0254-6124/2018/38(2)-139–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WU Ji. Characteristics and managements of space science missions (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(2): 139-146. DOI:10.11728/cjss2018.02.139

空间科学任务及其特点综述

吴 季

(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 人类进入太空以来已经发射了近 1 万个人造航天器, 其中大约 10% 执行的是空间科学和探测任务. 近年来中国经济快速发展, 提供了更多的基础研究经费, 经济转型也对创新驱动发展提出了更高需求, 中国对空间科学的投入开始逐年增加. 2015 年以来先后成功发射了悟空号、实践十号、墨子号和慧眼号 4 颗科学卫星, 天宫 2 号空间实验室也成功实施了一系列空间科学实验. 重要科学发现和成果正在不断地产出. 空间科学卫星任务 (或称计划) 与应用卫星从提出到评价都有很大不同, 因此有必要对其所具有的特点进行分析, 从而引导空间科学界从科学团队、技术团队到管理团队提高认识, 确保未来的空间科学任务发挥最大效益, 获得最大科学产出.

关键词 空间科学, 科学卫星, 科学产出, 项目遴选

中图分类号 P 35

Characteristics and Managements of Space Science Missions

WU Ji

(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract There are more than ten thousands spacecrafts have been launched since 1957. About 10 percent among them are space science missions. In recent years, more funds are available for space science in China due to the fast development of the economy and innovation requirements from the government to build up a new scientific and technology power by 2050. As a result, China has launched four space science satellites since 2015, *i.e.* DAMPE, Shijian-10, QUESS and Insight-HXMT. Moreover, TG-2 space lab is also operating successfully. A series of important scientific outputs have been published since last year. In this paper, the management experiences of the space science missions are summarized. The special characteristics of space science missions which are different from other kind of space missions are analyzed. The understanding of these characteristics is helpful for maximizing the scientific outputs which are key for the sustainable development of space science.

Key words Space science, Science satellite, Scientific outputs, Mission selection

2018-01-26 收到原稿, 2018-02-01 收到修定稿

E-mail: wuji@nssc.ac.cn

0 引言

早在数千年前, 人类就开始仰望太空和思考宇宙, 但是直到哥白尼和伽利略时代才真正进入现代科学研究的阶段. 1957 年第一颗人造卫星上天, 冲破了地球引力的束缚, 打破了地球大气层对人类探索太空的阻隔, 使人类真正进入到了一个认识太空和宇宙的大发展的阶段, 空间科学也从此诞生.

空间科学是以航天器为主要平台, 研究发生在地球、日地空间、行星际空间乃至整个宇宙空间的物理、天文、化学以及生命等自然现象及其规律的科学. 开展空间科学研究需要利用运载火箭脱离地球的引力进入太空, 需要航天器平台提供电源、探测器所需温度环境、稳定准确的姿态及天地测控通信等技术支持. 因此, 空间科学是一个国家航天事业的一部分. 对发达国家而言, 在航天事业发展初期, 空间科学就是其中一个重要组成部分, 二者是同步发展的. 例如美国主管空间科学与探索的政府机构美国国家航空航天局 (NASA) 是独立于军事航天部门之外, 于 1958 年单独成立的, 专门负责太空探索与科学研究; 欧洲空间局 (ESA) 也是专门负责空间科学与探索任务的成员国政府机构; 日本空间科学研究所 (ISAS) 是日本航天事业的发起单位. 然而在发展中国家, 如中国和印度, 由于有限的航天事业经费需要首先满足国家安全以及社会经济发展需求, 因此研制应用卫星就成为最迫切的任务, 发展空间科学只是在其具有一定经济实力之后的选择.

中国在发射第一颗人造卫星之后, 利用技术试验机会 (实践系列卫星) 对空间环境开展了由近及远的探测, 并对单粒子事件及其效应开展了初步的实验 [1,2]. 此外, 利用返回式卫星, 通过搭载开展了少量空间材料科学实验 [3]. 在载人航天工程中, 利用神舟飞船以及天宫 2 号开展了多项科学实验 [4,5]. 中国第一个真正意义上的空间科学任务是 2003−2004 年发射的地球空间双星探测计划 (TC-1, TC-2). 这使中国进入到拥有空间科学计划的航天大国行列 [6]. 之后实施的月球探测计划 [7] 以及 2015 年以来先后成功发射的暗物质粒子探测卫星 (悟空号), 实践十号返回式科学实验卫星 (实践十号), 量子科学实验卫星 (墨子号) 和硬 X 射线调制望远镜卫星 (慧眼号) 四颗科学卫星 [8−12], 已经或正在产出一系列重要科学发现和成果, 使中国逐渐成为国际空间科学领域里一支重要的新兴力量 [13,14].

回顾中国空间科学的发展历程, 目前正处于其大发展的一个新的历史起点上, 因此需要重新审视空间科学任务的特点, 汲取中国以及世界上其他国家的经验和教训, 力争使空间科学任务产出的效益最大化, 以促进其可持续发展.

1 空间科学任务的经费来源及各利益相关方的关系

空间科学任务是一个国家航天事业的一部分, 也是一个国家基础科学研究的一部分. 国家对航天事业以及基础科学研究的经费投入主要来自于政府的税收, 是政府研究与开发预算 (R&D) 的一部分. 其他科技发达国家的航天事业经费在国家政府预算中所占的百分比通常不超过 0.2%, 其中空间科学约占整个航天事业经费的 10%∼15%*.

空间科学经费的来源决定了如何对其执行情况进行评估. 经费投入应该促进科技的发展, 其中基础科学领域的投入应该产生基础科学领域里的成果即科学发现或新的理论. 一次空间科学任务所需经费通常达 10 亿元人民币或更多, 因此对空间科学任务研究成果的期待比一般基础科学领域小额度投入的产出成果期待更高. 这是空间科学任务与其他基础科学研究项目相比的一个重要特点, 即空间科学任务应该使其科学目标瞄准重大科学前沿, 力争取得重要科学突破, 或者带动相关学科有大的发展. 这个指导思想必须贯穿整个任务从遴选、立项、研发到运行的始终 [15], 才能确保任务产出的效益最大化, 并不断得到政府和公众的支持, 从而实现可持续的发展. 图 1 所示为空间科学各利益相关方的关系.

如图 1 所示, 空间科学任务的经费来自公众, 是国家政府预算的一部分. 此外, 空间科学任务还需得到公众的舆论支持. 政府在执行空间科学任务的过程中需要通过科学普及工作回馈公众一般的科学知识, 并向公众通报任务的执行情况及进度等, 使公众了解预算的使用情况. 空间科学研究群体作为公众的一部分, 向政府提出科学任务设想, 参与完成空间科学

*https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/fy_2018_budget_estimates.pdf

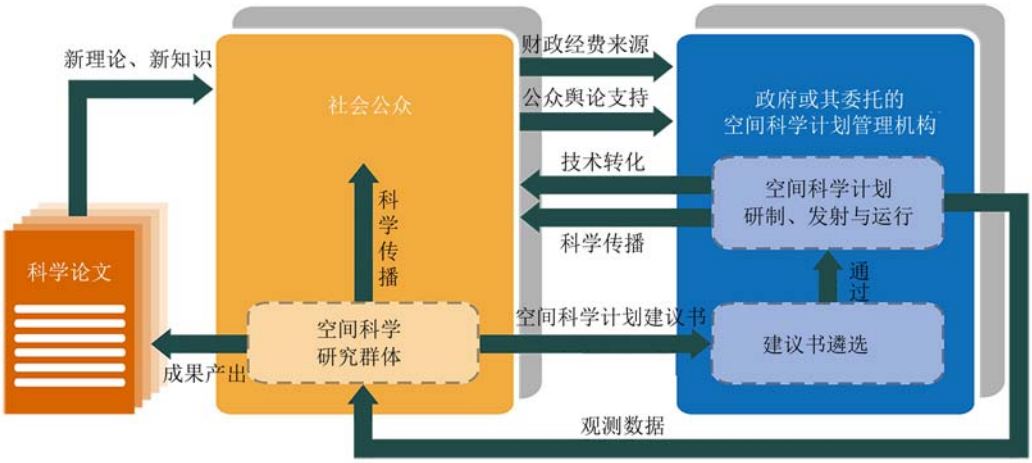

图 1　空间科学任务各利益相关方关系

Fig. 1　Relations between the stake holders of space science

任务. 政府管理部门或受政府委托的管理机构, 负责空间科学任务的遴选、研发和运行, 并组织开展科学数据的应用. 提出任务的空间科学研究团队获得所需探测数据并开展研究, 产出科学发现和研究成果, 通过论文的形式发表, 向社会公众提供新的知识.

2　空间科学任务的提出和遴选

空间科学任务的提出和遴选是确保科学产出和效益最大化最重要的先决条件. 根据国际上科学任务提出的通常做法, 中国空间科学任务的提出采用自下而上的征集方式. 这样的征集方式可以确保任务实施后的数据分析团队就是项目提出的科学团队, 最大限度保护其提出任务时的积极性和科学思想的一贯性, 因此能够确保科学产出和效益的最大化.

自下而上的任务提出方式一般分为两个阶段.

第一个阶段是由政府主管部门或委托的管理机构组织科学群体对科技发展前沿开展讨论, 确定重大的科技前沿方向和需要实现突破的领域. 通常做法是不设限制地广泛征集建议, 然后由领域专家组成战略规划研究专家组进行讨论. 专家组需同步研究国际上空间科学领域的重大前沿进展. 专家组经过讨论对需要和可以实现突破的重大前沿领域做出判断, 并达成共识. 在此过程中, 相应的管理部门需要提供辅助性的支持, 以及提供国内本领域各单位的基本情况和研究基础信息. 此外, 管理部门还需提供国家在顶层对基础科学突破的宏观需求信息, 例如整体科技发展、创新驱动对空间科学领域发展的需求信息, 并对专家进行动员. 完成这些基础性的工作后, 相应的政府管理部门就可以向科学研究群体和单位发布项目征集指南, 并进入第二阶段的工作.

第二个阶段是科学团体根据指南进行自由申报. 政府管理部门应该本着公开、公正和公平的原则, 对项目建议书进行审核以及遴选. 其中最大的约束条件是国家在空间科学领域能够投入经费的限制. 如前所述, 国际上航天强国在空间科学领域的投入占其整个航天投入的 10%~15%. 整个航天投入包括除国防以外的运载、地面设施、应用领域的所有卫星计划及载人航天计划等. 中国航天目前每年大约有 20 次发射活动, 按上述比例, 排除一定数量的国防任务, 空间科学任务应该有大约 2 次发射活动. 因此, 如果每年遴选一次空间科学任务, 应该每次遴选 2~3 个任务. 如果每两年遴选一次, 应该每次遴选 5~6 个任务. 如果从任务概念开始就予以支持, 在保留一定淘汰率的前提下, 遴选的数量应该更大一些. 通常一个空间科学任务在其研制周期中需要通过三次遴选, 第一次是任务概念 (预研), 第二次是背景型号 (关键技术攻关), 第三次是工程立项. 因此, 如果考虑 1~2 倍的淘汰率, 在预研阶段每年需要遴选 10 个左右科学卫星概念研究项目予以支持; 在背景型号阶段, 每年需要遴选 5 个左右科学卫星项目予以支持, 以确保在立项阶段有足够的候选项目备选.

一个科学任务概念或建议应该包含两个最主要的内容, 一是科学目标, 二是任务概念, 也就是采取

何种轨道和配置哪些科学载荷实现科学目标. 其他内容都可以在设计阶段中逐渐完善.

以上遴选过程中的遴选标准是非常重要的指挥棒. 这个指挥棒所指的方向必须公开和透明, 让申请者事先充分了解, 从而发挥好指挥棒的作用. 从以往的经验来看, 最为有效和重要的遴选标准有两个, 具体如下.

(1) 科学目标的重大性 (Impact). 任务的科学目标瞄准重大科学前沿, 一旦突破会引起科学理论的深刻变化, 并对人类认识自然产生重大影响, 拓展人类认知, 填补人类知识空白. 简言之, 科学目标最好应瞄准诺贝尔奖级别的重大成果.

(2) 任务实施后对学科发展的带动性 (Involvement). 一旦任务实施, 参与数据分析的人数较多, 可以预期产出数量较多的科学论文, 将对该学科发展有很大的带动性, 促进该领域蓬勃发展. 简言之, 这类任务应该能够带动数量众多的科学家参与进来, 并产出数量较多的科学论文, 比如每年发表较多 (例如 100 篇) 高质量的科学论文, 在国际上能获得同行普遍认同的评价.

对于不同类型的科学卫星, 遴选时这两个标准至少要满足其中之一. 如果能够同时满足, 则被遴选上的机会更大.

对于旗舰型的大型科学卫星计划应严格考察其是否符合上述两条标准. 同时也应该考虑到, 中国空间科学虽然已经起步, 但仍处于发展的初期阶段, 对于一些小型的科学卫星任务, 通过导向性的判断标准, 考察其是否具有新的科学思想和创新的切入点, 将有利于促进科学卫星和空间科学实验类项目的快速涌现和发展.

为了确保公开、公平和公正, 建议书的遴选需要由专家委员会来实施. 遴选专家需要避免利益相关, 并使专家能够充分理解和娴熟运用两条遴选标准. 政府管理机构或受政府委托的管理机构负责组织, 并根据年度经费和宁缺毋滥的原则确定最终入选项目.

3 空间科学任务的研发与运行管理

为确保科学目标能够实现, 科学卫星进入研制阶段以后, 在正常的应用卫星研制管理基础上, 以首席科学家为代表的科学团队增加为管理要素之一. 通常的做法是设立项目首席科学家, 并给予首席科学家在必要时的一票否决权.

科学团队在研制中的职责根据不同国家的研制程序稍有不同. 在美国重大型号中, 通常由研制管理机构负责组织科学团队的参与, 并没有一个单独的个人被定义为首席科学家, 而是在项目管理团队中设立项目科学经理, 负责与科学团队的沟通. 这类任务通常是平台类型的, 也就是其科学数据可以提供给大量的科学家开展研究工作. 项目科学经理的职责是确保科学数据可以为这些科学家服务. 对于中小型科学卫星任务, 美国实施由首席科学家全权负责的制度. 首席科学家不只对项目的科学目标负责, 还要对项目的经费、技术、进度和质量负责. 通常首席科学家需要聘用一个项目经理做助手, 但是首席科学家仍然是总负责人. 这种制度在美国 NASA 实施之后, 既有成功的例子, 也有失败的例子. 成功的例子是不但项目能够按时、按预算、按质量研制完成, 取得了突出的科学产出, 还将首席科学家培养为科学、技术、管理全面发展的专家人才. 失败的例子是项目在研制过程中问题层出不穷, 首席科学家自己不断提高技术指标要求, 使得研制进度拖期, 研制费用超支, 甚至迫使项目不得不中止.

ESA 在空间科学任务的管理上与 NASA 重大型号管理相似, 由欧空局直接负责项目研制, 并在项目管理团队中设立项目科学经理. 该科学经理必须是欧空局的雇员. 如果任务的载荷较大, 由欧空局负责经费, 这种安排则更加紧密. 如果科学载荷分散在成员国, 并由成员国负责提供经费研制, 则项目科学经理是各载荷科学家和科学用户团队与欧空局之间的桥梁. 通常办法是由该经理担任科学团队负责人, 组织载荷科学家和科学用户团队定期开会, 管理载荷的研制进度并研究载荷数据的格式和应用问题. 在项目研制过程中, 这种系列性的会通常每年召开两次. 卫星发射和交付后, 科学团队会议仍然继续, 但是议题通常为研究和协调数据应用问题.

经过 “两弹一星” 的创业阶段, 中国航天已经建立了一套完整的研制管理体系. 通常称为 “两总” 制 [16], 即总指挥和总设计师负责制. 其中总指挥为项目负责人, 对项目所有方面总负责. 但是由于卫星任务科技含量很高, 通常总指挥在项目执行中需要一个技术助手. 特别是在 20 世纪 60 至 70 年代创业初期, 项目负责人通常是有军队背景的老干部, 需要聘请专

业技术人员负责技术方面的工作. 因此 “两总” 体制就营运而生. 目前为止, 除非特殊情况, 这一制度仍然十分有效, 尽管总指挥人选大都是技术出身 (少数也有身兼两职的情况), 但聘用专职的技术负责人即总设计师仍然是一个很好选择. 总设计师无需考虑过多的行政管理问题, 可以集中精力思考技术问题, 确保任务的成功. 从中国第一个真正意义上的科学卫星任务地球空间双星计划开始, 就在探索 “两总 + 首席科学家” 的科学卫星研制管理体制, 即在成功实施多年的 “两总” 体制的基础上, 根据科学卫星的特点, 增加型号首席科学家岗位, 专职负责与科学目标实现相关的问题. 这是因为为了实现科学目标, 其对科学探测的要求通常在论证阶段就最大限度地转化为工程技术语言, 但是由于科学团队缺少工程技术经验, 存在转换中对要求解释不清楚的风险和部分遗漏, 这些遗漏在研制过程中会凸显出来. 因此, 首席科学家的作用是密切跟踪研制过程, 发现和处理研制中出现的与科学目标相关的各类问题并做出判断. 如果出现工程 “两总” 与首席科学家意见不一致的情况, 为了保证科学目标的实现, 这种制度赋予了首席科学家一票否决权. 与其说是权利, 不如认为其是一种对工程研制队伍的警示. 迄今为止一票否决的情况还没有发生过, 所有问题都通过论证、协商、实验等方式给予了解决.

在中国的科学卫星研制过程中, 首席科学家在工程研制阶段处于跟踪和监督位置上. 但在项目预研、科学载荷关键技术攻关阶段及卫星发射以后则处于对项目全权负责的位置上. 在进入工程研制阶段之前, 首席科学家需要带领科学团队凝练科学目标, 遴选和配置有效载荷, 并将科学探测的需求转化为初步的工程需求. 在卫星研制过程中, 首席科学家除对工程研制进行跟踪外, 还需要组织科学团队对数据进行模拟, 对科学载荷的标定进行把关, 对任务的宣传和国际合作负责. 在卫星发射之后, 首席科学家需要参加在轨测试. 在卫星交付运行后, 首席科学家作为科学用户团队的负责人, 需要负责数据的应用, 并对科学产出负总责.

中国的科学卫星管理体制即 “两总 + 首席科学家” 的体制汲取了中国 60 年航天发展的经验以及国际上科学卫星管理方面的经验, 经过多个科学卫星任务的实践, 被证明是确保科学卫星产出最大化的有效方法, 应坚持实施下去.

4　空间科学任务的产出与评估

空间科学任务的产出是科学发现和对自然界产生的新认识和理论, 其形式是在同行评议的学术期刊上发表的论文. 因此, 主要从以下两方面对其进行评价. 一是发表论文的质量, 即其发表的载体期刊的影响因子的高低. 在空间科学各个分支领域都有公认的顶级学术期刊, 此外还有综合性的科学期刊如 *Science*, *Nature* 等. 二是发表论文的数量.

此外, 评价时还要参考该项目入选时的标准. 如果遴选时是第一类标准, 则从其成果的重要性方面评价, 考察其成果是否在顶级学术期刊上发表及其影响度情况. 如果遴选时是第二类标准, 则应更加重视其参与度, 即有多少科学家参与了数据分析和应用, 每年利用该卫星数据发表的论文篇数. 对于参与度高的科学卫星任务, 通常每年发表数百篇高质量论文. 例如美国的雨燕 (Swift) 计划, 发射 10 年来平均每年发表约 300 篇高质量论文 *; 哈勃太空望远镜 (HST) 发射 25 年来也已发表超过 1 万篇论文 **, 其中不乏重大科学发现 [17]. HST 是一个典型的两个遴选标准都满足的非常成功的空间科学任务.

5　国际合作

空间科学是一个非常重要的国际合作领域. 主要原因有如下几个方面.

第一, 空间科学任务的科学目标瞄准科学发现, 只有第一没有第二, 所以在论证初期就要避免与其他国家的科学任务重复, 以免影响产出, 浪费国家在基础科学领域的有限投入. 为此, 各国的空间科学管理机构在空间科学领域的规划和任务都是相互公开和透明的. 在各自制定规划时, 首先考虑不要与其他国家重复. 同一领域里的任务需要有不同的切入点, 瞄准不同的子目标和科学问题. 除了公开发表各自的规划和公布立项实施的任务以外, 各国空间科学机构之间通常通过双边协调会议机制进行沟通. 一旦对同一个目标和问题都非常感兴趣, 可以通过双边

*https://swift.gsfc.nasa.gov/results/

**http://archive.stsci.edu/hst/bibliography/pubstat.html

甚至多边合作形成联合任务. 一个非常成功的国际联合任务的例子是 1986 年哈雷彗星回归时前苏联、欧空局和日本的联合探测任务 [18].

第二, 相对于科学家层出不穷的探测思想和需求而言, 各个国家在空间科学任务上的政府投入是远远不够的. 为了覆盖和解决更多的科学问题, 科学家群体也希望借助各种机会实现自己的梦想. 这就出现了利用别国卫星搭载仪器的现象, 也出现各个国家的空间科学管理机构相互开放搭载机会, 将自己决定立项的科学卫星的剩余资源让出, 向国际合作伙伴开放. 此外, 也为本国的科学团队提供科学载荷研制经费, 研制可以搭载到别国科学卫星上的科学载荷. 这种科学载荷相互搭载的方式不涉及经费交换, 以共享科学数据为合作前提.

第三, 空间科学任务的产出是科学论文. 重要的科学论文通常都发表在国际上公认的著名科技期刊上. 这些期刊的审稿人来各空间科学大国, 如美国、英国、法国、德国、日本、俄罗斯及中国等. 因此, 空间科学任务从开始论证就应该公开化, 增大曝光度, 以获得国际科学界同行的关注和认可, 并在各类国际会议上向同行报告其研制过程进展, 以便在发射升空、获得数据和科学成果后, 论文投稿时国际同行熟知其科学目标及工程背景, 有利于审稿人接受和理解其科学成果. 如果任务有国际合作同行的直接参与, 例如有国际合作伙伴提供科学载荷或参与载荷的设计、标定, 在论文评审过程中更容易得到评委的理解和支持. 相反, 如果一个科学任务只有本国科学家参加, 论证和研制过程又是保密的, 即使获得了非常出色科学数据和成果, 其论文在评审时也会受到较多质疑和较长的评审过程. 这就是科学卫星任务需要国际合作的另一个非常重要的原因.

基于上述三个主要原因, 国际上主要航天国家的空间科学任务通常都采取了国际合作方式. 这些合作通常从任务论证时已开始, 除科学家团队之间的国际合作外, 还需要空间科学管理机构之间进行沟通与合作, 定期召开双边会议, 探讨相互提供搭载机会、联合遴选科学任务、协调重大任务的联合探测等.

空间科学的产出是科学发现和提出新的解释自然的理论, 是人类认识宇宙和自然规律的整体行为的一部分, 尽管其成果会给执行任务的国家带来荣誉, 但归根结底是人类行为的一部分, 具有国际性, 必须公开和透明. 通过国际合作来推动国家空间科学事业的发展十分必要.

6 常见的认识误区与需要注意的问题

在发展空间科学事业的道路上, 需要认识到有几个危险的误区. 如果决策失当, 会丧失空间科学事业发展的大好时机, 影响空间科学在基础科学前沿突破和带动航天技术发展方面发挥重要作用, 甚至延误中国建设世界科技强国和航天强国的进程.

误区一, 以优先取得技术突破的航天任务替代空间科学任务, 占用了国家本应在空间科学领域的投入, 影响了空间科学的发展. 根据国家不同阶段的航天技术发展, 实施以技术突破优先的空间任务也是必要的, 但是不应冠以科学任务的名义. 科学任务是以科学发现为标志, 以实现任务的科学目标为优先, 任务成功的评价标准是正式发表的使用该任务数据的科学论文. 而以技术突破优先的任务标志是工程目标, 评价任务是否成功的标准为工程目标是否实现, 关键技术是否突破等. 因此, 不能认为国家有了技术实验卫星或以重大技术突破为目标的航天任务就等于有了科学卫星, 进而减少对真正科学任务的经费投入.

误区二, 以利用别国科学卫星数据开展的研究工作替代由中国科学卫星任务带动的研究工作. 仅利用别国科学卫星数据开展的研究工作不能算中国有了自己的空间科学, 即没有自主的空间科学任务, 等于在国家航天事业中没有空间科学. 这是因为空间科学任务不仅是科学研究, 还是航天事业的一部分, 除了产出科学成果之外, 还对航天技术有很大的带动作用. 为了实现新探索和新发现, 每次科学卫星任务都有新的要求. 对航天技术的带动是内在的一种激励, 可以带动技术队伍水平的不断提高. 此外, 科学卫星的数据尽管很开放, 但是任务主导国家的科学团队通常有一段时间 (通常 1 年) 的数据专有权. 在数据专有期内, 其科学团队可以充分利用数据的首次发现权, 使团队的科学能力和水平快速提高. 如果没有自己的科学卫星任务, 只能使用别国科学卫星开放后的数据 (通常称为二手数据) 开展科研, 获得的科学成果的影响度远低于第一手数据的影响度. 这十分不利于实现国家在基础科学领域的重大突破. 因此, 一定不能以使用国外科学卫星数据的研究工作来替代中国自己的科学卫星任务.

除上述两个误区之外, 管理部门还需特别注意以下几方面问题, 以确保科学卫星任务产出的最大化.

(1) 确保自下而上的任务征集方式, 这是保护科学团队的积极性, 确保产出最大化的最好方式. 即使管理部门确认了某个重要前沿需要布局而暂时还没有收到自下而上的建议, 也需要通过组织战略规划和动员, 引导科学团队提出任务建议. 与此相反的另一个问题是, 个别影响力很大的科学家为某个领域可能会提出安排和配置更多资源的要求. 一旦出现这种情况, 会使影响度较小但是仍然提出了创新思想的科学团队的遴选机会被淹没, 同时也会破坏空间科学中各分支学科的平衡发展.

(2) 确保首席科学家在任务实施前期和后期的领导权, 以及确保其在研制阶段的监督权. 除非出现首席科学家无法完成其职责的极特殊情况, 否则中途不应更换首席科学家. 更不能由管理部门自主确定项目, 并在项目立项之后, 特别是在有效载荷配置确定之后, 再指定首席科学家, 这会导致科学产出大打折扣.

(3) 确保项目在发射后的管理, 而不是把成功发射作为任务结束的标志. 发射后要跟踪数据处理和应用过程, 协助首席科学家组织科学数据的分析与研究, 统计科学论文数量, 并在任务设计寿命中止后考虑是否延寿运行, 扩大产出.

7　结论

从国际上空间科学任务的管理以及中国近年来实施空间科学任务的管理经验出发, 对空间科学及其特点进行了分析和综述, 具体如下.

(1) 经费来自政府预算即纳税人, 因此其产出必须回馈社会并产出新的知识, 促进经济社会发展.

(2) 为确保产出最大化, 空间科学任务的提出需来自科学论文产出的群体, 即开展科学研究的团队本身, 并采用自下而上的建议形式. 遴选标准主要考虑其重大性和参与度两个方面.

(3) 为了确保科学目标的实现, 科学卫星的研制过程应该由首席科学家参与并实施具有一票否决权的监督.

(4) 科学目标实现及科学任务成功的判据是评估使用该任务数据产出的科学论文的影响度和数量.

(5) 国际合作是空间科学任务确保产出的加分项, 因此管理部门需要组织并要求科学团队开展国际合作以扩大科学产出.

与航天发达国家相比, 中国的空间科学发展还处于起步阶段. 空间科学任务与其他应用卫星任务相比需要更精细的管理, 以确保其科学产出及可持续发展, 并在国家基础研究发展和航天科技发展中发挥应有的和不可替代的作用.

这里主要针对空间科学任务全生命周期内的管理流程展开分析. 但是内容和结论也适合于一线的空间科学研究和技术人员. 空间科学是一个完全开放的领域, 只有管理和被管理双方都深入了解其特点, 才能相互配合将各自的职责和工作做好.

中国的空间科学虽然刚刚起步, 但是已经有了一个很好的开端. 只要不断总结经验, 遵照科学规律, 就可以推动其健康发展, 使中国的空间科学事业逐渐走到世界舞台的中央, 为中华民族的伟大复兴, 为建设世界科技强国做出应有的和不可替代的贡献.

致谢　本文主要观点在中国科学院空间科学先导专项实施过程中得到进一步深化和印证. 感谢先导专项的全体参研人员, 感谢国家空间科学中心空间科学论证中心范全林、杨昉、李明等对参考文献的整理, 感谢先导专项国际特别顾问、中华人民共和国友谊奖获得者 Roger Bonnet 参与了很多问题的讨论并提供了国际上可以借鉴的经验.

参考文献

[1] HU Qizheng, CHEN Qinnan. The Chinese scientific satellite SJ-4 [J]. *Aerospace China*, 1994, **11**: 13-15 (胡其正, 陈钦楠. 实践四号卫星 [J]. 中国航天. 1994, **11**: 13-15)

[2] LIN Yunlong, SUN Huixian, CAI Jinrong. Experimental results of single particle event measurements and counter measures on Shijian-5 satellite [C]//The 5th Space Science Symposium for Chinese and Foreign. Urumqi: Chinese Society of Space Research, 2000: 25-30 (林云龙, 孙辉先, 蔡金荣. 实践五号卫星单粒子事件测量及对策研究试验结果 [C]//第五届中外空间/太空科学讨论会. 乌鲁木齐: 中国空间科学学会, 2000: 25-30)

[3] GAO Zhenliang, ZHANG Zhengfeng, ZHAO Huiguang, TANG Bochang. Space science application and expectation of Chinese Returnable Satellite [J]. *Satellite Network*. 2011, **1**: 26-29 (高振良, 张正峰, 赵会光, 唐伯昶. 中国返回式卫星的空间科学应用与展望 [J]. 卫星与网络. 2011, **1**: 26-29)

[4] Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences. The Chinese Academy of Sciences successfully completed the scientific trial task of Shenzhou-7 spacecraft [J]. *Bull. Chin. Acad. Sci.*, 2008, **23**(6): 538-541 (中国科学院

光电研究院. 中国科学院圆满完成神舟七号各项科学试验任务[J]. 中国科学院院刊, 2008, **23**(6): 538-541)

[5] WEN Hui. Many first-time validations had been realized on China's first space lab Tiangong-2[J]. *Aerospace China*, 2016(11): 4-7 (文汇. 天宫二号空间实验室实现多项"首次"验证[J]. 中国航天, 2016(11): 4-7)

[6] LIU Zhenxing, WU Ji. Geospace Double Star Exploration Project[C]//China Geospace Double Star Exploration Project Symposium. Weifang: Chinese Society of Space Research, 2002: 7-22 (刘振兴, 吴季. 地球空间双星探测计划[C]. 中国地球空间双星探测计划科学研讨会. 潍坊: 中国空间科学学会, 2002: 7-22)

[7] LUAN Enjie. China's lunar exploration program: the third milestone of China aerospace[J]. *Aerospace China*, 2007, **2**: 3-7 (栾恩杰. 中国的探月工程中国航天第三个里程碑[J]. 中国航天, 2007, **2**: 3-7)

[8] YIN J, CAO Y, LI Y *et al*. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers[J]. *Science*, 2017, **356**(6343): 1140-1146

[9] LIAO S K, CAI W Q, LIU W Y, *et al*. Satellite-to-ground quantum key distribution[J]. *Nature*, 2017, **549**: 43-47

[10] REN Jigang, XU Ping, YONG Hailin, *et al*. Ground-to-satellite quantum teleportation[J]. *Nature*, 2017, **549**: 70-73

[11] DAMPE collaboration. Direct detection of a break in the teraelectronvolt cosmic-ray spectrum of electrons and positrons[J]. *Nature*, 2017, **552**: 63-66

[12] ABBOTT B P, ABBOTT T D, ACERNESE F, *et al*. Multi-messenger observations of a binary neutron star merger[J]. *Astrophys. J. Lett.*, 2017, **848**: 1-59

[13] NORMILE D. Red star rising[J]. *Science*, 2016, **353**(6297): 342-345

[14] QIU J. China's quest to become a space science superpower[J]. *Nature*, 2017, **547**: 394-396

[15] WU J, BONNET R. Maximize the impacts of space science[J]. *Nature*, 2017, **551**: 435-436

[16] GUO Baozhu. China aerospace and system engineering[J]. *Aerospace Industry Management*, 2003(6): 4-8 (郭宝柱. 中国航天与系统工程[J]. 航天工业管理, 2003(6): 4-8)

[17] STS Institute. Hubble racks up 10,000 science papers[J]. *Commun. Acm*, 2011: 1-2

[18] BONNET R M, VITTORIO M. International Cooperation in Space: the Example of European Space Agency[M]. Massachusetts: Harvard University Press, 1994