

第四届“卿云杯”全国通识课程论文大赛

封面样张

学校	中国农业大学	院系	烟台研究院
专业	水产养殖学	姓名	乔同雷
年级	大二	任课教师	牛俊
课程名称	沟通与写作		
论文题目	几朝逐月觅水，共赴月海星河——以月壤水冰与月球玻璃视角浅析月表水资源探索历程		

几朝逐月觅水，共赴月海星河

——以月壤水冰与月球玻璃视角浅析月表水资源探索历程

摘要：“青天有月来几时，我今停杯一问之”。月之于中华民族不仅仅是诗歌中的一种意象，更是一道让中国人回答了几千年仍回味无穷的文明母题。现今“月球水”一直是深空科学领域的研究热点之一，我国科学家在国际学术期刊《自然》发布了一项新的研究成果：在对嫦娥五号带回的样品监测中，发现了月球水存在的证据。并且根据推算月球上大约储存有 2700 亿吨的水，而这里的水是指因行星撞击以水分子的形式封锁在“撞击玻璃珠”中的结构水和月球两极永久阴影区存在固态水冰。进而针对月球极区水冰资源探测与利用需求，科学家提出一种水冰资源“探-采-用”一体化提取实施方案。相信随着深空探索的不断深入，我们终将发现月球上我们素未谋面的月海星河。

关键词：月球水冰，月球玻璃珠，深空探索

一. 逐月觅水——跨越千年的情结

若想揭开更多关于月球的谜底，就要建立庞大且必要的时空观，从古籍中找答案，向先人们求学问，透过他们的视角去追觅洒下江边的第一缕月光，去邂逅我们不曾目睹过的“月球之水”。中国最早记载月球的典籍是《山海经·大荒西经》：“帝俊妻常羲，生月十有二，此始浴之。”¹这也意味着在距今约 2300 年前我们的祖先就踏上了探索月球的道路，而坐落在英格兰南部的巨石阵则将人类对月球的探索追溯到 4300 年前。即使缺少先进的科学技术，但这也丝毫没有阻止古人们在对月探索的征途中取得一项项的“学术性”突破：屈原在《楚辞·天问》中谈到“夜光何德，死而复育？厥利维何，而顾菟在腹”²，大意为“月亮有什么德行，竟然能够死而复生？对月亮有

¹ 出自《山海经·大荒西经》第十五卷，成书于战国初期到中期，“始此浴之”译为：（常羲）在这里给月亮洗澡。

² 出自屈原《楚辞·天问》，成书先秦，“顾菟”：月中兔名，也有译为蟾蜍。

何好处，让玉兔能常在其腹中？”“夜光”即月光，因月光是太阳反射形成的光，所以屈原似乎觉察到了是太阳给予了月亮以“生机勃勃的光芒”，故称之为“死而又育”。而屈原“玉兔在腹”的神奇猜想现代也有一个熟悉的名字——月球空心说。虽然现在主流观点认为月球不是空心的，但是现今对诸如阿波罗月震实验数据的真实存在，还是让“月球空心说”保有科学或真理的可能性。其实我们可以通过对月表地质构造和演示特性的研究与模拟月球重力场、电磁场等物理环境去尝试接近“月球空不空”的科学真相，但始终不可否认的是“月球空心说”这个跨越千年仍悬而未决的命题，势必会影响人们对研究和利用月球资源，与对深空探测策略和安全问题进行慎重考量。因此我们的古人对月球的思考或许早已超前了我们的认知与意识，而最令人称绝的是《淮南子》³中记录了一段针对月球由来的奇思妙想：“积阴之寒气，久者为水，水气之精为月”。千百年来先人们似乎都乐此不疲地去坚守着一个美丽的幻想：月球上是有水的，是有一座神奇的“广寒宫”的，是有如流淌在地球上奔腾不息的江河的！但因科研技术受限等客观问题，古人“逐月觅水”的求索之路也就此遗憾止步了。真理可能会迟到却从不会缺席，科技与生产力的提升加速了人类对月球的探索脚步：16世纪伽利略发明了天文望远镜，托马斯·哈里奥特完成了首张月球地图的绘制；20世纪50年代-70年代美苏争霸也为月球的探索做出历史性的科研贡献，1968阿波罗8号飞船首次载着3名宇航员飞向月球实现了首次载人环月飞行，于次年“阿波罗11号”升空标志着人类第一次登陆月球开启了人类探索月球的新纪元，也为解决月球是否有水这一困扰世人千年的学术难题，带来了前所未有的希望。

二. 求索不息——姗姗来迟的月球水真相

1969年7月20日“阿波罗11号”登月舱降落在月球上的静海。在全世界数亿电视观众注视下，阿姆斯特朗走出登月舱，那一刻全世界人们都在等待着他第一时间清楚准确地描述对月的所见所闻，但月球却向人类展示出了其陌生而冷漠的一面：表面覆盖着大量尘埃和岩石，坑洞、山脉和峡谷，没有一丝水的迹象。而阿波罗登月采集的月球返回样品一度成为人类认识月球最直接的证据，可无论是早期的绕月探测器、不载人的着陆探测器、阿波罗载人登月的实地考察，还是月球样品和月球陨石在实验室内外的研究，都没有找到月球有水的确凿证据甚至有人对月球表面不存在任何形式的水提出四个方面的证据来支持其观点：^[1]①月球岩石主要是岩浆冷却形成的各类火成岩没有发现与水作用有关的沉积岩②月球的主要矿物是常见的无水矿物即辉石、斜长石、橄榄石等没有发现任何原生或次生的含水矿物如粘土、云母、石膏等；此外研究发现对于一些变价元素，他们在月球矿物中往往以低价态形式存在，例如Fe元素在月球矿物中往往以二价而不是三价的形式存在。③月球上没有发现大气、水体和生物等能够证明水存在的痕迹；④月球表面在数十亿年间经历了无数小天体的频繁撞击即便曾经有水撞击过程产生的高温熔融也早已使这些水逃逸，加上月球没有大气层、引力束缚小等因素外源和内生水在月球表面很难长期保存。于是月球上不仅没有水同

³ 出自刘安《淮南子·天文训》，成书西汉，古代中国天文学研究重要著作。

时也缺乏氧气的观点曾一度被人们所接受，但科学家们却并未因此心灰意冷，这样的论断反而激发了他们对探索月球水的更大热情！随着遥感技术的进步，以及上世纪 90 年代月球探测的回潮，“月球觅水”的征途有了新的方向、收到了一条接一条的好消息。1994 年，美国科研人员通过克莱门汀探测器的雷达对月球两极进行了探测，发现疑似冰存在的证据。1998 年，美国“月球勘探者号”通过伽马射线仪和中子频谱仪，探测到月球极区富含氢元素，为水的存在提供了旁证，而 2020 年嫦娥五号成功在月球正面风暴洋北部采样并返回，标志“绕、落、回”三期探月工程完美收官。通过对其携带回来的 1731 克的月表样本进行检验，人们终于推翻了月球是一个没有大气没有水的“僵死”的天体的论断，长期的坚持与科技的赋能终于为证明月球水的存在与开展深层次研究注入了一剂强心剂、吃下了定心丸。

三. 月球水的前世今生——水冰

经过长期的科研探索科学家终于得出结论：^[2]月球上确实是有水的，而月球上的水主要有两种赋存状态：一种是“冰”水，一种是结构水。水冰即水以“冰”的形式存在于月球两极永久阴影区。结构水指的是物质中含的水，主要赋存在玻璃质或者矿物结构中，可以是分子水也可以是分子氢甚至羟基等。月球存在水冰的设想最早由美国科学家肯尼思·沃森等在 1961 年提出：由于月球极区的太阳入射角很小一些撞击坑底部可能处于太阳照射不到的永久阴影区表层和次表层温度常年维持在 40K 左右。随着空间探测技术和实验室分析技术的快速发展，雷达探测、全月球中子谱探测、红外光谱探测三大技术为揭开月球水之谜提供了关键证据。雷达探测首先给人们带来了好消息：^[3]1994 年“克莱门汀号”和 1998 年“月球勘探者号”轨道探测器发射后，通过雷达回波数据发现月壤中可能存在类似冰块或冰层反射体，而氢信号的强弱可以间接反映水含量的多少，因此检测到大量的氢也就间接证明了水分子的存在。2013 年最新估计月球永久阴影区至少含水冰 6 亿吨，这是首次获得月球极区存在水冰的证据。而针对月球“水冰”的探索，也就此按下了加速键，关于月球水冰的形成、演化、变迁与未来应用的前景，逐渐成为当下科学界破译更多月球之谜的着力点、落脚点。

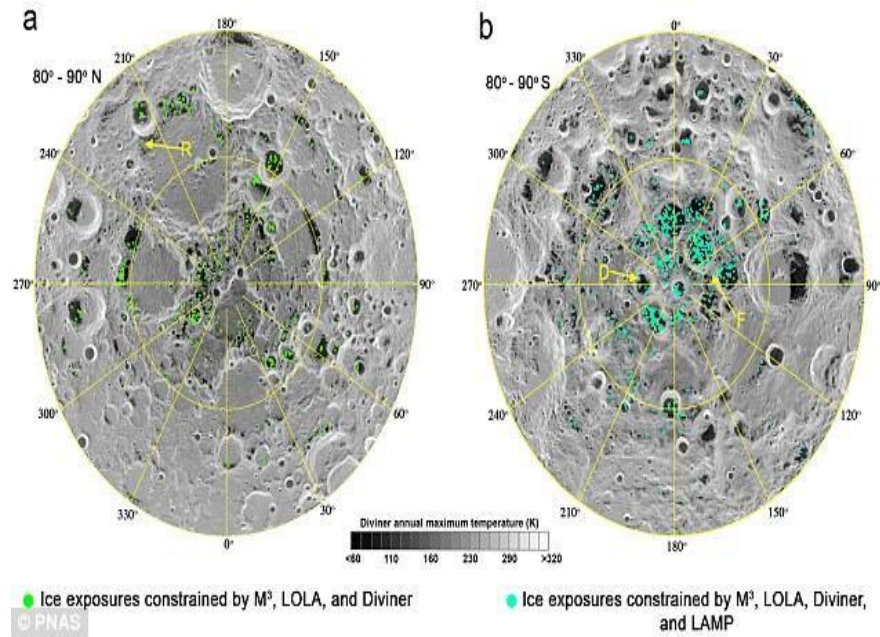


图 1 月球极区水冰资源分布图

此外红外光谱探测也从另一角度揭示了月球上有水或羟基的存在，其中羟基的可能性较大。由美国夏威夷大学、布朗大学、NASA 埃姆斯研究中心共同参与了一项研究，^[4]主要利用 NASA 月球矿物探测仪揭示了月球南极和北极表面水冰的分布状况，并在碰撞产生的尘埃中直接检测到了水的存在，科学家估计水含量在 5.9% 左右。来自印度和美国的科学家也相继证实了月球存在水冰的说法，在月球北极多个永久阴暗的陨石坑中检测到水冰的信号，并猜测冰的含量高达 $6 \times 10^9 \text{t}$ 。未来这个数字有待进一步地修整或刷新，而随着这一数字的趋于恒定，人类必将在月球水的科研勘探的征途上迈出新的革命性的一大步。月球水冰性质的特殊性与空间位置特性使其成为国际月球探测的最新热点，也必将成为未来重要的深空战略资源！

四. 月球水的前世今生——月球玻璃珠：

除了水冰这样的固态水，结构水作为月球上水的另一存在形式其地位同样不可忽视，而中国科学家在这个领域的探索已经走在了时代前列。2020 年实现人类历史上第一次月球背面软着陆的中国嫦娥四号探测器和“玉兔二号”月球车带回了珍贵的月球土壤。^[5]在这批珍贵的月球返回样品中，人们发现了丰富的玻璃物质，这些玻璃物质尺寸不一，形状各异，大的可达厘米级，小的只有几十个纳米，其中更多的是一系列不同形状和尺寸的玻璃珠。这些玻璃珠具有规则圆滑的外形，呈现出旋转形状的特征，有球状、扁球状、椭球状、哑铃状和泪滴状等。

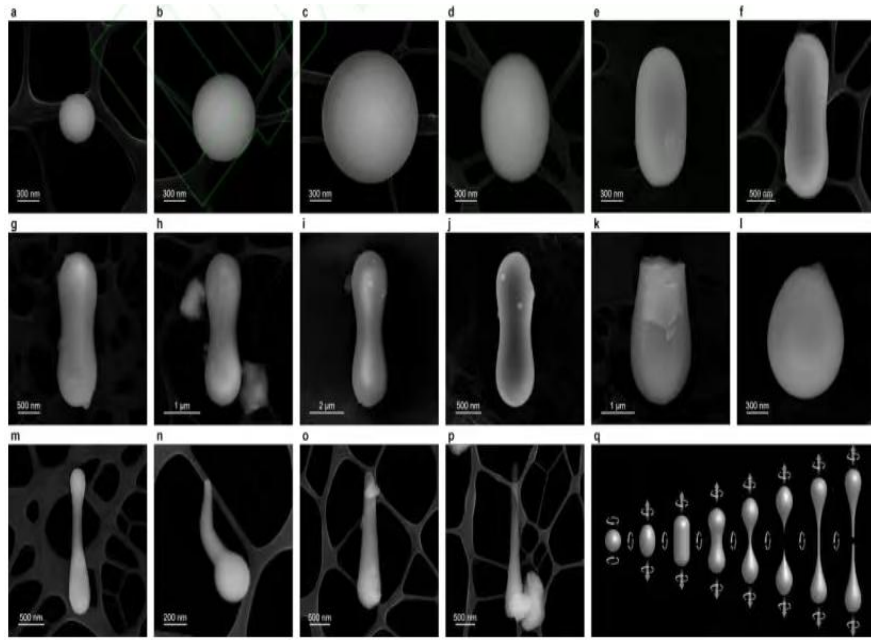


图 2 CE-5 月壤中形态各异的玻璃珠

关于这些月球玻璃珠的成因，科学界已经有了较为成熟的理论阐释：其实在我们居住的行星周围，曾有数以百亿计大小不一的天体，这些岩石天体都以极高的速度绕太阳飞行，当被地球引力捕获时，它们就会以各种角度撞击到地面，该撞击会产生极大的瞬时压力和非常高的温度。^[6]科学家认为超过 5GPa（1GPa=10000 个标准大气压）的压强就可能导致岩石的变质作用，巨大的压强和高温能熔融斜长石，从而生成玻璃状物质。地球因为有大气层的保护从而免受陨石或星体的撞击，但月球表面没有大气层，小天体与月球接触之前不会减速，当天体高速撞击月球表面，广泛分布的斜长石矿物在高温高压下瞬间熔融，同时被强大的冲击力抛向空中，在飞行的过程中冷却，玻璃珠越小或飞行的时间越长，冷却得越充分，它就越接近圆球的形状。因此这种玻璃珠本质上就是由陨石撞击发生变质作用生成的撞击岩。

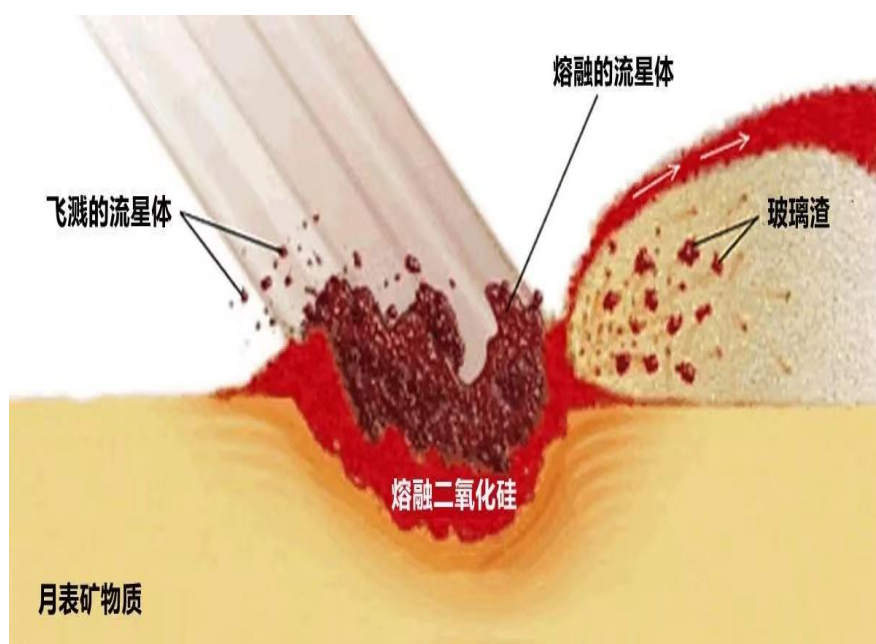


图 3 月球玻璃珠形成过程

而正是月球玻璃珠此番独特的形成过程，让其有望成为未来解开更多月球之谜的关键钥匙：^[7]月球玻璃是记录月球表面和内部演化历史信息的“照相机”，它记录着月球的演化进程：月壤中的大部分玻璃物质都是由陨石撞击产生的，这些撞击成因的玻璃物记录着月球表面从数千米到纳米的多尺度撞击事件，它们在月壤中的含量、自身成分、形态和微观结构都是反演月球表面撞击环境的重要依据。同时月球玻璃也记录着月球表面的太空风化行为：^[8]最早人们在阿波罗月壤所含的胶结物玻璃中发现了大量的纳米铁颗粒，由此提出了太阳风注入氢还原的观点，认为氢离子注入到月壤颗粒表面并伴随着晶格破坏产生表面非晶层，随后在撞击产生的高温作用下，注入的氢和铁的氧化物发生还原反应，产生单质纳米铁颗粒⁴。后续的大量研究又提出撞击导致的热沉积过程和太阳风离子溅射过程是产生纳米铁的主要过程^[9]，因此小小的玻璃珠中就可能隐藏着一段段关于太阳风的故事，关于月球资源形成的往事，更是未来开发利用月球资源的“说明书”、“数据库”。最后月球玻璃还是保存宝贵月球资源物质的永久容器，让很多稀有元素在月球上“站稳脚跟”，而含有丰富矿产资源的月表，很有可能成为未来人类深空工程中重要的补给站、中转站，为未来月球空间基地的建立提供重要的物质支撑，更是信心支撑！

五. 月球水资源的开发前景

值得庆幸的是，对我们如此重要的月球水，其在月表上的储量是可观的。^[10]专家研究认为月壤表面水含量大致为每吨月壤含水 10 到 1000 克，而撞击玻璃珠中的水含量是这个数值的两倍，拿我国第三大淡水湖太湖来比，太湖的面积约 2400 平方公里，蓄水量大约为 44 亿吨，那么月球玻璃珠中的水量就堪比 61 个太湖；我国三峡水库的蓄水量为 393 亿立方米，其水量相当于 6.87 个三峡水库；即便和我国最大的湖泊青海湖来比较，其也相当于 2.57 个青海湖。这些数据说明月球上的水量是相当巨大的，那么未来人类登陆月球真的不用为水资源短缺问题而担忧吗？并非如此，因为这计算的只是月球表面撞击玻璃珠中的含水量，与其说它是水，还不如说这是“玻璃”。因此我们所说的水其实是以组成这种撞击岩中的分子结构存在的，它是水却不是我们平时所定义的水。而要把这些所谓的月球水从玻璃珠中提取出来是十分困难的，经过不懈探索我国科学家也总结提出了月壤水冰资源“探-采-用”一体化实施方案的设计，其主要内容包括：^[11] ①利用在轨卫星探测构建水资源分布地图，对具有采集价值的地点进行标记，完成着陆器选址；②充分利用月面低温环境对该地点表层月壤的挥发分进行提取分析，进行可视化探测；③利用自身搭载的剖面钻具获取该地点剖面信息，构建水资源分布“三维地图”；④对于开采价值较高的开采位置，可利用提取装置进行水资源的收集并进行进一步利用。具体的一体化设计体系主要分为：水冰资源就位预判方案设计，挥发分科学分析方案设计，水冰资源提取方案设计，水冰资源利用方

⁴ 纳米铁颗粒：把铁原子按照纳米级别逐一叠加形成铁，在空气中易自燃、耐腐蚀。用溅射法：高能粒子撞击阴极靶材表面，并与表面铁原子交换能量，可制备纳米铁

案设计等。这一方案模型的提出为今后月球原位水冰资源利用及月球基地的建设任务提供了指导参考，其未来的可行性论证和开发优化改良将会是又一主抓的科研方向。综上，主观上我们的月球两级有“湖泊大海”，随处有“溪流江河”，但客观上看我们的月球真的比沙漠还要干旱。因此开发利用水冰与月球玻璃珠是一个循序渐进的工程，而这些宝贵的资源一旦被恰当有效的被利用，它们的作用可能不仅仅是改变月球的样貌，可能也会成为人类在浩瀚宇宙探索征程中的补给站、加油站、甚至可能成为人类地外文明中的第一个庇护所与文明延续的港湾！

六. 人类探月征程的意义与展望：

人类诞生之始，月亮就于茫茫长夜中给予人类以光明与思考，探月早已成为根植在人类骨子里的历史使命与无师自通的文化传承。回眸人类千年的探月史，在一步步揭开月球谜底的征程上，人类社会的进步与发展也按下了加速键。宇宙如宿命般将地球的命运与月球紧紧联系到了一起，而正确解读与运用“地一月一人”三者间的关系，就是在寻找与破译人类社会高质量发展的更多可能性与最优解。以地球潮汐为例，古人研究月亮更着眼于现实生产生活的客观需要：东汉学者王充经过不懈测算道出了潮汐发展的客观规律“涛之起也，随月兴衰。”从此人们知道了研究潮汐，就要在月亮上找答案。正是从汉代起，这轮皎洁的明月终于成为了中国古人洞悉潮汐奥秘的突破口——唐朝学者窦叔蒙首做《海涛志》⁵以“月与海相推，海与月相期”的先进理念，在潮一月同步原理的基础上用我国天文历算方法精确计算了潮时，成功以月球的变化较为科学地推算潮汐时刻，极大保障了航运出行的安全，促进了包括海水养殖在内的海上生产的可持续发展，真正实现了潮汐发电等现代科技运用对潮汐资源的趋利避害、多元发展。

此外研究月球不仅关乎我们的生存与发展，更与人类命运共同体的命运息息相关。当前空间探测具有高投入、高技术、高经济产出率的特点：^[12]高位置资源、微重力和高真空环境资源、丰富矿产等都是月球上可供人类开发利用的独特资源，对这些资源的开发是对地球资源的重要补充和储备，将对人类社会的可持续发展产生深远影响。例如月球上的矿产资源丰富，月表的岩石中富含硅、铝、钾、磷、铀、钍等 100 多种元素、而随着科技手段的不断提升，月岩晶格中的结构水或结晶水极有可能成为潜在的、可被规模化利用的重要资源；在月球表面厚厚的尘土里，还蕴藏着一种非常重要的能源——氦-3，有人预计如果利用核聚变发电，氦-3 是最安全清洁的能源，然而地球上的氦-3 仅有 15t 左右，尚不能支持美国半年的用电量，相比而言月球上的氦-3 最保守估计可供全世界开采 500 年。而从氦-3 的产生机理上看，其也是太阳发生热核反应不断地向没有大气层的月球抛射高能射线离子，被月壤吸附后以离子形式注入到月壤里面，这样相似的产生机理，不禁让人联想氦-3 与月球水的形成是否存在某种关

⁵ 《海涛志》唐代潮汐学家窦叔蒙所著，是史籍所记载最早的潮汐学专著

联呢？^[13]两年多以来，关于 CE-5 月壤玻璃物质的研究已经产出了多项重要成果，初步研究发现这些稳定存在了亿万年的玻璃物质记录了采样地点的陨石撞击环境、月球表面复杂太空风化过程以及月球 20 亿年来的撞击历史等，同时它们所捕捉的氦-3 可能高达 26 万吨占月球氦-3 总储量的约 20%，所存储的水高达 2700 亿吨。而针对氦-3 较为成熟的研究，是否会帮助人类加速揭开关于月球水更多的真相，这可能是未来一个值得期待的科学突破与值得关注的科研方向。同时月球上超高真空、强宇宙辐射、接近 300 度的日温差变化等稀有环境，为高科技产品与技术的攻关创造了得天独厚的检测与运营条件。诸如太空育种、太空栽培、太空养殖等科研工程是否可以通过我们的努力在未来的月球上成为可能，在得天独厚的月表环境中，让农作物的产量翻几番、让农产品的营养价值取得新的突破，通过月表特殊环境所诱发的农作物基因突变、诱导变异，从而解决作物新品种的特殊培育技术难题，实现深空探索、大气物理等领域与生物科技、医药、环境保护等众多学科门类的交叉融合、创新性突破，为中国乃至人类命运共同体开拓新的机遇与生存空间。我们青年一代应脚踏实地、志存高远，不仅要研究好地球上孕育无数农作物的江河湖水，更要放眼关注到能为地球与人类命运发展，带来无限可能的“太空之水”“月球之水”，在茫茫太空中、在与我们有着千丝万缕联系的月球上书写我们的强国之志，播种我们的爱农情怀，更圆梦我中华跨越千年、造福世界的民族夙愿，在大有可为的月表之上，创造更多“解民多艰”“圆梦今朝”的时代奇迹，敢于想象、实干创新，这就是我们青年一代应接续的“万里长征”，奔赴的大海星辰！



图 4 未来月球开发构想

月球也是当代战争的战略制高点，谁控制了太空、垄断了月球水也就主导了人类的未来，而共同追梦、互惠发展、努力构建休戚与共的人类命运共同体一直是中国人

民对国际社会的庄严承诺！因此正如习主席在祝贺探月工程嫦娥五号任务取得圆满成功致电中提到的那样，人类探索太空的步伐永无止境，我们要大力弘扬“追逐梦想、勇于探索、协同攻坚、合作共赢”的探月精神，一步一个脚印的开启星际探测新征程，为人类和平利用太空、推动构建人类命运共同体作出更大的开拓性贡献！因此我国在对包括月球在内的深空探索，对人类前途命运的砥砺前行开拓将永不止步，永远在路上！

日月经天，江河行地，星河灿烂，未来可期。几千年前，一次次举杯问月的发问曾是人类拓宽生命深度与厚度的追求；那么几千年后今天，又一轮明月悬于我们的面前，我们能否像几千年前那样，再次做出相同的选择。虽然月球上并没有形成我们先辈心中朝思暮想的江河湖海，但月球水也正以其独特的方式存在着，更以一种人类未曾发觉的方式奔腾着、澎湃着！或许未来我们真的能够将月球打造成茫茫宇宙中的一片绿洲，在其贫瘠阴沉的地表上，奔腾起前所未见的大江大河！而这些江河一路所孕育的可能是我们的后辈，也可能是崭新的、更具活力的、我们熟悉或陌生的生命与文明！我们应当传承先人的智慧，应当依旧怀揣同样坚定的信仰，山高路远同样也风光无限！相信翻越千山万水，终会于未来的月球上看到蓝天，鲜花挂满枝头……

或许对未知而求索的精神，对困难而奔赴的勇气，对文明延续而勇担的责任与使命，这些才是人类历史或放眼未来最动人心魄、最具生命张力与孕育希望的星辰大海、时代江河！

参考文献

- [1] 郑永春, 张锋, 等. 月球上的水:探测历程与新的证据. 地质学报, 2011(07): 1069-1078
- [2] 彭艳华, 孙宁, 等. 月球上水的研究现状及意义. 当代化工研究, 2020(19): 165-166
- [3] 彭艳华, 孙宁, 等. 月球上水的研究现状及意义. 当代化工研究, 2020(19): 165-166
- [4] 月球上发现了“水”_文慧.
- [5] 赵睿, 汪卫华. 月球玻璃. 物理, 2022(10): 681-690
- [6] Xiao, Z., Yan, P., et al. Translucent Glass Globules On the Moon. Science Bulletin, 2022(4): 355-358
- [7] Le Bars, M., Wiczorek, M.A., et al. An Impact-Driven Dynamo for the Early Moon. Nature, 2011(7372): 215-218
- [8] MUELLER, G., HINSCH, G. 月球细粉中的玻璃颗粒. 自然 228, 254-258 (1970)。
- [9] Krohn, K., Jaumann, R., et al. Cryogenic Flow Features On Ceres: Implications for Crater - Related Cryovolcanism. Geophysical Research Letters, 2016(23)
- [10] 郑永春, 张锋, 付晓辉等. 月球上的水:探测历程与新的证据[J].地质学报, 2011, 85(07): 1069-1078.
- [11] 周光旭, 崔中雨, 张伟伟等. 月壤水冰资源“探-采-用”一体化实施方案设计[J]. 深空探学报(中英文), 2023, 10(02): 178-189. DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20220009.
- [12] 吴辉. 较量, 在月亮之上——探月的经济价值和政治意义[J]. 中学政治教学参考, 2015, (10): 7-8..
- [13] 赵睿, 沈来权, 常超等. 月球玻璃[J]. 物理学报, 2023, 72(23): 128-145.

