



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 环境化学

朱利中 主编

 高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 环境化学

Huanjing Huaxue

朱利中 主编



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书共分五章,包括绪论、大气环境化学、水环境化学、土壤环境化学、污染物的生物及生态效应。本书简要介绍了环境化学的研究内容,当前环境化学研究的若干重要问题;重点阐述了主要化学污染物在大气、水体和土壤环境中的存在、迁移转化、归宿及生物生态效应。本书紧密结合我国乃至全球关注的重大环境问题,在介绍环境化学基本内容的基础上,注意适当反映环境化学领域的最新研究进展。

本书可作为高等院校环境科学类及相关专业的教材或参考书,也可作为环保工作者的参考读物。

## 图书在版编目(CIP)数据

环境化学/朱利中主编. —北京:高等教育出版社, 2011.6  
ISBN 978-7-04-033046-5

I. ①环… II. ①朱… III. ①环境化学-高等学校-教材  
IV. ①X13

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第130695号

策划编辑 陈文  
责任绘图 尹莉

责任编辑 陈文  
责任校对 张小镝

封面设计 于文燕  
责任印制 刘思涵

版式设计 余杨

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印刷 北京明月印务有限责任公司  
开本 787mm×960mm 1/16  
印张 24.75  
字数 470千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
版次 2011年6月第1版  
印次 2011年6月第1次印刷  
定价 36.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物料号 33046-00

# 前 言

环境是一个复杂的多介质开放体系，化学污染物种类繁多、浓度范围广，并以不同价态、形态赋存，它们在同一介质或不同介质间迁移转化，乃至发生长距离迁移；环境介质组成等对化学污染物迁移转化与生物有效性有重要影响；环境中多种污染物之间相互作用，会产生复合污染效应；化学污染物可通过食物链等途径影响人类健康。

环境化学是在化学科学传统理论和方法基础上发展起来的，研究有害化学物质在环境介质中的存在、化学特性、行为、效应及其控制的化学原理和方法的科学。它是环境科学的核心组成部分，也是化学科学的重要分支学科。

环境化学的特点是从微观的原子、分子水平上，研究宏观环境现象与变化的化学机理及其防治途径，其核心是研究环境中化学污染物的迁移转化和生物生态效应。环境化学主要包括环境分析化学、环境污染化学和污染控制化学等。

鉴于我国学科分类及高等院校环境专业的课程设置情况，我们在多年从事环境化学教学的基础上，曾编写出版了《环境化学》。近十多年来，环境化学在与其他学科的交叉融合中得到迅速发展，研究方法不断完善、研究内容不断丰富、研究深度不断增加、研究领域不断扩大，在解决重大环境问题中发挥着至关重要的作用。为更好地体现我国环境科学专业教学规范的基本要求，紧密结合我国和全球关注的重大环境问题，在阐述环境化学基本内容的基础上，反映环境化学的发展现状，力求使环境化学教材具有先进性、科学性、系统性、实用性及可读性，为此，我们组织编写了此书。

全书共分五章。第一章绪论，简要介绍了环境问题的发展历程及人们对其认识的过程，环境化学的研究内容、特点及发展概况，当前环境化学研究领域的若干重要问题；第二、三、四章分别为大气环境化学、水环境化学、土壤环境化学，着重介绍主要化学污染物在大气、水体和土壤环境中的存在、迁移转化行为及危害；第五章为污染物的生物及生态效应，简要介绍了污染物在生物体内的归宿，污染物的生物吸收及其在生物体内的运输、分布、转化、富集与积累等过程特征，同时分析和阐述了污染物的生物生态效应及污染物的结构-效应关系。

本书由朱利中教授主编，并编写了第一、二章，陈宝梁教授、杨坤教授分别编写了第三、四章，周培疆教授编写了第五章。吉林大学董德明教授审阅了全书，并提出了许多宝贵意见。高等教育出版社陈文编辑对本书的编写和出版给予了热情的指导与帮助。编者谨在此一并致谢。

本书可作为高等院校有关环境科学及相关专业的环境化学教学用书，也可作为环保工作者的参考读物。因编者学识和水平有限，书中错误与不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

朱利中

2011. 3. 25

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
第一节 环境化学 .....	2
一、环境问题 .....	2
二、环境化学的研究内容 .....	4
三、环境化学的发展概况 .....	5
四、环境化学研究领域的若干重要问题 .....	7
五、环境化学的发展趋势 .....	10
第二节 环境污染物 .....	11
一、环境污染源 .....	11
二、环境污染物的类别 .....	12
三、环境效应及其影响因素 .....	14
四、环境中污染物的迁移转化过程 .....	15
问题与习题 .....	17
主要参考文献 .....	17
第二章 大气环境化学 .....	18
第一节 大气的结构和组成 .....	19
一、大气的结构 .....	19
二、大气的能量平衡 .....	21
三、大气的主要成分 .....	24
第二节 大气污染物及其来源 .....	26
一、大气污染物的来源 .....	26
二、大气主要污染物 .....	28
三、大气污染效应 .....	46
第三节 大气中污染物的迁移 .....	47
第四节 大气中污染物的转化 .....	49
一、光化学反应基础 .....	50
二、大气中污染物重要的光化学反应 .....	53
三、大气中重要的自由基及其来源 .....	55

四、氮氧化物的转化 .....	57
五、碳氢化合物的氧化与光化学烟雾 .....	60
六、二氧化硫的转化 .....	67
七、酸沉降化学 .....	72
第五节 气溶胶化学 .....	83
一、气溶胶的定义、分类及来源 .....	83
二、气溶胶的粒径分布 .....	87
三、气溶胶颗粒的化学组成 .....	89
四、灰霾 .....	92
五、气溶胶的危害 .....	93
六、气溶胶污染来源的识别 .....	94
第六节 大气污染物对平流层臭氧的影响 .....	96
一、平流层化学研究概况 .....	97
二、氯氟烃类对臭氧层的破坏 .....	98
三、含氮化合物、甲烷及二氧化碳对平流层臭氧的影响 .....	99
问题与习题 .....	100
主要参考文献 .....	101
<b>第三章 水环境化学</b> .....	103
第一节 天然水概况 .....	104
一、水分子结构与特性 .....	104
二、天然水分布与循环 .....	106
三、天然水体组成 .....	110
四、水体的酸碱化学平衡 .....	117
第二节 水体污染 .....	119
一、水体污染与自净 .....	119
二、水体污染物 .....	120
三、水体污染物的形态、毒性效应与危害 .....	126
第三节 水体中污染物的物理化学迁移转化 .....	127
一、挥发作用 .....	128
二、吸附作用 .....	129
三、胶体颗粒的聚沉 .....	142
四、沉淀和溶解作用 .....	146
五、氧化还原作用 .....	152
六、配位作用 .....	163
七、水解作用 .....	169



八、有机物的光化学降解 .....	174
第四节 水体中污染物的生物化学迁移转化 .....	176
一、水体中污染物的生物化学过程 .....	176
二、重金属的生物甲基化作用 .....	179
三、无机氮污染物的生物转化 .....	181
四、有机物的生物转化 .....	182
第五节 水体中污染物的归趋和处理方法 .....	192
问题与习题 .....	195
主要参考文献 .....	196
<b>第四章 土壤环境化学</b> .....	<b>198</b>
第一节 土壤的组成与粒级 .....	200
一、土壤组成 .....	200
二、土壤的粒级分组与质地分类 .....	211
第二节 土壤的主要性质 .....	214
一、土壤胶体的表面性质 .....	214
二、土壤的酸碱性 .....	219
三、土壤的氧化还原性质 .....	223
四、土壤的配位和螯合作用 .....	224
五、土壤的生物学性质 .....	225
六、土壤的自净功能及环境容量 .....	226
第三节 土壤中污染物的迁移转化 .....	227
一、土壤的主要污染物 .....	228
二、氮和磷污染与迁移转化 .....	229
三、重金属在土壤-植物系统中的迁移转化 .....	231
四、土壤中农药等有机污染物的迁移转化 .....	249
五、土壤中温室气体的释放、吸收和传输 .....	273
第四节 土壤污染控制和修复原理 .....	274
一、控制和消除土壤污染源 .....	275
二、增加土壤环境容量,提高土壤净化能力 .....	276
三、土壤污染的缓解与修复原理 .....	277
问题与习题 .....	284
主要参考文献 .....	285
<b>第五章 污染物的生物及生态效应</b> .....	<b>289</b>
第一节 污染物在生物体内的归宿 .....	289
一、污染物在环境中的暴露 .....	289



二、污染物进入生物体内的途径及归宿 .....	290
第二节 污染物的生物吸收 .....	291
一、生物膜的基本组成和结构 .....	291
二、污染物跨膜运输方式及机理 .....	293
三、污染物跨膜运输的物理化学机理 .....	297
第三节 污染物在生物体内的运输及分布 .....	299
一、污染物在动物或人体内的运输及分布 .....	299
二、污染物在植物体内的运输及分布 .....	304
第四节 污染物的生物转化 .....	307
一、污染物的生物转化 .....	307
二、污染物的生物转化过程和反应类型 .....	308
三、影响生物转化的因素 .....	322
第五节 污染物的生物富集与积累 .....	324
一、生物富集 .....	324
二、生物放大与生物积累 .....	333
第六节 污染物的生物效应 .....	337
一、污染物的生物效应概述 .....	337
二、污染物的生物刺激效应 .....	337
三、污染物的生物毒性效应 .....	338
四、污染物生物效应的检测及生物标志物 .....	348
第七节 污染物的生态效应 .....	358
一、污染物在生态系统中的归宿 .....	358
二、污染物生态效应及研究方法 .....	360
三、污染物的生态风险评价 .....	362
第八节 化学污染物的结构-效应关系 .....	364
一、结构-效应关系概述 .....	364
二、分子结构参数表征 .....	365
三、化学污染物定量分子结构-性质/活性相关 .....	371
问题与习题 .....	380
主要参考文献 .....	381
附录 .....	386

# 第一章

---

## 绪 论

### 内 容 提 要

环境化学主要研究环境中污染物的浓度水平、存在形态、迁移转化行为、生物生态效应及其控制的化学原理。环境化学是环境科学的核心组成部分，也是化学的重要分支学科。环境化学在与其它学科的综合交叉中得到迅速发展，在解决重大环境问题中起着十分重要的作用。本章简要介绍了环境问题的发展历程及人们对其的认识过程，环境化学的研究内容、特点及发展概况，当前环境化学研究领域的若干重要问题；阐述了环境污染源、环境污染物、环境效应及其影响因素，环境介质中污染物的迁移转化过程。

环境化学 (environmental chemistry) 是一门研究有害化学物质在环境介质中的存在、化学特性、行为、效应及其控制的化学原理和方法的科学，是人们在认识和解决环境问题过程中逐渐形成和发展起来的。

环境化学是以化学物质 (主要是污染物质) 引起的环境问题为研究对象，以解决环境问题为目标的一门新兴交叉学科；其研究领域非常广泛，几乎深入环境的各个方面，如大气环境、水环境、土壤环境及生物圈，从污染物的环境背景调查、环境质量监测、迁移转化过程、生物生态效应到环境污染控制与修复，乃至全球环境问题的认识，无不依赖于环境化学的发展。环境化学不仅可以帮助识别化学污染物的来源、种类、数量和形态，还可以描述和预测污染物的环境过程及未来变化趋势，并为环境污染控制与修复提供方法原理和技术手段。因此，环境化学是随环境问题的出现而产生的，它贯穿于环境问题研究的全过程，在解决环境问题中发挥着十分重要的作用。

## 第一节 环境化学

### 一、环境问题

人类在与自然界的斗争中，运用自己的智慧和劳动，不断改造自然，创造和改善自己的生存条件，但由于资源的过度开采、污染物排放超出地球的承载力，带来了一系列环境问题。环境问题广义上是指任何不利于人类生存和发展的环境结构和状态的变化，如环境污染和生态破坏等。

环境污染是指由于人为因素使环境的结构或状态发生变化，环境质量下降，从而扰乱和破坏了生态系统和人们的正常生活和生产条件；具体是指有害物质对大气、水体、土壤和动植物的污染，并达到致害的程度，生物系统遭到不适当的干扰和破坏，不可再生资源被滥采滥用，以及因固体废物、噪声、振动、恶臭、放射性等造成对环境的损害。造成环境污染的因素有物理的、化学的和生物三方面，其中因化学物质引起的占80%~90%。

环境问题自古就有，而人们对环境问题的认识有个发展过程。早在春秋战国时期，齐国丞相管仲、荀况（荀子）提出了朴素的生态学思想，充分认识到生境对生物的重要作用。如荀况说“川渊者，龙鱼之居也；山林者，鸟兽之居也”；“川渊枯则龙鱼去之，山林险则鸟兽去之”。产业革命特别是第二次世界大战后，社会生产力的迅速发展，机器的广泛使用，为人类创造了大量的财富，而工业生产排放的大量废物进入环境，导致许多国家普遍发生了严重的环境污染。随着人类经济社会的发展，环境问题也在不断产生和发展。环境污染公害事件发生频率加快，污染范围由局地向区域，再向全球逐步发展，严重制约了人类经济社会的可持续发展。

20世纪40—50年代人们开始认识到环境污染；60年代人们仍把环境问题只当成一个污染问题，认为环境问题主要是城市和工农业发展带来的大气、水体、土壤、固体废物和噪声等的污染，未能从战略上重视土地沙化、森林破坏和物种灭绝等生态环境破坏问题。1938年，瑞士科学家 Paul Muler 发现滴滴涕（DDT）有惊人的杀虫效果。之后，人们开始大量生产和使用 DDT、六六六等有机氯农药，在短期内起到了极佳的杀虫效果，显著提高了农作物的产量。与此同时，有机氯农药对空气、水体、土壤等环境造成不同程度的污染，影响了粮食、蔬菜等农产品的安全。美国海洋生物学家 Rachel Carson 经过4年的调查，于1962年出版了《寂静的春天》一书，阐述了有机氯农药对环境的污染，用生态学原理分析了这些化学杀虫剂对生态系统的危害。

1972年,在瑞典斯德哥尔摩召开了联合国人类环境会议。会议发表的《人类环境宣言》中明确指出,环境问题不仅表现在水、气、土壤等的污染已达到危险程度,而且表现在生态环境的破坏和资源的枯竭;同时指出一部分环境问题是由于贫穷造成的,并明确提出发展中国家要在发展中解决环境问题。此次会议是人类认识环境问题的一个里程碑,会后正式成立了联合国环境规划署(UNEP)。

20世纪80年代,人们对环境问题的认识有了新的发展,提出了可持续发展战略,从保护环境和资源、满足当代和后代的需要出发,强调世界各国政府和人民要对经济发展和环境保护两大任务负起历史责任,并把两者结合起来。

20世纪90年代,可持续发展的思想得到巩固和发展。1992年6月,在巴西里约热内卢召开了联合国环境与发展大会,发表了《里约环境与发展宣言》、《21世纪议程》等重要文件,促使环境保护和经济社会协调发展,以实现人类的可持续发展。2002年9月,联合国在南非约翰内斯堡召开全球峰会,通过了《可持续发展问题世界首脑会议执行计划》,促使环境保护与经济社会协调发展。

与此同时,持久性有机污染物(POPs)对生态系统及人体健康的影响日益引起人们的关注。1995年5月,联合国环境规划署理事会通过了《关于持久性有机污染物的18/32号决议》。2001年在瑞典签署了《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》,旨在减少或消除POPs的排放,保护人类健康和环境免受其危害。

为使人类免受气候变暖的威胁,1997年12月,在日本京都召开了《联合国气候变化框架公约》缔约方第三次会议,通过了旨在限制发达国家温室气体排放量,以抑制全球气候变暖的《京都议定书》。议定书规定,到2012年,发达国家二氧化碳等六种温室气体的排放量要比1990年减少5.2%。具体地说,发达国家从2008年到2012年必须完成的削减目标是:与1990年相比,欧盟削减8%、美国削减7%、日本削减6%、加拿大削减6%、东欧各国削减5%~8%。新西兰、俄罗斯和乌克兰可将排放量稳定在1990年的水平。议定书同时允许爱尔兰、澳大利亚和挪威的排放量比1990年分别增加10%、8%和1%。2007年12月在印度尼西亚的巴厘岛召开了联合国气候变化公约气候变化会议,会议的主题是“从气候变化的毁灭性灾难中拯救我们的地球”,试图找到一条遏制全球气候变化的新途径。

1995年起,科学家开展了印度洋试验(INDOEX),发现灰霾笼罩亚洲大部分地区,其中污染最严重的是印度北部和中国东部,并推测这一现象可能影响到区域辐射胁迫及区域和全球气候,该现象被称为亚洲棕云(Asian brown cloud)。2002年8月,联合国环境规划署发表了《亚洲棕云:气候及其他环境

影响》，描述了南亚空气污染出现的新情况。之后，在非洲、美洲、欧洲也陆续发现了棕云现象，由此，亚洲棕云被重新命名为大气棕云（atmospheric brown cloud）。

随着环境问题的日益严重，人类对环境问题的认识也在不断提高。如人们越来越清楚地看到，环境问题已不再是某个国家和局部地区的事情。温室效应、臭氧层破坏、酸雨等已远远超出国家和地区的局限而成为全球性问题。环境污染及生态破坏已严重威胁人类的生存和发展，成为世界各国政府、公众关注的热点问题。由此，推动了环境科学的形成和发展。

## 二、环境化学的研究内容

环境化学是环境科学的核心组成部分，也是化学科学一个新的重要分支。环境化学是在化学学科基本理论和方法原理的基础上发展起来的，其主要研究内容为有害物质在环境介质中存在的形态和浓度水平，潜在有害物质的来源及其在环境介质中和不同介质之间的化学行为及归宿，有害物质对环境和生态系统及人体健康产生效应的机理和风险，有害物质已造成影响的缓解和消除及防止产生危害的方法和途径。环境化学的特点是从微观的分子、原子水平上，研究宏观的环境现象与变化的化学机理及其防治途径，其核心是研究环境中化学污染物的迁移转化行为和生物生态效应。

环境化学自从 20 世纪 70 年代形成以来，在与其他学科的交叉融合中得到迅速发展，在解决重大环境问题中发挥着至关重要的作用，并逐渐形成了环境化学的分支学科。我国学者普遍认为环境化学的分支学科主要包括：环境分析化学、环境污染化学和污染控制化学。随着环境科学的发展，环境化学研究领域不断扩大，逐渐形成了污染生态化学和环境理论化学等新的分支学科。其研究内容如下：①环境分析化学，应用现代分析化学的新原理、新方法和新技术鉴别和测定环境介质中有害化学物质的种类、浓度及存在形态。②环境污染化学，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理、迁移转化和归宿过程中的化学行为和生态效应，为环境污染控制与修复提供科学依据；主要研究领域包括大气污染化学、水污染化学、土壤污染化学等。③污染控制化学，研究与环境污染控制和修复有关的化学机理及工艺技术中的化学基础问题，为开发经济、高效的污染控制及修复技术、发展清洁工艺提供理论依据。④污染生态化学，在种群、个体、细胞和分子水平上研究化学污染物与生物之间相互作用过程及化学污染物引起生态效应的化学原理和过程，即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，微观上研究化学物质和生物体相互作用过程的化学机理。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，主要包括环境系统热力学、环境系统动力学、化学污染物结构-活性关系及环境化学行为与预测模型。但目前我国环境科学专业教学体系中环境化学课程及教材主要介绍环境污染化学等方面的内容。

实际环境问题是非常复杂的。环境本身是一个多因素的开放体系，其中的污染物含量很低、浓度范围广，并以不同形态存在，它们在同一介质及不同介质之间迁移转化或相互作用，乃至发生长距离迁移；介质组成对污染物的迁移转化与生物有效性有重要影响；环境中通常存在多种污染物的复合污染，表现出复合生物/生态效应，许多化学原理和方法不宜直接运用；正确认识和解决环境问题需要环境化学及相关学科的参与和协作，其中环境化学起着非常重要的作用，如污染物的环境背景调查、环境质量监测与评价、环境质量基准和标准的制定、污染控制和修复、区域乃至全球环境问题都需要环境化学参与解决。因此，环境化学贯穿于认识与解决环境问题的全过程，在环境保护中发挥着重要作用：①为识别化学污染物的来源、种类和数量提供分析测试手段；②从分子和细胞水平上认识化学污染物的环境行为，评价其生态风险；③为环境污染控制和污染环境修复提供技术原理和手段；④为描述和预测化学污染物的结构-效应关系及制定环境标准提供基础数据和理论依据；⑤促进环境科学与化学的其他分支学科的发展，丰富环境科学的内容。随着我国环境保护事业的迅速发展，环境化学研究也取得了丰硕的成果。环境科学工作者结合我国环境问题的实际，在环境分析化学、环境污染化学、污染控制化学等方面进行了广泛、深入的研究和探索，对我国环境化学及环境保护事业的发展起到了重要的推动作用。

### 三、环境化学的发展概况

环境化学的发展历程大致可分为四个阶段，即孕育阶段（1970年以前）、形成阶段（20世纪70年代）、发展阶段（20世纪80年代）和成熟阶段（1990年以后）。

第二次世界大战至20世纪60年代，世界主要发达国家的经济从恢复逐渐走向高速发展。由于当时人们只注重发展经济而忽视了对环境的保护，导致不断发生环境污染和危害人群健康的事件，如洛杉矶光化学烟雾事件、伦敦烟雾事件、日本的痛痛病事件和水俣病事件等，促使人们认识环境问题的重要性，并研究造成环境污染的原因和寻找控制污染的途径。20世纪60年代初，由于发现有机氯农药的污染及危害，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技术分别被应用到污染物测定和污染治理，形成了环境化学的雏形。

20世纪70年代，为推动国际重大环境前沿问题的研究，国际科学联合会

理事会于1969年成立了环境问题专业委员会(SCOPE),1971年出版了第一部专著《全球环境监测》。之后,陆续出版了一系列与环境化学有关的专著,初步确定了环境化学的研究对象、范围和内容。1972年,联合国人类环境会议以后,国际上先后成立了全球环境监测系统(GEMS)和国际潜在有毒化学品登记机构(IRPTC),并促进各国建立相应的环境保护机构,我国也提出了环境保护与建设工程“同时设计、同时施工和同时验收”的环保方针。这一时期,开始研究酸雨、大气及水污染防治等,关注的污染物主要包括SO<sub>2</sub>、粉尘、COD、BOD、重金属等。与此同时,美国《化学文摘》(CA)从1971年的第74卷开始在“环境”这个主题词下收录文献,此后以每年平均100篇文献的速度直线上升,1979年收录的文献达1150篇,标志着环境化学作为一个独立的学科已初步形成,并得到了快速发展。

20世纪80年代,环境化学进入了全面发展阶段,各研究领域开始向纵深发展,出现一些新的发展趋势。一是全面开展对主要元素,尤其是生命必需元素的生物地球化学循环和主要循环之间的相互作用,人类活动对这些循环产生的干扰和影响,以及对这些循环有重大影响的各种因素的研究。二是重视化学品安全性评价和环境致癌物的研究,探讨化学污染物在多介质界面之间的迁移转化行为。三是较为深入研究臭氧层破坏、温室效应等全球性环境问题及由此引起的次级环境效应等。四是污染控制化学的研究,从深入开展污染末端控制的过程化学和材料化学研究以寻找更加高效的控制方法和材料,逐步转向“污染预防”研究,提出了“污染预防”、“清洁生产”等概念。对危险废物污染、地下水污染、海洋污染、大面积酸化引起的种群消失和生态系统破坏、农业化学品滥用、污水灌溉及酸沉降引起的土壤退化和食品污染等问题也极为关注,开展了广泛的研究。随着环境问题逐渐成为全球关注的焦点,其他传统乃至新兴学科几乎都向环境领域渗透,有力推动了环境化学的发展。

20世纪90年代以后,环境化学在与其他学科的交叉渗透中逐渐形成自己的学科特色,在环境分析化学、环境污染化学、污染控制化学、污染生态化学等领域的研究得到了迅速的发展,环境化学发展趋于成熟。1998年开始,美国《化学文摘》在“环境”主题词下设置了环境分析、环境模拟、环境污染治理、环境生态毒理、环境污染迁移和环境标准等次主题词,美国化学学会也设立了环境化学专业委员会。这一阶段在环境化学研究的某些重点领域取得了突破性进展,如生物芯片在环境分析化学中的应用、环境内分泌干扰物(EEDs)/持久性有机污染物的筛选、大气对流层的自由基化学、气溶胶多相化学反应及其对酸雨形成等的影响、湖泊富营养化水华暴发的促进因子、磷化氢在湖泊生物地球化学循环中的作用、POPs传输机理、化学污染物在土壤或沉积物固-液界面的传输过程、土壤中重金属的存在形态及其生物有效性、土



壤中有机污染物的降解、土壤中温室气体的释放、复合污染过程及效应、低剂量效应、分子水平的生态毒理学、环境污染控制和污染环境修复的新技术和新原理、化学污染物的结构-效应关系等方面的研究均取得了重要进展,并提出了“绿色化学”、“工业生态学”等概念。三十多年来,特别是近十年来环境化学研究领域论文数量增长非常快,环境化学在解决重大环境问题等方面发挥着越来越重要的作用,许多成果被学术界广泛认可。由于早期在判定氯氟烃类(CFCs)损耗平流层臭氧方面所作的重大贡献,1995年,美国科学家 Sherwood Rowland 和 Mario Molina 及德国科学家 Paul Crutzen 获得诺贝尔化学奖。

环境化学是一门快速发展的新兴交叉学科。围绕解决日益严重的环境问题、实施可持续发展战略,环境化学研究不断向纵深发展,研究理念从被动研究重大环境问题转向主动预防、解决可能出现的环境问题,并推动了其他学科和相关技术的发展。环境化学发展呈现出如下特点与态势:①研究方法不断完善,环境化学工作者越来越多地应用化学、地学、生物学、毒理学、流行病学及数学等其他学科的新思维、新方法和新技术研究环境问题,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迁移;在理论环境化学领域,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、蛋白质组学及金属组学等各种组学技术研究相关科学问题。此外,环境化学还从传统的热力学平衡方法发展到应用动力学方法,研究污染物多介质环境过程及效应。②研究内容不断丰富,主要表现在:关注的污染物不断增加,从重金属、常见有机污染物逐渐转向持久性有机污染物和新型污染物,如溴代联苯醚、全氟辛烷化合物、环境内分泌干扰物、纳米颗粒物及污染物的降解和代谢产物;研究体系更加接近真实环境,由单一污染发展到复合污染,由单一介质发展到多介质体系。③研究深度不断增加,由传统的现状调查等发展到注重机理研究;从分子、细胞、个体、种群水平发展到生态系统研究;从研究高浓度、单一污染的短期生态效应转向研究低浓度、复合污染的长期效应。④研究领域不断扩大,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过程,由区域环境发展到全球环境,从生物有效性发展到毒性机理,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,形成了环境与健康等新的重要研究方向。

#### 四、环境化学研究领域的若干重要问题

环境化学在解决重大环境问题中起着十分重要的作用,其研究领域已深入到环境的各个方面。目前环境化学研究重点关注的问题有全球气候变化、酸沉降、气溶胶化学、室内空气污染及健康风险、水体富营养化、土壤和地下水污

染及修复、持久性有机污染物和环境内分泌干扰物、重金属和类金属污染、复合污染及效应、绿色化学、食品安全及生态安全等方面。

全球气候变化是当前和今后环境化学关注的重要问题。政府间气候变化委员会 (IPCC) 已全面阐述了全球气候变化的科学依据, 并根据观测数据和模拟结果提供了全球气候变化的证据, 分析了影响辐射平衡的大气辐射活性物种的辐射胁迫。事实上, 除  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、CFCs、 $\text{N}_2\text{O}$  等温室气体外, 大气中  $\text{O}_3$ 、颗粒物等痕量物质都会对全球气候和人体健康产生明显影响。2000 年, 科学家发现了一种迄今辐射效应最强 ( $0.57 \times 10^9 \text{ W/m}^2$ ) 的温室气体—— $\text{CF}_3\text{SF}_5$ , 这种气体有很长的生命周期。另外, 全球气候变化也会影响大气痕量物种迁移转化等化学行为。

酸沉降对生态系统的影响及危害仍是全球性的重大环境问题。酸沉降导致的土壤和水体酸化引起一系列生态环境问题, 如森林面积锐减和农作物减产等。酸沉降的形成机理、影响因素和污染防治仍受到人们的广泛关注。开发清洁能源, 提高能源利用效率, 减少  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  的排放是酸沉降防治中急需解决的重要问题。

气溶胶是分散在大气中的固态或液态颗粒物。大气中各种化学物质在气溶胶上的非均相化学反应对酸雨、光化学烟雾、臭氧层破坏等有重要影响。因此, 20 世纪 90 年代以来, 大气环境化学的研究重点逐渐转向气溶胶, 包括大气气溶胶的表征、气溶胶的形成及大气化学过程、气溶胶对大气能见度及气候变化的影响、气溶胶的健康效应等。

室内空气污染往往比室外更严重, 主要污染物包括醛酮化合物、多环芳烃 (PAHs)、苯系物 (BTEX)、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、可吸入颗粒物、细菌、病毒、放射性物质等。室内空气污染对人体健康有重要影响。美国历时 5 年的专题调查发现, 室内空气污染是室外的 2~5 倍, 甚至 100 倍; 68% 的人体疾病与室内空气污染有关。室内空气污染、健康风险及控制越来越受到人们的重视。

水体富营养化是当前重要的水环境问题之一, 受到世界各国的普遍关注。欧洲、非洲、北美洲和南美洲分别有 53%、28%、48% 和 41% 的湖泊存在不同程度的富营养化现象, 亚太地区 54% 的湖泊处于富营养化。我国水体富营养化问题也十分严重, 滇池、巢湖、太湖、东湖等出现蓝藻暴发现象, 近岸海域有时也出现蓝藻暴发现象。蓝藻的暴发机理及控制是我国及许多国家急需解决的重要问题。

土壤是生态系统的核心介质, 是各种污染物的源与汇。由于农药和化肥的大量施用、污水灌溉、大气的干湿沉降和垃圾填埋渗滤等, 造成土壤重金属和有机物污染日趋严重。土壤污染物可经挥发进入大气, 通过淋溶作用对地表水、地下水造成次生污染, 还会影响植物生长发育及土壤内部生物群落的变化