

外空矿物资源

——挑战与机遇的全球评估

Space Mineral Resources

——A Global Assessment of the Challenges and Opportunities

[美] 阿尔瑟·M·杜勒 (Arthur M. Dula) [中] 张振军 主编

中国航天科技国际交流中心 编译

中国航天出版社



中国宇航出版社

·北京·

Translation from the English language edition:

Space Mineral Resources—A Global Assessment of the Challenges and Opportunities

Edited by **Arthur M. Dula and Zhang Zhenjun**

Copying © 2015. International Academy of Astronautics

All Rights Reserved

本书中文简体字版由著作权人授权中国宇航出版社独家出版发行，未经出版社书面许可，不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

著作权合同登记号：图字 01-2017-4422 号

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

外空矿物资源：挑战与机遇的全球评估 / (美) 阿尔瑟·M·杜勒 (Arthur M. Dula)，张振军主编；中国航天科技国际交流中心编译. -- 北京：中国宇航出版社，2017. 6

书名原文：Space Mineral Resources—A Global Assessment of the Challenges and Opportunities

ISBN 978-7-5159-1358-2

I. ①外… II. ①阿… ②张… ③中… III. ①外太空—矿产资源—研究 IV. ①D98

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 150888 号

责任编辑 彭晨光

责任校对 祝延萍

封面设计 宇星文化

出版
发行

中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)60286808 (010)68768548

网址 www.caphbook.com

发行部 (010)60286888 (010)68371900
(010)60286887 (010)60286804(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2017 年 6 月第 1 版
2017 年 6 月第 1 次印刷

规格 787×1092

开本 1/16

印张 17.75

字数 432 千字

书号 ISBN 978-7-5159-1358-2

定价 148.00 元

本书如有印装质量问题，可与发行部联系调换

序 一

外空资源开发是航天事业发展和空间应用的前沿领域，也是近年来国际空间外交舞台及各国航天科技界、空间法学界的热议话题。随着地球资源具有日益面临枯竭之虞，人类在地球环境实现长期可持续发展方面面临巨大挑战。与此同时，商业航天企业以前所未有的速度和规模发展，正在深刻影响世界航天的发展格局，而商业航天企业关注的一个重要领域就是外空资源开发。

国际宇航科学院（IAA，The International Academy of Astronautics）是在世界著名科学家西奥多·冯·卡门倡导下于1960年成立的旨在利用航天科技促进人类和平与社会发展的全球性国际学术机构，由在航天科技及其相关领域具有突出贡献的各国专家组成，拥有基础科学、工程科学、生命科学和社会科学等四大学部。长期以来，国际宇航科学院高度重视上述领域的战略问题、前沿问题，每年组织各国顶级专家开展专题研究，已产生大量的科研成果，在许多方面引领了世界航天科技事业的发展方向，在国际宇航界的影响力举足轻重。2010年，国际宇航科学院研究中心在中国成立，为各国的国际宇航科学院院士开展学术交流和务实合作提供了新平台，有效促进了中国航天事业的对外交往工作。

2012年，国际宇航科学院批准启动“外空矿物资源”课题研究立项。2013年，国际宇航科学院“外空矿物资源”课题组（SG3.17）成立，由国际宇航科学院院士、美国海因莱因基金会负责人阿尔瑟·M·杜勒（Arthur M. Dula）与中国航天科技国际交流中心副主任、中国空间法学会秘书长张振军担任共同主持人，来自中国、美国、俄罗斯、法国、德国、英国、意大利、澳大利亚、乌克兰、以色列、西班牙、爱尔兰、日本、韩国等国的30名专家担任课题组成员。2015年8月，经过近三年的紧张工作，课题组全面完成课题研究工作，课题报告顺利通过国际宇航科学院相关评审程序。

2015年10月，上述两位课题主持人共同主编的国际宇航科学院课题研究成果《外空矿物资源——挑战与机遇的全球评估》（英文版）在美国出版发行。这是国际宇航界首次组织不同国家、不同专业背景的专家从技术、经济、管理、法律、政策等不同视角就外空矿物资源这一前沿领域联合进行的全方位专题研究，也是中国专家共同主持的国际宇航科学院课题研究成果首次在美国出版。本课题报告集中展示前沿科技发展动态，研讨外空矿物资源开发、利用的经济技术可行性，探讨时间表和路线图，并分析目前在政策和法律层面的解题路径和工作建议，对中国航天科技工业及商业航天发展具有较高的决策参考

价值。

本课题研究成果在美国出版之时，恰逢美国加快新一轮商业航天立法进程，在美国主流媒体和各类航天机构及多个国际会议场合引起积极反响和广泛关注。2015年11月，美国时任总统奥巴马签署《2015年外空资源探索和利用法》，明确外空矿物资源开采后的所有权归属，引发国际社会热议。国际空间法学会（IISL）在第一时间就此发布立场文件，各国随后在2016年召开的联合国外空委科技小组委员会、法律小组委员会届会上展开激烈辩论，并同意将“关于外空资源探索、开发和利用活动的潜在法律模式的一般性意见交流”作为法律小组委员会正式议题，但国际社会后续为此制定法律规则、实现国际法与各国国内法相统一任重道远。

2016年，中国航天科技国际交流中心（中国宇航出版社）将该书引进中国，组织精干队伍进行翻译，并与国际宇航科学院原英文课题研究团队密切合作，补充编译了大量新内容。2017年6月，经过一年的紧张工作，该书中文版在中国首发之时，恰逢中国宇航学会与国际宇航联合会（IAF）联合举办的全球航天探索大会（GLEXP 2017）在北京隆重举行，深空探测成为举世瞩目的热点话题。2016年，我国的火星探测任务批准立项。随着我国后续发射“嫦娥五号”月球探测器并首次开展月面无人钻孔取样返回试验，中国探月工程将迈出关键步伐。国际宇航科学院课题报告《外空矿物资源——挑战与机遇的全球评估》中文版如期在中国问世，必将积极推动相关领域的理论探索和国际交流合作。

“探索浩瀚宇宙，发展航天事业，建设航天强国，是我们不懈追求的航天梦。”期待有更多的航天科技工作者、空间法学工作者深入系统研究航天活动前沿领域，密切跟踪国际最新发展动态，特别要注重研究全局性、战略性、前瞻性重大课题，持续增强自主创新能力，与各国携手打造外层空间的人类命运共同体、利益共同体、发展共同体和责任共同体，为把我国早日建成世界航天强国、实现中华民族伟大复兴的中国梦、不断开创人类航天文明新高度作出应有的贡献。



国际宇航科学院副主席
原中国航天工业总公司总经理
中国国家航天局首任局长
2017年6月8日

序 二

托马斯·马尔萨斯（Thomas Malthus）认为，而且他的追随者今天仍然这样认为，人类由于自身生产和物质生产不断膨胀，过度消费着地球上的可用资源，经济发展模式因此变得不可持续，而且一场灾难正在临近。上述主张无疑可为我们当今建设资源节约型、环境友好型社会提供一定的基础理论支撑。然而，人类的全部历史已经证明，在每一个历史转折点，马尔萨斯主义者的很多观点其实并未得到充分验证。因为他们忽略了人性的两大关键特征：适应环境和创新求变。在历史长河中，人们总是通过提高稀缺货物的价格、降低充足货物的价格进行适应性调整，从而在激励稀缺货物生产的同时，抑制充足货物的生产；人们总是通过不断寻找新资源、新能源，寻求获得新资源、新能源的新路径以及提高劳动生产率的新方法而持续进行创新。其结果必然是一个螺旋式上升过程，资源能源利用效率和经济社会运行效率得以不断提高，从而让更多的人幸福而长寿。

外层空间带给人类的全新机遇和裨益只会受到人类自身想象力的局限。外空资源给全球经济带来的增长潜力无疑将是指数级的，也是可以持续的。这是应对马尔萨斯主义恐惧症的一个长期解决方案，他们一直担心人类和地球的崩溃即将到来。而与此论调相反，正如本课题研究所展示，外空资源开发代表着一种积极务实的新经济发展方向，有望让地球上至少一半的贫困人口摆脱贫困。这将是足以让全世界瞩目和期待的一项新使命。

今天，人类正在通过开发丰富的外空资源来实现新的伟大飞跃。这些资源将造福整个地球，对传统的资源稀缺理论重新定义，并为人类真正进入太阳系发展奠定基础条件。人类进军宇宙可谓目标宏远，但任务复杂艰巨，前行之路荆棘密布，而且由于知识、信息、经验和能力的局限，我们在很多时候其实并不知晓如何抓住机遇、迎接挑战，更不用说大量的机遇和挑战事实上还处于混沌未知状态。国际宇航科学院（IAA）的这份课题研究报告全面描述了蕴藏其中的机遇和挑战，并提出了挖掘我们身边巨额财富的潜在路径。

本项课题研究成果英文版自2015年出版以来，在短短的一段时间内，在技术和法律上出现一些重大突破，使得开发利用外空资源的路径变得更短、更清晰。像蓝色起源（Blue Origin）和太空探索（SpaceX）这样的私人公司已经成功演示了可重复使用的运载火箭，这将大幅度降低商业航天发射的成本。在法律层面，美国于2015年11月25日通过一部新法律，承认任何获得外空资源的美国实体均将成为这些资源的所有者。卢森堡也在积极推进类似的外空采矿立法，并于2017年成为全球第二个通过专门立法的国家。

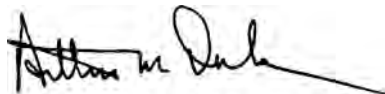
过去几十年间，外空资源所有权归属问题一直处于法律的灰色地带。联合国1967年《外空条约》明确禁止对外层空间及其天体提出任何领土要求，但国际社会目前针对外空资源归属权的处理大多是一些默契式的谅解，其中对月球岩石的处理则提供了一些先例。而国际社会对1979年《月球协定》的冷漠和争论更是凸显出相关国际规则的缺失。

尽管在外交层面尚可接受，但上述制度安排让那些有志于探索和开发外空资源的私营公司（及其潜在投资者）感到其应该拥有的权利处于一种不确定状态。这种制度安排显然会抑制相关的投资动力和投资行为。美国2015年11月通过的新法律正是试图用国内法对这种规则的不确定性加以弥补。由于美国立法的推动，联合国外空委开始正视这一法律问题，让我们看到了国际社会通过协商解决外空治理新问题的曙光。

任何单一国家都不可能仅仅依靠政府自身力量、传统模式和国家意志来完成外空资源开发这一史上规模最大、耗时最长、技术复杂程度最高的地外拓展任务。但我们并不会遭遇失败——只要我们能够运用行之有效的方式充分激发人类崇尚自由、追求财富、开疆拓土、勇于创新的固有禀性，推动所有的利益相关方朝着共同目标不断砥砺前行，最终必将到达理想的彼岸。

人类自1957年通过发射首颗人造地球卫星而进入外空的60年间，政府对航天活动的战略引领作用从来不应被低估，今后也是如此。但从长远来看，政府的作用将更多着眼于提供空间基础设施、营造公平竞争法治环境、鼓励创新发展、促进国际合作。企业是最有生机、最具活力的经营实体和创新实体，大量的地外拓展任务由商业航天企业按照市场规律自主完成，将是新时期太空经济的魅力和价值所在，也是必由之路。

美国海因莱因基金会作为专门从事航天科普教育、推动商业航天发展及国际交流合作的非营利组织，非常高兴能够支持本项课题研究工作及本书中文版在中国的问世，让我们得以有机会与更多的中国同行交流外空资源开发这一前沿话题。衷心感谢中国航天科技国际交流中心及其编译团队为本书的翻译出版和内容更新所开展的卓有成效的工作。衷心感谢备受尊敬的国际宇航科学院副主席、中国航天老领导刘纪原院士在百忙之中为本书中文版亲笔撰写序言。同时也借此机会，再次感谢国际宇航科学院、本课题共同主持人/共同主编张振军先生、本课题研究团队所有成员及相关机构、商业航天企业为顺利完成本课题研究工作所付出的智慧和心血。特别感谢美国K&L Gates公司的Paul Stimers先生对本课题研究提供的支持和帮助。



阿尔瑟·M·杜勒（Arthur M. Dula）

国际宇航科学院院士

“外空矿物资源”课题共同主持人、共同主编

美国海因莱因基金会受托人

《外空矿物资源——挑战与机遇的全球评估》

编译说明

《外空矿物资源——挑战与机遇的全球评估》(中文版)由中国航天科技国际交流中心组织编译。中国航天科技国际交流中心为此专门成立了编委会,由中国航天科技国际交流中心主任、中国宇航出版社社长邓宁丰担任编委会主任,中国航天科技国际交流中心副主任、中国宇航学会副秘书长张铁钧和中国航天科技国际交流中心副主任、中国空间法学会秘书长张振军担任编委会副主任。编委会对编译和出版工作进行了总体策划,并对全部文稿进行了最终审校。

国际宇航科学院(IAA)副主席、原中国航天工业总公司总经理、中国国家航天局首任局长刘纪原院士亲笔为本书作序,充分体现了国际宇航科学院对本书编译工作的高度重视和充分肯定。中国航天科技集团公司副总经理、中国空间法学会理事长袁洁对本课题研究高度重视,在2012年本课题获得国际宇航科学院立项之前,亲自批准委派中国专家参研,并就课题研究进展情况和课题报告中文版编译工作多次提出重要的指导意见。中国航天科技集团公司科技委、中国航天科技集团公司国际业务部、国际宇航科学院研究中心、国土资源部信息中心、美国海因莱因基金会对本书的编译和出版工作提供了宝贵支持,在此一并表示诚挚的谢意。

本书编译工作积极遵循“信、达、雅”和求真务实、严谨细实要求,编译、编辑团队在力求忠实于原著的基础上,对原文中的一些文字性错误进行了修正,并与国际宇航科学院原课题组研究团队通力合作,对部分内容进行了更新。

本书主要由以下人员编译完成:

张振军 中国航天科技国际交流中心副主任、中国空间法学会秘书长,承担本书主译、主审工作

陈丽萍 国土资源部信息中心战略与改革研究室主任、研究员、《国土资源情报》主编

汤文豪 国土资源部信息中心战略与改革研究室博士、《国土资源情报》执行主编

胡家焯 中国航天科技集团公司十二院工程师

张鑫伟 中国航天科技集团公司五院高级工程师
范嵬娜 中国航天科技集团公司五院高级工程师
王雪瑶 中国航天科技集团公司五院工程师
关丹 中国航天科技集团公司五院工程师
胡冠松 中国航天科技集团公司五院通信卫星事业部工程师
苗楠 郑州航空工业管理学院副教授
吕卓艳 法国国际空间大学讲师
黄泽雯 中国航天科技国际交流中心职员

需要指出，本书中文版各项观点并不代表中国航天科技国际交流中心及本书编译团队成员所在单位的意见。

中国航天科技国际交流中心及本书编委会在此谨向所有参加本书编译、编辑工作的人员及其所在单位表示衷心的感谢。由于时间仓促，水平有限，错误和疏漏在所难免，恳请广大读者提出宝贵意见。

中国航天科技国际交流中心

2017年6月8日

英文版主编致谢

《外空矿物资源——挑战与机遇的全球评估》课题研究是在国际宇航科学院（IAA）第三委员会（空间技术与系统开发委员会）的大力支持和指导下进行的，受益于国际宇航科学院许多院士特别是第三委员会院士、专家的严格评审。来自美国、中国、俄罗斯、法国、德国、英国、意大利、澳大利亚、乌克兰、以色列、西班牙、爱尔兰、日本、韩国等国的 30 名专家担任课题组成员。

如果没有来自世界各地不同领域顶级专家的宝贵而高效的共同努力，这项跨学科的课题研究不可能顺利完成到如此的精细程度。这些专家不仅无私奉献自己的时间和激情，还提供了大量素材和各自领域的专业技能。除课题组全体成员外，各章节执笔人和编辑校对人员同样居功至伟。执笔人大多来自于航天机构、商业公司、高等院校和非营利组织，也有从这些机构退休的高级专业人士。

国际宇航科学院秘书长让-米歇尔·康坦（Jean-Michel Contant）院士对本课题研究高度重视，多次过问课题研究进展，积极推荐本课题组在 2014 年举办的世界航天局长峰会期间向各国航天局政要展示研究结果，并对本课题给予高度评价。国际宇航科学院时任第三委员会主席、中国航天科技集团公司所属中国运载火箭技术研究院科技委主任鲁宇院士对本课题的成功立项和结题评审做了大量卓有成效的工作。国际宇航科学院评审委员会针对本课题报告提出大量宝贵意见，朱塞佩·雷邦迪博士（Giuseppe Reibaldi）针对课题研究内容提供了重要支持，在此一并表示感谢。特别感谢布兰德·布莱尔（Brad Blair）先生对技术内容、杰森·朱伦（Jason Juren）先生对法律内容的研究支撑，以及阿娜特·弗里德曼（Anat Friedman）女士对课题组秘书处的管理支撑。

需要指出，本课题研究成果虽然业已获得国际宇航科学院主席团的批准，但本报告中提出的任何意见、调研发现、结论及建议均为课题组成员及执笔人个人的意见，并不一定反映本课题主办机构、资助机构或课题组成员隶属机构的意见，也并不完全反映每位课题组成员的所有观点。主编注意到，不同章节之间存在少量的内容交叉重复之处。这主要是考虑到不少读者并不习惯于从头到尾按顺序阅读学术文献，因此有必要尽可能让各章自成一体，一些重要观点因此可能需要在不同章节均予以强调。主编同时也坦承，不同章节之

间的写作风格存在一些差异。这是由于我们的文案执笔人来自世界各地，文风不一致确实有所难免。我们认为，如果没有特殊情况，应该尽可能如实体现撰稿人原汁原味的描述。由于时间及专业水平的局限，缺点和疏漏在所难免，恳请广大读者提出宝贵意见。

国际宇航科学院（IAA）成立于1960年，是获得联合国认可的非政府国际学术组织，其宗旨是为和平目的促进宇航学科的发展，表彰在宇航领域具有杰出贡献的专业人士，并为全体院士提供一个能够让大家为促进航天国际合作、提升航天活动水平而贡献独到才智的国际平台。有关国际宇航科学院的更多信息，敬请访问其官方网站 www.iaaweb.org。

中国宇航出版社

本课题核心研究团队成员简介

(按照英文姓氏首字母排序)

一、课题共同主持人、共同主编

【美国】阿尔瑟·M·杜勒 (Arthur M. Dula)

阿尔瑟·M·杜勒先生是国际宇航科学院院士，美国海因莱因基金会（HPT）受托人，美国王剑-奥马兹有限公司（Excalibur Almaz）董事长兼首席执行官。兼任职务包括：国际空间法学会（IISL）会员，中国空间法学会（CISL）国际顾问咨询委员会特聘专家委员，美国国家航天协会（NSS）理事，国际空间大学（ISU）校董会成员，美国航空航天学会（AIAA）副研究员，英国星际协会（BIS）研究员，美国律师协会（ABA）科学技术和航空航天法专委会前任主席，美国休斯敦大学客座教授，具有美国得克萨斯州休斯敦市执业律师资格。

【中国】张振军 (Zhenjun Zhang)

张振军先生是国际宇航科学院通讯院士，现任中国航天科技国际交流中心副主任、中国空间法学会秘书长，《空间法学研究年刊》创刊主编，研究员级高级经济师、高级国际商务师、企业法律顾问，兼任北京市丰台区政协副主席、欧美同学会留美分会理事、国际空间法学会理事、国际宇航联合会外空安全委员会委员等职。受中国国家航天局和中国航天科技集团公司委派，自2011年起担任联合国外空委“外空活动长期可持续性”工作组专家，多次随中国代表团执行联合国外空治理规则谈判任务，深度参与国家航天立法促进和论证工作，主持多项国家部委研究课题，在国内外发表数十篇（部）空间法律政策论文、专著、合作译著及主编、共同主编著作。

二、课题组成员

【俄罗斯】奥列格·阿里夫诺夫 (Oleg Alifanov)

奥列格·阿里夫诺夫教授是国际宇航科学院（IAA）院士，俄罗斯莫斯科航空研究所（MAI）空间系统及火箭部首席科学家和行政负责人，俄罗斯航空航天科学创新教育联合体主席，俄罗斯宇航科学院副院长，俄罗斯科学院通讯院士。阿里夫诺夫教授是航空航天科技教育和研究领域的科学家、演讲家和组织者，是航空航天器的热设计和测试领域的专家。

【沙特阿拉伯】海赛姆·阿尔特韦瑞 (Haithem Altwaijry)

海赛姆·阿尔特韦瑞博士现任美国加州理工学院地球与空间科学联合项目的共同主任，曾任 KACST 空间研究所所长及沙特阿拉伯国家卫星技术项目副主任。

【乌克兰/美国】博赫丹·I·拜吉姆克 (Bohdan I. Bejmuk)

博赫丹·I·拜吉姆克先生是一位航空航天资深顾问，对空间系统和运载火箭具有深刻的了解，曾在波音公司从事管理工作，曾任美国国家航空航天局 (NASA) 星座计划常设审查委员会主席，并担任 2009 年奥古斯丁委员会成员。

【法国】乔瓦尼·F·贝格美 (Giovanni F. Bignami)

乔瓦尼·F·贝格美教授是法国天体物理学和外空研究领域最权威的科学家之一，曾率先发现了中子星“Geminga”。乔瓦尼·F·贝格美教授曾在法国图卢兹担任光学空间研究中心主任，曾任意大利天体物理研究所所长，同时也曾担任国际空间研究委员会 (COSPAR) 主席，并曾担任法国天体物理研究所 (INAF) 所长。

【法国】克里斯多夫·博纳尔 (Christophe Bonnal)

克里斯多夫·博纳尔先生是国际宇航科学院通讯院士，目前在法国空间研究中心 (CNES) 担任高级专家。他是法国航空航天协会会员，并自 2000 年以来担任该协会下属的空间运输委员会主席。

【澳大利亚/意大利】安德里亚·博伊德 (Andrea Boyd)

安德里亚·博伊德先生曾作为一名机电工程专业的毕业生，在欧洲空间局中心担任国际空间站飞行控制团队的飞行操作工程师。安德里亚·博伊德已在 50 多个国家参与了各类自筹资金研究项目，联合创建航空航天期货公司，并帮助澳大利亚阿德莱德赢得 2017 年国际宇航大会 (IAC 2017) 的承办权。

【哥斯达黎加/美国】富兰克林·张-迪阿兹 (Franklin Chang-Diaz)

富兰克林·张-迪阿兹先生是一名机械工程师、物理学家，同时也是美国阿斯特拉 (Ad Astra) 火箭公司的总裁和创始人。富兰克林·张-迪阿兹先生曾是 NASA 的一名航天员，曾在约翰逊航天中心担任 NASA 高级空间推进实验室主任。他在美国麻省理工学院 (MIT) 担任访问学者期间 (1983—1993)，主持完成一个研发项目，开发了用于载人飞往火星的等离子推进器。

【美国】凯瑟琳·康利 (Catharine Conley)

凯瑟琳·康利博士是位于美国华盛顿特区的 NASA 总部的行星保护官员和科学任务指挥部成员，并负责确保美国遵守联合国《外空条约》第九条的履约监督工作。凯瑟琳·康利博士曾担任 NASA 艾姆斯研究中心的研究科学家，其研究领域主要集中在运动演变规律，特别是动物肌肉的演变规律。

【美国】阿尔瑟·M·杜勒 (Arthur M. Dula)

阿尔瑟·M·杜勒先生是国际宇航科学院院士，美国海因莱因基金会 (HPT) 受托人，美国王剑-奥马兹有限公司 (Excalibur Almaz) 董事长兼首席执行官。兼任职务包括：

国际空间法学会 (IISL) 会员, 中国空间法学会 (CISL) 国际顾问咨询委员会特聘专家委员, 美国国家航天协会 (NSS) 理事, 国际空间大学 (ISU) 校董会成员, 美国航空航天学会 (AIAA) 副研究员, 英国星际协会 (BIS) 研究员, 美国律师协会 (ABA) 科学技术和航空航天法专委会前任主席, 美国休斯敦大学客座教授, 具有美国得克萨斯州休斯敦市执业律师资格。

【以色列/美国】阿娜特·弗里德曼 (Anat Friedman)

阿娜特·弗里德曼女士具有以色列律师执业资格, 是美国王剑-奥马兹有限公司的法律专员, 并担任“国际武器交易管理条例”(ITAR) 和“出口管理条例”(EAR) 的授权官员, 专事编制与新型商业化低地球轨道飞行和跨月球载人航天飞行相关的专有技术援助协议。阿娜特·弗里德曼女士在以色列获得法学学士学位, 在美国休斯敦大学获得法学硕士学位。

【斯里兰卡/美国】希拉子·杰里尔-汗 (Shirazi Jaleel-Khan)

希拉子·杰里尔-汗女士是在美国纽约和斯里兰卡同时获得执业资格的商标及版权业务专业律师, 对外层空间法具有浓厚兴趣。希拉子·杰里尔-汗女士在斯里兰卡获得法学学士学位, 随后在美国得克萨斯州休斯敦大学获得法学硕士学位。

【爱尔兰】苏珊·麦肯纳-朗罗尔 (Susan McKenna-Lawlor)

苏珊·麦肯纳-朗罗尔教授是一名天体物理学家, 也是爱尔兰梅努斯大学的实验物理学教授。1986年, 苏珊·麦肯纳-朗罗尔教授与风险投资家德莫特·德斯蒙德 (Dermot Desmond) 共同建立从事航天仪器制造业务的航天技术爱尔兰有限公司 (STIL), 并担任该公司执行董事。苏珊·麦肯纳-朗罗尔教授在1986年获得年度康复人物奖, 2005年当选为国际宇航科学院院士。

【韩国】李泰山 (Tai Sik Lee)

李泰山博士是韩国土木工程建筑技术研究所 (KICT) 所长, 韩国汉阳大学土木与环境系统工程系教授。近年来, 李泰山博士成功发起若干个国际项目, 例如经合组织 (OECD) 空间论坛 (2006年), 并主办一系列国际会议, 如 COP211、第七届世界水论坛、2015年第25届世界道路大会和 ASCE 地球与空间会议 (2008年和2012年)。通过他的社会活动、研究项目和出版物, 李泰山博士为国际建筑业的发展做出了贡献, 支持了发展中国家的建筑技术及后续外层空间建设的未来发展。

【美国】罗格·李纳德 (Roger Lenard)

罗格·李纳德先生是国际宇航科学院院士, 美国行星电力公司首席技术官, 杰出的物理学家、工程师和美国空军战斗机飞行员。罗格·李纳德先生不久前曾担任 NASA 主系统工程师和 Sandia 国家实验室项目技术团队的首席成员, 向马歇尔航天飞行中心提供有关核电及核热力推进计划的技术和程序性建议。罗格·李纳德先生曾在美国的两个总统研究委员会和四个国防科学委员会任职。

【中国】李芙蓉 (Furong Li)

李芙蓉教授毕业于北京大学，国际宇航科学院院士。李芙蓉教授自 20 世纪 70 年代初一直在中国航天系统工作。长期以来主要从事航天科普教育工作和航天科技领域的国际学术交流与合作事务。曾任中国宇航学会 (CSA) 副秘书长，国际宇航联合会 (IAF) 大会选址委员会委员，现任美国海因莱因基金会亚洲地区顾问。

【美国】约翰·曼金斯 (John Mankins)

约翰·曼金斯先生是美国 Artemis 创新管理解决方案有限公司总裁，是国际公认的空间系统和技术创新领军人物。约翰·曼金斯先生在 NASA 和设在加州理工大学的喷气推进实验室 (JPL) 拥有 25 年的职业生涯，亲历了从飞行项目和太空任务运行到系统级创新和先进技术的研发管理。约翰·曼金斯先生是国际宇航科学院院士并担任第三委员会 (空间技术与系统开发) 主席，并在国际宇航联合会、美国航空航天学会和 Sigma Xi 研究会担任委员。

【美国】乔治·C·尼尔德 (George C. Nield)

乔治·C·尼尔德博士是美国联邦航空管理局 (FAA) 负责商业航天运输业务的副局长。乔治·C·尼尔德博士在美国空军、NASA 以及私人工业领域拥有 30 多年的航空航天经验，曾担任美国航天与导弹系统组织的宇航工程师，美国空军飞行测试中心的飞行测试工程师，美国空军学院助理教授和研究主任，NASA 约翰逊航天中心航天飞机计划飞行整合办公室主任，曾参与过美国航天飞机/俄罗斯和平号空间站计划及国际空间站计划。

【俄罗斯】费拉季斯拉夫·舍夫琴科 (Vladislav Shevchenko)

费拉季斯拉夫·舍夫琴科先生是俄罗斯天文学家，专门从事月球探测领域的研究工作。他是莫斯科国立大学 Sternberg 国家天文研究所月球和行星研究系主任，并担任国际天文学联合会、国际天文学会、国际大地测量与地球物理联合会及国际空间研究委员会会员。

【英属马恩岛/美国】克里斯多夫·斯托德 (Christopher Stott)

克里斯多夫·斯托德先生是 ManSat 公司董事长兼首席执行官，ManSat 是一家从事轨道频率和监管服务的专业公司，总部设在英属马恩岛，客户遍及北美洲各地。克里斯多夫·斯托德先生还分别在国际卫星专业人士协会 (SSPI)、国际商业航天研究所 (IISC) 理事会任职，也是国际空间大学工商管理学院联合主席，同时是国际空间大学的教师和校董会成员。

【美国】凯西·斯旺 (Cathy Swan)

凯西·斯旺博士是国际宇航科学院院士，现任美国西南分析网络公司总裁，获美国加州大学洛杉矶分校博士学位。她的专业研究领域是空间政策，博士论文主题是“长时间航天飞行的影响及乘组人员承受压力研究”。1989 年，她在美国首都华盛顿成立“军备控制和技术评估中心”，专事处理极其复杂的卫星操作、军备控制及履约核查工作。凯西·斯旺博士参与了国际宇航科学院许多课题研究工作，出版了许多论文和著作，其

中包括国际宇航科学院另一项课题研究报告《太空电梯：技术可行性和前行之路的评估》（2014年）。

【美国】彼德·斯旺（Peter Swan）

彼德·斯旺博士是国际宇航科学院院士，现任国际太空电梯联盟（ISEC）总裁。多年来，他所带领的团队通过持续研究和年度会议不断推动“太空电梯”这一概念的发展。1998年，彼德·斯旺博士协助创建了一家教授空间系统工程的科技公司，他所开设的课程强调成功开发国家级空间系统所必需的工程技能和管理技能。彼德·斯旺博士早年毕业于美国加州大学洛杉矶分校机械工程系空间系统专业，曾参与国际宇航科学院多个宇宙课题研究项目。在过去十年中，他作为作者、共同作者及共同主编出版了很多著作，其中包括国际宇航科学院另一项课题研究报告《太空电梯：技术可行性和前行之路的评估》（2014年）。

【美国】里克·特姆林森（Rick Tumlinson）

里克·特姆林森先生是美国数家航天专业公司和非营利组织的联合创始人，包括深空工业公司、空间轨道装备公司、新世界研究所和空间前沿基金会等。里克·特姆林森先生是一名非常活跃的商业航天创业企业家和航天事务活动家。他领导了接替和平号空间站的相关任务并打造了世界上首个商业化航天设施的团队，将金融家丹尼斯·蒂托（Dennis Tito）发展成为第一个短期驻留国际空间站的普通公民探险家，并且是X奖励基金的创始受托人。里克·特姆林森先生共同创立了航天前沿基金会，并发起成立得克萨斯航天联盟、地球之光研究所等机构。里克·特姆林森先生曾在美国参议院两次就空间政策问题作证，在美国众议院就空间政策问题四次作证，并协助NASA制定了重返月球计划、组建了月球探测分析小组。

【中国】杨俊华（Junhua Yang）

杨俊华先生为国际宇航科学院院士，研究员，原中国航天国际交流中心主任，中国宇航学会原副理事长兼秘书长，中国空间法学会原副理事长，世界空间周协会（WSWA）理事会原理事。长期从事航天科技领域的国际国内学术交流、国际合作事务及航天科普教育工作。

【中国】张振军（Zhenjun Zhang）

张振军先生是国际宇航科学院通讯院士，现任中国航天科技国际交流中心副主任、中国空间法学会秘书长，《空间法学研究年刊》创刊主编，研究员级高级经济师、高级国际商务师、企业法律顾问，兼任北京市丰台区政协副主席、欧美同学会留美分会理事、国际空间法学会理事、国际宇航联合会外空安全委员会委员等职。受中国国家航天局和中国航天科技集团公司委派，自2011年起担任联合国外空委“外空活动长期可持续性”工作组专家，多次随中国代表团执行联合国外空治理规则谈判任务，深度参与国家航天立法促进和论证工作，主持多项国家部委研究课题，在国内外发表数十篇（部）空间法律政策论文、专著、合作译著及主编、共同主编著作。

此外，参与本课题研究的核心团队成员还包括：美国的拉塞尔·E·杜勒（Russel E. Dula）先生、西班牙的约瑟·戈维拉（Jose Gavira）先生、西班牙的费尔南多·G·冈萨雷斯（Fernando G. Gonzalez）先生、意大利的安德里亚·索马里瓦（Andrea Sommariva）先生、德国的汉斯·E·W·霍夫曼（Hans E. W. Hoffmann）先生、日本的藤原诘·吉由弘（Hiroshi Yoshida）先生等。

中国民航出版社

本课题报告撰稿团队成员名单

一、参与本课题报告研究、撰稿和编辑工作的个体成员

美国的阿尔瑟·M·杜勒 (Arthur M. Dula) 先生

中国的张振军 (Zhenjun Zhang) 先生

美国的彼德·斯旺 (Peter Swan) 先生

美国的罗格·李纳德 (Roger Lenard) 先生

美国的凯西·斯旺 (Cathy Swan) 女士

美国的布兰德·布莱尔 (Brad Blair) 先生

以色列/美国的阿娜特·弗里德曼 (Anat Friedman) 女士

斯里兰卡/美国的希拉子·杰里尔-汗 (Shirazi Jaleel-Khan) 女士

美国的杰森·朱伦 (Jason Juren) 先生

二、参与本课题报告供稿、撰稿工作的机构成员

美国海因莱因基金会 (HPT)

美国国家航天协会 (NSS)

国际空间开发大会 (ISDC)

美国得克萨斯农工大学航空航天工程系

欧洲空间大会 (都灵)

新空间会议

国际空间大学 (ISU)

国际太空电梯联盟 (ISEC)

中国宇航学会 (CSA)

中国空间法学会 (CISL)

加拿大航天协会 (CSS)

澳大利亚航天协会 (ASS)

三、参与本课题报告供稿、撰稿工作的商业航天企业

美国月球快车公司

美国王剑探索有限公司

美国深空工业公司

美国阿斯特拉火箭公司

美国沙克尔顿能源公司

中国民航出版社

全书内容摘要及相关事件概述

外空矿物资源（SMR）开发正在成为一项为全人类福祉和裨益而开展的商业航天行为。2012年，国际宇航科学院（IAA）批准从技术、经济、法律和政策等层面开展关于识别、获取和利用外空矿物资源的全方位研究。2013年和2014年，多家商业航天企业宣布其对月球、火星和小行星实施载人或机器人探索任务的意向。如今，关键问题并不在于要不要利用、如何利用外空矿物资源，而是如何最有效地利用它们。本课题研究的目的是在同一份文献中提供当前状态下与外空矿物资源相关的先进技术、经济、法律和政策分析。本课题还针对相关机遇和挑战进行了简要分析并提出了具体而务实的应对建议。

航天事业及地基采矿业的迅猛发展，使得人类对外空矿物资源进行工业化利用不再是天方夜谭；而且其可行性已经不再完全由工程决定，经济学原理在这里也将发挥至关重要的作用。初步的经济结论包括：第一、仅仅局限于将外空贵金属运回地球表面的总体设计似乎并不切合实际；第二、对推进剂、易耗品、结构材料和屏蔽物具有需求的太空客户的存在，使得小行星采矿活动在经济上变得可行；第三、长远来看，随着开发成本的不断下降和市场规模的持续扩大，同时服务地球客户和太空客户的混合式架构设计也将变得现实可行。

本课题研究的假设条件是国际航天业界能够另辟蹊径、有所作为。作为一个行业和人类的一部分，航天人可以也应该能够改变历史发展方向，使人类的生存发展状况能够得到持续改善。实现这一战略目标所需要的变化是：

有效利用太阳系现有的海量资源。这些资源来自于外空，更要服务于外空。

本课题研究团队主要来自两个行业的高级专家：航天业和商业采矿业。因此，本报告也将服务两大读者群：全球航天业和采矿业的领导者及广大同仁。

本课题研究得出的主要结论：

本课题组发现，外空矿物资源的有效开发利用将使得地球表面与太阳系内附近位置之间的经济旅行成为可能。在小行星、月球或火星开采水资源的关键要素在于未来的太空港可资利用。外空水资源将确保载人航天活动能够超越低地球轨道（LEO）向外拓展，而且成为驱动其他外空矿物资源开发利用的赢利动力。上述结论的支撑性论据源于以下的课题研究发现概述。

本课题研究的总体发现：

商业航天企业不能坐等政府的航天计划来降低技术和项目风险。商业航天企业必须确定其获得商业化成功的优化路径，积极主导超越低地球轨道的探测活动。21世纪上半叶，商业航天活动将成为人类航天活动的重要组成部分；航天领导力将主要来自商业航天企

业，而且不再完全依赖政府的航天计划。形成这些倡议的概念基础是为了让政府机构确信，商业航天企业将率先“走出去”，并将能够通过指定地点向政府项目销售太空产品来支持政府的航天探索活动。

发现之一：降低技术风险，开展工程设计

针对小行星和月球表层土进行采矿已在人类目前掌握的技术状态范围之内。推动地基采矿技术在外层空间的直接应用似乎成为必然路径，但由于外层空间具有真空、微重力和极端天气条件等因素，因此需要进行大量的适应性调整。科研人员已经提出很多解决方案并在地球上进行了环境模拟试验，从而让我们针对这一主题能够得出积极的结论。

发现之二：低成本进入外空将促进外空资源开发

航天发射活动的财务问题实际上大都集中在进入外空的发射成本上，特别是摆脱地球引力进入低地球轨道阶段。目前，人类进入深空的成本极为昂贵，因为别无选择，所以只有在确有必要时才会证明其合理性。而本课题研究发现：低成本进入外空特别是深空的现实需求将牵引外空资源开发活动的开展。如果降低两个数量级的空间运输成本就能抵达地月轨道拉格朗日点 1 (EML-1)，将会推动大批企业家涌入这一市场去追求巨大的商业机会。

发现之三：确立法律制度框架，确保国际法国内法相统一

尽管外层空间及其天体属于“全球公域”范围，需要受到国际法和国际空间法的规制。但经验表明，各国的国内法却是直接约束政府和私人行为体开展航天活动的主要法律框架。外空矿物资源的开采权和所有权需要符合一国国内法的规定，同时也需要与现行国际法基本原则保持一致。国际空间法已经明确，各国需要通过其国内法管制本国的航天活动。

另一方面，在防范和解决来自不同国家的空间活动行为体之间可能发生的潜在国际利益冲突方面，国际法的介入更加至关重要。而国家实践辅之以符合国际法基本原则的国内立法，将在外空矿物资源探索 and 开发领域促进具体国际规则的确立和应用，从而寻求从国际角度为所有的利益相关者提供最大的法律确定性。本课题研究团队期待，商业航天活动的先驱们能够为全人类的共同利益进一步发展国际空间法做出应有的贡献。

发现之四：外空矿物资源开发基本路线图

在本课题研究期间，多家从事或拟从事外空矿物资源开发的商业航天公司提交了各自的路线图，以开展有利可图的外空采矿业务。综合来看，当前人类开展外空矿物资源开发的基本路径似乎清晰可见：

第一阶段：2014—2020 年间，在地球启动商业基础设施建设。

第二阶段：2015—2022 年间，在低地球轨道 (LEO) 验证相关的硬件设施，并到潜在的小行星执行试验飞行任务。

第三阶段：2018—2029 年间，正式启动外空采矿项目并销售相关产品。预期结果：在 EML-1 销售水资源。

建立太空港并售卖从月球或小行星上开采的水资源将使人类在太阳系获得长足发展。

这样的发展意义非凡，因为来自月球或小行星的水资源价格肯定要比从地球表面提取输送到外空便宜得多。当人们发现，为到达月球轨道，地球发射场的有效载荷中超过 80% 的质量是推进剂，人们便会认识到，发射到轨道上的有效载荷中水资源的价格应该会有多高。经济学计算结果显示，开发于月球或小行星上的水资源价格将比从地球运送上来的水资源价格至少低出两个数量级。在外层空间原位加工、售卖水资源的商业活动应该能够获得成功。从人类的拓荒历史中可以发现，许多早期企业的成功秘诀均在于就地找到可以向后续探险者及定居者出售的资源。在地月经济圈，这样的资源就是水。水资源必将成为未来太空经济的“通用货币”。

在国际宇航科学院及各有关方面的大力支持下，本课题研究呈现出敢为人先、选题精准、及时高效、影响广泛等特点，2012 年正式立项，2013 年正式启动，2015 年 8 月全面完成相关工作。先后持续 30 个月的课题研究活动，有效激发了国际宇航界对外空资源开发这一主题的浓厚兴趣，产生了较为广泛的国际影响。这里仅仅列举其中近年来 12 个与外空资源开发相关的典型事件：

(一) 2014 年 9 月 6 日~7 日，美国国家航空航天局 (NASA) 旗下的艾姆斯 (Ames) 研究中心举办题为“近地天体经济学”的专题研讨会，其目的之一是“作为促进工业界、学术界和政府之间加强沟通和合作的催化剂”。会议详情见本书附录 G。

(二) 2014 年 12 月 1 日，在荷兰政府的支持推动下，“外空矿物资源治理”会议在荷兰海牙召开。这次会议的主要成果是宣布依托荷兰莱顿大学组建非官方的海牙外空资源治理工作组，专门研究外空资源开发的国际治理规则问题。该工作组自 2016 年 4 月以来，已经先后召开三次正式会议。

(三) 2015 年 3 月 20 日~21 日，卢森堡政府经济部举办题为“走进外空资源利用”的专题研讨会。会议围绕商业行为和政府活动的关系，以及需求、投资与技术成熟度的关系，风险识别等话题展开讨论。

(四) 自 2015 年 10 月起，一年一度的国际宇航大会 (IAC) 追加一个独立的分会场，名为“外空矿物资源、小行星采矿及月球/火星原位资源利用”。

(五) 2015 年 11 月 25 日，美国时任总统奥巴马签署《商业航天发射竞争力法》，其第四部分《2015 年外空资源探索和利用法》对已获取的小行星资源或外空资源的相关权利作出明确规定，对现行外空法律制度构成重大突破。

(六) 2015 年 12 月 8 日~20 日，针对美国颁布的《2015 年外空资源探索和利用法》，国际空间法学会 (IISL) 理事会以协商一致方式编制并发布《国际空间法学会关于外空资源开采的立场文件》表达关切，成为率先发声的国际组织和学术权威机构。

(七) 2016 年 2 月 3 日，卢森堡副首相兼经济部长埃蒂安·施耐德 (Etienne Schneider) 宣布，卢森堡政府将通过包括为企业报销 45% 的研发费用、直接向企业注资等一系列激励政策，加快推动小行星采矿业的发展，吸引一批美国商业航天企业在卢森堡创新创业。2016 年 6 月 3 日，卢森堡首相泽维尔·贝特 (Xavier Bettel) 和副首相兼经济部长埃蒂安·施耐德举办新闻发布会，宣布其小行星采矿立法计划，同时宣布愿意向有志

于从事小行星采矿的公司进行投资。埃蒂安·施耐德同时宣布，美国深空工业公司和行星资源公司已在卢森堡开设子公司，卢森堡将成为后者的主要股东。2017年，卢森堡国会通过外空资源立法成为全球第二个进行外空采矿专门立法的国家。

(八) 2016年2月15日~26日，联合国外空委科技小组委员会第53届会议在维也纳举行，俄罗斯、巴西等国代表团对美国的外空资源单边立法行为提出尖锐批评。2016年4月4日~15日，联合国外空委法律小组委员会第55届会议在维也纳举行，外空资源开发利用涉及的法律问题成为各国辩论热点。会议决定将“关于外空资源探索、开发和利用活动的潜在法律模式的一般性意见交流”列为法律小组委员会正式议题。

(九) 2016年3月18日，欧洲空间局（ESA）旗下的欧洲空间法中心（ECSL）举办题为“从科技和法律视角看外空自然资源开发”的主题论坛，外空资源归属问题再度引发热议。

(十) 2016年9月8日，美国国家航空航天局（NASA）用“宇宙神”5-411运载火箭发射无人探测器，启动执行其首次小行星采样返回任务。

(十一) 2017年3月27日~4月7日，联合国外空委法律小组委员会第56届会议在维也纳举行，“关于外空资源探索、开发和利用活动的潜在法律模式的一般性意见交流”首次成为正式议题。会议期间，国际空间法学会和欧洲空间法中心联合举办空间法研讨会，会议主题是“《外空条约》通过50年之后如何看待探索、开采、利用外空资源的法律模式”。

(十二) 2017年6月5日~8日，中国宇航学会（CSA）和国际宇航联合会（IAF）联合举办的全球航天探索大会（GLEX 2017）在北京隆重举行，深空探测成为举世瞩目的热点话题。

2017年3月，本课题两位共同主持人发起的《外空矿物资源——挑战与机遇的全球评估》第2期学术课题研究正式通过国际宇航科学院的立项评审。目前，课题研究团队已经成立，课题研究工作已经全面启动，研究内容将更加聚焦、更加深入。课题组期待各国各界专业人士积极支持参与后续的课题研究工作。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.0 引言	1
1.1 需求	1
1.1.1 选择太空	2
1.2 外空矿物资源的概念	3
1.2.1 SMR 的开发方式	5
1.2.2 SMR 概念的简史	8
1.2.3 SMR 的分类	10
1.3 法律政策概述	16
1.4 治理	17
1.5 国际宇航科学院课题研究	17
1.5.1 本报告的组织结构	18
第 2 章 外空矿物资源开采	20
2.0 摘要	20
2.1 研究报告范本	20
2.2 现今的商业项目	22
2.2.1 月球商业开发公司	23
2.2.2 小行星开发公司	23
2.2.3 商业火星开发公司	24
2.2.4 太空缆绳和太空电梯公司	26
2.3 投资人	26
2.4 可应用的政府项目——小行星重定向任务	27
2.5 SMR 的益处	29
2.6 SMR 的开采	32
2.6.1 获取阳光资源	32
2.6.2 获取材料（矿石）	32
2.7 加工（从矿石到产品）	39

2.8	支持 SMR 的外空资源及其加工制造	40
2.8.1	源头加工	40
2.8.2	工厂加工	41
2.8.3	SSP 加工	41
2.9	SMR 关键工艺的评估	42
2.9.1	资源提取	44
2.9.2	备料和运输	44
2.9.3	资源加工	44
2.9.4	太空制造	45
2.9.5	太空建设	45
2.9.6	产品捕获、存储、精炼和分配	46
2.9.7	能量需求	47
2.9.8	SMR 技术开发计划的现状	47
2.10	研究与开发概念	47
2.11	SMR 系统小结	50
第 3 章	市场分析	52
3.0	SMR 系统的概念	52
3.1	SMR 的产品价值及实例	52
3.2	主要市场描述	53
3.3	SMR 的市场评估与经济学分析	58
3.3.1	SMR 市场和经济预研	58
3.4	SMR 的市场与经济学评估	64
3.4.1	理解市场	64
3.5	法律和经济学——市场的助推器	72
3.6	SMR 的市场机遇小结	73
第 4 章	外空矿物资源开发路线图	76
4.0	绪论	76
4.1	框架开发	77
4.2	SMR 路线图	81
4.2.1	深空工业公司 (DSI)	82
4.2.2	行星资源公司 (PR)	85
4.2.3	沙克尔顿能源公司 (SEC)	88
4.2.4	王剑探索公司 (EE)	94
4.3	对比与总结	102

第 5 章 外空矿物资源系统速览	103
5.1 SMR 支持系统——可重复使用火箭	103
5.1.1 地球和轨道运输	104
5.1.2 太空运输	108
5.1.3 轨道动力学	110
5.1.4 产品向地球的递送	111
5.2 SMR 创新性支持系统	111
5.3 支持 SMR 的通用功能架构	118
5.3.1 识别	118
5.3.2 资源开采	119
5.3.3 矿物的装卸和运输	120
5.3.4 资源加工	120
5.3.5 太空制造	121
5.3.6 先进制造业将开辟新的太空市场	121
5.3.7 太空建造	121
5.3.8 产品捕获、存储、提炼和分配	122
5.3.9 小行星捕获	122
5.3.10 能量生产	123
5.4 研究与开发的目标	124
5.5 机遇概述	125
5.5.1 有人照料系统的维护	126
5.5.2 自动组装、维护和维修	126
5.5.3 基于空间的使用接口系统	127
5.6 技术成熟度和风险评估	128
5.6.1 假设条件和方法	130
5.6.2 SMR 关键技术的评估	131
5.6.3 借力 65 年以来的太空研究经验	132
5.6.4 保卫地球	134
5.7 SMR 技术开发项目的状况	134
5.7.1 SMR 关键风险的识别	134
5.7.2 风险减缓策略	135
5.7.3 用于风险评估和减缓的系统工程工具	137
5.7.4 在降低 SMR 风险方面公共/私人合作的作用	137
5.8 风险在机遇管理中的作用	140

5.8.1	作为进入市场壁垒的风险	141
5.8.2	公共与私营风险偏好	141
5.8.3	领先指标的开发	141
5.8.4	机遇可能伪装为风险	142
5.9	技术成熟度和风险评估小结	143
5.10	SMR 设计参考任务	143
5.10.1	NASA 载人小行星探测任务之设计参考任务	145
5.10.2	国际政府间设计参考任务	147
5.10.3	基于太空市场的设计参考任务	149
5.10.4	基于地球市场的设计参考任务	151
5.11	小行星镍加工的设计参考任务	153
第 6 章	建模分析	160
6.0	前言	160
6.1	机器人小行星探测器	161
6.2	系统建模框架	166
6.3	基于人类旅行和定居的太空市场需求	169
6.3.1	基本规则和假设条件	170
6.3.2	人均消费和运输	173
6.4	空间基础设施预测	175
6.5	产品分配和推进剂加注的节点	178
6.6	SMR 稻草人操作概念模型	182
6.7	SMR 定价与均衡建模	182
6.8	稻草人模型分析和评价	185
6.9	SMR 建模分析小结	186
第 7 章	政策与法律视角下的外空矿物资源	187
7.0	引言	187
7.1	一般性政策、法律与规则考量	188
7.1.1	近地操作安全问题	190
7.2	外空资源所有权	191
7.2.1	法律背景	192
7.2.2	与 SMR 相关的条约	193
7.2.3	习惯国际法及其与 SMR 的相关性	197
7.2.4	为何允许提取 SMR	200
7.2.5	外空资源所有权小结	206

7.3 SMR 系统的政策考量	206
7.4 法律与政策小结	206
第 8 章 研究发现、结论与建议	208
8.0 重要成果	208
8.1 主要发现	209
8.2 SMR 基础路线图	211
第 9 章 面向未来的概念设计	213
附录 A 术语及缩略词	214
附录 B IAA 课题管理大纲	216
附录 C 针对水资源的需求分析	219
附录 D 针对镍资源的需求分析	221
附录 E 全球战略情景分析	223
附录 F 国际宇航科学院简介	228
附录 G 近地天体经济学	230
参考文献	236

中国民航出版社

第 1 章 绪论

1.0 引言

当我今天早上醒来，环顾四周，我所看到的大自然正处于危机之中。

我们不得不回收牛奶容器，汽油价格达到每加仑 4 美元，水资源需要限量供应，极端天气似乎越来越多，还有威胁人类生命安全的风暴、城市上空爆炸的小行星不时光顾，我们所到之处也都非常拥挤。如果将这种现象从一个小社区扩展到全人类，那么“罗马俱乐部”（梅多斯，1972）的预言似乎就变成了现实。然而，开发外空资源不仅将会改变我们的生活，也将改变我们的命运。对此我们能做什么并不是问题之所在。问题的关键在于，我们能做些什么来应对那些快要淹没这个世界的难题。答案似乎是简单的：

- 1) 对日渐稀少的资源进行等式变量；
- 2) 对假设条件作出改变；
- 3) 增加资源供给，锐意创新，不断创造就业岗位和财富。

本课题研究的前提是国际航天界能够另辟蹊径、开创未来。我们，作为一个行业，作为人类的一部分，可以改变当前的历史发展潮流，使它步入更加积极乐观的方向。唯有如此，人类的生存条件才能得到改善和提升。我们应当去完成的变革就是：

有效利用我们太阳系中可用的海量资源。取之于太空，用之于太空。

1.1 需求

犹豫和冷漠正在侵蚀我们脚下的地面，人类在灾难的边缘摇摇欲坠。我们背后是一个拥挤不堪而且备受资源约束的世界，而我们面对的却是充满无限可能和危险的悬崖峭壁。我们是否应该注意“伊卡洛斯命运”的警告，把我们的脚步牢牢地放置在当下；或者，人类应当准备好亲吻天空，并把生物、创造力和数字记忆的使者传入未知的荒野？我们的选择，正如赫伯特·乔治·威尔斯所言：“要么选择宇宙，要么一无所有。”

地球也许到了一个临界点。根据最新的研究，“罗马俱乐部”做出的灾难预测与当前数据相符，这意味着如果当前的发展趋势保持不变，到 2050 年地球环境将很有可能崩溃。如果没有颠覆性的事件或者突破性的科技出现，人类将不得不面对其“增长的极限”。很显然，地球上的矿物和能源正在消耗殆尽。矿物，被定义为一种不可再生资源。人类的消费需求继续增加，因为全球性贫困正在被一个新兴的全球中产阶级所替代，他们渴望物质丰富的生活方式。人类正在稳步地消耗着地球上有限的资源。虽然通过创造替代品和提高

效率，开发新技术给我们带来了希望，但是有数据清楚地表明，全球年度人均消费总量仍然在不断上涨。正如一位作者所言，消费着“最后几个小时的古老的阳光”，我们已经走上了一条不归之路 [哈特曼 (Hartmann), 1999] ——比喻我们将不可再生和快速消耗的碳氢化合物库存作为我们的能量金字塔的根基。这是一条不可逆转的道路，很容易导致社会崩溃。但是，一种方法就是利用外空资源并推翻那个预言，正如奥尼尔博士 [奥尼尔 (O' Neill) 1976] 所描绘的那样：

“只有当人们忽视了我们大气层之外的所有资源，忽视了那些数千倍于我们从这个被困的地球所能获得的所有资源的时候，生长极限的宿命论或许才是合理的。正如‘房屋决议案 451’中用美妙的语言所表述的那样：‘这个微小的地球并不是人类的监狱，她并非一个封闭的、资源不断减少的星球，事实上她处于一个充满机遇的庞大体系之中……’”

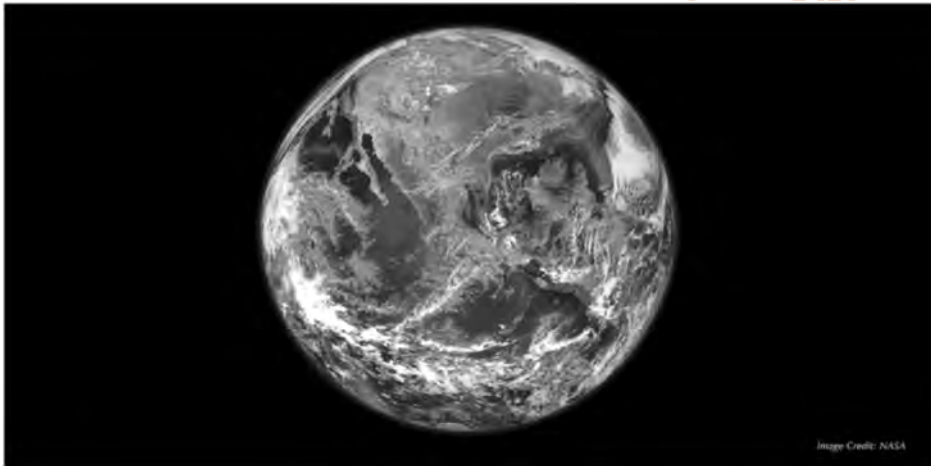


图 1-1 从太空观察到的脆弱的地球 (NASA 图片)

1.1.1 选择太空

术语“选择太空”的首创者马尔科·贝尔纳斯科尼博士和阿瑟·伍兹博士认为，对外层空间的利用将为人类推翻“罗马俱乐部”的预言创造条件。他们相信：

“‘选择太空’概念是一种利用近地资源，特别是太空能量，以满足人类的基本和预期需求的渐近式计划。” [伍兹 (Woods)]

作为人类继续成长并以体面方式走向未来的手段，这一概念已经被讨论了多年。对于太空旅行者，即那些走出去探险完成伟大壮举以改变未来、使世界更加强大的人们来说，宇宙现在已对他们敞开了大门。技术上的投资、人文精神和突破低地球轨道的商业活动将使人类能够保持积极的增长。

伍兹和贝尔纳斯科尼在他们的网站上写道：

“来自太空的无限的环境清洁能源不仅能维持和刺激全球经济，开发其他地外资源最

终也将保证人类的后代有足够的物质资源供应。因此，虽然现在的先进社会可以保证人类的生活水平和持续发展，但我们星球上也存在不太幸运的群体，‘选择太空’将为其生活水平的提高带来希望。因此，‘选择太空’可以并且应当成为太空可持续探索和发展的主要动机——甚至是超越国家荣誉、安全和科学探索的更强大的太空探索驱动力。事实上，它应该是吸引新一代探险家和企业家的能量和资本、开启“新型太空经济”的催化剂。如果能够及时实施并且有足够的保障条件，最终将收获的是充满繁荣和活力的星际文明、健康的环境，甚至有可能超越合理预期，提供可以供人类这一物种在太空中扩张到太阳系及其以外的基础设施条件。”（伍兹）

“选择太空”的执行力将会导致：

1) 快速增长的技术被航天公司和航天国家所利用，并刺激高效制造和地外资源回收技术的飞跃发展。

2) 地外发展所需的外空矿物资源将被大规模利用，并且必要时，稀缺资源将会被带回地球以满足地球上的消费需求。

3) 随着小行星交会对接和采矿方面经验的积累，针对太空中威胁性天体的设计、跟踪及移转能力将会大大提升。

4) 对燃煤能源的需求将会大幅度下降，因为太阳能发电卫星将提供能源，且几乎不会排放任何温室气体。

5) 基于参与或支持这些地外活动的巨大教育培训需求，新的学习环境将在全球范围内呈现激活状态。

6) 为了支持地外活动，大量的投资和资源需求将会刺激全球经济，新兴经济必须具备独创性和进取性，才能确保它们能够支持这些高度复杂的地外活动。

7) 人类在地外拥有未来这一意识的涌现，使得人文精神被再次唤醒并注入能量。

8) 重新点燃“扩张主义”激情理念：“去吧，年青人”。

1.2 外空矿物资源的概念

外空矿物资源（SMR）这个概念是整个“选择太空”的关键组成部分。SMR 商业化已经讨论了几十年了。克拉夫特·艾瑞克早在 20 世纪 60 年代就已强调“地外的必要性”。“这个想法指的是，克拉夫特·艾瑞克坚信，为了维持物种的持续发展，探索太空并利用太阳系的资源是人类的责任所在，没有任何外在的‘发展的限制’”[维基百科，艾瑞克（Ehrlicke）]。现在，在 SMR 的利益驱动下，大胆、创新和冒险精神将会带领人类走向地外星球并提升地球自身环境。可以提供两种 SMR 开采方式。航天科技可以直接通过提供新的消费替代品、更高效的材料和更有效的回收利用，来缓解地球的压力。而且，人类现在有能力扩张到宇宙，同时创造、拓展新的生物环境以适应其条件和机会。考虑到附近 SMR 和能源的数量，我们没有必要打断这种从全球性贫困向现代生活水平的转变进程。实际上，约翰·刘易斯（John Lewis）博士估计，按照今天的生活标准，太阳系范围内的

人口容纳能力在 10 千万亿（基于 1997 年北美矿物和能源的人均消费量统计数据）（刘易斯，1997）。

作为“选择太空”路径取向的一部分，本课题研究将会讨论 SMR 的重要需求。SMR 的本质包括两个方面：

(1) 改善地球上的人类生活状况

- 1) 提供就业机会；
- 2) 振兴科学、技术、工程和数学方面的教育；
- 3) 激励创新；
- 4) 提供航天活动拥有投资回报率（ROI）的愿景；
- 5) 鼓励针对航天活动的商业投资；
- 6) 为商业开发进入太阳系提供路径。

(2) 启动进入太阳系的商业活动

- 1) 提供奔赴地外星球活动的愿景；
- 2) 提供奔赴地外星球的利润动机；
- 3) 提供国家太空探索计划的商业产品；
- 4) 为太空探索活动提供必要条件；
- 5) 使人类在外空建立定居点成为可能；
- 6) 使基于外空的太阳能卫星为地球服务成为可能。

对上述需求的关注是因为地球上的资源正在减少。人类正在接受清洁水的缺乏、清洁能源限制、失业及各类全球性危机的多重挑战。开发太阳系可以拓宽视野和增加就业机会，使人类在地球上的境况得到大幅改善。

在我们力所能及的范围内，我们拥有技术、经济、法律和政策手段。这些手段不仅在收获财富方面，在保护我们在太空中的安全方面也起着非常重要的作用。我们人类现在拥有的尖端技术可以将小行星的撞击威胁转化为任何人都想象不到的更丰富的物质资源。太阳系内部所能容纳的人口数量大约为千万亿。现在的经济将会成比例实现增长，私人和企业将会更加繁荣。俄罗斯航天先驱康斯坦丁·齐奥尔科夫斯基 [齐奥尔科夫斯基 (Tsiolkovsky), 1895] 曾经预言：

“踏上小行星的土壤，在月球上用一只手举起一块石头，在数十千米之外观察火星，登陆其卫星甚至火星表面，还有什么能比这更加有趣呢？从开始使用火箭的那刻起，天文学的一个伟大新纪元就开始了：这是一个精细化研究浩瀚苍穹的时代。”

一般在讨论 SMR 之前，为了了解小行星的数量和 SMR 的价值，简单地调查某种具体情况（例如小行星），会很有帮助。数以百万计的小行星正在围绕太阳在轨道上运行。它们的直径小的不足 1 m，大的超过 400 km。它们是石头或者山一样大小的矿石星体，在深邃的太空中围绕太阳运行。人类已经登陆了一些小行星并且拍摄了照片。

新一轮开采 SMR 之旅将使我们的社会摆脱贫困，创造出从未想象到的物质和经济最繁荣的时期。我们可以将重工业和危险的研究活动搬到一个更加安全的地方——太空，这

样也会使我们的世界远离污染。这也能够让我们通过探索新前沿和新世界展开想象的翅膀。这会挑战我们，凭借我们的勇气，使我们摆脱只能在地球上生存的束缚。我们要做的就是勇往直前，并且捕捉到太空巨大的能量和矿物资源来实现这些目标。创造性地利用这些资源可以使科幻小说中所想象的大型结构、新型住所、娱乐设施、社会和生态环境成为可能。我们并不缺乏使其将来成为可能的技术、运输系统、设计才能和配套的基础设施。地球上的工业已经具备了加工处理外空资源的设备，并且我们的社会将无缝地整合引入这个新的财富源泉来达到繁荣的新高度。人类仅需要穿过一扇已经打开的大门到达外空的边界。剩余需要添加的部分是资本、远见和坚持不懈。斯蒂芬·霍金教授，在他 65 岁的时候体验了他的第一次零重力飞行，并用一句话说出他的体会：“我们长期生存的唯一机会并非困于地球，而是探索外层空间。” [霍金 (Hawking), 2011] 很明显，现在不是人类文明是否要扩展到宇宙的问题，而是什么时候、怎样及由谁扩展到宇宙的问题。

的确，开采外空资源正是一个拯救地球的及时机会。

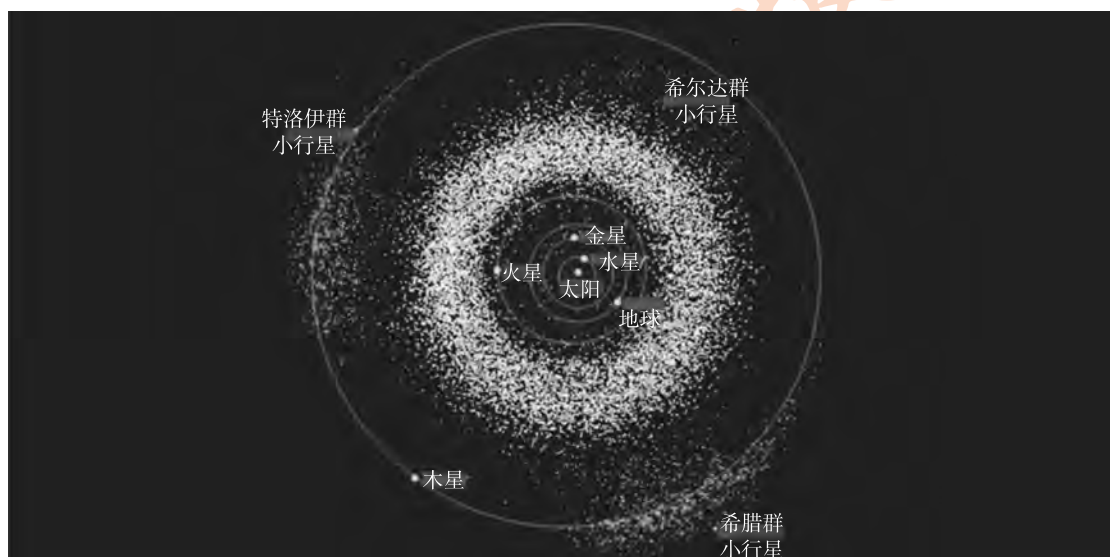


图 1-2 太阳系中数十亿的小行星 [维基百科]

1.2.1 SMR 的开发方式

探索 SMR 的历史性方法是以“就地取材”的方法对外空资源进行原位利用。当你到达目的地时利用你手边的资源，采用经济的手段（以各种形式；经济的，一起升空，一起操作，一起保护自己，一起返回）到太空旅行是很明智的选择。下面就是两个很明显的例子：

- 1) 用表土覆盖月球栖息地来抵御辐射。
- 2) 回收冰层（从月球的火山口或者从火星的次表层）来提供燃料、水和氧气。

为了从这些显而易见的资源进行扩展，例如，火星可以提供二氧化碳、地下水和从大气中提取的水，下面列举一些预期的用途：

- 1) 广泛的能源再生问题。这包括在火星内部和表面的能量。没有太空和其他星球表

面充足的能源，任何的探索或者开采事业都是不可能的。能源（特别是电能）是一种最容易探测和可替代的资源。在深邃的太空和其他星球表面都是必不可少的资源。

2) 在密封的栖息环境中种植农作物。

3) 改变二氧化碳，通过各种工艺流程减少栖息地辐射，同样也是用于增材制造的一种材料资源。

4) 给火箭推进和月球车做推进剂和助燃剂。

这个经济的太空探索方法会使人类足迹扩展到太阳系成为可能。实际上，这仅仅是一个非常不错的选择，还是将走出低地球轨道之外旅行的必由之路。扩展到太阳系的总体设计会在后面的章节中详细讨论，但为了明确概念，在这里我们概述一下利用 SMR 的 3 种方法。一种思想是让商业界创造利润，由他们提供必需的服务。很显然，第一项服务就是给国际探索活动提供燃料、氧气和水。这就意味着送货给客户——开始这可能会由机器人完成——到达月球表面的设备，地球-月球拉格朗日太空港，或者回到低地球轨道或地球同步轨道的建设设备。

1.2.1.1 SMR 开发方式之一——原位利用

这将是初期的方式，因为这是最简单的方式，可以实现早期的探索并到达低地球轨道附近。通过采集和使用当地的资源，任务范围可以扩大。水、燃料和氧气可能是率先被开发的资源（被发现、移动、加工、储存和利用）。这类资源具有很高的经济价值，可以计算为节约下来的成本，以及因此而避免和减少的任务风险。最终这个 SMR 开发方式之一在将来会发展并且成为载人和机器人任务不可或缺的模式。设想商业企业可以和远在太空、希望减少初期到月球和火星探索/居住成本的国家签订合同。这些太空站所可以做任何事来为国内和国际探索任务提供原位基础设施。这些位于当地资源附近的私企，按照一定的收费标准提供产品给探险家们，这个费用会大大少于从地球运送相同水平产品的成本。SMR 开发方式之一的理念会尽可能迅速地把我们从依赖地球基础设施和补给品中解放出来。这个理念就是商业企业率先到达小行星，在月球和火星上建立一个永久的基站，因为他们的任务是给国际和科学企业提供一个商业化运作的基站。建立这些基站的动机是与使用基础设施和物资的国际实体和组织签订合同。买卖和使用居住所需的当地资源、燃料、水、氧气、推进剂、种植农作物的土壤，还有用于增材制造的材料，会使大批的国家和国际企业能够完成他们的任务，而不需要自行建造他们所需的基础设施。这和很多历史上的商业项目（开始都是由政府支持的）例如哈德逊海湾公司和东印度公司类似。

不论哈德逊海湾、美国航空快递服务，还是东印度公司，只要第一个拥有到达小行星、月球或者火星的能力，就一定会取得商业上的成功，并且对其国际航天探索事业提供支持。

1.2.1.2 SMR 开发方式之二——运输材料到加工点

这个概念通过在适当的地点提供电力、仓储设施、增材制造和其他能量/设备，帮助人类到达低地球轨道之外的范围。第一项活动很可能是能量的生成，为水、燃料、推进剂和植物生长提供氧气、氢气、氮气（潜在的）和含碳物质的储存。这一想法的优点在于会

将矿工、探险家或“殖民者”所需的资源和资产放置在方便的轨道位置。其中一些位置会作为设计涉及的任务在接下来的章节中阐明。一些较明显的原位资源所在位置包括：

- 1) 月球的表层。
- 2) 小行星的表层。
- 3) 火星的表层。
- 4) 拉格朗日点：地月轨道 EML-1 和 EML-2。
- 5) 月球轨道。
- 6) 火星轨道（或许在火星的卫星上）。
- 7) 地球和火星或者地球和小行星带之间的环形轨道。
- 8) 地球太空电梯或月球电梯的最顶端。

对 SMR 进行加工并将它们运送到特定的太空站所，然后由机器人或人类旅行者利用它们开拓太阳系。建立太空站所的概念已经形成了数年，并得出一个简单的结论：

人类冲出低地球轨道之前必须完成相应的基础设施建设。

第一个这样的太空站所似乎应当位于地月轨道 [EML-1]，这样前往月球和火星的探险之旅才有可能上演。这个概念利用了 SMR 开发方式之一：原位利用资源并生产补给品。下一步就是将这些资源供应给客户（例如地月轨道 EML-1）。国际政府项目可以在太空站所买到这些产品，而无须从地球携带。

在讨论太空站所的燃料加注时，大部分人关注的主要是以下两个方面：

1) 一方面，大部分的研究最终聚焦在水及其组成元素上。因为，毋庸置疑，水是丰富的、非常有用的，但是从地球运输是昂贵的。通过水资源提取技术，我们能够得到饮用水、农业用水、氧气、氢气及可呼吸的空气。

2) 另一方面，政府航天项目和商业航天活动之间可以通过一种自然的“主要租户”关系强化合作。尽管今天在任何一个太空港，都没有购买燃料（和水资源）的需求，未来在特定日期以一定价格购买特定数量的商品，对于商业企业而言将是一个主要的激励手段。

1.2.1.3 SMR 开发方式之三：将 SMR 运送到地球

由于万有引力的存在，此前有关 SMR 的研究低估了将资源送返给人类的價值。巨大的地球重力加速度给设计带来了巨大的困难，且远远超出当前散热问题和资产控制问题带来的麻烦。许多研究表明，碎石和冰可以作为产品的隔热板，但是，在 25 000 英里/小时（1 英里=1 609.3 米）的返回速度下，即便是最理想的情况，这也是困难的。就这一点而言，从深空或月球运输资源返回地球的前景是模糊的。在过去几年中，一个关键项目取得了突破，即国际宇航科学院发现太空电梯“似乎”是一个可行的方法。但还有大量的工作亟待完成，且该方法所需的锁链材料还远没有研发成功。但是可以预测，这个可供上下运动的基础设施的未来是乐观的。在基础设施章节，我们将给出有关太空电梯的详细讨论。多年来，产品、服务及资源的返回价值一直被低估。但是，将资源运回地球的价值，强化了向 SMR 项目投资的理由。

考虑到这些需求，将 SMR 送返回地球，不仅仅是可行的，更是值得的。其主要思想

很简单：

- 1) 运输资源（原产的和加工的）到太空电梯的最顶端；
- 2) 装载到太空电梯的下行机构；
- 3) 沿太空电梯向下转移到地球同步轨道（从轨道高度 100 000 km 降至 36 000 km）；
- 4) 通过可控缆绳爬升机构降落返回地球，尤其是使用制动装置。

后续的系统章节将给出更多细节，但其主要思想是简单的，且其特征与 SMR 任务具有很好的匹配度。其基本思想包含低速、柔性座椅和安全操作。地球太空电梯概念的一个扩展是可以加入月球电梯。该设备将安全、及时地将 SMR 从月球表面运送到 EML-1。对 SMR 的加工过程可以在 EML-1 处的加工点进行，然后在其途中再被发送到与地球太空电梯的顶端交会对接。从那里，将其放在缆绳爬升机构里并传送到地球表面。

在月球上处理材料然后运输到 EML-1 是否明智，是一个合理的辩题。月球的表面有许多优势，其中并非最不重要的是微重力。重力是一个伟大的组织者。此外，月球的质量应该可以保护居民，使其受到的辐射量至少是 EML-1 处的一半。

还有其他方法可以用于将加工后的 SMR 送回到地球表面。每一种新的方法经过研究均被认为是困难的。然而，SMR 向地球表面的返回对于未来充分利用我们的外层空间是必不可少的。

1.2.1.4 SMR 开发方式小结

利用外空矿物资源的一般方式按照其复杂性和基础设施需求被分为三大类。随着人类离开地球而走向月球、火星甚至更远，在整个太阳系中，对矿物的利用将是有用的。在这个时候，我们不能确定哪些矿物是最有用的，或者哪些是最麻烦的。但是，我们可以得出结论，原位利用当地矿物质存、建设定居点或补充燃料，将是人类扩张的一大步。此外，原位利用资源可以提供大量的电力。

1.2.2 SMR 概念的简史

下文将简要介绍 SMR 的背景及其概念形成的历史和发展。

“对月球衍生氧气的利用早在第一次登月之前就被提出。人们长期以来已经认识到，利用月球表面的推进剂源为太空飞行器加注燃料，将大大增加空间运输系统的有效性，并且实际上可以减小人类勘探任务的风险，为探险者提供备用空气供应，以及在遇到着陆问题的情况下提供备用推进剂。美国陆军 1959 年的一项研究表明，对月球资源原位利用（ISRU, In Situ Resource Utilization）最早记录的考察，是永久居住的地下月球基地的关键启动因素：

“根据目前的标准，为了支持月球基地，维持和补给工作将是昂贵的。持续的设备供应和生存手段是必需的，且每次补给的费用都将是昂贵的。我们必须探索每个可能想到的解决方案，来使物流成本最小化。必须通过利用再生或其他技术在月球上最大限度使用任何氧气或电源。”（报告，美国陆军，1959）

这项月球基地研究被称为“地平线项目”。除了月球资源原位利用，该项研究还标志

着第一次使用术语“商业化”与月球基地相关联。它被军队人员用作“调查月球的科学、商业和军事潜力”的指令。在这份开创性的报告完成后不久，第二次月球研究（美国空军的项目 LUNEX）提出了一个目标更加有限的浅层次月球探索设想。（LUNEX，1961 年）

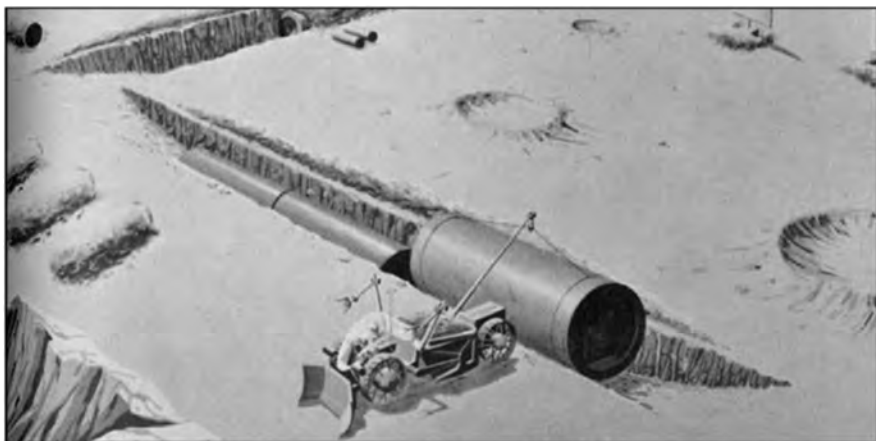


图 1-3 “地平线项目”图像显示如何使用 SMR 掩埋月球栖息地模块（美国陆军，1959）

也许由于美国陆军已对地下月球设施的建设和后勤支持要求进行更详细考察的影响，一个资金充足的月球资源原位利用课题组突然出现在新成立的美国国家航空航天局（NASA）架构中。伯特利（Portree，2001）总结了他们的工作：

“NASA 首次于 1962 年正式考虑月球资源原位利用，当时它成立了地外资源工作组（WGER）。在整个 20 世纪 60 年代，地外资源工作组专注于月球资源。这是因为有更多关于月球资源潜力的数据，并且因为在阿波罗时代月球资源的利用可能与 NASA 的活动更加相关。……在 20 世纪 60 年代，月球资源原位利用的研究主要是为了提供生命支持消费品。到 20 世纪 80 年代，研究月球资源原位利用的推进剂生产潜力占据主导地位。月球资源原位利用可以定义为使用当地的资源来协助其探索活动——与短语“就地生存”基本上是同义词。在空间探索的背景下，月球资源原位利用使航天器质量最小化。例如，如果航天器可以在其目的地收集推进剂，那么这些推进剂就不需要耗费昂贵的成本从地球表面运输。”（伯特利，2001 年）

对目的地选择要借助于必要的态势感知，因为在那里会有很多的意外情形。拟议中的小行星任务数量已超越月球任务数量并仍在不断增加。这对商业飞行任务和行星保护具有双重好处。这项研究一般会描述那里有什么，以及对此可以做些什么。

为了进行经济上的比较，让我们将讨论限于 1986 年发现的一颗由金属构成的近地小行星（小行星 1986 DA）。它的直径约为 2 km，大约是南美常规露天煤矿的大小。仅仅是这颗小行星中的镍的价值就约为 2012 年美国国债总量的 3 倍。

最有价值的近地小行星（NEA）是那些轨道接近地球的小行星，这样需要最少的能量就能到达它们并返回地球。估计存在 200 多万颗这样的小行星，但是，只有 10 000 颗被记

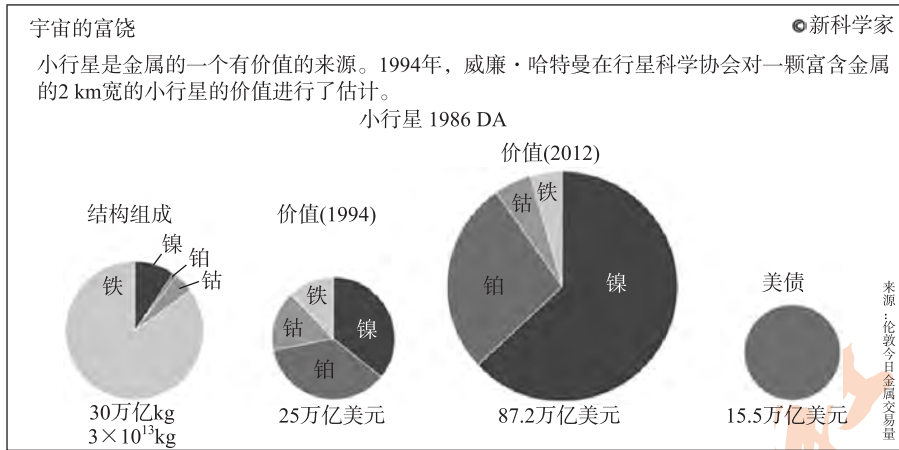


图 1-4 小行星 1986 DA 的价值 (新科学家)

录在册。目前已知的近地小行星的数量每年增长约 1 200 颗，但随着更多资源被用于支撑这项任务，小行星数量将会持续增长。鉴于近地小行星拥有极其丰富的资源，其技术可达性、经济可行性将继续扩大。每个月都会发现 1 km 或更大直径的近地小行星；幸运的是，没有一个轨道在未来几个世纪会威胁地球。较小的近地小行星仍然可能对区域范围造成破坏。目前，寻找近地小行星的重点集中在对地球存有威胁的小行星。这项全球性工作由政府赞助实施，天文学界自愿参与。寻求近地小行星资源价值的繁荣的太空行业，可以提供后续资金，以识别和描述尽可能多的近地小行星。

1.2.3 SMR 的分类

在地球表面上存有极其丰富的资源，其中一些已经广泛用于人类的航天活动。第一类是普遍存在的资源，存在于太空的大部分区域，特别是在地球-月球周围区域。这类外空资源多种多样，包括太阳辐照度和具有热/冷转换性质的真空环境。这些资源是有价值的，将被 SMR 公司用于地表以外的活动。下一个类别，轨道位置，这一类资源不突出，但同样有价值。诸如低地球轨道 (LEO)，地球静止轨道 (GEO)，拉格朗日点 (L-1 ~ L-5)，环月低轨道和环火星低轨道等地点都将对企业在太阳系内的商业探险活动具有价值。下一组资源来自我们太阳系内不同天体上的矿物，包括小行星、月球、火星及其卫星。

表 1-1 SMR 开发方式

资源类型	SMR #1-原位利用	SMR #2-转移到某处	SMR #3-转移到地球表面
普遍存在的资源	✓		
轨道位置资源	✓		
小行星	✓	✓	✓
月球	✓	✓	✓
一般行星	✓	✓	✓

1.2.3.1 外空资源类型之一——普遍存在的资源

这类外空资源包括我们在航天历史上最常用的一种资源——阳光。此外，还有无处不在的真空状态，以及不同程度的热/冷状态。外层空间的这些属性都被用作外空资源，并将继续被应用在航天飞行任务中。这些是几乎所有太空玩家都在利用的“原位”资源。

1.2.3.2 外空资源类型之二——轨道位置

该类资源的价值以地球同步轨道的位置为例介绍。通信世界听取了亚瑟·克拉克爵士的讲话，他解释了在太空中，地球某条经线上方的一个稳定位置的价值。目前在地球同步轨道中400多颗商业通信卫星能够赚钱，其中有价值的位置资源包括：

近地球轨道具有可重复使用的观测和通信机会，这对于我们地球现象的观测是非常有价值的。地球资源卫星，气象卫星，商业图像系统，当然，国际空间站也在这一范围内。

地球同步轨道是有史以来在地球附近可以成功进行通信和预报天气的位置。

地球-月球轨道将是一个宝贵的位置资源，作为未来执行太阳系飞行以及月球任务的太空站和航路站。L-1是一个部分稳定且在我们的地月生态圈内容易访问的位置。

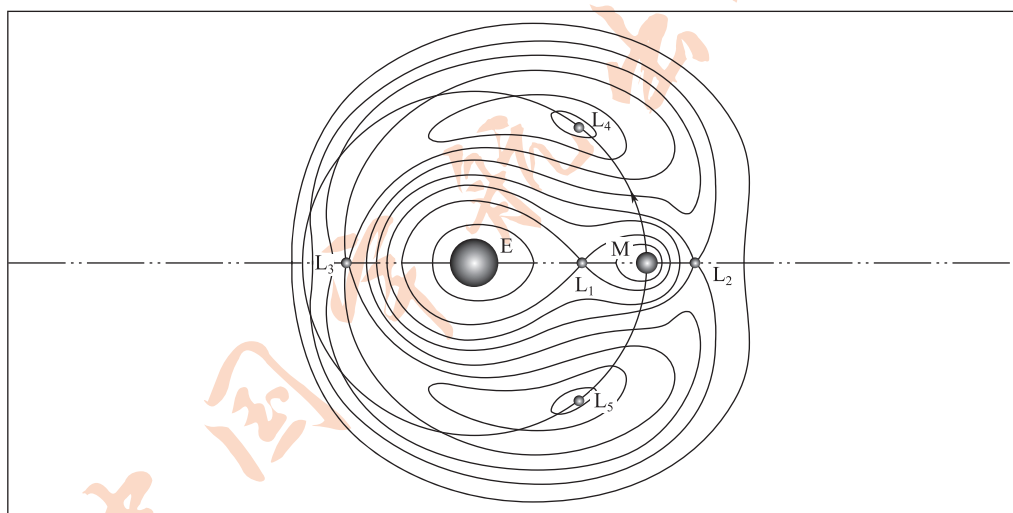


图 1-5 地月系统拉格朗日点 (纳德, 罗伯-佐治亚州州立大学, 地月系统拉格朗日点)
(<http://hyperphysics.phyOastr.gsu.edu/hbase/mechanics/lagpt.html>.)

环月低轨道与低地球轨道具有相似的特征，只是前者环绕月球运行。

环火星低轨道与低地球轨道、环月低轨道具有相同的优势。此外，火星卫星将提供可能对未来商业空间企业有价值的有力位置。

1.2.3.3 外空资源类型之三——小行星

这类外空资源具有显著的矿物多样性，也是对人类最大的威胁之一。应对威胁问题已开始得到解决，而其潜在的商业价值估计是巨大的。

“小行星代表了原材料的重要潜在资源，既可持续支持太空探索活动，也能支持更

广泛意义上的全球经济 [例如马丁 (Martin), 1985; 哈特曼, 1986; 刘易斯等, 1993]。许多近地小行星在能量方面相对容易达到, 并且具有非常低的表面重力, 这将使得从其提取到的材料转移到地球附近的成本实现最小化。此外, 对于其中很多天体, 大自然已经为我们进行了有效精炼, 或者至少说是预处理。例如, 金属类小行星 (其构成近地小行星群体的百分之几) 基本上由纯的镍-铁合金组成, 并且尽管地球上这两种元素作为重要储备, 但它们在将来航天事业发展的背景下仍然是非常有价值的。也许更令人感兴趣的是, 金属类小行星还含有约百万分之一的金和铂族元素 (PGE), 其具有足够高的价值 (例如作为工业催化剂), 使得它们可能值得直接运送回地球 [例如卡盖尔 (Kargel), 1994]。以今天这些元素的价格 (每千克 \$ 20 000 ~ \$ 50 000) 计算, 结果是一个单独的约 200 m 跨度的小型金属类行星的可能价值在 1 000 亿美元的量级上。因此, 除了是科学意义上的金矿, 一些小行星也可能被证明是真正战略意义上的金矿。此外, 虽然基本上属于岩石天体, 普通的球粒状陨石类小行星 (其可能占近地小行星总量中的大多数) 本身由几个百分比的镍-铁金属组成, 其类似地包含百万分之一水平的铂族元素。此外, 碳质陨石类小行星 (其可能占近地小行星的 10% ~ 15%) 相对富含挥发性物质, 可以为未来的太空任务提供水、氢和氧, 而不需要克服地球引力将这些材料从地球运出, 这对未来的太空经济可能具有重要价值。最后但并非最不重要的是, 也有强烈的环保主义主张, 即使是从小行星开采相对普通材料 (如铁、镍、铜和日益重要的稀土元素), 作为地球上露天开采的替代方案, 小行星本土生态系统可能不会受到人类采矿活动的破坏, 而我们的地球却会破坏 (见哈特曼, 1986 年的讨论)。基于所有这些原因, 发展从小行星和其他外星源获取有用资源的能力, 可以看作是对世界经济未来的重要投资 [例如克劳福德 (Crawford), 1995]。” (克劳福德, 2013)

由于缺乏一般性解释和推广, 很少有人了解 SMR 的基本参数。本研究课题旨在对这种情况进行补救。毫无例外地, 地球上的一切都可以在太空中找到更多 (可高达几个数量级)。一个例子是在土卫六的碳氢化合物湖或土星环存在的纯净冰。还有许多其他的例子, 包括哈雷彗星——它的碳氢化合物存储量几乎与所有石油输出国组织 (OPEC) 国家的探明总储量相同, 除此之外, 其水含量比美国密歇根湖更多。下一个问题就是——哪种外空资源更接近于“实用”?

“外空材料原位利用 (ISMU, 以前称为原位资源利用) 可以降低成本, 并且可以在我们开发和扩展月球或火星前哨基地时显著提高我们的能力。我们的外空材料原位利用计划的目标是尽快使这些前哨基地摆脱对地球的完全依赖, 从而迅速将我们的太空运输货物的对象从散装材料 (如推进剂和建筑材料) 转移到更多的人和复杂设备。” [沙利文 (Sullivan) 等, 1991]

在美国航空航天学会 (AIAA) 2013 年学术年会上发表的题为《小行星采矿》的论文介绍了对小行星产品的分类。

“资源和市场的层次结构表明, 一般来说, 从小行星可获得的资源可以分为 4 大类:

游离水、结合水、金属和土壤。”

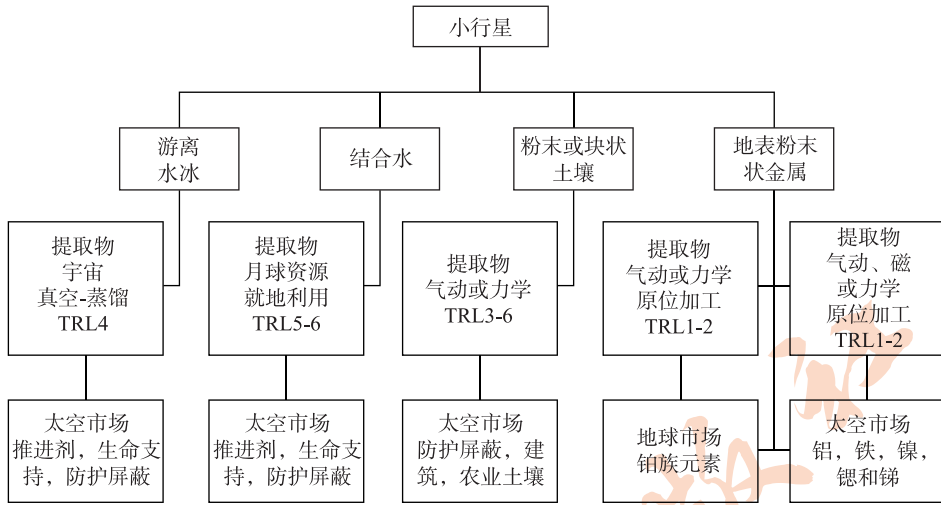


图 1-6 外空资源提取物及其市场的分层系统（蜜蜂机器人航天飞船机械公司）

“这是一个标准做法，地面矿井组织围绕主要矿物的采矿作业，同时从集中度较低的副产品中获取额外收入。同样地，我们不会一路航行到一个小行星，却只挖掘一种资源。” [扎西尼 (Zacny), 2013]

1.2.3.4 外空资源类型之四——月面

在这类外空资源中，已有我们实际到达过的地点。新一轮探索计划不再仅仅是简单拾取资源，而是要把资源利用起来。我们已经针对如何利用月球资源来支持月球基地的活动进行了大量研究（详见 WGER, 1962—1970）。在早期的会议论文集中可以找到许多现代原位资源利用（ISRU）的思想。这项工作一直持续到阿波罗计划执行时期直到 20 世纪 70、80 年代。该计划是由一小群在 NASA 约翰逊航天中心（JSC, Johnson Space Center, 即月球样本采集中心所在地）的月球科学家、工程师，以及许多行星科学界名家来领导的。阿波罗任务带回了足够多的月球岩石和土壤样本，稳固地确立了月球的地质特征，特别是降落点所在的赤道地区的地质特征。门德尔（Mendell, 1985）和麦凯（McKay, 1992）的两篇论文概述了这段时期大量的原位资源利用研究工作。一个由通用动力公司提供大量资金的 NASA 研究项目调查了利用月球资源建设大规模空间太阳能发电系统的潜力 [博克 (Bock), 1979]。随后 Eagle Engineering 公司为 NASA 约翰逊航天中心开展了一系列重要的、更为细致的关于原位资源利用和可重复使用航天器设计的研究。[戴维斯 (Davis), 1988]

当美国时任总统乔治·H·W·布什（George H. W. Bush）在 1989 年呼吁“重返月球，这次留下来”时，他认识到了学会“靠山吃山”的价值。由 NASA 牵头的，后续对关于月球/火星探索进行的努力，被称为“太空探索计划（SEI, Space Exploration Initiative）”，该计划赞助了一系列在 NASA 组织内部和周围展开的月球基地建设设计工



图 1-7 固定在月球上的推进剂生产装置 (Frassanito & Associates 公司/美国航空航天学会/麻省理工学院)

作 [见林德罗斯 (Lindroos), 2008]。一个月球基地设计 (1993 年 NASA 约翰逊航天中心一个名为 LUNOX 的月球建筑设计) 认定原位资源利用是一个核心要素。这种设计在很大程度上利用了戴维斯 (1988) 的建模工作。该方法建立了映射关系, 用来预测未来月球挖掘和材料加工处理中质量和功耗的参数估计。遗憾的是, 由于老布什总统的政府需要应对经济衰退, 使得国会反对任何昂贵的计划, 上述“太空探索计划”的寿命因此极为短暂。这戏剧性地降低了美国政府资助载人航天探索设计的研究工作以及原位资源利用的支撑性技术研发。然而, 情况在 2004 年再次发生变化, 乔治·W·布什总统清晰而有力地阐述了重返月球和利用月球资源的目标:

“对于我们的太空探索计划来说, 重返月球是非常重要的一步。在月球上建立长期的人类基地, 可大大减少今后进行太空探索的成本, 使人类实现更加伟大的探索计划成为可能。使沉重的航天飞船和燃料摆脱地球引力的束缚, 并将它们送入太空代价高昂。而在月球上进行航天飞船的组装和发射准备, 只需要摆脱很轻的引力、只需要很少的燃料, 因此只会花费小得多的成本。此外, 月球也蕴藏着大量的资源。它的土壤里含有的原料, 也许可以收集加工成发射火箭用的燃料, 或者可以呼吸的空气。我们可以在月球上研制和试验新的太空探索技术、系统和方法, 以便在其他更具挑战性的太空环境中展示我们的能力。” (布什, 2004)

“这次挑战的结果迎来了原位资源利用技术的又一次复兴。为了使 ISRU 更加有效和鲁棒, 需要在矿物开发、化学加工、制造和航天技术领域进行必要的融合, 必须要求美国民用航天机构广泛开展合作, 并将合作范围延伸到大学、企业甚至国际合作伙伴。正在进行的研究已经从 NASA 得到了比以往任何时候都更大的资金支持, 这还包括用原位资源利用任务需求规划来指导 NASA 的投资。现在大量文献已经清楚地指出原位资源利用的优势。原先的概念已经逐步演变成工业模型, 现在正在从硬件子系统原型机中收集到越来越多支持这一理论的信息。然而, 当时的 NASA 月球基地建设架构在需求中小心地避免了将 ISRU 放在关键路径上。也因此将原位资源利用的目标定义限制到了一个相对局限的

部分，即在人类到达月球后，可以很好地完成后期演示功能 [桑德斯 (Sanders), 2007a]。这种做法将原位资源利用技术和能力中大多数收益推迟到下游的任务中，将月球基地建筑设计限定在昂贵且浪费的方法，进而增加了计划和任务的风险。” [拜登 (Biden) 和布莱尔 (Blair), 2009]

1.2.3.5 外空资源类型之五——一种目前 SMR 探索任务的例子，中国“玉兔”月球探测车

月球探测车的科学目标是测绘月球表面的地貌并探测表面的物质构成。图 1-8 为从着陆器上拍摄的中国首个月球探测器“玉兔”在月球表面的照片。

商业技术路线：为了方便理解“如何”使 SMR 的开发满足商业上的可行性，本文将阐述 4 个 SMR 公司的商业技术路线。第 4 章将会对每个公司选择的方法进行详细说明。

深空工业公司 (DSI, Deep Space Industries)

沙克尔顿能源公司 (SEC, Shackleton Energy Company)

行星资源公司 (PR, Planetary Resources)

王剑探索公司 (EE, Excalibur Exploration)

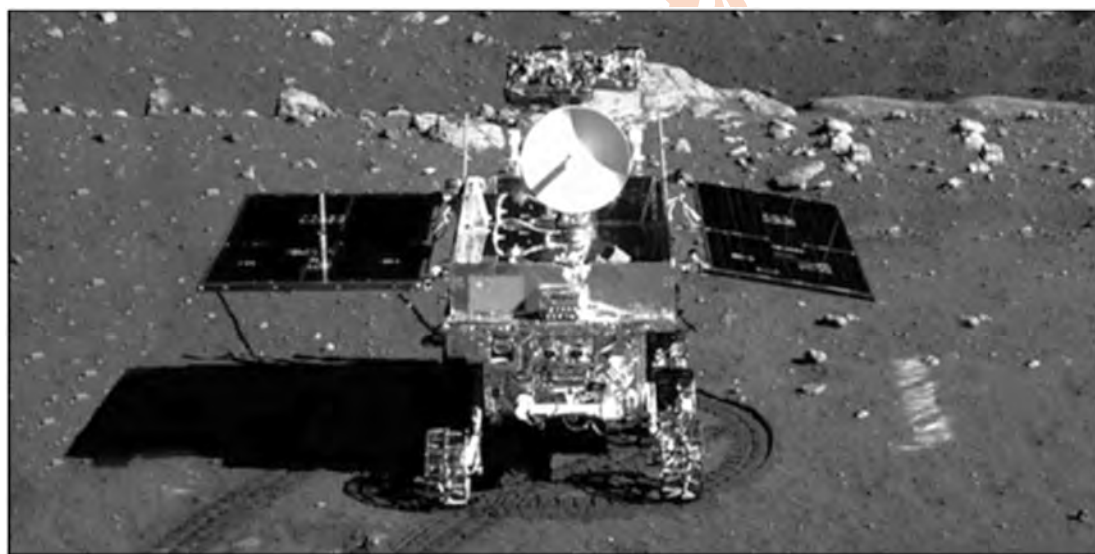


图 1-8 “玉兔”号在月球上^① (中国国家航天局)

^① 见维基百科, Yutu (rover), [http://en.wikipedia.org/wiki/Yutu_\(rover\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Yutu_(rover))。(于 2015 年 6 月 9 日 12:00 GMT)

1.4 治理

外空资源，无论是矿物资源还是空间太阳能，对发展中国家来说都将比发达国家更为重要。这是因为发达国家已经拥有世界上 96% 的财富。任何研读过历史的人都知道，在不发生大规模战争的情况下，发达国家不太可能以任何方式分享这笔财富。发展中国家有 40 亿人口，占世界人口的 60%，却只拥有世界上 6% 的财富。他们的出路必须是外层空间。

发达国家可以为外层空间开发提供技术、借贷和股权融资。发展中国家可以提供人力资源、工程及管理人才。任何航天计划中至少 50% 的总成本都来自人力资源。发展中国家并不需要施舍。施舍从长期来看并不会成功。他们可以成为平等的合伙人，并且通过在外空开发计划中提供人力资源获得应有的回报。想要达成合作，发展中国家必须在高中和大学开展科学、技术、工程和数学教育，否则他们将没有人力资本参与到投资项目当中。

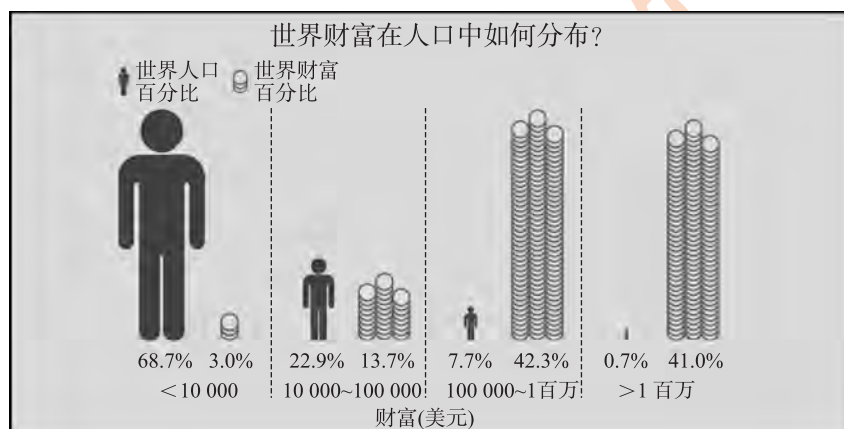


图 1-10 财富分布 (来源: 人类发展报告, 1992, 全球人类发展维度)

任何提出航天项目治理模型的人都必须非常小心，以确保在发展中国家和发达国家间进行的创新活动中不会存在不必要的障碍。此前的模式都没能满足这个需求。新的治理模式相比之前要有所改变，应利用谨慎的思维提前做好对所有事情的规制。

1.5 国际宇航科学院课题研究

本课题研究的目的是在一份文档中提供当前状态下与 SMR 机遇和挑战相关的先进技术、经济、法律和政策分析。本课题还将提供具体而务实的建议。国际宇航科学院的组织成员基于选举产生，是从全球选出的能够持续为未来做出贡献的航天专家（详见附录 F）。本课题仅是该组织正在进行的许多研究项目中的一项，其研究目标如下：

为促成和鼓励对 SMR 的短期评估、开发和利用提供一个合乎逻辑的、系统且实际的

规划技术路线。

尽管已经有一些关于 SMR 的书籍和/或学术类、科普类论文发表,就本课题组成员的学识而言,在此问题上现在还没有对 SMR 问题进行全方位论述的文章。与空间太阳能不同的是,SMR 至今还未成为近期政府或产业资助的研究项目。国际宇航科学院(IAA)这一课题研究将会成为全球第一个全面研究这一主题的项目,因此本研究课题对惠及人类的 SMR 开发活动具有重要价值。

1.5.1 本报告的组织结构

进行本课题研究的目的是提供技术信息、政策和法规分析,经济环境和机会分析,以及建议下一步发展方向。最终,提供一个全球技术发展路线图。按照这一技术路线,将会实现 SMR 开发效率和效能最大化,并获得能够避免人类文明及物种灭绝灾难的必然收益。整个研究报告的布局遵循以下逻辑顺序:

- 1) 做好准备工作,确定大背景,解决“如何开采”的问题;
- 2) 描述市场和潜在获利的技术路线;
- 3) 着眼于项目必需的技术手段;
- 4) 针对不同方案进行分析选择;
- 5) 评估法律、政策及治理问题;
- 6) 提出结论和建议。

第 1 章 绪论:本章介绍贯穿全书的思想,对 SMR 处理方法进行描述,对所寻找资源进行类型化列表。除此之外,本章还简单地介绍了一些见解,为后文进行详释作出铺垫。

第 2 章 外空矿物资源开采:本章将会介绍外空矿物开采和加工材料的可能存在位置的矿物含量,对工艺流程的讨论及所需的技术设备。小行星矿物开发具有极大的潜力,但是每个小行星的情况都不尽相同,而且在准备开采前需要对其有一定的了解。行星表面能提供一系列的矿物资源,但所面临的问题是,在哪里以及如何开发它们。

第 3 章 市场分析:本章将着眼于确保商业成功的财务分析方法。经济模型除了着手于所开采矿物的价值,还要考虑到达开采点、提供开采设备、储存资源及运输到客户手中所涉及的投资需求。

第 4 章 外空矿物资源开发路线图:本章将会着眼于 4 种已经成熟的基本技术路线。有资产和计划的部分公司已经投入了大量资金在其所选择的方法上,这已成为不争的事实。本章将会对比各个技术路线的相同点和差异点。

第 5 章 外空矿物资源系统速览:本章将就太阳系层级的项目从系统角度进行分析。此分析将有助于识别、理解和避免多种风险。本章将会基于传统的 NASA 技术成熟度方法和评级标准对所涉技术成熟度进行评估。最终,还要对 SMR 商业航天企业实现盈利的技术可行性进行评估。

第 6 章 建模分析:本章将讨论商业航天企业理解问题时的需求。除此之外,建模分

析将会帮助公司理解短期资金的投资方向，进而实现创业成功。

第7章 政策与法律视角下的外空矿物资源：本章将对世界范围内的国际公约和政策法律进行分析。

第8章 研究发现、结论及建议：本章将会对本课题研究成果进行归纳整合并从中得出结论和建议。

第9章 面向未来的概念设计——水资源是太空通用货币：这是一条对未来开采水资源重要性认知的简要推论。

附录：术语及缩略词，IAA 课题管理大纲，针对水资源的需求分析，针对镍资源的需求分析，全球战略情景，国家宇航科学院简介，近地天体经济学。

参考文献。

中国宇航出版社