

# 月球十万人定居点水资源管理与战略储备深度研究报告

## 1. 引言：从生存到文明的跨越

随着人类航天技术的飞速发展，月球基地的构想已从单纯的科学考察站演变为具备一定规模的永久性定居点。建立一个拥有10万人口的月球基地，意味着人类社会将首次在地球生物圈之外建立独立的文明分支。在这一宏伟工程中，水资源的管理处于核心地位。在地球上，水被视为一种可再生的自然资源，而在月球这一极端环境下，水不仅是维持生命的必需品，更是工业生产的原料、能源的载体以及抵御辐射的盾牌。

本报告旨在全面剖析月球十万人基地在水资源需求上的特殊性，构建详尽的年度用水量预测模型，并论证战略水储备的必要性及其合理规模。分析将基于国际空间站(ISS)的运行数据、受控生态生命保障系统(CELSS/BLSS)的实验成果、原位资源利用(ISRU)的技术参数以及类似极端环境下(如南极科考站、新加坡水务策略)的地球经验，力求提供一份详实、严谨且具有前瞻性的技术蓝图。

## 2. 第一章：地月水文环境的范式转移——需求与环境的根本差异(问题一)

要准确预测月球基地的用水量，首先必须深刻理解“用水需求”在月球语境下与地球环境的本质区别。这不仅仅是数量的增减，更是水文循环模式、物理形态及资源属性的根本性范式转移。

### 2.1 开放循环与闭环工业的对立

在地球上，水资源管理依托于巨大的自然水文循环。太阳能驱动海水蒸发，大气环流输送水汽，降水补充地表径流和地下水。人类城市实际上是一个“半开放系统”：从自然界取水，经过使用和初步处理后，绝大部分水被排放回自然界，由环境容量承担最终的净化和循环功能<sup>1</sup>。在工业化社会(如美国)，人均日用水量可达375升至5000升(含工业分摊)，其中绝大多数是“通过性”使用，而非“消耗性”使用<sup>2</sup>。

相比之下，月球表面不仅没有液态水，更处于高真空环境，任何暴露在外的液态水都会瞬间沸腾并升华逃逸至太空。因此，月球基地必须是一个严格的“闭环系统”。在这个系统中，没有“排放”的概念，只有“回收”。每一滴被排出的尿液、每一口呼出的水汽、每一次洗澡后的灰水，都必须被收集、净化并重新送回供水端。这种闭环要求使得月球基地的水处理设施更像是一个精密的化学工厂，而非传统的污水处理厂。

### 2.2 重力环境与流体力学的挑战

地球上的供水与排水系统高度依赖重力( $1g$ )。自来水厂利用重力输送，污水通过坡度管道自然汇流，沉淀池利用重力分离固液。然而，月球重力仅为地球的六分之一( $0.17g$ )。在低重力环境下，表

面张力和毛细作用对流体行为的影响显著增强，气液分离变得极其困难<sup>4</sup>。

这意味着月球基地的水循环系统不能简单照搬地球的重力沉降池设计。气液分离器必须采用离心式设计，管道设计需通过压力驱动而非重力流，这大大增加了系统的能耗和复杂性。此外，低重力环境对植物蒸腾作用、人体体液分布（体液向头部转移）以及洗浴方式（水珠漂浮难以控制）都产生了深远影响，进而改变了水的微观使用模式<sup>5</sup>。

## 2.3 水的双重属性：生命之源与能源基石

在地球上，水主要作为溶剂、冷却剂或清洗介质。而在月球基地，水的角色发生了质的飞跃：它是主要的工业原料。通过电解水( $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ )，水成为氧气的主要来源，更是火箭推进剂（液氧/液氢或液氧/甲烷）的前体<sup>7</sup>。

这种差异导致了用水性质的根本不同：

- 循环性用水：用于人类生存和农业灌溉的水。这部分水在理论上是可以无限循环的，损耗极低。
- 消耗性用水：用于生产推进剂的水。这部分水被分解后，随着火箭发射被喷射出月球引力井，属于永久性的资源净损失，必须通过不断开采月球冰来补充<sup>9</sup>。

## 2.4 污染物积累与水质敏感性

在地球开放系统中，微量污染物（如药物残留、重金属）会被巨大的自然水体稀释。但在月球封闭的循环回路中，任何无法被处理系统降解的污染物（如某些药物代谢物、化妆品残留、材料挥发的有机物）都会随着循环次数的增加而不断富集，最终达到毒性浓度<sup>11</sup>。因此，月球基地的水处理标准远高于地球自来水标准，需要配备多级膜过滤、催化氧化及深度吸附系统，以应对这种“生物放大效应”<sup>13</sup>。

维度	地球城市用水模式	月球基地用水模式	核心差异影响
循环机制	开放/半开放（依赖自然净化）	全封闭（依赖人工ECLSS）	极高的回收率要求（>98%）
驱动力	重力流为主	压力/离心力为主	基础设施能耗更高，设备更复杂
资源属性	溶剂、生活资料	原料、能源、防辐射层	工业消耗（推进剂）成为最大变量
水质风险	稀释效应	富集效应	需极其严格的痕量污染物控制

获取成本	低(抽水/净化)	极高(采矿/升华/电解)	“每一滴水都昂贵如金”
------	----------	--------------	-------------

### 3. 第二章:微观水文学——人类代谢与ECLSS系统的极限(问题二要素)

预测10万人的用水量,首先需从微观层面分析单人的代谢需求及生命保障系统的效率。基于国际空间站(ISS)及地面模拟实验(如Lunar Palace 1, BIOS-3)的数据,我们可以建立高精度的单人模型。

#### 3.1 人体代谢水的一般平衡

一个成年人在太空环境下的基本代谢水平衡如下<sup>14</sup>:

- 输入(**Input**):
  - 饮用水与饮料:约 1.6 – 2.0 升/天
  - 食物中的水份(复水食品或新鲜作物):约 0.5 – 1.0 升/天
  - 代谢水(体内氧化反应产生):约 0.35 升/天
  - 总摄入量:约 3.0 – 3.5 升/天
- 输出(**Output**):
  - 尿液:约 1.2 – 1.5 升/天
  - 潜在水损失(呼吸与排汗):约 1.5 – 1.8 升/天
  - 粪便水份:约 0.15 升/天
  - 总排出量:与摄入量基本平衡。

在ISS上,宇航员的卫生用水被严格限制(主要使用湿毛巾),人均总用水量(含卫生、制氧)约为 3.78 – 4.4 升/天<sup>5</sup>。然而,对于一个10万人的长期定居点,居民包括科学家、工程师、工人和家属,不能长期忍受仅用湿毛巾擦身的生活。

修正后的月球定居者卫生标准:

考虑到长期心理健康和生活质量,必须引入淋浴和洗衣设施。参考地球上的节水型生活标准,并结合高效的灰水回收系统:

- 淋浴(雾化喷淋/回收式): 10 – 15 升/人/天
- 洗衣(超声波/真空清洗): 5 升/人/天
- 冲厕(真空抽吸, 极少量水): 0.5 升/人/天

- 人均日生活用水总量：约 25 升/人/天。

这 25 升水并非消耗掉了，而是进入了回收循环。关键在于回收效率。

### 3.2 环控生保系统(ECLSS)的回收效率模型

目前ISS的水回收系统(WRS)集成了尿液处理组件(UPA)和水处理组件(WPA)。随着盐水处理器组件(BPA)的引入，尿液回收率已从 85% 提升至 98% 以上<sup>6</sup>。

- 冷凝水回收：来自呼吸和汗液的空气冷凝水，回收率接近 100%，处理难度较低。
- 尿液与灰水回收：通过蒸汽压缩蒸馏(VCD)和膜过滤。剩余的浓缩盐水(Brine)通过BPA进行深度脱水。目前技术极限可达 98% 的总回收率。
- 固体废物(粪便/污泥)：目前的ISS直接抛弃固体废物。但在月球基地，必须采用生物转化或超临界水氧化技术(SCWO)来回收其中的水份和养分。假设通过这些技术，粪便和固体废物的含水回收率可达 95%<sup>18</sup>。

单人日净损耗计算：

若系统总循环量为 25 升/天，综合回收效率取保守值 99% (考虑到工业级规模效应和技术进步)：

$$\text{人均日净损耗} = 25 \text{ L} \times (1 - 0.99) = 0.25 \text{ L/天}$$

加上制氧消耗(不循环)：每人每天需消耗约 1.0 升水用于电解产生 0.84 kg 氧气(部分氧气通过呼吸变成  $CO_2$  后被Sabatier反应器还原成水，但仍有损耗)。假设Sabatier反应回收了 50% 的氧元素，则制氧净水耗约为 0.5 升/天<sup>20</sup>。

综上，单人每日需补充的新水(Makeup Water)约为 0.75 升。

---

## 4. 第三章：宏观水文学——农业与工业的巨量吞吐(问题二核心)

对于10万人的基地，真正决定用水规模的并非人均饮用水，而是为了喂饱这10万人所需的农业系统，以及维持基地运转的工业活动。

### 4.1 农业用水：巨大的“植物河流”

要在月球实现自给自足，必须种植粮食。根据生物再生生命保障系统(BLSS)的研究，如“月宫一号”和 BIOS-3，植物不仅提供食物，还承担了空气再生和水净化的功能<sup>21</sup>。

- 蒸腾作用(Transpiration): 植物吸收的水分中，约 95% – 99% 会通过叶片蒸腾回到大气中<sup>23</sup>。这部分水并未消失，而是被空调系统(冷凝热交换器)收集，成为极其纯净的水源。
- 作物需水量：
  - 水培系统存水量：每平方米种植面积约需 50 – 100 升的循环营养液。
  - 日蒸腾量：高效受控环境下，每平方米作物每天蒸腾约 2 – 4 升水<sup>24</sup>。
  - 生物量锁水：新鲜蔬菜(如生菜)含水量高达 96%<sup>25</sup>，小麦等谷物在收割时也含有水分。这部分水被人类摄入后进入代谢循环，或随不可食生物量(根、茎)进入废物处理。

农业规模估算：

为满足10万人 2500 kcal/天的热量需求，若采用全素食与部分昆虫/合成蛋白结合，人均需要约 50 – 100 平方米的高效种植面积。取中间值 70 平方米/人。

$$\text{总种植面积} = 100,000 \text{ 人} \times 70 \text{ m}^2/\text{人} = 7,000,000 \text{ m}^2$$

农业系统日循环水量：

$$7,000,000 \text{ m}^2 \times 3 \text{ L/m}^2/\text{天} = 21,000,000 \text{ L/天}$$

这 2.1 万吨水每天在植物和冷凝器之间循环。

农业净损耗：

尽管回收率极高，但由于生物质合成(光合作用将水和  $CO_2$  转化为碳水化合物  $C_6H_{12}O_6$ )，水分子被化学拆解并固定在干物质中。

假设每人每天消耗 0.6 kg 干物质食物，根据光合作用方程，产生 1 kg 葡萄糖消耗 0.6 kg 水。

$$\text{化学固定耗水} = 100,000 \times 0.6 \text{ kg} \times 0.6 = 36,000 \text{ kg/天}$$

这 36 吨水/天是真正的“化学消失”，虽然人体代谢会氧化食物重新产生代谢水，但这在之前的代谢模型中已计算。在此宏观模型中，我们将其视为农业系统的输出。此外，考虑到系统泄漏、污泥

残留等, 农业循环的物理损失率设为 0.05%。

$$\text{物理损失} = 21,000,000 \text{ L} \times 0.0005 = 10,500 \text{ L/天}$$

农业系统日需补充水: 约 10.5 吨(物理损失)。(化学固定部分在人体代谢中释放回系统, 故不重复计入净损耗)。

## 4.2 工业与推进剂生产: 贪婪的巨兽

这是与地球最根本的不同点。在月球, 水是火箭燃料。

- 推进剂需求模型: 假设基地每年支持 100 次星舰(Starship)级别的发射任务(用于人员轮换、货物出口、科学探测)。每次任务用于月面着陆和起飞返回月球轨道(NRHO)或地球, 约需消耗 1000 – 1200 吨推进剂<sup>26</sup>。Starship 使用液氧甲烷(Methalox), 质量比(氧化剂: 燃料)约为 3.6 : 1<sup>10</sup>。
  - 总推进剂需求:  $1200 \text{ 吨} \times 100 \text{ 次} = 120,000 \text{ 吨/年}$ 。
  - 液氧(LOX)需求:  $120,000 \times (3.6/4.6) \approx 93,913 \text{ 吨}$ 。
  - 液甲烷(LCH4)需求:  $120,000 \times (1/4.6) \approx 26,087 \text{ 吨}$ 。
- 水消耗计算:
  - 氧气: 电解水( $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ ), 质量比为 8 : 9(氧占水质量的 88.9%)。

$$\text{制氧需水量} = 93,913 / 0.889 \approx 105,639 \text{ 吨}$$

电解产生的副产物氢气(约 11,726 吨)可用于制造甲烷。

- 甲烷: Sabatier 反应( $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$ )。制造 16g 甲烷需要 8g 氢气, 同时生成 36g 水(可回收)。

净反应只需要碳源和氢气。上述电解产生的氢气(1.17 万吨)足以支持甲烷生产所需的氢气量(制造 2.6 万吨甲烷仅需约 0.65 万吨氢气)。

注: 甲烷中的碳需从月球风化层提取(含量极低, 约 82ppm)或从地球进口/回收废物, 这里假设碳源解决, 仅关注水。

结论: 推进剂生产每年直接消耗约 10.6 万吨水。这部分水被电解、液化、燃烧, 最终喷射到太空, 是不可回收的净损失。

## 4.3 基础设施泄漏与损耗

- 大气泄漏: ISS 的数据显示, 由于微陨石撞击、密封圈老化及结构应力, 存在持续的空气泄

漏。ISS泄漏率约为 0.27 kg/天(按空气计)<sup>29</sup>。10万人基地的加压体积将是ISS的数千倍。假设人均居住体积 100 m<sup>3</sup>, 总加压体积 10,000,000 m<sup>3</sup> (ISS约为 900 m<sup>3</sup>)。按体积线性外推, 泄漏率可能高达 3,000 kg空气/天。空气中含水汽(20°C, 50%湿度时约为 1% 质量比)。

$$\text{水汽泄漏} = 3,000 \text{ kg} \times 0.01 = 30 \text{ kg/天} \approx 11 \text{ 吨/年}$$

这在工业消耗面前几乎可以忽略不计。

- 建筑用水:月球建筑将主要使用硫磺混凝土(Sulfur Concrete)或烧结风化层,这些工艺不需要水<sup>31</sup>。这是一个显著的节水点,与地球建筑业大量耗水形成对比。

## 5. 第四章:年度总用水量预测(问题二结论)

基于上述分析,我们可以构建月球10万人基地的年度用水模型。

用水类别	日均循环量 (吨)	回收效率	日均净消耗 (吨)	年均净消耗 (吨)	占比
居民生活 (含卫生)	2,500	99%	25	9,125	6.2%
农业系统 (蒸腾)	21,000	99.95%	10.5	3,832	2.6%
工业-推进 剂生产	N/A	0% (消耗 性)	290	105,850	72.1%
工业-其他 损耗	500	95%	25	9,125	6.2%
系统泄漏与 意外	N/A	0%	0.1	36	<
总计	~24,000	-	~350.6	~127,968	100%
加上安全裕			~403	~147,163	

度 (15%)					
---------	--	--	--	--	--

预测结果：

月球10万人基地的年均需水量约为 **14.7** 万吨。

其中，超过 **70%** 的水消耗用于生产火箭推进剂，仅有不到 10% 是由于人类生活和农业循环的效率损耗导致的。这再次印证了月球基地作为“太空港”的工业属性远重于其居住属性。

---

## 6. 第五章：战略水储备的必要性分析（问题三）

问题三：是否需要额外水资源储存以备万一？答案是绝对肯定的。

在地球，如果城市供水中断，我们可以通过卡车运水或抽取地下应急水源。但在月球，水资源的获取 (ISRU) 是一项高风险的采矿作业，且基地与地球之间存在至少3天的物流延迟（实际上受发射窗口限制，救援可能需要数周甚至数月）。

### 6.1 关键失效模式 (Failure Modes)

1. **ISRU 供应链断裂**: 月球采水依赖于在永久阴影区 (PSR) 作业的机器人。极低温 (**40 K**)、磨蚀性极强的月尘以及复杂的机械故障可能导致采矿作业完全停摆。根据NASA的技术评估，月球采矿设备的平均无故障时间 (MTBF) 在初期可能较短<sup>34</sup>。如果采矿暂停，推进剂生产可以停止，但生命维持不能停止。
2. **ECLSS 生物/化学污染**: 在高度闭环系统中，最大的噩梦是循环水体被污染。例如，水培系统中爆发根腐病真菌，或者尿液处理系统中积累了未知的有毒代谢物<sup>35</sup>。此时，整个循环系统的水可能需要被隔离净化，甚至直接废弃。如果没有储备水，这意味着全员脱水死亡。
3. **能源黑天鹅事件**: 水的提取和循环是能源密集型的。若核反应堆停堆或太阳能阵列在月夜期间受损，电力短缺将迫使基地关闭高能耗的电解和采矿设备，仅维持最低限度的生命保障循环。
4. **火灾消防需求**: 高压富氧环境下的火灾是致命的。参考南极麦克默多站，其75%的储水是作为消防储备<sup>36</sup>。在月球，水不仅灭火，还能在升华过程中带走大量热量，防止舱壁因高温破裂。

### 6.2 心理与社会稳定性

对于10万人的社会，水储备不仅是物理需求，更是心理安全基石。根据马斯洛需求层次，当生理安全受到威胁时，社会秩序将迅速崩溃。充足的储备能防止因设备小故障引发的群体性恐慌 (Run on the Water Bank)。

---

## 7. 第六章: 储备规模的量化与建议(问题四)

问题四: 额外储存的水资源为一年需求的多少比较合适?

确定储备量不能简单地按“年需求百分比”一刀切, 而应基于“分级保障原则”进行计算。我们需要区分生存底线、农业维持线和工业缓冲线。

### 7.1 第一级: 生存绝对底线 (Survival Reserve)

假设发生最极端灾难: ISRU完全停止, 且循环系统效率下降或部分污染, 无法依赖农业回收水。

- 人均最低生存用水: 4 升/天(仅饮用和最低限度卫生, 参考ISS应急标准)。
- 保障周期: 建议设定为 90 天。这足以覆盖大多数地球救援任务的筹备与飞行周期, 或等待下一个月球昼夜循环进行设备修复。
- 计算:

$$100,000 \text{ 人} \times 0.004 \text{ 吨/人/天} \times 90 \text{ 天} = 36,000 \text{ 吨}$$

### 7.2 第二级: 农业重启与生态维持 (Biosphere Reserve)

如果农业系统因缺水而崩溃, 重建整个生物圈(从种子发芽到收成)至少需要3-4个月, 期间将引发饥荒。因此, 储备必须包含维持植物最低存活的水量, 或者在系统被污染后用于“重启”系统的种子水。

- 植物维持: 设定为正常农业循环量的 20% (仅维持根系存活, 停止生长)。
- 保障周期: 30天。
- 计算: 农业系统保有量约 2.1 万吨(循环中)。建议储备等同于 100% 的系统充填量, 即 21,000 吨, 作为独立的“种子水库”, 平时不参与循环, 仅在污染时启用。

### 7.3 第三级: 工业与消防缓冲 (Operational Buffer)

- 消防储备: 参考麦克默多站, 但考虑到月球水分离困难, 建议每个居住区独立储备。全基地总量建议为 5,000 吨。
- 推进剂缓冲: 为了保证发射窗口不被采矿波动影响, 应储备至少 5 次全负荷发射 的水量。

$$5 \times 1,056 \text{ 吨} \approx 5,280 \text{ 吨}$$

### 7.4 总储备量推荐

将上述三级叠加:

1. 生存储备: 36,000 吨

2. 农业重启: 21,000 吨
  3. 工业消防: 10,280 吨
- 建议总储备量: 约 67,280 吨。

## 7.5 与年度需求的比例关系

回顾第五章预测的年度净消耗量约为 14.7 万吨。

$$\text{储备比例} = \frac{67,280}{147,000} \approx 45.7\%$$

结论与建议:

建议额外储存的水资源量应为年消耗量的 40% 至 50%。

这一比例看似很高, 但必须考虑到月球基地的高风险性质。这 6.7 万吨水不仅是生命的保险, 也是巨大的热容库(Heat Sink)和辐射屏蔽层。建议将储水罐设计在居住舱的外壁夹层或地下熔岩管中, 利用这部分“死水”来屏蔽宇宙射线, 实现工程价值的最大化。

## 8. 结语

在月球建立并维持一个10万人的社会, 在水资源管理上是对人类智慧的终极挑战。我们必须从地球的“开采-排放”模式彻底转向“回收-闭环”模式。

虽然高效的ECLSS系统能将生活用水的损耗降至极低, 但作为航天港的月球基地, 其水资源消耗将被推进剂生产所主导, 年消耗量预计可达15万吨级。面对严酷的太空环境, 建立约占年需求量45%(约6.7万吨)的战略水储备, 是确保这一人类地外文明分支安全、稳定与可持续发展的绝对底线。水, 在月球上, 既是血液, 也是燃料, 更是护盾。

## 引用的著作

1. When It Comes to Water, You Have to Think Global - NASA, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://www.nasa.gov/missions/aqua/when-it-comes-to-water-you-have-to-think-global/>
2. Water on the Moon - so how big a colony can it support? : r/space - Reddit, 访问时间为 一月 31, 2026,  
[https://www.reddit.com/r/space/comments/a4c72/water\\_on\\_the\\_moon\\_so\\_how\\_big\\_a\\_colony\\_can\\_it/](https://www.reddit.com/r/space/comments/a4c72/water_on_the_moon_so_how_big_a_colony_can_it/)
3. How Much Water Would a Self-Sustaining Moonbase Need ..., 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://www.universetoday.com/articles/how-much-water-would-a-self-sustaining-moonbase-need>

4. NASA Achieves Water Recovery Milestone on International Space Station, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://www.nasa.gov/missions/station/iss-research/nasa-achieves-water-recovery-milestone-on-international-space-station/>
5. How much water can an astronaut on ISS use per day? | ILLUMINATION - Medium, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://medium.com/illumination/space-day-saturday-ae1cda0625b5>
6. Status of ISS Water Management and Recovery, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230006217/downloads/ICES%202023-097%20Status%20of%20ISS%20Water%20Management%20and%20Recovery.pdf>
7. In-Situ Resource Utilization Modeling of a Lunar Water Processing ..., 访问时间为 一月 31, 2026,  
[https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20240005576/downloads/ICES\\_2024\\_ISRU\\_final.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20240005576/downloads/ICES_2024_ISRU_final.pdf)
8. Should Oxygen, Hydrogen, and Water on the Moon Be Provided by Earth Supply, Life Support Recycling, or Regolith Mining?, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210019592/downloads/ICES-2021-147.pdf>
9. Emissions calculation for Starship: - each starship burns 4600 tons of methalox ... | Hacker News, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://news.ycombinator.com/item?id=24062774>
10. What is the LOX mass of a Starship and a Superheavy?, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://space.stackexchange.com/questions/49163/what-is-the-lox-mass-of-a-starship-and-a-superheavy>
11. Water recycle system in an artificial closed ecosystem - Lunar Palace 1: Treatment performance and microbial evolution - PubMed, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34728198/>
12. Status of ISS Water Management and Recovery, 访问时间为 一月 31, 2026,  
[https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20240005472/downloads/ICES%202024-317%20Status%20of%20ISS%20Water\\_Final.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20240005472/downloads/ICES%202024-317%20Status%20of%20ISS%20Water_Final.pdf)
13. Closing the Water Loop for Exploration: 2021-2022 Status of the Brine Processor Assembly, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://ttu-ir.tdl.org/bitstreams/3767aa5d-c502-450d-8e4e-b9607533c7e7/download>
14. building an economical and sustainable lunar infrastructure to enable human lunar missions - NASA Technical Reports Server, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190032258/downloads/20190032258.pdf>
15. International Space Station Water Balance Operations - NASA Technical Reports Server, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20110012703/downloads/20110012703.pdf>
16. Environmental Control and Life Support System (ECLSS) Fact Sheet - NASA, 访问时间为 一月 31, 2026,  
[https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2020/10/q-281237\\_eclss\\_0.pdf?emrc=67ffdc](https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2020/10/q-281237_eclss_0.pdf?emrc=67ffdc)
17. Water recycling is paramount for space stations and long-duration missions – an environmental engineer explains how the ISS does it | FIU News - Florida

- International University, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://news.fiu.edu/2025/water-recycling-is-paramount-for-space-stations-and-long-duration-missions-an-environmental-engineer-explains-how-the-iss-does-it>
18. Past, Present, and Future of Closed Human Life Support Ecosystems - A Review, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://ttu-ir.tdl.org/bitstreams/f9acc843-3570-4dc1-b00b-9e7caa05a2da/download>
19. Recent Developments in Microbial Electrolysis Cell-Based Biohydrogen Production Utilizing Wastewater as a Feedstock - MDPI, 访问时间为 一月 31, 2026 , <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/16/8796>
20. Estimating the mass of a Martian Propellant Plant for Starship - a detailed analysis - Reddit, 访问时间为 一月 31, 2026,  
[https://www.reddit.com/r/spacex/comments/ap3bz1/estimating\\_the\\_mass\\_of\\_a\\_martian\\_propellant\\_plant/](https://www.reddit.com/r/spacex/comments/ap3bz1/estimating_the_mass_of_a_martian_propellant_plant/)
21. Literature Review - SAM, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://samb2.space/research/literature-review/>
22. Human Exploration Beyond Low Earth Orbit: Staged Evolution of BLiSS Technologies, 访问时间为 一月 31, 2026,  
[https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20250004370/downloads/ICES-2025-460\\_submit.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20250004370/downloads/ICES-2025-460_submit.pdf)
23. Irrigation Water Loss and Recovery in Utah | USU, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://extension.usu.edu/crops/research/irrigation-water-loss-and-recovery>
24. How Much Water Does a Hydroponic System Use? - Dosatron, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://www.dosatron.com/en-nam/nutrient-delivery-system/how-much-water-does-a-hydroponic-system-use/>
25. NFT lettuce water consumption : r/Hydroponics - Reddit, 访问时间为 一月 31, 2026  
,  
[https://www.reddit.com/r/Hydroponics/comments/rrl9op/nft\\_lettuce\\_water\\_consumption/](https://www.reddit.com/r/Hydroponics/comments/rrl9op/nft_lettuce_water_consumption/)
26. SpaceX Starship/Super Heavy Engineering General Thread 4, 访问时间为 一月 31, 2026, <https://forum.nasaspacesflight.com/index.php?topic=49622.3680>
27. Once in orbit, how many tons of fuel does the Starship HLS need to reach lunar orbit? How much fuel is needed to land on the moon and take off from it to reach lunar orbit again? : r/SpaceXLounge - Reddit, 访问时间为 一月 31, 2026,  
[https://www.reddit.com/r/SpaceXLounge/comments/183v0te/once\\_in\\_orbit\\_how\\_many\\_tons\\_of\\_fuel\\_does\\_the/](https://www.reddit.com/r/SpaceXLounge/comments/183v0te/once_in_orbit_how_many_tons_of_fuel_does_the/)
28. SpaceX Raptor - Wikipedia, 访问时间为 一月 31, 2026,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX\\_Raptor](https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX_Raptor)
29. Assessment of the physical and psychological aspects of the current life support system on the International Space Station for sustainable space exploration - Frontiers, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://www.frontiersin.org/journals/space-technologies/articles/10.3389/frspt.2024.1461389/full>

30. What is the leak up rate on the ISS? : r/askscience - Reddit, 访问时间为 一月 31, 2026,  
[https://www.reddit.com/r/askscience/comments/zefxn/what\\_is\\_the\\_leak\\_up\\_rate\\_on\\_the\\_iss/](https://www.reddit.com/r/askscience/comments/zefxn/what_is_the_leak_up_rate_on_the_iss/)
31. PRODUCTION OF LUNAR CONCRETE USING MOLTEN SULFUR, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19980001900/downloads/19980001900.pdf>
32. Building a New World: Lunar Concrete Could Transform Moon Colonization by 2034, 访问时间为 一月 31, 2026,  
[https://www.architectmagazine.com/design/building-a-new-world-lunar-concrete-could-transform-moon-colonization-by-2034\\_o](https://www.architectmagazine.com/design/building-a-new-world-lunar-concrete-could-transform-moon-colonization-by-2034_o)
33. Is Waterless Concrete Part of the Construction Industry's Future? | GPRS, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://www.gp-radar.com/article/is-waterless-concrete-part-of-the-construction-industrys-future>
34. In-Situ Resource Utilization Gap Assessment Report - the International Space Exploration Coordination Group, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://www.globalspaceexploration.org/wordpress/wp-content/uploads/2021/04/ISEC-G-ISRU-Technology-Gap-Assessment-Report-Apr-2021.pdf>
35. OCHMO-TB-002 Environmental Control & Life Support System (ECLSS): Human-Centered Approach - NASA, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/07/eclss-technical-brief-ochmo.pdf>
36. Running water in the Antarctic | Alfa Laval, 访问时间为 一月 31, 2026,  
<https://www.alfalaval.com/media/stories/fresh-water/running-water-in-the-antarctic/>