



实验动物科技资讯

2025 年第 18 期 总 399 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 11 月 18 日 星期二

《探索科技伦理与动物实验革新·资源与工具推介》之九

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。

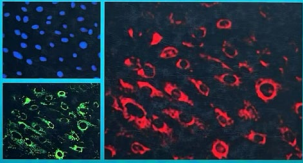
专栏编辑

专业书籍推介

国家自然科学基金“重点项目”资助

Toxicity Testing Strategy in the 21st Century
Principles and Practices
21 世纪毒性测试策略
理论与实践

主编 彭双清 Paul L. Carmichael



军事医学出版社

内容简介

本书针对21世纪健康安全风险评估技术发展的新特点，集合国内外专家，系统总结阐述了近年来毒性测试策略与技术方面的最新进展。全书共十五章，既全面总结了21世纪毒性测试策略的主要内涵及最新概念，如有害结局模型（AOP）与分子起始事件（MIE）等，也介绍了主要毒性测试新模型、技术方法、毒性测试国际重点研发项目及最新研究进展与研究成果。本书还介绍了21世纪毒性测试策略及技术方法最新进展，同时通过具体案例介绍其他风险评估方法在食品、环境、职业健康等领域的应用。本书适合从事风险评估与毒性测试与风险评估领域的专家、一线科技骨干、科技卫生管理、环境、食品、化学、化妆品等健康相关产品安全评价等领域的科技工作者和相关管理部门人员参考。

图书信息

21世纪毒性测试策略：理论与应用/彭双清，(英) 保罗·卡迈克尔 (Paul L. Carmichael) 主编。—北京：军事医学出版社，2016.6
ISBN 978-7-345-07946-6
I. ① Q2-0-5 ② 彭-③ 卡 ④ 毒性测试
IV. ① R991
中国版本图书馆CIP数据核字 (2016) 第203119号

责任编辑：孙 宇 黄晓梅 吕海峰
出 版：军事医学出版社
地 址：北京市海淀区太平路22号
邮 编：100020
联系电话：发行部：(010) 66931949
编辑部：(010) 66931127, 66931039, 66931104
传 真：(010) 66931294
网 址：http://www.mmp.com.cn
印 度：中德(北京)印刷有限公司
发 行：新华书店
开 本：787mm×1092mm 1/16
印 张：18.5(4.5插)
字 数：450千字
版 次：2016年8月第1版
印 次：2016年8月第1次
定 价：116.00元

本社图书凡购、租、阅、展者，本社发行部负责调换

主编简介



彭双清 博士，研究员，博士生导师。军事医学科学院疾病预防控制中心技术委员会主任，毒理学评价研究中心主任。长期从事安全性评价与风险评估的研究，主要研究方向为毒性测试策略与毒理学替代方法的研究。先后主持与承担科研项目40余项，其中包括国家重点基础研究计划(973)课题、国家“863计划”项目、国家科技重大专项“重大新药创制”及国家科技部国际合作课题等。先后在国内外发表科技论文250余篇，其中SCI论文论280余篇，主编(参编)专著6部。12项科技成果先后获国家、军队科技进步奖。2002年获国务院政府特殊津贴，2004年获军队杰出人才岗位津贴，荣立军队三等功2次，2014年获中国科协“优秀科技工作者”荣誉称号。长期从事安全性评价与GLP管理工作，承担国家科技部支持的国家GLP技术平台建设，指导药研所、博士研究及博士后50多名，任中国毒理学学会理事、毒理学替代方法与毒理学专业委员会主任委员、中国环境医学学会常务理事、毒性测试与替代方法专业委员会主任委员等职务。是国家食品药品监督管理总局药审专家、医疗器械审评专家、军队特殊药品审评专家、国家环境保护部新化学物质环境审评专家、国家卫生计生委食品安全国家标准审评委员会专家、任“Environmental Toxicology and Pharmacology”副主编，担任《毒理学杂志》《生态毒理学杂志》《食品质量安全学报》等杂志编委。



Paul L. Carmichael 博士，研究员，教授。从事毒理学及免疫研究26年。2000年从美国哈佛大学医学院联合利华安全与环境保障中心工作。负责非动物测试方法的研究及其在人类健康与产品安全评估中的应用。近年来，重点开展21世纪毒性测试策略新技术方法及其应用的研究，为排除了TT21C的毒性和非动物测试方法由重要负责。在动物替代方法发表学术论文100余篇，担任国际化学品安全人类健康委员会毒理学委员会主席、英国毒理学学会毒理学委员会和英国环境毒理学委员会等学术职务。因其在分子生物学杰出贡献获得伦敦大学颁发的Tullock-Ridley奖。任美国Brown大学、美国Laureate大学和北京大学客座教授。

副主编简介

李 津 博士，研究员。从事开发和应用非动物测试方法进行化学毒理学风险评估，整合基于计算机预测及体外和体内多类数据，开发基于毒性通路的21世纪毒理学安全评估方法。自2011年以来，积极促进中国科学家与美国科学家的学术交流，协助规划及组织国际学术研讨会及教育培训。参与在中国设立多项前沿科技发展基金项目，促进以风险评估为基础的毒理学方法在中国化学品安全评估体系上的开发应用及数据推广。中国毒理学学会、任中国毒理学学会毒理学替代方法与转化毒理学专业委员会委员、计算毒理学专业委员会委员等学术职务。

郭家彬 博士，副研究员，硕士生导师。主要研究领域为心血管毒理学、神经药理学及毒性测试替代方法。先后承担或参与国家自然科学基金课题、国家“重大新药创制”科技重大专项等12项国家基础科研项目。已在Heart Fail Bio Med, Toxicol Sci, Toxicology等国内外专业期刊发表学术论文37篇，主编专著1部。获中国药学会科学技术二等奖、中国实验动物学会科学技术三等奖和北京市科技进步奖等荣誉多项。现担任13届中国药理学学会优秀青年工作。任中国环境医学学会毒性测试与替代方法专业委员会秘书长、中国毒理学学会工业毒理专业委员会委员等学术职务。

《21世纪毒性测试策略——理论与实践》编委会

主 编 彭双清 Paul L. Carmichael
副主编 李 津 郭家彬
编 委 (按姓氏拼音排序)

Bob van de Water	荷兰莱登大学毒理学系	博士，教授
Cameron Mackay	联合国利华安全与环境保障中心	博士，研究员
崔 凡	军事医学科学院疾病预防控制中心	博士
Erik JH Danen	荷兰莱登大学毒理学系	博士，教授
Gavin Maxwell	联合国利华安全与环境保障中心	博士，研究员
郭家彬	军事医学科学院疾病预防控制中心	博士，副研究员
郭家彬	军事医学科学院疾病预防控制中心	博士，副研究员
黄瑞娟	美国NIH国家转化科学中心	博士，研究员
李瑞娟	联合国利华安全与环境保障中心	博士，副研究员
李 津	联合国利华安全与环境保障中心	博士，研究员
李诗章	美国NIH国家转化科学中心	博士
姜 丹	上海市疾病预防控制中心	博士，医师
Louise von Stechow	荷兰莱登大学毒理学系	博士，教授
卢春凤	佳木斯大学基础医学院	博士，教授
Mary T. McBride	安捷伦公司	博士，研究员
Melvin Andersen	美国NIH健康科学研究所	博士，研究员
Michael Davies	联合国利华安全与环境保障中心	博士，研究员

Paul L. Carmichael	联合国利华安全与环境保障中心	博士，教授/研究员
Paul Russell	联合国利华安全与环境保障中心	博士，研究员
彭 辉	军事医学科学院疾病预防控制中心	硕士，实验师
彭双清	军事医学科学院疾病预防控制中心	博士，研究员
裴小峰	国际人道对待动物协会	研究员
Rebecca Clewell	美国Hamner健康科学研究院	博士，研究员
冉 皓	上海市疾病预防控制中心	博士，副主任技师
Steve Gutsell	联合国利华安全与环境保障中心	博士，研究员
Troy Seidle	国际人道对待动物协会	研究员
Vicki Summerfield	联合国利华安全与环境保障中心	博士，研究员
王以英	军事医学科学院疾病预防控制中心	博士，副研究员
武晓军	军事医学科学院疾病预防控制中心	博士，助理研究员
夏 静	军事医学科学院疾病预防控制中心	博士，助理研究员
夏惠彪	美国NIH国家转化科学中心	博士，研究员
袁金松	军事医学科学院毒物药物研究所	博士，助理研究员
Yeyejide Adeleye	联合国利华安全与环境保障中心	博士，研究员
殷卓华	牡丹江国研中心	博士，研究员
袁海峰	军事医学科学院疾病预防控制中心	博士
袁晓燕	军事医学科学院疾病预防控制中心	博士，助理研究员
张 强	美国埃默里大学公共卫生学院	博士，教授
张廷家	军事医学科学院疾病预防控制中心	博士，助理研究员
赵增明	军事医学科学院疾病预防控制中心	博士，助理研究员

前言

毒性测试 (toxicity testing) 通过一系列技术手段获得足够可靠的数据，以鉴定化学物质及其产品的毒性特征。为制定相应的风险管理措施提供科学依据。它是外源性物质风险评估的重要组成部分，是保障人类健康与环境安全的重要手段。传统的毒性测试主要依赖于大量的动物实验，通常耗时长、费用高，难以满足大量化学物质的测试与风险评估需求。由于物种间差异、剂量外推等原因，测试结果的准确性和可重复性低，与人类相关性存在不确定性。此外，随着人们对动物保护和福利的重视以及“3Rs”原则的推广与实施，动物实验越来越受到限制。然而，在过去40年间，毒性测试方法并没有出现多大的改变。近年来，生物化学、分子生物学、生理学、细胞生物学和免疫学等现代生物学学科取得了突飞猛进的发展，并且与化学、计算机科学、数学和物理学等其他不同学科呈现越来越多的交叉融合，形成了基因组学、蛋白质组学、生物信息学和系统生物学等新兴学科，高通量测序、生物芯片和3D打印等多种技术也取得了快速发展。这些生物学与技术的发展，为毒理学领域的变革和发展提供了强有力的理论与技术支持。针对21世纪毒性测试与毒理学发展的挑战与机遇，2007年美国国家研究委员会(NRC)发布了在毒理学领域具有里程碑意义的研究报告，即《21世纪毒性测试：愿景与挑战》(toxicity testing in the 21st century: a vision and a strategy,简称TT21C)。TT21C提出了毒性测试与风险评估的新框架体系，主要包括化学物特征、化合物及其代谢产物的毒性测试、剂量-反应与外推模型、人群暴露数据以及风险评估信息等要素，重点关注毒性通路分析和靶向测试。未来毒性测试的重点将由整体动物测试转向基于(人)细胞、细胞系和/或细胞亚群的体外测试和计算毒理学方法，着力实现高通量、高灵敏度、低成本、预测能力强且准确的毒性测试。TT21C不仅从策略层面为化学物的毒性测试与风险评估提供了指导，同时也在技术和方法层面为多学科的交叉融合提供了发展动力。21世纪毒性测试新策略的提出在全球范围内引发了制药工业、环境保护组织、科研院所和政府相关部门的广泛关注和高度重视。欧盟和美国等发达国家和地区自2007年开始先后启动了多个重大研发计划，旨在推动TT21C的发展，促进其在环境污染物、药物、化妆品、食品添加剂、杀虫剂及化学物等相关产品的毒性测试与风险评估中的应用，如Tox21、ToxCast、AxLR8、和SEURAT-1及ZEU-ToxRisk等项目。在我国，也

有越来越多的科技工作者、企业从业人员及相关管理人员加入到这个全球性的开创性研究工作中，并取得了可喜的进展。为了系统介绍21世纪毒性测试新策略及其发展，我们组织国内外专家，编写了这本《21世纪毒性测试策略——理论与实践》。期待该专著出版对于推动我国健康安全风险评估技术的发展与应用起到积极的促进作用。

全书共十五章，主要阐述了21世纪毒性测试策略及技术方面的最新进展，并通具体案例介绍其在风险评估中的应用实践。第一章简要介绍了21世纪毒性测试策略提出的背景、意义及发展历程；第二、三章阐述了有害结局模型(AOP)概念和分子起始事件(MIE)的基本内涵；第四章至第七章介绍了毒性测试关键技术新模型及其应用，主要涉及生物网络关系模型、基于生理学的代谢动力学模型以及毒性通路计算模型等；第八章至第十一章通过一些具体案例，介绍毒性测试策略新技术方法在风险评估中的应用，包括皮肤过敏反应、DNA损伤、遗传毒性和神经毒性等案例；第十二章至第十五章分别重点介绍了美国Tox21和ToxCast项目，以及欧盟AxLR8和SEURAT-1项目的最新进展与研究成果。全书内容新颖，具有较强的科学性和实用性。力求从测试策略、技术方法和应用指导等多个层面展示21世纪毒性测试策略的发展全貌。该专著的出版得到了美国国家联合利华安全与环境保障中心的资助，得到了国家自然科学基金委员会重点项目的资助以及中国毒理学学会毒理学替代方法与转化毒理学专业委员会的大力支持，在此诚挚感谢！书中的疏漏与缺点，恳请读者批评指正。

彭双清
2016年5月于北京

目 录

第 1 章 21 世纪毒性测试概述	1
1.1 毒性测试概述	1
1.2 毒性测试的目的与意义	3
1.3 毒性测试面临的挑战	4
1.4 21 世纪毒性测试策略的提出	4
2 21 世纪毒性测试策略的主要内容	6
2.1 化学物特征	6
2.2 化合物及其代谢产物的毒性测试	7
2.3 剂量-反应和模型构建	9
2.4 人群和人群暴露数据	10
2.5 风险情景	11
3 21 世纪毒性测试策略的实施	12
3.1 TT21C 策略与技术发展	12
3.2 基于 TT21C 的风险评估	13
4 21 世纪毒性测试策略的发展与展望	14
4.1 国际进展情况	14
4.2 我国 21 世纪毒性测试策略的发展	19
第 2 章 有害结局模型 (AOP)	23
1 概述	23
2 AOP 的概念及提出背景	25
3 AOP 的应用	28
3.1 化学物分类及 QSAR 工具的发展	28
3.2 国际指南计划方案	29
3.3 整合方法的发展	29
4 AOP 的构建	29
4.1 AOP 主要信息模块	29
4.2 有害结局的确定	30
4.3 分子起始事件	30
4.4 毒理学有效性的关键事件	31
4.5 数据汇总	31
4.6 AOP 的评估	33
4.7 AOP 的可信度	34

4.8 AOP 的基本信息要求	34
5 AOP案例	35
6 前景与展望	35
第3章 分子起始事件 (MIE)	43
1 概述	45
2 MIE及其带来的挑战	45
3 化学物表征	46
4 MIE的鉴别	47
5 路径中的MIE	48
5.1 从化学物入手识别 MIE	48
5.2 从生物学反应入手识别 MIE	48
6 人体与环境综合风险评估	49
7 结论	49
第4章 定量构效关系 (QSAR) 模型	51
1 QSAR概述	53
1.1 QSAR 的历史	53
1.2 QSAR 的应用	54
2 QSAR分析的基本方法	55
2.1 专家系统	56
2.2 模型建立方法和流程	57
3 QSAR常用软件	62
3.1 免费提供的软件	63
3.2 商业 (付费) 软件	65
4 QSAR在风险评估和管理毒理学中的应用	68
4.1 用 QSAR 模型进行风险评估	68
4.2 QSAR 模型中数据集的使用	69
4.3 QSAR 预测的可靠性	72
5 QSAR的发展方向	77
5.1 毒性数据库的获取和整合	77
5.2 毒性数据库的质量	78
5.3 QSAR 模型的预测能力及验证	78
第5章 毒性通路计算模型	85
1 毒性通路的概念	87
2 毒性通路的建模与模拟	88
3 计算机数值模拟技术	90
4 毒性通路计算机模拟工具	91
5 个例研究	91

2

4.8 AOP 的基本信息要求	34
5 AOP案例	35
6 前景与展望	35
第3章 分子起始事件 (MIE)	43
1 概述	45
2 MIE及其带来的挑战	45
3 化学物表征	46
4 MIE的鉴别	47
5 路径中的MIE	48
5.1 从化学物入手识别 MIE	48
5.2 从生物学反应入手识别 MIE	48
6 人体与环境综合风险评估	49
7 结论	49
第4章 定量构效关系 (QSAR) 模型	51
1 QSAR概述	53
1.1 QSAR 的历史	53
1.2 QSAR 的应用	54
2 QSAR分析的基本方法	55
2.1 专家系统	56
2.2 模型建立方法和流程	57
3 QSAR常用软件	62
3.1 免费提供的软件	63
3.2 商业 (付费) 软件	65
4 QSAR在风险评估和管理毒理学中的应用	68
4.1 用 QSAR 模型进行风险评估	68
4.2 QSAR 模型中数据集的使用	69
4.3 QSAR 预测的可靠性	72
5 QSAR的发展方向	77
5.1 毒性数据库的获取和整合	77
5.2 毒性数据库的质量	78
5.3 QSAR 模型的预测能力及验证	78
第5章 毒性通路计算模型	85
1 毒性通路的概念	87
2 毒性通路的建模与模拟	88
3 计算机数值模拟技术	90
4 毒性通路计算机模拟工具	91
5 个例研究	91

2

6 计算毒理学人才的培养	93
7 附录与展望	93
第6章 基于生理的毒代动力学 (PBPK) 模型	97
1 概述	99
2 PBPK模型的框架内容	99
2.1 搭建模型框架	100
2.2 转化为数学模型	101
2.3 定义参数值	103
2.4 方程组求解	103
2.5 模型评估	103
2.6 模型预测	104
3 PBPK模型的应用	104
3.1 化学物风险评估	104
3.2 药物剂开发与评价	105
3.3 人类生理数据数据的使用	105
3.4 体外- 体内外推	105
4 总结	106
第7章 现代毒性测试新技术	109
1 概述	111
2 21世纪毒性测试的新工具与新技术	111
2.1 体外模型系统	112
2.2 体外试验	116
2.3 高通量筛选	117
2.4 细胞成像技术和高内涵筛选	118
2.5 组学方法	119
2.6 生物信息学和可视化工具	123
2.7 计算毒理学	126
3 通过合作与协作, 实现21世纪毒性测试战略	127
4 总结	128
第8章 皮肤敏感性的风险评估	131
1 概述	133
1.1 皮肤致敏评估方法	133
1.2 皮肤致敏的有害接触途径	133
2 皮肤致敏的毒代动力学	135
2.1 毒代动力学特征	135
2.2 毒代动力学模型	136
3 分子起始事件	137

3

4 皮肤致敏的毒物效应动力学	138
4.1 毒效学反应	138
4.2 毒效学模型	140
5 存在问题与展望	141
第9章 基于毒性通路的毒性评估	145
1 概述	147
2 化学物与毒性通路的选择	148
2.1 化学物的选择	148
2.2 测试细胞的选择	149
2.3 暴露量的计算	149
2.4 毒性通路的建模与模拟	150
3 基于毒性通路的毒性评估	152
3.1 剂量-反应模型评价	152
3.2 实际暴露剂量检测	153
3.3 剂量-反应关系评估	154
3.4 计算模型应用	155
3.5 体外-体内模型外推	157
3.6 低剂量暴露的风险评估	157
4 结论与展望	158
第10章 遗传毒性通路	163
1 DNA损伤所致信号应答	165
1.1 DNA 损伤和损伤适应	165
1.2 DDR 中间信号转导激酶磷酸化作用	165
1.3 转录因子 p53 是细胞应激反应中的中央枢纽	167
1.4 p53 受翻译后修饰的调节	167
2 DNA损伤诱导的细胞应答	168
2.1 DNA 修复	168
2.2 小 DNA 损伤的修复	168
2.3 大块损伤和阻碍双链断裂形成的 DNA 损伤的修复	168
2.4 DNA 损伤诱导的细胞死亡	169
2.5 DNA 损伤导致的细胞周期阻滞	170
3 肿瘤形成和治疗过程中的DNA损伤	171
3.1 DNA 损伤与肿瘤形成	171
3.2 阐述 DNA 损伤应答提高抗肿瘤治疗效果	172
4 RNA测序研究DNA损伤应答信号网络	173
4.1 RNA 干扰机制	173
4.2 siRNA 筛选	173

4

4.3 siRNA 筛选研究 DDR 信号应答	174
4.4 siRNA 筛选鉴定 DNA 诱导的细胞应答	175
5 siRNA筛选鉴定肿瘤发展驱动基因	176
6 siRNA筛选用于识别新的肿瘤药物靶点及联合致死性相互作用	176
6.1 siRNA 筛选用于毒性化合物的分类	177
6.2 siRNA 筛选应用	177
第11章 线粒体毒性通路	181
1 概述	183
1.1 线粒体毒性测试	183
1.2 线粒体毒性作用机制	183
2 线粒体毒性与毒性通路致毒	184
2.1 多靶比重的线粒体毒性特征	184
2.2 细胞毒性与线粒体毒性检测	185
2.3 PGC-1 α 通路扰动作用测试	185
3 毒性通路计算模型及其应用	187
3.1 毒性通路计算模型的构建	187
3.2 计算模型的应用与毒性模拟评估	188
3.3 计算模型的验证	189
4 结论	190
第12章 美国 Tox21 项目	195
1 概述	197
2 Tox21筛选过程	198
3 Tox21项目化合物库	199
4 Tox21项目招募人	199
5 定量高通量筛选	201
6 数据处理与分析	202
7 Tox21项目中经过验证和使用过的体外测试	203
7.1 细胞内表面测试方法	204
7.2 转靶性靶点测试方法	205
7.3 转靶性靶点测试方法	206
7.4 基于信号通路的测试分析	208
8 结论与展望	209
第13章 美国 ToxCast 项目	215
1 概述	217
1.1 ToxCast 的产生背景	217
1.2 ToxCast 的运作方式	218
2 ToxCast数据库	220

5

3 ToxCast应用实例	220
3.1 结合 ToxCast 筛选潜在内分干扰化学物	222
3.2 利用 ToxCast 数据重建动态的细胞状态轨迹	222
3.3 利用 ToxCast 数据预测西药细胞毒性	222
3.4 ToxCast 数据库与其他数据库的对比研究	223
3.5 ToxCast 体外测试对化学物毒性的预测力评价	225
4 前景与展望	225
第14章 欧盟 AXLR8 项目	227
1 欧盟细胞计划概述	229
2 AXLR8项目概况	231
2.1 项目目标	231
2.2 主要工作内容	232
2.3 项目工作组成员	232
3 历届研讨会及主要议题	234
3.1 第一届 AXLR8 研讨会	234
3.2 第二届 AXLR8 研讨会	235
3.3 第三届 AXLR8 研讨会	236
4 AXLR8对“地平线2020”细胞计划的建议	240
4.1 “地平线 2020”细胞计划的目标	240
4.2 “地平线 2020”细胞计划研究策略	241
4.3 “地平线 2020”细胞计划战略重点	242
4.4 AXLR8 提议的“地平线 2020”细胞计划下新项目	245
4.5 “地平线 2020”细胞计划建议	247
5 发展趋势与展望	248
第15章 欧盟 SEURAT 研究计划	253
1 概述	255
1.1 立项背景	255
1.2 研究计划愿景	255
1.3 研究计划策略	256
1.4 研究计划的科学内容	257
2 SEURAT-1计划内容设置	257
2.1 SC&Tox 项目	258
2.2 HoMiBio 项目	258
2.3 DETECTIVE 项目	259
2.4 COSMOS 项目	259
2.5 NOTOX 项目	260
2.6 ToxBank 项目	261

6

3 研究计划主要进展	262
3.1 SC&Tox 项目进展	262
3.2 HoMiBio 项目进展	263
3.3 DETECTIVE 项目进展	264
3.4 COSMOS 项目进展	266
3.5 NOTOX 项目进展	270
3.6 ToxBank 项目进展	273
4 前景展望	273

7