

前言

P r e f a c e

21 世纪,全球环境问题日益突出,气候变化、空气污染、水资源短缺、土壤污染和退化、生物多样性减少、废弃物管理等问题相互交织,不仅威胁生态系统的健康,也给人类社会的可持续发展带来了严峻挑战。党的二十大报告指出“尊重自然、顺应自然、保护自然,是全面建设社会主义现代化国家的内在要求”。新时代 10 年,在习近平生态文明思想的引领下,污染防治攻坚向纵深推进,绿色、循环、低碳发展迈出坚实步伐,生态环境保护发生历史性、转折性、全局性变化,我们的祖国天更蓝、山更绿、水更清。近年来,我国通过实施一系列严格的环保法规和政策,如《中华人民共和国环境保护法》(2014 年修订)、《水污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等,在大气、水和土壤污染防治方面取得了明显成效,但面临的挑战依然严峻。随着经济社会的发展和公众环保意识的提高,环境工作者也需要与时俱进,继续深入推动绿色发展,促进人与自然和谐共生。

环境化学是化学与环境科学交叉的一门学科,它主要是运用化学的理论和方法,研究对人类健康和自然生态系统具有重大意义的化学成分在环境中的存在形态及其迁移、转化、归宿和效应的规律。环境化学探讨化学污染物的浓度水平、污染机制、迁移转化、毒性效应和控制技术等,在认识、阐明、解决环境问题中发挥重要作用。化学污染物种类多、浓度范围广,存在不同的价态、形态、异构体等,它们在介质中和介质间吸附分配、沉积包埋、交换转化、迁移富集、代谢降解。因此,探讨环境污染物的环境行为、污染机制,解决环境问题,特别需要环境化学发挥主体作用。本书系统地介绍了环境化学的基本理论和应用,并紧密结合环境化学前沿研究进展和发展趋势,充分吸收最新环境化学研究成果,内容涵盖了水环境化学、大气环境化学、土壤环境化学、典型污染物的环境行为、环境分析化学、环境污染物毒性与健康危害评估、环境污染修复技术和绿色化学等多个方面。

在本书编写的过程中,力求做到紧跟环境化学发展前沿,注重基础理论与实践创新的融合,将理论与实际案例融会贯通;坚持思想性、系统性、科学性、生动性、先进性相统一,使全书结构严谨、逻辑性强、知识体系完备;为读者提供全面、丰富的学习和参考资料。同时,组建了高水平绿色环保领域环境化学新形态教材建设团队,参加编写的人员包括重庆大学梁嘉良,四川农业大学杨刚、徐敏,四川师范大学杨铮铮,太原理工大学汪素芳,南方科技大学张斌田,济南大学冯锐、张永芳,齐鲁工业大学孙静、申婷婷,成都理工大学黄荣富、孙永华、钱蕾、贾佳、杨菊、朱霞萍、张信凤、高英等。本书配套建成了 5 节高阶核心示范课和 10 项重点校内实验实践项目,完成了教材知识图

谱，旨在打造高水平的环境化学课程建设，为提升人才自主培养质量提供有力支撑。

在本书编写过程中，得到了昆明理工大学任肖敏教授的关心和支持，科学出版社编辑对本书编写出版给予了热情指导和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

本书涉及一些新兴领域内容，同时环境化学发展十分迅速，该领域涉及的问题多且复杂，而编者水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，敬请读者及同行专家提出宝贵意见，以便不断完善。

编 者

2025 年 7 月

目 录

Contents

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 环境及环境问题	1
1.1.1 环境	1
1.1.2 环境问题	1
1.2 环境化学概述	3
1.2.1 环境化学的发展	3
1.2.2 环境化学的研究内容	4
1.3 环境污染物	5
1.3.1 污染物来源	5
1.3.2 化学污染物分类	6
1.3.3 污染物在环境中的迁移转化过程	7
1.4 环境保护与环境伦理	8
1.4.1 环境保护	8
1.4.2 环境伦理	10
1.4.3 社会责任与环境保护的关系	12
习题	13
参考文献	13
第 2 章 水环境化学	15
2.1 天然水的组成和基本特征	15
2.1.1 地球上的水	15
2.1.2 水分子的特性	16
2.1.3 天然水的组成	17
2.1.4 天然水的性质	25
2.1.5 水中污染物的形态	36
2.2 无机物在水中的环境行为	39
2.2.1 吸附	39
2.2.2 聚集	43
2.2.3 溶解沉淀	48
2.2.4 氧化还原	56

2.2.5 配位作用	63
2.3 有机物在水中的环境行为	68
2.3.1 分配作用	68
2.3.2 挥发作用	70
2.3.3 水解作用	71
2.3.4 生物降解	73
2.3.5 光解作用	74
2.4 水质模型	77
习题	78
参考文献	80
第3章 大气环境化学	82
3.1 大气圈及其主要污染物	82
3.1.1 大气的组成	82
3.1.2 大气的结构	83
3.1.3 大气中的主要污染物	85
3.2 大气中污染物的迁移	101
3.2.1 辐射逆温	102
3.2.2 大气稳定度	102
3.2.3 影响大气污染物迁移的因素	103
3.3 大气中污染物的转化	106
3.3.1 光化学反应基础	106
3.3.2 大气中重要的光化学过程	110
3.3.3 大气中重要自由基及其来源	113
3.3.4 大气中碳氢化合物的转化	115
3.3.5 大气中氮氧化物的转化与光化学烟雾污染	122
3.3.6 大气中硫氧化物的转化与硫酸烟雾型污染	126
3.3.7 大气酸性沉降	131
3.3.8 臭氧的生成与耗损	135
3.3.9 全球气候变化	137
习题	140
参考文献	140
第4章 土壤环境化学	142
4.1 土壤形成与组成	142
4.1.1 土壤形成	142
4.1.2 土壤组成	146
4.2 重金属在土壤中的迁移转化	162
4.2.1 土壤中的重金属	162
4.2.2 重金属在土壤中的迁移	162

4.2.3 重金属在土壤中的转化	165
4.2.4 重金属在土壤-植物体系中的迁移及机制	169
4.3 农药在土壤中的迁移转化	173
4.3.1 土壤中的农药	173
4.3.2 农药在土壤中的环境行为与吸附作用	173
4.3.3 农药在土壤中的迁移	174
4.3.4 农药在土壤中的降解	176
4.3.5 农药在土壤中的残留	179
4.3.6 典型农药在土壤中的迁移转化	181
习题	189
参考文献	189
第5章 典型污染物的环境行为	191
5.1 无机污染物的环境行为	191
5.1.1 无机污染物概述	191
5.1.2 镉	192
5.1.3 汞	194
5.1.4 砷	201
5.1.5 铜	203
5.2 有机污染物的环境行为	205
5.2.1 有机污染物概述	205
5.2.2 二噁英	208
5.2.3 多环芳烃	211
5.3 新污染物的环境行为	216
5.3.1 新污染物概述	217
5.3.2 持久性有机污染物	219
5.3.3 内分泌干扰物	220
5.3.4 抗生素	222
5.3.5 微塑料	223
5.3.6 环境纳米污染物	225
5.4 污染物的交互作用	226
5.4.1 无机-无机污染物复合污染的交互作用	227
5.4.2 无机-有机污染物复合污染的交互作用	228
5.4.3 有机-有机污染物复合污染的交互作用	229
5.4.4 传统-新污染物复合污染的交互作用	230
5.5 污染物的生物富集与代谢	230
5.5.1 污染物的生物富集、放大和积累	230
5.5.2 污染物的生物转化	234
习题	238

参考文献	239
第 6 章 环境分析化学	240
6.1 环境样品的采集与前处理	240
6.1.1 环境样品的采集	241
6.1.2 环境样品的溶解和分解	245
6.1.3 环境样品前处理技术	247
6.2 化学分析方法	253
6.2.1 酸碱滴定法在环境样品分析中的应用	253
6.2.2 配位滴定法在环境样品分析中的应用	255
6.2.3 沉淀滴定法在环境样品分析中的应用	256
6.2.4 氧化还原滴定法在环境样品分析中的应用	258
6.3 仪器分析方法	261
6.3.1 光学分析法	261
6.3.2 色谱分析法	265
6.3.3 质谱分析法	268
6.4 新兴分析技术与趋势	269
6.4.1 传感器概述	269
6.4.2 传感器的特性	272
6.4.3 传感器电极的修饰方法	273
6.4.4 几种常见的新型传感器	273
6.5 环境分析数据处理与质量控制	278
6.5.1 数据处理与统计分析	278
6.5.2 质量控制方法与标准制定	281
6.6 环境监测与质量评价	287
6.6.1 环境监测体系与方法	288
6.6.2 环境质量评价指标与标准	290
习题	297
参考文献	298
第 7 章 环境污染物毒性与健康危害评估	299
7.1 环境污染物的毒性作用	299
7.1.1 毒物、毒性和中毒	299
7.1.2 毒作用及类型	300
7.1.3 剂量、剂量-反应和剂量-效应关系	301
7.1.4 表示毒性的常用参数	302
7.1.5 环境毒理学的基本研究方法	304
7.2 毒性作用机制及影响因素	306
7.2.1 环境污染物的“三致”作用	306
7.2.2 环境污染物的内分泌干扰效应	309

7.2.3 环境污染物的联合毒性作用	311
7.2.4 环境污染物的毒性作用机制	313
7.2.5 环境污染物的毒性作用影响因素	316
7.3 计算毒理学	317
7.3.1 计算毒理学的概念	317
7.3.2 毒代动力学	317
7.3.3 环境污染物的定量结构-活性关系	320
7.3.4 有害结局路径	324
7.4 安全性和风险评价	325
7.4.1 环境污染物的安全性	325
7.4.2 环境污染物的健康风险评价	326
7.4.3 环境污染物的生态风险评价	329
习题	331
参考文献	332
第 8 章 环境污染修复技术	333
8.1 环境污染修复技术基本原理	333
8.1.1 概述	333
8.1.2 典型污染环境修复技术的基本原理	334
8.2 水污染修复技术	338
8.2.1 水环境污染概述	338
8.2.2 水体中主要的污染物及来源	338
8.2.3 河流水污染存在的主要问题	345
8.2.4 水环境修复技术	346
8.3 大气污染的环境修复技术	350
8.3.1 大气污染概述	350
8.3.2 大气污染的修复净化技术	352
8.4 土壤污染治理与修复技术	355
8.4.1 土壤修复的概念与分类	356
8.4.2 土壤污染的物理修复	357
8.4.3 土壤污染的化学修复	360
8.4.4 土壤污染的微生物修复	363
8.5 生物多样性保护与生态系统修复	371
8.5.1 生物多样性	371
8.5.2 受损生态系统特征	373
8.5.3 受损生态系统的修复	376
习题	379
参考文献	379

第9章 绿色化学	381
9.1 绿色化学概述	381
9.1.1 绿色化学的概念	381
9.1.2 绿色化学的原则	382
9.1.3 原子经济性	382
9.1.4 <i>E</i> 因子	385
9.1.5 工业生态系统	386
9.2 绿色合成和替代化学品	387
9.2.1 绿色原料	387
9.2.2 绿色反应介质和绿色溶剂	393
9.2.3 环境友好的催化剂	396
9.2.4 化学反应的能量强化	400
9.2.5 绿色能源	403
9.3 绿色化学的应用	407
9.3.1 平流层臭氧消耗问题的解决	407
9.3.2 绿色化学与农业可持续发展	409
9.3.3 废物的循环利用与绿色化处理	410
9.3.4 绿色化学和清洁生产	411
9.3.5 绿色产品及其评价	412
习题	413
参考文献	414

| 第 1 章 |

绪 论

本 章 摘 要

环境化学是化学与环境科学交叉的一门学科，它主要是运用化学的理论和方法，研究对人类健康和自然生态系统具有重大意义的化学成分在环境中的存在形态及其迁移、转化、归宿和效应的规律。本章概括介绍环境化学在环境科学中和解决环境问题方面的地位、作用，以及它的研究内容、特点和发展动态；主要污染物的类别及其在环境各个圈层中的迁移转化过程；环境保护和环境伦理的关系，以及社会、企业和个人在环境保护中的职责。本章要求掌握对现代环境问题的认识，明确环境化学的基本任务，理解环境伦理的内涵及对环境保护的影响意义。

◆ 1.1 环境及环境问题

1.1.1 环境

环境是相对的，它相对于中心事物而存在。环境是在自然背景的基础上，经过人类参与与改造而形成，是自然与社会因素的融合，因此它是变化的。不同学科对环境有不同的理解。在环境科学中，对于以人类为主体的外部世界，环境就是人类的生存环境，指的是围绕在人类周围的客观事物的整体，包括自然环境和社会环境，或者指围绕人群的空间，以及其中可以直接、间接影响人类生活和发展的各种自然因素和社会因素的总体。在环境法中，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。

1.1.2 环境问题

人类与环境之间是一个相互作用、相互影响、相互依存的对立统一体。由自然或人为原因造成的环境污染、环境素质下降和生态系统破坏，对人类生存和进一步发展构成威胁，形成环境问题。按照环境问题的成因，可将其分为原生环境问题和次生环境问题。原生环境问题也称为第一环境问题，主要是由自然因素造成的，如洪水、旱灾、虫灾、台风、

地震、火山爆发等。它不完全属于环境科学研究的范围。次生环境问题也称为第二环境问题,指人类不断利用自然、改造自然,以达到改善生存生活条件的目的,这一系列社会经济活动造成对自然环境的破坏,改变了原生环境的物理、化学或生物学的状态。次生环境问题包括环境污染和生态破坏两种类型。

环境污染是指有害物质对大气、水、土壤和动植物的污染,并达到致害的程度,导致生态系统遭到破坏,同时包括固体废物、噪声、振动、恶臭、放射性等其他因素对环境造成的损害。造成环境污染的因素有物理的、化学的和生物的三方面,其中因化学物质引起的占 80%~90%。人类社会的进步依赖于化学品的使用,同时也使新化学品不断地增长。20 世纪初,已知化合物的数量仅为 55 万种,到 20 世纪末达到了 2000 万种。至今,已知化合物已达到 1.2 亿种,同时每年以近 400 万种的速度激增。化学品的产量也已从 20 世纪 50 年代的 700 万 t 增加到 2019 年的 23 亿 t。大量的人工化学品通过生产、储藏、运输、使用和处理过程进入环境,造成越来越严重的环境问题。一些物质,甚至是曾经被广泛使用的明星分子,如 DDT(双对氯苯基三氯乙烷)、六六六(六氯环己烷)、氟利昂等,因为环境问题或健康效应被取代。DDT 是瑞士科学家 Paul Müller 发明的一种杀虫剂,被认为是杀虫剂的终极产物,它曾被一些国家大规模、大面积使用,并因其巨大的贡献,Paul Müller 于 1948 年获得诺贝尔生理学或医学奖。后来发现该物质对人体健康甚至人类后代有影响,1972 年在美国被禁止使用,2001 年各国政府签署的《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》(简称《公约》)将其列入全球持久性有机污染物的首批淘汰清单。氟利昂被科学家证实是南极上空“臭氧空洞”的元凶,逐渐被新型的制冷剂所取代。同时,许多替代品虽然对臭氧损耗能力较低,但表现出很强的全球增温能力等,引起一系列新的环境问题。

在历史发展的进程中,人类为了自身的生存和发展不断地开发和利用自然资源,导致污染问题时有发生。早在 18 世纪末,法国化学家 Leblanc 发明了由食盐制取纯碱的方法,该技术传到英国后,建成了世界上最早的肥皂工厂,成为现代化工的发源地。但是该生产工艺对于环境却是一大灾难。一方面,该工艺过程中产生大量的氯化氢(HCl)。该物质是一种无色、有刺激性、腐蚀性及窒息性的气体,对上呼吸道有强烈刺激性,对眼睛、皮肤、黏膜有腐蚀作用。HCl 的大量排放引起工厂周围树木死亡,几乎导致寸草不生;工厂工人的健康严重受损,产生安全事故。另一方面,该工艺会产生大量的化学废弃物,其中含有碳酸钠、硫酸钙、亚硫酸钙和未完全燃烧的木炭,这些成分使得废弃物变得沉重而黏稠,堆积如山,占用大量的土地资源并且不断流出废液污染土壤,同时在阴暗潮湿的条件下发生化学反应产生硫化氢,在干燥多风的条件下释放二氧化硫,造成严重的大气污染和健康危害。

20 世纪 30 年代至 60 年代,因现代化学、冶炼、汽车等工业的兴起和发展,工业“三废”排放量不断增加,环境污染和破坏事件频频发生,最著名的就是“世界八大公害”。其中,比利时马斯河谷烟雾事件、美国多诺拉烟雾事件、英国伦敦烟雾事件、美国洛杉矶光化学烟雾事件和日本四日市哮喘事件是由排放大量污染气体和粉尘引起的,而日本水俣病事件、富山骨痛病事件和米糠油事件是由污染引起的食物中毒事件。70 年代以来,世界上又发生了许多公害事件,其严重程度甚至远远超过了“八大公害”事件。例如,印

度农药厂的农药剧毒原料甲基异氰酸酯泄漏事件、苏联切尔诺贝利核电站泄漏爆炸事件以及瑞士化工厂仓库爆炸事件等。21 世纪的罗马尼亚金矿氰化物污染事件,使多瑙河瞬间变为“死亡之水”,这场灾难被认为是自切尔诺贝利核事故以来欧洲最大的灾难性事件,也是 21 世纪以来世界上最严重的环境污染事故,引发了旷日持久的国际诉讼,被认定为全球六大毒物污染事件之一。随着环境问题的日益严重,人们越来越清晰地认识到,环境问题不再是某个国家或地区的局部问题,如温室效应、臭氧层破坏、酸雨等已经演化成全球性的环境问题。环境污染、生态破坏等环境问题已经严重威胁到人类的生存和发展,为各国政府和社会公众所关注。

◆ 1.2 环境化学概述

1.2.1 环境化学的发展

全球范围内环境事件的发生不但震惊了世界,也促使人们思考这些事件发生的根源、所造成的危害以及解决或降低危害的办法。最初,研究者主要侧重于污染物检测手段,研究造成环境污染的原因和寻找污染控制的途径,这些为环境化学学科的诞生创造了条件。例如,20 世纪 60 年代,人们发现了有机氯农药污染及危害,开始研究农药残留的检测方法和环境行为,分析化学和化学工程被应用于环境污染物测定和污染治理,形成了环境化学的雏形。另外,环境污染问题也促进了环境化学研究的发展。例如,对煤烟等造成大气污染问题的研究发展了硫和气溶胶化学、对光化学烟雾污染的研究发展了大气光化学、对酸雨污染的研究发展了酸性降水化学、对水俣病的研究促进了污染物在水体中迁移转化的研究。到 80 年代,环境化学进入了全面发展阶段,开展了主要元素的生物地球化学循环研究、化学污染物在多介质界面间的迁移转化行为研究、污染控制化学研究等。到 20 世纪末,环境化学与其他学科交叉渗透,逐渐形成了自己的学科特色,环境分析化学、环境污染化学、污染控制化学、污染生态化学等领域迅速发展,环境化学发展趋于成熟。

环境化学源于化学,但又不同于原来的化学学科,因为它是从环境的角度考虑问题,是环境科学的核心组成部分,是环境科学与化学的综合和交叉。它以环境问题为研究对象,以解决环境问题为目标。简单来说,环境化学是运用化学的理论和方法,研究大气、水、土壤环境中化学污染物的鉴定和测量,污染物存在形态、迁移转化规律、生态效应以及减少或消除其产生的科学,是环境科学中的重要分支学科之一。环境中的化学污染物是指由人类活动产生,与自然环境化学组分共存和相互作用,可能产生不良生态效应或健康效应的物质。化学污染物通常以各种形态存在于不同的环境介质中,一般含量较低,只有 ppm(10^{-6})或 ppb(10^{-9})甚至是 ppt(10^{-12})量级,因此首先需要准确确定其成分、含量、形态和结构等。另外,它们可能赋存于不同的环境介质中,分布广泛,迁移转化速度很快,且可能存在明显的时空动态变化。因此,需要对环境污染物的环境行为进行研究,包括污染物的形成、迁移、转化、归趋和消除等,甚至需要研究污染物在环境中的积累、

相互作用和生物效应等问题,这就需要应用化学、生物学、生态学、毒理学、地学等多学科的基础理论和方法来进行研究。这种多学科、多介质、多层次的研究不仅丰富了环境化学研究的内容,也为环境化学提供了许多新的生长点,推动了环境化学和这些学科的互相渗透及交叉。

1.2.2 环境化学的研究内容

环境化学的特点是在微观的原子分子水平上研究宏观环境现象与变化的化学机制及防治途径,其核心是研究化学污染物在环境中的化学转化和生物生态效应。环境化学的研究内容包括:有害物质在环境介质中的浓度水平和存在形态;潜在有害物质的来源,在环境介质中和不同介质之间迁移转化的化学行为及归趋;有害物质对环境和生态系统及人体健康产生效应的机制和风险;有害物质已造成影响的缓解和消除,以及防止产生危害的方法和途径。自20世纪70年代以来,环境化学迅速发展,在解决重大环境问题中发挥着至关重要的作用,逐渐形成了环境化学的分支学科:环境分析化学、环境污染化学、污染控制化学、污染生态化学和环境理论化学。

(1) 环境分析化学:应用现代分析化学的新原理、新方法、新技术,鉴定环境介质中有害物质的类别(定性),测定其含量(定量),以及进行价态和形态分析。环境分析化学的基本内容包括环境样品前处理、高效分离待测组分、高灵敏的样品定性定量检测、多种方法和仪器的联合使用,以及分析方法标准化、分析数据智能化和基于人工智能等的大数据分析。

(2) 环境污染化学:应用化学的基本原理和方法研究化学污染物在大气、水体、土壤环境介质中的形成机制、迁移转化和归趋过程中的化学行为和生物生态效应,为环境污染防治控制和修复提供科学依据,主要包括大气污染物化学、水污染化学和土壤污染化学等。环境污染化学的主要研究对象是人类在生产和生活中向环境排出的污染物,但自然环境中的许多天然物质以及各种物理因素构成的环境背景与污染物直接作用或对污染物产生间接影响。因此,环境污染化学的研究对象实际应是由污染物及其环境背景共同构成的综合体系。

(3) 污染控制化学:研究与污染控制和修复有关的化学机制及工艺技术中的化学问题,为开发经济、高效的污染控制及修复技术,发展清洁生产工艺提供理论依据。污染控制化学主要包括绿色化学(环境友好化学、清洁化学)、“三废”控制(水质净化与水污染控制、大气污染控制、固体废弃物的处理处置与资源化,主要集中于将污染物通过转化或再利用的方法进行消减,并建造成套的处理措施)和污染环境修复(对人类活动的环境进行治理)。

(4) 污染生态化学:在种群、个体、细胞和分子水平上研究有害物质与生物之间的相互作用过程,以及引起生态效应的化学原理、过程和机制。污染生态化学包括化学污染物在生态系统中的形成、转化过程、作用机制及其生态效应与生态毒理效应等内容,既从宏观上研究化学物质在维持和破坏生态平衡中的基本作用,又从微观上研究化学物质和生物体相互作用过程的化学机制。

(5) 环境理论化学：应用物理化学、系统科学和数学的基本原理和方法及计算机仿真技术研究环境化学中的基本理论问题，如环境系统热力学、动力学、化学污染物结构-活性关系及环境化学行为与预测模型，重要研究方向包括复杂环境过程的理论模拟方法、生物毒性分子机制理论研究方法、混合物毒性预测方法学、环境污染物非线性非均相多介质模型，以及环境理论计算方法与模型在污染物风险评价中的应用。

随着环境化学研究领域的不断扩展，研究深度不断增加，研究焦点与人们关注的热点紧密结合。在环境化学的研究方法方面，环境化学工作者越来越多地应用其他学科的新思维、新方法和新技术研究环境问题。例如，在环境污染化学领域，应用大气科学的方法和数学模型研究污染物的长距离传输；在环境理论化学领域，应用定量结构-效应关系研究污染物的剂量-效应关系和结构-毒性关系；在环境毒理学领域，应用基因组学、代谢组学、蛋白质组学等各种组学技术研究相关科学问题。同时，环境化学研究内容不断丰富，关注的污染物不断增加，从传统的重金属、常见有机污染物逐渐转向持久性有毒化学污染物和新型污染物。此外，环境化学研究领域由室内环境发展到室外环境，由多介质界面行为研究发展到区域环境调控，再到全球环境调控；从生物有效性发展到毒性机制，从生态毒理学发展到健康效应。环境化学不断与其他学科交叉和渗透，形成环境与健康等新的重要研究方向。

◆ 1.3 环境污染物

1.3.1 污染物来源

环境污染源是指造成环境污染的污染物发生源，通常指向环境排放有害物质或对环境产生有害影响的场所、设备、装置或人体。按污染物的来源可分为天然污染源和人为污染源。天然污染源是指自然界自行向环境排放有害物质或造成有害影响的场所，如正在活动的火山。环境科学主要研究的是人类生产和生活排放的污染物，因此人为污染源是环境保护工作研究和控制的主要对象。人为污染源有多种分类方法。

(1) 按排放污染的种类，可分为有机污染源、无机污染源、热污染源、噪声污染源、放射性污染源、病原体污染源和同时排放多种污染物的混合污染源等。事实上，大多数污染源都属于混合污染源。然而，在研究某一特定环境问题时，往往将某些混合污染源作为只排放某一类污染物的污染源。

(2) 按污染的主要对象，可分为大气污染源、水体污染源和土壤污染源等。

(3) 按排放污染物的空间分布方式，可分为点污染源(集中在一点或一个可当作一点的小范围排放污染物)、面污染源(在一个大范围区域内排放污染物)。

(4) 按人类社会活动功能分为工业污染源、农业污染源、交通运输污染源和生活污染源。①工业生产中的某些环节，如原料生产、加工过程、燃烧过程、加热和冷却过程、成品整理过程等使用的生产设备或生产场所都可能成为工业污染源。它通过排放废气、废水、废渣和废热污染大气、水体和土壤；还产生噪声、振动，危害周围环境。工业污染源

对环境危害最大。②农业污染源指在农业生产过程中对环境造成有害影响的农田和各种农业设施。不合理施用化肥和农药会破坏土壤结构和自然生态系统,特别是破坏土壤生态系统。地表和地下水循环将土壤中的氮和磷、农药以及牧场、养殖场、农副产品加工厂的污染物带入水体,导致水质恶化甚至污染饮用水,危及人体健康。农业污染大多为面源污染,且对环境污染的贡献率逐渐增大。③对周围环境造成污染的交通运输设施和设备。这类污染源发出噪声,引起振动,排放废气,泄漏有害液体,排放洗刷废水(包括油轮压舱水),散发粉尘等,都会污染环境。汽车尾气是城市大气污染物的主要来源。④人类活动产生的废水、废气和废渣都会造成环境污染。生活污染源污染环境的途径主要有:消耗能源排出废气造成大气污染;排出生活污水(包括粪便)造成水体污染;排出厨房垃圾、废塑料、废纸、金属、煤灰和渣土等固体废弃物造成环境污染。

1.3.2 化学污染物分类

1. 无机类污染物

无机类污染物通常包括无机单质和无机化合物。无机单质包括汞、镉、铬、铜、铅、锌、砷等重金属,硒等类金属,以及卤素和磷等。无机化合物包括氰化物、一氧化碳、氮氧化物、卤化氢、互卤化合物(如 ClF 、 BrF_3 、 IF_5 、 BrCl 、 IBr_3 等)、卤氧化物(如 ClO_2 等)、次氯酸及其盐、无机硫化物(如 H_2S 、 SO_2 、 H_2SO_3 、 H_2SO_4 等)、无机磷化物(如 PH_3 、 PX_3 、 PX_5 等)、无机砷化物(如 H_3AsO_3 、 H_3AsO_4 等)和硅的无机化合物等。

2. 有机类污染物

有机类污染物主要包括烃类化合物、有机氮化物、有机卤化物、有机硫化物、有机磷化物、含氧有机物和金属有机化合物等。烃类化合物,包括烷烃、烯烃、芳香烃(如苯系物等)和多环芳烃(PAH)等;有机氮化物,包括胺、腈、硝基甲烷、硝基苯、三硝基甲苯、亚硝酸等;有机卤化物,包括卤代烃、芳香族卤化物、有机氯农药、氯代苯酚、多氯联苯、多溴联苯以及二噁英等;有机硫化物,包括烷基硫化物、硫醇、巯基甲烷、二甲砷和硫酸二甲酯等;有机磷化物,包括磷酸酯类化合物和有机磷农药等;含氧有机物,包括酚类化合物、环氧乙烷、醚、醇、醛、酮、有机酸、酯和酐等;金属有机化合物,包括甲基汞、二甲基汞、四乙基铅、三丁基锡、三苯基锡、甲基胂酸等。

3. 新污染物

新污染物是指排放到环境中,具有生物毒性、环境持久性、生物累积性等特征,对生态环境或人体健康存在较大风险,但尚未纳入管理或现有管理措施不足的有毒有害化学物质。新污染物具有生物毒性、环境持久性、生物累积性等特征,且现阶段尚未被有效监管,相对传统已经被监管的污染物而言较“新”。新污染物有以下几大类:①持久性有机污染物,包括有机氯杀虫剂、工业化学品如多氯联苯和六氯苯等,生产中的副产品如二噁英和呋喃等。②内分泌干扰物,能影响人体和动物体内正常激素水平的外源性化学物质,

包括涕灭威、硫丹等含硫化合物,多氯二噁英、氯丹等含卤素化合物,烷基酚、硝基甲苯等不含卤素和硫的化合物,氯氰菊酯、氯菊酯等菊酯类化合物,汞、镉、铅等重金属。③抗生素,包括喹诺酮类、 β -内酰胺类、大环内酯类、氨基糖苷类抗生素等。④全氟有机化合物,最具代表性的就是全氟辛烷磺酸盐(perfluorooctane sulfonate, PFOS)和全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)。⑤微塑料,即直径在 $1\text{ }\mu\text{m}\sim 5\text{ mm}$ 的塑料碎片,包括聚乙烯、聚苯乙烯、聚丙烯、聚酰胺和聚氯乙烯等。⑥环境纳米污染物,在尺度上至少有一维达到 $1\sim 100\text{ nm}$ 范围的化合态,以胶体和高分子为主。它们的种类繁多,特别是人工制造的各类化学品。在此尺度范围内几乎集中了最常见的污染物质,它们的环境行为与迁移转化过程有许多共同特征,总称为环境纳米污染物。

4. 复合污染物

复合污染是多种污染物同时存在,并共同对大气、水体、土壤、生物和人体产生综合性污染的现象。例如,土壤中多种重金属元素镉、铅、锌、砷等的复合污染,重金属元素与土壤中杀虫剂、除草剂和抗生素等农药残留之间的复合污染等;大气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 等颗粒物、臭氧、挥发性有机物、含氮/硫气体等之间的复合污染和协同影响等。同时,污染物以各种化学状态存在或相互作用,造成对环境与生态的综合影响,如光化学烟雾等。

1.3.3 污染物在环境中的迁移转化过程

环境污染物是使环境的正常组成和性质发生直接或间接有害于人类的变化的物质,是环境化学研究的对象。这些物质在环境中所发生的空间位移及其引起的富集、分散和消失的过程总称为污染物的迁移。污染物在环境中的迁移方式有机械迁移、物理化学迁移和生物迁移三种。污染物在环境中的迁移受到两大因素的制约:一是污染物自身的物理化学性质;二是外界环境的物理化学条件,其中包括区域自然地理条件,还有其他方面,如生物因素。而污染物在环境中通过物理、化学或生物的作用改变存在形态或转变为另一种物质的过程,包括形态、状态和价态的变化,称为污染物的转化。各种污染物转化的过程取决于它们的物理化学性质和所处的环境条件,此转化过程往往与迁移过程伴随进行。物理转化主要形式有蒸发、渗透、凝聚、吸附与放射性元素蜕变等过程;化学转化以光化学氧化、氧化还原和配位水解等作用最为常见;生物转化是通过生物体的吸收、代谢作用而实现的,是一个极其复杂的生物化学反应过程。污染物的转化结果,一方面可使污染物对生物毒性降低,甚至转化为无毒物质或形成易降解的结构;另一方面可以增加污染物的生物可利用性,使污染物的生物毒性增强,或形成难降解的结构。不同形态的污染物在环境中有不同的化学行为,并表现出不同的污染生态效应。

污染物可在同一环境介质内迁移转化,也可在不同环境介质间实现多介质、跨介质迁移、转化而形成循环。在大气中,污染物通过扩散和气流搬运等发生迁移,也可以通过光化学反应或吸附在颗粒物表面发生表面的催化反应而发生转化。例如,大气中的二氧化硫被催化氧化为三氧化硫,进而形成硫酸或硫酸盐,最终导致酸雨的形成;氮氧化物和碳氢化合物通过光化学氧化反应生成臭氧、过氧乙酰硝酸酯等光化学氧化剂,在一定条件下形

成光化学烟雾。在水体中，污染物可通过溶解态随水流动或吸附于悬浮物而传输，或随悬浮物沉降而进入水底沉积物中。同时，污染物可通过氧化还原反应，配位、螯合、水解和生物降解等作用发生形态或价态的转化。例如，在不同环境条件下不同价态的 $\text{Cr}(\text{III} \leftrightarrow \text{VI})$ 、 $\text{As}(\text{III} \leftrightarrow \text{V})$ 之间相互转化，汞元素在无机汞和有机汞形态之间转变。在土壤中，微生物对降解污染物，特别是对有机污染物的迁移转化起到重要作用。土壤的 pH、温度、湿度、离子交换能力、有机质含量、微生物种类等是影响污染物转化的主要因素。对金属离子来说，pH 小于 7 时易溶于水呈离子状态，pH 大于 7 时易与碱性物质生成不溶于水的盐类物质；而许多有机物可在微生物作用下分解成二氧化碳和水。

总体来说，土壤是污染物的源和汇，各种污染物可在土壤/沉积物-水-空气-生物不同介质间发生迁移转化(图 1-1)。大气中的污染物可以通过干湿沉降进入土壤，污染物也可以通过污水排放/灌溉、农药化肥使用和地表径流进入土壤。进入土壤后的污染物可通过挥发进入大气，也可通过淋溶、解吸作用，随地表径流进入地表水，或下渗到地下水。污染物也可在土壤中进行化学降解和微生物降解，其中微生物降解对土壤污染物的转化起重要作用；污染物还可以被植物吸收迁出土壤，通过土壤-植物系统，经食物链最后进入人体。土壤有机质及矿物质对污染物的吸附作用，可降低其生物有效性。

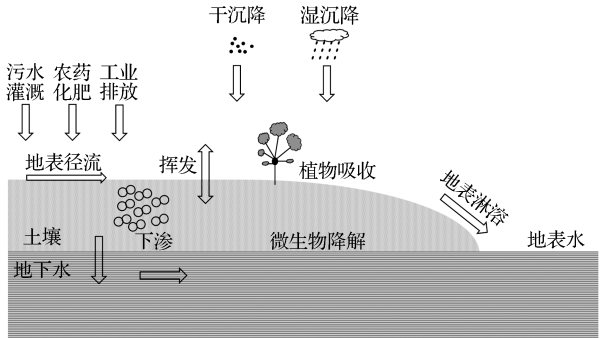


图 1-1 污染物在土壤/沉积物-水-空气-生物不同介质间发生迁移转化

◆ 1.4 环境保护与环境伦理

1.4.1 环境保护

环境保护的概念可以追溯到古代，当时人们已经开始意识到自然资源的重要性，并采取了一些保护措施。现代环境保护运动起源于 20 世纪 60 年代，当时全球范围内出现了一系列严重的环境问题，如空气污染、水污染、土壤退化和生物多样性减少。这些问题引起了广泛的关注和担忧，促使各国政府、科学界和公众共同努力，推动了一系列环境保护政策和法律的制定与实施。环境保护是指对自然环境进行有计划、有组织、有目的的保护、管理和治理，以减少或消除人类活动对环境的不利影响，促进人与自然的和谐发展。环境保护的目的是保护生态系统的健康，确保资源的可持续利用，提高环境质量，从而保

障人类和其他生物的生存和发展。环境保护主要包括污染控制、资源保护、生态保护和环境管理等内容,对于保障人类健康、维护生态平衡、促进可持续发展和应对全球环境问题等方面具有重要意义。

1. 环境保护的目标与原则

环境保护的目标涵盖了生态、经济、社会等多个领域,具体目标包括生态目标、经济目标和社会目标。首先,保护生态系统的稳定性和健康性,维护生物多样性,防止生态系统的退化和破坏;其次,实现资源的合理利用和可持续利用,减少环境污染带来的经济损失,促进经济的绿色发展;最后,提高环境质量,保障人类健康,改善人类生活环境,增强公众的环境意识和参与度。为实现这些目标,环境保护需要遵循以下基本原则。

(1) 预防为主。预防为主是环境保护的基本原则之一。与事后治理相比,预防措施可以更有效地减少环境污染和破坏,避免环境问题的发生。因此,在环境保护中,应优先采取预防性措施,如清洁生产、绿色设计、节能减排等,减少污染物的产生和排放。

(2) 综合治理。环境问题往往是多因素、多层次的综合结果,单一的治理手段难以奏效。因此,环境保护需要综合治理,采取多种手段和措施,从源头到末端进行全方位的治理。例如,针对水污染问题,可以采取污染源控制、污水处理、生态修复等多种措施相结合的方法,综合治理水污染。

(3) 公众参与。环境保护不仅是政府和企业的责任,也是全社会的共同责任。公众参与是环境保护的重要力量,通过提高公众的环境意识和参与度,可以推动环境保护工作的开展。公众可以通过多种方式参与环境保护,如环保志愿者活动、环境监测、环保教育等。

(4) 法律保障。法律是环境保护的重要保障。通过制定和实施环境法律法规,可以规范和约束各类主体的环境行为,确保环境保护工作的顺利进行。例如,《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国大气污染防治法》《中华人民共和国水污染防治法》等法律法规,为环境保护提供了法律依据和保障。

(5) 科技支撑。科学技术是环境保护的重要支撑。通过发展和应用先进的环保技术,可以提高环境治理的效果和效率。例如,清洁能源技术、污染控制技术、环境监测技术等,为环境保护提供了有力的科技支撑。同时,开展环境科学研究,揭示环境问题的成因和机理,为环境保护提供科学依据。

环境保护的目标和原则是相辅相成的,只有在明确目标的基础上遵循科学合理的原则,才能实现环境保护的最终目的。通过预防为主、综合治理、公众参与、法律保障和科技支撑等多方面的努力,可以有效保护和改善环境,促进经济社会的可持续发展。

2. 全球环境问题的现状与趋势

全球环境问题已成为人类社会面临的重大挑战之一,这些问题不仅威胁自然生态系统的稳定和健康,也对人类的生存和发展构成了严重的威胁。

(1) 气候变化是当前最为严峻的全球环境问题之一。自工业革命以来,化石燃料的广泛使用和大规模的森林砍伐,大气中的温室气体浓度显著增加,导致全球气温升高。这种气候变化带来了多方面的影响,包括极端天气事件增加、海平面上升和生态系统

变化。

(2) 空气污染是全球范围内广泛存在的环境问题，对人类健康和生态环境造成了严重影响。主要的空气污染物包括颗粒物(PM_{2.5}和 PM₁₀)、臭氧、二氧化硫、氮氧化物和挥发性有机物等。

(3) 水污染是指有害物质进入水体，导致水质恶化，影响水生生物和人类健康。主要的水污染物包括有机物、重金属、农药、养殖废水和生活污水等。

(4) 土地退化和荒漠化是全球范围内的重大环境问题，特别是在干旱、半干旱和半湿润地区。这些问题严重影响了土地资源的可持续利用和生态环境的健康。

(5) 生物多样性是指地球上各种生物及其遗传变异和生态系统的多样性。生物多样性对维持生态系统的功能和服务具有重要意义。然而，当前生物多样性正面临严重威胁，主要原因包括栖息地破坏、气候变化、过度捕捞、外来物种入侵和污染等。

全球环境问题的现状与趋势表明，环境保护任重道远，需要各国政府、企业和公众共同努力。通过加强国际合作、推动技术创新、提高公众参与度、发展绿色经济、完善政策法规和加强生态系统保护等多方面的措施，可以有效应对全球环境挑战，实现人类社会的可持续发展。

3. 环境保护中的创新技术与跨学科合作

环境保护在现代社会中不仅是一个科学问题，更是一个复杂的社会问题，涉及科技、经济、法律、社会等多个领域。为有效应对环境问题，必须依赖创新技术和跨学科合作。

创新技术是环境保护的重要支撑，能显著提高环境治理的效率和效果。在环境保护中广泛应用的创新技术包括以减少温室气体排放、降低环境污染为目的的清洁能源技术，如太阳能、风能、水能、地热能 and 生物质能等；通过设计和建造节能、环保的建筑物，减少能源消耗和环境污染的绿色建筑技术；旨在减少资源消耗和废物排放，通过资源的循环利用实现可持续发展的循环经济技术；以及环境监测与治理新技术等。

环境问题具有复杂性和综合性，需要多学科的共同参与和合作。跨学科合作在环境保护中发挥着重要作用，能够整合不同领域的知识和技术，提供全面和创新的解决方案。典型的跨学科合作在环境保护中的具体应用包括：环境科学与工程的合作、环境经济学与政策的合作、环境法学与管理的合作、社会科学与环境教育的合作、信息技术与大数据的合作。尽管跨学科合作在环境保护中具有重要意义，但也面临一些挑战，如学科间的沟通与协作、资源与利益的协调、长期的投入与支持等。未来，随着环境问题的复杂性和综合性不断增加，跨学科合作将成为环境保护的重要趋势。通过加强不同学科之间的交流与合作，整合多方面的知识和技术，能够提供更全面和创新的解决方案，从而有效应对环境挑战，实现可持续发展。

1.4.2 环境伦理

环境伦理是指关于人与自然环境之间关系的道德准则和价值体系，涉及人类对自然