

新兴技术对未来生物安全的影响*



刘 晓 王小理 阮梅花 熊 燕**

中国科学院上海生命科学信息中心 上海 200031

摘要 新兴技术不断创造新产品、新需求、新业态，培育新增长点，成为创新驱动发展和国家竞争力的关键所在，也是有效防御生物威胁的重要支撑。新兴技术的开发和应用，既能造福人类，保障国家安全，也因为其不确定性、监管缺失和资源开放等引发潜在的生物安全风险，对人类健康、农业、环境以及国家安全等造成重大危害。文章在分析新兴技术“两用性”特征的基础上，提出加强评估和预警，从源头上规避新兴技术安全风险，建立政府、科技界、公众共同参与的综合治理体系的建议。

关键词 新兴技术，生物安全，生物威胁，综合治理

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2016.04.008

新一轮科技创新发展迅速，已经深度融合和广泛渗透到人类社会的各个方面，技术已经成为当代社会推动变革的主要力量。虽然新技术永远蕴含着风险，但积极的突破能催生创新的解决方案，帮助应对资源短缺、环境污染、气候变化等当今世界最为迫切的各项挑战，有望深刻改变人类的生产和生活方式，同时也是有效防控危害人民生活 and 生态环境、保障国家安全的关键，对社会和经济的可持续发展具有重要意义。

1 新兴技术层出不穷，成为社会生产力新飞跃的突破口

1.1 新兴技术蓬勃发展，将全方位深刻改变人类社会生产和生活

近年来，信息网络、生物医药、清洁能源、新材料与先进制造领域等正孕育一批具有重大产业变革前景的颠覆性技术突破，其中，量子计算与量子通信、量子点技术、干细胞与再生医学、合成生物技术、纳米技术等发展迅速并展现诱人的应用前景。世界经济论坛新兴技术跨界理事会评选出2015年十大重要技术成果，包括下一代机器人技术、分布式制造技术、精准基因工程技术、自然人工智能技术、神经形态技术、数字基因组技术等，描绘了未来技术的发展趋势和巨大应用潜力^[1]。分布式制造技术正在改变人类制造和交付产品的方式，颠覆当前标准化制造模式，减轻制造行业对环境的影响，进一步降低交通领域

*资助项目：国家自然科学基金委员会-中科院学科发展战略研究合作项目（L1222037）

**通讯作者

修改稿收到日期：2016年3月2日

的能源消耗,将推动工业品由大批量集中式生产向定制化分布式生产转变;精准基因工程技术通过直接修改基因编码,从基因层面修改农作物,大大增强植物的耐受性,降低对水资源、土地以及化肥等外部资源的依赖,提高农产品产量和品质,保障食品和粮食安全;数字基因组技术能迅速廉价地测定人们的基因组,促进高度靶向治疗的发展,实现更加个性化和更有效率的医疗卫生改革,医学模式将进入个性化精准诊治和低成本普惠医疗的新阶段;神经形态技术取得突破,将开发模仿人类大脑的计算机芯片,大大提高数据处理速度,提高机器学习能力,将小型化与人工智能带入新阶段。总之,一系列新兴技术可能会以难以想象的方式改变社会,推动经济格局和产业生态重大调整,为经济社会发展提供前所未有的驱动力。

1.2 会聚推动科学和技术进步,带来新一轮科技革命

现代科学技术正呈现多学科相互交叉、渗透、高度融合,以及系统化、综合化的趋势。当今世界的重大突破、重大原创性科学成果的产生,大多是学科交叉、技术会聚的结果。会聚技术的影响将是深远和全方位的,其优先领域发展成功对人类的未来是决定性的。可以预见,在信息科学、生命科学、物质科学、环境科学、材料科学、计算科学、工程科学乃至社会科学间的交叉、融合,很有可能催生新的科学思想和孕育科学理论的重大突破,形成新的跨学科的科学前沿和新兴技术。例如高通量低成本的新一代组学技术、单分子技术、纳米技术、超高分辨率成像技术、生物计算技术等新技术、新方法的发展,以及与数理科学“定量概念”、工程科学“设计概念”、合成化学“合成认识概念”等思路和策略的进一步交叉融合,生命科学将开启以系统化、定量化和工程化为特征的“多学科会聚”研究范式,为更深入系统地认识生命、更精准有效地改造生物体提供前所未有的机遇^[2]。新一代信息技术和无线传输、无线充电等技术融合发展,为实现从人与人、人与物、物与物、人与服务互联向“互联网+”方向发展创造条件。智慧地球、智慧城市、智慧物流、智能

生活等应用技术的不断拓展,将形成无时不在、无处不在的信息网络环境,对人们的交流、教育、交通、通信、医疗、物流、金融等各种工作和生活需求作出全方位及时智能响应,推动人类生产方式、商业模式、生活方式、学习和思维方式等发生深刻变革^[3]。

2 新兴生物安全技术是有效防御生物威胁的重要保障

2.1 生物安全是国家科技创新的重点战略部署

生物安全包括“四防两保”,即防御生物武器攻击、防范生物恐怖袭击、防控传染病疫情、防止生物技术误用和滥用以及保护生物遗传资源与生物多样性、保障生物实验室安全等^[4]。由于不断发生的新发突发传染病、生物意外事故,以及生物恐怖、生物武器等将对人民健康、生态环境、经济发展与社会稳定造成重大影响,各国政府充分认识到生物安全形势的严峻性和全面加强生物防御能力建设的迫切性,发达国家已将生物安全问题上升到国家安全战略层面,从国家安全战略需求出发,不断调整和完善生物安全战略和法律法规。美国、英国、俄罗斯、澳大利亚等国家,通过实施生物防御计划,持续投入巨额经费,将生物防御研究和传染病应对相结合,通过开发广谱多用途的基础设施和新兴技术,增强针对未来可能出现的更高级威胁的应对能力。同时,通过健全组织机构,加强部门间协作机制建设,形成了“威胁和需求评估—基础研究—核心技术研发—产品开发—审批认证—产业应用”的生物防御体系。

(1) 各国均制定和完善法律法规,为国家生物防御提供保障。2001年后,美国政府对生物安全的关注更是提升至前所未有的高度,出台了一系列法规和战略以进一步加强应对生物恐怖和传染病暴发的能力。例如,美国相继发布了《公共卫生安全与生物恐怖准备和应对法案》《生物盾牌计划法案》《公众响应和应急准备法》《大流行与全方位危害准备与应对法》等,并于2004年签署“21世纪生物防御”总统令。白宫又

于2015年10月发布致16个政府机构的《增强美国生物安全与生物安保的下一步举措》新备忘录。该备忘录提出了改进美国联邦政府生物安全和生物安保操作规范与监管系统的系列措施。

(2) 建立预防、监测、防控一体化的防御。面对生物威胁，各国都采取积极防御态度，加大在生物防御领域的预算投入。2013年，俄罗斯用于抵御化学和生物威胁的支出达56.5亿卢布（约合1.8亿美元）。2014年，美国用于民用生物防御的联邦预算总额为66.9亿美元；2015财年，美国国会拨款55亿美元用于国际与国内埃博拉疫情的快速响应。奥巴马总统提出的2016财年预算中，也有137亿美元用于民用生物防御相关的项目计划^[5]。同时，美国的生物防御体系立足现状又瞄准未来，不仅制定了“国家储备战略”，还提出并实施了谋划长远而统筹兼顾的生物防御计划，其中就包括在隶属于美国国家科学技术委员会的国土与国家安全委员会指导下，由白宫科技政策办公室、国土安全部、国防部、卫生与公众服务部、环保署和农业部等机构共同参与的“生物监测计划、生物传感计划和生物盾牌计划”。通过足够的战略储备以及提升技术和产品的快速研发、生产能力，保障大规模杀伤性武器和突发传染病发生时的高效应对^[6,7]。

2.2 科学技术是生物安全防御体系的重要支撑

生物安全能力建设主要包括监测、预警、鉴别、处置和恢复等方面；其技术支撑及保障体系包括对威胁物质的基础研究、关键技术平台建设、研发基地建设、防控物质研制、安全设施建设等。由于生物威胁防护涉及微生物学、免疫学、分子生物学、生物信息学、流行病学、传染病学，以及计算机、信息、通信、传感等多学科和技术，因此，各国均通过建立学科交叉的技术集成平台和体系提高对生物安全的监测、预警和应对，以及生物威胁防控等能力^[8]。

在实验室应对网络方面，世界卫生组织（WHO）利用不同国家和组织的科研机构和实验室网络建立了全球疫情预警和反应网络（GOARN），协调国际疾病暴发

应对工作；美国建立了分布在其国内国外的生物威胁应对实验室网络（LRN），该网络现已有140多个实验室成员，覆盖了其50个州，还包括了位于澳大利亚、加拿大、英国的实验室^[9]。

在基础设施及平台建设方面，美国国立卫生研究院（NIH）通过其过敏与传染病研究所（NIAID）建立了生物防御和突发传染病区域研究中心、人类免疫学和生物防御转化医学研究合作中心、流感研究和监测中心、生物防御和突发传染病研究资源存储库以及疫苗和治疗药物评价机构、生物防御和突发传染病体外测试和动物实验等机构，支持各种水平和多重用途的研究和开发。

合成生物学技术、新型传染病防控技术、新型神经科学技术的发展，将进一步提高传染病监测、检测以及威胁评估、预防和恢复能力。美国国防部高级研究计划局（DARPA）启动的生命铸造厂项目（Living Foundries Program）旨在创建革命性的生物制造平台，采用新型生产模式，制造新型特质材料，开发新型产品（化学品、燃料、药物等）和系统（多细胞体系、自我修复体系、警戒性生物体系），以维护国家安全^[10]。新型遗传学和免疫学技术的研发，可用于精确和快速检测、诊断和治疗传染病；建立病毒进化研究平台，通过预测其突变路径，在疾病暴发前研发药品和疫苗等。另外，微电子、信息科学以及神经科学技术的发展有助于创建可临床应用的连接受损脑部的植入式神经接口，进行精确的刺激治疗。基于计算机技术、数据挖掘、人工社会建模、地理信息系统、复杂系统建模仿真等技术，以及管理科学的发展，将在生物威胁事件监测预警、危害评估、应急响应等方面发挥重要作用。

3 新兴技术带来新的生物安全风险

3.1 新兴技术的不确定性导致生物安全风险

新兴技术的开发和应用过程中，不确定性是其重要特征。不确定性主要体现在两个方面：一是因为无法确切地了解和掌握技术的内在机理，导致掌握的信息不完全

性；二是因为掌握信息的不全面，导致结果（应用）的偶然性和不可预知性。一些新兴技术在开发应用中的这种不确定性，有可能导致生物安全风险。例如，在纳米毒理学领域，一些纳米材料的毒理学机制尚不明确，目前能够归纳出具有系统性、普遍性的规律性知识还很有限。因此，要对纳米生物安全性问题做出科学合理、客观公正的评价，还需要开展更深入、更系统的纳米毒理学研究，尤其是体内实验的验证以及纳米毒理学机制的相关研究^[11]。

合成生物学技术也有与纳米技术相类似的问题。通过设计、合成创造的微生物可能对其他物质和环境产生副作用和不利影响；具有特定功能的合成生物产品释放到环境中，有可能产生意想不到的后果；合成的生物体可能与自然生物体进行遗传交换，导致自然基因污染等^[12,13]。如果更高级的元件组合出现，或者元件/线路之间、元件/线路与细胞成分及细胞环境产生相互作用，其潜在风险会更加不确定。

另外，随着生物安全水平（BSL）3级和4级设施的构建和危险病原菌的大规模研究，越来越多地围绕3级和4级设施进行，生物防御研发中的技术研发和应用。如果缺乏详细的安全评估，研究人员（包括周边的社区和其他环境）也会面临潜在的生物安全风险^[14]。

再者，随着新一代机器人、自然人工智能等技术的发展，机器可能真的拥有智能，产生意识、思维，甚至情感，使得超智能机器人有一天也许会超越并且奴役人类，出现更加可怕的安全和伦理问题。

3.2 新兴技术监管缺失带来生物安全挑战

新兴技术的特点还在于新颖性。新颖性不仅仅是技术本身的创新，也意味着在伦理和法律上的新挑战以及监管模式上的革新。例如，合成生物学在本质上将基因技术上升到了工程化的新高度，无论对自然界生物的改造深度和“从无到有”合成的创新度，还是“改造”及“创新”的规模与速度，都与原来以基因工程为主体的生物工程技术不能同日而语。目前，人工生命密码子、非天然氨基酸实现人工设计与合成，已开始突破生命的

自然范畴，而现行的有些法律法规无法适应新技术的发展速度，存在评估监管的漏洞和缺陷。例如，原细胞系统和不具有生命性质的“自下而上”合成的衍生物，以及XNA/正交系统等不同于转基因法令中所指的传统核酸，游离在现有的法律规范范围之外，带来潜在的安全风险。

3.3 新兴技术资源开放引发生物安全隐患

网络信息技术、分布式制造技术、合成生物技术，以及科研数据、材料设施的开放共享，提供了功能强大的研发工具和前所未有的创新平台使工具和技术的获取更加容易；大数据与互联网带来的信息及信息挖掘“风暴”，为社会各阶层的信息交流及利用带来了极大的方便，并使创新门槛迅速降低，创新生活实验室、制造实验室以及众筹、众包、众智等多样化新型创新平台和模式不断涌现，科研和创新活动向个性化、开放化、网络化方向发展，催生越来越多的新型科研机构和组织。以“创客运动”（Maker Movement）为代表的小微型创新正在全球范围掀起新一轮创新创业热潮，也将培养“公民科学家”和非传统的创新者；将来，普通人也许足不出户就能创造自己想要的生物体，他们没有接受过分子生物学、遗传学等学科教育以及安全培训，也不需要遵守行业行为准则或申报程序；另外，分布式制造技术为医疗设备的远程制造提供了方便，但也为民间自行制造生物武器创造了条件，导致大众创新等活动存在安全隐患，对生物安全管理提出挑战。

4 加强监管，建立新兴技术综合治理体系

新兴技术监管的矛盾在于：如果管控的太严，将会阻碍新技术的发展和推广；如果管控不够严谨，某些技术及其产品有可能会对人类产生难以估量的损害。如何大力推进技术的研发，充分释放技术的潜力，开展有效的监管，并获得公众的支持，使其最大程度地造福人类，并降低新技术可能带来的负面影响，已经成为政府、学术界、产业界必须面对的巨大挑战。

新兴技术的治理应该是一种预判性的规范和引导。

在面对以纳米技术、人工智能技术、机器人技术、合成生物学技术等为代表的新兴技术时，需要在研究和开发的早期阶段，预先考虑安全和政策的挑战，将安全性问题放在产业发展之前进行先导性的研究，建立新兴技术监管防范体系，明确政府、机构、科学家、企业、公众的责任和角色，避免安全风险评估、监管政策等滞后于科技发展的被动局面。

（1）政府监管方面。首先，密切跟踪新兴技术发展所带来的新的生物安全问题，研究新特征、新变化，适时按需求推出新的规范或法规，努力实现积极稳妥，趋利避害。其次，新兴技术安全问题涉及很多行政管理机构，它们之间的合作与交流是建立防范体系的关键，因此，应建立行政管理机构之间合作规则的框架，避免由于过量管理而造成的冗繁。

（2）资助机构方面。要开展新兴技术风险研究和风险管理。应在新兴技术的发展规划中设立更多的生物安全研究项目，并将其研究成果作为制定新兴技术战略规划的重要参考^[15]；将安全问题引入技术的研发、预测、推广、评估的各个环节，从源头上规避技术风险。同时，建立新兴技术的安全管理和评估机制，将新兴技术的安全问题纳入技术的发展目标、实施细则及协调机制中，并通过提高安全评估的水平，提前预测潜在的风险。

（3）防范研究方面。新兴技术已经在发展一些创新的使能技术和工具，保证技术与产物的“可控性”、“自限性”。要利用新兴技术的研究成果，发展生物安全的防范技术，建立生物安全科技支撑体系。

（4）研究人员的安全意识方面。要加强新兴技术领域科研人员有关安全，重视对其进行安全防护和安全管理的教育培训，规避生物安全事件。另外，要尽早考虑创客运动等带来的潜在风险，通过进行注册、登记、备案等措施，对相关的研究和活动进行有序管理。

参考文献

- 1 Top 10 Emerging Technologies of 2015. [2015-03-04]. <http://www.weforum.org/agenda/2015/03/top-10-emerging-technologies-of-2015-2/>.
- 2 赵国屏. 生命科学与生物产业发展趋势. 人民日报, 2015-10-18.
- 3 白春礼. 创造未来的科技发展新趋势. 人民日报, 2015-07-05.
- 4 郑涛, 田德桥, 祖正虎, 等. 生物安全是国家战略必需的生命工程. 军事医学, 2014, (2): 90-97.
- 5 Boddie C, Sell T K, Watson M. Federal funding for health security in FY2016. Health Security, 2015, 13: 186-206.
- 6 田德桥, 联辉, 黄培堂, 等. 美国生物防御战略计划分析. 军事医学, 2012, 36 (10): 772-776.
- 7 李铁虎, 夏治强. 美国化学与生物防御计划概要. 国外防化科技动态, 2008, (4): 8-14.
- 8 沈倍奋. 发展生物安全技术, 有效防控生物威胁. 军事医学, 2014, (2).
- 9 焦振泉, 孟玲, 王锐, 等. 国际公共卫生实验室网络的现状及发展趋势. 疾病监测, 2007, 22 (3): 145-147.
- 10 Biological Technologies Office. [2015-04-01]. <http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2014/04/01.aspx>.
- 11 王国豫, 赵宇亮. 敬小慎微——纳米技术的安全与伦理问题研究. 北京: 科学出版社, 2015.
- 12 Vriend H. Constructing life: Early Social Reflections on the Emerging Field of Synthetic Biology. Hague: Rathenau Institute, 2006.
- 13 刘晓, 熊燕, 王方, 等. 合成生物学伦理、法律与社会问题探讨. 生命科学, 2012, 24 (11): 1334-1338.
- 14 关正君, 裴蕾, 马库斯·施密特, 等. 合成生物学生物安全风险评价与管理. 生物多样性, 2012, 20 (2): 138-150.
- 15 丁大尉, 李正风, 胡明艳. 新兴技术发展的潜在风险及技术治理问题研究. 中国软科学, 2013, (6): 62-70.

Potential Risks and Biosecurity Issues in Development of Emerging Technologies

Liu Xiao Wang Xiaoli Ruan Meihua Xiong Yan

(Shanghai Information Center for Life Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China)

Abstract Emerging technologies can create new products, new demands, new business, and new growth. They also become the key to innovation-driven development, competitiveness of the country, and important support to control of biological threats. Development and application of emerging technologies can be benefit for mankind and for protection of national security. But due to their uncertainty and lack of supervision, they could bring about biosecurity risk to human health, agriculture, and environment, and cause significant threat to national security. Based on analyzing the “dual-use” features of emerging technologies, this paper proposes to strengthen the R&D and risk assessment of emerging technologies, establish comprehensive governance system, which involve participation of the government, scientific community, industry and public to avoid biosecurity risks of emerging technologies.

Keywords emerging technologies, biosecurity, biological threat, governance

刘 晓 中科院上海生命科学信息中心馆员，主要从事生命科学相关领域情报研究。参与了国家自然科学基金委、中科院、上海市科委的等多项战略研究和软科学研究项目。E-mail: liuxiao@sibs.ac.cn

Liu Xiao Librarian of Shanghai Information Center for Life Sciences, Chinese Academy of Sciences. Her main research interest is intelligence research in the field of life science and related disciplines. She participated a number of research projects supported either by National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences, or by Science and Technology Commission of Shanghai Municipality. E-mail: liuxiao@sibs.ac.cn

熊 燕 女，中科院上海生命科学信息中心研究员，主要从事生命科学及生物医药领域的战略决策情报研究。承担和参与了国家自然科学基金委、科技部、中科院、上海市科委的等多项战略研究和软科学研究项目。负责“合成生物学学科发展战略研究项目”有关政策环境及安全、伦理问题的研究。发表文章20余篇，主编、参编著作10余部，编译著作1部。E-mail: yxiong@sibs.ac.cn

Xiong Yan Female, professor of Shanghai Information Center for Life Sciences, Chinese Academy of Sciences. Her main research interest is in the strategic decision-making research area in the field of life sciences and biomedical science. She chaired and participated many strategic studies and soft science research projects, supported by National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences, or by Science and Technology Commission of Shanghai Municipality. She actively participated “SA strategic study for the development of Synthetic Biology”. She has published more than 20 papers, and has copublished a dozen of books. E-mail: yxiong@sibs.ac.cn