



# 生态毒理学

周启星 孔繁翔 朱琳 主编



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 生态毒理学

周启星 孔繁翔 朱琳 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书比较全面地论述了生态毒理学的基本概念、基础理论与研究方法,比较系统地阐明了生态毒理学的基本原理,并对生态毒理学研究进行了展望。主要内容有:生态毒理学基本知识、基本概念与研究方法;生态毒理学原理,包括污染暴露途径与作用模式、污染的分子毒理与生态效应、污染物的毒激活及其影响因素、重金属污染生态毒理学、有机污染生态毒理学、无机气体污染物的生态毒理学、污染生态风险评价等。

本书论据充分、内容丰富、材料翔实,论述深入浅出,可供生态学、环保科技工作者与管理人员、医学研究人员、工业生产决策者与卫生部门有关人员参考,并可作为大专院校环境科学、生态学、环境工程、食品卫生、医学、地学和农学等专业本科生、研究生的试用教材,以及环保、医护人员的培训教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

生态毒理学/周启星,孔繁翔,朱琳主编. —北京:科学出版社,2004  
ISBN 7-03-014224-1

I. 生… II. ①周…②孔…③朱… III. 环境科学:毒理学  
IV. R994.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 091610 号

责任编辑:李锋 朱丽 彭克里 孙晓洁 / 责任校对:张棋  
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:东方上林

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2004年9月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2004年9月第一次印刷 印张: 29 1/2

印数: 1~2 500 字数: 556 000

定价: 59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

## 《生态毒理学》编委会

主编 周启星 孔繁翔 朱琳

编委 (以姓氏汉语拼音字母为序)

程云 孔繁翔 刘宛 宋玉芳

孙瑞莲 佟玉洁 王新 王美娥

张倩茹 周启星 朱琳

# 前 言

进入 21 世纪,人类对其生活与生存的环境提出了更高的要求。然而在我国,由于工农业生产等人类活动强度持续加大,直接或间接产生的污染物或环境毒物的数量和种类继续增加,污染物的胁迫与毒害作用使许多地区的生态系统处于亚健康或非健康状态甚至导致急性、亚急性和慢性死亡,我国环境污染形势仍然令人担忧!相关生态毒理学著作的出版,具有重要的实践意义与现实紧迫性。

生态毒理学是毒理学、生态学和环境化学等多学科相互交叉和融合的学科,是为了避免和消除环境污染暴露而发展起来的新兴边缘学科,是研究有毒、有害物质以及各种不良生态因子暴露对生命系统产生毒性效应,以及生命系统反馈解毒与适应进化及其机理与调控的一门综合性科学。生态毒理学虽然在我国起步较晚,但在阐述污染物暴露对生态系统毒害过程及机理,并依据生态毒理学原理选择、获得合适的污染暴露防范与治理措施及有效消控的技术方面,已经起到了其他学科不可替代的作用。

本书以中国科学院沈阳应用生态研究所、南京大学和南开大学这几年在生态毒理学领域开展的相关研究工作所取得的研究进展与研究成果为基础,包括国家杰出青年科学基金(20225722)的一部分研究工作的成果,注意吸收国际上近几年生态毒理学研究成果与进展,并参考国外有关生态毒理学专著,结合国内其他单位的生态毒理学研究工作编写而成,是对国内外生态毒理学研究的一次较为全面的总结,有助于推动我国该领域的研究工作进入一个新的发展阶段、上升到一个新的水平。

本书共分 11 章。第一章至第三章介绍了生态毒理学的基本知识、基本概念与研究方法,阐述了该学科的基本框架、与相邻学科的关系以及生态毒理学研究的意义与重要性;第四章至第六章,较为系统地论述了生态毒理学原理,包括污染暴露途径与作用模式、污染的分子毒理与生态效应、污染物的毒激活及其影响因素三个相互联系的部分;第七章至第九章,论述重金属污染生态毒理学、有机污染生态毒理学和无机气体污染物的生态毒理学,涉及大气、水、土壤和沉积物等环境介质的污染毒作用过程及机理;第十章介绍了污染生态风险评价,即结合生态毒理学等多学科研究结果,预测环境毒物对生态系统的有害影响;第十一章,就污染生态毒理学研究中的若干科学前沿及今后研究进行论述与展望。各章作者分别为:第一章,周启星;第二章,周启星、程云;第三章,刘宛;第四章,张

倩茹、孔繁翔；第五章，孔繁翔；第六章，朱琳；第七章，王新、王美娥；第八章，朱琳、孙瑞莲、宋玉芳；第九章，孔繁翔；第十章，朱琳、佟玉洁；第十一章，周启星。

本书的出版，得到了国家科学技术学术著作出版基金的资助，还得到了中国科学院沈阳应用生态研究所、中国科学院陆地生态过程重点实验室著作出版基金的资助，在此一并致谢。

我们殷切希望广大读者和有关专家对本书提出批评指正和进一步改进的建议，为继续深入开展我国该领域的科学研究，促进我国污染防治与污染环境修复工作更上一个新的台阶，为创造一个“绿水青山”的美好环境而共同努力。

作 者

2004年6月改于北京

# 目 录

## 前言

第一章 绪论	1
第一节 毒物与毒理学	1
一、毒物及其分类	1
二、毒理学及其发展	3
第二节 环境毒物与生态毒理效应	5
一、环境污染与环境毒物	5
二、环境污染的生态毒理效应	21
三、环境污染的人体健康效应	24
第三节 生态毒理学的基本框架	27
一、学科定义与内涵	27
二、学科来源及发展	28
三、分支学科及其相互关系	31
四、与相邻学科的关系	34
第四节 生态毒理学研究的意义与展望	36
一、生态毒理学研究的意义	36
二、今后研究展望	37
第二章 基本概念与基础理论	39
第一节 基本概念	39
一、毒物暴露与不良效应	39
二、生物毒性与生态毒性	39
三、半数致死剂量与半效应浓度	41
四、最大允许浓度与临界浓度范围	46
五、无作用浓度与安全极限	48
六、蓄积毒性与 BCF	49
第二节 基本原理	51
一、环境毒物的剂量-效应关系原理	51
二、环境毒物的结构-活性相关原理	53
三、毒理作用的多层次效应原理	56

四、毒理生态动力学原理	61
五、环境毒物的生态适应性原理	63
第三节 联合效应广义理论	68
一、复合污染的基本内涵	68
二、毒物浓度组合关系的直接支配作用	68
三、对生物种类及生态系统类型的影响	71
四、生物作用部位的影响	72
五、复合污染生态效应的矢量特性	74
<b>第三章 生态毒理学研究方法</b>	<b>76</b>
第一节 常规毒性试验	76
一、急性毒性试验	76
二、亚慢性和慢性毒性试验	81
三、蓄积毒性试验	86
四、毒性试验的方式及其标准化	88
第二节 微宇宙毒性试验	92
一、微宇宙法简介	92
二、水生微宇宙毒性试验	92
三、土壤微宇宙毒性试验	96
第三节 分子及细胞生态毒理方法	97
一、PCR-SSCP 技术	97
二、荧光原位杂交技术	101
三、DNA 损伤试验	105
四、基因芯片技术	114
五、一般代谢酶的活性测定	118
六、解毒系统酶类诱导作用的检测	119
七、抗氧化防御系统检测	120
八、RAPD 技术在 DNA 损伤检测中的作用	123
第四节 生物致突变效应检测	124
一、概述	124
二、体外基因突变试验	125
三、细胞遗传学试验	127
四、体内基因突变试验	130
<b>第四章 污染暴露途径与作用模式</b>	<b>133</b>
第一节 环境毒物对生态系统的毒害过程	133



一、毒害过程	133
二、环境毒物在不同生态系统中的毒害过程	134
第二节 生态系统污染暴露及其途径	140
一、污染暴露的类型	140
二、环境毒物暴露途径	141
第三节 毒作用机理	143
一、形态变异	143
二、细胞结构受损	143
三、与细胞组分的化学结合	144
四、影响酶活性	145
五、遗传物质损伤	146
第四节 毒作用的一般模式	151
一、毒物的转运	151
二、毒物对靶分子的作用	155
三、毒性产生与表现过程	158
第五章 污染的分子毒理与生态效应	161
第一节 环境污染物的生物标志物	161
一、概述	161
二、细胞色素 P450	164
三、金属硫蛋白	174
四、应激蛋白质	182
五、第二阶段酶	189
六、以氧化为介质的反应	195
七、血红素和卟啉	206
八、污染对酶的抑制作用	207
九、脱氧核糖核酸(DNA)变化	210
十、生物标志物的讨论	212
第二节 污染物在细胞和器官水平上的影响	217
一、对细胞的影响	217
二、对组织器官的影响	219
第三节 个体及种群水平的毒性效应与评价	220
一、对个体及种群的毒理效应	221
二、污染对种群毒性的评价方法与应用	230
三、种群分析的方法	231

四、污染的种群毒性的评价应用	236
五、毒性数据与种群模型之间的联系	241
六、种群模型与主要环境问题的关系	243
第四节 污染的群落与生态系统效应	243
一、概述	243
二、生态系统水平的效应试验	249
三、基于生态系统水平试验数据的评价	254
四、生态系统模型	259
第五节 景观生态系统在生态毒理学研究中的应用	266
一、景观生态学的概念	266
二、生态毒理学对景观认识的必要性	267
三、景观毒理学发展	268
四、用计算机模拟模型和地理信息系统作为工具	269
五、生态毒理学中的景观指示物	269
<b>第六章 污染物的毒激活及其影响因素</b>	<b>275</b>
第一节 污染物的形态转化与生物有效性	275
一、污染物的生物转化与生物活化	275
二、第一阶段反应	276
三、第二阶段反应	277
四、污染物的生物有效性	278
第二节 污染物的毒激活过程	279
一、毒激活的机理	279
二、致癌物在体内的激活方式	280
三、几种常见化学致癌物的代谢活化	281
第三节 环境因子的作用	284
一、温度	284
二、湿度	285
三、光照	285
四、环境 pH 值	286
五、环境氧化-还原电位	287
第四节 生物因子的作用	287
一、植物	287
二、动物	288
第五节 营养因子的作用	295

一、蛋白质	295
二、脂质	296
三、维生素类 and 无机盐类	296
四、糖类	297
五、禁食	297
第六节 多因子的联合作用	297
一、非生物因子联合作用	298
二、生物因子的联合作用	298
三、多种因子的联合作用	299
第七节 污染物的联合作用	300
一、毒物联合作用的类型	301
二、联合作用类型的判断	303
三、联合作用的机理	304
四、联合作用研究实例	305
<b>第七章 重金属污染生态毒理学</b>	<b>306</b>
第一节 砷	306
一、暴露途径与界面过程	306
二、毒作用机理与生态毒性效应	308
三、生态毒理效应及调控	312
第二节 铅	316
一、暴露途径与界面过程	316
二、毒作用机理与生态毒性效应	318
三、生态化学毒性效应及调控	322
第三节 汞	325
一、暴露途径与界面过程	325
二、毒作用机理与生态毒性诊断	327
三、生态化学毒性效应及调控	331
第四节 镉	334
一、暴露途径与界面过程	334
二、毒作用机理与生态毒性诊断	336
三、生态化学毒理效应及调控	339
第五节 铜	344
一、暴露途径与界面过程	344
二、毒作用机理与生态毒性诊断	346

三、生态化学毒性效应及调控	350
<b>第八章 有机污染的生态毒理学</b>	<b>353</b>
<b>第一节 农药</b>	<b>353</b>
一、环境污染源	353
二、毒性作用机理	355
三、毒性效应	361
四、调控措施	364
<b>第二节 环境激素</b>	<b>366</b>
一、环境污染源与作用机理	366
二、确定环境激素的研究方法	369
三、毒性效应	370
四、调控措施	371
<b>第三节 多环芳烃</b>	<b>372</b>
一、环境污染源	372
二、毒性作用机理	375
三、环境归趋	377
四、毒性效应	378
<b>第四节 多氯联苯</b>	<b>379</b>
一、环境污染源	379
二、环境归趋	380
三、毒性作用机理	383
四、毒性效应	385
五、调控措施	386
<b>第五节 酞酸酯类</b>	<b>387</b>
一、环境污染源	387
二、毒性作用机理	388
三、毒性效应	389
四、调控措施	391
<b>第六节 兽药</b>	<b>392</b>
一、环境污染源	392
二、毒性效应	393
三、调控措施	396
<b>第九章 无机气体污染物的生态毒理学</b>	<b>398</b>
<b>第一节 硫氧化物</b>	<b>398</b>

一、环境污染源	398
二、污染作用机理	399
三、毒理效应	400
第二节 氮氧化物	402
一、氮氧化物的形式与形成过程	402
二、对生物的影响	402
第三节 臭氧	404
一、环境污染源	404
二、对生物的影响	405
第四节 碳氧化合物	407
一、环境污染源	407
二、毒理效应	408
三、污染物的作用机理	408
第五节 氟化物	409
一、环境来源和形成	409
二、对生物的毒理效应	410
第十章 污染生态风险评价	412
第一节 环境污染与生态风险	412
一、环境激素与其他化学品污染问题	412
二、生态风险及其特点	413
第二节 风险评价的生态毒理学基础	414
一、概述	414
二、毒理学数据的作用	414
第三节 生态风险评价及其程序	415
一、生态风险评价的发展史	415
二、生态风险评价的程序	417
第四节 生态风险评价的发展	422
一、生态风险评价展望	422
二、计算生态风险的新方法	425
三、化学品的生态风险评价	430
第五节 五氯酚对水生生态系统的风险评价研究	431
一、五氯酚的暴露评价	431
二、五氯酚的危害评价	432
三、五氯酚对水生生态系统的风险表征	432

---

第六节 生态风险管理	435
一、生态风险管理	435
二、生态风险管理与生态风险评价的关系	435
<b>第十一章 污染生态毒理学研究展望</b>	<b>436</b>
第一节 新概念与研究方法改进	436
一、联合毒性效应：“互作态”的新概念	436
二、毒性试验：方法的可比性与标准化问题	437
第二节 今后研究重点与展望	439
一、新型疾病与环境污染的关系	439
二、致毒过程与分子机理及生物标记	441
三、污染环境的脱毒与缓解机理	442
<b>主要参考文献</b>	<b>445</b>

# CONTENTS

<b>Chapter 1</b>	<b>Introduction</b> .....	1
1.1	Poisons and toxicology .....	1
1.2	Environmental poisons and ecotoxicological effects .....	5
1.3	Basic frame of ecotoxicology .....	27
1.4	Significance and prospect of ecotoxicology .....	36
<b>Chapter 2</b>	<b>Basic Concepts and Theory</b> .....	39
2.1	Basic concepts .....	39
2.2	Basic principles.....	51
2.3	General theory of joint effects .....	68
<b>Chapter 3</b>	<b>Researching Methods of Ecotoxicology</b> .....	76
3.1	Routine toxicity test .....	76
3.2	Microcosmic toxicity test .....	92
3.3	Molecular and cellular ecotoxicological methods .....	97
3.4	Determination of biological mutation .....	124
<b>Chapter 4</b>	<b>Pollution-Exposure Pathways and Mode of Action</b> .....	133
4.1	Poisoning processes of ecosystems by environmental poisons .....	133
4.2	Toxic exposure and its pathways of ecosystems .....	140
4.3	Mechanisms of toxic action .....	143
4.4	General mode of toxic action.....	151
<b>Chapter 5</b>	<b>Molecular Toxicology and Ecological Effects</b> .....	161
5.1	Biomarkers of environmental pollutants .....	161
5.2	Toxic effects at cell and organ levels.....	217
5.3	Toxic effects at individual and population levels .....	220
5.4	Toxic effects at ecosystem levels .....	243
5.5	Landscape ecotoxicology .....	266
<b>Chapter 6</b>	<b>Toxic Activation of Pollutants and Its Influencing Factors</b> .....	275
6.1	Transformation of pollutants and bioavailability .....	275
6.2	Toxic activation of pollutants .....	279
6.3	Action of environmental factors .....	284

6.4	Action of biological factors .....	287
6.5	Action of nutrition .....	295
6.6	Joint action of multiple factors .....	297
6.7	Joint effects of pollutants .....	300
<b>Chapter 7</b>	<b>Contaminative Ecotoxicology of Heavy Metals .....</b>	<b>306</b>
7.1	Arsenic .....	306
7.2	Lead .....	316
7.3	Mercury .....	325
7.4	Cadmium .....	334
7.5	Copper .....	344
<b>Chapter 8</b>	<b>Ecotoxicology of Organic Pollutants .....</b>	<b>353</b>
8.1	Pesticides .....	353
8.2	Environmental hormones .....	366
8.3	Polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) .....	372
8.4	Polychlorinated biphenyls(PCBs) .....	379
8.5	Phthalate esters .....	387
8.6	Animal drugs .....	392
<b>Chapter 9</b>	<b>Ecotoxicology of Gaseous Pollutants .....</b>	<b>398</b>
9.1	Sulfur oxides .....	398
9.2	Nitrogen oxides .....	402
9.3	Ozone .....	404
9.4	Carbon oxides .....	407
9.5	Fluorides .....	409
<b>Chapter 10</b>	<b>Ecological Risk Assessment .....</b>	<b>412</b>
10.1	Environmental pollution and ecological risk .....	412
10.2	Toxicological basis of risk assessment .....	414
10.3	Ecological risk assessment and its frame .....	415
10.4	Development of ecological risk assessment .....	422
10.5	Risk assessment of pentachlorophenol(PCP)pollution of aquatic ecosystems .....	431
<b>Chapter 11</b>	<b>New Development and Future Research of Contaminative Ecotoxicology .....</b>	<b>436</b>
11.1	New concept and improvement in researching methods .....	436
11.2	Prospect on keystone researching contents .....	439
<b>Main References</b>	.....	<b>445</b>



# 第一章 绪 论

## 第一节 毒物与毒理学

### 一、毒物及其分类

当你求医时，医生会用化学试剂为你诊断，这些化学试剂可能就是毒物的一种，如果长期使用，说不定会影响你的身体健康。或者，医生为了治疗你的疾病为你开了一帖“良药”，你长期食用或过量食用，也可能对你的健康产生危害。你每天食用的蔬菜，或许也含有有毒化学品，这些化学品可能由于能够促进植物授粉或生长而在蔬菜的生产过程中以各种形式被加入，或者为了延长保鲜期限而加入。我们每天食用的肉类或许也含有毒化学品，它们的加入是为了促进动物的生长。如果你检查你厨房的水槽或你家的冰箱，或许会发现，许多蔬菜中可能都含有农药的残留。你呼吸的每口空气，你喝的每口水，都可能潜在含有来自工业、交通、农业、家庭生活或自然起源的污染物或毒物。

也许你不曾想到，我们经常食用的食盐和酒，也是“毒物”，因为如果过量，它们也会产生毒害作用。如表 1.1 所示，二噁英的毒性很大，其半数致死剂量(LD<sub>50</sub>)只有 0.02mg/kg 体重；而硫酸铜的毒性较小，其 LD<sub>50</sub> 高达 1500mg/kg 体重。而同样是金属铅化合物，由于存在形态不一样，毒性也差异很大，如硫酸钠铅 LD<sub>50</sub> 高达 10 000mg/kg 体重，而硝酸铅 LD<sub>50</sub> 为 3000mg/kg 体重。可见，在日常生活中，导致动植物和人等生物体产生伤害的有毒物质暴露的剂量范围变化很大，主要取决于体内存在的毒物种类和形态。

准确地说，所谓毒物，一般是指与生命体或生命组织发生相互作用能引起生物受到严重伤害甚至导致死亡的物质；或者说，毒物是指那些以相对较小的剂量就能导致生物受害或严重的细胞功能损伤以及生态系统产生不良效应的物质。可以说，自然界存在的所有物质都应该具有潜在的毒性，因为随着它们对生物体的过多暴露，都能导致对生物体的伤害。当然，所有化学品能够保持在生物体能够承受的毒性极限以下，例如，对生物体采用适当的预防措施，也可以安全、广泛应用。对于任何一种污染物，如果不能确定一个容许的污染极限，就必须采用零暴露方法。

在英文中，毒物有 3 个对应的词。一个是“toxin”，是指由植物、动物和细