

月球探测与人类社会的可持续发展

欧阳自远^{1,2}, 邹永廖¹, 李春来¹, 刘建忠¹, 徐琳²

1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002

摘要:1959年至1976年的18年是人类第一次月球探测高潮,美国和前苏联共成功发射了45个月球探测器,获取了382 kg的月球岩石和月壤样品,这些探测资料和月球样品的系统分析与研究,大大促进了人类对月球、地球和太阳系的认识,并带动了一系列基础科学的创新,促进了一系列应用科学的发展。通过从1976年至1994年近18年浩如烟海的月球探测数据和资料的消化、分析与综合研究后,1994年Clementine环月探测器的发射,标志新一轮探月高潮的开始。当前,国际探月活动刚进入重返月球、逐步建设月球基地的阶段,而逐步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。本文在系统分析已有的探测与研究资料基础上,论述了开发利用月球上具有的巨大能源库、丰富的矿产资源和独特的环境资源将对人类社会可持续发展所具有的深远意义。

关键词:月球;探测;资源;可持续发展

中图分类号:V11 文献标识码:A 文章编号:1007-2802(2003)04-0328-06

1 月球探测的概况

1.1 月球探测的历程

20世纪50年代末期,在冷战背景下,美国和前苏联展开了以月球探测为中心的空间竞赛,掀起第一次月球探测高潮。从1959年到1976年,美苏两国共发射83个月球探测器,其中45个发射成功。1969年7月美国阿波罗11号飞船首次实现了人类登上月球的夙愿,随后“阿波罗”12、14、15、16、17和前苏联的“月球”16、20和24相继进行了载人和不载人登月取样,共获得了382 kg月球样品和难以计数的科学数据。月球探测是人类进行太阳系探测的历史性开端,大大促进了人类对月球、地球和太阳系的认识,带动了一系列基础科学的创新,促进了一系列应用科学的发展。月球探测,尤其是载人登月是人类迈出地球摇篮的第一步,是人类历史进程的里程碑。人类在宇宙空间展示的智慧创举、超强能力和攀登精神,是开拓进取、求实创新的光辉范例,增强了探索宇宙、建设好地球家园的信心。月球探测成为人类历史和科学技术发展史上划时代的标志

性事件。

第一次月球探测高潮的最主要推动力是冷战和空间霸权争夺的政治需求。美国和前苏联通过月球探测不仅实现了政治目的,而且在科学和技术上取得了巨大的、划时代的成就。它们正是通过月球探测,建立和完善了庞大的航天工业和技术体系,有力地带动和促进了一系列科学技术的快速发展;月球探测技术在军事和民用领域得到延伸、推广和二次开发,形成了一大批高科技工业群体,包括微电子、计算机、遥感、遥测与遥控、微波雷达、红外与激光、超低温、超高温和超高真空技术,以及冶金、化工、机械、电子视听声像和信息传递等,产生了显著的社会经济效益。据不完全统计,从阿波罗计划派生出了大约3000种应用技术“成果”。在登月后的短短几年内,这些应用技术就取得了巨大的效益:在登月计划中每投入1美元就可获得4~5美元的产出。

阿波罗计划实施后,大规模的月球探测热潮暂告一段落,进入月球探测“宁静期”,人们关注的重点集中在:消化、分析与综合研究浩如烟海的月球探测数据和资料;向各种军用和民用领域转化大量高新

收稿日期:2003-06-20 收到

基金项目:国家自然科学基金项目(40243019)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-115)资助

第一作者简介:欧阳自远(1935—),男,中国科学院院士,天体化学专业。

技术;总结空间探测耗资大、效率低、探测水平不高的经验与教训;以月球探测获得的技术为基础,完善航天技术系统,研制新的空间探测技术,如往返运输系统、大推力火箭、高效探测仪器等,为进一步开发利用外星资源进行科学和技术准备。

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,美国国家宇航局(NASA)开始构思重返月球的计划。1989年7月20日美国总统布什宣布:“在即将到来的十年里,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。俄罗斯、欧洲空间局、日本和印度在上世纪90年代也制定了月球探测的计划,并在积极实施中。最近3年将发射4个月球探测器。在2002年10月的世界空间大会上,美国宣布将在近期启动系统的月球探测计划,开发利用月球资源。总之,月球探测已经成为各航天国家空间探测的重点,月球探测的新高潮即将到来。

1.2 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”,建立像南极类型的永久研究站,在地球以外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世纪六七十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:如美国的“战略导弹防御计划”(SDI)将月球用作空间激光武器平台和对地球监视的基地,是实现制“天”权的重要步骤。

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

第一次月球探测高潮后,经过近30年的研制、开发与转化,世界上主要航天国家都已建立起了先进、实用和完整的航天技术工业和研发体系,载人航天和空间往返运输系统等在技术和经济上都已非常成熟,月球基地建设技术已接近实用化。重返月球、建设月球基地在技术上已属可行。

1.3 各航天国家重返月球的计划

NASA指出:“再次探测月球是大势所趋。在过去的30年里,美国过多地将目光放在对火星及火星生命的探寻上,火星探测要取得突破性的进展,在10年内是不可能实现的。现在可行的是在5年之内将宇航员重新送回月球,并在月球上建立永久性科研基地。这次的任务不仅是认识月球,更重要的是学会如何使用月球上的资源”。因此,21世纪初人类将踏上重返月球并建立月球基地的新征程,为此世界主要航天国家或组织纷纷提出了雄心勃勃的重返月球计划,月球探测重新升温。

1995年美国提出了面向21世纪的全新而完整的探月计划。其内容主要包括:用机器人对月球进行探测;重新载人登上月球,在月球上建立适于居住的前哨站;建成第一个具有生命保障系统的受控生态环境的月球基地。俄罗斯计划在2010年前,发射系列月球轨道探测器,建立月球轨道卫星站,全面绘制月球图,精细测量月面化学元素分布。在此基础上,发射携带月球车的系列软着陆器,探测月壤中 ^3He 的含量、分析月海区矿产资源开发利用前景,确定适宜开采的位置。2010年以后研究月球采矿工艺,建立月球基地。欧洲空间局(ESA)在1994年就提出了重返月球、建立月球基地的详细计划,第一颗月球卫星Smart-1计划于2003年发射,随后的10年内将把四五个探测器送上月球,逐步建立起月球科学研究基地。日本将月球探测作为其主要的航天活动,1990年发射了第一个月球探测器——飞天号,2003年计划发射第二个月球探测器“月球-A”,

2005年和2007年计划发射两个“月神”号探月器(其中一个将实施软着陆)。2015年后将在月球上建立观测站。印度在月球探测方面也制订了详细计划,拟于2007年前后发射月球探测器。此外,英国、德国、奥地利、乌克兰等国也都提出了相应的月球探测计划。

未来的月球探测主要侧重于^[1]:(1)月球能源资源的分布与利用;(2)月球矿产资源的分布和利用;(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,建立月基天文台、特殊生物制品和特种新型材料生产基地,以及基础科学实验室等;(4)建立月球基地的方案与逐步实施。与上世纪六七十年代的月球探测相比,在21世纪重返月球建立月球基地的计划中,参与的国家更多,规模更宏大,目标更明确。

2 月球的能源资源

月球内部的地质构造活动历史集中在距今46~31.5亿年间^[2,3],主要的演化事件有:(1)前雨海纪(距今40~40.5亿年)为月球早期熔融,全球性岩浆洋的发育,岩浆分异形成斜长岩、富镁结晶岩套和克里普岩的月亮;(2)雨海纪(40.5~39亿年)有大量小天体撞击月球,开掘形成大型月海盆地;(3)风暴洋纪(39~31.5亿年)时月海盆地内大面积月海玄武岩喷发,形成月海充填事件;(4)爱拉托逊纪(31.5~8亿年)时小天体频繁撞击月球,在月陆和月海表面形成大小不等的撞击坑;(5)哥白尼纪(8亿年至今)时小天体撞击月球,形成有辐射纹的撞击坑。自距今31.5亿年以来,月球只是一个固化的岩石躯壳在围绕地球旋转,月表的岩石受到小天体频繁撞击、破碎、溅射和太阳的辐射,形成厚达3~20 m覆盖月表的月壤层。

月球表面覆盖着一层由岩石碎屑、粉末、角砾、撞击熔融玻璃物质组成的、结构松散的混合物即月壤。月壤中绝大部分物质是就地及邻近地区提供的^[2,4]。月壤的成分极为复杂,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,不但使挥发性元素如Ag、Br、Cd、Ga、Ge、Hg、In、Pb、Te和Sn等产生迁移并富集于月壤颗粒表面,特别是太阳风粒子的注入使月壤富含稀有气体组分。月壤中稀有气体的含量与颗粒粒度呈线性反相关关系,也与月壤中的矿物组成、元素成分与结构特征有关;钛铁矿捕获的稀有气体的浓度最来开发,又可进一步降低成本。特别是最近法国科

高^[5]。特别需要强调的是,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,月球表面物质几乎完全混合,在深达数米的月壤中这些亲气元素含量较均匀,但由于太阳风离子注入物体暴露表面的深度一般小于0.2 μm,因此这些元素在细粒月壤中平均含量最高,有些月壤细粒粉末中稀有气体含量高达0.1~1 cm³/g(标准状态下),相当于10¹⁹~10²⁰原子/cm³。

在月壤的稀有气体中,最让人感兴趣的是³He。因为,相比目前正加速发展的利用氘和氚反应的热核聚变反应堆来说,用³He进行核聚变反应具有比用氘作燃料更多的优点,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,而这些中子会对核反应装置产生广泛的放射性损伤;相反,³He的反应物主要产生高能质子而不是中子,这些质子可保护系统而不产生放射性;(3)氘本身的放射性对身体有伤害,而³He则没有。

因此,估算月壤中³He的资源量对未来开发利用月球能源具有重要的意义。按照³He在总的氦元素中的比值,可计算出³He在月壤中的平均含量为3~4 ng/g。这样,对于成熟月壤而言,因月壤中³He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³He的资源量。以“阿波罗”和“月球”的实测结果为参考标准计算,月壤中³He的资源总量可达100~500万t。而目前所知,地球上的总的³He非常少,仅15~20 t。建设一个50 MW的D-³He核聚变发电站,每年消耗的³He仅50 kg。以1992年的用电量算,美国如果全部采用D-³He核聚变,年发电总量仅需消耗25 t ³He,而中国只需8 t,全世界该年总用电只须约100 t,也就是说,月壤中的³He可供地球发电1~5万年。可以说,开发月壤中所蕴涵的丰富的³He对人类未来能源的可持续发展具有重要而深远的意义。

³He作为一种清洁、高效、安全的核聚变发电燃料是毋庸置疑的。问题的关键在于运行成本。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³He来发电看起来是难以想象的和操作的,但随着科技的发展,航天运输成本将日益降低,当地一月之间的运输成本降低到可以接受的程度时,利用³He发电就成为可能了。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如O、CO与N等,而He可以作为副产品学家宣布,2030年将使用³He进行核聚变发电商业

化,³He发电已指日可待。因此,从综合开发利用月球资源角度考虑,月球的基地应建立在月海玄武岩集中的区域。

3 月球的金属矿产资源开发

3.1 月海玄武岩与钛、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背面外,其它19个都在月球的正面。阿波罗六次登月取回的样品及“月球”系列探测器带回的岩石样品分析结果表明,月海玄武岩含TiO₂ 0.5%~13%^[3]。根据TiO₂的含量,月海玄武岩可分为高钛玄武岩、低钛玄武岩和高铝玄武岩。

各类月海玄武岩的矿物组成主要由辉石、长石、橄榄石和钛铁矿组成。为粗略估算月海玄武岩中钛铁矿的资源量,首先要探测月海玄武岩的分布面积与厚度及其钛铁矿的含量。过去只能根据撞击坑(或盆地)的形貌、地层与地形的关系,以及有关的地球物理参数来估算玄武岩的厚度^[6~8]。目前较为精确的计算方法是根据撞击坑(盆地)的周边溅射物的多光谱成像数据判断月海物质(玄武岩)和高地物质(斜长岩)的分布特征,再利用成坑模式推算出月海盆地玄武岩的延伸深度,进而计算玄武岩的体积^[9~10]。根据这一模式,我们粗略估算出月表22个月海玄武岩的总体积为106万km³。

若以钛铁矿含量超过8%,即TiO₂含量在4.2%以上的月海玄武岩进行估算。通过多光谱成像数据分析^[12,13],玄武岩TiO₂含量大于4.2%的月海玄武岩占总月海玄武岩面积的30%左右,则钛铁矿的总资源量约为1500万亿t。根据月球正面月海玄武岩厚度分布图^[4],可估算出玄武岩总体积和钛铁矿的总资源量分别为80~160万km³和1100~2200万亿t;根据月球正面玄武岩中TiO₂含量分布图^[15],估算TiO₂含量大于4.5%的月海玄武岩中钛铁矿的总资源量约为1300~1900万亿t^[5]。尽管上述估算带有很大的不确定性,但可以肯定的是月海玄武岩中所蕴涵的丰富的钛铁矿是未来月球开发利用的最重要的矿产资源之一。

3.2 克里普岩与稀土元素、钍、铀等资源^[16~18]

克里普岩(KREEP)是高地三大岩石类型之一,因富含K、REE和P而得名。克里普岩最早发现于阿波罗-12的12013号样品,实际上在月球上分布很广泛。由于阿波罗-12、14、15、16、17所采集的所

有克里普岩中稀土元素的配分模式相近似,且Sm/Nd和¹⁴³Nd/¹⁴⁷Nd值都比较接近,可以认为所有的克里普岩为同源,是岩浆分异或残余熔浆结晶形成的富含挥发组分元素的岩石,其源区应该是位于月壳与月幔之间的过渡带^[2,3,14]。

克莱门汀和月球勘探者探测发现,风暴洋区域Th含量大于 3.5×10^{-6} (3.5~9)^[15~17]。进一步分析发现,这些高Th含量区与克里普岩的Th含量完全吻合。因此,一些专家认为该区域可能就是克里普岩的出露区域,并由此探讨了出露月面或近月表的形成机制,指出富Th的风暴洋区的克里普岩被后期月海玄武岩所覆盖,由于晚期的撞击作用挖掘、掀起下伏的克里普岩,使其与月海玄武岩混合从而形成了高Th物质,其厚度估计有10~20km^[14,18]。根据这一观点,我们^[5]以阿波罗-15克里普岩中REE的平均含量(REE为 511.72×10^{-6})为计算标准,通过模式计算出风暴洋区克里普岩中的总稀土元素资源量约为225~450亿t。

尽管对克里普岩的分布区域还有争论,目前尚无法精确计算出克里普岩的厚度和总体积,影响评估稀土元素乃至钍、铀的资源量,但并不影响以下共识:克里普岩中所蕴涵的丰富的钍、铀和稀土元素也是人类开发利用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。

4 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(月球表面气压仅约 10^{-14} 大气压),因而月球表面不会有大气层的吸收、反射与散射等干扰;由于没有大气层的热传导,月球表面昼夜温差极大($140 \pm 10 \sim -170 \pm 10$);月球没有全球性的磁场,只有极微弱的区域性剩磁,磁化强度约 $(2 \sim 4) \times 10^{-6}$ 电磁单位/g;月球的内部能量已近于衰竭,表面热流仅为 $2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,内部地温梯度也很小,月震释放的能量小于 2×10^{10} J/a,每年月震释放的能量仅相当于地震的一亿分之一;自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“地质钟”停留在31亿年之前,至今仍保存着早期历史状况;月球表面还具

有高洁净、弱重力的特征^[18]。

上述所有特征是在地球上无法得到的。因此,在月球表面建立月基天文观测站和研究基地,技术要求比哈勃太空望远镜要低,而精度则高得多。月基天文观测站的运行和维护费用可能比哈勃望远镜低得多。月球上的天文观测站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。在月面建立月基对地监测站,可以对地面的气候、生态、环境污染和各种自然灾害进行高精度的观察和监测。月球对地监测站甚至可以清晰地监视各种经济、军事与社会活动,从而进行研究、预报和评估,提供极有价值的情报信息。月球还是一个富有潜力的军事平台,具有重要的军事战略意义。

月球的特殊环境为研制特殊生物制品和特殊材料开拓了广阔而诱人的前景,目前已提出需要在月球基地内研制的生物制品与特殊材料的庞大清单。月球将成为新的生物制品和特殊材料的研制、开发和生产的基地。

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,月球的矿产资源、能源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。

参考文献(Reference):

- [1] Zou Yongliao, Ouyang Ziyuan, Li Chunlai. Space chemistry researches in China during 2000 - 2001 [J]. Chinese Journal of Space Science, 2002, 22 (supp.): 120 - 128.
- [2] 中国科学院地球化学研究所. 月质学研究进展[M]. 北京: 科学出版社, 1977. 41 - 203.
Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. The re-
- search progress of selenology[M]. Beijing: Science Press, 1977. 41 - 203. (in Chinese)
- [3] 欧阳自远. 天体化学[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 93 - 145.
Ouyang Ziyang. Cosmochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1988. 93 - 145.
- [4] Grant H, David V, Bevan M F. Lunar sourcebook — A user's guide to the moon [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 121 - 474.
- [5] 欧阳自远, 邹永廖, 李春来, 刘建忠. 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, Liu Jianzhong. Prospect of exploration and utilization of some lunar resources [J]. Earth Sci, 2002, 27(5): 498 - 503. (in Chinese with English abstract)
- [6] Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B L, Binder A B, Elphic R C, Maurice S, Thomsen D R. Global elemental maps of the Moon: The Lunar prospector Gamma-ray spectrometer [J]. Science, 1998, 281(4): 1984 - 1988.
- [7] Paul G Lucey, Blewett D T. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of clementine ultraviolet-visible images [J]. J. Geophysical Research, 2000, 105 (E8): 20297 - 20305.
- [8] Haskin L A, Gillis J J, Koroter R L, Jolliff B L. The materials of the Lunar Procellarum - KREEP Terrane: A synthesis of data from geomorphological mapping, remote sensing, and sample analyses [J]. J. Geophysical Research, 2000, 105 (E8): 20403 - 20415.
- [9] Head J W. Lava flooding of ancient planetary crusts: Geometry, thickness, and volumes of flooded lunar impact basins [J]. Moon and Planets, 1982, 26: 61 - 88.
- [10] Head J W, L Wilson. Lunar mare volcanism: Stratigraphy, eruption conditions, and the evolution of secondary crusts [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1992, 56: 2155 - 2175.
- [11] Charles J B, Paul G L. Basalt thickness in mare Humorum: The crater excavation method [J]. J. Geophysical Research, 1998, 105 (E8): 16855 - 16870.
- [12] Paul G L, Blewett D T, Hawke B R. Mapping the FeO and TiO₂ content of the lunar surface with multispectral imagery [J]. J. Geophysical Research, 1998, 103: 3679 - 3699.
- [13] Elphic R C, Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B, Maurice S, Binder A B, Lucey P G. Lunar Fe and Ti abundance: Comparison of Lunar prospector data [J]. Science, 1998, 281(4): 1993 - 1996.
- [14] Mark A Wieczorek, Roger J Phillips. The "Procellarum KREEP Terrane": Implications for mare volcanism and lunar evolution [J]. J. Geophysical Research, 2000, 105 (E8): 20417 - 20430.
- [15] Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B L, Elphic R C, Maurice S, Binder A B, Miller M C, Prettyman T H. High resolution measurements of absolute thorium abundances on the lunar surface [J]. J. Geophysical Research, 1999, 26(17): 2681 - 2816.
- [16] Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B L, Binder A B, Elphic R C, Maurice S, Miller M C, Prettyman T H. Thorium abundances on the lunar surface [J]. Journal of Geophysical Research,

- 2000,105(E8):20307 - 2331.
- [17] Haskin L A, Gillis J J, Korotev R L, Jolliff B L. The materials of the Lunar Procellarum - KREEP Terrane: A synthesis of data from geomorphological mapping, remote sensing, and sample analyses [J]. *J. Geophysical Research*, 2000, 105 (E8): 20403 - 20415.
- [18] 邹永廖, 欧阳自远, 徐琳, 刘建军, 胥涛. 月球表面的环境特征 [J]. *第四纪研究*, 2002, 22(6): 533 - 539.
- Zou Yongliao, Ouyang Ziyuan, Xu Lin, Liu Jianjun, Xu Tao. The Lunar surface environmental characteristics [J]. *Quaternary Sciences*, 2002, 22 (6): 533 - 539. (in Chinese with English abstract)

Lunar Exploration and Containable Development for Human Society

OU YANG Zi-yuan^{1,2}, ZOU Yong-liao¹, LI Chun-lai¹, LIU Jian-zhong¹, XU Lin²

1. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;*

2. *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*

Abstract : From 1959 to 1976, 45 lunar explorers were successfully sent to explore the Moon by USA and USSR, and 382 kg samples of the lunar rocks and regolith were sent back to the Earth. By studying these exploring data and returned samples, new knowledges about the Moon, the Earth and the Solar system have been largely accumulated, some applied sciences and technology have been greatly improved. After long consideration about post Lunar Exploration Project, the human race began to dream of return-to-moon project, and in 1994, the Clementine mission was sent to the Moon, which marks the beginning of a new tide of the Lunar exploration. Exploring and utilizing the energy resources, the mineral resources, the unique environmental resources of the Moon and settling the Lunar base are now becoming the whole objectives for the lunar exploration in the 21st century. In this paper, the authors document up-to-date exploring data of the Moon, analyze previous studying results, and demonstrate that exploration and utilization of the energy resources and the mineral resources, the unique environmental resources of the Moon will be of great significance for future development of the human society.

Key words : the Moon; exploration; resources; containable development