

月球探测进展与我国的探月行动(下)

欧阳自远

中国科学院院士, 第三世界科学院院士 绕月探测工程首席科学家; 中国科学院地球化学研究所/中国科学院国家天文台, 北京 100012

关键词 月球探测 嫦娥一号绕月探测卫星 中国月球探测工程

月球探测是中国的航天事业在卫星应用和载人航天取得历史性成就的基础上向深空探测领域迈出的第一步。本文详细回顾了人类探测月球的历程与探测成果, 21世纪初月球探测的发展趋势与前景; 介绍了我国月球探测的发展战略和各阶段科学目标, 尤其是正在实施的“嫦娥一号”绕月探测工程的科学目标。

2.3 重返月球

2.3.1 重返月球进展概况

1986年, 空间探测技术和月球科学研究达到了新的阶段, 对月球进行科学的、“理性”的探测时机已经成熟, 美国航空航天局(NASA)开始构思重返月球的计划。1989年7月20日, 时任美国总统老布什宣布:“在即将到来的10年里, 我们努力的目标是自由号太空船; 然后, 在新的世纪, 我们要重返月球, 重返未来, 而且这一次要呆下去”。“要呆下去”开发利用月球矿产资源、能源和特殊环境, 建设月球基地, 为人类社会的可持续发展服务, 已成为新世纪月球探测的总体目标。

1994年和1998年, 美国成功发射了“克莱门汀”和“月球勘探者”号月球探测器, 对月球的形貌、资源、水冰等进行了探测, 标志着“又快、又好、又省”空间探测战略的实施, 奏响了人类重返月球、建立月球基地的序曲。

2004年1月14日, 美国总统小布什宣布了美国新的太空计划, 其中提出2008年前开始发射无人探测器到月球, 进行系统的月球探测; 2015—2020年重新载人

登月, 在月球上长期居留; 以月球为跳板, 2030年把宇航员送上火星乃至更遥远的宇宙空间。对此, 各国的评论一致认为, 美国新太空计划的目标是控制能源、军事优先。欧空局(欧洲航空航天局)根据美国的重返月球计划, 迅速调整了月球探测计划, 规划在2020—2025年实施载人登月, 并在月球上长期居留, 2035年把宇航员送上火星。

重返月球首先是在现有技术条件下, 以月球本身的资源、能源、特殊环境的利用为目标, 重新对月球进行全球性、综合性和整体性的探测, 进而载人登月, 建立月球基地, 以月球为跳板, 逐步开展深空探测。美国、欧空局、俄罗斯、日本、乌克兰、奥地利、英国、德国、巴西和印度等国家和组织都制定了相应的月球探测计划, 并在积极实施中。

2.3.2 重返月球和建立月球基地的原动力

(1) 重返月球是社会发展的需求: 重返月球, 建立永久基地, 是人类开发太空资源, 拓展生存空间至关重要的第一步。通过这一系统工程, 人类可以学会如何“离开地球家园”, 建立类似南极的永久研究站, 在地球以外

(上接第252页)

的研究刚刚起步, 离确认“怒伤肝”还有距离。

总之, 目前在复杂性科学观兴起的时候, 我们可以找到解开中医学的科学性之谜的钥匙, 我们也能看到, 中医学的发展方向是在抓住复杂性科学观发展的机遇, 融入现代科学的潮流中。

(2005年7月25日收到)

1 李约瑟. 中国科学技术史, 第二卷第十三章C节, 北京: 科学出版社, 1978

2 伊·普里戈金. 从存在到演化, 上海: 上海科技出版社, 1986: 3

3 赫尔曼·哈肯. 信息与自组织, 成都: 四川教育出版社, 1987

The Chinese Traditional Medicine: A Modern Scientific Point of View

Zhu Qing shi

CAS Member, University of Science and Technology of China, Anhui 230026

Key words Chinese Traditional Medicine, Joseph Needham, complexity science

空间生产产品和发展工业,建设能够自给自足的地外家园。

(2)重返月球是科学和技术发展的需求:20世纪60—70年代的探月工程证实,空间探测是一个具有极高产出率的项目,它实现的真正价值往往远远高于工程本身。月球探测可以成为科学和技术的“孵化器”。

(3)重返月球是空间科学技术发展的需求:重返月球是空间探测发展的必然,月球将是人类长期进行深空探测的前哨站和转运站。随着技术的不断成熟,可以在月球基地上建设空间加“油”站和发射场;月球是一个庞大的“太空实验室”,可开展一系列天文学、空间科学、近代物理学、生物工程学等的研究,研制和生产一系列特殊生物制品和特殊材料。

(4)重返月球是空间军事活动发展的需求:月球将被用作对地球监视的基地,是实现制“天”权的重要步骤。

月球蕴藏有丰富的矿产资源和能源,可为人类社会的可持续发展提供资源储备,这一因素可能是重返月球最主要的原动力。

3 新世纪初月球探测的趋势与前景

未来的月球探测将主要侧重于:①月球能源的全球分布与利用;②月球矿产资源的全球分布和利用;③月球特殊空间环境资源(超高真空、无大气活动、无磁场、地质构造稳定、弱重力、超洁净)的开发利用,可供建立月基天文台,建立特殊生物制品和特种新型材料生产基地,建立基础科学实验室等;④建立月球长期居留基地,并利用月球为跳板进行深空探测。

3.1 月球将为人类社会提供长期、稳定、廉价和洁净的核聚变燃料

月球上可利用的能源主要有太阳能和核聚变燃料。由于月球表面没有大气,太阳辐射可以长驱直入;同时,月球上的白天和黑夜都相当于14.5个地球日,因此在月球表面建立全球性的并联式太阳能发电厂,就可以获得极其丰富而稳定的太阳能。这不但解决了月球基地的能源供应问题,还可以用微波将能量传输到地球,为地球提供新的能源。

月球表面覆盖着一层由岩石碎屑、粉末、角砾、撞击熔融玻璃等物质组成的、结构松散的混合物——月壤。月壤中绝大部分物质是就地及邻近地区物质提供的。由于月球几乎没有大气层,月球表面长期受到微陨石的冲击及太阳风粒子的注入,特别是太阳风粒子的注入使

月壤富含稀有气体组分。由于太阳风离子注入物体暴露表面的深度一般小于 $0.2\ \mu\text{m}$,因此这些稀有气体在细颗粒月壤中平均含量最高,有些细颗粒月壤粉末中稀有气体含量高达 $0.1\sim 1\ \text{g}/\text{cm}^3$ (标准状态下),相当于 $1\times(10^{19}\sim 10^{20})$ 个原子/立方厘米。在整个月球演化史中,由于外来物体对月球表面的频繁撞击,月壤物质几乎完全混合,在深达数米的月壤中这些稀有气体的含量较均匀。

在月壤的稀有气体中,最让我们感兴趣的是氦-3。因为,相比目前正加速发展的利用氘和氚反应的热核聚变装置来说,用氦-3来进行核聚变反应比用氘作燃料具有更多的优点,主要表现在:①反应产生的能量更大;②传统的氘核反应过程中,伴随核聚变能的产生,要产生大量的高能中子,而这些中子能够对核反应装置产生广泛的放射性损伤;相反的,若用氦-3作为反应物,则主要产生高能质子而不是中子,对环境保护更为有利;③氦本身具有放射性,而氦-3则没有。

月壤中氦-3的资源量对人类未来开发利用月球能源具有极重要的意义。由于月壤中氦-3的含量较为稳定,只要能够精确探测月壤的厚度,就可以估算出月壤中氦-3的资源量。以“阿波罗”和“月球号”探测器的实测结果为参考标准计算,月壤中氦-3的资源总量可达100~500万吨。而地球上天然气可提取的氦-3是非常少的,只有15~20吨,而且很难提取。

全世界的年总发电量约需100多吨的氦-3,也就是说,月壤中的氦-3可供地球能源需求达万年。因此,开发月壤中所蕴藏的丰富的氦-3对人类未来能源的可持续发展具有重要而深远的意义。

据计算,氦-3的能量回报率为270,原子能发电的能量回报率为20,煤为16。氦-3作为一种清洁、高效、安全的核聚变发电燃料是毋庸置疑的。当前,可控核聚变工业发电尚未实现,从月球上运回氦-3成本过高。由于目前技术条件和经济发展等诸多条件的制约,利用月壤中氦-3来进行发电看起来是难以想象的,但随着可控核聚变发电的商业化,航天科技的发展和进步,航天运输成本将日益降低,当地-月之间的运输成本降低到我们可以接受的程度时,利用氦-3发电将成为理所当然和历史潮流的必然。人类要开发月球,建立月球基地,必然要在月球上获取生命维持系统的各种气体氧气、二氧化碳、氮气等,而氦-3可以作为副产品来进行开发,这样会进一步降低成本。

3.2 月球的金属矿产资源将是地球资源的重要储备和支撑

3.2.1 月海玄武岩中的钛、铁等资源

月面上有 22 个月海,除东海、莫斯科海和智海位于月球的背面外,其他 19 个月海都分布在月球的正面。月海中的玄武岩含二氧化钛的含量范围为 0.5%~13%。月球上 22 个月海中所充填的玄武岩总体积约 106 万立方公里。若以月海玄武岩中钛铁矿含量超过 8%,即二氧化钛的含量大于 4.2%的平均水平进行估算,月海玄武岩中钛铁矿(FeTiO_3)的总资源量约为 1300~1900 亿吨。尽管上述估算带着很大的推测性与不确定性,但可以肯定的是,月海玄武岩中所蕴藏的丰富的钛铁矿是未来开发利用月球的最重要的矿产资源。

3.2.2 克里普岩与稀土元素、钍、铀等资源

克里普岩(KREEP)是月陆三大岩石类型之一,因富含钾(K)、稀土元素(REE)和磷(P)而得名。克里普岩在月球上分布很广泛。富钍、铀的风暴洋区的克里普岩被后期月海玄武岩所覆盖,克里普岩与月海玄武岩混合并形成了高钍、铀物质,其厚度估计有 10~20 公里。风暴洋区克里普岩中的稀土元素总资源量约为 225~450 亿吨。克里普岩中所蕴藏的丰富的钍、铀和稀土元素也是人类未来开发利用月球资源的重要矿产资源之一。

此外,月球还蕴藏有丰富的铬、镍、钾、钠、镁、硅、铜等金属矿产资源,将会为人类社会的可持续发展作出贡献。

3.3 月球表面特殊空间环境的利用

月球几乎没有大气层,属于超高真空状态,因而月球表面不会有大气吸收、反射与散射等干扰;由于没有大气的热传导,月球表面昼夜温差极大;月球没有全球性的磁场,月岩只有极微弱的剩磁;月球的内部能量已近于衰竭,内部的地温梯度也很小,月震释放的能量仅相当于地震的一亿分之一;月球的地质构造极其稳定,自距今 31 亿年以来,月球没有发生过显著的火山活动和构造运动。因此,月球的“地质时钟”停滞在 31 亿年之前,至今仍保留了其早期形成时的历史状况;月球表面还具有高洁净、弱重力的特征。

月球表面的所有这些特征,是在地球上无法达到的。可以用于:

(1)在月球表面建立月基天文观测基地,技术要求比美国的哈勃太空望远镜可能更低,而观测效果更好。月球上的天文观测基地将是月球基地的重要组成部分,它不仅可以对太阳系、银河系天体和星际空间进行观测研究,而且是进行太阳物理学、天体物理学、重力波物理学、中微子物理学观测和实验最有吸引力的场所。

(2)在月面建立月基对地监测站,可以对地球的气

候变化、生态演化、环境污染和各种自然灾害进行高精度的观察和监测,为人类的可持续发展做出贡献。

(3)月球的特殊环境为研制特殊生物制品和特殊材料展示了广阔而诱人的前景,目前,需要在月球基地内研制的生物制品与特殊材料的庞杂清单已经提出。月球将成为新的生物制品和特殊材料的研制、开发和生产的重要基地。

(4)月球是地球唯一的天然卫星,是人类唯一的、庞大而稳固的“天然空间站”,是人类征服太阳系、开展深空探测的前哨阵地和转运站。在月球上建立永久性“地球村”,是人类向外层空间发展的第一个目标,也是最关键的一步,而重返月球计划旨在建设一个具有生命保障系统的受控生态环境的月球基地,进行月面建筑、运输、采矿、材料加工和各项科学研究,为将来建设适于人类居住的月球村进行科研和技术准备,使月球最终成为一个庞大、稳固而功能齐全的“天然空间站”,成为人类共有的科学实验室和开展深空探测的研究试验基地、前哨阵地和物资转运站。因此月表与月球的空间环境具有巨大的利用前景。

可以看出,月球的能源资源矿产资源和特殊环境资源将对人类社会的可持续发展发挥长期稳定的支撑作用,地-月系统不仅是一个统一的自然体系,而且在人类社会的可持续发展方面,也将构成一个统一的整体。

4 我国月球探测的发展战略与科学目标

4.1 开展月球探测是我国航天活动发展的必然选择

纵观世界航天发展态势,重返月球,开发月球资源,建立月球基地已成为世界航天活动的必然趋势和热点。我国在发射人造地球卫星和载人航天成功之后,与时俱进,适时开展以月球探测为主的深空探测,是我国科学技术发展和航天活动的必然选择,也是我国航天事业持续发展,有所作为、有所创新的重大举措。

(1)月球探测将成为我国空间科学和技术发展的第三个里程碑。发射人造地球卫星、载人航天和深空探测是航天活动的三部曲。我国在应用卫星方面已有 30 多年的成功经验,成果令人瞩目,而随着载人航天取得重大的突破,目前唯有深空探测尚未开展。纵观世界航天活动的发展历程,深空探测是航天活动的第三个重要领域,世界主要航天国家和组织都在实施或计划开展以月球和火星探测为主线的深空探测,我国作为世界大国

和主要航天国家开展月球探测是航天活动发展的必然选择, 理应在月球探测领域占有一席之地, 并有所作为。

(2) 月球探测是一个国家综合国力和科学技术水平的重要体现, 开展月球探测工作有利于进一步牢固确立我国的大国地位, 扩大我国在全球的政治影响。

(3) 月球探测能极大地增强民族凝聚力。从历史来看, 我国航天发展史中两个重要的里程碑——第一颗人造地球卫星(东方红一号)和第一艘载人飞船(神舟五号)的成功发射, 极大地鼓舞了全国各族人民和海内外华人, 增强了中华民族的自豪感和凝聚力。开展月球探测必将实现中华民族嫦娥奔月的千年梦想, 更大地增强民族凝聚力和自豪感, 成为中华民族伟大复兴的一个重要标志性工程。

(4) 月球探测可以成为我国新的科技生长点, 有利于推动科教兴国方针的贯彻实施, 促进高新技术的全面发展, 推动基础科学的创新和发展。

(5) 21 世纪, 人类将重返月球。深入研究发现, 月球具有丰富的资源和可利用的巨大战略价值, 世界各国对月球资源的争夺将越来越激烈。开展月球探测, 将提高我国认识月球、开发利用月球资源的能力, 对维护我国在月球上的权益具有重要的战略意义。

当前, 正值国际上重返月球计划尚未全面开展之际, 我们必须与时俱进, 抓住机遇, 抓紧实施月球探测工程。我国的月球探测虽然起步晚, 但可以在较高的起点上迎头赶上, 确保我国在国际月球探测活动中占有一席之地。

4.2 我国月球探测工程的发展规划设想

我国开展月球探测工程应紧密结合我国国情和月球探测工程的特点, 应服从和服务于科教兴国战略和可持续发展战略, 以满足政治、经济、社会和科学技术发展的综合需求为目的, 把推进科学技术进步放在首位, 力求在社会的全面发展中发挥更大的作用; 要坚决贯彻“有所为, 有所不为”的方针, 有限目标, 突出重点, 集中力量, 在关键领域取得突破; 我国月球探测工程起步较晚, 尤其要借鉴国外月球探测工程的经验和教训, 优选探测目标, 有一定的先进性和创新性, 形成自己的特色, 力求高起点进入国际主流, 作出应有贡献; 充分利用我国在开展人造卫星工程、载人航天工程和空间科学研究等方面创造的条件和取得的成果, 加强系统设计创新和关键技术攻关, 在求实创新的基础上, 实施“又快、又好、又省”的发展策略, 探索更加经济、更加高效的月球探测工程发展道路; 采取短期目标与长远目标相结合, 单一任务与综合性计划相结合, 循序渐进与分阶段发展

相结合, 各阶段互相有机衔接的发展策略, 以实现持续、协调的发展。

综合分析国际上月球探测已取得的成果, 以及世界各国“重返月球”的战略目标和实施计划, 考虑到我国科学技术水平、综合国力和国家整体发展战略。近期我国的月球探测应以不载人月球探测为宗旨, 可分为三个发展阶段:

第一阶段: 环月探测 研制和发射我国第一个月球探测器——嫦娥一号月球探测卫星, 对月球进行全球性、整体性和综合性探测。图 4 为嫦娥一号月球探测卫星的轨道设计。

第二阶段: 月面软着陆器探测与月球车月面巡视勘察 发射月球软着陆器, 试验月球软着陆和月球车技术, 就地勘察着陆区区域的地形地貌、地质构造、岩石成分与分布, 就位探测月壤层和月壳的厚度与结构, 记录小天体撞击和月震, 开展月基极紫外、低频射电和光学天文观测。

第三阶段: 月面自动采样返回 发射小型采样返回舱, 进行就地勘察着陆区区域的地形地貌、地质构造、岩石类型与分布, 就位探测月壤层和月壳的厚度与结构, 记录小天体撞击和月震, 探测月球内部结构; 采集关键性月球样品返回地球, 进行系统深入研究。

我国在基本完成不载人月球探测任务后, 根据当时国际上月球探测发展情况和我国的国情国力, 可进一步研究拟定我国载人月球探测的战略目标和发展规划, 择机实施载人登月探测以及与有关国家合作共建月球基地。

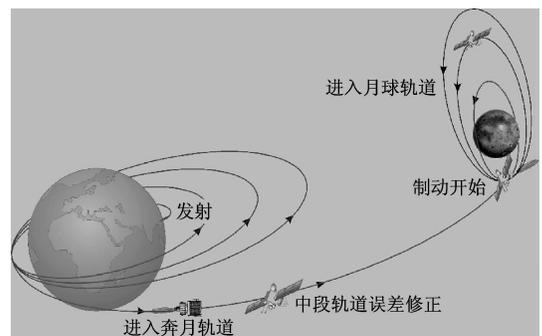


图 4 嫦娥一号月球探测卫星的轨道设计

4.3 “嫦娥一号”月球探测卫星的科学目标

我国的第一个月球探测卫星应在确保成功的基础上, 优选探测目标, 确保重点, 探测内容既要与国际接轨, 又要具有特色, 不完全重复其他空间国家已做过的工作, 为月球研究和“重返月球”提供所需要的新资料, 奠定我国在国际月球探测和深空探测中的地位。

“嫦娥一号”月球探测卫星的主要目标是:

4.3.1 获取月球表面高精度三维立体影像

获取月球表面三维影像,精细划分月球表面的基本构造和地貌单元;进行月球表面撞击坑形态、大小、分布、密度等的研究,为类地行星表面年龄的划分和早期演化历史研究提供基础数据;划分月球表面断裂和环形影像纲要图,勾画月球地质构造演化史。

4.3.2 分析月球表面有用元素含量和物质类型的分布特点

月球表面物质是研究月球形成和演化历史最为直接的对象,因此,月球表面物质的元素丰度、岩石类型及其全球分布的探测和研究,是月球资源探测的主要途径和最重要的研究主题。“嫦娥一号”将勘查月球表面有开发利用价值的14种元素(钛、铁、钍、铀、钾、氧、硅、镁、铝、钙、钠、锰、铬、稀土元素,其中有9种元素是我国首次进行探测)的含量与分布规律,获取这些元素的分布图。根据元素分布的特点和高光谱数据,找出各元素在月表的富集区,确定克里普岩、斜长岩和玄武岩的类型与分布特点;通过对月岩及其分布的研究,评估月球矿产资源(如铁、钛和稀土元素)的开发利用前景,为未来开发和利用月球的资源提供依据,为研究太阳系和地-月系的起源方式与演化过程提供直接和有效的科学证据。

4.3.3 探测月壤特征与厚度

利用微波辐射技术,探测月球表面月壤的特征和厚度,这也是国际上第一次进行全月球的月壤厚度测量。从而得到月壤年龄及其分布,估算月球表面核聚变发电燃料氦-3的分布及资源量。

4.3.4 探测地月空间环境

月球与地球的平均距离约为38万公里,处于地球磁场空间的远磁尾,在向阳面可穿出地磁场磁层顶,感受行星际空间环境(如原始太阳风、太阳宇宙线及行星际磁场)。探测太阳宇宙线高能带电粒子和太阳风等离子体,研究太阳风和月球以及磁尾和月球的相互作用,对深入认识这些空间物理现象对地球空间环境以及对月球空间环境的影响有深远的科学及工程意义。通过月球卫星轨道参数的高精度测量和科学分析,研究月球质量分布的不均一性。

4.4 “嫦娥一号”月球探测卫星的工程目标

(1)突破月球探测的关键技术。主要包括研究地-月飞行技术,验证航天器飞出地球并进入其他天体引力场的轨道设计;实施远距离测控和通信,为深空探测的测控和通信打下技术基础;研究月球飞行的热环境条

件,验证航天器的热设计,探索深空探测器的热控解决途径等;

(2)初步建立我国的月球探测工程大系统。包括运载火箭、卫星、发射场、地面测控系统和地面应用系统,根据月球探测的特点进行相应的整合与适应性修改,初步建立适应未来发展的工程大系统;

(3)验证各项关键技术,获取月球探测的宝贵工程实践经验,为未来探测积累技术基础;

(4)初步建立我国月球探测技术研制体系,培养相应的人才队伍,推动月球探测活动的进一步开展。

4.5 我国已完全具备开展月球探测的能力

我国已经建立起了完整配套的航天工程体系,这些基础设施和研制条件为我国开展月球探测工程奠定了必要的物质基础。经过多年可行性论证,我国月球探测的总体战略和科学目标已经明确。东方红-3号(DFH-3)可以作为月球探测卫星平台,各分系统也基本采用其他卫星的成熟技术。长征-3甲(CZ-3A)运载火箭可以满足发射月球探测卫星的要求。我国现有的S频段航天测控网,在甚长基线干涉(VLBI)天文测量网的配合下,可以完成首期月球探测的测控任务。通过建设直径为50m(北京密云)和40m(云南昆明)的天线,我国完全可以具备月球探测数据的接收、处理和研究能力。

总之,我国规划开展的月球探测工程,科学目标明确、先进,有创新性,投资有限,是一项影响深远的国家战略工程。我国已经具备了开展月球探测一期工程——“嫦娥一号”月球探测卫星的能力和条件,将在2007年初完成首次月球探测。“嫦娥一号”必须确保成功,任务还非常艰巨;我们将竭尽全力,发扬两弹一星和载人航天精神,攻克一系列技术难关,实现中华民族的历史夙愿。

(2005年6月16日收到)

Review of Lunar Exploration and Introduction of Chinese Lunar Exploration Project

Ouyang Zi yuan

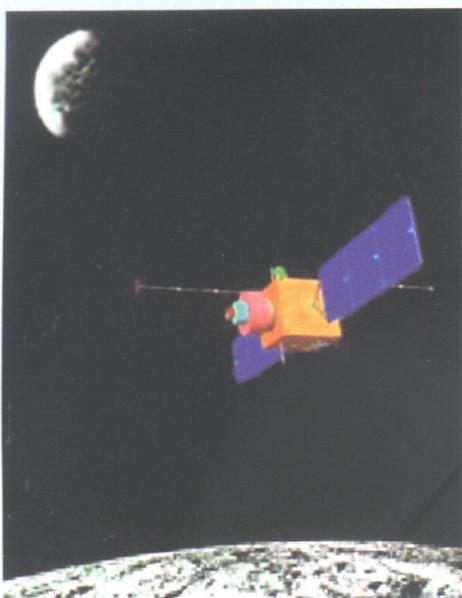
Institute of Geochemistry, The National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012

Key words lunar exploration, Chang'E 1 lunar orbiter, Chinese lunar exploration project

月球探测的趋势和前景

未来的月球探测主要侧重于研究:

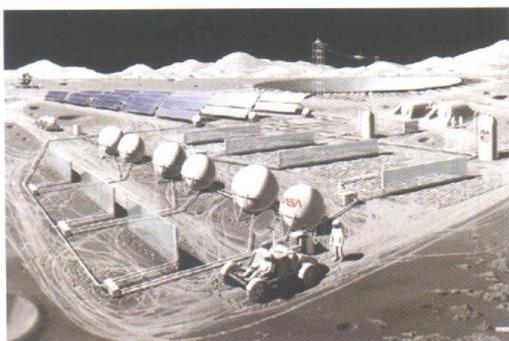
- ①月球的资源分布利用; ②矿产资源分布和利用;
- ③建立月基天文台; ④利用月球实施深空探测



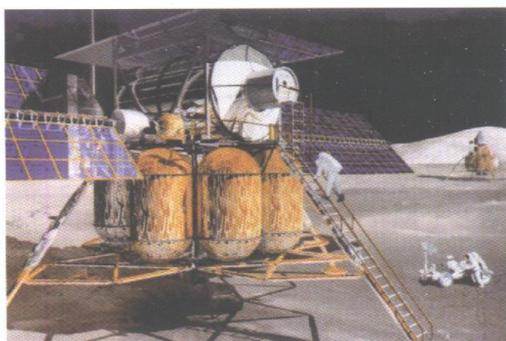
▲ 嫦娥一号月球探测卫星



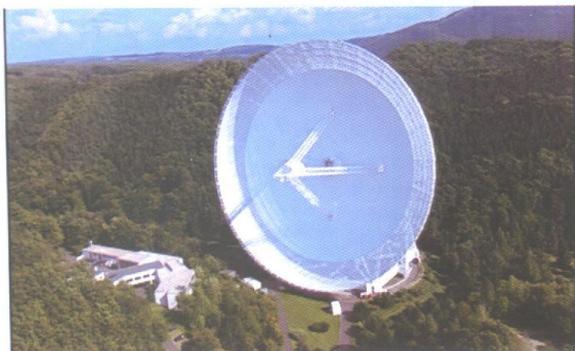
▲ 未来月球基地的设想——矿产资源提取基地



▲ 未来月球基地的设想——月基天文观测基地



▲ 未来月球基地的设想——月球太阳能发电厂



▲ 用于嫦娥一号月球探测卫星科学数据接收的50米天线



▲ 探测仪器(可见光立体成像相机激光高度计)

参见本期“月球探测的进展与我国的探月行动”(下)