



实验动物科技资讯

2025 年第 08 期 总 389 期

投稿邮箱: dongqinghua@nifdc.org.cn

每期刊载: <https://nrla.nifdc.org.cn/nrla/>

<https://www.lascn.net/>

2025 年 9 月 4 日 星期四

《探索科技伦理与动物实验革新·资源与工具推介》

科学进步与伦理责任的平衡,始终是人类文明发展的重要命题。在生命科学和医药科学研究蓬勃发展的历史进程中,实验动物为人类福祉做出了不可替代的贡献。然而,如何以尊重生命的态度对待这些沉默的伙伴,如何在科研创新与动物保护之间构建可持续的伦理框架,是全球科学界和政策制定者共同面临的挑战。

自 2022 年《FDA 现代化法案 2.0》和 2024 年《FDA 现代化法案 3.0》的发布,2025 年美国 NIH 和 FDA 又先后出台了一系列政策,并启动了与之相呼应的“实验动物研究补充计划”(Complement-ARIE)和“替代方法验证网络”(VQN)项目,加速推进 NAMs,通过对传统动物模型和动物实验技术的补充与完善,使生物科学研究更加高效和有效。与此同时,欧盟委员会也于 2025 年 7 月发布了最新“欧洲化工行业行动计划”,并决定自 2026 年起逐步淘汰化学品安全评估中的动物实验。

为了使广大的实验动物科技工作者方便和及时了解有关实验动物福利伦理研究和动物实验替代方法研究的常用工具,借助有关工具获取当下的最新研究进展和研究成果,为科技工作者能够结合自己的研究方向有针对性的进行探索,在解决自己工作中遇到的实际问题的同时,也从不同的侧面和层面推进实验动物福利伦理和动物实验替代方法研究的发展,《实验动物科技资讯》将不定期的推出有关书籍、论文、期刊和网站的介绍,为推动我国实验动物福利和动物实验伦理工作的深度发展、了解和掌握国际上 NAMs 的最新研究动态,以及我国相关政策和标准要求提供有关信息和数据。

专业书籍推介

国家重点研发计划项目资助

体外与预测毒理学

In Vitro and Predictive Toxicology

主编 郭家彬 帅 怡
主审 彭双清 郝卫东

北京大学医学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

体外与预测毒理学 / 郭家彬, 帅怡主编. -- 北京: 北京大学医学出版社, 2021. 10
ISBN 978-7-5659-1637-3

I. ①体… II. ①郭…②帅… III. ①毒理学 IV. ①R99

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 207507 号

体外与预测毒理学

主 编: 郭家彬 帅 怡
出版发行: 北京大学医学出版社
地 址: (100191) 北京市海淀区学院路 38 号 北京大学医学部院内
电 话: 发行部 010-82802230, 邮购部 010-8280495
网 址: <http://www.pumpress.com.cn>
E-mail: booksale@pumpress.com.cn
印 刷: 中国 (北京) 印务有限公司
经 销: 新华书店
责任编辑: 董文强 责任校对: 蔡新强 责任印制: 李 喆
开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 26 字数: 658 千字
版 次: 2021 年 10 月第 1 版 2021 年 10 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-5659-1637-3
定 价: 160.00 元
版权所有, 侵权必究
(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

编委会

主 编 郭家彬 帅 怡
主 审 彭双清 郝卫东
编 委 (按姓名汉语拼音排序)
卞 倩 江苏省疾病预防控制中心
曹 侃 国家食品安全风险评估中心
陈景文 大连理工大学环境学院
段军超 首都医科大学公共卫生学院
高 原 宣统公司 (P&G) 全球产品管理部
郭家彬 解放军疾病预防控制中心
贺争鸣 中国食品药品检定研究院
黄瑞莉 美国国立健康研究院国家转化科学中心
李国君 北京市疾病预防控制中心
李海山 中国检验检疫科学研究院
李鹤群 联合利华安全与环境保障中心
李 津 联合利华安全与环境保障中心
李维维 贵州医科大学药学院
李雪花 大连理工大学环境学院
李宇杰 解放军疾病预防控制中心
梁 江 国家食品安全风险评估中心
刘 超 解放军疾病预防控制中心
刘盛男 中国医科大学公共卫生学院
罗飞亚 中国食品药品检定研究院
鹿 媛 清华大学机械工程系

彭 辉 解放军疾病预防控制中心
皮静波 中国医科大学公共卫生学院
翟小峰 宣统公司
邵 侃 美国印第安纳大学声明验证中心
沈国林 中国检验检疫科学研究院
史 薇 南京大学环境学院
帅 怡 上海市疾病预防控制中心
孙 伟 清华大学机械工程系
陶功华 上海市疾病预防控制中心
王 奎 宣统公司 (P&G) 全球产品管理部
徐海滨 国家食品安全风险评估中心
徐 团 美国国立健康研究院国家转化科学中心
徐晓范 中国医科大学公共卫生学院
杨晋芬 南方医科大学公共卫生学院
杨 颖 广东省疾病预防控制中心
张 雨 解放军疾病预防控制中心
张 强 美国埃默里大学罗格斯公共卫生学院
张 涛 清华大学机械工程系
张敏伟 南京大学环境学院
赵晓红 北京联合大学应用生命科学学院
朱晓峰 宣统公司 (P&G) 全球产品管理部
庄晓梅 军事科学院军事医学研究院毒物药物研究所
Sharon B. Stuard 宣统公司 (P&G) 全球产品管理部
Susan Felzer 宣统公司 (P&G) 全球产品管理部

序 一

随着“3R”原则在全球的广泛实施以及毒性测试需求的急剧增加, 主要依赖于动物实验的传统毒性测试与安全性评价方法面临着严峻的挑战和限制。体外与预测毒理学是毒理学与现代生命科学及化学、数学、材料科学和计算机科学等交叉融合而形成的一个新的毒理学分支学科。进入 21 世纪以来, 体外与预测毒理学发展迅速, 形成了一系列毒性测试新理论、新技术和新策略, 并在化学品、食品、药品、化妆品和农药等相关产品的毒性测试及风险评估等领域中得到越来越广泛的应用, 成为现代毒理学发展的重要研究领域之一。国际上多个国家和地区成立了相关专业机构, 大力推动体外与预测毒理学方法的发展、验证及其应用。已有许多体外与预测毒理学方法被国际经济合作发展组织 (OECD)、人用药品注册技术要求国际协调会 (ICH) 等国际组织和有关国家的监管部门纳入法规指导原则或被推荐为优先使用的测试方法。

近年来, 我国体外与预测毒理学的发展也非常迅速, 技术水平和科技实力得到显著提升, 专业人才队伍不断壮大, 但相比欧盟、美国和日本等国家地区还存在一定差距。在全球化和信息化的时代, 2017 年, 我国正式成为 ICH 的成员国, 这对于我国体外与预测毒理学的发展而言, 既是挑战, 也是机遇。

《体外与预测毒理学》系统介绍了体外与预测毒理学的基础理论、测试策略、技术方法, 以及应用实践和展望, 同时还介绍了相关技术方法的前沿动态与展望等内容, 具有较高的学术价值和较强的实用价值。该书是该套全面学习了体外与预测毒理学的基础知识、技术方法和前沿进展的一本宝贵的工具书, 相信此书的出版对于推动我国体外与预测毒理学的学术领域发展有着十分积极的影响。

李 喆
中国食品药品检定研究院 院长

序 二

“体外毒理学”或“毒理学体外与替代测试方法”的兴起, 不仅具有特定的时代背景, 以及科学与人文交融相向的需求驱动, 更是站在毒理学的基石上, 融汇生命科学最新前沿技术, 赋予了毒理学方法体系全新内涵, 为毒理学持续焕发新活力提供根基。同样, 预测毒理学作为毒理学的跨学科利器, 是毒理学集成计算化学/计算生物学、结构化学、大数据以及分子生物学的交叉学科, 为进入环境中微量化学物的生态毒性和健康风险预测提供了早期、快速的解决方案, 也为新药研发临床前安全性评价提供了早期决策手段, 并带动了毒理学多学科复合型人才涌现和成长。

体外与预测毒理学在中国的发展非常迅速, 中国毒理学会于 2014 年、2016 年先后成立了“毒理学替代法与转化毒理学专业委员会”和“计算毒理学专业委员会”, 有力地推动了中国该领域的科学研究、技术发展和学术交流。体外毒理学测试和预测毒理学方法在环境化学物风险评估, 以及新药、工业化学品、日用化学品和产品等安全性评价中的应用逐渐成熟和广泛。《体外与预测毒理学》专著出版非常及时, 将进一步扩大毒理学学科知识的传播, 使毒理学更好地服务于生态环境建设和健康中国建设的行动实践。

《体外与预测毒理学》一书是我国第一部系统阐述体外与预测毒理学理论和技术方法的专著, 汇集了国内外 70 余位相关专家, 在经历相关科研、技术创新、安全性评价实践等, 取得丰富经验和知识积累的基础上撰写而成。该书的出版对推动我国体外与预测毒理学及相关领域的科研、科学知识与实践应用发挥重要作用, 我很高兴为本书写序, 祝愿编者们辛勤付出结集成果, 同时向广大同行和读者推荐该专著。

周月坤
中国毒理学会 理事长
军事医学研究院 首席科学家

前言

随着现代科学技术的快速发展及其在生产生活中的广泛应用, 化学物质的种类和数量呈现急剧增长的趋势。截至 2021 年 7 月, 美国《化学文摘》[CAS] 登记统计的化学物数量已超过 1.83 亿。全球每天交易的商品中至少包含 1500 万种化学物, 而人们日常生产和生活中经常接触的化学物质就有 8 万余种。这些化学物质对人类健康和环境安全的不良影响和潜在风险值得高度关注。此外, 由于工业污染、环境化学物排放和化学事故等原因, 进一步加剧了化学物的安全隐患。然而, 人们对这些化学物的毒性认识非常有限, 超过 95% 的化学物缺少毒理学和健康危害数据, 各种化学物及食品、化妆品、化妆品和食品等相关产品的毒性测试和风险评估缺口巨大。目前, 化学物及相关产品的毒性测试和风险评估仍然主要依赖于动物实验。然而, 动物实验周期长、通量低、成本高, 同时还存在种属差异和剂量外推等不确定性, 且随着人们对动物福利和动物保护的日益关注和重视, 基于动物实验的毒性测试方法越来越受到挑战和限制。目前, 已有多个国家或地区发布了多项相关法规或技术指导原则, 明确要求采取限制甚至禁止动物实验, 如欧盟《化学品注册、评估、授权和限制管理》(REACH) 法规、《欧洲化妆品指令 76/769》等。2019 年 9 月, 美国环境保护部公开宣称, 计划在未来的化学物毒性测试与风险评估中大幅减少对动物实验的依赖, 预计在 2035 年之前几乎全面禁止哺乳动物实验。

另一方面, 细胞生物学、基因组学、蛋白质组学和生物信息学等生命科学技术的快速发展及其在毒理学领域的广泛应用, 以及传统毒理学与化学、物理学、材料科学、数学和计算机科学等学科的交叉融合, 为建立和发展非动物毒性测试替代方法提供了有力的理论和技术支持。体外和预测毒理学测试是最常用的非动物测试方法, 已成为现代毒理学的重要发展方向, 并逐步形成了毒理学的一个新兴分支学科, 即体外与预测毒理学。近年来, 体外与预测毒理学技术和方法发展十分迅速, 涌现出许多有力的新技术和新模型, 如“组学”测试技术、高通量分析、人多能诱导干细胞模型、三维生物打印模型、定量结构效应关系分析、交叉文库、毒理学关注阈值和毒理学大数据分析等。这些体外与预测毒理学新技术和新模型的发展使人们有可能更加快速、准确、经济地对化学物等外源性物质和相关产品进行毒性测试和风险评估, 并越来越多地在化学品、化妆品和药品等产品安全性评价和风险评估中得到应用, 同时也越来越多地得到法规和管理的接受认可。美国食品药品监督管理局在 2017 年发布的《预测毒理学路线图》和 2021 年发布的《毒理学科学计划》中指出, 将在新产品评审中加强对体外和预测毒理学技术的发展和运用, 整合应用更多的新技术方法以提高非临床测试的预测性, 并着力减少和替代传统动物实验。在国内, 体外与预测毒理学也越来越得到学术界和工业界以及相关管理部门的重视, 并在环境新化学物质、食品和药品等产品的毒性测试和风险评估中得到广泛应用。已有许多体外与预测毒理学技术方法被纳入相关技术指导原则或成为法规推荐的毒性测试方法。可以预见, 体外与预测毒理学势必在未来得到更广泛的发展和运用。

本书共 21 章。第一章概述了体外与预测毒理学的基础理论、发展历史和基本技术方法, 以及新技术方法进展; 第二章至第十三章主要介绍了体外与预测毒理学模型和技术方法; 第十四章至第十六章主要介绍了数据质量分析以及体外与预测毒理学替代方法的验证和法规接受; 第十七章至第二十一章分别介绍了体外与预测毒理学技术方法在食品、化妆品、化学品、纳米材料和内分分泌物安全性评价中的应用。本书可供相关从业人员学习交流使用, 也可作为毒理学、药理学、食品科学、化妆品科学、环境科学等专业研究生和相关专业科技人员。

感谢参与本书编写的所有作者, 以及两位主审专家彭双清教授和郝卫东教授。本书自 2018 年底开始编撰, 历时近 3 年, 其间经多次讨论、反复修改, 正是每一位作者和主审专家的敬业执着与辛勤付出, 才使书籍最终能够出版。本书得到国家重点研发计划项目 (2018YFC1602602)、联合利华国际合作项目与北京大学医学出版基金的资助, 以及中国毒理学会毒理学替代法与转化毒理学专业委员会和中国环境诱变剂学会毒性测试与替代方法专业委员会的大力支持, 在此一并表示衷心感谢!

本书所述内容仅代表作者观点, 不作为相关技术指导原则和法规管理依据。书中若有疏漏和不当之处, 恳请批评指正!

郭家彬
2021 年 8 月, 北京

目录

第一章 概论 1
第一节 背景与历史 1
一、现代毒理学的挑战 1
二、3R 原则与法规要求 2
三、体外与预测毒理学的发展 2
第二节 基本方法 3
一、常用体外模型 3
二、预测毒理学方法 6
三、毒性终点与生物标志物 8
四、测试方法验证 9
五、验证与法规接受 11
第三节 新技术方法与策略 12
一、21 世纪毒性测试策略 12
二、有缺陷策略 12
三、整合测试与评估方法 13
四、新技术方法与下一代风险评估 15
第四节 展望 16
第二章 “组学” 测试技术 19
第一节 转录组学 19
一、转录组学技术 19
二、数据整合 20
三、应用与展望 22
四、展望 22
第二节 蛋白质组学 24
一、蛋白质组学技术 24
二、数据整合 25
三、应用与展望 27
第三节 代谢组学 27
一、代谢组学方法 27

2 目 录	
二、代谢组学技术	27
三、组学分析及高通量识别	29
四、应用进展	29
五、展望	30
第四节 基因组学	30
一、基因组学概论与高通量识别	31
二、高通量测序技术	32
三、展望	34
第五节 蛋白质组学	35
三、蛋白质组学技术	39
第一节 多能干细胞	39
一、多能干细胞	41
二、诱导多能干细胞	43
第二节 诱导多能干细胞来源的分化细胞	43
一、心肌细胞	43
二、肝细胞	45
三、神经细胞	46
四、肾细胞	47
第三节 成体干细胞	48
一、造血干细胞	48
二、间充质干细胞	49
第四节 细胞与组织	51
一、细胞与组织概述	51
二、模型的构建	52
第四章 3D 生物打印模型	58
第一节 3D 生物打印常用技术	58
一、喷墨型生物 3D 打印	59
二、挤出型生物 3D 打印	60
三、激光辅助直写生物 3D 打印	61
四、比较与总结	62
第二节 3D 打印材料	63
一、3D 打印常用材料的基本要求	63
二、非细胞 3D 打印常用材料	64
三、细胞打印常用材料	65
第三节 3D 打印细胞组织模型及其应用	67

目 录 3	
一、组织模型	67
二、细胞模型	69
三、心肌模型	70
四、肾脏模型	72
五、肝细胞模型	73
第五节 展望	75
第五章 器官芯片	79
第一节 概述	79
一、基本概念	79
二、发展历史	79
三、现状与趋势	80
第二节 设计原理与关键技术	81
一、设计原理	81
二、基本材料及其制造技术	83
三、3D 生物打印模型的制造方法	85
第三节 器官芯片及其应用示例	87
一、肺芯片	87
二、肝芯片	87
三、肾芯片	88
四、肠芯片	89
五、心脏芯片	91
六、脑芯片	92
七、血管芯片	92
八、多器官芯片	93
第四节 总结和展望	94
第六章 体外代谢处置模型	98
第一节 概述	98
一、代谢转化和代谢途径	98
二、代谢转化与毒性的关系	99
三、药物代谢酶和转运体	99
四、体外代谢处置模型的发展	100
第二节 常用体外代谢处置模型	100
一、肝细胞模型	101
二、肝细胞系	101
三、肝细胞模型	103

4 目 录	
四、体外代谢处置模型	105
五、组织芯片模型	107
六、器官流式模型	108
第三节 体外代谢处置新技术模型	109
一、3D 培养细胞模型	109
二、多能干细胞培养模型	110
三、微流控芯片	110
第四节 展望	111
第七章 基于毒作用机制的毒性测试	115
第一节 概述	115
一、基本概念	115
二、研究策略	116
第二节 常见毒性通路	117
一、NF- κ B 信号通路	117
二、热休克蛋白通路	117
三、p53 调控的 DNA 损伤修复通路	118
四、细胞凋亡通路	119
五、线粒体膜通透性改变通路	120
六、PGC-1 α 信号通路	121
七、HOG 信号通路	122
第三节 毒性通路应用示例	123
一、NF- κ B 信号通路在炎症模型中的应用	123
二、p53 调控的 DNA 损伤修复通路	125
三、线粒体膜通透性改变的毒性测试	125
第四节 展望	126
第八章 体外-体内数据外推 (IVIVE) 模型	130
第一节 概述	130
一、概念与原理	130
二、基本要素	131
第二节 毒效动力学外推模型	131
一、简单的剂量-反应模型	132
二、系统生物学模型	132
第三节 毒效动力学外推模型——PBPK 模型	132
一、PBPK 模型概述	133
二、转化为数学模型	134

目 录 5	
三、交叉参考	136
四、毒效动力学模型	136
五、评价模型性能	137
六、模型验证	137
第四节 体外毒性数据结合 PBPK 模型在 IVIVE 中的应用	138
一、安全评估的估算	138
二、应用案例与展望	142
第九章 定量结构效应关系模型	142
第一节 概述	142
一、21 世纪毒理学	142
二、计算毒理学模型	143
第二节 基于定量结构效应关系模型的毒性预测	144
一、常用机器学习算法	145
二、模型建立与验证	145
三、模型应用与展望	147
四、模型应用与展望	147
第三节 基于高通量筛选数据的毒性预测	148
一、应用案例与展望	148
二、计算毒理学模型的发展	149
第四节 展望	150
第十章 毒理学关键阈值 (TTC)	153
第一节 基本概念与发展历史	153
一、基本概念	153
二、发展历史	153
第二节 分级 TTC 决策树	155
一、遗传毒性或致癌性	155
二、遗传毒性	155
三、分级 TTC 决策树与展望	155
四、TTC 模型的发展	157
第三节 使用规则与法规接受	157
一、TTC 方法的使用	157
二、TTC 的法规接受	157
第四节 应用案例与展望	159
第五节 展望	161
一、欧洲食品安全局/世界卫生组织的科学风险评估 (2016 年 3 月)	161

6 目 录	
二、TTC 扩展化物品、毒性和数据提取	162
三、展望	162
第十一章 交叉参照	166
第一节 概述	166
一、基本概念	167
二、发展历史与法规接受	167
三、模型建立	168
第二节 基于交叉参照的交叉参照模型	168
一、确定交叉参照的目的	168
二、建立类似物并评估其适用性	169
三、建立类似物的数据，并评估数据的充分性和一致性	170
四、优化交叉参照模型并确定交叉参照方案	171
五、交叉参照模型的应用	174
第三节 交叉参照模型的应用	174
一、填补数据缺口	174
二、早期发现和不确定性分析	175
第四节 展望	175
第十二章 剂量-效应计算模型与基准剂量法	178
第一节 基本概念与原理	178
一、概述	178
二、毒性标志物	179
三、毒性通路	179
四、起始点	180
五、系统毒性学作用模型	180
第二节 基准剂量法	181
一、概述	181
二、剂量-效应关系的拟合	181
三、基准剂量的选择	184
四、基准剂量的计算	186
五、注意事项	186
第三节 剂量-效应计算模型	187
一、计算模型构建	187
二、毒性通路模型构建	188
三、注意事项	189

目 录 7	
第四节 挑战和展望	189
第十三章 毒理学大数据分析与应用——Tox21 项目实例	193
第一节 Tox21 项目简介	193
第二节 Tox21 数据分析	197
一、化合物库	197
二、机器人平台	198
三、高通量筛选	198
四、数据质量控制与数据整合	198
第三节 基于 Tox21 大数据的预测模型	201
一、化合物毒性模型	201
二、Tox21 数据预测模型体内毒性	201
第四节 展望与展望	205
一、挑战	205
二、大数据时代数据建模的新方法	205
第十四章 数据质量评价	210
第一节 概述	210
一、数据质量的重要性	210
二、基本要素	211
三、基本原则	212
第二节 数据质量评价	213
一、数据质量评价系统	213
二、Tox21 评价工具	214
三、美国环保局 (EPA) 数据质量评价系统	215
四、美国健康评估和转化办公室 (OHSAT) 数据质量评价工具	216
第三节 数据质量评价	217
一、评价要素	217
二、评价方法	218
第四节 应用案例	219
一、系统毒性学中的应用	219
二、风险评估中的应用	220
三、模拟毒理学中的应用	220
四、定量结构效应关系模型的质量评价	221
第五节 展望与展望	222
一、数据质量评价的挑战	222
二、相关性的外推与展望	223

8 目 录	
三、展望	224
第十五章 试验方法的验证	227
第一节 概述	227
一、验证目的	228
二、验证内容	228
三、验证机构	229
第二节 经济合作与发展组织验证的方法及程序	232
一、验证的范围	232
二、验证的范围和分类	233
三、验证程序	233
第三节 验证范围	235
一、毒理学终点点的体外方法验证进展	235
二、验证范围的进展	237
第四节 中国的发展现状与建议	239
一、现状	239
二、挑战	239
三、建议	240
第十六章 法规接受	244
第一节 概述	244
一、概念与内涵	244
二、目的	245
三、发展历史	246
第二节 法规接受的管理和要素	247
一、法规接受的管理	247
二、法规接受的要求	248
三、国际协调	250
四、法规接受体系	252
第三节 法规接受的实施	254
一、法规接受过程	254
二、接受方法的应用	257
三、评价	258
第四节 国内外进展	259
一、国际政策和法规进展	259
二、全球项目进展	260
三、中国的发展现状	262

目 录 9	
第五节 展望	264
一、挑战与机遇	264
二、发展对策	265
第十七章 食品安全性评价	271
第一节 概述	271
一、基本概念	271
二、食品毒理学评价试验	272
三、计算毒理学	272
四、健康风险评估	275
第二节 食品安全风险评估	277
一、风险评估	277
二、食品添加剂的安全性评价	279
三、转基因食品的安全性评价	280
四、食物过敏原	281
第三节 应用案例	282
一、食品添加剂的安全性评价	282
二、农药和兽药残留的安全性评价	283
三、转基因食品的安全性评价	285
四、新食品原料的安全性评价	288
五、食品添加剂的安全性评价	288
第四节 结语与展望	289
第十八章 化妆品安全性评价	293
第一节 化妆品的安全性评价	293
一、方法和步骤	293
二、评价策略与技术	294
三、评价内容与检测项目	294
第二节 化妆品监管法规	295
一、我国化妆品监管法规	295
二、欧盟化妆品法规	296
三、美国化妆品法规	297
四、日本化妆品法规	299
第三节 原料的安全性评价	299
一、危害识别	300
二、剂量-反应关系	307
三、暴露评估	309

10 目 录	
四、风险评估	309
第五节 化妆品产品的安全性评价	311
一、局部刺激性评价	311
二、安全性评价的其他考量	312
三、上市前审查	313
第五节 展望	313
第十九章 化学品安全性评价	317
第一节 概述	317
一、化学品安全与法规	317
二、化学品安全评价方法	319
三、良好实验室规范原则在化学品评价中的应用	319
四、中国化学品安全评价体系	319
五、法规要求	320
第二节 化学品安全评价	323
一、化学品安全评价方法	323
二、化学品安全评价方法	324
三、化学品安全评价方法	324
第三节 化学品安全评价	328
一、化学品安全评价	328
二、化学品安全评价	329
三、化学品安全评价	330
第四节 展望	330
第二十章 纳米材料安全性评价	333
第一节 概述	333
一、理化特性	333
二、特殊效应	334
三、毒性影响因素	335
第二节 评估方法与风险评估策略	337
一、纳米材料的表征	337
二、风险评估策略	338
第三节 毒性效应与分子机制	340
一、氧化应激	340
二、炎症反应	340
三、自噬	341
四、DNA 损伤	341

目 录	11
点、细胞凋亡.....	342
第四节 体外与预测毒理学评价.....	342
一、器官水平.....	342
二、细胞水平.....	343
三、亚细胞及分子水平.....	345
四、发育和构效关系模型.....	345
第五节 总结与展望.....	346
第二十一章 环境内分泌干扰物评价.....	348
第一节 概述.....	348
第二节 典型环境内分泌干扰物及其危害.....	349
一、二噁英及其类似物.....	349
二、多环芳烃及其衍生物.....	350
三、多溴联苯醚及其衍生物.....	350
四、全氟化合物.....	351
五、典型塑化剂双酚 A、邻苯二甲酸酯及其衍生物.....	351
六、农药类.....	352
第三节 环境内分泌干扰物的致毒机制.....	352
一、受体介导的致毒机制.....	352
二、非受体介导的致毒机制.....	359
第四节 环境内分泌干扰物的筛选方法.....	360
一、体内试验.....	360
二、体外试验.....	362
三、计算机模拟的环境内分泌干扰物筛选.....	363
第五节 环境内分泌干扰物评估体系.....	365
一、美国环境保护部的筛选评估体系.....	365
二、OECD 的筛选评估体系.....	366
第六节 展望.....	367
附录.....	371
附表 1 已验证或批准接受的替代方法（福利效应）.....	371
附表 2 相关网站与信息资源.....	376