

# 太空资源开发技术体系研究

王 巍<sup>1</sup>, 姚 伟<sup>2</sup>

(1. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100048; 2. 中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室, 北京 100094)

**摘 要:** 为解决地球可持续发展面临的战略性资源重大问题和规模化太空探索面临原位资源补给重大挑战, 太空资源开发已成为当前国际航天发展的前沿热点领域。在阐明太空资源开发的概念和内涵、深入分析国内外技术发展现状与趋势的基础上, 结合太阳系资源分布特点, 提出了太阳系资源开发体系架构和“天工开物”倡议设想。以人类社会发展紧密相关的战略性矿产资源开发为核心, 以水冰资源开发和水基推进剂制备为基础, 以地球为中心, 由近及远, 分阶段建设月球资源开发体系、近地小天体采矿体系、火星资源开发体系、主带小行星采矿体系、类木行星探索开发体系及内行星探索开发体系, 逐步构建全太阳系资源的开发能力。

**关键词:** 太空资源; 开发与利用; 体系架构; 太空资源补给站; 地外天体采矿站; 太空资源加工站

中图分类号: V476 文献标志码: A 文章编号: 1000-1328(2023)11-1621-12

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2023.11.001

## Research on the Technology Architecture of Space Resource Exploitation

WANG Wei<sup>1</sup>, YAO Wei<sup>2</sup>

(1. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China;

2. Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In order to solve the major problem of strategic resources faced by the sustainable development of the Earth and the significant challenge of in-situ resource supply for large-scale space exploration, space resource exploitation has become one of the cutting-edge hot focuses currently. On the basis of clarifying the concept and connotation of space resource exploitation, in-depth analyzing of the current situations and trends of technological development, combining with the resources distribution characteristics of solar system, a solar system resource exploitation architecture and the initiative “Tiangong Kaiwu” are proposed. With the exploitation of strategic mineral resources closely related to the development of human society as the core, the development of water-ice resources and water-based propulsion preparation as the basis, the capacity of solar system resource exploitation can be gradually built step by step. Taking the Earth as the center, from near to far, the lunar resource exploitation architecture, NEA mining architecture, Mars resource exploitation architecture, main-belt asteroids mining architecture, Jovian planets exploitation architecture and the inner planets exploitation architecture will be developed to gradually build the capacity to exploit resources throughout the solar system.

**Key words:** Space resource; Exploitation and utilization; Architecture; Space resource depot; Extraterrestrial mining station; Space resource processing station

## 0 引 言

自然资源的储量和利用程度决定了人类文明能够延续的极限。20世纪以来,人类进入资源大量消耗、社会高速发展的时代,地球资源正在迅速枯

竭。战略性矿产资源对能源、化工、制造、农业、军事等行业发展至关重要,是全球经济发展的限制性因素,其供需不平衡导致了一系列全球性问题,威胁人类在地球上的生存发展<sup>[1-2]</sup>。20世纪中叶,航天时代刚刚开启时人们就认识到,太空探索可以使

收稿日期:2023-10-16; 修回日期:2023-10-27

基金项目:国家自然科学基金(U22B2092);科技部重点研发计划(2020YFA0710304)

封闭的地球经济向无限的太空资源开放,催生新的太空经济<sup>[3]</sup>。太阳系拥有丰富的矿产资源,具有巨大的开采价值。例如,Asterank数据库对探测信息较为充分的997颗小行星进行了价值估算,其中701颗价值超过100万亿美元<sup>[4]</sup>。

近年来,太空探索的热度、广度和深度都得到显著提升,重返月球、载人火星等极具挑战性的探索任务已逐步实施,地月空间已进入到经济开发阶段,太空资源开发活动将逐步从地月空间向更远的深空扩展,太空资源开发利用已成为国际航天强国重点发展方向并吸引了大批商业公司纷纷投入开发热潮。人类将逐步实现月球资源开发、小天体资源开发、火星资源开发,并将最终具备全太阳系资源开发的能力。当人类具备太空资源开发的能力后,将打破地球封闭系统的限制,可获取太阳系内的无限资源,为人类发展提供不竭动力。

未来,开发太空资源必将成为国家间实力竞争的一项重要科技领域,同时也会成为航天大国新的经济增长点。太空资源开发将实现商业化、规模化,形成新产业体系,改变全球原材料供应和全球经济格局,并在科技、经济、安全和政治等方面产生巨大影响。随着太空资源开发能力的发展,人类的生产生活和各类经济活动将向更深远的太空拓展,具备“脱离地球的生存能力”,真正实现可负担、可持续的太空探索。21世纪中叶前后,人类将登陆月球及其以远的天体,逐步在地外星球建立新家园。人类文明将以地球文明为源头,不断开拓出地月文明甚至太阳系文明。历史证明,任何一个民族,只要能率先把主要社会经济活动范围拓展到新空间,就能在文明竞争中抢占先机。正如大航海时代创造的奇迹一样,以太空资源开发为代表的“大航天时代”将会拓展人类生存发展新空间,创造人类发展史的下一个奇迹,带来人类文明新的繁荣。

## 1 太空资源开发的概念和内涵

所谓资源,指的是一切可被人类开发和利用的物质、能量和信息的总称。太空资源(space resource)广义上指地球大气层之外能够为人类开发利用并获得经济和其他效益的物质或非物质资源的总称,包括位置资源(如LEO、GEO、EML等特殊轨道和位置),信息资源(如恒星、脉冲星等特殊的方位和频率信息,可提供导航服务),环境资源(如微重力、高

真空、强辐射、大温差等特殊天然环境),能源资源(如太阳能、地热能、潮汐能等)和物质资源(如月球、小天体、火星等蕴藏的自然资源)等<sup>[5]</sup>,如图1所示。在过去的半个世纪里,空间位置、信息、环境、能源资源已得到广泛应用。通过利用空间高远位置资源,航天器实现了卫星通信、导航定位、对地观测等应用;利用空间环境资源开展了各种空间科学实验,对人类社会产生了深刻而广泛的影响。

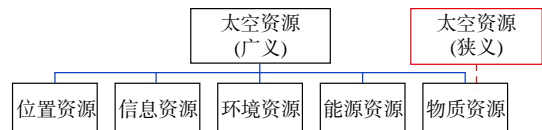


图1 太空资源概念与分类

Fig. 1 Concept and classification of space resources

随着航天科技的快速发展,人类已到达月球并向更远的深空进发。当前国际航天重心转向太空物质资源开发。美国《2015外空资源探索与利用法》定义太空资源是“在外空原位发现的任何种类的自然资源”,海牙国际空间资源治理工作组给出的太空资源定义为“外层空间可采的原位非生物资源”。参照当前联合国和各国立法的定义,太空资源的狭义内涵特指地外天体物质资源。迄今为止,人类还未实现对太空物质资源的开发利用,因此,本文聚焦太空物质资源及其开发利用。

太空资源开发一般是指识别、开采和利用地外天体物质资源,获得有用的产品和服务。具体来说,它是指在地外天体环境条件下,以较低的风险、代价和成本,开发利用地外天体物质资源,生产制造服务于地球可持续发展、服务于大规模空间活动以及服务于地外天体探索与开发的材料和产品,同时确保上述活动的可实施性、可持续性和可扩展性。按应用目标,太空资源开发可分为两大类:一是服务于可持续、规模化太空探索的资源利用(即指For Space),它更强调就地取材,在地外天体上识别、获取和利用本地自然资源和废弃资源,以获得有用的产品和服务,直接支撑太空探索活动以及未来可能的地外移民和长期居住,这一般被称为原位资源利用(In-situ resource utilization, ISRU)<sup>[6]</sup>;二是服务于地球可持续发展的资源利用(即指For Earth),它从地外天体获取地球发展所需的重要资源,并运回地球利用,这一般被称为太空采矿(space mining),包括小行星采矿(asteroid mining)、月球采矿(lunar mining)等内容<sup>[7]</sup>。

## 2 太阳系资源的类型与特征

从宇宙起源、物质起源来看,各种元素在宇宙中广泛分布,宇宙物质的存在具有广义的普遍性和统一性。太阳系普遍被认为是由一团旋转的气体和尘埃分子云在自身引力的作用下坍缩形成,太阳形成于质量中心位置,其余坍缩成分形成行星盘继而演化为现今的太阳系。太阳系内氢、氦、氧、碳等具有很高的丰度,并拥有各种金属和矿物质等<sup>[8]</sup>。

月球作为地球的“第八大洲”,位于地球引力阱的边缘,蕴藏丰富的物质资源,具有独特的资源开发优势。根据人类在长期地基对月观测和月球探测中的一系列重大发现和科学数据,月壤和月岩中存在着地球上组成物质的全部化学元素,拥有丰富的自然资源,包括水冰、矿物、<sup>3</sup>He等。例如,月海玄武岩蕴藏丰富的钛铁矿( $\text{FeTiO}_3$ ),估计总资源储量为 $1.3 \times 10^{15} \sim 1.9 \times 10^{15}$ 吨。月球克里普岩(KREEP)富含钾(K)、稀土元素(REE)和磷(P)以及钍、铀等放射性元素,风暴洋区的克里普岩中总稀土元素资源量为 $2.25 \times 10^{10} \sim 4.5 \times 10^{10}$ 吨<sup>[9]</sup>,其中的稀土和铀资源分别达200亿吨和3.6亿吨,而地球储量分别仅约1亿吨和160万吨。此外,月球还蕴藏丰富的铬、镍、钾、钠、镁、铜等金属矿产资源。由于两极永久阴影区内长期缺乏太阳辐照,温度基本维持在40 K左右,因此,在此区域沉积了大量不同形态的水资源,初步估计,月球极区有约6亿吨水冰资源<sup>[10-12]</sup>。更为重要的是,在太阳风长期轰击下,月球表面汇聚了超60万吨<sup>3</sup>He核聚变资源<sup>[9]</sup>,远超地球所储藏的500 kg。

太阳系中已观测到约130万余颗小行星,绝大多数小行星都集中在火星与木星轨道之间,称为主带小行星(Main-belt asteroids, MBA),约有3万多颗接近地球轨道的近地小行星(Near Earth asteroids, NEA)。小行星一般没有大气,按照光谱特征可分为碳质小行星(C类)、硅质小行星(S类)和金属质小行星(M类)等。金属质小行星(约占小行星总量的8%)主要由铁、镍构成,富含铂族矿物和稀土元素,有些小行星中铂系金属元素含量很丰富,例如铂、钴、铈、铀、钍等稀有金属<sup>[7,13]</sup>,矿石品位显著高于地球,相对均匀分布,不用深钻,开采、冶炼难度小。碳质小行星(约占小行星总量75%)富含碳、氢、氧、氮等元素,能够为深空探索补给物资。

火星探测分析结果表明,火星表面的大部分区域都覆盖着火壤。火星原位样品分析得到的化学元素含量表明,在火星表面岩石中,氧元素含量最高,其次是硅、铁、锰、钙和硫等元素。火星表面存在大量水资源<sup>[14-16]</sup>,包括极地永久水冰盖、次表层冰冻圈、矿物结合水、水蒸汽等。火星大气压很低,约500~700 Pa,但富含二氧化碳,浓度达95%,其次是氮、氩,此外还有少量的氧和水蒸气。

其他行星可分为类地行星和类木行星。类地行星除地球、火星之外,还包括水星和金星,它们都由岩石构成,又称为固态行星,有着相对较小的尺寸、相对高的密度、相对少的卫星以及相对高含量的硅酸盐成分。类木行星主要包括木星、土星、天王星和海王星,这些行星距离太阳较远(5 AU以远),都有浓密的大气层,且自身质量为地球质量的10倍以上,故又称为巨行星。这些行星直径较大、密度低、有大量卫星以及环结构。按照组成成分的不同,巨行星又进一步分为气态巨行星和冰巨星。其中气态巨行星包括木星和土星,主要成分为氢和氦;冰巨星包括天王星和海王星,主要成分为氧、碳、氮和硫等元素<sup>[9]</sup>。

## 3 发展态势

### 3.1 国外发展态势

太空资源开发作为未来太空探索重大任务和人类可持续发展的使能技术,已成为当前国际航天新兴前沿方向。NASA一直十分重视太空资源利用技术发展,并将其列入载人和无人深空探测规划体系。2004年1月,时任美国总统小布什宣布“太空探索愿景”,要求NASA“开发新技术,利用月球丰富的资源,让人类探索更具挑战性的环境”。2007年,时任NASA局长迈克尔·格里芬提出太空经济(Space Economy)时代已经到来。NASA于2015年发布《空间技术路线图》,把原位资源利用列为载人深空探索优先发展的首要技术,并列为交叉技术领域的重要组成部分<sup>[17]</sup>。2018年,参与国际空间探索协调组(ISECG)的10余个国家和地区的航天机构共同发布《全球探索路线图》,指出原位资源利用是载人深空探索的一项关键技术<sup>[18]</sup>。2019年,ESA提出“太空资源战略”<sup>[19]</sup>,以原位资源利用实现月面长期生存为愿景,实施三阶段计划:勘测、探索和技术培育(21世纪20年代早期)、端到端演示验证(20年代中

期)以及集成ISRU试验工厂(30年代中期)。2020年4月,时任美国总统特朗普签署关于“太空资源开采和使用的国际支持及保障”的行政令,为美国开发利用包括月球在内的太空资源提供政策支持。2020年9月,NASA发布“阿尔忒弥斯计划大纲”,将在月球上演示生产水、燃料和其他供应品,以及建造设施的能力<sup>[19]</sup>。

2021年成功着陆火星的“毅力”火星车上搭载了火星原位资源利用载荷MOXIE,已成功完成火星大气原位资源利用科学实验<sup>[21]</sup>。ESA于2023年4月发射木星冰卫星探测器(JUICE),将探索木星及其3颗蕴藏着丰富液态水的大型卫星(木卫四、木卫三、木卫二),探寻地外生命存在的证据<sup>[22]</sup>。2023年10月,NASA发射首个金属质小行星Psyche(灵神星)探测任务,探索金属小行星的起源和商业开采的可能性<sup>[23]</sup>。

近年来,面对地球可持续发展面临的战略性资源短缺的问题,国际上兴起了“太空淘金热”,涌现出一批以太空采矿为目标的私营公司。行星资源公司等相继制定了小行星采矿任务计划,AstroForge公司将开采小行星资源并带回地球,Asteroid Mining公司将从小行星中提炼铂金元素。2012年,国际宇航科学院启动“外空矿物资源”(Space mineral resources, SMR)课题的研究工作,得出“外空资源的有效开发利用将使得太阳系内地球附近的经济旅行成为可能,外空水资源将确保载人航天活动能够拓展到LEO以远,而且会成为其他外空矿物资源开发利用的盈利动力”等重要结论<sup>[24]</sup>。美国科罗拉多矿业学院开设了小行星采矿学课程。太空资源开发已逐渐由概念走向现实,是国际航天的战略发展方向。

### 3.2 国内发展态势

随着我国载人航天和深空探测重大科技工程的顺利实施,我国已实现月球“绕、落、回”和火星“绕、着、巡”等伟大成就。2020年嫦娥五号携月球样品返回地球,标志着我国已具备月球采样返回能力,圆满完成了探月工程任务。

在航天发展的新阶段,太空资源开发是我国无人、有人月球探测及行星探测工程的重要目标之一。我国探月工程四期明确提出将利用嫦娥八号开展月面原位资源利用的关键技术试验。载人登月及国际月球科研站,已从认识月球发展到利用月球阶段,将开展一系列月球原位资源利用试验研

究。天问系列任务、载人登火等行星探测及后续工程,将逐步具备小天体和火星探测采样与资源利用能力。

我国学者也非常重视太空资源利用研究。2002年,欧阳自远院士就撰文论述了月球表面<sup>3</sup>He等月球资源的利用前景<sup>[25]</sup>。2016年,叶培建院士带领的载人深空探测中国学科发展战略工作组系统分析了实施载人深空探测所面临的关键科学和技术问题,认为原位资源利用技术是有可能带来颠覆性、变革性的技术领域<sup>[26]</sup>。钱学森空间技术实验室长期开展太空资源利用研究,研制了钻取一体化水冰资源原理样机并开展典型环境试验<sup>[27-28]</sup>,提出地外人工光合作用并开展空间站试验载荷样机研制<sup>[29-30]</sup>,探索无粘接剂、熔融致密化成型月壤3D打印方法并发展月壤储能方法<sup>[31-32]</sup>。2021年,包为民院士牵头开展地月空间探索和开发战略研究,重点论证了月球资源开发利用的发展战略<sup>[33]</sup>。

作者领导的研究论证团队经过近3年的战略论证和关键技术探索,组织完成了太空资源开发与利用技术的发展战略研究,开展了一系列单项技术的探索和攻关,提出了太空资源开发的顶层发展规划设想,初步形成了太空资源开发技术攻关方向、发展路线图以及任务布局。

## 4 太阳系资源开发体系架构设想

太阳系资源开发体系架构以小天体、月球、火星等目标天体的物质资源为对象,以地外天体战略性矿产资源开发为核心,以水冰资源利用和水基燃料制备为基础,建设太空资源补给站、地外天体采矿站、太空资源加工站、太空资源行星际运输通道、太空资源低成本返回通道等太空资源开发基础设施。以地球为中心,由近及远,分阶段建设月球资源开发体系、近地小天体采矿体系、火星资源开发体系、主带小行星采矿体系、类木行星探索开发体系及内行星探索开发体系,见图2。

月球和近地小天体的水冰资源开发是规模化太空活动的基础。当人类具备地外天体水冰开采能力,并在此基础上构建了地月空间的水基推进剂的供应链后,将激活整个地月空间的经济活动;建立日地L2资源补给站和太空资源加工站后,才能真正激发太空淘金热,近地小天体采矿才具备技术经济可行性和可持续发展能力,人类的规模化活动才

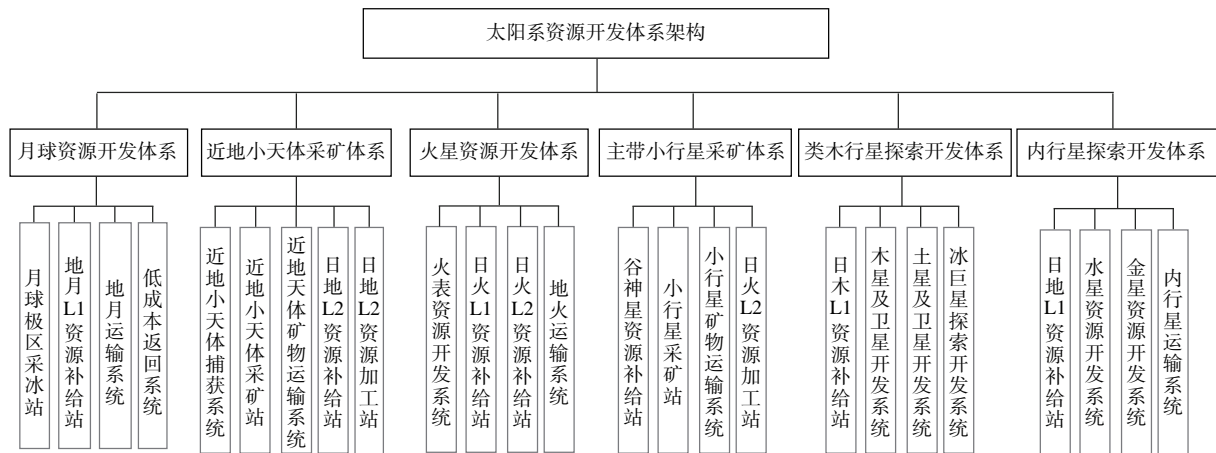


图 2 太阳系资源开发体系架构

Fig. 2 Architecture of space resource exploitation

有可能进一步拓展到火星;当具备火星资源开发的能力并在火星系统建立了资源补给站后,将打开更大的资源宝库,将具有开发主带小行星的能力,也将进一步延拓到更深远的类木行星;建立日地 L1 资源补给站后,将为开展内行星的水星和金星规模化探索和开发提供基础。

太阳系限制性三体系统存在 5 个独特的平衡点,即 Lagrange 平动点(L1 至 L5)。两大天体的平动点是十分独特的空间位置资源。对于简化的圆形限制性三体问题,质心旋转坐标系中小天体运动方程为

$$\ddot{\mathbf{r}} = -G \left( \frac{M_1}{R_1^3} \mathbf{R}_1 + \frac{M_2}{R_2^3} \mathbf{R}_2 \right) - \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}) - 2\boldsymbol{\omega} \times \frac{\delta \mathbf{R}}{dt} \quad (1)$$

式中: $M_1$  和  $M_2$  分别为两个大天体的质量; $\mathbf{R}_1$ ,  $\mathbf{R}_2$  和  $\mathbf{R}$  分别为两大天体相对小天体的位置矢量和小天体相对质心的位置矢量; $\boldsymbol{\omega}$  为旋转角速度。

拉格朗日点 L1 和 L2 位置可由下两式求解:

$$\frac{M_1}{(R_{12} - r_{L1})^2} = \frac{M_2}{r_{L1}^2} + \frac{M_1}{R_{12}^2} - \frac{r_{L1}(M_1 + M_2)}{R_{12}^3} \quad (2)$$

$$\frac{M_1}{(R_{12} + r_{L2})^2} + \frac{M_2}{r_{L2}^2} = \frac{M_1}{R_{12}^2} + \frac{r_{L2}(M_1 + M_2)}{R_{12}^3} \quad (3)$$

式中: $r_{L1}$  为 L1 点距第二大天体的距离; $r_{L2}$  为 L2 点距第二大天体的距离; $R_{12}$  为两大天体距离。

拉格朗日点附近飞行器的运动方程为

$$\begin{cases} \delta x = C_1 e^{d_1 t} + C_2 e^{-d_1 t} + C_3 \cos(d_2 t) + C_4 \sin(d_2 t) \\ \delta y = a_1 C_1 e^{d_1 t} - a_1 C_2 e^{-d_1 t} - \\ \quad a_2 C_3 \sin(d_2 t) + a_2 C_4 \cos(d_2 t) \\ \delta z = C_5 \cos(d_3 t) + C_6 \sin(d_3 t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $C_i (i = 1, 2, \dots, 6)$  为积分常数,其存在着简单周期轨道(Halo 轨道)或拟周期(Lissajous 轨道)和类似管道的不变流形。航天器可以沿稳定流形进入 L 点轨道,沿不稳定流形离开。利用这些稳定、不稳定的不变流形以及不同流形之间的交叉拼接可以实现航天器的低成本星际航行<sup>[34]</sup>。

从地球出发,由近及远,以地月 L1、日地 L1/L2、日火 L1/L2、谷神星、木星 L1 为纽带,逐级建设资源补给站;就近取材,开发月球、小天体、火星的水冰并制造水基推进剂,有机联系各地外天体资源开发体系,逐步实现全太阳系资源的开发能力,见图 3。相比直接到达,将有效提高运输效能,大幅降低行星际运输成本。

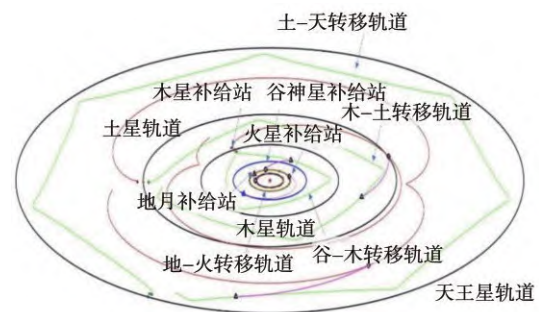


图 3 太阳系资源开发体系构建路线设想

Fig. 3 Construction roadmap of solar system resource exploitation

根据火箭方程,可推导得到星际运输过程中的传动比(空间运输系统初始总质量  $M_0$  与所需运输的货物质量  $M_c$  之比):

$$\frac{M_0}{M_c} = \frac{q}{1 - K(q - 1)} \quad (5)$$

式中: $K = M_r/M_p$ 为推进系统干重和推进剂质量的比值,一般取 $0.12^{[35]}$ ;  $q$ 取决于速度增量 $\Delta v$ 和推进比冲 $I_{sp}$ ,即

$$q = \exp\left(\frac{\Delta v}{gI_{sp}}\right) \quad (6)$$

式中: $g$ 为重力加速度;液氢液氧的典型比冲 $I_{sp}$ 为450 s,甲烷-氧的典型比冲 $I_{sp}$ 为374 s。

因此,对于确定的星际运输系统而言,其运营成本 and 运输能力主要取决于运输过程中的速度增量。为便于估计,采用霍曼转移和圆锥曲线拼接的方法估计各星际运输节点的速度增量。霍曼转移椭圆轨道上的运动速度可通过活力公式计算

$$v_c = \mu_s \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right) \quad (7)$$

式中: $\mu_s$ 为中心天体的引力常数; $a$ 为椭圆半长轴。

而初始轨道速度和最终轨道速度可通过圆周运动近似得到

$$v_c = \frac{\mu_s}{r} \quad (8)$$

两者之差即为霍曼转移的速度增量 $v_{inf}$ 。

若需逃逸或进入到行星的引力球,则需从行星圆周轨道转移到双曲线逃逸轨道,逃逸速度为

$$v_{esc} = \frac{2\mu_p}{r} \quad (9)$$

则双曲线运动速度为

$$v_h = \sqrt{v_{inf}^2 + v_{esc}^2} \quad (10)$$

估算得到的各星际节点间的速度增量和传动比见表1。直接货运到达火星、主带小行星、木星和土星的传动比很大,甚至无法到达。因此,通过在日地L1/L2、日火L1/L2、谷神星和日木L1点设置补给站,为星际运输接续提供推进剂,可大大降低传动比,提升货运能力和效率。例如,从日火L2点到日木L1点速度增量达9 762 m/s,相应的传动比为371,而如果在谷神星设置补给站,则传动比降至6。若进一步利用Lagrange平动点不变流形管道,则可通过非常低的速度增量实现各平动点间的货物运输。

#### 4.1 月球资源开发体系

月球资源开发是太空资源开发的第一步,将为地月空间经济化和最终的全太阳系资源开发提供物质基础。当具备月球水冰开采能力,并在此基础上构建了水基推进剂的太空供应链后,不仅在登月任务中能够发挥重要作用,而且将激活整个地月空间的经济活动,支撑近地小行星开发和载人火星探

表1 各星际节点间的速度增量和传动比

Table 1 Velocity increments and gear ratios between interstellar nodes

星际节点	速度增量/( $m \cdot s^{-1}$ )	传动比
地表-LEO	9 500	-
LEO-EML1	3 990	3.0
LEO-LLO	3 096	2.3
EML1-月表	2 390	1.9
LEO-SEL2	3 275	2.4
LEO-LMO	5 682	5.3
SEL2-SML1	5 395	4.8
火表-LMO	4 300	3.3
SML2-MBA	6 034	6.0
MBA-SJL1	4 298	3.3
SML2-SJL1	9 762	371.0
SJL1-土星	3 785	2.8
SEL1-金星	5 062	4.2

测,为更深远的太空开发与探索奠定基础。表2给出了从地球供应和从月球供应水和燃料的发射运输成本比较。可以看出月基供应具有显著优势:即使对LEO轨道提供燃料,月基供应都具有成本优势;对GEO、EML1轨道提供燃料,月基供应将比地基供应的成本低一个量级;对月面应用,成本低近两个量级。表3给出了地月空间活动推进剂和生保物资保障对水的年需求估算。以此为例,在月球极区开采水并生产氢氧燃料,相较地基供应,到2025年可节省56亿美元,到2040年可节省540亿美元,而到2055年则可节省910亿美元。

表2 从地球和月球供应推进剂的成本比较<sup>[36]</sup>

Table 2 Cost of propellant from the Earth or the Moon<sup>[36]</sup>

目的地	地球供应每千克 成本/美元	月球供应每千克 成本/美元
地球表面	1	-
近地轨道	4 000	3 000
地球同步转移轨道	8 000	1 500
地球静止轨道	16 000	1 500
地月L1轨道	12 000	1 000
月球表面	36 000	500

月球资源开发体系以水冰资源开发为目标,重点建设月球极区采冰站、地月L1资源补给站,建立低成本月面发射系统和地月运输系统,形成低成本地月供应链系统,支撑常态化地月空间活动,并为近地小天体采矿和其他行星开发重点提供空间推进剂补给。整体体系架构如图4所示。

月球极区采冰站重点利用月球极区永久阴影

表 3 太空人口预测和燃料与生保水资源需求<sup>[36]</sup>Table 3 Space population and propellant consumption prediction<sup>[36]</sup>

太空人口分布/人	2010	2025	2040	2055	2070
近地轨道站	6	37	218	1 131	7 891
EML1 轨道站	0	10	79	323	2 630
月面前哨站	0	2	68	647	5 261
火卫一前哨站	0	0	12	162	1 315
火表前哨站	0	0	20	970	9 206
年均水需求量/t	2010	2025	2040	2055	2070
近地轨道补给站	2	433	2 385	3 096	23 320
EML1 补给站	0	425	3 133	5 534	43 158
月面补给站	0	13	482	771	4 665
火卫一补给站	0	5	328	1 577	12 084
火表补给站	0	0	342	1 720	12 230

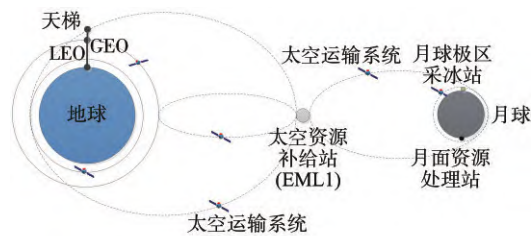


图 4 月球资源开发体系设想图

Fig. 4 Architecture of lunar resource exploitation

区丰富的水冰资源、易于获取的太阳能资源以及随处可用的月壤资源。通过阴影区水冰开采设备、水资源运输车、坑缘月面资源补给站和太阳能反射阵列等设施,实现永久阴影区水冰资源的规模化开采。大部分水资源发射到地月 L1 资源补给站,在轨生产、供应氢氧燃料。少部分水资源在月面通过光电催化生产氢氧燃料,为月球无人和有人探索与开发提供水、氧、燃料等供应,并在此基础上,通过月壤原位建造屏蔽防护、储能站等基础设施,为人类规模化、常态化月面居住提供物质和能源保障。在进行月球水冰资源开发前,首先需要对水冰资源进行勘查选址。通过遥感和原位勘查,确定水冰赋存位置和状态,对水冰资源保有量和品位进行评估。赋存位置决定了水冰资源的开采难度和成本,赋存状态决定了开采、提取和提纯方案,资源保有量和品位则决定了水冰矿体的总价值。水冰开采站的选址不仅需要考虑资源储量和品位、赋存与分布等状态,还需综合考虑廉价、充足的能源,以及运输、操作的适应性和便捷性。因此,月球水冰资源开采站选址除考虑潜在的水资源分布情况外,月球极区的太阳光照、环境温度和地形地貌条件,以及保障地月通

信遥操作的地球可见度条件等,都是基地选址必须考虑的关键因素<sup>[37]</sup>。更为重要的是,具备水冰赋存条件的月球永久阴影区无自然的太阳光照,处于难以抵达的撞击坑底部,面临常年低温(低至 25 K)的恶劣环境,给规模化开采带来极大挑战,必须综合考虑多种因素,选择合适的开采基地。

由于月壤水冰资源主要储藏在撞击坑内的永久阴影区,规模化开采面临一系列技术难题:1)开采区处于撞击坑内,而主要基地设施在撞击坑脊高地处,坑缘地形陡峭、环境复杂,水冰开采设备如何从坑脊基地处到达坑底阴影区并把开采的资源运回基地? 2)开采区处于冷黑极端环境,温度可达 40 K,无光照,无法直接利用太阳能,水冰开采设备如何在极端恶劣环境下安全可靠并长期运行? 3)永久阴影区内水冰赋存形式、深度和品位不确定度大,如何进行原位勘探并精细化确定开采点? 4)如何规模化、大范围开采星壤并提取水冰。

为在水冰资源储量丰富的永久阴影区内实现规模化的水冰资源开采,需在光照充分的撞击坑边缘部署反射镜组,满足全月昼期间的太阳能反射要求。水冰开采车携带太阳能汇聚加热设备、冰壤开采设备和水收集装置,进入待开采阴影坑中进行原位水冰开采工作,太阳能汇聚加热设备与撞击坑边缘的反射镜组对准,收集反射的太阳光,并通过高导光管将光能传输到需加热的含冰星壤,水冰相变挥发后变成水蒸气,通过管道进入冷凝器凝结为液态水收集储存。水资源运输车往返于阴影坑中的水冰开采车和位于坑缘的氢氧燃料站之间,将储存于水箱中的水资源运送到氢氧燃料站。位于坑缘的氢氧燃料站处于光照条件良好的位置,将开采运输来的水通过电解的方式制备氢氧,为车用燃料电池提供发电燃料,并利用环境低温和液化装置将氢氧液化长期储存,可为月面发射的发动机提供氢氧推进剂<sup>[38]</sup>。

月球开采的水冰等资源通过月基发射进入月球轨道和地月空间,运送到地月资源补给站,如图 5 所示。在地月空间可选的资源补给站轨道位置包括:1)约 100 km 高度的低月球轨道(LLO);2)顺行圆轨道(PCO)和冻结轨道;3)椭圆轨道(ELO);4)地月平动点周期和拟周期轨道等。综合考虑月球资源获取和地月空间活动的资源补给需求,优先在地月 L1 建立资源补给站。

由于液氢、液氧长期储存困难,储存比质量低。

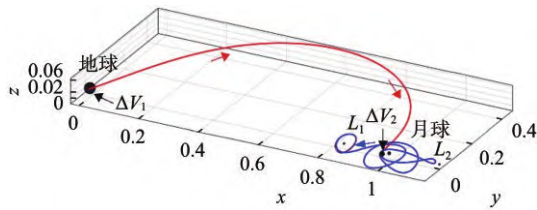


图5 地月空间补给运输通道

Fig. 5 Supply chain in the cislunar space

从月球表面发射水箱,在轨道上进行光电解并液化生产液氢液氧推进剂,与直接从月面运送液氢液氧推进剂相比,发射成本小,贮罐设计简单,是实现大量供应的高效方法<sup>[39]</sup>。通过太阳能和其他发电装置产生的电能,利用水电解器将水分解成氢气和氧气,并进行液化储存,为航天器和未来的地月空间站提供燃料、氧补给服务,可大幅提高其工作寿命和可重复使用性,具备更大范围的机动飞行能力和更大规模的宇宙探索能力。地月资源补给站发挥地月空间和深远太空的“驿站”功能,实现水、氧和推进剂等重要物质资源的太空补给,逐步降低、摆脱对地球资源的依赖。

#### 4.2 近地小天体采矿体系

近地小天体开发不仅可获取地球可持续发展的战略性矿产资源,也可为后续建立空间设施以及星际航行提供大量基础材料,包括制备推进剂、开发防护材料、建造防辐射结构,甚至整个星际探测产业链所需要的各种材料。这些近地小天体几乎全都含有水,其中不少还含有镍、铂、金等贵金属,物质资源十分丰富;此外,许多近地小天体相对容易到达,且表面处于微重力水平,非常有利于将提取到的资源转移到地球或近地轨道上,显著降低开发成本,开采潜力和价值巨大<sup>[40]</sup>。发射采矿设备到目标小行星并建立采矿站,实施矿物开采、分选与初步加工。

近地小天体采矿体系以稀贵金属等战略性矿产资源开发为目标,兼顾水冰资源开发利用,实现对高价值近地小天体的勘探、捕获、资源开采和分选,太空矿物冶炼、太空产品制造等功能。重点建设近地小天体捕获系统、近地小天体采矿站、太空矿物运输系统和日地L2资源加工补给站,见图6。

该系统主要利用近地小天体捕获系统实现对近地小天体目标的附着和捕获;捕获后的小天体根据体积和质量大小,采用整体牵引迁移或将部分切割迁移的方式将近地小天体目标转移至日地L2资

源加工站。对于有着陆条件的近地小天体,可采用着陆开采方式,建立近地小天体采矿站进行矿物开采、分选,然后将获得的高价值原料运输至日地L2资源加工补给站。在日地L2建设资源加工补给站,既便于将开采、分选的小天体矿产就近加工处理,也同时将获取的近地小天体水冰资源制备推进剂等物资,为更深远的探索与开发提供物资补给。

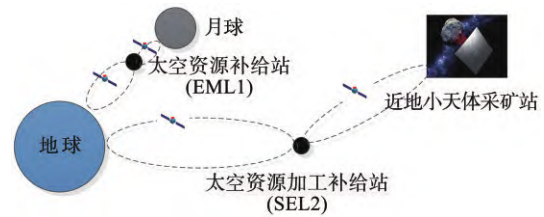


图6 近地小天体采矿体系设想图

Fig. 6 Scheme of NEA mining architecture

小天体开发的前提条件是采矿飞行器通过轨道转移和抵近绕飞等过程到达目标小天体。不同的小天体运行轨道差别很大,发射机会的搜索就成为探测任务设计与规划的重要内容,需以任务成本(速度增量)等为优化目标,以交会相对速度、发射能量、任务时间等为约束条件,开展优化搜索。对两脉冲转移方案,优化搜索的目标函数为

$$J = \sqrt{|\mathbf{v}_L - \mathbf{v}_E|^2 + v_{e\infty}^2} - v_{ep} + \sqrt{|\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_A|^2 + v_{a\infty}^2} - v_{ap} \quad (11)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \Omega_{1r} = \left( \sqrt{|\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_A|^2 + v_{a\infty}^2} - v_{ap} \right) \leq \Delta v \\ \Omega_{2r} = |\mathbf{v}_L - \mathbf{v}_E|^2 \leq c \\ t \leq t_m \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{v}_E$ 和 $\mathbf{v}_L$ 分别为出发时行星速度和飞行器速度; $\mathbf{v}_A$ 和 $\mathbf{v}_a$ 为交会时小行星速度和飞行器速度; $v_{ep}$ 和 $v_{ap}$ 分别为出发行星和到达小行星的轨道速度; $v_{e\infty}$ 和 $v_{a\infty}$ 分别为飞离和进入双曲剩余速度; $\Delta v$ 为交会时的速度增量; $c$ 为发射总能量; $t$ 为飞行总时间。

#### 4.3 火星资源开发体系

火星资源开发体系以火星水冰和大气资源综合开发为目标,重点建设火表资源开发站、日火L1资源补给站和地火运输系统,见图7。

火表资源开发站利用火星丰富的水冰资源和二氧化碳大气资源,重点实现水冰规模化开采和大气二氧化碳转化利用,并生产推进剂燃料。

建立日火L1资源补给站,将火星表面开采的资

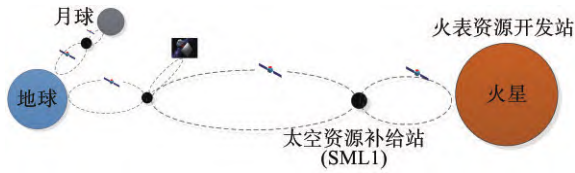


图 7 火星资源开发体系设想图

Fig. 7 Scheme of Mars resource exploitation

源通过低成本火基发射(从火星表面供应发射燃料),运输至资源补给站,在轨道上规模化生产水基/甲烷推进剂,形成低成本地火供应链关键节点,实现火地联动,支撑常态化地火空间活动,如图 8 所示。

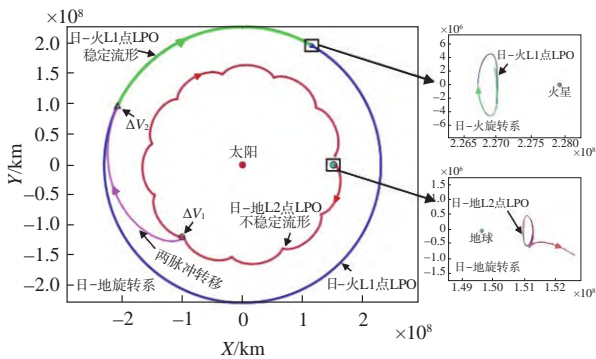


图 8 SEL2-SML1 行星际运输通道

Fig. 8 Interplanetary transportation between SEL2 and SML1

#### 4.4 主带小行星采矿体系

主带小行星采矿体系以稀贵金属等战略性矿产资源开发为目标、兼顾水资源开发利用,重点建设谷神星资源补给站,小行星采矿站、小行星矿物运输系统和日火 L2 资源加工补给站,见图 9。

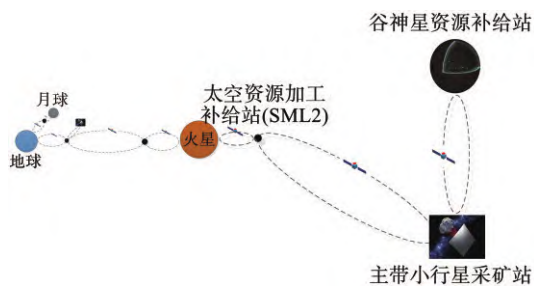


图 9 主带小行星采矿体系设想图

Fig. 9 Scheme of MBAs mining architecture

以小行星带中最大的天体、矮行星“谷神星”为基地(表面重力  $0.27 \text{ m/s}^2$ , 逃逸速度  $0.51 \text{ km/s}$ , 直径大于  $900 \text{ km}$ ),它具有丰富的水冰资源,可为主带小行星活动制备提供燃料。建立谷神星资源补给站,重点实现谷神星水冰资源的有效开采和转化,以此为基础,为小行星带资源开发提供资源补给。捕获

或发射小行星采矿站至小行星带其他小行星,完成主带小行星矿产资源开采,如图 10 所示。

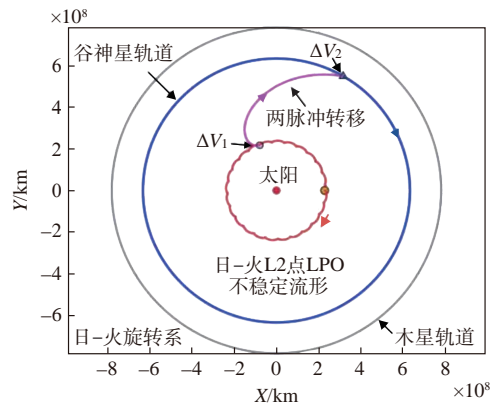


图 10 SML2-MBA 行星际运输通道

Fig. 10 Interplanetary transportation between SML2 and MBAs

日火 L2 资源加工补给站从主带小行星获取资源,开展矿物冶炼、生产制造和燃料制备,为规模化的火星探索与开发提供工业基础,并向地球运输资源,同时为主带小行星资源开发、类木行星探索开发提供物质基础。

#### 4.5 类木行星探索与开发体系

类木行星主要是指以木星、土星为代表的气态类木行星和以天王星、海王星为代表的冰巨星。此类行星距离太阳较远,太阳辐射强度很低。

类木行星探索与开发体系以类木行星大气和卫星海洋资源开发为目标,重点建设日本 L1 资源补给站,木星、土星、冰巨星的探索开发系统。以日本 L1 资源补给站为基础,支撑开展类木行星的探索与开发。通过日本 L1 和日火 L2 站间的资源运输通道,支撑木星以远的低成本到达和探索开发,见图 11 和图 12。

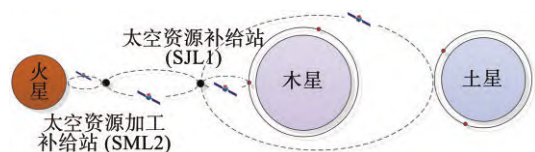


图 11 类木行星探索与开发体系设想图

Fig. 11 Scheme of Jovian planets exploitation architecture

#### 4.6 内行星探索开发体系

重点建设日地 L1 资源补给站、金星资源开发系统、水星资源开发系统和内行星运输系统,实现水星水冰等挥发分资源、 $^3\text{He}$  等稀有资源,金星大气资源等物质资源的开发利用。

建立并依托日地 L1 资源补给站,利用拉格朗日

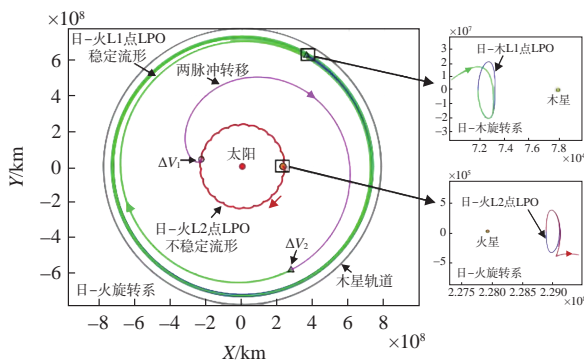


图 12 SML2-SJL1 行星际运输通道

Fig. 12 Interplanetary transportation between SML2 and SJL1

点特殊轨道优势,为水星和金星探索与开发提供物资供应,降低地球发射的严格窗口和轨道选择限制。发展内行星运输系统,依托地月 L1、日地 L1 资源补给站,支撑金星和水星低成本、快速、高效到达,开展内行星探索开发,见图 13 和图 14。

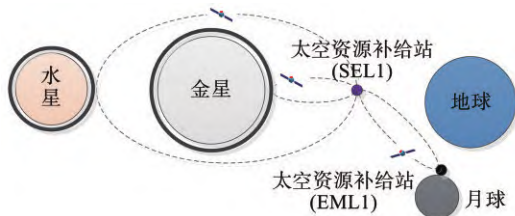


图 13 内行星探索与开发体系设想图

Fig. 13 Scheme of inner planets exploitation architecture

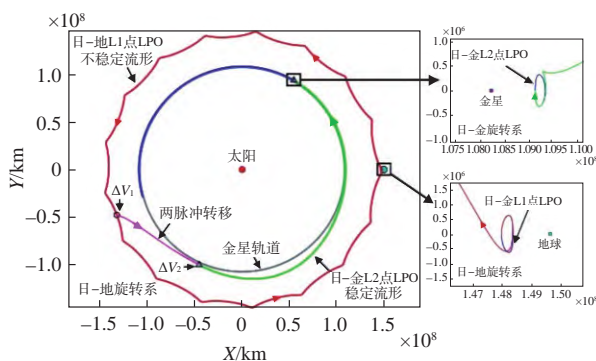


图 14 内行星运输通道

Fig. 14 Interplanetary transportation of inner planets

### 4.7 太空资源开发的关键技术

太空资源开发涉及一系列关键技术,结合全太阳系太空资源开发体系发展构想,需全面布局空间进出、太空运输、太空补给、太空资源勘探、太空资源开采、太空资源加工等技术方向。

在空间进出方向,重点突破天地往返飞行、超低轨摆渡飞船与低成本绳系返回、空间天梯等技术;太空运输方向,重点突破低成本星际运输通道、

高比冲水基推进、借力飞行等技术;太空补给方向,重点突破推进剂原位制备、推进剂低温液化、推进剂零蒸发长期储存、推进剂在轨加注等技术;太空资源勘探方向,重点突破遥感资源探测、原位资源勘探、太空资源评估等技术;太空资源开采方向,重点突破星表水冰开采、行星大气资源捕集、地外天体矿物开采、原位矿物分选等技术;太空资源加工方向,重点突破太空矿物冶炼、太空原位制造、太空原位建造等技术。

### 5 “天工开物”太空资源开发计划设想

随着航天科技的快速发展,以小行星采矿为代表的太空资源开发已逐步变为现实,它不仅将大幅减少地球补给、降低太空探索的任务成本,是实现规模化深空探测的重要基础,更为重要的是,它将催生“太空新经济”,创造不可估量的经济价值,为地球可持续发展注入新动力。我国应尽快开展太空资源开发技术攻关,部署太空资源开发系列任务。

借鉴我国明代科学家宋应星《天工开物》科技著作和“物自天生,工开于人”所蕴含的丰富的中国优秀文化内涵,本文特此提出“天工开物”太空资源开发计划倡议。由近及远,分阶段逐步建设月球资源开发体系、近地小天体采矿体系、火星资源开发体系、小行星带采矿体系、类木行星及卫星探索体系及内行星探索开发体系,形成全太阳系资源开发能力。

#### 5.1 先期目标:近地天体资源开发

为加快我国太空资源开发能力体系建设,初步形成我国太空资源勘探、开采和应用能力,开展太空应用示范,为建立太空资源开发基础设施体系夯实技术和能力基础。第一阶段将通过“勘、采、用”三步走,形成近地天体资源开发能力,开启太空资源开发新时代。

太空资源勘查任务(勘):2023~2025年,利用已有地基和天基天文望远镜,开展近地天体资源勘查任务,建立太空资源数据库,绘制太空资源分布图谱。

太空资源开采演示任务(采):2026~2030年,开展近地天体资源开采演示任务,验证太空资源开发的技术可行性。

太空资源开发示范工程(用):2031~2040年,开展近地天体资源开发示范工程验证,形成太空资源规模开发初步能力。

## 5.2 长远目标:全太阳系资源开发

为形成太阳系全域资源开发能力,初步给出了2035年、2050年、2075年及2100年前全太阳系资源开发四阶段的发展路线图,推动我国太空资源开发利用领域实现跨越式发展。

2035年左右,以月球、近地小天体资源开发为目标,建设月球资源开发体系和近地小天体采矿体系,具备地月空间资源供应能力和近地小天体采矿能力。

2050年左右,以火星、主带小行星资源开发为目标,建设火星资源开发体系和主带小行星采矿体系,具备火星资源补给能力和主带小行星采矿能力。

2075年左右,以类木行星和内行星资源开发为目标,建设类木行星探索开发体系和内行星探索开发体系,具备木星、土星、水星、金星深度探索和资源开发能力。

2100年左右,补充建设资源补给站点,形成太阳系全域资源开发能力。

## 6 结论与展望

本文结合太阳系资源分布特点和航天科技发展预测,以人类社会发​​展紧密联系的太空矿产资源开发为核心和重点,由近及远地逐步构建全太阳系资源的开发能力。结论与展望如下:

1)太阳系拥有丰富的矿产资源,具有巨大的开采价值。太空资源开发将形成新产业体系,改变全球原材料供应和全球经济格局,为解决地球资源匮乏困境提供新路径。而且,太空资源开发将使人类具备“摆脱地球的生存能力”,人类的生产生活和各类经济活动将不断向太空延伸,拓展人类生存发展新空间。

2)随着航天科技的快速发展,人类已具备月球、小行星、火星等地外天体的探索与开发能力,太空资源开发利用已从梦想变成现实,已成为当前国际航天重大前沿热点方向。地月空间已进入到经济开发阶段,太空资源开发活动将逐步从地月空间向更远的深空扩展。太空资源开发利用已成为国际航天强国重点发展方向并吸引了大批商业公司纷纷投入开发热潮。

3)由近及远、分阶段逐步建设月球资源开发体系、近地小天体采矿体系、火星资源开发体系、主带小行星采矿体系、类木行星探索开发体系及内行星探索开发体系,将形成规模化、可持续的太空资源开发设施,具备全太阳系资源开发能力,为拓展人

类的生存发展空间、地球可持续发展注入新动力。

4)需加快推进“天工开物”太空资源开发计划专项论证,做好顶层规划、制定发展路线图。加强多学科交叉,重视基础理论、前沿探索和技术创新,逐步实施地面技术攻关、空间飞行验证、太空资源开发基础设施建设,并最终实现太空资源开发应用。

## 参 考 文 献

- [1] NICKLESS E, ALI S H, ARNDT N, et al. Resourcing future generations: a global effort to meet the world's future needs head-on[R]. London, UK: The Geological Society of London, 2015.
- [2] 翟国生. 矿产资源形成之谜与需求挑战[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [3] CORDINER R. Competitive private enterprise in space [M]// Peacetime Uses of Outer Space. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1961.
- [4] ASTERANK. Asteroid database and mining rankings [EB/OL]. [2023-10-27]. <https://www.asterank.com/>
- [5] 齐国生. 太空资源[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2016.
- [6] RAPP D. Use of Extraterrestrial Resources for Human Space Missions to Moon or Mars [M]. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [7] ZACNY K, CHU P, CRAFT J, et al. Asteroid mining [C]. AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, San Diego, USA, September 10-12, 2013.
- [8] TRIMBLE V. The origin and abundances of the chemical elements revisited [J]. The Astronomy and Astrophysics Review, 1991, 3(1): 1-46.
- [9] 焦维新, 邹鸿. 行星科学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- [10] FELDMAN W C, BARRACLOUGH B L, MAURICE S, et al. Major compositional units of the moon: lunar prospector thermal and fast neutrons[J]. Science, 1998, 281(5382): 1489-1493.
- [11] FELDMAN W C, MAURICE S, BINDER A B, et al. Fluxes of fast and epithermal neutrons from lunar prospector: evidence for water ice at the lunar poles [J]. Science, 1998, 281(5382): 1496-1500.
- [12] GLADSTONE G R, HURLEY D M, RETHERFORD K D, et al. LRO-LAMP observations of the LCROSS impact plume [J]. Science, 2010, 330(6003): 472-476.
- [13] KARGEL J S. Metalliferous asteroids as potential sources of precious metals[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 1994, 99(E10): 21129-21141.
- [14] DUNDAS C, BRAMSON A, OJHA L, et al. Exposed subsurface ice sheets in the Martian mid-latitudes [J]. Science, 2018, 359: 199-201.
- [15] MORGAN G A, PUTZIG N E, PERRY M R, et al. Availability of subsurface water-ice resources in the northern mid-latitudes of Mars [J]. Nature Astronomy, 2021, 5(3): 230-236.
- [16] LI X T, YAO W, WANG H. Martian subsurface water ice

- prediction at the Tianwen-1 mission landing site [J]. *Icarus*, 2023, 389: 115268.
- [17] NASA. 2015 NASA technology roadmaps [R]. Washington D. C., USA: NASA, 2015
- [18] INTERNATIONAL SPACE EXPLORATION COORDINATION GROUP. The Global Exploration Roadmap [R]. Washington D. C., USA: NASA, 2018.
- [19] ESA. ESA space resources strategy [R]. Paris, France: ESA, 2019.
- [20] NASA. Artemis plan: NASA's lunar exploration program overview [R]. Washington D. C., USA: NASA, 2020.
- [21] HECHT M, HOFFMAN J, RAPP D, et al. Mars oxygen ISRU experiment (MOXIE) [J]. *Space Science Reviews*, 2021, 217 (1): 9.
- [22] ESA. JUICE: JUPITER ICy moons Explorer: Exploring the emergence of habitable worlds around gas giants, Definition study report [R]. Paris, France: ESA, 2014.
- [23] 林亲, 姚伟. “灵神星”任务及其对太空资源开发的启示 [J]. *宇航学报*, 2023, 44(10): T12-T15.
- [24] DULA A M, ZHANG Z J. Space mineral resources: A global assessment of the challenges and opportunities [M]. Houston: Virginia Edition Publishing Company, 2015.
- [25] 欧阳自远, 邹永廖, 李春来, 等. 月球某些资源的开发利用前景 [J]. *地球科学*, 2002, 27(5): 498-503.
- OUYANG Ziyuan, ZOU Yongliao, LI Chunlai, et al. Prospect of exploration and utilization of some lunar resources [J]. *Earth Science*, 2002, 27(5): 498-503.
- [26] 中国科学院. 中国学科发展战略: 载人深空探测 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [27] LIU Y W, WANG C, PANG Y, et al. Water extraction from icy lunar regolith by drilling-based thermal method in a pilot-scale unit [J]. *Acta Astronautica*, 2023, 202: 386-399.
- [28] LI X T, ZHANG G, WANG C, et al. Water harvesting from soils by light-to-heat induced evaporation and capillary water migration [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 175: 115417.
- [29] 冯德强, 张策, 姜文君, 等. 地外人工光合成装置研制与试验 [J]. *中国空间科学技术*, 2020, 40(6): 13-22.
- FENG Deqiang, ZHANG Ce, JIANG Wenjun, et al. Design and trial of extraterrestrial artificial photosynthesis device [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2020, 40(6): 13-22.
- [30] FENG D Q, JIANG W J, ZHANG C, et al. A membrane reactor with microchannels for carbon dioxide reduction in extraterrestrial space [J]. *Catalysts*, 2021, 12(1): 3.
- [31] GU J P, WANG Q G, WU Y X, et al. Numerical study of particle transport by an alternating travelling-wave electrostatic field [J]. *Acta Astronautica*, 2021, 188: 505-517.
- [32] LU X C, MA R, WANG C, et al. Performance analysis of a lunar based solar thermal power system with regolith thermal storage [J]. *Energy*, 2016, 107: 227-233.
- [33] 包为民, 汪小卫. 地月空间探索与开发的思考 [J]. *宇航学报*, 2022, 43(6): 705-712.
- BAO Weimin, WANG Xiaowei. Some thoughts about cislunar exploration and exploitation [J]. *Journal of Astronautics*, 2022, 43(6): 705-712.
- [34] GÓMEZ G, KOON W S, LO M W, et al. Connecting orbits and invariant manifolds in the spatial restricted three-body problem [J]. *Nonlinearity*, 2004, 17(5): 1571-1606.
- [35] RAPP D. Human missions to Mars: Enabling technologies for exploring the red planet [M]. Cham: Springer International Publishing, 2023.
- [36] KORNTA D, ABBUD-MADRID A, ATKINSON J, et al. Commercial lunar propellant architecture: a collaborative study of lunar propellant production [J]. *Reach*, 2019, 13: 100026.
- [37] 张思勃, 刘阳, 王慎泉, 等. 月表温度和地形对科研站选址的影响 [J/OL]. *中国空间科学技术*, (2023-02-24) [2023-11-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1859.V.20230224.0841.002.html>.
- ZHANG Sibo, LIU Yang, WANG Shenquan, et al. Remote sensing of surface temperature and topography for the potential outpost locations of the lunar south pole [J/OL]. *Chinese Space Science and Technology*, (2023-02-24) [2023-11-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1859.V.20230224.0841.002.html>.
- [38] 王超, 彭祺攀, 王慎泉, 等. 月面原位资源补给站概念方案设计 [J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(6): 596-605.
- WANG Chao, PENG Qibo, WANG Shenquan, et al. Conceptual design of lunar surface In-situ resource supply station [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(6): 596-605.
- [39] 姚伟. 在轨流体管理技术进展和关键技术分析 [J]. *航天器工程*, 2008, 17(3): 89-94.
- YAO Wei. Progress and key technology analysis of on-orbit fluid management [J]. *Spacecraft Engineering*, 2008, 17(3): 89-94.
- [40] 林亲, 王超, 姚伟. 高开采价值小行星探测目标选择探讨 [J/OL]. *中国空间科学技术*, (2023-11-13) [2023-11-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1859.V.20231110.1701.002.html>.
- LIN Qin, WANG Chao, YAO Wei. Study on the selection of asteroid exploration targets with high mining value [J/OL]. *Chinese Space Science and Technology*, (2023-11-13) [2023-11-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1859.V.20231110.1701.002.html>.

#### 作者简介:

王 巍(1966-),男,博士,研究员,中国科学院院士,主要从事先进导航、制导与控制技术等方面的研究。

通信地址:北京市海淀区阜成路16号(100048)

姚 伟(1972-),男,博士,研究员,主要从事能源与资源开发利用、热物理与多相物理化学等方面的研究。

通信地址:北京市5142信箱225分箱(100094)

Email: yaowei\_72@hotmail.com