



国外优秀科技著作出版专项基金资助

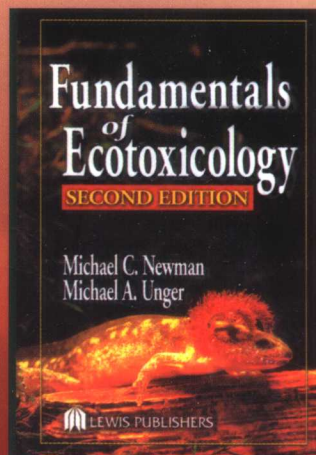
# 国外名校名著

# 生态毒理学原理

## Fundamentals of Ecotoxicology

(原著第二版)

[美] 迈克尔 C. 纽曼 (Michael C. Newman) 著  
迈克尔 A. 昂格尔 (Michael A. Unger) 著  
赵园 王太平 译



化学工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

生态毒理学原理/[美] 纽曼 (Newman, M. C), [美] 昂格尔著 (Unger, M. A) 著; 赵园, 王太平译. —北京: 化学工业出版社, 2006.10

(国外名校名著)

书名原文: Fundamentals of Ecotoxicology, second edition

ISBN 978-7-5025-8751-2

I. 生… II. ①纽…②昂…③赵…④王… III. 环境毒理学  
IV. R994.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 123659 号

Fundamentals of Ecotoxicology, Second Edition/by Michael C. Newman, Michael A. Unger

ISBN 1-56670-598-3

Copyright©2003 by CRC Press LLC. Lewis Publishers is an imprint of CRC press LLC.

All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by Lewis Publishers, part of Taylor & Francis Group, LLC.

本书中文简体字版由 Taylor & Francis Group, LLC. 授权化学工业出版社独家出版发行。  
未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2006-2608

国外名校名著

**生态毒理学原理**

(原著第二版)

[美] 迈克尔 C. 纽曼 著

迈克尔 A. 昂格尔

赵园 王太平 译

责任编辑: 满悦芝

责任校对: 蒋宇

封面设计: 郑小红

\*

化学工业出版社 出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询 (010)64982530

(010)64918013

购书传真 (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市万龙印装有限公司装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 21 字数 536 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-5025-8751-2

定 价: 65.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 国外优秀科技著作出版专项基金

## FUND FOR FOREIGN BOOKS OF EXCELLENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY (FFBEST)

### 管理委员会名单

名誉主任：成思危 全国人大常委会副委员长  
主任委员：谭竹洲 中国石油和化学工业协会名誉会长  
副主任委员：李学勇 王心芳 阎三忠 曹湘洪  
潘德润 朱静华 王印海 龚七一  
俸培宗 魏 然

### 委 员（按姓氏笔画顺序排列）：

王子镐	王心芳	王印海	王光建	王行愚
申长雨	冯 霄	冯孝庭	朱家骅	朱静华
刘振武	杨晋庆	李 彬	李伯耿	李学勇
李静海	吴剑华	辛华基	汪世宏	欧阳平凯
赵学明	洪定一	俸培宗	徐 宇	徐静安
黄少烈	曹 光	曹湘洪	龚七一	盛连喜
阎三忠	葛 雄	焦 奎	曾宝强	谭竹洲
潘德润	戴猷元	魏 然		

秘 书 长：魏 然

副 秘 书 长：徐 宇

## 给中国读者的话

在过去的十年中，对一本综合的生态毒理学教科书的需求变得极为迫切。为此，许多作者都尝试着去满足这种需求。本书的英文版已被英语国家的学生和科研工作者们广泛使用。然而，应对我们共同的地球上由污染物所带来的挑战的需要在所有文化中都存在，而不仅仅局限于英语国家中。正是源于对这一点的坚信，作者和译者们向寻求生态毒理学普遍方法的中国学生和科学家们提供这本《生态毒理学原理》中文版。污染物在各种尺度上对我们生活所造成的影响以及现今快速的全球化，都促成了我们一起去分享和交流对生物圈中污染物及其效应的科学的认识。

**Michael C. Newman**

**Michael A. Unger**

# 序

化学工业出版社的编辑打电话来让我为即将出版的《生态毒理学原理》中译本作序，我认真地考虑后答应了此事。倒不是因为我在这个领域是什么行家，而是因为近几年在国内出版的一些毒理学专著中，如《细胞毒理学》(2001)、《动物毒物学》(2001)、《实用生物毒素学》(2001)、《分子毒理学基础》(2001)、《遗传毒理学》(2002)、《环境毒理学》(2004)和《肾脏毒理学》(2004)等，还没有一本生态毒理学的专著。2005年出版的由顾祖维、吴中亮、仲伟鉴三位教授主编的《现代毒理学概论》列有“生态毒理学”一章，涉及这个领域，但限于篇幅难以进行深入的介绍。现在，将有一本由美国威廉玛丽学院(College of William & Mary) Michael C. Newman 和 Michael A. Unger 两位博士所著的《生态毒理学原理》第二版(2003)中译本在中国问世，让国内同仁便捷地了解生态毒理学的现状，是一件令人高兴的事，我写一篇序一是为它做些宣传，二是可以对此书先睹为快，图其之便！

1962年Carson女士的一本《寂静的春天》(*Silent Spring*)使人们开始认识到现代化工业生产给人类带来高度物质文明的同时，也给人类赖以生存的自然环境带来令人担忧的变化；人类对自然要由掠夺到平衡、由征服到与之协调，才能使人与自然和谐相处。1972年联合国人类环境会议的召开和环境规划署的成立反映了上述观念的深化。中国政府首次参加了1992年的联合国环境与发展会议并在《里约热内卢宣言》上签字，这标志着中国作为一个发展中的大国将在改善全球生态环境方面做出应有的贡献。20世纪末中国版本《21世纪议程》的出版更反映了中国政府为提升中国生态环境质量而投入巨大行政资源的决心。

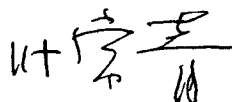
经济发展的需求必然会带动相关学科的发展。20世纪60年代，生态毒理学作为生态学和毒理学融合的一个前沿分支开始形成；90年代以来，生态毒理学作为一门研究生物圈中污染物及其对包括人类在内的生物圈各个组成部分的效应的新兴学科，已经开始异军突起。1988年在丹麦召开了欧洲首届生态毒理学会议，1998年全面论述生态毒理学各领域研究理论和实践的综合性著作《生态毒理学》在德国出版。同年，Michael C. Newman 博士所著的《生态毒理学原理》第一版在美国问世，2003年，该著作的第二版出版发行。现今，其中译本的出版必将有助于填补国内在生态毒理学领域尚缺乏一本系统性教材的空白。该书详尽介绍了生态毒理学的基本概念及最新进展，被誉为“迄今为止最为全面的一本生态毒理学教材”。

按照学科的定义，环境毒理学是研究在自然环境和人工环境中存在的毒性物质(污染物)对人类有机体损伤作用机理、防治措施、危害评价与管理的一门科学。而生态毒理学将受到影响的对象进行了延伸，即：个体→种群→群落→生态系统→景观→生态区→大洲→半球→生物圈，此体系的组成包括动物(包括人类)、植物和微生物所有有生命的机体。因而与环境毒理学相比，生态毒理学的范围更为广泛，内容更为复杂。

学科发展的这种趋势多具有共性。以我熟悉的放射性物质的毒性效应为例，20世纪60年代由国际放射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)提出的关于辐射剂量限值，主要限于工作人员在工作中受到的放射性物质和辐射源的职业暴露；随着大量的放射性物质向环境的常规或事故性释放，对公众受到的非意愿性照射的限制就提到该委员会的工作议程，20世纪80年代该委员会提出了相应的建议；又时隔20多年，

该委员会在 2005 年第一次提出了开发对非人类种系辐射防护网络的新建议，以便在相同的科学基础上对人类和其它有机体进行防护；为此，需要对一些动植物种建立相应的剂量学模型、暴露与辐射剂量的关系以及对效应结果的解释等。

所幸的是，在 20 世纪 90 年代初参与成立中国毒理学会筹备工作的几位老一辈专家对毒理学国际动态有高瞻远瞩的了解，所以在 1993 年我学会成立之际就设有生态毒理学专业委员会；在头三届曹洪发和沈英娃两位主任委员积极推动下国内生态毒理的学术交流也有长足的进展。而今，留美青年生态毒理学家赵园博士和水环境学家王太平博士用介绍国外生态毒理学专著的方式加盟了这支队伍，可以说，中国生态毒理学后继有人。这更是一件值得庆贺的事。



中国毒理学会理事长（2001—2005）

军事医学科学院放射与辐射医学研究所研究员

2006 年 8 月

# 译者的话

在学习知识的过程中，大家通常会深刻地体会到，一本好的参考书对帮助我们熟悉和掌握一门新的学科是多么的重要！截至我们着手翻译本书的时候，在中国，虽然人们已经越来越意识到研究生物圈中的污染物及其对包括人类在内的各成分的效应的重要性，但是还没有一本系统全面的生态毒理学专著；而已有的专业书籍大多偏重于分子毒理学和哺乳动物毒理学，“生态”这一概念并没有真正地融入其中。基于这一想法，我们翻译了这本《生态毒理学原理》（第二版），希望能对国内从事生态毒理学研究和学习的广大读者有所帮助。

本书英文版在美国发行以来，深受读者好评，被誉为是“迄今为止最为全面和系统的一本生态毒理学教材”。该书第一版（1998年）由 Newman 博士撰写，随后推出的第二版（2003年）对初版进行了修订和完善，不仅补充了相关领域的一些最新进展，更由 Unger 博士执笔，对有机污染物的迁移转化及毒性效应做了进一步强化。与同类教材相比，该书作为 Newman 博士多年教学科研经验之总结，内容丰富全面且紧扣生态毒理学这一主题，条理清楚，可读性强，尤其适合作为本科生和研究生教材。

Newman 博士是著名的生态毒理学家，发表过 100 多篇学术论文和 10 本专著，也是译者在美攻读博士学位期间的导师，这为本书的翻译和审校提供了极大的方便。他和我们逐页校对翻译稿和原书，其严谨负责的治学精神令人钦佩。在他的建议下，我们在原书的基础上增加了一些有关中国环境问题的内容。此外，我们力求翻译稿准确流畅，在对原书的英文术语提供尽可能确切的中文翻译的同时，特意保留了英文原文，以黑体字标出并在书后提供了相应的中英文术语对照表，以便于读者查阅。另外，对原书中出现的错误也加以改正并做了注释。

感谢两位原作者、化学工业出版社以及 CRC 出版社的大力支持。另外，深圳大学的郑伟和威廉玛丽学院的肖洁也对翻译提供了帮助。限于时间和经验，不当和错误之处在所难免，非常欢迎广大读者给我们提出宝贵的意见和建议（电子邮箱：yuaner@vims.edu）。

在此把这本书献给我们的家人，并真诚希望能够为我国生态毒理学的发展尽一份力量。

译者  
2006年9月

# 前 言

## 本书的要旨

岂有一件事人能指着说这是新的？哪知，在我们以前的世代，早已有了。

《圣经·传道书》第1章10-11节

与上面《传道书》作者所说的消沉观念相比，我们生活在一个令人激动的、富于新发现和对已有概念全新应用的时代，这一切为人类智力的发展提供了极好的机会。分子遗传学和计算机等领域的发展已经很好地证明了这一点，其它例子已无需再举。在生物地球化学、数学和地质学领域的一些随手可举的新发现正在影响着我们对整个世界的理解。Lovelock 的盖亚假说 (Gaia hypothesis, 地表反射率、温度和化学成分在生物区系调节作用下达到均衡) (Lovelock, 1972, 1988; Margulis 和 Lovelock, 1989) 则使我们对污染物的认识从生态系统水平延伸到了全球性的高度。最近，人类又了解到全球蒸馏作用能把易挥发持久性的杀虫剂从其施用的温暖地区转移到地球上较冷的地区，而这些地区已经很少使用这些杀虫剂，或者已禁用了好几十年。

仅在几十年前，非线性动力学和混沌理论揭示了决定论的局限性。如今我们知道，想准确地预测除了最最简单的系统之外的任何过程都是不可能的。这样的全新概念让我们理解到，第3章介绍的生物富集模型在达到一个简单的平衡浓度之前并不一定准确描述污染物的富集。与现在的普遍观点形成鲜明对比的是，我们可以预测，在特定条件下浓度是上下波动的 (Newman 和 Jagoe, 1996)。

就在几十年前，法国的科学家发现生命活动曾在 18 亿年前改变了奥克劳 (非洲加蓬) 的地球化学并且把足够多可裂变的铀 ( $^{235}\text{U}$ ) 聚集起来达到了临界质量 (Lovelock, 1988; 1991)。元古代的生物通过影响水循环，制造氧化性的大气，并通过生物矿化作用 (biomineralization, 生物调节矿物沉积) (Lovelock, 1988; Milodowski 等, 1990) 加快了铀的富集。这些制造能量已经将近 100 万年 (Choppin 和 Rydberg, 1980) 的奥克劳自然反应堆 (Oklo natural reactors) 显著表明，生物活动所导致的核反应早在人类在地球上出现之前就已经产生！这些自然核反应堆的残余物的分布也为环境科学家们研究现今核裂变废物的长期迁移和归宿提供了线索。

写这本书的初衷来源于作者意识到每天都有新概念的出現以及对已有观念的全新应用。这本书就是我们为了向您展示生态毒理学有用的新概念所做的努力。这不但因为这些概念和事实本身极具吸引力，而且，它们也为我们提供了避免或解决环境问题的工具。

……敏捷而健康的大自然清楚地知道太阳每日都要升起。放弃我们的偏见永远不晚。不管已经存在了多长时间，没有一种思想或者行事方法可以毫无证据就被接受。被每个人都应和或者默许的真理，也许将来就会成为谬论而化为思想上的一缕飞烟……

梭罗 (1854)



## 本书的内容和结构

这本书可用作高年级本科生和研究生课程的教科书或者一般参考书。它涉及范围包括从分子水平到全球性生态毒理学问题。本书对于如生物化学和生物个体等低层次生态结构方面的稍加偏重反映了目前人们生态毒理学知识和研究方向的不平衡性。同时，它也延伸到对生态系统以外如景观、区域和生态圈的研究，目的是突出如下观点：当前的许多问题都超越了传统意义上的生态系统的范畴。

人类健康和生态健康问题在有些时候是相互联系的。采取这个非传统而且很可能使人不安的方法的原因很简单：如果不把二者联系起来，就会与目前的对评价污染物造成危害的方法大相径庭。而且，对于包括人类在内的所有动物来说，许多作用机理、内在动力学和作用效果是相同的。最后，虽然我们更倾向于在环境问题上超越论的幻想<sup>①</sup>，但是对于污染物对生态健康的影响和其对人类健康的影响一样，我们决策的出发点都是以人类为中心。所以，为什么不能把二者相提并论呢？

本书分为 15 章，由专家撰写的短文穿插全书，以充实重点概念或者举出一些很好的例子。第 1 章给出生态毒理学的基本观点；第 2 章详细描述了当今主要污染物以及它们在生物圈中的循环和归宿；从第 3~12 章，按生态结构从低到高的顺序逐一详细讨论生物富集和污染物效应，以上这 10 章的基本框架皆从科学角度出发而非法规制度；在讨论环境风险评价的第 13 章和第 14 章中也涉及部分管理方面的内容；附录 3 和附录 4 总结了美国和欧洲环境方面的主要法律法规；最后一章对本书做出总结。

书中的所有章节对北美的事例稍有偏重。这是作者自身背景和经历所致，而非对其它地区不感兴趣。我们已经认识到对于亚洲、欧洲等其它地区的学生来说这是个不足之处，但是我们尽可能地提到非北美地区的环境问题，比如说，在附录 4 就总结了欧洲的环境法规。

为帮助读者阅读，在书中强调了重要的专业术语，而且在书后术语表中总结出来。为了保持文章的连贯性，作者将一些重要的资料列于脚注中，所以请读者们不要无意中忽略这些内容。某些不被生态毒理学家们广泛接受的观点，如脚注里提到的“Lorax 不合理”则在书中被明确地标记上“不合理”。即使忽略部分内容，读者也不会成为一个知识狭隘的生态毒理学家。在每章的最后都列出作者建议读者阅读的资料，供大家思考的问题则放在了本书的最后。

---

① 人们对于生态效应做出的决策常被视为是由于人类对地球的无私保护。实际上，人们的动机是基于完整的生态系统的价值：它们给人类助益却向来不需回报。这些助益包括为人类提供干净的水和大气、提供食物和娱乐用品、提供医学和遗传学所需的生物材料、提供娱乐和生活设施等。人们所做的决策正是依据以上提到的这些相对于工业产品的不同程度的潜在价值。在环境保护方面无私动机的错误观念被人们广泛地称为“Lorax 不合理 (Lorax incongruity)”。[Lorax 是 Dr. Seuss 写的一部儿童畅销小说 (*Geisel and Geisel*, 1971) 里的人物。他为了无私地阻止人们砍伐树木而“代表树讲话，因为树没有舌头。”] 在当前社会，这种具有好的出发点但是迂腐的错误观点非常流行。

## 作者简介

### Michael C. Newman

Newman 博士是美国威廉玛丽学院 (College of William and Mary) 弗吉尼亚海洋科学研究所 (Virginia Institute of Marine Science) 教授, 并于 1999~2002 年间担任该所研究生院院长。在此之前, 他是 University of Georgia 萨瓦纳河生态实验室 (Savannah River Ecology Laboratory) 的高级研究员以及“生态毒理、修复及风险评价研究组”组长。他分别从 University of Connecticut 取得生命科学学士和动物学硕士学位, 从 Rutgers University 取得环境科学的硕士和博士学位。在 University of Georgia 和 University of California-San Diego 的博士后研究之后, 他于 1983 年加入了 University of Georgia 的研究人员队伍。Newman 博士感兴趣的领域包括毒物和生物富集模型、预测金属生物活性的 QSAR 类模型、毒物对种群的效应、改变毒性和生物富集的因素、生态风险评价的定量方法、统计毒理学以及无机水化学。他曾发表过 100 多篇关于这些主题的科学论文, 著有《水生生态毒理学的数量方法》(*Quantitative Methods in Aquatic Ecotoxicology*, 1995)、《生态毒理学原理》(*Fundamentals of Ecotoxicology*, 第一版, 1998)、《种群生态毒理学》(*Population Ecotoxicology*, 2001) 以及《群落生态毒理学》(*Community Ecotoxicology*, Clements 和 Newman, 2002) 等学术专著, 也是《金属生态毒理学: 概念与应用》(*Metal Ecotoxicology: Concepts and Applications*, 1991, 与 A. W. McIntosh 合编)、《生态毒理学: 一种分级的处理方法》(*Ecotoxicology: A Hierarchical Treatment*, 1996, 与 C. H. Jagoe 合编)、《风险评价: 逻辑与度量》(*Risk Assessment: Logic and Measurement*, 1998, 与 C. L. Strojjan 合编)、《海岸与河口风险评价》(*Coastal and Estuarine Risk Assessment*, 2002, 与 M. Roberts 以及 R. Hale 合编) 以及《风险评价的时间-事件模型》(*Risk Assessment with Time to Event Models*, 2002, 与 M. Crane, P. Chapman 以及 J. Fenlon 合编) 等书的主编。他还领导了用于处理低于检测限数据的软件 UNCENSOR 和 vUNCENSOR 的开发工作。2003 年, 由于其在环境科学领域的杰出贡献, 美国环境毒理和化学学会 (SETAC) 授予他奠基者奖 (Founder's Award)。

Newman 博士在专业学会和教学方面都很活跃。他创建了 SETAC 的卡罗来纳分会, 并担任第一任会长。1988~1996 年, 他是 SETAC 颁奖委员会的成员, 并于 1992~1994 年间担任会长。他是期刊《环境毒理和化学》(*Environmental Toxicology and Chemistry*) 的编委, 曾经担任期刊《环境污染与毒理学档案》(*Archives of Environmental Contamination and Toxicology*)、《生态毒理学》(*Ecotoxicology*) 以及《风险分析》(*Risk Analysis*) 的编委, 并且编辑了图书系列《痕量物质研究进展》(*Advances in Trace Substances Research*) 以及《当今生态毒理学和环境化学课题》(*Current Topics in Ecotoxicology and Environmental Chemistry*)。在过去的 6 年中, 他一直是 EPA 科学顾问委员会的生态进程与效应委员会成员。他曾在 University of Connecticut、University of California-San Diego、University of South Carolina、College of William and Mary、University of Georgia、Royal Holloway University of London (英国)、University of Antwerp (比利时)、University of Joensuu (芬兰)、Jagiellonian University (波兰) 以及 University of Technology-Sydney (澳大利亚)

进行讲学。

### **Michael A. Unger**

Unger 博士是美国威廉玛丽学院弗吉尼亚海洋科学研究所的研究副教授。他从 Michigan State University 取得了动物学学士学位，并从威廉玛丽学院获得环境化学硕士和海洋科学博士学位。在 Johns Hopkins University (马里兰州 Shady Side 的 APL 水生科学研究所) 完成两年的环境化学研究工作之后，他于 1990 年来到弗吉尼亚海洋科学研究所，担任化学和毒理学部分析化学方面的学术带头人。现在他是该所环境和水生动物健康系的一员，在研究、教学以及有关 Chesapeake Bay 环境污染问题的咨询服务领域都很活跃。

他的研究着重于污染物行为及其如何影响污染物的迁移和毒性。研究兴趣包括分析方法的发展、污染物的分配行为、用于评价法规的长期归趋研究以及污染物的降解。他开设了《环境化学》这门研究生课程，并为教师和公众的教育扩大项目做出很大贡献。作为弗吉尼亚州环境厅科学咨询委员会的成员之一，Unger 博士定期地对州内的环境问题提出建议。

# 目 录

<b>第 1 部分 综述</b> .....	1
<b>第 1 章 绪论</b> .....	2
1.1 生态毒理学的历史需要.....	2
1.2 生态毒理学专业知识的当前需要.....	4
1.3 生态毒理学.....	8
1.4 生态毒理学：一门综合性学科.....	9
1.4.1 简介.....	9
1.4.2 科学、技术与实践.....	11
1.5 小结.....	15
推荐读物.....	16
<b>第 2 章 环境污染物</b> .....	17
2.1 简介.....	17
2.2 污染物的环境归趋.....	19
2.2.1 污染物的分配.....	20
2.2.2 降解.....	21
2.3 主要的几类污染物.....	22
2.3.1 金属和类金属.....	22
2.3.2 无机气体.....	24
2.3.3 营养物.....	24
2.3.4 有机化合物.....	24
2.3.5 有机金属化合物.....	32
2.3.6 近来引起关注的污染物.....	33
2.4 小结.....	38
推荐读物.....	38
<b>第 2 部分 生物富集</b> .....	39
<b>第 3 章 吸收、生物转化、解毒、消除和富集</b> .....	40
3.1 简介.....	40
3.2 吸收.....	41
3.2.1 简介.....	41
3.2.2 反应级数.....	43
3.3 生物转化和解毒.....	44
3.3.1 概述.....	44
3.3.2 金属和类金属.....	44
3.3.3 有机化合物.....	46
3.4 消除.....	47
3.4.1 消除机制.....	47
3.4.2 消除的模拟.....	48
3.5 富集.....	52
3.6 小结.....	53
推荐读物.....	54
<b>第 4 章 影响生物富集的因素</b> .....	55
4.1 简介.....	55
4.1.1 简述.....	55
4.1.2 生物可利用率.....	55
4.2 影响生物可利用率的化学性质.....	57
4.2.1 无机污染物.....	57
4.2.2 有机污染物.....	60
4.3 影响生物富集的生物性质.....	63
4.3.1 受温度影响的过程.....	63
4.3.2 形体变异.....	64
4.3.3 其它因素.....	65
4.4 小结.....	67
推荐读物.....	67
<b>第 5 章 从食物的生物富集和营养传递</b> .....	68
5.1 概述.....	68
5.2 从食物的生物富集的定量.....	69
5.2.1 食物的同化作用.....	69
5.2.2 营养传递.....	70
5.3 无机污染物.....	73
5.3.1 金属和类金属.....	73
5.3.2 放射性核素.....	75
5.4 有机化合物.....	76
5.5 小结.....	77
推荐读物.....	77
<b>第 3 部分 毒物的效应</b> .....	79
<b>第 6 章 分子效应和生物标记物</b> .....	80
6.1 概述.....	80

6.2 有机化合物的解毒 .....	81	9.3 存活时间 .....	145
6.2.1 阶段 I .....	81	9.3.1 时间-反应模型基础 .....	145
6.2.2 阶段 II .....	83	9.3.2 存活时间数据的拟合 .....	146
6.3 金属硫蛋白 .....	84	9.3.3 起始 .....	148
6.4 应激蛋白 .....	88	9.3.4 混合毒物模型 .....	148
6.5 氧化应激和抗氧化反应 .....	89	9.4 影响致死性的因素 .....	151
6.6 DNA 的修饰 .....	91	9.4.1 生物因素 .....	151
6.7 酶功能异常和底物库的转移 .....	92	9.4.2 非生物因素 .....	152
6.8 小结 .....	93	9.5 小结 .....	153
推荐读物 .....	94	推荐读物 .....	153
<b>第 7 章 细胞、组织和器官</b> .....	95	<b>第 10 章 种群效应</b> .....	155
7.1 概述 .....	95	10.1 概述 .....	155
7.2 普通细胞毒性和病理组织学 .....	96	10.2 流行病学 .....	155
7.2.1 坏死 .....	96	10.3 种群动力学和种群统计学 .....	158
7.2.2 炎症 .....	97	10.3.1 概述 .....	158
7.2.3 其它一般效应 .....	98	10.3.2 一般种群反应 .....	159
7.3 基因和染色体损伤 .....	98	10.3.3 复合种群动力学 .....	160
7.4 癌症 .....	102	10.3.4 种群统计学上的变化 .....	164
7.5 以鳃为例 .....	107	10.3.5 种群中个体的能量分配 .....	171
7.6 小结 .....	108	10.4 种群遗传学 .....	172
推荐读物 .....	108	10.4.1 遗传性质的变化 .....	174
<b>第 8 章 对个体的亚致死效应</b> .....	109	10.4.2 耐受性的获得 .....	175
8.1 概述 .....	109	10.4.3 基因改变的测量和解释 .....	176
8.2 Selye 应激 .....	109	10.5 小结 .....	178
8.3 生长 .....	110	推荐读物 .....	178
8.4 发育 .....	111	<b>第 11 章 对群落和生态系统的效应</b> .....	180
8.4.1 发育毒性和畸胎学 .....	111	11.1 概述 .....	180
8.4.2 性别特征 .....	113	11.1.1 定义与限定 .....	180
8.4.3 发育的稳定性 .....	118	11.1.2 背景 .....	180
8.5 生殖 .....	119	11.1.3 对效应的一般评价 .....	181
8.6 生理 .....	119	11.2 两个或多个物种之间的相互作用 .....	182
8.7 行为 .....	121	11.2.1 捕食和食草 .....	182
8.8 亚致死效应的测定 .....	124	11.2.2 竞争 .....	183
8.9 小结 .....	127	11.3 群落性质 .....	184
推荐读物 .....	127	11.3.1 概述 .....	184
<b>第 9 章 个体的急性和慢性致死效应</b> .....	129	11.3.2 结构 .....	185
9.1 概述 .....	129	11.3.3 功能 .....	192
9.1.1 总述 .....	129	11.4 生态系统性质 .....	194
9.1.2 急性、慢性和特定生命阶段的 致死效应 .....	129	11.5 小结 .....	195
9.1.3 试验类型 .....	130	推荐读物 .....	195
9.2 剂量-反应 .....	131	<b>第 12 章 景观到全球效应</b> .....	196
9.2.1 剂量-反应模型基础 .....	131	12.1 概述 .....	196
9.2.2 剂量-反应模型的数据拟合 .....	132	12.2 景观和地域 .....	199
9.2.3 起始 .....	135	12.3 大陆和半球 .....	200
9.2.4 混合毒物模型 .....	136	12.4 生物圈 .....	204
		12.4.1 概述 .....	204

12.4.2 持久性有机污染物的 全球运动 .....	204	12.5 小结 .....	206
12.4.3 全球变暖 .....	205	推荐读物 .....	206
<b>第4部分 来自有害污染物的风险</b> .....	207		
<b>第13章 污染物的风险评价</b> .....	208	14.2 放射能的基本原理 .....	222
13.1 概述 .....	208	14.2.1 辐射的类型 .....	223
13.1.1 风险评价的逻辑性 .....	208	14.2.2 浓度、衰变常数和半衰期 .....	223
13.1.2 风险的表达 .....	210	14.2.3 放射性核素的检测 .....	224
13.1.3 风险评价 .....	211	14.2.4 效应 .....	224
13.2 人类风险评价 .....	212	14.3 剂量 .....	225
13.2.1 概述 .....	212	14.4 环境迁移 .....	226
13.2.2 危害鉴定(数据收集和评估) .....	213	14.4.1 运用速率常数的模型 .....	228
13.2.3 暴露评价 .....	213	14.4.2 初选水平模型 .....	228
13.2.4 剂量-反应评价 .....	214	14.4.3 运用平衡条件和剂量转换因 子的模型 .....	229
13.2.5 风险表征 .....	216	14.5 风险因子的推导 .....	231
13.2.6 总结 .....	216	14.5.1 流行病学研究 .....	231
13.3 生态风险评价 .....	217	14.5.2 剂量-反应关系 .....	232
13.3.1 概述 .....	217	14.5.3 现今被接受的风险因子 .....	234
13.3.2 问题形成 .....	218	14.6 暴露于辐射的人类的风险 .....	234
13.3.3 分析 .....	219	14.7 放射性污染的生态效应 .....	235
13.3.4 风险表征 .....	220	14.8 风险分析中的置信度 .....	236
13.3.5 总结 .....	220	14.9 小结 .....	238
13.4 小结 .....	220	14.10 致谢 .....	238
推荐读物 .....	221	推荐读物 .....	238
<b>第14章 暴露于辐射的风险</b> .....	222		
14.1 概述 .....	222		
<b>第5部分 总结</b> .....	239		
<b>第15章 结论</b> .....	240	15.2 生态毒理学实践方面的重要性 .....	240
15.1 综述 .....	240	15.3 生态毒理学科学上的重要性 .....	241
<b>课后学习问题</b> .....	242		
<b>附录</b> .....	248		
附录1 国际单位制(SI)前缀 .....	248	附录5 中国现代环境法律法规总结 .....	253
附录2 各种单位的换算系数 .....	248	附录6 简单生物富集模型的推导 .....	256
附录3 美国法律法规总结 .....	249	附录7 估算污染物暴露的公式 .....	257
附录4 欧盟法律法规总结 .....	251		
<b>术语表</b> .....	259		
<b>参考文献</b> .....	285		

# 第 1 部分

## 综 述

# 第 1 章 绪 论

就在病人在法庭上胜诉的当天，有人写了这样的标题：“智子微笑的那一天”。但是出生于 1956 年的植村智子已不可能知道这一切了。她在地外表健康的母亲的子宫里的时候就受到了汞的侵袭。没有人知道她是否能够意识到自己周围所发生的一切。

Smith 和 Smith (1975)

## 1.1 生态毒理学的历史需要

随着财政紧缩压力的不断上升，重新思考我们这套复杂且耗费巨大的环境法规体系的明智性是自然而然而又负责任的做法。这时人们会感到难以理解：为什么不能把这些钱的大部分重新用到解决国家财政赤字、重要社会问题、医学研究、技术革新、教育、太空探索或者其它值得努力的方面去 (Lomborg, 2001)? 但是就在几十年前，理解这些花费的需要却并不难——智子的母亲懂得，她无意中吃了富含汞的鱼，使智子出生时就患有严重的永久性神经系统损害。

第二次世界大战结束之后，**稀释模式 (dilution paradigm)**，解决污染的方法是稀释) 缓慢地被**飞返模式 (boomerang paradigm)**，你丢弃的东西会返回来伤害你) 所取代。在日本发生过两起可怕的由受污染食物导致的重金属中毒事件。20 世纪 50 年代，有机汞通过海洋食物网的传递造成几百人中毒。在三井公司停止向水俣湾排放汞之前，包括智子在内的将近 1000 人成为**水俣病 (Minamata disease)** 的牺牲者。从 1940~1960 年，日本福山县的居民由于食用含镉大米而中毒。这种随后被命名为**痛痛病 (Itai-Itai disease)** 的疾病的暴发与被金属采矿废物污染了的灌溉水有关。其病名“痛痛”则反映了该病带来的极度关节疼痛，字面上的意思就是“哎哟哎哟”。

1945 年，新墨西哥州的 Alamogordo 开展了露天核武器试验，晚些时候原子弹在广岛和长崎相继爆炸。9 年之后，“Bravo 计划”的炸弹在比基尼珊瑚岛爆炸，辐射微尘遍及周围几千平方千米的海洋，包括一些岛屿和一艘名字颇具讽刺意味的“幸运之龙”的渔船 (Woodwell, 1976)。在爆炸后的四天之内，Ailingae 岛、Rongelap 岛和 Rongerik 岛遭受了 300~3000rem<sup>①</sup> 的辐射水平 (Choppin 和 Rydberg, 1980)。这些以及随后的核爆炸 (见第 14 章) 的裂变产物快速地作半球状扩散并始料未及地在食物中富集，造成对其可能对人类长期效应的大量关注。从 1960~1965 年，全球范围内铯 137 的人体内**积存量 (body burden)** 急剧增长；在美国、前苏联和法国等国停止了露天核武器试验后，积存量才慢慢降低 (Shukla 等, 1973)。

① rem——即伦琴人体当量 (roentgen equivalent man) ——是对辐射的一种度量，考虑到不同类型辐射潜在的生物效应的不同，它把接受到的辐射剂量与可能的损害联系起来。同样，它是确定允许的辐射暴露的一个很方便的单位。例如，常人每年大约接受 0.360rem (360mrem) 的辐射，而普通的辐射工作者的暴露必须不能超过每月 600mrem。rem 作为官方单位已经被希夫特 (Sv) 所代替。(1rem=0.01Sv。) 与之对比的是，在这本书后面要用到的居里 (Curie, Ci) 只是一个简单的对放射性的度量。1 居里等于  $2.2 \times 10^6$  dpm (蜕变每分钟)。Ci 虽然在这本书里仍然被广泛采用，它已被贝克尔 (becquerel, Bq) 代替作为放射性的官方单位。1 居里等于  $3.7 \times 10^{10}$  Bq。



在这些公开的放射性核素释放之前, 未被报道的释放就已经发生了, 但由于国家安全的原因而并不为一般公众所知晓。英格兰西北部海岸的一场大火使 Windscale 钚加工厂向周围地区释放了 20000 Ci 的放射性碘 ( $^{131}\text{I}$ ) (Dickson, 1988)。放射性碘在甲状腺中的富集会引发癌症, 因此备受关注。 $^{131}\text{I}$  被释放到大气中后, 通过污染当地植被而被奶牛食入, 人食用奶制品后又在甲状腺里富集。前苏联乌拉尔地区的一个隐秘的军工厂 (Chelyabinsk 40) 在加工钚时, 秘密地向附近的一个湖泊和 Techa 河下游分别释放了  $1.2 \times 10^8 \text{ Ci}$  和足够引起下游居民放射性中毒的钚 (Medvedev, 1995)。1957 年 9 月, Chelyabinsk 40 的一个储藏罐爆炸, 泄漏了  $1.8 \times 10^7 \text{ Ci}$  放射性物质, 迫使  $1000 \text{ km}^2$  范围内的大约 11000 人被疏散 (Trabalka 等, 1980; Medvedev, 1995)。1944~1966 年, 美国原子能委员会位于华盛顿州的汉福德研究中心 (Hanford Site) 向公众隐瞒了其泄漏情况。从 1944~1947 年, 这个中心向大气中释放了 440000 Ci 的放射性碘 ( $^{131}\text{I}$ ) (Stenehjem, 1990)。1963 年 5 月 12 日, 其 k-东反应堆则向哥伦比亚河排放了 20000 Ci 的  $^{131}\text{I}$  (Stenehjem, 1990)。人们对污染物对于非人类物种的影响的关注也在增长。杀虫剂如 DDT<sup>①</sup> (二氯二苯三氯乙烷) 富集在野生生物体内, 达到了令人担忧的浓度后导致了直接的毒性和亚致死效应。从 1957~1960 年, Hunt 和 Bischoff (1960) 以及 Dolphin (1959) 记载了一种鸕鹚 (*Aechmophorus occidentalis*) 通过淡水食物链 (加利福尼亚 Clear 湖) 对杀虫剂 DDD (二氯二苯二氯乙烷) 生物富集而死亡。这些杀虫剂在大脑中富集到足够的量后, 导致生物轴突机能障碍及死亡。而在此过程中, 有足够多的杀虫剂可被转移到鸕鹚体内。对于这项发生在 1949 年为控制 Clear 湖地区一种并不咬人的蠓虫而施用 DDD 的举措, Dolphin (1959) 是这样描述的: “大约 40000 加仑 ( $1.5 \times 10^5 \text{ dm}^3$ ) 含 30% DDD 的杀虫剂从驳船上的圆桶中被倒入水中”。

雷切尔·卡逊 (Rachel Carson) 的名作《寂静的春天》(*Silent Spring*) (1962) 唤起了公众对杀虫剂在野生生物体内富集所产生的上述以及那些尚不明显的后果的关注。尽管 DDT 和 DDE (二氯二苯二氯乙烯) 对人类相对无毒, 但是它们抑制鸟类卵壳腺钙依赖型 ATP 酶 (ATP 即三磷酸腺苷) 的活性, 致使卵壳变薄, 增大了卵产出后破碎的风险 (Cooke, 1973, 1979)。由于 DDT 及其降解产物 DDE 相对难以降解并且易在脂质中富集, 处于较高营养级的鸟类极易受到伤害。这些性质使得其浓度随着食物网中的每次营养交换而增大。猛禽和食鱼鸟类的生殖失败成了很普遍的现象。例如, 在长岛海湾 (Long Island Sound) 筑巢的每对鱼鹰 (*Pandion haliaetus*) 生产幼鸟的平均数量从每窝 1.71 只 (1938~1942 年) 降到了 20 世纪 60 年代中期的每窝 0.07~0.40 只 (Spitzer 等, 1978)<sup>②</sup> 在阿拉斯加 (Cade 等, 1971) 和美国其它地区的猛禽种群的繁殖成功率也降低了 (Hickey 和 Anderson, 1968)。Ratcliffe (1967, 1970) 则报告了在英国, 隼 (*Falco peregrinus*) 和其它猛禽的繁殖成功率也有同样的下降趋势。在南卡罗来纳州的沿海地区, 鹈鹕 (*Pelicanus occidentalis*) 的繁殖率在 1969~1972 年间降到了维持种群存在的水平以下 (Hall, 1987)。

在如此多的事件之中, 两个具有转折意义、最为公众所关注并且导致了模式转变 (从稀释模式到飞返模式) 的事件是水俣病和 DDT 在猛禽和食鱼鸟类体内的富集 (见图 1.1)。两者共同使人们的一部分注意力从令人眼花缭乱的工业化和绿色革命转移到了那些被忽视的生态系统中污染物所造成的后果上。它们是推动生态毒理科学发展的最初事件中的一部分。

① DDT 曾经是世界范围内控制疾病和农业害虫的极其重要的工具。Paul Müller 因为发现了其作为杀虫剂的价值而获得 1948 年的诺贝尔医学奖。现在它在这方面的重要性经常被我们对它的理解——如果不加选择地使用, 对非靶生物有害效应——而遮蔽。

② 鱼鹰种群已经有所回升。Ambrose (2001) 报道说, 在 1981 年, 鱼鹰在美国的繁殖对少于 8000 对; 但是到 1994 年, 这一数字增加到了 14264 对。