素影响,特别是近年地球气温变暖,我国北方草原地区降雨量下降。例如,内蒙古东部地区,20 世纪 80 年代与 60 年代相比,年均降雨量由 400~450mm 下降到 250~350mm,严重影响产草的质量。广大边远地区的农牧民,为解决生活燃料的短缺,不得不砍伐和采挖荒漠上仅存的一点林木和植被,更增加了我国草原复原的难度,进而影响我国畜牧业的发展。

(3) 水土流失、土壤沙化、耕地减少 我国水土流失严重,每年流失表土量达 50 亿 t,相当于我国耕地每年被刮去 1cm 厚的沃土层,由此流失的氮、磷、钾大约相当于 4000 多万 t 化肥。我国水土流失最严重的是黄土高原,面积达 4300 万 hm^2 ,占该区总面积的 75%,每平方公里土壤的侵蚀量为 5000~10000t;由此,黄河水中的含沙量为世界之最,每立方米河水含沙达 37kg 以上。长江流域的水土流失面积也有 3600 万 hm^2 ,占流域总面积的 20%,造成每立方米江水含沙 1kg,已跃居世界大河泥沙含量的第四位。此外,土壤风蚀在我国一些地区也极为严重。甘肃河西走廊发生黑风暴的次数逐年增多,1970 仅 1 次,而 1979 年达 12 次。

近几十年来,土壤沙化的发展很快。我国沙漠面积几乎扩大了 1 倍,从 6667 万 hm^2 扩展到 13000 万 hm^2 ,约占国土面积的 13.5%;还有近 670 万 hm^2 耕地和 1/3 的天然草场不同程度地受到沙漠化的威胁与影响。

我国耕地因人口增加、经济发展和城市建设而被大量侵占。1957~1980 年,被侵占耕地约 0.23 亿 hm^2 ,平均每年减少 150 万 hm^2 左右,相当于一个福建省的耕地面积。中华人民共和国成立初期我国的人均耕地面积为 0.18 hm^2 ,如今仅为 0.085 hm^2 ,不及那个时候的一半。这充分说明我国农业生态环境有恶化的危险。

(4) 水旱灾害日益严重 我国是个水旱灾害多发的国家:全国二分之一的人口、三分之一的耕地和主要大城市处于江河的洪水位之下,工农业产值占全国三分之二的地区受到洪水的威胁。这种状况目前远未根本改变,致使水旱灾害日益严重。全国平均受灾面积 20 世纪 60 年代高于 50 年代,70 年代高于 60 年代,而 80 年代又高于 70 年代。全国年均成灾面积,80 年代是 50 年代的 2.1 倍,是 70 年代的 1.7 倍。这种情况的产生与水土流失造成湖泊淤积和盲目围湖造田,使湖泊水面大幅度减少有关。据统计,从 20 世纪 50 年代到 80 年代,我国共减少湖泊 500 多个,水面缩小 186 万 hm^2 ,蓄水量减少 513 亿 m^3 。

(5) 水资源短缺 据统计,全国有近 300 个城市缺水,占城市总数的 60%,受影响的城镇人口占全国总人口的 29%;日缺水量达 1240 万 t 以上,其中严重缺水的城市有 50 多个。水资源短缺,不仅影响工业生产和城镇居民生活,也对农牧业造成影响。据统计,每年因缺水而不得不缩小灌溉面积和有效的灌溉次数,造成粮食减产 50 多亿 kg。现在,我国北方和西北地区的农村,尚有 5000 多万人口和 3000 多万头牲畜得不到饮水保障。由于缺水,不得不进一步大量抽取地下水,结果使北京、上海、天津、西安、常州、宁波等 20 多个城市出现地面沉降。

2. 环境污染严重

我国目前环境污染的程度,较发达国家要严重得多。

(1) 大气污染仍十分严重 我国是一个以煤为主要能源的国家,2017 年的原煤产量仍



超过 35.2 亿 t，煤炭占商品能源总消费的 66%。燃煤造成严重的大气污染。例如，2011 年我国大气 SO₂ 排放量达 2228.2 万 t，城市大气中二氧化硫的年日平均值，北方城市为 0.092mg/m³，南方城市为 0.088mg/m³，均远高于我国空气环境质量二级标准；在监测的 51 个城市雨水中，pH 年均值低于 5.6 的占 59%；而降水中出现酸雨的城市，比上年度增长 7.8%。

(2) 水污染状况远未根本解决 据国家环境保护部公布，2015 年，全国废水排放总量为 735.3 亿 t，工业废水 199.5 亿 t，占比为 27.1%，其中造纸、化工、纺织、钢铁合计排放占比约为 48%，成为工业废水最主要的排放来源，排放量虽比上年度下降，但仍有近 80% 的工业废水未经处理直接排入江河湖海，使流经城市的河段受到严重污染。城镇生活污水排放量为 535.2 亿 t，占比为 72.8%。2014 年对七大水系总河长 43562km 的评价中，符合地面水水质 4 类和 5 类的，仅占约半数，达 44%；其中辽河水系和海河水系污染最严重。

此外，近年来一些海域富营养化加重，赤潮灾害增多。1990 年，在中国沿岸海域从南到北，相继发生了较大面积的赤潮 34 起，为 1961~1980 年均的 30 倍。其发生范围之广，对养殖业危害之重，前所未见。

(3) 城市噪声污染严重 2013 年监测的 49 个城市，其平均等效声级均在 55dB (A) 以上，16 个城市高于 60dB (A)；其中居民文教区的噪声超标率达 97%。

(4) 工业固体废物增加 据统计，1991 年全国工业固体废物产生量达 32.7 亿 t，其中工业危险废物产生量 4573.69 万 t，倾倒丢弃量 3.94 万 t。此外，全国还有带来水、气、声和渣污染的 57.3 万个乡镇企业，更是不容忽视的污染源。

由此可见，我国的环境保护事业，任重道远。无论世界范围还是我国，也无论是发展中国家还是发达国家，除了某些方面或局部区域的环境问题获得不同程度的解决外，就总体而言，当代的世界环境问题仍然十分严重，特别是解决全球性大气环境问题，已到了刻不容缓的时候，以致环境保护工作者不得不大声疾呼“人类只有一个地球”，这已获得国际社会的全面认同。

1.2.6 解决环境问题的根本途径

人口激增、经济发展和科技进步，是产生和激化环境问题的根源。因此，解决环境问题必须依靠控制人口，加强教育，提高人口素质，增强环境意识，强化环境管理，依靠强大的经济实力和科技进步。

1) 控制人口对于解决当代环境问题，有着特殊重要的作用。与此同时，还要加强教育，普遍提高群众的环境意识，促使人们在进行任何一种社会活动、生产生活活动、科技活动与发明创造时，都能考虑到是否会对环境造成危害，或能否采取相应的措施，使对环境的危害降到最低限度。这些措施包括各种技术手段，以及环境管理。特别是加强环境管理，是一种低投入，高效益的解决环境问题的根本途径。

2) 解决环境问题必须要有相当的经济实力，即需要付出巨大的财力、物力，并且需要经过长期的努力。初步估计，要把目前我国的城市污水全部进行二级处理，按 20 世纪 80 年代中期的不变价格估算，至少需要 300 亿元；如果把控制工业和城市大气污染、防治生态环境破坏的资金也计算在内，至少需要几千亿元的资金。目前，我国用于环保的投资每年大约 100 多亿元，是当年国民生产总值的 0.7%。显然，我国有限的环保投资，对于我们这样一