

美国国家纳米技术计划评估及启示

汪凌勇, 董瑜

(中国科学院文献情报中心, 北京 100190)

摘要: 2020 年 4 月, 美国国家科学院、工程院和医学院公布了对“国家纳米技术计划”(NNI) 的最新评估报告《国家纳米技术计划 4 年一度的评估: 纳米科学、应用与商业化(预印版)》。本文介绍了此次评估的背景和主要目标、NNI 运作框架和管理协调机制、NNI 目标执行情况及效果与影响, 以及国家纳米技术委员会关于 NNI 未来优先领域方向和实现该优先领域目标的建议, 最后针对此次 NNI 评估提出了若干认识与思考。

关键词: 美国; 国家纳米技术计划; 纳米科学评估

中图分类号: G321 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2020.06.005

1 引言

1.1 评估背景

全球医药、食品、水、微电子、通信、国防和其他重要经济领域的进展正日益被纳米科学发现和纳米技术进展所推动, 这为美国持续聚焦并投资于纳米科技领域提供了正当和合理的依据。

相关例证表明, 作为高度跨学科的研究领域(事实上, 也是最重要的跨学科研究领域), 纳米技术过去一直具有而且未来仍将展现美好的发现和发明前景。在该领域早期工作的支持下, 纳米技术如今为日益广泛的具有重要经济意义的应用(包括纳米电子、显示器、催化剂、超强材料、能源储存、药物递送系统等)奠定了基础, 并正在为支撑美国国家安全的科技做出重要贡献。

其他国家诸如中国、日本和欧洲也对纳米科技大量投资, 导致纳米科技相关教育和劳动力培训及转化性研发活动在全球范围加速开展。在某些情况下, 这些国家已超过了美国联邦政府的投资水平和效率。以年度发表的该领域论文数、专利数、研

发投资额以及发表文章的科学家数量等诸多指标衡量, 全球顶级竞争者之间的差距均在缩小。特别是, 几乎在所有这些方面, 美国如今均落后于其他若干国家和地区。

1.2 评估的发起、目标与主要思路

考虑到“国家纳米技术计划”(NNI) 未来须将优先领域更好地置于确保经济繁荣、美国公民健康和国家安全, 应白宫科技政策办公室(OSTP)的要求, 美国国家纳米技术协调办公室(NNCO)委托国家科学院、工程院和医学院临时组建“国家纳米技术委员会”(以下简称委员会), 承担了 NNI 的本次评估和报告撰写工作。

委员会本次评估旨在提供一个重新设计和协调 NNI 的框架, 以提高 NNI 同国家研发优先领域的一致性; 扩大加速技术向相关市场转移的活动; 强化最先进的研发基础设施; 以及促进本国劳动力教育与培训。委员会认为, 美国要想充分收获纳米技术能够带来的各种经济和社会效益, 这些必需的选择。

委员会被要求评估自 2003 年 NNI 获授权以来

第一作者简介: 汪凌勇(1967—), 男, 副研究员, 硕士研究生导师, 主要研究方向为科技政策、科研评估。

通讯作者简介: 董瑜(1971—), 女, 副研究员, 硕士研究生导师, 主要研究方向为科技政策。邮箱: dongy@mail.las.ac.cn

收稿日期: 2020-05-19

美国的纳米科技成就与进展,包括当前纳米技术对美国经济繁荣和国家安全的影响。在评估的基础上,委员会须考虑 NNI 是否应继续及怎样继续下去的问题。为此,委员会以国际比较作为评估的主要方法、策略和思路,试图从以下两个方面对 NNI 进行评估并给出答案:(1)绝对而言,美国是否从 NNI 获得了足够的投资收益?(2)相比较而言,其他国家和地区支持纳米技术的投资和战略是否比美国更有成效?

2 评估的主要内容

评估主要围绕 NNI 执行进展、效果与影响进行,与此同时,评估亦对 NNI 目前的运作框架和管理协调机制及其存在的问题进行了分析,目的在于更好地完善计划的后期管理框架与协调机制。

2.1 对 NNI 管理的评估

2.1.1 NNI 运作框架和管理协调机制

NNI 于 2000 年 1 月宣布成立,2003 年《21 世纪纳米技术研究与发展法案》明确授予相关联邦参与部门或机构(以下简称部门)纳米技术研发领域的拨款权。作为一个目前跨涉 20 个联邦部门的纳米技术相关研发活动的大型政府投资计划,需要强调指出的是,国会并没有为该计划提供单独列支、独立于各联邦部门的拨款,而是由各参与部门在其现有预算(这个预算包含 NNI 活动所需的资金)的支持下,通过 NNI 管理层的协调将相关经费用于执行 NNI 目标。实际上,NNI 的职责在于协调参与部门单独或合作开展纳米技术相关活动。也就是说,美国学术界、政府和工业实验室从事的纳米科技相关研发乃是源自参与部门并由这些部门提供支持,而不是源自 NNI 本身。作为一个跨机构协调计划,NNI 的职责主要体现在,通过与各参与部门的联系和同美国国家科技委员会的互动,对联邦预算制定和战略规划提供信息和施加影响。作为一个协调者,NNI 发挥聚拢所需知识和人才的作用,从而更好地推动纳米科技进展,并通过建立一个包含共同目标、优先领域和战略在内的框架来帮助每一个参与部门分配相关预算资源。这一运作框架同其他国家直接投资于计划的方式明显不同。

国家科技委员会纳米科学、工程与技术分委员会(NSET)和 NNCO 负责 NNI 的基础性协调工作。

OSTP 委托 NSET 对计划进行监管,NSET 成员是来自各参与部门的代表。NNCO 对 NSET 提供管理支持,主要包括:(1)为 NSET 提供技术和管理支持,包括多机构规划、预算和评估文件准备工作;(2)充当参与部门同学术界、工业界、专业协会和外国机构等联系的桥梁;(3)代表 NNI 提供公共宣传服务;(4)促进源于 NNI 活动的技术发明、创新和知识的早期应用;(5)开发、更新和维护面向公众的 NNI 网站。

2.1.2 主要管理成就、目前存在的问题与不足

报告指出,自 NNI 启动以来,NNCO 以很小的预算(其所有协调和交流活动每年花费低于 300 万美元)在提高美国在纳米科技领域的国际竞争力方面发挥了重要作用。NSET 推动建立和指导设计的“纳米技术签名计划”(NSIs)在联合相关联邦部门以共享知识和经验方面非常有效,同时高效确保了美国在关键纳米技术领域处于全球领导地位。NNI 其他显著成功的例子还包括服务于纳米学术研究的世界级设施网络的建立等。通过以上种种措施,NNCO 和 NSET 成功促进了若干跨机构的合作行动。

然而,报告同时指出,考虑到其他国家在纳米技术商业化方面的成功,美国必须重新思考其相关政策、投资和知识产权框架,以改善纳米技术知识产生、技术创新保护和产品开发与商业化的环境。目前,NNCO 已认识到这一挑战,并于 2019 年末建立了“纳米技术创业网络”(NEN)平台,通过论坛等形式帮助参与方共享推动纳米技术商业化的最佳实践和技术发展路径中的经验与教训,强化纳米技术同商业化途径之间的联系。委员会承认 NNCO 这一举措,但认为,NEN 平台目前所开展的活动在当下全球纳米科技高度竞争的环境下仍然是不够的。

另外,NSET 和 NNCO 相关经费由 NNI 最大的几个联邦参与部门共同承担。各参与部门所提供的支持与其纳米科技研发投入大致相称,而这个数据每年是由这些部门自己上报的。由此带来的问题是,参与部门上报纳米技术研发投入增多缺乏动机,因为如此将相应增加对 NSET 和 NNCO 的支持力度。报告指出,这是一种同其他国家和地区截然不同的协调模式,其他国家对纳米科技研发投入有直接的拨款和强健的投资协调结构,而美国目前的制度则

显得相对脆弱和缺乏灵活性, 特别是在当前全球竞争威胁日益加剧的环境下更突显这一缺陷。

2.2 对 NNI 执行、效果与影响的评估(含国际比较)

无论是在美国国内还是在海外, NNI 都被广泛认为是一个高度成功的跨学科、跨机构协调计划, 甚至被誉为美国当代此类行动中的最佳典范, 但评估表明, NNI 目前仍然存在一些问题, 特别是在商业化方面与其他国家相比明显不足。

2.2.1 NNI 4 大目标执行情况及效果

NNI 的目标自该计划设立以来未有改变, 包括:

(1) 推进世界级的纳米技术研发; (2) 促进新技术向具有商业化潜力和公共利益的产品转化; (3) 发展和维持教育资源、技能劳动力队伍以及动态的基础设施与工具; (4) 支持负责任的纳米技术研发。

委员会非常认同这些精心设计的目标。然而, 报告指出, 不是所有目标都得到了足够的关注、投资和很好的协调。报告对 NNI 执行这 4 大目标的情况和效果有如下评价: (1) 在目标 1 方面, 在其存在以来的头 10~12 年里, NNI 在推进世界级的纳米技术研发方面做得特别好, 尽管在纳米技术研发领导力方面美国如今无疑正面临其他许多国家和地区的挑战。(2) 在目标 2 方面, NNI 的相关活动、成效和影响则要小一些, 其全球竞争力表现应该也不如目标 1。(3) 在目标 3 方面, 尽管 NNI 无疑对扩大纳米技术劳动力培训做出了贡献, 但该计划没有制定一套发展适宜的劳动力队伍以满足目标 3 的国家战略。全球纳米技术竞争日趋激烈, 而国外和美国本土培养的科学家、工程师却越来越多地去往其他国家和地区工作, 这使美国面临日益严重的相关熟练研究人员和技术人员短缺的问题。此外, NNI 在建立必需的纳米科技基础设施方面也取得了成功, 但这些基础设施目前尚需得到维持和确保今后的进一步发展。(4) 最后, 在目标 4 方面, 委员会认为, NNI 做得特别好, 被认为是负责任的纳米技术研发及其相关国际合作的全球领导者。

2.2.2 NNI 总的成就与影响、存在的问题及相比其他国家的不足

报告指出, NNI 的成效和影响是切实可见的。NNI 支持了材料科学、新型装置设计、新的制造工艺等方面的进展, 而这些对于美国最近发起的意

推进新兴量子计算、量子传感、量子通信技术的“国家量子计划”(NQI) 具有不可或缺的重要意义。甚至可以说, NQI 正是美国以往纳米科技投资特别是 NNI 相关研究活动直接引发的结果。与此同时, NQI 还沿袭了与 NNI 相似的管理架构和运作规则。

报告同时指出, 虽然总的来说, 美国在纳米技术领域依然保持有力的竞争者地位, 然而, 将美国同其他国家进行比较, 则有越来越多的证据表明, 目前美国在纳米科技领域的竞争力总体在减弱。

尽管 NNI 早期取得了较大成功, 然而纳米科学领域出现的重要机会, 以及美国的战略需求, 在 NNI 启动以来已经发生了很大变化。特别是, 20 年前, 美国的核心机会是产生新知识和获得新材料以加深我们对纳米观现象的理解。报告指出, 对基础纳米科学研究的支持仍须继续, 但如今对美国而言, 更大的机会将来自在负责任的纳米产品的商业化这一背景下实现纳米科技的社会与经济效益。

然而, 相比其他国家, 美国在促进对商业化的协调及相关支持方面一直是较为迟缓的。其他国家已改变了对纳米科技的支持模式, 以实现负责任的开发和商业化这一核心目标。一些发达国家和新兴经济体在 NNI 建立的同时也发起了自己的计划, 并形成了多种支持机制, 这些机制在扩大计划规模和提高计划产出方面高度有效, 它们包括:

对最具创新性的基础科学研究与技术开发的聚焦性支持, 以及拉长稳定资助的周期, 以鼓励最有能力的技术人才进入纳米技术领域;

国家或地区支持的资助机构间灵活、高效的多种协调机制, 其目的是最大化基础性研究的影响, 推进在具有重要战略意义的地区相关社会问题的纳米技术应用与解决方案;

致力于应对社会挑战的成功的整合性研发活动, 它们具有高度跨学科性, 广泛涉及纳米使能材料、纳米结构、纳米装置和纳米系统;

相关机制的建立, 以促进政府-工业合作伙伴关系, 建立和滋润国家纳米技术生态系统, 加速具有潜能的纳米研发成果的商业化;

建立和维护先进纳米技术共享基础设施, 以支持基础与应用性科学、纳米技术产品的商业化和纳米技术使能系统与应用;

促进得到良好培训的纳米技术技能劳动力的快速增长，以满足不断变化但始终增长的高技术产业需求。

报告特别提及，欧洲微电子研究中心（IMEC）、法国微纳米技术创新园区（MINATEC）、日本筑波科学城以及中国的苏州纳米城都是颇具规模的商业化典范，并认为这些都比美国目前的做法在收获纳米科技研发的成果上效果更好。报告指出，美国在这方面竞争力的落后其后果显而易见，许多发端于美国的基础纳米科学进展正在美国之外被转化为社会与经济效益。例如，许多纳米材料的制造，如太阳能纳米材料，几乎已全部转移到国外。

此外，报告分析指出，美国目前缺乏系统的相关数据收集工作，特别是与其他国家相比更是如此，这使美国在许多情况下难于做到用社会和经济效益来衡量其基础纳米科学研究的投资回报，缺乏此类数据支持同时也妨碍了美国向公众宣传联邦政府投资于纳米科学研究的作用与收益。

2.2.3 中国的做法与成功经验

报告指出，中国无论是在相关论文的发表数量还是论文影响力方面均在全球纳米技术研发共同体中占据领先地位，中国专利数量的变化亦同其论文发表数量的变化趋势相似，从而确证了中国在纳米技术领域日益强化的领导地位。

中国在纳米技术领域年度出版物数量的快速增长同这些年来中国政府对纳米技术的高度重视和坚定承诺相吻合，其纳米技术研发产出与国家纳米技术的投资水平呈明显的正相关。

基于美国 and 所有拥有大型科技计划的国家所共有的信念，即纳米技术是未来国家经济发展、繁荣、健康和安全的基石，中国高度重视纳米技术并做出了大力发展纳米技术的决策。正如美国制定了 NNI，中国于 2000 年建立了国家纳米科技指导协调委员会。中国政府发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020）》将纳米科学定为 4 大基础研究领域之一。政府对纳米科技的高度重视和强力投资吸引了许多中国科学家进入纳米科学研究领域，也吸引了一些外国培养的中国研究人员返回中国。

截至 2015 年，中国“国家纳米重大科学研究计划”已投资 10 亿元人民币支持相关纳米技术项

目，这一投资规模相比美国要小很多。报告分析指出，这里面有中国执行研发的成本费用相对较低的因素，也可能因为中国的研发优先领域主题相比美国更为狭窄。报告认为，快速确定能为中国带来全球竞争优势的优先领域，然后非常高效地将资源集中到这些领域，这是中国纳米技术规划与协调行动的最典型特征。

3 评估结论与建议

3.1 评估的主要结论

报告的主要结论归结起来有两条：一是 NNI 应当继续；二是 NNI 应当更加重视纳米技术的商业化，以实现更大的经济和社会效益。

首先，美国在纳米技术领域依然保持有力的竞争者地位，但美国已不再是纳米技术领域无可争辩的研发领导者。报告指出，大团队科学与工程无疑是驱动所有先进经济体的引擎之关键元素，个体和小规模行动则不太可能实现全球竞争优势。一旦 NNI 中止，美国同时保持国家研究事业的广度和深度以聚焦于跨学科纳米技术挑战的能力将大为削弱，美国的国家竞争能力也将处于更大的风险。因此，报告认为，NNI 应当继续，但在其协调优先领域和运作的方法模式方面须做出重大调整，以确保美国在日益加剧的全球竞争中保持领导地位。

其次，委员会对于 NNI 对美国经济的价值一致持积极评价，但担心最近其他国家一些聚焦于技术、目标更加明确的新的商业化途径可能会产生更好的效果。考虑到美国在相关研究与商业化之间的发展不平衡以及丧失纳米技术领导地位对美国经济繁荣和国家安全的明显威胁，报告指出，NNI 应以更有效的方式来组织相关纳米技术研发，以加速纳米技术发现向更高技术准备度水平的转化，从而实现更佳的社会效益。报告相信 NNI 应做如下重新聚焦：建立创新型机制，以促进纳米技术快速商业化并实现由此带来的社会效益；与此同时，通过对基础性纳米科学研究、改善基础设施和扩大教育与培训等的积极、战略性投资重建美国的科学领导力。委员会没有给出具体的商业化模式建议，而是把这一任务交给了 NSET 和 NNCO。

3.2 国家纳米技术委员会关于 NNI 未来优先领域目标以及为实现此目标针对计划管理和参与部门的建议

报告的建议主要针对 NNI 未来优先领域目标及实现途径。首先, 报告为 NNI 提出了以下 3 大优先领域方向:

(1) 广泛提高纳米科技研发转化为经济、环境和社会效益的效率;

(2) 聚焦于利用纳米科技应对经过战略性选择的有关环境与社会挑战;

(3) 强化未来科学家和工程师队伍的补充与培养, 将重点有意识地放在加速技术转化上, 并强力投资于支撑基础科学和商业化的下一代基础设施, 以扩大和改善美国的国家纳米技术生态系统。

为实现上述优先领域目标, 报告针对 NSET、NNCO 和计划各参与部门提出了如下 5 条建议:

(1) NSET 和各参与部门应协调一致开展行动, 在联邦研发优先领域(目前包括安全、人工智能、量子信息科学、制造、生物基材料、水、气候变化、太空旅行、能源、医疗创新、食品与农业等)指导下, 提供负责任和可持续的基于纳米技术的解决方案;

(2) NSET 和 NNCO 应强化和扩展从实验室到市场的创新生态系统, 支持纳米技术研发从基础研究向产品的转化, 以确保美国竞争力;

(3) 各参与部门新的投资须强化和革新美国的制造与表征设施网络, 以维持美国的国际领导力;

(4) NSET、NNCO 和各参与部门应大力吸引并培养最好的学生参与纳米科技相关科学、技术、工程与数学(STEM)研究的各种活动, 通过为学生提供奖学金的各种公私合作伙伴关系, 确保多样化的世界级劳动力队伍;

(5) NNI 应通过 NSET 和 NNCO 继续担当其纳米技术研发协调的重要角色。NNCO 应得到充足的资源和适宜的人员配备, 以确保 NNI 的敏捷性和全球竞争力。NNCO 还须进一步加强扩大同非营利机构的合作和建立新的公私合作伙伴关系等方面的工作。

4 几点启示

对于 NNI 本次评估的做法和评估相关数据、

分析与结论, 提出以下粗浅看法和认识。

4.1 关于评估本身

首先, 此次评估是典型的绩效评价, 即目标结果式评价, 以目标为第一要旨, 以目标实现情况作为评价计划成功与否的准则。为此, NNI 针对计划设立之初确立的 4 大目标的执行情况及所取得的成就与进展逐一进行检查和评估, 体现了绩效评价不忘初衷的原则和精髓。

其次, 作为一个尚在执行中的计划, 对其管理的评估往往构成计划评估的重要内容。NNI 不但评价计划的进展和成就, 同时对计划运作框架和管理协调机制及其特点进行了总结, 对其主要管理机构 NSET、NNCO 的经费来源和由此产生的一些问题进行了分析, 以发现目前管理机制存在的不足, 从而在今后加以改进。这些都非一些简单罗列计划成就进展的总结表彰式评估可比的。

第三, 本次评估聚焦商业化主题, 反复强调美国在纳米技术研究与商业化之间的不平衡, 特别是相比其他国家(包括中国)在商业化方面的劣势与不足, 反映了美国目前的重心和指导性思维不是研发优势本身, 而是希望通过研发优势充分收获纳米技术能够带来的各种经济与社会效益。

4.2 关于大团队科学与工程的作用和必要性

与以往大科学(Big Science)更加强调经费的庞大、人员的规模和设施的昂贵相比, 报告中用的大团队(Big Team)科学与工程的概念更加强调相互间的协同作战和多部门、跨部门联合。NNI 虽不具有单列的、独立于各联邦部门的经费, 但作为一个称职的协调者, 其通过建立一个包含共同目标、优先领域和战略在内的框架, 帮助每一个联邦参与部门分配相关预算资源, 从而充分发挥了聚拢知识和人才的作用。报告声称, 大团队科学与工程是驱动所有先进经济体的引擎之关键元素, 而个体和小规模行动则不太可能实现全球竞争优势, 并认为一旦 NNI 中止, 美国同时保持国家研究事业的广度和深度以聚焦于跨学科纳米技术挑战的能力将大为削弱, 美国的国家竞争能力也将处于更大的风险。作为一个典型的多元分散型科技体制的国家, 美国尚且通过设立 NNI 这种计划和发展跨部门的协调机制来推动大团队科学与工程, 在中国发展和强化这种高度体现国家目标、更多服务于国际竞争力的

战略性、集成性研究，其作用和必要性毋庸置疑。

4.3 关于报告内中美比较部分有关中国的数据、分析与结论

报告表明，中国在纳米技术领域取得了举世公认的进步和成就，也在某种意义上证明了中国相关政策及研发投资的作用与高效率。中国聚焦于主题精炼的优先领域的做法及其强大的政策执行力也体现了中国在发展科学技术以实现国家目标方面的典型制度特征和某种竞争优势。

然而，我们却不可因已经取得并被竞争对手所承认的进步和成就而沾沾自喜，从而放慢前进的脚步。美国在纳米技术基础性研发方面依然保持非常强大的国际竞争力，在纳米技术的更多关键领域仍占据着世界领先地位。以在美国和欧洲专利局受理的纳米技术专利数量衡量，美国目前位居全球榜首。尽管我们在纳米技术商业化方面也取得了一定的成功（如苏州纳米城），但我们的研发优势还需

要更多地转化为我们的核心竞争力；我们的纳米技术基础性研究在聚焦的同时也需要注意保持一定的广度，它们是未来不可预知的知识发现的重要基础。

另外，纳米技术研发是我国的传统优势领域，甚至可以认为是最具优势的研發领域之一，但在其他更广泛的基础研究和高技术领域，中国的论文数量和高影响力论文能否并驾齐驱，相关研发与成果商业化能否齐头并进，这些都是依然极具不确定性和挑战的问题，需要借鉴和推广我们发展纳米技术的成功做法，也需要引入和吸收其他国家的先进经验。■

参考文献：

- [1] The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. A Quadrennial Review of the National Nanotechnology Initiative[EB/OL]. [2020-05-04]. <https://www.nap.edu/download/25729>.

A Review of the US National Nanotechnology Initiative and its Enlightenment

WANG Ling-yong, DONG Yu

(National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: The US National Academies of Sciences, Engineering and Medicine released its latest report A Quadrennial Review of the National Nanotechnology Initiative (NNI): Nanoscience, Applications, and Commercialization (Prepublication Copy) in April 2020. This paper introduces the background of the review and its primary purpose, the NNI framework and its coordination mechanism, the implementation of NNI goals, its results and impact, and suggestions of the Committee on National Nanotechnology Initiative about NNI future priorities and actions needed to meet these priorities. At last the paper puts forward some understandings and thinkings about this review.

Key words: the U.S.; Nanotechnology initiative; review