

开放循环模式下月球十万人定居点水资源需求与战略储备深度可行性研究报告

1. 执行摘要

本报告旨在针对假设的十万人人口级月球定居点，在采用“开环”用水模式（即水资源单次使用后不再回收循环，直接排放或废弃）的前提下，进行全面的水资源消耗基准、农业灌溉需求、工业及屏蔽耗水以及战略储备体系的深度调研与建模。

分析表明，在摒弃了国际空间站（ISS）及未来月球门户（Gateway）所依赖的闭环再生生命保障系统（ECLSS）后，月球基地的水资源管理逻辑将发生根本性转变：从“循环维持”转变为“资源开采与通量管理”。在开放循环模式下，水不再是珍稀的循环介质，而是一种高通量的工业消耗品，其消耗量级将比闭环模式高出数个数量级。

本研究通过对人类代谢生理学、受控环境农业（CEA）蒸腾动力学、原位资源利用（ISRU）工业化学以及月球极地环境物理学的综合分析，构建了以“纯消耗”为核心的水资源代谢模型。报告预测，维持一座10万人的开环月球城市，其年度总水需求量将达到数千万吨级，这对月球极地水冰资源的开采能力、能源供给及基础设施建设提出了前所未有的挑战。

2. 引言：开放循环模式的定义与环境约束

2.1 开放循环（Open-Loop）的工程定义

在航天生命保障系统的传统语境中，闭环系统（Closed-Loop）通过冷凝回收、尿液蒸馏和废水处理来实现90%以上的水资源再生¹。然而，本报告所探讨的“开放循环”模式假设了一种极端丰富的资源供给场景或特定的工程权衡策略，即认为月球原位水冰资源的开采成本低于复杂回收系统的研发、部署与维护成本。

在此模式下：

- 生活用水：使用后作为灰水（Greywater）或黑水（Blackwater）直接排放至月球表面或深埋，不进行净化回用。
- 农业用水：植物蒸腾产生的水蒸气不被冷凝器捕获回用，而是随通风系统排放或视为大气损耗。
- 工业用水：冷却水通过闪蒸直接排入真空进行散热，化学反应生成水不予回收。

2.2 月球定居点的人口规模与环境背景

10万人的定居点规模远超科学前哨站，已达到地球中型城市的体量。这一规模意味着基地必须具备完整的社会功能，包括居住、农业生产、工业制造及复杂的物流体系³。基地选址假设位于月球南极或北极的永久阴影区（PSR）边缘，以便同时获取光照能源与水冰资源⁵。

然而，开放循环模式面临着月球真空环境的严酷物理约束。任何液态水的排放都会真空中瞬间

沸腾(闪蒸)并最终升华或冻结,这对基地周边的地质环境、热环境及光学观测环境将产生深远的“人工污染”影响⁷。

3. 人类生存系统的水资源纯消耗模型

在开放循环模式下,水资源的消耗不再受限于再生系统的处理能力,而是更多地取决于维持人类生理健康、心理舒适及社会运转的“最优”需求而非“生存”需求。

3.1 生理代谢与饮用需求:从生存线到健康线

3.1.1 基础代谢水摄入

根据NASA在阿波罗计划及航天飞机任务中的数据,航天员在微重力环境下的基础饮水量(含食品复水)约为每日1.6至2.8升⁸。然而,这一数据是在极度受限的任务环境下测得的。在月球重力(1/6 g)环境下长期生活,体液转移现象虽较微重力环境有所缓解,但心血管系统的适应性调整仍会影响体液平衡调节机制⁹。

为了维持长期定居者的肾脏健康、防止泌尿系统结石(航天员高发病症)并抵消干燥环境下的呼吸失水,单人每日的直接饮用水及食物内含水摄入量需上调。参考地球正常重力环境下的健康推荐值及空间站长期驻留的代谢数据,建议设定为 3.5 升/人/日¹⁰。

3.1.2 呼吸与皮肤蒸发损耗

在标准大气压或略低压(如70kPa)的居住舱大气中,人体通过呼吸和皮肤无感蒸发流失的水分约为每日0.8至1.2升。在闭环系统中,这部分水分被冷凝热交换器(CHX)回收²;而在开环模式下,这部分水分需通过持续的大气补给来维持湿度,属于“不可见”的纯消耗。

3.2 卫生与清洁用水:生活质量的决定性因素

卫生用水是开环模式与闭环模式差异最大的领域。在ISS上,受限于水回收能力,航天员主要依赖湿巾擦拭,日均卫生用水仅约0.5升¹¹。对于10万人的永久定居点,这种清洁方式在心理学和社会学上是不可持续的。

3.2.1 淋浴与身体清洁

参考美国南极麦克默多站(McMurdo Station)的数据,该站拥有反渗透海水淡化系统,在非限制供水期间,人均日用水量可达60加仑(约227升)¹²。然而,考虑到月球水资源的开采成本远高于南极海水淡化,完全对标地球发达国家的奢侈用水(350升/日¹¹)并不现实。

更合理的参考标准是美国海军潜艇或远洋舰船的用水标准。在这些受限但保障基本舒适的环境中,人均日淡水消耗量设计标准为30至40加仑(约113至151升),其中包含淋浴、洗漱及洗衣¹³。若设定每人每日进行一次限制流量的淋浴(约30-50升)及基础洗漱,卫生用水的纯消耗量应设定为 60 升/人/日。

3.2.2 衣物洗涤与清洁

在短期太空任务中，衣物通常是用完即弃¹¹。但对于10万人口的社会，这种模式会产生无法处理的固体废弃物灾难。因此，必须引入洗衣设施。参考高效洗衣机的耗水量，每公斤衣物耗水约10-15升。假设人均每日需洗涤衣物0.5公斤，则需耗水约 **8 升/人/日**。

3.2.3 冲厕用水

在开环模式下，冲厕水是巨大的消耗源。若采用传统的真空抽吸系统(类似飞机或潜艇厕所)，每次冲洗仅需0.2-0.5升水。假设每人每日使用6次，消耗量约为 **3 升/人/日**。若采用地球常规重力冲水马桶，该数字将飙升至30-50升，这在工程上极不经济。因此，即使在开环模式下，真空马桶仍是必然选择。

3.3 食品制备与内务消耗

3.3.1 食品加工与烹饪

对于非脱水食品的烹饪(如大米、意面、汤类)以及餐具清洗，人均日消耗量约为 **15 升**。这一数据参考了隔离社区及野战厨房的用水标准¹⁴。

3.3.2 医疗与公共卫生

10万人的社区必须配备医院、实验室及公共清洁设施。医疗设备灭菌、手术室清洁及公共区域的防尘喷淋(月尘控制是关键¹⁵)将产生额外的人均分摊消耗。估算约为 **10 升/人/日**。

3.4 人均生活用水纯消耗汇总表

消耗类别	细分项	消耗量 (L/人/日)	备注
生理摄入	饮用与食物含水	3.5	维持健康代谢基准
个人卫生	淋浴/洗脸/刷牙	60.0	参考潜艇标准 ¹³
	冲厕 (真空系统)	3.0	灰/黑水直接排放
生活支持	衣物洗涤	8.0	必需的长期生存活动
	烹饪与餐具清洁	15.0	¹⁴
公共分摊	医疗/保洁/控尘	10.0	月尘治理需求

环境维持	湿度维持(呼吸/排汗)	1.5	补充大气流失
总计		101.0	约 0.1 吨/人/日

这意味着，仅维持10万人的基本生活，每日需消耗约 **10,100** 吨 水。

4. 农业系统: 蒸腾作用下的巨量水消耗

为了实现10万人的食物自给，基地必须建立大规模的受控环境农业(CEA)系统。在闭环生命保障系统(BLSS)中，植物是水净化的核心组件，蒸腾出的水分被视为宝贵的清洁水源¹⁶。然而，在开环模式下，植物为了进行光合作用而不可避免的蒸腾失水，将成为系统最大的水资源“黑洞”。

4.1 作物种植面积与卡路里需求

4.1.1 耕地面积需求模型

根据NASA及生物圈2号的研究，在高效水培及人工光照条件下，提供一个成年人每日所需全部热量(约2500-3000 kcal)及氧气，约需 **20 至 50** 平方米的种植面积¹⁸。考虑到作物轮作、缓冲余量及多样化饮食需求(不仅仅是小麦，还需要蔬菜、豆类等)，我们设定人均所需耕地面积为 **40** 平方米。

- 总耕地面积: $100,000 \text{人} \times 40\text{m}^2/\text{人} = 4,000,000\text{m}^2$ (即400公顷)。

4.2 核心作物的蒸腾动力学分析

植物的蒸腾速率受环境因素(光照强度PPFD、温度、相对湿度、CO2浓度)及作物生理特性(气孔导度、叶面积指数LAI)的共同影响。在月球基地为了追求高产，通常会维持高光照和适宜温度，这必然导致高蒸腾率。

4.2.1 小麦 (Wheat)

小麦是主要的主食来源。NASA生物质生产舱(BPC)的实验数据显示，在全覆盖冠层阶段，小麦的日蒸腾量可达 **4.5 至 6.0** 升/平方米/日²⁰。在某些高光强(>1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)实验中，峰值甚至超过 10 升/平方米/日²²。

4.2.2 生菜 (Lettuce)

生菜生长周期短，需水量相对较低，但作为维生素来源必不可少。其平均蒸腾速率约为 **2.0 至 3.0** 升/平方米/日²³。

4.2.3 土豆 (Potato)

土豆也是关键的碳水化合物来源，且收获指数高。其蒸腾速率在块茎膨大期较高，平均约为 **3.4 至 5.2 升/平方米/日**²²。

4.2.4 大豆 (Soybean)

作为蛋白质来源，大豆在水培环境下的蒸腾速率较高，约为 **4.0 至 5.0 升/平方米/日**²¹。

4.3 综合灌溉需水计算

在开环模式下，灌溉系统必须补充两部分水分：

1. 植物吸收固定的水分：仅占灌溉量的1%-5%，成为生物量的一部分。
2. 蒸腾损耗的水分：占95%-99%，直接排放至大气。

由于不回收蒸腾水，灌溉需水量 W_{irr} 几乎等同于蒸腾量 ET 。为了维持10万人的均衡饮食，种植结构假设为：50% 谷物(小麦/水稻)，20% 薯类(土豆/甘薯)，15% 豆类(大豆)，15% 蔬菜(生菜/番茄)。

加权平均蒸腾速率计算：

$$R_{avg} = 0.5 \times 5.0 + 0.2 \times 4.0 + 0.15 \times 4.5 + 0.15 \times 2.5 \approx 4.35 \text{ L/m}^2/\text{d}$$

为了保守起见并涵盖系统蒸发损耗，取 **4.5 升/平方米/日** 作为基准设计值。

单人每日农业耗水：

$$40 \text{ m}^2/\text{人} \times 4.5 \text{ L/m}^2/\text{d} = 180 \text{ L/人/日}。$$

10万人基地日农业耗水：

$$100,000 \times 180 = 18,000,000 \text{ L/日} \quad (\text{即 } 1.8 \text{ 万吨/日})。$$

这表明，农业系统的耗水量几乎是生活用水的1.8倍。在开环模式下，这相当于每天向月球大气层排放1.8万吨水蒸气，这需要巨大的通风系统将其排出舱外，否则基地将瞬间变成桑拿房。

5. 工业、屏蔽及基础设施的不可回收耗水量

除了生物生存需求，月球基地作为工业枢纽，其工业过程、燃料生产及辐射防护将消耗巨量水资源。

5.1 推进剂生产 (ISRU Propellant Production)

月球基地最核心的经济价值之一是作为深空加油站，利用水冰电解生产液氢(LH2)和液氧(LOX)

)。

反应方程式： $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$

质量比：每消耗 18kg 水，产生 2kg 氢和 16kg 氧。

5.1.1 需求场景：SpaceX Starship 级别的运输

假设10万人基地需要频繁的地月物流及火星中转任务。

- **Starship** 补给：一艘星舰(Starship)在轨道加注约需 1200 吨推进剂(主要为氧和甲烷，但月球早期可能以氢氧为主，或者利用萨巴捷反应合成甲烷

$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$)。若仅考虑氢氧引擎或为星舰提供液氧(LOX占推进剂质量的78%)，需求依然巨大²⁶。

- 发射频次：维持10万人的物资流动(即便大部分自给自足)，假设每年有 50 次重型起降任务(客运及货运)。
- 单次消耗：假设每次发射需在月面加注 1000 吨 LOX/LH2 推进剂。这需要电解约 1000 吨水(若产物全部利用)或更多。
- 年工业耗水： $50\text{次} \times 1000\text{吨/次} = 50,000\text{吨/年}$ 。

此外，还需考虑月面穿梭机(Lunar Hoppers)及采矿车的燃料消耗，预计额外增加 10,000 吨/年。

推进剂生产总耗水：约 6 万吨/年。

5.2 辐射屏蔽系统的水消耗

月球表面暴露于银河宇宙射线(GCR)和太阳质子事件(SPE)中。水是最高效的辐射屏蔽材料之一²⁸。

5.2.1 屏蔽层设计

对于长期定居点，建议的屏蔽厚度为 2-3 米水当量(g/cm^2)²⁹。

- 居住舱表面积：假设人均居住空间 $50\ m^3$ (含公共空间)，采用多层圆柱或穹顶结构。粗略估算10万人居住区的总表面积可能达到 $2 \times 10^6\ m^2$ 。
- 屏蔽水总量： $2 \times 10^6\ m^2 \times 2\ m = 4,000,000\ m^3$ (400万吨)。

虽然这部分水主要是静态储备(Capital Water)，但在开环模式的逻辑下，由于缺乏闭环维护，屏蔽水可能会因微陨石撞击泄漏、结构老化渗漏或作为紧急备用水源而被消耗。假设年损耗率为 1%，则年补充需求为 4 万吨。

5.3 建筑工程与月球混凝土(Lunarcrete)

利用月壤制造建筑材料 (ISRU Construction) 需要粘结剂。

- 硫磺混凝土: 无水方案, 适合真空环境, 但耐热性差³⁰。
- 水硬性混凝土: 若使用改性水泥, 水灰比约为 0.4³²。在真空环境下施工, 水分蒸发流失极快, 且未反应的水分会升华。
- 耗水估算: 假设基地每年扩建或维护需浇筑 100,000 立方米混凝土, 每立方米需水 200kg。考虑真空施工的额外损耗 (50%), 年耗水约 3 万吨。

5.4 热控系统的闪蒸消耗 (Flash Evaporator System)

在月球正午 (120°C), 基地散热是巨大挑战。虽然主系统应使用辐射散热器, 但在峰值热负荷或应急情况下, 闪蒸蒸发器 (FES) 通过向真空喷射水雾带走热量是极其高效的手段³³。

- 原理: 水在真空下瞬间蒸发吸热。每蒸发 1kg 水约带走 2400 kJ 热量。
- 消耗: 假设基地应急热控每年运行总时长累积为 100 小时 (针对10万人的散热规模), 平均功率缺口 100 MW。
- 计算: $100\text{MW} = 100,000\text{kJ/s}$ 。需水流量 $\approx 40\text{kg/s}$ 。
- 年耗水: $40\text{kg/s} \times 3600\text{s} \times 100\text{h} = 14,400,000\text{kg} \approx 1.44\text{万吨}$ 。

5.5 大气泄漏损耗

对于10万人规模的巨型加压结构, 大气的自然泄漏 (通过密封圈、气闸操作、微裂纹) 是不可避免的。

- 泄漏率: 参考ISS及生物圈2号的数据, 年泄漏率可控制在 1%-10%³⁵。但在月球多尘、强辐射环境下, 密封老化更快。
- 水分流失: 大气中含水量约 1% (体积比)。若基地总加压体积为 10^7m^3 , 年泄漏气体总量巨大, 其中夹带的水分流失估计约为 0.5 万吨/年。

6. 年度总需水量预测与战略储备量建模

6.1 年度总需水量汇总

基于上述模块分析, 10万人基地的年度水资源“纯消耗”清单如下:

模块	细分项	日消耗量 (吨)	年消耗量 (万吨)	占比
生活用水	卫生/饮用/内务	10,100	368.65	34.2%
农业用水	蒸腾损耗	18,000	657.00	61.0%

工业消耗	推进剂生产	164	6.00	0.6%
	建筑与屏蔽补充	192	7.00	0.6%
	热控闪蒸	39	1.44	0.1%
	大气泄漏	14	0.50	0.05%
不可预见	冗余系数 (3.5%)	983	35.88	3.5%
总计		29,492	1,076.47	100%

年度总需水量预测: 约 **1,076** 万吨。

这一数字意味着基地必须每天开采近 **3** 万吨 纯净水冰。若假设月球极地永久阴影区(PSR)的月壤含冰量平均为 5%³, 则每天需要挖掘处理 **60** 万吨 月壤。这相当于地球上一个超大型露天矿山的开采规模, 且需在极端低温、真空和辐射环境下全天候运行。

6.2 战略储备量规划

在“开环”模式下, 水不仅是生命之源, 更是消耗极快的燃料和工质。一旦供应链(采矿-运输-液化)中断, 基地的生存倒计时将以小时计。因此, 战略储备必须具备极高的冗余度。

6.2.1 风险场景分级

- 1. 一级风险(短期故障): 采矿设备维修、管道冻结、短时电力中断。持续时间: 3-7天。
- 2. 二级风险(中长期中断): 主要矿区枯竭需转移、大型运输系统瘫痪、月球尘暴影响作业。持续时间: 1-3个月。
- 3. 三级风险(灾难性事件): 战争、严重的地质灾害、地球补给彻底断绝。持续时间: 6个月至1年。

6.2.2 储备量计算模型

战略储备不仅要覆盖生活用水, 还需维持农业系统的最低生存线(植物不死亡, 但停止生长)。

- 生存维持模式(Survival Mode):
 - 生活用水降至 10 L/人/日(仅饮用+极简卫生)。
 - 农业用水降至 20%(仅维持根系存活, 减少光照降低蒸腾)。
 - 工业活动全部停止。
 - 日需量:

$$100,000 \times 10 + 18,000,000 \times 0.2 = 1,000 + 3,600 = 4,600 \text{ 吨/日}。$$

- 正常运行模式(Normal Mode):
 - 日需量:约 29,500 吨/日。

6.2.3 推荐储备方案

- 战术储备(缓冲罐):满足 7天正常运行。
 - $29,500 \times 7 = 206,500$ 吨。
 - 分布于各居住区和农业舱周边的储水罐中。
- 战略储备(深层存储):满足 6个月生存维持。
 - $4,600 \times 180 = 828,000$ 吨。
 - 存储于地下的大型冰库或利用屏蔽层水墙兼做储备。

总战略储备量:约 103 万吨。

这大约相当于 400 个奥运会标准泳池的水量, 或者一个边长为 100 米的立方体冰山。

7. 结论与工程启示

本报告的研究揭示了在月球10万人定居点采用“开环”用水模式的惊人代价:

1. 资源消耗极度高昂:年耗水超过 1000 万吨, 这要求建立庞大的行星级采矿工业体系。仅农业一项的蒸腾损耗(657万吨/年)就占据了总需求的60%以上。这表明, 在月球如果不回收植物蒸腾水, 农业将成为不可承受的重负。
2. 物流与能源瓶颈:处理每日60万吨月壤所需的能源(挖掘、加热升华、冷凝收集)将是天文数字。若以加热月壤至100°C提取水分计算, 仅热能需求就达到吉瓦(GW)级, 需要数十座核反应堆或覆盖数百平方公里的太阳能板。
3. 模式对比的必然性:开环模式虽然节省了废水处理系统的硬件研发成本, 但其带来的资源开采成本(OpEx)和能源基础设施成本(CapEx)远超闭环系统的代价。

最终建议:

对于10万人的月球基地, 完全的“开环”模式在工程和经济上均不具备可持续性。混合模式或许是唯一可行路径:即对高回收成本的黑水(冲厕水)和部分工业废水采用开环排放(或用作辐射屏蔽填充), 但对农业蒸腾水(最清洁且量最大)必须进行冷凝回收。仅此一项改变, 即可将年需水量从1000 万吨降低至 400 万吨以下, 显著提升基地的生存可行性。

引用的著作

1. 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-recover>

- [y-milestone-on-international-space-station/](#)
2. 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/g-281237_eclss_0.pdf?emrc=67ffdc
 3. Lunar water and long-term sustainability : r/IsaacArthur - Reddit, 访问时间为 一月 31, 2026,
https://www.reddit.com/r/IsaacArthur/comments/1p0mbga/lunar_water_and_long_term_sustainability/
 4. Space colonization - Wikipedia, 访问时间为 一月 31, 2026,
https://en.wikipedia.org/wiki/Space_colonization
 5. 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>
 6. Powering Human Settlements in Space | ACS Central Science - ACS Publications, 访问时间为 一月 31, 2026, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscentsci.0c00382>
 7. Lunar Base Habitat Designs - SpaceArchitect.org, 访问时间为 一月 31, 2026,
<https://spacearchitect.org/pubs/NASA-CR-195687.pdf>
 8. Water – Human Consumption OCHMO-TB-027 Rev C - NASA, 访问时间为 一月 31, 2026,
<https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/12/ochmo-tb-027-water.pdf>
 9. Issue #191 Water in Space: How Do Astronauts Stay Hydrated Beyond Earth?, 访问时间为 一月 31, 2026,
<https://www.salaciousdrinks.com/blogs/the-droplet/issue-191>
 10. Biologically-Based and Physiochemical Life Support and In Situ Resource Utilization for Exploration of the Solar System—Reviewing the Current State and Defining Future Development Needs - PMC - PubMed Central, 访问时间为 一月 31, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8398003/>
 11. 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>
 12. Usable Water in McMurdo Station: How does it get here, and where does it go?, 访问时间为 一月 31, 2026, <https://mcm.lternet.edu/node/1883>
 13. Manual of Naval Preventive Medicine Chapter 6 WATER QUALITY AFLOAT, 访问时间为 一月 31, 2026,
<https://www.med.navy.mil/Portals/62/Documents/BUMED/Directives/All%20Pubs/5010-6%20-%2026%20Jan%202022.pdf?ver=AGOOMql118XaB88mbE-cmw%3D%3D>
 14. Emergency Preparedness - Cal Water, 访问时间为 一月 31, 2026,
<https://www.calwater.com/customercare/emergency-preparedness/>
 15. Lunar habitation - Wikipedia, 访问时间为 一月 31, 2026,
https://en.wikipedia.org/wiki/Lunar_habitation
 16. Spaceship EAC: recycling water on the Moon - ESA's blogs - European Space Agency, 访问时间为 一月 31, 2026,
<https://blogs.esa.int/exploration/en/spaceship-eac-recycling-water-on-the-moon>

- /
17. Water in space - ESA, 访问时间为 一月 31, 2026,
https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/International_Space_Station/Water_in_space
 18. Phasic Temperature Control Appraised With the Ceres-Wheat Model - DigitalCommons@USU, 访问时间为 一月 31, 2026,
https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1012&context=cpl_en
 19. Wheat production in controlled environments - PubMed, 访问时间为 一月 31, 2026, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11537261/>
 20. Carbon dioxide and water exchange rates by a wheat crop in NASA's biomass production chamber: Results from an 86-day study (January to April 1989), 访问时间为 一月 31, 2026, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19900016137>
 21. NASA's Controlled Environment Agriculture Testing for Space Habitats, 访问时间为 一月 31, 2026,
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140017323/downloads/20140017323.pdf>
 22. Potato and Human Exploration of Space: Some Observations from NASA-Sponsored Controlled Environment Studies, 访问时间为 一月 31, 2026,
<http://bigidea.nianet.org/wp-content/uploads/2018/07/Potato-Research-2006-Wheeler.pdf>
 23. 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/>
 24. A Long-Term Analysis of the Possibility of Water Recovery for Hydroponic Lettuce Irrigation in Indoor Vertical Farm. Part 1 - MDPI, 访问时间为 一月 31, 2026,
<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/24/8907>
 25. Water requirements (L) to produce 1 kg dry matter of green fodder, protein and energy feeds - ResearchGate, 访问时间为 一月 31, 2026,
https://www.researchgate.net/figure/Water-requirements-L-to-produce-1-kg-dry-matter-of-green-fodder-protein-and-energy_tbl1_287884466
 26. SpaceX Starship - Wikipedia, 访问时间为 一月 31, 2026,
https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX_Starship
 27. Mission Architecture Using the SpaceX Starship Vehicle to Enable a Sustained Human Presence on Mars - PMC - NIH, 访问时间为 一月 31, 2026,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9527650/>
 28. Radiation Shielding for Lunar Missions: Regolith Considerations, 访问时间为 一月 31, 2026,
https://isic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/1604-E&C%20+%20EE%20Monthly%20Meeting%20-%202022%2007%20July_Presentation%20-%20NASA%20SIaba.pdf
 29. What thickness/depth of water would be required to provide radiation shielding in Earth orbit? - Space Exploration Stack Exchange, 访问时间为 一月 31, 2026,
<https://space.stackexchange.com/questions/1336/what-thickness-depth-of-water-would-be-required-to-provide-radiation-shielding-i>

30. 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>
31. Lunarcrete - Wikipedia, 访问时间为 一月 31, 2026,
<https://en.wikipedia.org/wiki/Lunarcrete>
32. Space 2002 and Robotics 2002: Concrete for Lunar and Mars Soils In Situ Resource Utilization - ASCE Library, 访问时间为 一月 31, 2026,
<https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/40625%28203%2920>
33. Experimental Study of the Cooling Properties in Low-Pressure Flash Evaporation - Avestia, 访问时间为 一月 31, 2026,
https://avestia.com/MHMT2024_Proceedings/files/paper/ICMFHT/ICMFHT_169.pdf
34. Application Guidelines - BAC Europe, 访问时间为 一月 31, 2026,
<https://www.baltimoreaircoil.eu/node/1900>
35. Engineering of Biosphere 2: closure and energy - PubMed, 访问时间为 一月 31, 2026, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11542287/>