

高等学校教材

■ 但德忠 主编

# 环境分析化学



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

高等学校教材

# 环境分析化学

但德忠 主编

高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

## 内容简介

本书在介绍环境分析化学的基础理论、基本知识和相关技术的基础上,重点介绍了当今环境分析化学前沿的热点问题:环境样品的采集、制备与分解;痕量分析中的不确定度;环境分析化学中常用的分离与富集方法;痕量有机污染物分析的预处理新技术;化学形态分析;生物传感器;流动注射分析;突发环境事件的现场快速应急分析技术和重大环境问题,以及相关分析技术等。本书内容丰富,取材新颖,突出了科学性、系统性、实用性和前瞻性,各章附有习题与思考题。

本书可作为高等学校环境科学、环境工程、环境化学、环境监测、农业化学、检验检疫、化学化工等专业教学用书,也可供相关科技人员和管理人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

环境分析化学/但德忠主编. —北京:高等教育出版社,  
2009.1

ISBN 978-7-04-024921-7

I. 环… II. 但… III. 环境分析化学-高等学校-  
教材 IV. X132

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 188865 号

策划编辑 陈文 责任编辑 谭燕 封面设计 于涛 责任绘图 尹莉  
版式设计 余杨 责任校对 殷然 责任印制 朱学忠

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100120	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landracoco.com">http://www.landracoco.com</a>
印 刷	煤炭工业出版社印刷厂		<a href="http://www.landracoco.com.cn">http://www.landracoco.com.cn</a>
		畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787×960 1/16	版 次	2009 年 1 月第 1 版
印 张	27.75	印 次	2009 年 1 月第 1 次印刷
字 数	510 000	定 价	35.90 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 24921-00

# 前 言

全球范围的大气、江河、海洋和土壤等环境污染正在日益严重地破坏生态平衡并危及人类的生存与发展。在追踪和调查污染源,弄清污染物种类、数量及其化学形态,研究其毒性、降解、迁移和转化规律,预测预报其毒性危害程度,以及资源环境的破坏、管理和修复等诸多方面,现代环境分析化学正起着日益重要和不可替代的作用。

目前,环境分析化学面临的主要挑战是:第一,面对环境复杂体系,如何发展高效、高速、高选择、高灵敏和高通量的分析技术,包括这些技术的基础理论;第二,面对突发性的环境污染事故、食品安全等严重问题,如何发展痕量或超痕量物质的现场快速检测方法;第三,面对痕量有机污染物,尤其是痕量持久性有机污染物和环境激素,如何发展新的高效样品处理技术及高灵敏和高特效的分析技术;第四,面对形态分析对生态环境和人体健康的挑战,如何发展实时、原位、在线分离和分析技术等。

对这些环境科学前沿的热点问题,除了依靠环境分析化学涉及的所有现代分析测试的最新技术外,还需要有足够的数学、物理学、微机电加工技术、计算机技术、分子生物学技术等多方面的知识。这说明现代环境分析化学已经发展为内容浩繁、多学科基础理论和相关实验技术水平深度融合的一门交叉性学科,它既不像分析化学那样着眼于传统基础理论的介绍,也不像环境监测那样囿于标准化、规范化,而着重在对监测全过程的认识了解。现代环境分析化学最根本的是它本身具有学科的前沿性与超前性,是重点研究与环境污染相关问题的方法学,为复杂环境污染问题的研究提供解决问题的新的科学思路和实验方法。

本书是作者在总结多年环境分析化学教学、科研工作的基础上,广泛参考国内外相关的文献资料编著而成。全书内容在介绍环境分析化学的基础理论、基本知识和相关技术的基础上,重点介绍当今前沿的热点环境分析化学问题:痕量分析中的不确定度;环境样品的采集、制备与分解;痕量有机污染物分析的预处理新技术;化学形态分析;生物传感器;流动注射分析;突发环境事件的现场快速应急分析技术和重大环境问题及相关分析技术等。注意突出了内容的科学性、系统性、实用性和前瞻性。本书授课学时为34~51学时,各校可根据不同专业的具体需求进行侧重和取舍。

本书由但德忠任主编。参加编写的有四川大学但德忠(第一章、第二章、第五章、第六章、第八章、第九章第一节、第四节和第五节),四川农业大学伍钧(第

三章),西南民族大学吴永康(第四章、第九章第二节和第三节),宜宾学院黄飞(第十章)和广州大学吴翠琴(第七章)。全书由但德忠负责统稿。四川大学肖丹教授任本书的主审。

本书获得了四川大学立项教材的资助。高等教育出版社陈文对本书的出版给予了热情的支持和帮助,责任编辑谭燕为本书的审阅和修改付出了辛勤的劳动。四川省环境监测站谢振伟为本书第九章的编写提供了宝贵的资料。研究生祝艳涛、魏娜等在收集整理资料方面做了大量的工作。本书还参考引用了国内外不少同行的教材、专著和论文等文献资料。作者在此一并表示诚挚的谢意。作者还要特别感谢英国普利茅斯大学地球、海洋与环境科学学院的环境分析化学专家 Paul John Worsfold 教授,他对作者在英国高访期间进行的流动注射研究工作给予了极大的支持。

本书内容涉及领域广泛,限于作者水平有限,在内容选取和表述方面难免有疏漏之处,敬请广大读者批评指正。

但德忠

2008.3.27

# 目 录

第一章 绪论	1
第一节 环境与环境问题	1
一、环境	1
二、环境问题	1
第二节 环境污染物	2
一、环境污染物的来源及类别	2
二、环境污染物的性质和种类	2
三、优先控制污染物	5
第三节 现代环境分析化学概述	6
一、环境分析化学	6
二、现代环境分析化学	7
三、现代环境分析化学的特点	8
四、现代环境分析化学的发展	10
第四节 现代环境分析方法简介	13
一、化学分析法	13
二、仪器分析法	13
三、生物分析法和分子生物学检验法	17
习题与思考题	18
参考文献	19
第二章 痕量分析基础	20
第一节 痕量分析的基本概念	20
一、痕量分析中表示组分含量常用的符号	20
二、痕量分析方法的评价指标	20
第二节 痕量分析中的空白值	23
一、空白值对待测物准确度的影响	23
二、空白值的测定与扣除	24
第三节 痕量分析中的玷污与损失	24
一、玷污的控制	24
二、损失对痕量分析的影响及控制	27
第四节 痕量分析中的不确定度	28

一、概述 .....	28
二、不确定度的定义 .....	29
三、不确定度与测量误差 .....	30
四、不确定度的评定 .....	32
五、环境分析中不确定度的主要来源 .....	37
六、不确定度评定应用实例 .....	42
第五节 环境标准物质 .....	45
一、基体和基体效应 .....	45
二、环境标准物质 .....	45
三、环境分析的质量控制样品 .....	51
习题与思考题 .....	52
参考文献 .....	52
第三章 环境样品的采集、制备与分解 .....	54
第一节 环境样品的采集和制备 .....	54
一、概述 .....	54
二、固体样品的采集和制备 .....	55
三、水样的采集与保存 .....	61
四、气体样品的采集 .....	66
五、生物样品的采集与制备 .....	72
第二节 环境样品的分解 .....	75
一、湿法分解 .....	75
二、干法灰化-酸溶法 .....	80
三、熔融-酸处理 .....	81
四、烧结法 .....	84
五、溶样机理简介 .....	84
第三节 微波溶样 .....	89
一、概述 .....	89
二、微波溶样的特点 .....	90
三、微波溶样的原理 .....	91
四、微波溶样的设备 .....	94
五、微波溶样的方法 .....	100
六、微波溶样的应用 .....	102
第四节 其他分解法 .....	105
一、溶解和稀释 .....	105
二、蒸气分解 .....	106

三、酶水解法	106
四、紫外光分解法	106
习题与思考题	109
参考文献	110
<b>第四章 环境样品预处理中常用的分离与富集方法</b>	<b>111</b>
第一节 概述	111
一、痕量物质分离与富集的必要性	111
二、分离富集方法的评价	112
第二节 沉淀分离法	113
一、沉淀法	113
二、共沉淀法	113
第三节 溶剂萃取法	114
一、液-液萃取法	114
二、连续液-液萃取	117
三、浊点萃取法	117
四、液-固萃取法(索氏萃取)	120
第四节 离子交换分离法	121
一、离子交换剂的分类	121
二、离子交换树脂的性质	122
三、离子交换理论	123
四、离子交换柱式分离法	123
第五节 顶空、气提和蒸馏法	124
一、顶空法(HS)	124
二、气提法	125
三、蒸馏法	125
第六节 柱色谱法	128
一、液-固色谱原理	128
二、柱色谱分离条件	129
三、柱色谱分离操作	130
四、凝胶色谱法	131
第七节 平面色谱法	134
一、纸色谱	134
二、薄层色谱	135
习题与思考题	139
参考文献	139



第五章 痕量有机污染物分析的预处理新技术	140
第一节 概述	140
一、环境痕量有机污染物分析的特点	140
二、环境痕量有机污染物的分析	141
三、环境痕量有机污染物衍生化	142
第二节 衍生化技术	144
一、概述	144
二、气相色谱中常用的柱前衍生化方法	144
三、液相色谱中常用的柱前衍生化方法	147
四、固相化学衍生化法	148
五、衍生化反应操作及注意事项	148
第三节 固相萃取	149
一、固相萃取的基本原理和特点	149
二、固相萃取装置	150
三、固相萃取分类及方法	151
四、固相萃取吸附剂	154
五、固相萃取的应用	160
第四节 固相微萃取	161
一、固相微萃取装置的构造	161
二、固相微萃取法的原理和方式	162
三、固相微萃取法萃取条件的选择	163
四、固相微萃取的类型	164
五、固相微萃取的应用	165
第五节 液相微萃取	166
一、概述	166
二、液相微萃取的模式	167
三、液相微萃取法的原理	169
四、液相微萃取法的萃取条件选择	170
第六节 搅拌棒吸附萃取	170
一、概述	170
二、搅拌棒吸附萃取装置的结构和使用方法	171
三、搅拌棒吸附萃取的原理	172
四、搅拌棒吸附萃取的应用	173
第七节 超临界流体萃取	174
一、基本原理	174

二、超临界流体萃取操作	176
三、超临界流体萃取的应用	178
第八节 亚临界水萃取	179
一、亚临界水萃取的原理及特点	179
二、亚临界水萃取技术	180
三、亚临界水萃取的应用	182
第九节 微波萃取	182
一、概述	182
二、微波萃取设备和控制参数	184
三、微波液相萃取和微波气相萃取	187
四、微波萃取的应用	189
第十节 超声波萃取	190
一、超声波萃取的原理	190
二、超声波萃取的特点	191
三、超声波萃取系统	192
四、超声波萃取的应用	194
第十一节 加速溶剂萃取	195
一、基本原理	195
二、加速溶剂萃取的应用	197
第十二节 膜分离技术	198
一、膜定义及膜的分类	198
二、膜分离过程的类型及特点	199
三、液膜萃取技术	202
四、环境样品分析过程中的膜分离	204
第十三节 热解吸技术	206
一、概述	206
二、热解吸原理	207
三、热解吸装置	207
四、热解吸需注意的问题	210
五、热解吸技术的应用	211
习题与思考题	212
参考文献	212
第六章 化学形态分析	214
第一节 概述	214
一、化学形态与形态分析	214

171	二、金属形态与颗粒物形态	216
178	三、形态分析的意义及重要性	218
181	四、形态分析的特点	220
181	第二节 形态分析中的采样和样品预处理	221
181	一、形态分析样品的采集和贮存	221
181	二、形态分析样品的制备	222
181	三、形态分析的分选方法	224
182	第三节 形态分析技术	230
184	一、溶解态金属的形态分析技术	230
181	二、大气颗粒物的形态分析技术	242
188	第四节 元素的化学形态分析	245
191	一、汞的化学形态分析	245
190	二、砷的化学形态分析	248
191	三、铬的化学形态分析	251
192	四、铅的化学形态分析	253
194	五、镉的化学形态分析	255
191	六、硒的化学形态分析	257
191	七、锡的化学形态分析	260
191	八、磷的化学形态分析	263
191	习题与思考题	266
191	参考文献	267
191	第七章 生物传感器	269
191	第一节 概述	269
191	一、生物传感器的工作原理	269
191	二、生物传感器的分类	270
191	三、生物传感器的特点	271
191	四、生物传感器的性能	272
191	第二节 生物敏感元件的固定化技术	273
191	一、概述	273
191	二、固定化技术	274
191	第三节 几种新型生物传感器	280
191	一、压电生物传感器	280
191	二、表面等离子体共振生物传感器	282
191	三、分子印迹-仿生传感器	284
191	四、双层类脂膜生物传感器	289

五、免疫传感器	291
六、DNA 生物传感器(基因传感器)	295
七、光纤生物传感器	297
第四节 生物传感器在环境分析中的应用	301
一、用于水质分析的生物传感器	301
二、用于气体分析的生物传感器	305
三、生物传感器在环境分析中的其他应用	306
第五节 生物芯片	307
一、概述	307
二、生物芯片的分类	307
三、生物芯片技术	309
四、生物芯片在环境分析中的应用	311
习题与思考题	312
参考文献	312
<b>第八章 流动注射分析</b>	<b>314</b>
第一节 概述	314
一、流动注射分析的定义	314
二、流动注射分析的特点	315
第二节 流动注射分析原理	315
一、基本原理	315
二、分散度	316
三、流动注射分析流路	317
第三节 流动注射分析仪	318
一、液体驱动系统	318
二、进样阀	320
三、连接管及反应管	322
四、流通式检测器	322
五、流动注射分析仪	326
第四节 流动注射分析技术	330
一、停流技术	330
二、合并带技术	330
三、梯度技术	331
四、平行流动注射分析	332
五、反相流动注射分析	332
六、间隔(连续)流动分析	332

10	第五节 流动注射分析技术的进展	333
208	一、顺序注射分析技术	334
208	二、流动注射-可更新表面技术(微珠注射)	336
108	三、阀上实验室	338
108	四、微流控芯片技术	342
20	第六节 流动注射在线预处理技术及其在环境分析中的应用	347
208	一、概述	347
208	二、流动注射在线消解系统	348
208	三、流动注射在线蒸馏系统	349
208	四、流动注射在线沉淀系统	350
208	五、流动注射在线柱预富集系统	351
118	六、流动注射在线膜分离系统	352
218	七、流动注射在线萃取系统	354
218	习题与思考题	355
218	参考文献	355
	<b>第九章 突发环境事件的现场快速应急分析技术</b>	<b>359</b>
218	第一节 概述	359
218	一、突发环境事件及应急监测	359
218	二、突发环境事件应急监测的基本原则	360
218	三、应急监测分析技术与方法的选择	361
218	四、应急监测分析程序及方法	364
218	第二节 气体快速应急监测仪	366
218	一、气体检测管	366
218	二、便携式气相色谱仪	371
228	三、红外气体检测仪(IGA)	377
228	第三节 水体污染应急监测仪	382
228	一、检测试纸法	382
228	二、水质速测管	383
228	三、便携式分光光度计	383
228	四、便携式多参数水质分析仪	385
228	第四节 其他现场快速检测技术	385
228	一、移动式气相色谱-质谱联用仪	385
228	二、拉曼光谱分析法	388
228	三、发光细菌毒性分析法	389
228	四、快速筛选检测技术	390

第五节 车载实验室	393
一、概述	393
二、环境应急监测车的基本性能、仪器设备配置及特点	394
习题与思考题	398
参考文献	398
<b>第十章 重大环境问题及相关分析技术</b>	399
第一节 消耗臭氧层物质及其分析	399
一、概述	399
二、氟氯烷烃的测定	400
三、臭氧的测定	401
第二节 温室效应气体及其分析	402
一、概述	402
二、一氧化二氮的测定	403
三、二氧化碳的测定	404
四、甲烷的测定	406
第三节 酸雨及其监测	407
一、概述	407
二、酸雨的分析监测	409
三、酸雨研究的现状和发展趋势	412
第四节 大气颗粒物及其分析	413
一、概述	413
二、颗粒物的采样和质量浓度、粒径分布	416
三、颗粒物的形态分析和成分分析	418
四、制定 PM <sub>2.5</sub> 环境质量标准的意义	421
第五节 环境激素和持久性有机污染物的分析	421
一、概述	421
二、环境样品的净化技术	422
三、环境激素和持久性有机污染物的分析	423
四、酶联免疫吸附分析法和生物芯片技术	426
习题与思考题	428
参考文献	429

# 第一章

## 绪论

### 第一节 环境与环境问题

#### 一、环境

环境是指围绕着人类所构成的空间中可以影响人类生存与发展的各种自然因素与社会因素的总体。人类的大多数活动都直接或间接地与环境发生着联系,这主要表现为人类同环境进行着物质和能量的交换。

#### 二、环境问题

人类从环境中获取物质和能量,主要表现为人们开发利用各种自然资源。当这种开发活动过度,超过环境本身的调节作用和缓冲能力,便导致环境结构和组成的变化及生态功能的下降,对人类及其他生物的正常生存与发展造成影响和破坏,这样的问题统称为环境问题。

环境问题大致分为两类:由自然力引起的原生环境问题,也称为第一环境问题,如火山喷发、地震、洪涝、干旱、滑坡等引起的环境问题。由人类的生产和生活活动引起的次生环境问题,也称为第二环境问题。次生环境问题包括生态破坏、环境污染等。生态破坏是指人类活动直接作用于自然生态系统,造成其生产能力显著减少和结构显著改变,从而引起的环境问题。环境污染则指人类活动的副产品和废弃物进入环境后,对生态系统产生的一系列扰乱和侵害,使环境质量恶化,并对人或生物的健康产生危害的现象。

环境问题是随着人类社会和经济的发展而发展的。近代环境问题始于工业革命。这一阶段的环境问题与工业和城市同步发展。先是由于人口和工业密集,燃煤和燃油量剧增,发达国家城市饱受空气污染之苦,后来又出现日益严重的水污染和垃圾污染,工业废气、汽车尾气更是加剧了污染的程度,酿成了不少震惊世界的公害事件(如“八大公害”事件)。20世纪80年代,又发生了一些突发性公害事故,如印度博帕尔毒气泄漏和前苏联切尔诺贝利核泄漏等。

当代环境问题公认是从英国科学家 1985 年发现南极上空出现“臭氧洞”开始的。这一阶段环境问题的特征是全球范围内出现了不利于人类生存和发展的征兆。目前,这些征兆集中在酸雨、臭氧层破坏和全球变暖三大全球性大气环境问题上。环境问题是整个地球在遭到人类掠夺性开发后发生的系统性病变,严重削弱了自然环境对人类社会生存发展的支撑能力。环境问题已经危及全人类的生存和发展。在现阶段,环境污染问题是环境问题最突出、最集中的表现。

## 第二节 环境污染物

环境污染物是指进入环境后使环境的正常组成和性质发生变化,直接或间接有害于人类生存或造成生态环境破坏的物质。

### 一、环境污染物的来源及类别

环境污染物的种类繁多多样,按污染类型可分为大气污染物、水体污染物、土壤污染物和生物污染物等;按污染物的形态可分为气体污染物、液体污染物和固体污染物等;按污染物的性质可分为化学污染物、物理污染物和生物污染物等;按污染物产生的原因可分为生产污染物、生活污染物和医院污染物。生产污染物主要考虑工业污染、交通污染、农村面源污染等。生活污染物主要来源于洗涤、粪便污水等。大多数污染物是以散逸至大气、排泄至水体或在土壤表面堆积和填埋的方式进入环境的。

### 二、环境污染物的性质和种类

#### (一) 环境污染物的性质

##### 1. 自然性

生活在自然环境中的人类,与自然界有着十分密切的内在联系。研究表明,人体血液中含有六十多种元素,其含量与地壳中的丰度极为相似(图 1-1)。因此,人类不能孤立地分析环境污染问题。区别污染物的自然或人工属性,有助于估计其对人体的潜在危害。

##### 2. 毒性

环境污染物大多具有毒性,有的还具有强烈的“三致”作用(致癌、致畸、致突变)。决定毒性强弱的主要因素是污染物的性质、含量、存在形态和污染物共存时的相互作用。

##### 3. 扩散性

扩散性是指污染物进入环境后,随水和空气流动被稀释扩散的速率大小和



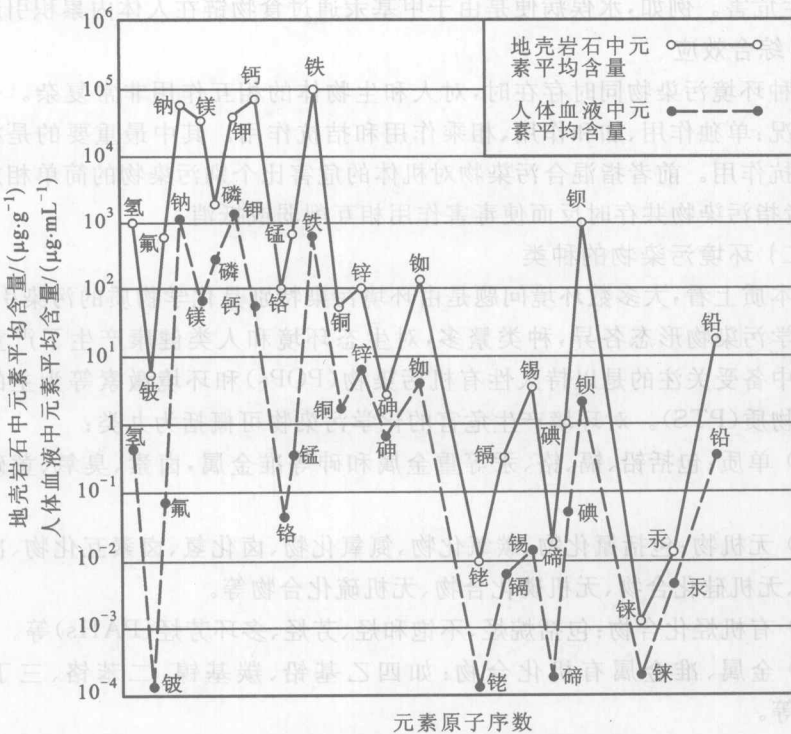


图 1-1 人体血液中与地壳中元素的平均含量

(引自:何燧源. 环境毒物, 北京:化学工业出版社, 2002.)

迁移规律。在不同的空间位置, 污染物的浓度和强度分布随时间变化而变化。因此, 环境污染物浓度范围极宽, 从污染源到环境质量, 本底值含量可在千分之几至千亿分之几, 甚至更低。

#### 4. 活性和持久性

活性和持久性是指污染物在环境中的稳定程度和危害的持续时间。如 H<sub>2</sub>S 易被氧化成 SO<sub>2</sub> 很快从空气中消逝; 水体底泥中的汞约 10~100 年才变成对生命有威胁的甲基汞等。活性高的污染物, 在环境中易转化成毒性更强的污染物。

#### 5. 生物可分解性

有些污染物能被生物所吸收、利用并分解, 生成无害的稳定化合物(如粪便的无害化处理、污水的生物降解等)。大多数有机物都有被生物分解的可能性。但有的很难被分解, 属难降解有机物。

#### 6. 生物累积性

有些污染物可通过食物链在人体或生物体内逐渐累积、富集, 引起病变发