

十万人口级月球殖民基地水资源代谢与循环 系数深度整合研究报告(非农业模型)

1. 执行摘要

本报告旨在评估一个规划人口为 100,000 人的月球永备殖民地在不建立农业生产系统(食物完全依赖外部补给)前提下的水资源通量。基于人类代谢生理学、ISRU工业需求及深空生命保障系统(ECLSS)的技术演进, 本研究构建了一个全物理化学循环模型。

在“开放循环”基准下, 维持该规模基地及其附属科研设施运行的年均净用水量为 3×10^6 吨。通过引入卤水处理组件(BPA)与超临界水氧化(SCWO)等前沿回收技术, 研究预测基地核心生命保障系统的内循环率可达 99.2%, 而计入推进剂喷射等刚性损耗后的全基地综合循环系数(资源留存率)约为 95.1%。

2. 基地年均净用水量分析(开环模式: 不考虑循环)

在完全不考虑回收的开放模式下, 水被视为维持社会运转和工业生产的消耗性工质。基于 300 万吨/年的总预算, 各模块消耗细节如下¹:

2.1 生活维持与科研基地用水(约 285.4 万吨/年)

这是基地的核心水汇, 包含了十万定居者的生存、卫生及科研环境维护。

- 生理与代谢消耗(人均 3.5 L/日): 用于抵消月球低压大气导致的呼吸失水并维持流体平衡。
- 卫生清洁(人均 60.0 L/日): 参考远洋潜艇标准, 提供受限流量的淋浴及洗漱服务¹。
- 内务与生活支持(人均 18.0 L/日): 包含衣物洗涤、科研设备灭菌、食品复水及必要的月尘控制喷淋。
- 小计: 十万人日均消耗量约为 7,820 吨。

2.2 工业、建设与系统刚性流失(约 14.6 万吨/年)

除生物需求外, 基地作为深空物流节点和工程实体, 存在无法避免的物理/化学损耗。

- 推进剂电解消耗(约 6.0 万吨/年): 为维持地月、地火频繁物流, 需电解水生产液氢(LH_2) 和液氧(LOX)。反应式为 $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ ¹。
- 建筑材料固结(约 7.0 万吨/年): 月球混凝土(Lunarcrete)在固化过程中会化学锁死部分水分。
- 热控 flash 与泄漏(约 1.6 万吨/年): 包含峰值负荷下的水闪蒸(Flash Evaporation)散热及结构性大气渗透。

3. 考虑循环后的循环系数预测

在引入成熟的物理化学闭环系统后，水资源的利用逻辑从“单向消耗”转变为“多级循环”²。

3.1 核心生命保障系统(LSS)循环系数: 0.988 - 0.992

这是指从定居者的代谢产物及卫生废水中提取饮用水的效率。

- 尿液与卤水回收(BPA): 引入卤水处理器组件(BPA)，利用特种膜技术和热风干燥提取浓缩液中的残水，可将尿液回收率从 94% 提升至 98%³。
- 黑水全回收(SCWO): 针对粪便和有机固废，采用**超临界水氧化(SCWO)**技术。在 $374^{\circ}C$ 和 22.1 MPa 以上的临界点，有机物被彻底氧化，水分回收率接近 100%⁴。
- 冷凝水捕获: 空气调节系统(HVAC)通过冷凝热交换器回收 100% 的呼吸和皮肤蒸发水分⁵。

3.2 全基地全局循环系数(Settlement Retention Coefficient): ~95.1%

虽然 LSS 内部可以做到极高闭环，但由于系统边界外的“单向流失”，全基地的广义循环系数(即资源留存率)会下降。

- 流失项构成：
 1. 化学湮灭：电解制推进剂后的氢氧喷射流，无法回收。
 2. 物理流失：随空气泄漏外逸至月球真空的水分子。
 3. 结构锁定：建筑材料内的静态束缚水。
- 计算模型：

$$\text{综合循环系数} = \frac{\text{系统总循环通量} - \text{刚性流失项}}{\text{系统总循环通量}}$$

在 300 万吨的年通量下，每年约有 14.75 万吨 水为不可回收的“净补充量”。

4. 十万人基地(非农业)水通量汇总平衡表

消耗模块	初始开环需水量(吨/年)	回收/再生技术	预计循环系数	年残余损耗量(吨/年)
生活与科研用水	2,854,000	SCWO + BPA + RO	0.992	22,800
推进剂生产	60,000	电解燃料喷射	0	60,000

(ISRU)				
建筑与屏蔽补充	70,000	结构锁定/维护	0.15	59,500
物理泄漏与闪蒸	16,000	真空损耗	0	16,000
总计	3,000,000	物理化学全闭环	综合 ~0.951	~148,300

3

5. 工程评估与结论

5.1 预测结论

1. 水资源留存潜力：对于一个技术成熟、拥有大规模 SCWO 反应集群的十万人月球基地，其全基地层面的水资源循环留存系数可稳定在 **0.95** 左右。
2. 年度补给需求：虽然年通量高达 300 万吨，但在高效循环支撑下，基地每年对月球极地水冰的新增开采需求仅为 **15 万吨** 级。
3. 技术脆弱性风险：缺乏农业系统的“生物缓冲”，系统对 SCWO 等机械设备的可靠性具有绝对依赖。必须建立能够覆盖 **6 个月** 生存维持线(约 101 万吨)的战略水储备¹。

5.2 关键建议

- 部署 **SCWO** 工业集群：这是实现黑水与固废全回收、压榨每一滴含水的核心枢纽。
- 热控系统迭代：应全面采用巨型流体辐射器替代闪蒸散热，以消除由于散热带来的 1.44 万吨 /年净损耗¹。
- 泄漏感知网络：针对千万立方米级的加压壳体部署智能传感器，守住大气泄漏这一“静默失水”点。

引用的著作

1. 月球基地纯耗水报告.pdf
2. NASA just recycled 98% of all astronaut pee and sweat on the ISS (engineers are thrilled), 访问时间为 二月 1, 2026,
<https://www.space.com/astronaut-peee-iss-water-recycling-98-percent-milestone>
3. NASA Achieves Water Recovery Milestone on International Space Station, 访问时间为 二月 1, 2026,

<https://www.nasa.gov/missions/station/iss-research/nasa-achieves-water-recovery-milestone-on-international-space-station/>

4. Supercritical Water Oxidation (SCWO) Trade Study and 2021 Final Report, 访问时间为 二月 1, 2026,
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210022923/downloads/2021%20SCWO%20Report.docx.pdf>
5. Real-time rapid leakage estimation for deep space habitats using exponentially-weighted adaptively-refined search, 访问时间为 二月 1, 2026,
https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230002995/downloads/Rautela_as-accepted-version.pdf?attachment=true
6. 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 二月 1, 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>
7. Real-time rapid leakage estimation for deep space habitats using exponentially-weighted adaptively-refined search - ResearchGate, 访问时间为 二月 1, 2026,
https://www.researchgate.net/publication/366158659_Real-time_rapid_leakage_estimation_for_deep_space_habitats_using_exponentially-weighted_adaptively-refined_search