

美国国防高级研究计划局 2014—2023 财年预算的启示

王钊, 李文娟*, 王强

军事科学院战略评估咨询中心, 北京 100091

摘要 美国国防高级研究计划局(DARPA)作为美国颠覆性技术的孵化器,在美国国防科技创新中扮演着重要角色。通过分析 2014—2023 财年 DARPA 研究、开发、试验与鉴定(RDT&E)预算经费的发展和变化情况,明晰了美国国防前沿技术创新方向和布局:从横向阶段划分看,基础研究不再是预算近两年的布局重点,预算重心由基础研究向先期技术发展转移;从纵向项目配置看,预算呈现出持续布局前沿技术、推进新技术演示验证、助力“全域作战”体系建设等趋势;从投向的技术领域看,微电子、人工智能、通信与网络以及生物科技是 DARPA 近 2 年的研发重点。

关键词 DARPA; RDT&E 预算; 微电子; 人工智能; 通信与网络技术; 生物科技

2014 年 11 月,时任美国国防部长哈格尔在里根国防论坛上明确提出第 3 次“抵消战略”,即以创新军事技术和作战概念改变未来战局,维持美国军事优势。随后,美国国防部和各军兵种的研究机构开始不断强调发展新兴技术,争相提出新型作战概念。美国国防高级研究计划局(DARPA)作为国防部的重要研究机构,是第 3 次“抵消战略”的重要实施与进者,促成了互联网、GPS 系统、隐身飞机、激光武器、无人机、高超声速飞行器、弹道导弹防御系统、相控阵雷达等方向的重大创新,在前沿技术研

发布局、未来技术军事应用等方面取得显著成效。近年来,DARPA 相继启动“敏捷地月空间行动演示火箭”计划,委托通用原子公司设计空间推进小型核反应堆,以及洛克希德·马丁公司和蓝色起源公司开发采用核热推进系统的航天器,力求航天推进技术实现突破发展;开展 30 余项人工智能相关项目,涵盖网络攻击、可解释人工智能、人机融合、推理决策、频谱管理、深度伪造检测等方面,实现人工智能与军事作战应用深度融合,技术溢出成效初显;开展“量子孔径”(QA)项目,利用里德堡原子射

收稿日期:2022-06-11;修回日期:2022-11-10

作者简介:王钊,助理研究员,研究方向为国防科技评估,电子信箱:wz0531024@163.com;李文娟(通信作者),副研究员,研究方向为国防科技评估,电子信箱:liwj0915@126.com

引用格式:王钊,李文娟,王强. 美国国防高级研究计划局 2014—2023 财年预算的启示[J]. 科技导报, 2024, 42(2): 6-13; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.02.001

频传感器技术,开发量子传感射频天线,颠覆传统电磁信息感知机制;研发“天基高超声速和弹道跟踪空间传感器”(HBTSS),填补美国现有导弹预警架构体系中的空白;开展“个性化防护生物系统”(PPB)等项目^[1],创新军事医学研究、为军人作业和卫勤保障提供有力支撑。我国对 DARPA 的科研管理体制以及研究布局等议题一直保持着浓厚的研究兴趣,但现有研究大都集中在梳理 DARPA 在美国国防科技创新链中的地位^[2-5],仅有少数研究分析了 DARPA 科技项目的布局情况^[1,6],对其整体科研资金的投向和投量关注不够,不利于深入了解和掌握美国国防科技前沿布局。通过整理 2014—2023 财年 DARPA 研究、开发、试验与鉴定(RDT&E)经费数据^[7-16],梳理了预算投向和投量的变化情况,剖析了 DARPA 新兴技术研发重点和方向。

1 预算申请总体情况

DARPA 在每年第一季度会向美国国防部提出科研经费预算申请,旨在对新财年轻费支出进行系统规划。DARPA 的 RDT&E 经费预算申请包括 4 个预算活动阶段,依次为基础研究阶段、应用研究阶段、先期技术发展阶段和管理保障阶段。每个科研活动阶段细分为 3 个层次,由高到低依次为计划单元、项目群和子项目。基础研究预算支持信息、电子、数学、计算机和材料科学等领域的科学研究

和试验,探索这些技术的国防应用潜力。应用研究预算的目标是开发信息与通信、电子、生物等领域的新技术,使其广泛提升军事能力成为可能。先期技术发展预算的目标是开发、展示、评估革命性新技术或新系统,并大幅降低成本,使商业化生产成为可能,以满足当前和未来军事任务。管理保障经费为 DARPA 的行政费用提供资金支持。基础研究、应用研究、先期技术发展阶段是 DARPA 预算申请的重点。与陆、海、空三军技术研发部门相比,DARPA 的技术研发强调以军方未来潜在需求为目标,坚持以创新为唯一宗旨,始终把精力放在对未来的探索上,致力于发展高风险、高投入、高回报的颠覆性技术和系统。DARPA 每年将 30 亿~40 亿美元的预算分配给 200 多个研究项目,其经费占比不到美国国防部 RDT&E 预算的 4%。

2023 财年,DARPA 为 RDT&E 预算申请经费 41.19 亿美元,较美国国会 2014 财年申请经费增长 43.8%,但总体占国防部 RDT&E 预算的比例持续下降,从 2014 财年 4.5% 跌至 2023 财年的 3.2%,增速低于国防部 RDT&E 预算(图 1)。其中,基础研究申请经费从 2014 财年(3.65 亿美元)到 2023 财年(4.83 亿美元)有小幅增长,但占比总体下降,2023 财年基础研究经费仅占 RDT&E 预算 11.7%,占比创 10 年新低;应用研究申请经费连续 2 年上涨,2023 财年达到 16.51 亿美元,占总体预算 40.1%,近 10 年的占比先升后降;先期技术发展申请经费连

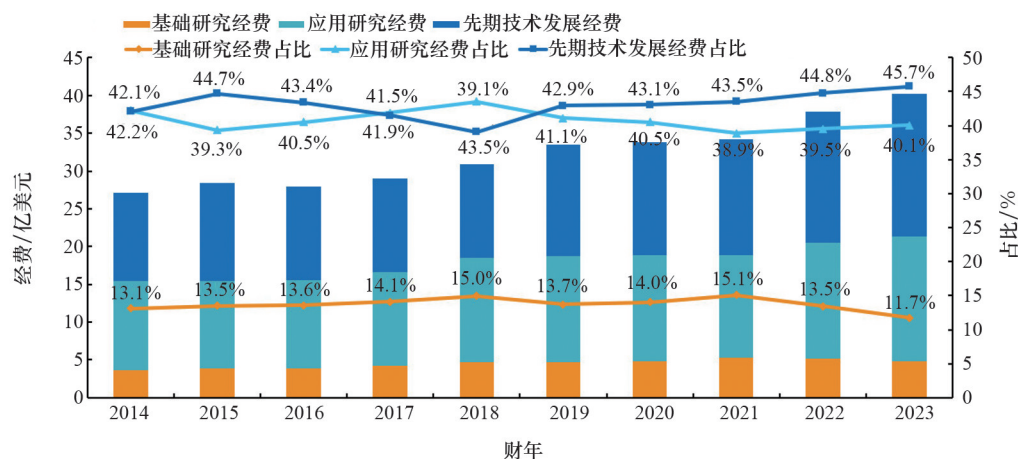


图 1 2014—2023 财年 DARPA 的 RDT&E 预算组成变化情况

续7年上涨,2023财年达到18.84亿美元,占总体预算45.7%,占比创10年新高。

在计划单元层面,电子技术、指挥、控制和通信系统、传感器技术等7个计划单元的预算连续3年增加(图2);电子技术和指挥、控制、通信系统等4

个计划单元2023财年预算增幅超过20%。网络中心战技术预算连续9年保持经费投量第一的位置,电子技术预算连续2年大幅上涨,经费投量跃居第二位(图2)。

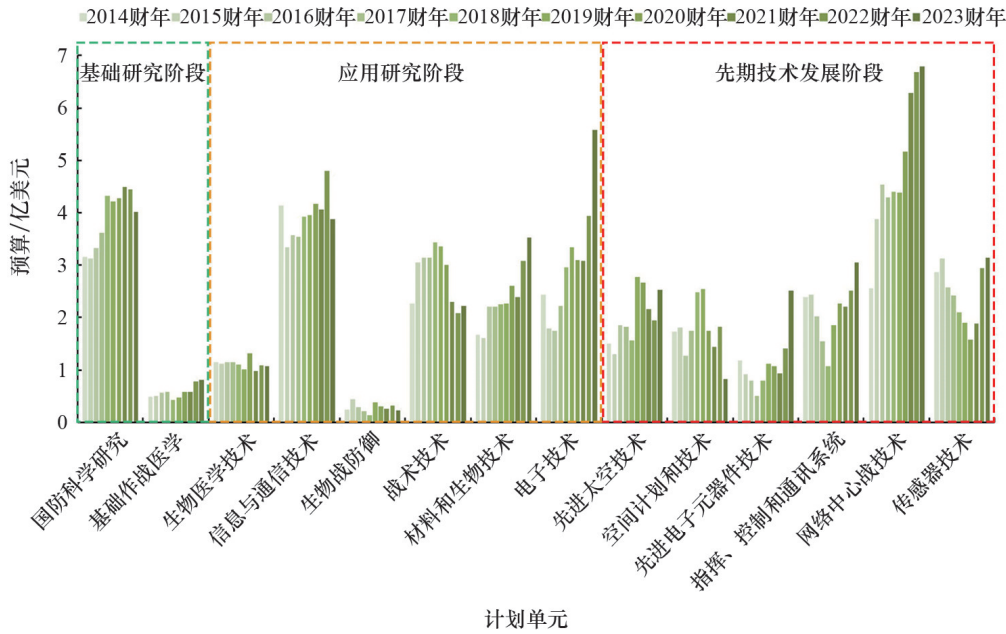


图2 2014—2023财年DARPA计划单元经费投量柱状图

在子项目层面,每3~5年呈现出应用研究新增经费占比大幅降低、先期技术发展新增经费大幅增加的趋势(图3)。

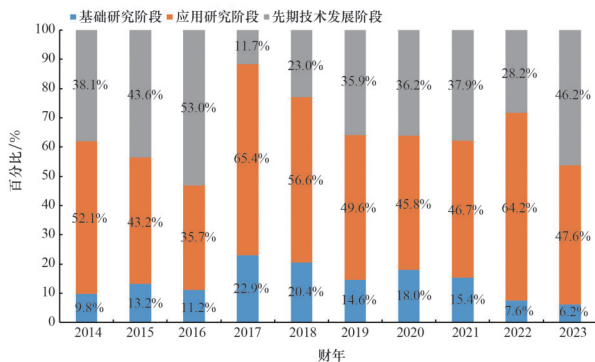


图3 2014—2023财年DARPA各研究阶段新增项目经费占比

2014—2016财年,应用研究经费新增项目经

费占比从52.1%逐年下降到35.7%,先期技术发展新增项目经费占比从38.1%逐年上升至53.0%;2017—2021财年,应用研究经费新增项目经费占比从65.4%逐年下降到49.6%,先期技术发展新增项目经费占比从11.7%逐年上升到35.9%;2022—2023财年,应用研究经费新增项目经费占比从64.2%逐年下降到47.6%,先期技术发展新增项目经费占比从28.2%逐年上升到46.2%。

2 科研经费投向分析

2.1 整体投向分析

从整体经费投向看,人工智能、微电子、生物科技、通信和网络和航空航天是DARPA较为关注的领域。2014年至今,DARPA对人工智能的投资是逐年递增的。人工智能经费在2018—2021财年间

快速增长,4年平均增长率约为55.9%,随后增长速度放缓。人工智能经费大幅增加与美国前任总统特朗普2019年签署行政命令启动“美国人工智能计划”的背景相吻合^[17]。最终,人工智能经费占比由2014财年的2.4%增加至2023财年的14.7%。微电子经费自2017财年开始稳定小幅增长,2023财年实现爆发式增长(增长率45.3%),经费占比28.3%,超越通信与网络领域、成为经费投量第一名。微电子经费增长的现实与DARPA自2017年起推行“电子复兴计划”(Electronics Resurgence Initiative, ERI)的背景相吻合^[18]。生物科技经费自2018财年起呈现稳定上涨态势,5年平均增长率为9.5%,与美国2018年提出《国家生物防御战略》的

背景基本吻合^[19],2023财年经费占比10.5%,10年间占比较为稳定。通信与网络经费近10年间波动上涨,但经费占比整体下降。2019财年之前,通信与网络经费持续削减,2020财年起经费实现增长,5年平均增长率为16.6%,2023财年经费占比24.3%,低于2014财年的30.8%。航空航天经费近10年间波动较大,2019财年经费最多,达到5.2亿美元,随后几年下降明显,2023财年为3.35亿美元,占比8.1%(图4)。DARPA航空航天经费的削减不代表该领域技术研发不重要,而是美国将航空航天领域的科研经费重点投向太空军和太空发展署等部门^[20]。

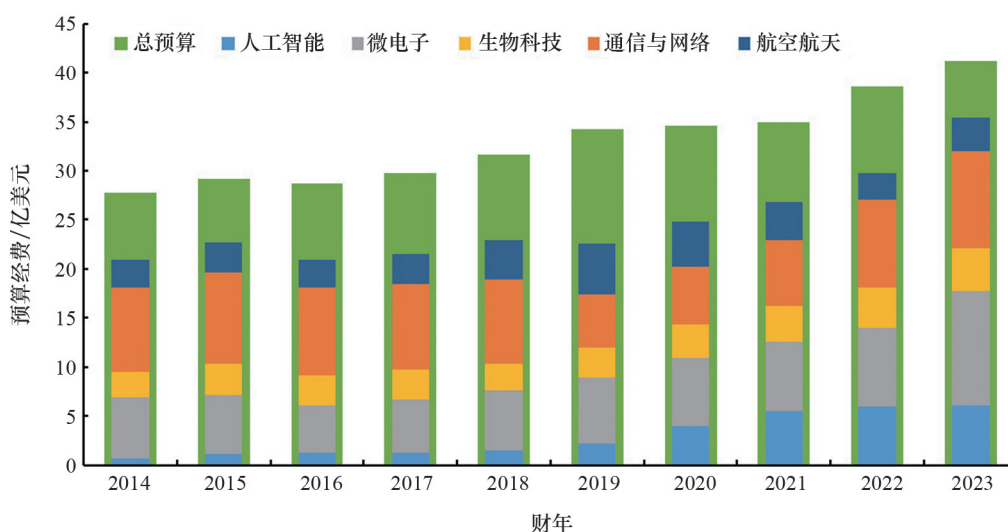


图4 2014—2023财年DARPA主要领域经费投入变化情况

2.2 基础研究阶段分析

从基础研究阶段的布局看,美国依然重视生物科技、人工智能和微电子领域。生物科技领域是DARPA近10年来基础研究阶段的投资重点之一,其基础研究经费体量在2020财年之前始终保持首位,直到被人工智能所超过。人工智能领域基础研究经费在2014财年仅约1472万美元,占比4.0%,但经过近10年持续增长,2023财年已跃居基础研究经费首位,经费达到约1.52亿美元,占比31.5%。微电子领域基础研究经费近10年波动较

大,2023财年达到历史新高,约为8783万美元,占据基础研究经费投量第三位,占比18.2%(图5)。

人工智能、生物科技和微电子领域子项目基础研究经费合计占比由2014财年的43.7%增长到2023财年的72.9%。2023财年,基础研究经费投量前10名的子项目中,人工智能、生物科技和微电子领域的子项目占比分别为30%、30%和20%。其中,“基础人工智能科学”子项目连续3年位居基础研究经费投量第一。此外,在2023财年DARPA基础研究经费削减的背景下,微电子和生物科技领域

子项目经费实现逆增长,分别增长了900万和937万美元。基础研究经费增量前10名的子项目中(新增项目除外),微电子和生物科技领域子项目占比超过60%。其中,“低温逻辑技术”“铁电计算”“分子系统和材料组成”等子项目经费翻倍增长。

2.3 应用研究阶段分析

从应用研究阶段的布局看,微电子、生物科技、人工智能以及通信与网络领域成为投入重点。通信与网络领域应用研究经费体量在2018财年之前保持首位,但10年来削减明显,经费占比由2014财年的35.7%下降至2023财年的13.5%(图5)。微电子、生物科技以及人工智能领域应用研究经费近10年增长明显。微电子领域应用研究经费逐年增长,于2019财年超过通信与网络领域、成为应用研究经费投量首位,约5.44亿美元,占比32.9%(图5)。生物科技领域应用研究经费近10年来波动性增长,2023财年达到约3.20亿美元。人工智能领域应用研究经费由2014财年的2933万美元增长到2023财年的2.45亿美元。

微电子、生物科技、人工智能以及通信与网络

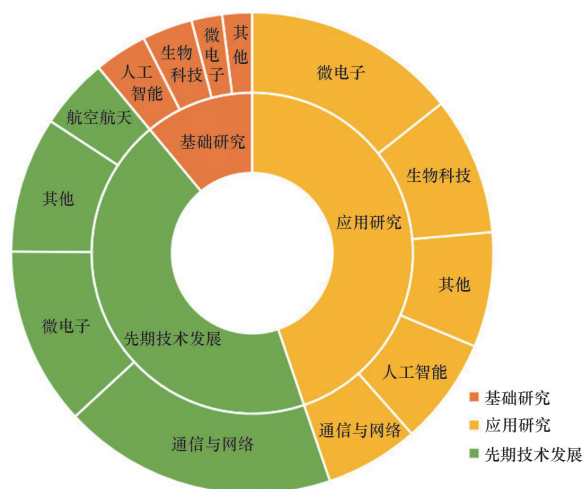


图5 2023财年DARPA主要领域经费投向

领域合计应用研究经费占比从2014财年的74.5%增长到2023财年的80.6%。2023财年,应用研究经费投量前10名的子项目中,微电子和人工智能领域子项目占比均为30%。此外,微电子领域子项目新增经费2.52亿美元,占应用研究新增经费的

45%。应用研究经费增量前10名的子项目中(新增项目除外),微电子领域子项目占比50%。其中,“先进制造工具”“三维异构集成先进制造方法”“极端环境下电子先进制造”等新增项目专注于先进封装测试技术、复杂三维微系统制造技术以及极端环境电子产品的研发。

2.4 先期技术发展阶段分析

从先期技术发展阶段的布局看,通信与网络、微电子、航空航天、人工智能领域是投入重点。通信与网络先期技术发展经费投量近10年始终保持首位,在2023财年占比达到41.3%(图5)。航空航天领域先期技术发展经费在2019财年达到最高(5.20亿美元),随后逐年下降,2023财年反弹增长至3.35亿美元,占比17.8%(图5)。微电子领域先期技术发展经费在2022、2023财年迎来大幅增长,3年平均增长率为34.0%,2023财年占比28.4%(图5)。人工智能领域先期技术发展经费由2014财年的2400万美元增长到2023财年的2.09亿美元。

通信与网络、微电子、航空航天、人工智能领域合计先期技术发展经费占比在2023财年达到98.6%。先期技术发展经费投量前10名的子项目中,航空航天和人工智能领域子项目占比分别为40%和30%。先期技术发展经费增量前10名的子项目中(新增项目除外),人工智能、航空航天、微电子、通信与网络领域项目占比分别为30%、20%、20%和30%。

3 结论与启示

3.1 主要结论

通过对2014—2023财年预算数据的分析,主要得出以下3点结论:(1)2014财年以来,DARPA大幅增加对人工智能领域和微电子领域的研发投入,微电子领域已超越通信与网络领域,成为DARPA前沿技术布局中的“重中之重”。(2)DARPA现阶段基础研究的预算优先级依次是人工智能、生物科技和微电子,应用研究的预算优先级依次是微电子、生物科技、人工智能、通信与网络,先期技术发展的预算优先级依次是通信与网络、微电子、航空

航天和人工智能。(3) 整体看, DARPA 充分贯彻为美国国家安全创造技术突破和新能力的战略使命, 将投资主要集中在微电子、人工智能、生物科技、通信与网络以及航空航天等技术领域, 加速推进应用研究和先期技术发展, 助力“全域作战”体系建设发展。

美国大力投资这些关键技术领域与美国近年来的国家安全战略和国家发展战略密切相关。国家利益是美国国家安全战略的首要目标, 这些技术领域都是目前世界技术革命发展中的前沿技术, 谁掌握这些技术、谁就掌握了未来发展的主动权, 若这些技术优先在军事领域获得应用, 那美国就可以进一步扩大军事优势。此外, 从拜登总统上任以来, 美国就将保持技术领先作为重要的国家竞争战略, 对内出台了一系列法案发展科技, 对外拉拢盟友打压竞争对手, 如 2021 年开始一直在酝酿的《2021 美国创新与竞争法案》、2022 年美国商务部发布的《关键和新兴技术(CET)清单》等, 重点关注人工智能、通信、微电子、生物等技术领域。

3.2 对中国发展的启示

当前, 中国的国防科技发展突飞猛进, 呈现出多点突破群体涌现、交叉融合深度渗透的显著特征。与此同时, 国防科技发展仍面临着原始创新不足、关键技术和科学仪器受制于人等困难。分析 DARPA 近 10 财年预算调整与布局, 得出了以下 3 点中国在进一步塑造国防科技核心竞争力方面的启示。

一是加快布局前沿技术和新兴领域军事化应用探索。近年来, DARPA 通过“用于快速战术执行的空域全面感知”“主动解释不同替代方案”“空战演进”等项目, 分别从侦察感知、情报分析、自主系统等领域切入, 促进人工智能技术在军事方面的应用; 通过“三维异构集成的先进制造方法”“低温逻辑技术”“联合大学微电子计划”等项目驱动微电子技术变革, 聚焦高效、高性能微电子长期发展; 通过“大流行病预防”“神经信号接口与应用”“增强人体恢复力”等项目, 持续探索新型传染病和生物威胁防护、神经接口、人体恢复增强等前沿技术军事应用。DARPA 充分贯彻美国国防部建设发展战略规

划, 以明确的军事技术需求聚焦基础研究发展, 持续推动自身在人工智能、通信与网络、微电子等领域的前沿技术探索, 为新概念、新方法在军事上应用寻找科学依据。借鉴其经验, 中国应以军事需求为牵引, 以发展规划为抓手, 以军民融合为纽带, 以先进制度为保障, 持续推动人工智能、通信与网络、微电子等前沿技术探索; 创新国防科技研发管理体制机制, 优化武器装备采购管理体系, 为新技术的试验和军事应用提供保障。

二是加快突破核心技术和研究成果试验部署。近年来, DARPA 多个项目研究成果转向作战用途, 例如“黑杰克”项目成功部署两颗 Mandrake 卫星、C-130 运输机在空中成功回收一架“小精灵”无人机、配备舱内自动化系统的“黑鹰”直升机首次完成无人自主飞行、无人集群城市作战项目群在各军种实战化应用、吸气式高超声速导弹(HAWC)测试成功等。DARPA 还进一步加大应用研究和先期技术发展阶段的投入, 两者经费占比均接近历史最高。同时, DARPA 始终重视基础研究、应用研究、先期技术发展三者间联系与相互支持。借鉴其经验, 中国应结合世界科技发展趋势、自身战略规划、科技发展现状、军队和国防建设情况、科技发展体制等因素, 优化调整中国国防科技经费布局, 加快芯片、大型科学仪器、工业软件等关键技术的投入; 对于“卡脖子”的关键技术, 坚持先解决有无, 再解决好坏的原则, 推动“国产核心技术”落地使用和成果试验部署, 摆脱对外依赖, 一步步实现自主可控。

三是加速发展破解“全域作战”技术的关键技术领域。近年来, DARPA 的首要投资和新增投资主要集中在微电子、人工智能以及信息与通信等技术领域, 目的是实现指挥控制“去中心化”, 建立一套更快反应、更耐破坏、更扁平化的作战体系, 这对侦察、指控、火力、信息等作战系统的建设带来了巨大挑战。以此为引领, 近年来, DARPA 以微电子、通信与网络、人工智能等技术发展, 助力“全域作战”体系建设。由先进传感器、人工智能和集成电路构建的下一代国防“基础设施”是实施“全域作战”的前提; 由先进通信与网络技术铺设的下一代国防“信息管道”是“全域作战”的必要支撑; 由智能

弹药、无人车、无人机、无人船等装备构成的下一代“武器终端”是“全域作战”实施的重要平台。然而，受制于下一代通信网络建设、人工智能技术进展、新旧武器装备以及软/硬件兼容性问题，“全域作战”并非无懈可击。中国应在全面竞争中瞄准核心领域，例如卫星通信、电磁技术等，以打造具有竞争力的“全域作战”体系关键节点的先进技术。

参考文献(References)

- [1] 程鲤, 李长芹, 荆象新, 等. DARPA 2021 财年生物科技项目布局情况分析[J]. 国防科技, 2020, 41(6): 16-21.
- [2] 易比一, 黄世亮, 雷二庆. DARPA 引领国防科技创新之道[J]. 科技导报, 2018, 36(4): 33-36.
- [3] 易比一, 黄世亮, 雷二庆. DARPA 在国防科技创新链中的定位[J]. 科研管理, 2017, 38: 297-300.
- [4] 曹晓阳, 魏永静, 李莉, 等. DARPA 的颠覆性技术创新及其启示[J]. 中国工程科学, 2018, 20(6): 122-128.
- [5] 王莉, 王鹏. DARPA 科技创新的管理实践与经验启示[J]. 科技导报, 2018, 36(4): 12-16.
- [6] 袁荣亮, 郭杰, 王彤. 美国 2021 财年国防高级研究计划局科研预算分析[J]. 飞航导弹, 2021(5): 1-8.
- [7] Defense Advanced Research Projects Agency. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2014 president's budget submission, Defense Advanced Research Projects Agency justification book volume 1 of 1, research, development, test & evaluation, defense-wide[R]. Arlington: DARPA, 2013.
- [8] Defense Advanced Research Projects Agency. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2015 budget estimates, Defense Advanced Research Projects Agency defense wide justification book volume 1 of 5, research, development, test & evaluation, defense-wide[R]. Arlington: DARPA, 2014.
- [9] Defense Advanced Research Projects Agency. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2016 president's budget submission, Defense Advanced Research Projects Agency defense wide justification book volume 1 of 1, research, development, test & evaluation, defense-wide[R]. Arlington: DARPA, 2015.
- [10] Defense Advanced Research Projects Agency. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2017 president's budget submission, Defense Advanced Research Projects Agency defense-wide justification book volume 1 of 1, research, development, test & evaluation, defense-wide[R]. Arlington: DARPA, 2016.
- [11] Defense Advanced Research Projects Agency. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2018 budget estimates, Defense Advanced Research Projects Agency defense-wide justification book volume 1 of 1, research, development, test & evaluation, defense-wide[R]. Arlington: DARPA, 2017.
- [12] Defense Advanced Research Projects Agency. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2019 budget estimates, Defense Advanced Research Projects Agency defense-wide justification book volume 1 of 5, research, development, test & evaluation, defense-wide[R]. Arlington: DARPA, 2018.
- [13] Defense Advanced Research Projects Agency. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2020 budget estimates, Defense Advanced Research Projects Agency defense-wide justification book volume 1 of 5, research, development, test & evaluation, defense-wide[R]. Arlington: DARPA, 2019.
- [14] Defense Advanced Research Projects Agency. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2021 budget estimates, Defense Advanced Research Projects Agency defense-wide justification book volume 1 of 5, research, development, test & evaluation, defense-wide[R]. Arlington: DARPA, 2020.
- [15] Defense Advanced Research Projects Agency. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2022 budget estimates, Defense Advanced Research Projects Agency defense-wide justification book volume 1 of 5, research, development, test & evaluation, defense-wide[R]. Arlington: DARPA, 2021.
- [16] Defense Advanced Research Projects Agency. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2023 budget estimates, Defense Advanced Research Projects Agency defense-wide justification book volume 1 of 5, research, development, test & evaluation, defense-wide[R]. Arlington: DARPA, 2022.
- [17] Office of Science Technology Policy. American artificial intelligence initiative[R]. Washington D.C.: Office of Science Technology Policy, 2019.
- [18] Defense Advanced Research Projects Agency. Electronics resurgence initiative[R]. Arlington: DARPA, 2017.
- [19] Federal Government of the United States. National-Bio-defense-Strategy[R]. Washington D.C.: Federal government of the United States, 2018.
- [20] 中国青年报. 美国防预算突破 8000 亿美元, 意味着什么 [EB/OL]. (2022-04-07) [2022-06-01]. <https://export.shobserver.com/baijiahao/html/469554.html>.

Budget analysis and enlightenment of DARPA from fiscal year 2014 to 2023

WANG Zhao, LI Wenjuan*, WANG Qiang

Consulting Center for Strategic Assessment, Academy of Military Science, Beijing 100091, China

Abstract DARPA, as an incubator of disruptive technologies, plays an important role in the scientific and technological innovation of the US military. The research on DARPA RDT&E budget can provide an important basis for understanding the development direction and trend of US defense technology. This paper explored frontier technology innovations of the US military by analyzing the budgets from FY 2014 to FY 2023. The results show that (1) the focus of the budget has shifted from basic research to advanced technology development, (2) the budget shows a trend of continuously arranging frontier technologies, promoting the demonstration and verification of new technologies, and helping the construction of the "mosaic warfare", and (3) microelectronics, artificial intelligence, communication and network, and biotechnology have been the key research areas of DARPA in the past two years.

Keywords DARPA; RDT&E budget; micro-electronic; artificial intelligence; communication and network; biotechnology ●



(责任编辑 傅雪)