



月球基地供水系统建模（讨论稿）

1. 研究目标与问题定义

本研究旨在评估：

在一个已完全建成并投入运行（fully operational）的 10 万人月球基地中，如何在连续 1 年的时间尺度内，保证基地具有充足的水供应，并分析相应的运输成本与时间需求。

本问题属于**短期运行保障**（operational feasibility）分析，而非长期文明可持续发展规划。

2. 需水量参数定义（外生输入）

在本模型中，基地**总需水量不再视为单一参数**，而是由三类用途的用水需求构成，且**不考虑浪费与冗余**（即均为“使用的水，gross demand”）。

2.1 生活用水（Domestic Water Use）

仅考虑维持正常生活所必需的用水，包括饮食与基本清洁。

- **饮用及食品制备用水**：依据阿波罗计划数据：
 $D_{\text{drink}} = 2.6 \text{ L} \cdot \text{person}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ （其中约 0.8 L 用于食品制备）
- **清洁用水**：统计口径较为分散，取工程上合理估计值：
 $D_{\text{clean}} = 10 \text{ L} \cdot \text{person}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$

因此，单人生活用水量为：

$$D_{\text{life}} = 12.6 \text{ L} \cdot \text{person}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$$

2.2 农业用水（Agricultural Water Use）

假设基地采用大尺度单作物温室与低频灌溉的受控环境农业系统。在该条件下，取估计值：

$D_{agri} = 312 \text{ L} \cdot \text{person}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$

2.3 技术用水 (Technical / Industrial Water Use)

技术用水包括电池系统、热控冷却与电解水过程，其量级相对较小，模型中采用粗略估计：

$D_{tech} \approx 5 \text{ L} \cdot \text{person}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$

2.4 总需水量表达式

单人每日总需水量为：

$D_{w,1p} = D_{life} + D_{agri} + D_{tech}$

10 万人基地的总需水量为：

$D_w = 100,000 \times D_{w,1p}$

3. 供水系统总体结构

供水系统由以下三大子模型构成，并辅以明确的阶段划分：

- 1. 运力模型 (Transportation Model)
 - 2. 储水模型 (On-site Storage Model)
 - 3. 水循环模型 (Water Recycling Model)
-

4. 运力模型 (Transportation Model)

假设所有初始水源均来自地球，存在两条可选供水路径，用于情景对比分析。

4.1 路径 A：太空电梯运输

- 年最大运力：

$$\begin{aligned} &[\\ R_{\text{elevator}} &= 179{,}000 \text{ t/year} \\ &] \end{aligned}$$

- 年运输成本：

$$\begin{aligned} &[\\ C_{\text{elevator}} &= 4.0 \text{ billion USD / year} \\ &] \end{aligned}$$

特点：

- 高前期建设成本
 - 低边际运输成本
 - 运力稳定，适合运行期持续补水
-

4.2 路径 B：地面直接发射

参数基于饱和发射能力假设：

- 总目标运量：

$$\begin{aligned} &[\\ M_{\text{total}} &= 100 \times 10^6 \text{ t} \\ &] \end{aligned}$$

- 年最大运力：

$$\begin{aligned} &[\\ R_{\text{trans}} &= 150{,}000 \text{ t/year} \\ &] \end{aligned}$$

- 对应运输时间：

$$\begin{aligned} &[\\ T_{\text{mission}} &= \frac{M_{\text{total}}}{R_{\text{trans}}} \approx 667 \text{ years} \\ &] \end{aligned}$$

- 年燃料消耗：
[
 $F_{\text{annual}} = 4,843,800; \text{t}$
]
- 燃料单价：
[
 $P_{\text{fuel}} = 480; \text{USD/t}$
]
- 总燃料成本：
[
 $C_{\text{total}} \approx 1.55 \times 10^{12}; \text{USD}$
]

特点：

- 运力极低
- 时间尺度不可接受
- 仅适合作为对照或早期一次性铺底方案

5. 储水模型 (On-site Storage Model)

基地内部采用分布式储水系统，可抽象为库存—阈值模型。

5.1 状态变量

$S(t)$: 时刻 t 的基地储水总量

5.2 阈值与容量参数

- 最大储水容量 (设计参数) : S_{max}
- 运输触发阈值 (设计参数) : S_{trans}
- 安全阈值 (可计算参数) : S_{safe}

其中 S_{max} 与 S_{trans} 需要通过情景分析或优化确定，而 S_{safe} 表示在无外部补水条件下仍可维持最短安全运行时间所需的最低水量。

一般满足： $S_{\max} > S_{\text{trans}} > S_{\text{safe}}$

5.3 安全阈值的计算思路

若定义最小安全保障时间为 T_{safe} （天），则：

$$S_{\text{safe}} = \int_0^{T_{\text{safe}}} D_{\text{net}}(t) dt$$

在回收率变化缓慢或取下界估计时，可近似为：

$$S_{\text{safe}} \approx T_{\text{safe}} \times (1 - \eta_{\min}) \times D_w$$

6. 水循环模型（Water Recycling Model）

定义水回收效率为随时间变化的函数 $\eta(t)$ 。

6.1 动态回收率假设

考虑到技术成熟度提升，假设水回收率随运行时间逐步上升：

- 初期运行阶段： $\eta \approx 0.90$
- 稳定运行阶段（接近 ISS 水平）： $\eta \rightarrow 0.98$

$\eta(t)$ 可在数值模拟中设定为线性或指数形式的单调上升函数。

6.2 净补水需求

在任意时刻，每日净补水需求为：

$$D_{\text{net}}(t) = (1 - \eta(t)) \times D_w$$

7. 供水阶段划分

7.1 阶段 I：基地运行前（Pre-operational Phase）

- 目标：将储水量提升至 $(S_{\{max\}})$
- 特点：
 - 无水消耗
 - 纯运输问题
 - 决定初始缓冲能力

7.2 阶段 II：基地运行后（Operational Phase）

在基地投入使用后，水量动态可表示为：

$$\begin{aligned} &[\\ S(t+1) &= S(t) + R_{\{delivery\}} - D_{\{net\}} \\ &] \end{aligned}$$

其中：

- $(R_{\{delivery\}})$ ：地-月供水速率
- $(D_{\{net\}})$ ：考虑回收后的净耗水

运输系统依据 $(S_{\{trans\}})$ 与 $(S_{\{safe\}})$ 进行调度与风险评估。

8. 关于“是否需要考虑可持续性”的说明

本研究问题限定为：

Investigate the water needs for a one-year period once the Moon Colony is fully operational

因此：

- **不需要显式建模长期可持续发展 (multi-decade or permanent sustainability)**
- 只需验证在 1 年时间尺度内是否存在可行的供水与储水策略，使得：

$$\begin{aligned} &[\\ &S(t) \geq S_{\text{safe}}, \quad \forall t \in [0, 365] \\ &] \end{aligned}$$

长期可持续性（如 ISRU、大规模闭合生态系统）可作为后续研究或讨论部分简要指出。

9. 参数优化问题的提出

在上述建模框架下，系统设计的核心不确定性集中于两个关键参数：

- 最大储水容量 S_{max}
- 运输触发阈值 S_{trans}

二者共同决定初始运水规模、运行期运水频率以及缺水风险水平。因此，供水系统设计可被表述为如下优化问题：

在给定需水结构 D_w 、水回收率演化 $\eta(t)$ 以及运输能力约束的条件下，选择 S_{max} 与 S_{trans} ，使得在 1 年运行期内始终满足 $S(t) \geq S_{\text{safe}}$ ，并同时最小化运输成本、运输频率或风险指标。

10. 模型用途与下一步工作

该模型框架可用于：

- 比较不同储水–运水策略的可行性
- 分析回收率提升对储水规模的替代效应
- 评估在给定运力下的最小安全储水需求

下一步可开展：

- 对 S_{max} 与 S_{trans} 的参数扫描与优化

- 不同 T_{safe} 假设下的风险对比分析
- 将结果用于运输方案（太空电梯 / 火箭发射）的可行性评估