

环境污染物生物降解

● 夏北成 编著



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

环 境 污 染 物 生 物 降 解

夏北成 编著

化 学 工 业 出 版 社

环境科学与工程出版中心

·北 京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

环境污染生物降解/夏北成编著. —北京: 化学工业出版社, 2002.3
ISBN 7-5025-3710-4

I. 环… II. 夏… III. 有机污染物-生物降解
IV. X505

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 004930 号

环境污染生物降解

夏北成 编著

责任编辑: 董琳 管德存

责任校对: 凌亚男

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社出版发行

环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64918013

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

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印刷

北京市彩桥印刷厂装订

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 13½ 字数 356 千字

2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3710-4/X·147

定 价: 30.00 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。

序

就环境科学和人类的环境保护事业而言，20 世纪是一个伟大的世纪。在 20 世纪人类几尽所能地对环境进行破坏，一方面是对资源的破坏，另一方面是排放大量的污染物质对自然环境的污染破坏。同时，人类为了消除自己所造成的环境破坏的恶果也进行了不懈的努力，在环境治理与恢复的研究和实践中，取得了极大的成绩，既解决了环境污染与治理的问题，又推动自然科学的发展。从发展的角度看，20 世纪的上半叶是以破坏和污染为主，而后半叶则是污染破坏与治理恢复并进。特别是在后半叶世界各国政府对环境保护的重视已经达到了极高的程度，大量的关于环境保护的国际公约和条例被制订，且在全球范围内有很好的约束力。中国政府在这方面也付出了极大的努力，从 20 世纪 70 年代开始发展自己的环境保护事业，在过去的 30 年里所作出的成就让世界折服。中国的环境保护事业从无到有，发展迅速，特别是在法律法规上、在环境监测与管理上、在综合利用和污染治理上、在环境规划与评价上所作出的努力确实取得了很好的效果，使中国在发展经济的同时较好地保护了环境。像广州市这样的人口与经济规模的特大城市，在保持长期的快速经济发展的同时还能被评选为国际花园城市，这就是很好的例证。

人类对优美环境的追求是永远的，但是由于各种经济活动对环境的破坏也一刻没有停止。不过人类对自己的破坏行为所引起的恶果有了深刻的反省，从而加强了对环境的保护，包括对环境保护科学的研究和探索。所以在环境保护和环境治理方面的研究以及应用现代科学研究成果为环境保护服务等方面一直在努力，并不断创新和超越。在环境治理方法的研究方面，从物理的方法、化学的方法，到物理化学的方法，到大型环境工程的建设，到生物学方法的

研究与应用，一步一步地寻求更好、更完善、更有效的方法。物理、化学的方法的局限性使得生物治理的方法受到青睐，虽然生物方法同样有其局限性。大量的研究成果表明，生物方法具有十分巨大的潜力，是环境污染治理和自然环境恢复的最理想方法，特别是近些年发展的生物修复研究更显示了一个美好的前景——那些被认为已经被严重污染而不可救药的环境都有可能在生物修复的方法下重新恢复到自然状态。人类在经历了自然环境的严重破坏后会更加珍惜自然环境，特别是那些重新获得生机和环境。这一切都是科学研究的成就和贡献，该书倾注全力以介绍环境污染物质的生物治理的理论方法与实践，期望有更多的读者能了解这些，并能从学术上作出更多的努力。

书中介绍了环境污染物质降解研究的现状和进展，既有作者自己的研究成果，又有大量的国内外的研究成果，资料非常丰富。不仅详细地介绍了微生物降解的一般原理，而且对多种有机污染物，包括烃（油）类、芳香族化合物、卤代有机化合物、有机农药和危险性化合物等环境污染物质的生物降解过程，并对这些污染物质的生物降解研究成果进行总结与归纳，能使读者在了解一般原理的同时，也了解到研究的进展，甚至还有一些研究方法也同时介绍给读者。读者能从书中得到多方面的知识和信息，是一部值得一读的科学著作。对从事环境科学的专业人员以及相关领域的研究人员了解该学科领域是很有帮助的。希望有更多的有志之士将自己的智慧奉献给伟大的环境保护事业。

陈新庚

中山大学教授、博士生导师

2001年12月于广州

前 言

人类以骄傲的步履跨入了一个崭新的 21 世纪，就在这新世纪起步的时候，回首人类的历史，回首 20 世纪，无不为人类的进步与发展而自豪。特别是 20 世纪，在人类历史的漫长岁月中也只不过是一“瞬间”，可是在这一“瞬间”创造了人类历史的辉煌。从人口数量、物质生产、文明发展、科学技术等均表明 20 世纪的确是人类最值得骄傲的一个世纪，在这个世纪中，尽管对人类的发展提出了许多悲观的质疑，罗马俱乐部的世界模型是一个较典型的代表。资源、人口与环境的三大问题的展示及其预测，给人类自我发展提出了极为严肃的警告，这也表现了人类最伟大的另一面。

20 世纪以极为惊人的速度发展，在辉煌的背后也有过无数的悲哀，最具警世效应的是环境的污染与破坏。无数仁人志士为此而疾呼，普遍遭受环境污染与破坏之苦的全世界人民都对此有了极为深刻的认识。虽然存在继续污染与破坏的现象，但在广泛的努力之下，许多问题是有望得到解决的，更何况已经有许多的先例给人们以无穷的鼓舞，如英国泰晤士河的治理等。虽然目前仍然有许多的环境问题困扰着人们，但是人类智慧的不断发展，必将会寻找到一条合适的解决途径。在 20 世纪中，人类在创造辉煌并留下悲哀的同时，也发展了解决困难与问题的思想方法与技术。

人类在遇到严重的环境问题后，就在开始思索环境问题产生的原因和解决的方法。从著名的八大公害事件分析可知，人为排放的污染物质是引起环境污染的最根本的原因。简单的逻辑推理便知，减少污染物质的排放就可以解决问题。然而，事实都并非如此单纯，人类正处在一个强劲的发展过程中，社会发展的动力具有强大的惯性，即使采取强力制动也需要一个很长的时期才能使发展停下来，更何况人类不可能停止发展的过程。这就出现了严重的矛盾。

在矛盾中探索出了解决问题的方法。削减污染物质排放并不一定要求停止发展过程，可以在污染物质产生以后进行削减。削减的方法是将污染物转化为无害的物质或者甚至是可以再利用的物质。例如污水处理方法的形成，污水处理方法可以使已经形成的污染物质减少，但是建设污水处理厂需要时间和资金的投入，对于许多污染源排放而言，并不可以立竿见影，或者只能是望梅止渴。因此，环境污染治理技术不断获得进展和突破，使环境污染治理技术简单易行、经济可用成为人类努力的又一个目标。

减少污染的其他方法也是不可忽视的，如规划的方法，在一定的约束条件下充分利用环境空间和环境资源（环境容量等），将污染物最合理地分布在某空间内获得最小的污染效果或者以最小的投入获得最佳的环境效果。规划可以从宏观上部分地减轻污染，避免发生重大的环境问题，然而，规划的局限性也是显而易见的。因此，污染物的削减仍然是本质的。改进工艺，使用清洁生产技术等各类方法和技术分别获得不断的发展，在这样一种发展模式下不断进步。尽管在不断努力，但问题总是不断出现。一般的污染物质可以通过治理措施或者工程手段得以削减净化，然而，人类自己制造了许多物质，其中大部分进入环境后都会成为污染物质，而且是具有严重环境毒性的物质，如杀虫剂 DDT 等，这些人工合成的物质被人为地大量施用而进入环境中，且在环境中十分稳定，毒性持久，并具有累积毒害的效果。这又使人类遇到新的难题。人类的探索精神是最值得称颂的，因此，对这些人工合成有机污染物的治理发展了大量的可用方法和技术，可以减少其在环境中的毒性作用。利用环境微生物清除污染、进行生物降解是 20 世纪后半叶为解决环境问题所作的最重要的努力之一，也取得了很显著的成效，本书所介绍的大量研究成果就是最直接的证据。

环境微生物不仅仅只是在环境污染物降解方面发挥被动的作用，可以人为利用，加速其在环境中降解污染物和净化环境的速率，使一些难以通过污染治理工程而达到净化的环境也有可能得到恢复。在 20 世纪末期，人类为环境问题又作出了一项重要的贡献

——环境生物修复。可以预见，在此之后，还将有层出不穷的方法和技术用于保护环境。本书介绍有关环境污染物质生物降解的知识和研究进展，希望能为有志于环境保护的所有人士提供一个了解相关知识和技术的窗口，为读者进一步阅读更广泛的科学著作提供一个阶梯。为环境科学的繁荣尽一份微薄的力量。

本书的写作使用了大量的参考资料，其中引用的很多资料是美国 Michigan State University 的微生物生态中心 (Center for Microbial Ecology) 主任 James M. Tiedje 教授实验室的研究成果。感谢 James M. Tiedje 教授和美国 Oak Ridge 国家实验室 Dr. J. Zhou 在这方面给予的帮助。笔者在 Tiedje 教授实验室工作学习期间，Tiedje 教授在有机污染物生物降解和环境修复方面的卓越成就引导我对本书所涉及的领域产生了兴趣，在开展相关研究的同时获得了很多的知识。这些对本书的写作有很大的帮助。特此表示感谢。

中山大学图书馆副研究馆员张丽园对本书的编写给予了大力支持。除亲自撰写一些章节，如第八章“有机农药在环境中的生物降解”外，还为文稿校对、查阅、检索、整理文献资料以及书中全部引用的主要参考文献的整理等付出了大量的劳动。大量的文献资料通过国际互联网获得，感谢信息时代为我提供了最好的工具。

编著者

2001 年 12 月于广州

内 容 提 要

本书对环境中的各种有机污染物质的生物降解过程、途径以及相关的研究方法等都作了较详细的介绍。除了介绍生物降解的原理与相关知识外,还对烃(油)类、芳香族化合物、卤代有机化合物、有机农药、危险性化合物等几类重要的环境污染物质的生物降解的研究成果进行了较全面的介绍,从理论与应用等多个视角阐述生物降解对环境修复和治理的重要性以及发挥环境微生物的降解作用的生态要素。书中列举大量的国内外文献与研究成果,并采用图文并茂的方式展示已有成果,使读者能更加直观地理解环境微生物对污染物质的降解的机理和生态要求。

本书内容丰富,材料翔实,叙述深入浅出,可供环境科学、环境生物学、微生物学、生态学和环境工程学方面的研究人员和研究生、大学生等作为参考资料阅读,也可供环境保护技术部门与管理部门的专业人士参考。

化工出版社·环境科学与工程出版中心（部分图书目录）

书 名	定 价 (元)	书 名	定 价 (元)
三废处理工程技术手册·废水卷	98.00	水处理工程师手册	98.00
三废处理工程技术手册·固体废物卷	90.00	实用水处理设备手册	40.00
三废处理工程技术手册·废气卷	85.00	实用废水处理技术	17.00
水处理剂应用手册	45.00	水处理剂和工业循环冷却水系统分析方法	58.00
工业废水中专项污染物处理手册	50.00	精细化工废水治理技术	28.00
水处理工程典型设计实例	48.00	水处理化学品手册	85.00
水处理新技术及工程设计	32.00	国内外废水处理工程设计实例	30.00
敞开式循环冷却水系统的化学处理	20.00	国内外给水工程设计实例	30.00
水化学	28.00	工业水处理技术问答及常用数据	48.00
农药废水处理(实用水处理技术丛书)	25.00	有机化工废水治理技术	40.00
制浆造纸工业废水处理(同上)	25.00	染料、染色工业废水处理	25.00
膜法水处理技术(同上)	28.00	废水处理工程	33.00
制革工业废水处理(同上)	18.00	工业水处理技术	50.00
城市中小型污水处理厂的建设与管理(同上)	38.00	环境水质监测质量保证手册(第二版)	55.00
重金属废水处理(同上)	22.00	新编危险物品安全手册	185.00
化工废水处理技术(同上)	28.00	危险化学品安全技术全书	230.00
发酵工业废水处理(同上)	36.00	粉煤灰利用技术(资源化技术丛书)	18.00
医院污水污物处理(同上)	26.00	胶原蛋白(资源化技术丛书)	14.00
绿色化学工艺(环境工程实用技术丛书)	19.00	木质素(资源化技术丛书)	20.00
二氧化硫脱除与回收(同上)	26.00	壳聚糖(资源化技术丛书)	18.00
工业废水处理与回收利用(同上)	20.00	工业脱硫技术	30.00
废水处理单元过程(同上)	20.00	工业废气净化与利用	76.00
造纸工业水污染控制与治理技术(同上)	30.00	燃煤二氧化硫污染控制技术手册	60.00
煤加压力化废水处理(同上)	19.00	环境与工业气体净化技术	75.00
食品工业废水处理(同上)	25.00	硫氮污染防治工程技术及其应用	20.00
农药污染与防治(同上)	18.00	生活垃圾卫生填埋现场运行指南	30.00
混凝·絮凝剂·絮凝设备(同上)	15.00	环境污染物分析监测	56.00
清洁生产导论(同上)	24.00	污染控制微生物工程	36.00
人口、资源与环境(环境教育丛书)	18.00	废催化剂回收利用	28.00
环境污染与控制(环境教育丛书)	18.00	环保设备——原理·设计·应用	66.00
绿色生活与未来(环境教育丛书)	19.00	禁用染料和环保型染料	24.00
英汉环境科学与工程词汇	48.00	农药残留量实用检测方法手册(二卷)	58.00
中国环境保护法规全书(1997-2001)	120.0	环境工程技术经济和造价管理	36.00

(欢迎索取我社图书目录,也可登录我社网站 www.cip.com.cn 查询更多书目)

以上图书全国各大书店均有销售,也可直接从我社邮购。

- ◆ 您从邮局或银行汇款均可,包装邮寄费按10%计。
- ◆ 收款单位:北京市朝阳区惠新里3号 化学工业出版社发行部邮购科 邮编:100029
开户银行:工商银行北京和平里分理处 账 号:891269-66
- ◆ 邮购电话/传真:010-64918013, 64982511 E-mail: yougou@cip.com.cn

目 录

1 生物降解的基本原理	1
1.1 环境污染物与环境微生物	1
1.1.1 环境污染物	1
1.1.2 环境微生物	2
1.2 环境微生物类群	3
1.2.1 细菌	4
1.2.2 放线菌	5
1.2.3 真菌	6
1.2.4 原生动物	7
1.2.5 微型后生动物	7
1.2.6 藻类	8
1.2.7 极端环境微生物	9
1.3 环境微生物生态学原理	13
1.3.1 环境微生物的重要生态因子	13
1.3.2 微生物的生长与种群增长	18
1.3.3 微生物群落结构	20
1.3.4 微生物种群间的相互关系	27
1.3.5 环境微生物与物质循环	29
1.3.6 微生物与污染物净化	35
1.3.7 污染物、环境、微生物三者的关系	40
1.4 环境微生物的代谢	41
1.4.1 微生物的营养	41
1.4.2 微生物生理代谢的基础——酶	43
1.4.3 微生物的能量代谢	44
1.4.4 微生物的合成代谢	46
1.5 污染物质的可生物降解性	47
1.6 污染物质的生物迁移转化途径	51

1.6.1	污染物质的扩散迁移	51
1.6.2	吸附与沉积	52
1.6.3	微生物对污染物质的吸收	54
1.6.4	污染物质的降解与累积	54
1.6.5	污染物质的生物富集	56
1.6.6	污染物质的生物转化	57
1.7	生物对污染的适应与进化	58
1.8	污染物生物降解的营养动力学	60
1.8.1	氧的消耗及其反应动力学	60
1.8.2	Monod 方程	62
1.8.3	能量代谢与物质平衡	63
2	好氧处理过程与原理	65
2.1	微生物好氧代谢原理	65
2.2	活性污泥法原理	66
2.2.1	活性污泥法的原理	66
2.2.2	活性污泥絮体的形成	68
2.2.3	活性污泥微生物	68
2.2.4	活性污泥反应动力学	71
2.3	活性污泥法过程及其影响因素	73
2.4	活性污泥法工艺	74
2.4.1	传统活性污泥工艺	74
2.4.2	阶段曝气池	75
2.4.3	渐减曝气池	75
2.4.4	吸附再生法	75
2.4.5	生物吸附氧化法	76
2.4.6	完全混合法	77
2.4.7	序批式活性污泥法	77
2.4.8	氧化沟法	78
2.5	好氧生物膜法	78
2.5.1	生物膜的结构与净化原理	79
2.5.2	生物膜生物类群	81
2.5.3	生物膜生长介质	82
2.6	生物膜营养动力学	85

2.6.1	生物膜基本反应动力学	85
2.6.2	生物滤池生物膜营养动力学	88
2.6.3	生物接触氧化生物膜营养动力学	89
2.7	好氧生物膜反应器	91
2.7.1	生物滤池	91
2.7.2	生物转盘法	93
2.7.3	生物接触氧化法	95
2.7.4	生物流化床法	96
3	厌氧生物处理过程与原理	99
3.1	概述	99
3.2	厌氧微生物	101
3.2.1	产酸细菌	102
3.2.2	产甲烷菌	103
3.2.3	产酸菌与产甲烷菌的关系	104
3.3	厌氧反应生物化学原理	105
3.3.1	水解反应	106
3.3.2	发酵酸化反应	107
3.3.3	产乙酸反应	108
3.3.4	产甲烷反应	109
3.3.5	厌氧脱氮反应	111
3.3.6	硫酸盐还原反应	111
3.4	有机物的厌氧生物可降解性	113
3.4.1	BMP 测试	113
3.4.2	碳水化合物的厌氧生物可降解性	113
3.4.3	蛋白质的厌氧生物可降解性	114
3.4.4	脂肪、脂肪酸的厌氧生物可降解性	115
3.4.5	酚类化合物厌氧生物可降解性	116
3.4.6	厌氧生物难降解化合物	116
3.5	厌氧生物降解营养动力学	117
3.6	影响厌氧生物降解的因素	119
3.6.1	温度	119
3.6.2	pH 值	120
3.6.3	营养物与微量元素	122

3.6.4	生物毒性物质	123
3.6.5	氮与硫	124
3.7	厌氧生物处理工艺	124
3.7.1	厌氧消化池	124
3.7.2	厌氧接触法	125
3.7.3	厌氧生物滤池	127
3.7.4	厌氧流化床	129
3.7.5	升流式厌氧污泥床反应器	131
3.8	厌氧除磷脱氮技术	134
3.8.1	厌氧生物脱氮	134
3.8.2	生物除磷	137
3.8.3	除磷脱氮	139
4	贫营养环境污染生物降解	141
4.1	贫营养环境	141
4.1.1	贫营养环境及污染特征	141
4.1.2	环境水质与水质标准的发展	142
4.1.3	贫营养水生物处理原理	145
4.2	贫营养环境微生物	147
4.2.1	贫营养环境微生物特性	147
4.2.2	贫营养环境微生物群落	149
4.2.3	生物膜及其生物相	152
4.3	贫营养环境中的基质利用	158
4.3.1	基质利用及营养动力学	158
4.3.2	二级基质利用	160
4.3.3	非稳定基质处理过程	161
4.4	贫营养水体的生物处理技术	162
4.4.1	饮用水的传统处理工艺	162
4.4.2	生物活性炭处理工艺	163
4.4.3	生物预处理	165
4.4.4	生物接触氧化法	167
4.4.5	生物处理组合工艺	168
4.5	富营养化水质的净化	170
4.5.1	富营养化水质特征	170

4.5.2	富营养化水体中有机物的去除	172
4.5.3	富营养化水体中氮和磷的去除	173
4.5.4	富营养化水体中藻类的脱除	173
5	石油污染的生物降解	176
5.1	石油污染物在环境中的迁移与转化	176
5.1.1	石油污染物	176
5.1.2	石油污染物在环境中的迁移	177
5.2	石油及碳氢化合物的生物降解	179
5.2.1	烷烃的降解	179
5.2.2	苯及烷基苯类化合物的降解	181
5.2.3	石油污染物的生物转化反应	184
5.3	石油污染物降解微生物	186
5.3.1	石油污染物降解微生物的类群	186
5.3.2	BTEX 降解者	188
5.3.3	石油污染的反硝化降解菌	191
5.4	石油污染降解研究	195
5.4.1	甲基苯和二甲基苯的降解研究	195
5.4.2	石油污染物降解的土壤呼吸测定	200
5.4.3	氮和磷的增加与石油污染物的降解	202
5.4.4	石油污染物的自然降解	206
5.5	石油污染物生物反应器	208
5.5.1	颗粒活性炭生物过滤器	208
5.5.2	地下水污染生物过滤器	210
5.5.3	挥发性气体化合物生物过滤器	214
5.5.4	生物膜反应器	215
5.5.5	生物反应器中生物膜结构	217
5.6	影响石油污染物降解的环境因素	222
6	芳香族化合物的生物降解	226
6.1	芳香族化合物的环境行为	227
6.1.1	芳香族化合物在水环境中的吸附过程	227
6.1.2	芳香化合物在土壤环境中的迁移	228
6.1.3	芳香族化合物在生态系统中的转移	229
6.2	芳香族化合物生物降解	230

6.2.1	芳香族化合物生物降解原理	231
6.2.2	多环芳香化合物的生物降解	233
6.2.3	卤代芳香族化合物的生物降解	238
6.2.4	芳香族化合物生物降解途径	240
6.3	芳香族化合物的环境毒性	240
6.3.1	芳香族化合物的一般性质	240
6.3.2	烷基苯类化合物的环境毒性	241
6.4	芳香族化合物降解微生物	243
6.4.1	芳香族化合物的降解微生物	243
6.4.2	芳香族化合物降解微生物的分布格局	246
6.4.3	白腐菌对芳香族化合物的降解	250
6.5	芳香族化合物生物降解的影响因素	252
6.5.1	易降解有机物对芳香族化合物降解的影响	252
6.5.2	苯环上取代基的影响	253
7	卤代有机化合物的生物降解	257
7.1	环境中卤代有机化合物的来源	257
7.1.1	卤代有机化合物的自然产生	257
7.1.2	卤代有机物的人为释放	259
7.2	卤代有机化合物的环境行为	261
7.2.1	卤代有机化合物的溶解性	261
7.2.2	卤代有机物的挥发性	263
7.2.3	卤代有机物的残留	264
7.3	卤代有机物的环境毒性	266
7.3.1	卤代脂肪烃的环境毒性	266
7.3.2	卤代芳香族化合物的环境毒性	267
7.4	卤代有机化合物的生物去卤作用	269
7.4.1	生物去卤途径	269
7.4.2	生物降解性	271
7.4.3	多氯联苯的去氯化作用	272
7.5	卤代有机化合物的生物降解	280
7.5.1	卤代有机化合物的好氧生物降解	280
7.5.2	卤代有机化合物的厌氧生物降解	283
8	有机农药在环境中的生物降解	291

8.1 有机农药的环境行为	291
8.1.1 农药在环境中的分配	291
8.1.2 农药在土壤环境中的移动性	292
8.1.3 农药在水体环境中的迁移	295
8.1.4 农药在大气环境中的迁移与转化	297
8.1.5 农药的残留与富集	299
8.2 农药污染的生态效应	301
8.2.1 农药污染对食物链的破坏	301
8.2.2 农药对农田生态系统的影响	302
8.2.3 农药污染对土壤生态系统影响	304
8.2.4 农药污染对水生生态系统的影响	306
8.2.5 农药对人体健康的影响	306
8.3 农药的生物降解	308
8.3.1 农药在环境中的生物降解	308
8.3.2 农药降解的数量变化规律	309
8.3.3 微生物的农药代谢途径	313
8.3.4 土壤根际环境的农药降解	316
8.3.5 影响农药生物降解的因素	317
8.4 农药生物降解微生物	318
8.5 有机氯农药的生物降解	320
8.5.1 有机氯农药的脱氯反应	320
8.5.2 DDT的生物降解	321
8.5.3 六六六的生物降解	322
8.5.4 2,4-D的生物降解	323
8.6 有机磷农药的生物降解	324
8.6.1 有机磷农药的生物降解反应	324
8.6.2 对硫磷等农药的微生物降解过程	325
9 危险性有机污染物的生物降解	327
9.1 危险性有机污染概述	327
9.2 化学物质的三致作用及其影响因素	329
9.2.1 化学物质的致癌作用	329
9.2.2 化学物质的致突变作用	330
9.2.3 化学物质的致畸作用	331