

纳米技术的风险问题及对策研究

李润虎

(中国科学院 自然科学史研究所, 北京 100190)

摘要: 随着纳米技术的迅猛发展, 与之相关的风险问题也已逐渐进入了人们的视野, 如何规避纳米技术发展所带来的风险问题已成为纳米技术发展绕不开的话题域与难点。对纳米与人类生活、纳米与环境、及其与军事三个方面展开案例分析, 在综合研判国内外纳米风险相关理论研究的基础上, 提出科技重大风险视域下纳米科技发展转型的条件和必然性, 即纳米技术的发展转型需要人类首先进行一次认知意义上的转型, 通过科技革命和产业革命在遏制致毁知识增长的同时建立起一种新的自我纠错机制, 以此化解纳米技术带来的巨大社会风险, 实现技术乃至人类社会的可持续发展。

关键词: 纳米技术; 科技重大风险, 风险; 自我纠错机制; 致毁知识

中图分类号: N01 ;TB383

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2020)04-0380-08

1 引言

伴随着纳米技术这一高科技如火如荼的发展, 其发展风险理论也随即被人们重视了起来。纳米技术及其相关知识的不确定性已使其呈现出高科技风险隐忧, 建立科学合理的纳米技术发展监管体制迫在眉睫又充满挑战。一方面, 纳米技术的良性发展需要跨学科、跨领域的合作共赢; 另一方面, 纳米技术目前已进入公众消费领域, 其所面临的隐患和风险已威胁到公众甚至整个地球, 其所面对的问题已趋向于复杂性系统研究范畴。

近年来, 纳米技术风险的伦理、法律和社会影响研究已在人文社会科学领域掀起研究热潮, 自 ELSI 问题(伦理、法律与社会问题)提出以来, 目前, 在美国等发达国家, 纳米技术的 ELSI 研究及公众参与的民主浪潮在公共管理的各个领域展开, 纳米技术的伦理与风险评估突破传统专家评估式走向了开放的以利益相关者为主导的公众参

与伦理评价模式^[1]。2003 年, “发现纳米尺度”国际跨学科学术研讨会提出了“纳米伦理学(Nanoethics)”概念, 自此以后, 纳米伦理学开始了其建制化发展并逐渐形成了一个新兴的研究领域。

2006 年德国的舒美尔和美国的贝尔德着重讨论了纳米科技伦理问题^[2]; 美国学者阿尔霍夫和林、科曾斯和韦特莫尔等人分别从纳米伦理困境及纳米技术与环境、健康、隐私和人体等方面进行辩护和讨论^[3]; 2017 年蒙提详细讨论了纳米技术在上述几个方面引发的种种问题和困境^[4]。同年, 格尔克讨论了最近两年内纳米技术公众参与计划的成果和意义, 引发了有关风险和监管的激烈讨论^[5]; 2019 年中下旬美国政府问责局出版的报告指出, 由一些联邦机构资助的关键研究领域涉及由于暴露纳米级材料而可能导致的潜在环境、健康和安全(EHS)风险。通过问责调查发现^[6], 由五个联邦机构认定的与 EHS 相关的 119

个项目中,有 22 个项目并未专注于确定纳米技术在多大程度上构成 EHS 风险。相反,许多项目的重点是探索如何利用纳米技术来补救环境损害或检测各种危害。

与其他伦理、社会风险研究相比,国内学者对纳米技术的风险效应总体关注度不够高。目前,有关纳米技术的社会风险讨论主要集中在对纳米技术未来应用的宏观性反思上。1999 年,刘益东提出致毁知识概念,以其为研究对象开展包括纳米技术风险在内的科技重大风险研究,并提出了解决方案;2006 年至 2011 年期间,邱仁宗、曹南燕、费多益、王国豫、李三虎、刘松涛等学者纷纷出版论文、著作以呼吁人们关注纳米技术伦理研究的必要性和重要性。自 2012 年始,国内部分理工大学开始与国外相关机构合作组织“科技伦理研究联盟”,并每年一次举行以“负责任创新”为主题的国际研讨会,会议期间,梅亮系统介绍了责任式创新的产生背景、内涵、理论基础与分析方法,并以纳米科技与人工智能的实践开展进行对比分析,突出强调了科技创新的本质目的为社会满意而非粗放发展,为负责任创新提供了相关政策意见^[7]。

赵宇亮院士认为:“利用纳米技术造福人类的同时,如何评估其安全性并降低潜在的风险,已经成为各国政府和科学界高度关注的一个重要研究内容。中国科学家在纳米安全性领域起步早,做了许多基础研究工作,在一些方面走在国际前列,当然还有大量工作需要进一步研究。总之,国际社会纳米伦理与社会研究从 2001 年开始迅速发展,但中国的研究则刚刚开始,在国际上几乎没有‘声音’,这与中国纳米科学研究在国际上的领先地位是极其不相称的”^[8]。当前,国内外关于纳米科技风险的研究,虽涉及面较广,但仍存在明显不足。经过分析和归纳概括,笔者认为主要存在以下三方面的问题:首先,关于纳米科技风险的伦理、社会理论较少,当前主要成果集中在纳米毒性、纳米科技管理、纳米技术伦理讨

论等领域;其次,新兴科技风险治理本来就难度极大,而其中的纳米技术又呈现出涉及和渗透面非常广泛、边界不清的特点,极具特殊性,因此对纳米技术风险治理更具挑战;最后,在认识上,统一的“纳米伦理治理”尚未形成,用以真正规约纳米技术发展,管理纳米科技良性发展的指导性意见也尚未形成。当前,关于纳米科技风险的研究仍为“单兵作战”模式,从相关数据库检索整理发现,伦理、社会领域的风险研究尚未形成规模,哲学层次的反思尤其欠缺,如已有研究仍主要将纳米技术的风险视为众多风险之一,即要么视为未来风险的一种进行呼吁,要么视为当前风险的一种进行“边发展、边纠错”,以科技重大风险视角来理解和研究纳米技术风险已迫在眉睫。

基于上述讨论,本文通过对纳米与人类生活、纳米与环境、及其与军事三个方面进行案例剖析,综合研判国内外纳米风险相关理论研究,提出科技重大风险视域下,只有人类完成关于纳米科技发展认知意义上的转型,通过科技革命和产业革命在遏制致毁知识增长的同时建立起一种新的自我纠错机制,由纳米技术带来的巨大社会风险才可能被化解,人类的可持续发展才能够实现。

2 纳米技术风险的主要分布领域及案例

纳米技术风险的本质是其理化特性的复杂性引发的不可确定性,然而,虽其在诸多问题上仍充满悬念,由其主导的相关产品却已开始充斥在人类生活的方方面面,并进而走向了更广阔的自然。本文从人类生活、自然及纳米武器三个方面探讨当前纳米技术的发展与应用,通过三个不同的案例,探究纳米技术在当下的应用图景,在科技重大风险视域中分析其已有和潜在的风险,走出“看似重视风险治理、实则放行”的传统认知模式,为步入真正贴合高科技巨大风险的思维模式和规约范式提供路径研探。

2.1 无处不在的银纳米颗粒

银纳米颗粒 (Silver nanoparticles) 就是将粒径做到纳米级的金属银单质, 一般这样的纳米颗粒在 1~100nm 之间。虽其经常被描述为“银”, 但事实上由于其理化特性, 其大部分由氧化银组成。常用的银纳米颗粒为球形, 但也有制成金刚石、八角形甚至薄片等形状的。纳米银颗粒一般粒径在 25 纳米左右, 其对常见的大肠杆菌、淋球菌、沙眼衣原体等数十种致病微生物均有明显的抑制和灭杀作用, 并且不会产生耐药性。随着其粒径变小, 其杀菌性能也会越强。

目前, 无论是“抗菌防臭、足够舒适”的高科技棉袜还是自带除臭、杀菌本领的高档洗衣机, 甚至是人们给婴儿使用的具备抗菌功能的奶瓶、玩具、牙刷、牙膏、空气净化器、放在屋顶的太阳能电池板、抗菌类医药及医疗器械和众多军迷爱好者关注的隐形飞机实际上无不是新型纳米材料银纳米颗粒参与的杰作。银纳米颗粒充斥在服装和个人护理产品、医疗和制药行业以及食品等行业, 已经与人类生活密切交织在一起。

目前已有充分的文献证据表明银纳米颗粒对人体及环境具有毒性作用, 国际、国内目前已开展关于其释放及相关毒性的研究^[9]。研究表明, 银纳米颗粒的毒性归因于它们在细胞中释放的银离子, 实验发现, 银纳米颗粒和银离子都具有相似的细胞毒性^[10], 银纳米颗粒不仅具有穿过膜与内部结构相互作用的能力, 而且还具有被沉积在膜内的能力。膜中的银纳米颗粒沉积会影响溶质的调节、蛋白质交换和细胞识别功能。暴露于银纳米颗粒环境往往会导致“炎症、氧化、遗传毒性和细胞毒性后果”。银纳米颗粒主要在肝脏中积累^[11], 但也被证明对包括大脑在内的其他器官有毒^[12]。在组织培养的人类细胞中, 科学家发现纳米银会导致自由基的形成, 相关研究已经引起人们对银纳米颗粒潜在健康危害的担忧^[13]。

影响比较大的银纳米颗粒毒性事件是 Silzone

心脏瓣膜事件: 1997 年, St. Jude Medical 公司发布了带有镀银缝制袖口 (使用离子束辅助沉积涂层) 的机械心脏瓣膜^[14]。该瓣膜旨在减少心内膜炎的发生。该阀门已获批准在加拿大、欧洲、美国等大多数市场上销售。然而, 后来的研究表明该瓣膜可阻止组织向内生长, 引起瓣周漏、瓣膜松动, 甚至在最坏的情况下需对使用者重新进行瓣膜手术。糟糕的是, 此时该公司已完成 36000 个心脏瓣膜的销售量, 事件发生后, St. Jude 停产并自愿召回了该阀门, 并对相应受到影响的用户进行了高额的赔偿。

2.2 无处不在的碳纳米管和石墨烯的纳米材料

碳纳米管 (Carbon Nanotube, 缩写为 CNT) 是在 1991 年 1 月由“日本筑波 NEC 实验室的物理学家饭岛澄男使用高分辨透射电子显微镜从电弧法生产碳纤维的产物中发现的。它是一种管状的碳分子, 管上每个碳原子采取 sp^2 杂化, 相互之间以碳-碳 σ 键结合起来, 形成由六边形组成的蜂窝状结构作为碳纳米管的骨架; 石墨烯 (Graphene) 是一种由碳原子以 sp^2 杂化轨道组成六角型呈蜂巢晶格的平面薄膜, 只有一个碳原子厚度的二维材料。”^[15]

根据题为“确保所有人的用水和卫生设施的可用性和可持续管理”的可持续发展目标^[16], 联合国成员国一致同意尽快致力于将目前未经处理的废水比例减半的决议^[17]。根据国际水协会 (International Water Association) 2018 年的一份报告^[18], 目前产生的所有废水中约有 80% 未经任何形式的处理或净化就直接排放到世界水道中。也就是说, 这些废水 (其中一些未经处理的工业废水) 可以自由地混入河流和海洋中, 对环境、农业以及依赖天然水源的人们的健康都是有害的。

由于存在这些潜在风险, 并且出于实现可持续发展目标的义务, 世界各地的研究人员正在努力识别对各地水道的任何新的或不可预见的危

害,并研究处理污染废水和工业废水的新的有效方法。然而,研究人员惊讶地发现,长期被人们用来过滤和净化水资源的拥有巨大潜力的有用工具——碳纳米管纳米材料却同时也是工业废水中新兴的重要污染物之一。

同时,碳纳米管已被应用于开发新型的触控柔性屏,由于其具有柔性、抗干扰、防水、耐敲击与刮擦等特性,目前已被制作为可以形成曲面的触控荧幕,同时,其也具有高度的潜力可应用于穿戴式装置、智慧家具等产品;而鉴于石墨烯纳米材料展现出的特性,其可作为更好的半导体材料、透明导电电极、导热材料/热界面材料、场发射源及真空电子器件、超级电容器、海水淡化、太阳能电池、石墨烯生物器件、甚至是石墨烯抗菌物质(自动除去气味的鞋子,或保存食品新鲜的包装,类似于上节提到的银纳米材料)和应用于抗癌治疗(氧化石墨烯,石墨烯的衍生化合物)等。

截至目前,人类生活中已有许多利用碳纳米管和石墨烯的产品。这些纳米材料的产量估计为每年数百吨^[19]。毫无疑问,随着CNT产量的增长必然也导致含CNT的工业废水数量增加,如上所述,使用常规方法很难对其进行处理和纯化。碳纳米管在化学上非常稳定,通常只能使用强酸或高温下的氧化处理才能降解。

最新的研究虽已表明,由纳米材料造成的污染,也可以通过其他纳米材料甚至是上述纳米材料来进行去除和消解,然而实际情况是其实际操作和材料本身还要造成多大的污染,目前还无法估量。鉴于目前对纳米安全的材料毒性检测手段的欠缺和不完备,加强纳米实验室的安全化建设,提高实验室工作人员的安全意识就显得非常重要^[20],可以预见的是,人类将不可避免地要面对一种更加难以对付的环境污染——纳米材料污染。

2.3 前程未卜的应用——纳米机器人

纳米机器人学(nanorobotics)是建造纳米

(10^{-9} 米)级别机器或者机器人的新兴学科。更具体来说,纳米机器人学指的是设计和建造由纳米或者分子级别的成分构成的、大小在0.1~10微米的纳米机器人(nanorobots)的纳米技术工程科学(纳米机器人是一个当前正处于研发状态的设备,英文为nanorobots,nanoids,nanites,nanomachines或者nanomites)。因此,纳米机器人的尺度问题使得其很难实现体外的定位与精确操控,而如果一旦发生失控甚至“丢失”等情况,后果不堪设想。据中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所官网2019年9月30日的报道,美国科学家已宣布,在纳米机器人领域有一项重大科技突破:借助光声断层成像技术,实时控制纳米机器人,让它们准确抵达人体某个部位(比如病人的肠道恶性肿瘤处),进而让纳米机器人实现药物递送,或进行智能微手术。

这一技术的突破,虽可能给医疗领域带来一场变革,但同时,纳米机器人也将作为一种可以和纳米级别物体进行精确交互的机器人,或者是一种能够以纳米级精度制造的机器人来实施纳米操作,将会接管我们人类的身体甚至是整个世界;不止如此,据中国科学院官网“纳米机器人:于细微处见神奇”报道,各主要军事大国正在积极进行军用纳米机器人的研发,并已成功研制出数十种纳米机器人用的元器件;纳米机器人部队将在一些实验室或生产线整装待发。利用纳米技术具有其他技术难以比拟的信息存储、传输与处理能力,科学家配备微型导航系统,研制成功了机动性好、隐蔽性和摧毁能力强的“纳米导弹”。“美国陆军太空与导弹防御司令部/陆军战略司令部于2010年研制成功了多用途纳米导弹系统助推器,Dynetics公司于2010年7月进行了多用途纳米导弹系统助推器的一系列点火试验”^[21]。

可以预见的是,不论是纳米机器人作为手术刀“治病救人”,还是纳米机器人作为武器“摧毁人类”,人类的纳米技术发展之路都像是在和魔鬼谈判、在刀尖上跳舞,必须时时如履薄冰,谨慎

小心, 稍有不慎, 留给人类的可能就是前所未有的灾难!

3 纳米技术的风险特性及对策研究

由“美国国家科学基金会(NSF)和美国商务部(DOS)共同资助的研究报告《聚合四大科技, 提高人类能力》指出, 科学和技术的聚合始于纳米尺度的综合, 它创造了大量的机遇, 对人类发展而言, 具有个人、社会和历史各方面的巨大影响”^[22]。那么, 作为四大科技之一的纳米技术具备怎样的风险特性呢?

3.1 纳米技术的风险特性

我们知道, 风险是“对发生负面影响的可能性和强度的一种综合测量”^[23], 纳米技术风险也不例外, 从前面的案例中我们可以预见, 纳米技术必将给健康、环境、社会、伦理和军事等方面带来不可预知甚至是不可估量的风险。如潘多拉魔盒一般, 纳米技术风险由于其种种不可思议的特性变得难以捉摸, 而造成这样的不确定性主要是因为纳米技术本身是多学科、多领域集合的产物, 同时, 也正是由于纳米技术跨学科的特点, 决定了要想做出合理适度的发展纳米技术的明智决策是困难甚至是不可能的。

加拿大萨斯卡彻温大学的社会学教授米塔提出“安全比后悔好”(better safe than sorry)的方法, 他认为, 预防应该是放在首位的, 不识别和限制严重的风险(比如失控的复制)必将付出高昂的代价, 而若要实现真正的长治久安, 良药在于形成良好的应对机制, 即调动不同社会角色共同为同一目标协调合作, 而不是自上而下的权威和制裁。

国内长期致力于科技重大风险研究的刘益东研究员认为, “人类文明的出现和发展依靠两大基本条件: 一是自然条件; 二是知识条件。对前者的滥用、破坏引发了环境保护与可持续发展的概

念、研究领域及相关行动; 对后者的误用, 特别是对后者中影响最大的科技知识的持续增长和误用、滥用却没有引起足够的重视, 其中最突出的一点是至今人们对科技知识增长的不可逆性和科技正负效应不可抵消的意义还缺乏基本的认识和重视。这种忽视表现为一般很少有人注意到科技知识增长具有不可逆转的特点, 而那些发现了这一特点的学者也没有认识到它对人类生存、发展所具有的生死攸关的意义和将要造成的毁灭性后果。”通过分析、论证, 他指出, “在当代社会和科技发展的条件下, 科技知识增长已经失控, 因此要转变发展方式。”^[24]

纳米技术的相关知识显然也符合上述规律, 即纳米知识的增长面临失控的危险, 原因如下。

(1) 当下人类文明已有的伦理及法律已落后于当前科技尤其是纳米技术的发展, 以纳米技术为代表的高科技发展对传统伦理和法律带来的挑战已迫使人们必须对其进行彻底的反思, 以期能尽快形成相关伦理规范和治理法规。

(2) 由于纳米技术本身的不确定性, 各国虽对纳米技术出台了相应的发展指导方针, 却很少有国家出台针对纳米技术威胁的相应预防和补偿措施。比如我国虽很早就提出了“国家纳米科技发展纲要(2001~2010)”、《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》, 然而, 截至目前, 却尚未有任何应对纳米技术风险(尤其是纳米毒性和纳米机器人)的相关预防和补偿措施出台, 有关纳米技术的预防和管控已经远远落后其发展的需要了。

(3) 纳米技术及其相关应用, 已经深入到人们生活的方方面面, 面对政府防控机制的缺失, 出现判断失误(尤其在面临高复杂性的纳米科技)而延误防治的可能性正逐步加剧, 再加上与之相关的立法不足甚至是立法空白, 更导致纳米技术的风险防控乏力, 从而很难实现有效的规约和风险治理。

3.2 科技风险视域下的纳米科技发展转型

当前无论是“风险社会理论”还是“负责任创新理论”，都无法彻底避开以上误区，同时，绝大多数的人们尚未从科技乐观的思潮中走出来，对科技发展的容忍度较高，风险意识薄弱，而这也已不仅是科技风险科普能解决的问题了。刘孝廷教授指出，当前科技发展亟需一场科技风险视域下的科技转型，“修修补补”已经于事无补，人类若想长治久安，在面临新型科技尤其是像纳米技术这样复杂性风险难以预测的高科技发展时，应当机立断，做出新的改变，以适应即将到来的种种可能风险^[25]。

“科学转型是指从现行的科学到新类型科学的转变，这种转型的最直接、最重要的目的就是遏制致毁知识的增长，建立起一种新的自我纠错机制，即能够靠科学自身的力量纠正科学的不合理发展与不合理应用的错误，此举生死攸关。为此，必须对现行科学的一些基本观念、学科建制、理论结构、动力机制、评价标准以及科学与经济、社会的关系等进行重大改革或重建，实现从粗放式创新向可持续创新的大转型。”^[26]

纳米科技转型应首先强调其安全性，即“better safe than sorry”原则，传统法兰克福学派对技术的批判无论是马尔库塞的“异化理论”还是哈贝马斯的“商谈伦理”，事实上依旧不能应对当前纳米高科技所带来的伦理和法律失灵问题，这就如同核武器诞生以前，一切有关冷兵器的规约面对足以毁灭人类乃至地球的核弹，都变成了一张废纸。值得注意的是，纳米武器（如纳米机器人、纳米炸弹等）虽目前已开始陆续成为现代战争中出奇制胜的“关键”，然而迄今为止，联合国却尚未针对此出台相应的如生物、核武器公约一样的纳米武器公约，这足以证明，人们对纳米科技所带来的风险依旧持观望态度而未充分意识到其巨大的威胁，这同时也证明，以往针对“风险”的防范和管控体系已经处于失灵的状态。

刘益东提出的“动车困境”和科技伦理法律失灵对上述失灵状态给出了深刻分析，即科技发展犹如多轮驱动的动车一样，“当发现行进道路和前方危机四伏的情况下，不是先暂停，而是边运行、边争论、边纠错，只有迈过‘达成共识、预期共赢、共同行动、条件齐备’这四道关坎，才可能使动车或停运、或变速、或转向，条件十分苛刻，所以要纠正重大错误极其困难”^[27]，世界上各国法律各异，空白很多，公海和荒岛更难监控，因此科技伦理法律无法约束世界上所有科技专家和实验室，科技狂人与黑客、军方武器研发都不受约束，对于容易转化为恐怖分子所用的技术，企业实验室也不会束手束脚^[28]。因此，复杂性极高、难以预料和防控的纳米高科技发展如果深陷“动车困境”，等完全迈过“达成共识、预期共赢、共同行动、条件齐备”四道关卡之时，人类可能已经万劫不复了。

由此可见，纳米技术风险治理面临严峻挑战，当今世界，分布式发展导致“躲在角落里暗暗发展”的科技是根本无法禁止的，体制内的纳米科技也无法得到有效监管和正确引导，后果不堪设想。

因此，纳米技术的发展转型本质上首先必须使全人类进行一次认知意义上的转型，即一场本体论变革，一种和核弹一样可以毁灭世界但却看不见摸不着的东西已经诞生，我们必须对我们的科技发展进行重大转型。就如同发展量子力学以解决牛顿力学无法照顾到的地方一样，我们必须有选择性地发展技术，即我们应该设法掌控技术发展的顺序。我们应该努力延缓有害技术的发展及应用，同时加快有利技术的发展，尤其是那些能实施防控的技术。有关纳米高科技发展的，即使其是应用于生活和工作而非军事的，也都应安全先行，增加评估的专业性和时长，尽最大可能确保其不至于滥用，而涉及军事的，凡是属于大规模杀伤性武器范围的，必须坚决予以禁止，尽

快制定纳米武器国际公约, 纳米武器研发必须接受公约的严格监管。纳米技术军事应用的直接威胁, 纳米技术国际竞争的间接威胁等要求纳米技术的创新和研发必须从一开始就考虑避免危害生态环境、人类安全等问题, 推动国家安全导向的纳米技术研发和应用发展^[29]。

4 结论

综上所述, 笔者认为, 当前纳米技术风险治理面临极为严峻的挑战, 需要重新审视相关纳米技术风险理论。

(1) 纳米技术的社会风险问题虽目前尚不能在科学界达成确定性共识, 但纳米技术的发展势必给人类社会带来风险甚至重大风险方面已经达成共识。

(2) 由于一定的纳米生态毒性效应和纳米技术风险已经引起重视, 面对国家和社会需求, 组织开展跨学科的合作以在纳米技术危害到来之前推出有效的预防、规范措施, 最大可能地降低纳米技术的社会风险, 增加我国纳米科技发展的可持续性, 已成为纳米技术发展绕不开的前提。

(3) 由于纳米科技的复杂性和不可确定性, 既往的伦理及法律难以奏效, 目前甚至都尚未制定纳米武器公约, 而纳米武器时代已经到来, 我们不能再以往认知方式来理解和看待纳米高科技的发展与应用, 否则类似 Grey Goo (一个假设的世界末日情节, 涉及分子纳米技术, 其中失控的自我复制机器将消耗在地球上的所有生物量, 同时建立更多的自己, 这一相关情景被称为 Ecophagy“吞噬环境”, 更确切地说是“吞噬住宅”。最初假设是机器会通过“被设计”而具有这种能力, 虽然普遍认为机器可能“意外地”获得这种能力) 这样的世界末日迟早会到来。当前最为紧迫的事情便是充分意识到这一危机, 并尽快制定合适的风险规约理论及应对举措来促使纳米科技在安全的范围内发展。

总之, 危机引发革命, 科技危机引发科学革

命、技术革命, 进而引发产业革命。真正破解纳米技术风险, 需要一场科技革命与产业革命以实现当前科技转型及技术转型。只有以受控技术崛起为特征的新技术革命和以智库与文创产业崛起为特征的新产业革命为导向和目标的技术发展^[26], 才能真正化解纳米技术带来的巨大社会风险, 让纳米技术这一用途极其广泛的新兴技术造福社会, 实现人类社会的可持续发展。

参考文献

- [1] 曹南燕, 胡明艳. 纳米技术的 ELSI 研究[J]. 科学与社会, 2011(4): 100.
- [2] Schummer J, Baird D. Nanotechnology Challenges: Implications for Philosophy, Ethics and Society[M]. World Scientific Publishing Company, 2006.
- [3] Allhoff F, Lin P. Nanotechnology & Society: Current and Emerging Ethical Issues[M]. Springer, 2008.
- [4] Monte L A D. Nanoweapons: A Growing Threat to Humanity[M]. Potomac Books, 2017.
- [5] Gehrke P J. Nano-Publics: Communicating Nanotechnology Applications, Risks, and Regulations[M]. Palgrave Pivot, 2017.
- [6] Government Accountability Office, GAO. Nanotechnology: Better Guidance Is Needed to Ensure Accurate Reporting of Federal Research Focused on Environmental, Health, and Safety Risks: GAO-08-402[M]. BiblioGov, 2013.
- [7] 梅亮. 责任式创新: 科技进步与发展永续的选择[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- [8] 侯海燕, 王国豫, 等. 国外纳米技术伦理与社会研究的兴起与发展[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2011(4): 352.
- [9] AshRani P V, Grace L K M, Prakash H M, Suresh V. Cytotoxicity and Genotoxicity of Silver Nanoparticles in Human Cells[J]. ACS Nano, 2008, 3(2): 279-290.
- [10] Miura N, Shinohara Y. Cytotoxic effect and apoptosis induction by silver nanoparticles in HeLa cells[J]. Biochem Biophys Res Commun., 2009, 390(3): 733-737.
- [11] Johnston H J, Hutchison G, Christensen F M, et al. A review of the in vivo and in vitro toxicity of silver and gold particulates: particle attributes and biological mechanisms responsible for the observed toxicity[J]. Crit. Rev. Toxicol., 2010, 40(4): 328-346.
- [12] Ahamed M, Alsalhi M S, Siddiqui M K. Silver nanoparticle applications and human health[J]. Clin. Chim. Acta.,

- 2010, 411(23-24): 1841-1848.
- [13] Verano-Braga T, Miethling-Graff R, Wojdyla K, et al. Insights into the Cellular Response Triggered by Silver Nanoparticles Using Quantitative Proteomics[J]. ACS Nano, 2014, 8(3): 2161-2175.
- [14] Horstkotte D, Bergemann R. Thrombogenicity of the St. Jude medical prosthesis with and without silzone-coated sewing cuffs[J]. The Annals of Thoracic Surgery, 2001, 71(3): 1065.
- [15] 田 玫, 王 博. 牺牲模板法制备空心结构钯纳米粒子/石墨烯复合体及其甲酸电氧化性能研究[J]. 无机化学学报, 2014(12): 2747.
- [16] Untreated Wastewater: a Growing Danger[EB/OL]. 2017. [2020-06-01]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa75d1>.
- [17] Goal 6: Sustainable Development Knowledge Platform. [EB/OL]. [2020-06-01]. <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg6>.
- [18] Water Use: Wastewater Treatment [EB/OL]. [2020-06-01]. <https://water.usgs.gov/edu/wuww.html>.
- [19] Zion Market Research. Carbon Nanotubes Market, By Type (Single-Walled Nanotubes (SWNT), Multi-Walled Nanotubes (MWNT)) for Polymers, Electrical and Electronics, Energy, Composites and Other Applications: Global Industry Perspective, Comprehensive Analysis, and Forecast, 2016–2021[EB/OL]. [2020-06-01]. <https://www.zionmarketresearch.com/report/carbon-nanotubes-market>.
- [20] 王國豫, 張 燦, 李曉曦. 纳米实验室的安全文化现状与对策[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2011(4): 375.
- [21] 姜 山, 等. 纳米[M]. 北京: 科学普及出版社(中国科学院科学传播系列丛书), 2013: 211.
- [22] 白春礼. 纳米科技现在与未来[M]. 四川: 四川教育出版社, 2002: 8.
- [23] 王玉平. 科学技术发展的伦理问题研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2008: 189.
- [24] 刘益东. 试论科学技术知识增长的失控(上)[J]. 自然辩证法研究, 2002(4): 39-42.
- [25] 刘孝廷. 超越技术与进步——从核风险看人类发展文化的取向[J]. 山东科技大学学报(社会科学版), 2011(5): 7.
- [26] 刘益东. 粗放式创新向可持续创新的战略转型研究——科技重大风险研究 21 年[J]. 智库理论与实践, 2019(4): 75-78.
- [27] 刘益东. 对不准原理与动车困境: 人类已经丧失纠正重大错误的能力[J]. 未来与发展, 2011(12): 2.
- [28] 刘益东. 致毁知识与科技伦理失灵: 科技危机及其引发的智业革命[J]. 山东科技大学学报(社会科学版), 2018(6): 5-6.
- [29] 李三虎. 纳米技术: 国家安全的新边疆[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2011(4): 323.

Research on Risks and Countermeasures of Nanotechnology

Li Runhu

(Department of History of Science and Technology in the West, Institute for the History of Natural Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: With the rapid development of nanotechnology, its related risks have gradually emerged. Avoiding risks emerging due to the development of nanotechnology has become a topic of concern and has made the development of nanotechnology difficult. Based on comprehensive research and analysis of domestic and foreign nano-risk related theoretical studies, this paper proposes the prerequisites involved in and the inevitability of the transformation of nanotechnology. It discusses three aspects of major scientific and technological risks through case analysis, namely nanotechnology and human life, environment, and military. One of the prerequisites of the development and transformation of nanotechnology is cognitive transformation in human beings. The technological revolution and industrial revolution established a new self-correction mechanism that curbs the growth of destructive knowledge to resolve the problems resulting from the use of nanotechnology. It is a risk to mankind to fail to pursue the sustainable development of technology.

Key Words: nanotechnology; huge scientific risk; risks; self-correction mechanism; ruin-causing knowledge