

待补充完善：

1、

\subsubsection{Spatial Optimization Based on Physio-Geographical Constraints}

Estimating rocket launch capacity requires considering frequency beyond technical payload (100-150 metric tons). Based on historical records of the 10 existing launch sites, we estimate that under ideal post-2050 conditions, each site can support at most one launch per day.处的历史记录

## # 1.1background

随着人类对地外空间的探索从短期任务式登陆向长期永久定居转型，地球有限的资源与脆弱的生态系统正促使我们寻找地外栖息地，以实现文明的多行星化。但传统化学动力火箭存在载荷比低、发射成本高、化学污染不可逆等短板，难以支撑大规模月球殖民地建设的海量物资运输需求。在此背景下，空间电梯系统作为革命性的星际运输基础设施应运而生，将协同月球轨道接驳系统，构建起一条绿色、高效且可持续的星际物流链。

大规模月球殖民地的构建，既是对星际物流运输能力的极致考验，更是对生命保障需求持续供给的严峻挑战。在月球这一严酷环境中，十万居民的日常消耗构成了物流的长期需求。当我们将传统火箭与新兴空间电梯系统进行对比时，必须权衡能耗成本、时间进度、发射窗口限制、环境负荷以及系统故障带来的风险成本。这一研究既关乎月球殖民工程的可行性与经济性，也对未来星际物流体系的构建与地球生态保护具有重要意义。

## # 4.模型 I：基于广义能量等效与时序协同的运输成本评估模型 (Universal Energy-Equivalent and Temporal Coordination Model)

### 4.1 模型概述 (Model Overview)

为了量化评估 2050 年后大规模月球殖民地建设的物流可行性，本文构建了广义能量等效与时序协同评估模型 (UETCM)。该模型放弃了易受宏观经济波动干扰的货币价值尺度，创新性地确立了以焦耳 (Joule) 为度量的广义能量等效 (Universal Energy-Equivalent, UEE) 作为核心评估标准。这一跨维度的基准锚定，不仅消除了跨越数十年建设周期的通货膨胀影响，更在热力学本质上实现了化学火箭动量转化与空间电梯势能增益这两类异构运输技术的公允对标。

在模型构建与求解过程中，我们首先基于齐奥尔科夫斯基方程与引力场能量梯度，推导出了载荷质量与能源消耗间的线性映射关系。考虑到现实物理约束，模型引入了地理纬度修正算子与发射频次阈值，提出“低纬度优先”原则，揭示了地球自转赋予的切向初速度对物流能效的非线性贡献。针对工期与成本的天然矛盾，模型利用帕累托前沿 (Pareto Front) 刻画了混合运输模式下的战略博弈空间，并通过最大距离法 (Maximum Distance Method) 锁定了兼顾建设时效与能源经济性的“多目标优化膝点”，即 139 年的黄金工期。

最后，为修正理想化模型的偏差，我们将 UETCM 扩展为包含扰动因子的随机修正模型。通过 10,000 次蒙特卡洛 (Monte Carlo) 仿真，系统性地模拟了缆索摆动导致的变轨能耗、发射场气象干扰、电梯检修、火箭失效带来的进度停滞。研究不仅量化了系统在“非完美运行”下的性能退化，更识别出电梯妥善率与气象窗口是制约星际物流链韧性的核心变量。该模型为未来地月物资运输体系的构建提供了一套从底层物理机理到高层战略决策的系统性评估框架。

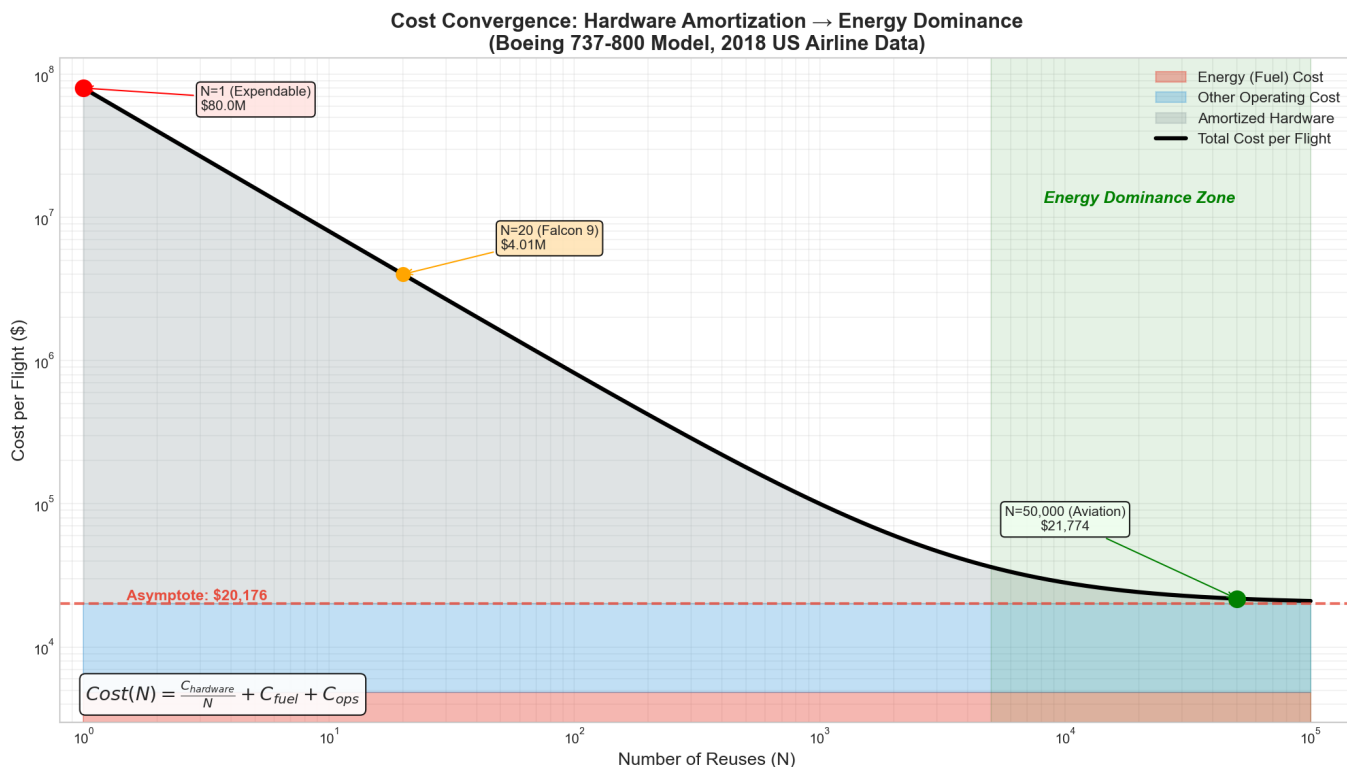
### 4.2 广义能量等效 (UEE) 的成本表征能力论证

在传统的经济模型中，成本通常以货币计量。然而，针对跨越数十年的地月物流链，货币受通胀及地缘政治影响具有极大的不确定性。本文提出：在成熟的运输系统中，能源消耗是经济成本的最优代理变量。为证实这一

公理的有效性，本节从成本结构、行业数据及统计相关性三个维度进行多重论证。

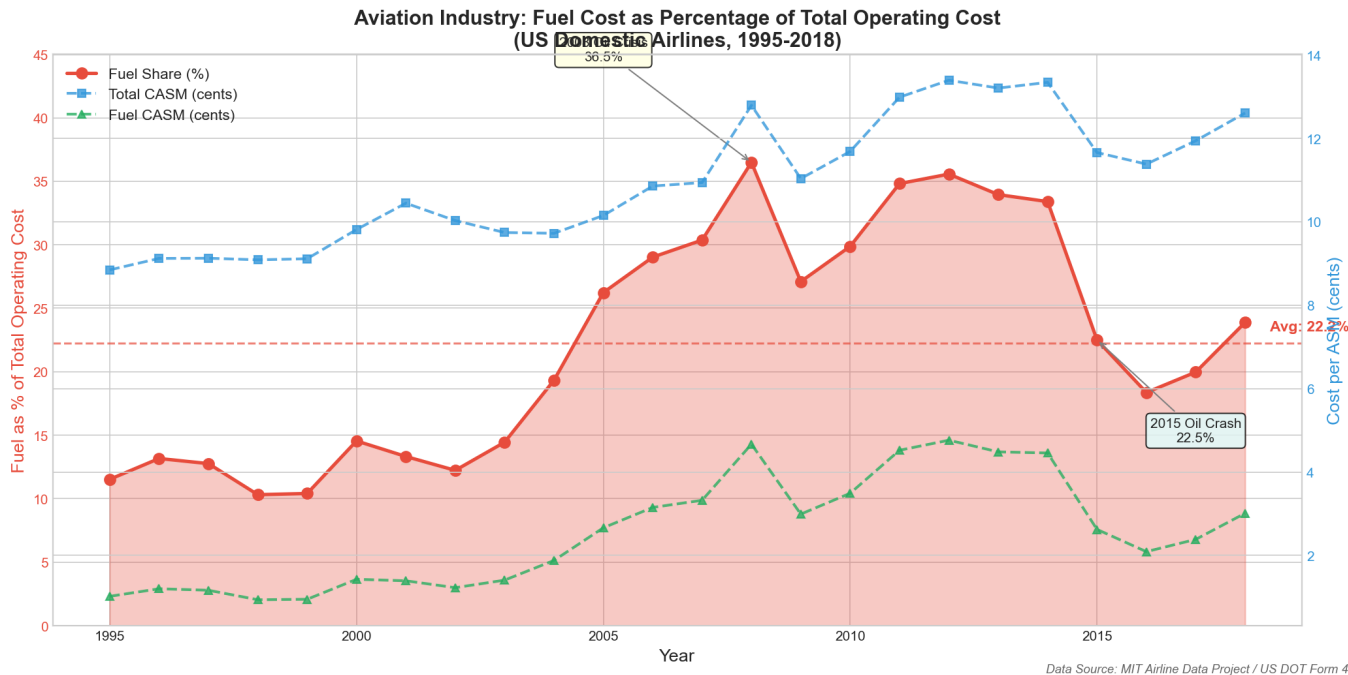
### 4.2.1 成本结构的收敛性分析 (Cost Structure Convergence)

任何运输系统的单次运营成本  $Cost(x)$  可分解为硬件摊销、能源消耗与运维成本三部分： $Cost(x) = \frac{C_{hardware}}{x} + C_{energy} + C_{operations}$  其中  $x$  为运输工具的复用次数。随着 2050 年后星际运输技术的成熟， $x$  将趋于极大值，导致单位制造载荷  $C_{hardware}/x$  迅速稀释。以波音 737 飞机的成本收敛曲线为例：当复用次数达到量级增长时，制造成本占比快速下降，能源成本逐渐演变为驱动总成本的主导因素，占比常年稳定在 22% 以上。在未来的地月物流中，能源效率的优化将成为降低边际成本的唯一核心路径。



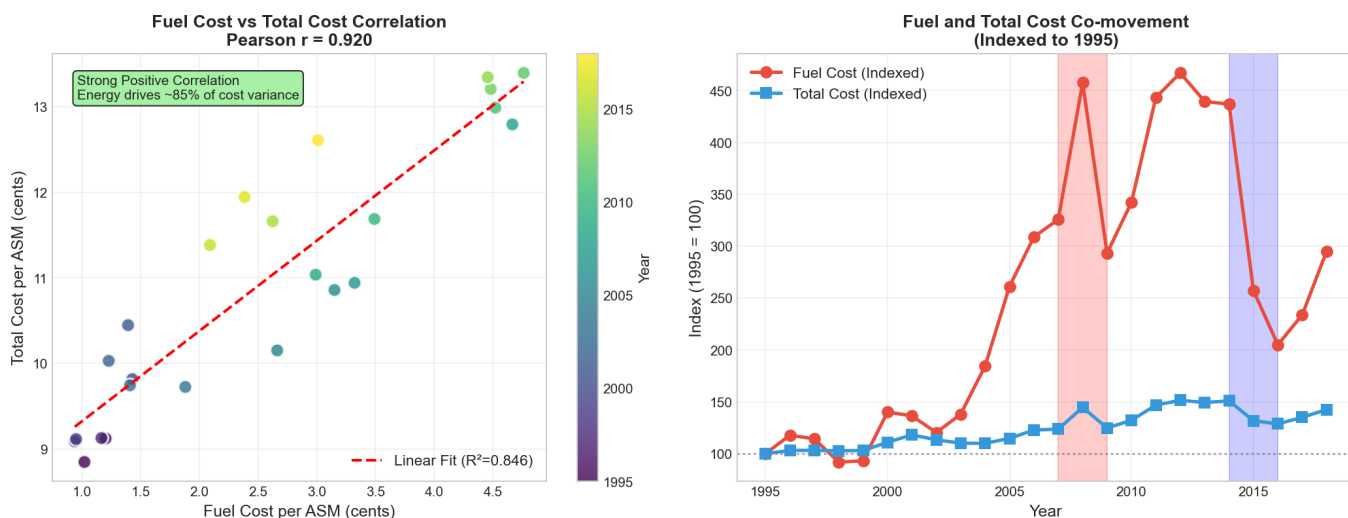
### 4.2.2 实际行业数据的实证支撑 (Empirical Evidence)

航空业作为目前人类最成熟的大规模运输系统，其数据具有显著的参考价值。如图，分析 1995-2018 年美国国内航空业运营数据发现，即使在油价波动的复杂环境下，燃油成本仍稳定占据总运营成本的 15%-25%，证明能源是成熟运输系统的核心成本驱动因素。



为进一步量化这种关联，本文绘制总成本与能源成本的散点图并引入皮尔逊相关系数 (Pearson Correlation Coefficient) 进行验证：
$$r = \frac{\sum (C_{total} - \bar{C}_{total})(C_{energy} - \bar{C}_{energy})}{\sqrt{\sum (C_{total} - \bar{C}_{total})^2} \sqrt{\sum (C_{energy} - \bar{C}_{energy})^2}}$$

Evidence: Energy Cost Strongly Correlates with Total Operating Cost (US Domestic Airlines Industry)



计算结果显示，总成本与能源成本的散点分布呈现极强的线性趋势，相关系数  $r$  达到 **0.92**。这证明在成熟的运输范式下，捕获了能量消耗即捕获了成本的核心变动。

**4.2.3 选取 UEE 作为度量衡的科学优势** 基于上述论证，本文确立 UEE 为核心评估标准，其优势体现在以下维度：

- **经济恒定性 (Economic Invariance)**: 焦耳 (Joule) 作为物理常数，能够提供跨越时空的稳健评估，规避了长期任务中的货币贬值风险。
- **异构技术对标 (Standardized Comparison)**: UEE 指标打破了化学火箭与空间电梯的物理界限，将异构能源消耗统一映射至热力学本质。
- **物理约束锚定 (Gravitational Constraint)**: 跨星际物流的本质是克服引力势阱。能量消耗直接量化了突破引力束缚的物理难度，比货币更能精准反映引力位能变化与载荷间的非线性映射关系。

- **环境可持续性 (Sustainability):** 在多行星文明进程中，能源获取效率 (Low Entropy) 是制约大规模建设的首要瓶颈，符合低碳星际文明的发展逻辑。

## ## 4.2 理想下的能源成本建模 (Ideal Energy Cost Modeling)

在确立了 UEE 作为成本代理变量后，本节将针对两种运输范式建立数学映射，定量计算将 1 亿公吨物资运至月球的物理代价。

### ### 4.2.1 传统火箭直接运输：基于动量转化的化学能消耗分析

对于传统火箭方案，其成本的核心取决于将货物送出地球引力势井所需的化学燃料质量。我们首先利用齐奥尔科夫斯基火箭方程 (Tsiolkovsky Equation) 来探讨燃料消耗与有效载荷之间的内在关联。

- Step I: 基于齐奥尔科夫斯基方程的质量比约束分析

考虑火箭在忽略空气阻力情况下的速度增量  $\Delta v$ 。为便于分析，我们定义质量比  $R$  为初始质量  $m_0$  与末端质量  $m_f$  之比，则有：

$$R = \frac{m_0}{m_f} = e^{\Delta V / v_e}$$

其中  $v_e$  为火箭喷气速度。在给定的近地轨道 (LEO) 或地月转移任务中， $\Delta V$  由轨道力学决定，可视为常数。

- Step II: 燃料消耗与有效载荷的线性映射推导

由于火箭并非单纯由有效载荷组成，还包含结构质量如燃料箱、发动机等，我们引入结构系数  $\alpha$ 。定义其为结构质量与燃料质量之比，即  $m_s = \alpha \cdot m_{\text{fuel}}$ 。通过对总质量构成的代数推导，可以得出燃料质量  $m_{\text{fuel}}$  与有效载荷  $m_p$  的精确比例：

$$m_{\text{fuel}} = \underbrace{\frac{R-1}{1-\alpha(R-1)}}_k \cdot m_p$$

通过这一公式，我们将复杂的飞行过程提炼为一个比例系数  $k$ 。根据燃料释放的理想化学能公式：

$$E_{\text{rocket}} = \frac{1}{2} m_{\text{fuel}} \cdot v_e^2 = \frac{1}{2} k \cdot v_e^2 \cdot m_p$$

这表明，在传统火箭模式下，**能源成本是有效载荷的线性函数。**

- Step III: 地月全过程引力位能变换核算

为了完成全过程成本评估，我们进一步考虑势能变化。全过程能量消耗  $\Delta E$  可视为克服地球引力势能、月球引力补偿及动能转换的总和：

$$\Delta E_{\text{total}} = m_p \cdot \left[ \left( \frac{G M_E}{R_E} - \frac{G M_E}{d_{EM}} \right) - \frac{G M_M}{r_M} \right]$$

公式中的各项分别代表了从地表逃逸、地月相对位置势能差以及进入月球轨道所需的能级跃迁。综合上式可知**火箭运输下总能耗与有效载荷质量成线性正比关系。**

### ### 4.2.2 空间电梯运输：基于引力梯度与转动惯量的能量增益模型

与火箭直达相比，空间电梯方案的本质差异只在第一段：货物先由地面港口沿缆索被送到顶点锚，再从顶点锚装载火箭飞往月球。由于从顶点锚至月球的火箭段仍可用上一小节的火箭模型处理，本节只建立电梯段的能量

增益模型。

货物由地面港口 (Earth Port) 运送至顶点锚 (Apex Anchor) 的过程中, 其能量变化主要由三部分组成: 克服地球引力的位能提升、随高度增加的向心动能增益, 以及在顶点锚释放时的切向动能。其能量输入公式表达为:

$$E_{\text{elevator}} = m_p \left[ \left( \frac{GM_E}{R_E} - \frac{GM_E}{r_0} \right) + \frac{1}{2} \omega^2 r_0^2 \right]$$

其中,  $r_0$  为顶点锚至地心的距离,  $\omega$  为地球自转角速度, 上式表明**电梯运输同样满足能耗与载荷的线性正比关系**。

### ## 4.3 理想下的时间进度与物流效率建模 (Ideal Timeline and Logistic Efficiency Modeling)

在解决了单次运输的物理能效问题后, 模型进入了对时间进度的求解阶段。这一任务的复杂性在于: 1 亿公吨的总载荷并非瞬间送达, 其时间进度受到全球发射场地理分布、发射频次上限以及空间电梯和火箭固有运力的多重博弈制约。

#### #### 4.3.1 运输进度计算公式

为了量化 2050 年后的建设时间线, 模型定义  $M_{\text{total}} = 10^8$  公吨为建设 10 万人殖民地所需的总物资需求。根据题目给出的三种情景模式, 完成该宏大工程所需的时间进度  $t$  取决于系统的**年度累计运力  $C$** 。通过构建以下时序模型, 我们可以得到不同情景下的完成时间:

- **纯太空电梯情景 (scenarios a)** :  $t_a = \frac{M_{\text{total}}}{C_e}$
- **纯火箭情景 (scenarios b)** :  $t_b = \frac{M_{\text{total}}}{C_r}$
- **混合情景 (scenarios c)** :  $t_c = \frac{M_{\text{total}}}{\lambda C_e + \mu C_r}$

其中  $C_e$  为空间电梯系统的年吞吐量,  $C_r$  为火箭系统的年综合运力。上述公式揭示了一个关键逻辑, 时间进度的缩短是以提高年度累计运力为代价的。通过调节混合权重  $\lambda$  与  $\mu$ , 我们可以在建设速度与能源成本之间寻求动态平衡点。

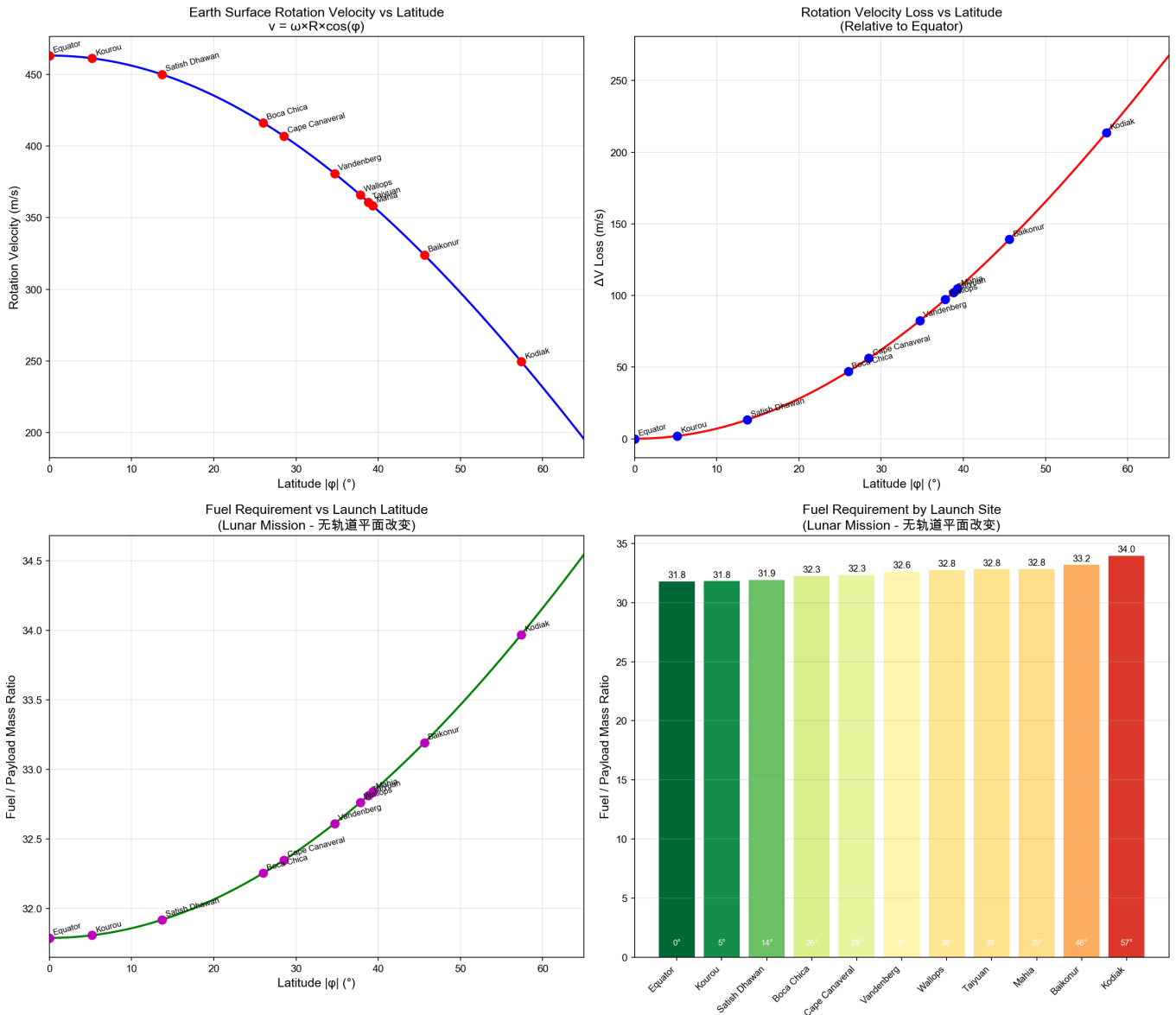
#### #### 4.3.2 基于物理地理约束的物流效率优化

单纯计算理论工期是不够的, 现实中影响 2050 年建设进度的最大阻碍是发射场的地理约束与频次限制。这直接决定了上述公式中  $C_r$  的真实上界。

1. **频次对进度的刚性约束**: 本文以全球 10 个现有发射场的历史发射记录及维护周期进行估计, 得出在 2050 年后的理想状态下, 每个站点每日至多可发射一枚火箭。这意味着火箭系统每年的总发射窗口是有上限的, 这种运力天花板是决定工期下限的核心变量。
2. **地理纬度对进度的效率修正**: 由于地球自转赋予了火箭一个切向初速度  $v_{0i}$ , 不同纬度的发射站其能量增益不同, 公式如下:

$$v_{0i} = v_{0E} \cdot \cos \theta_i$$

其中  $v_{0E}$  为地球赤道自转线速度,  $\theta_i$  为所在发射站的纬度。公式说明, 发射站的纬度越高, 初速度越小, 需要消耗更多化学燃料进行货物运输。



如上图所示，随着纬度从赤道向高纬度增加，切向速度损失呈非线性上升。这直接导致了燃料/有效载荷比从赤道站点的 31.8 上升至高纬度站点的 34.0。

因此，本模型设定了“低纬度优先”原则：在火箭发射次数未达上限时，优先调用库鲁（Kourou）等低纬度站点以最小化全球总能耗。这一原则不仅是为了最小化能耗，更是为了通过优化站点分配，确保在给定的时间进度要求下，物资交付的效率达到最大化。

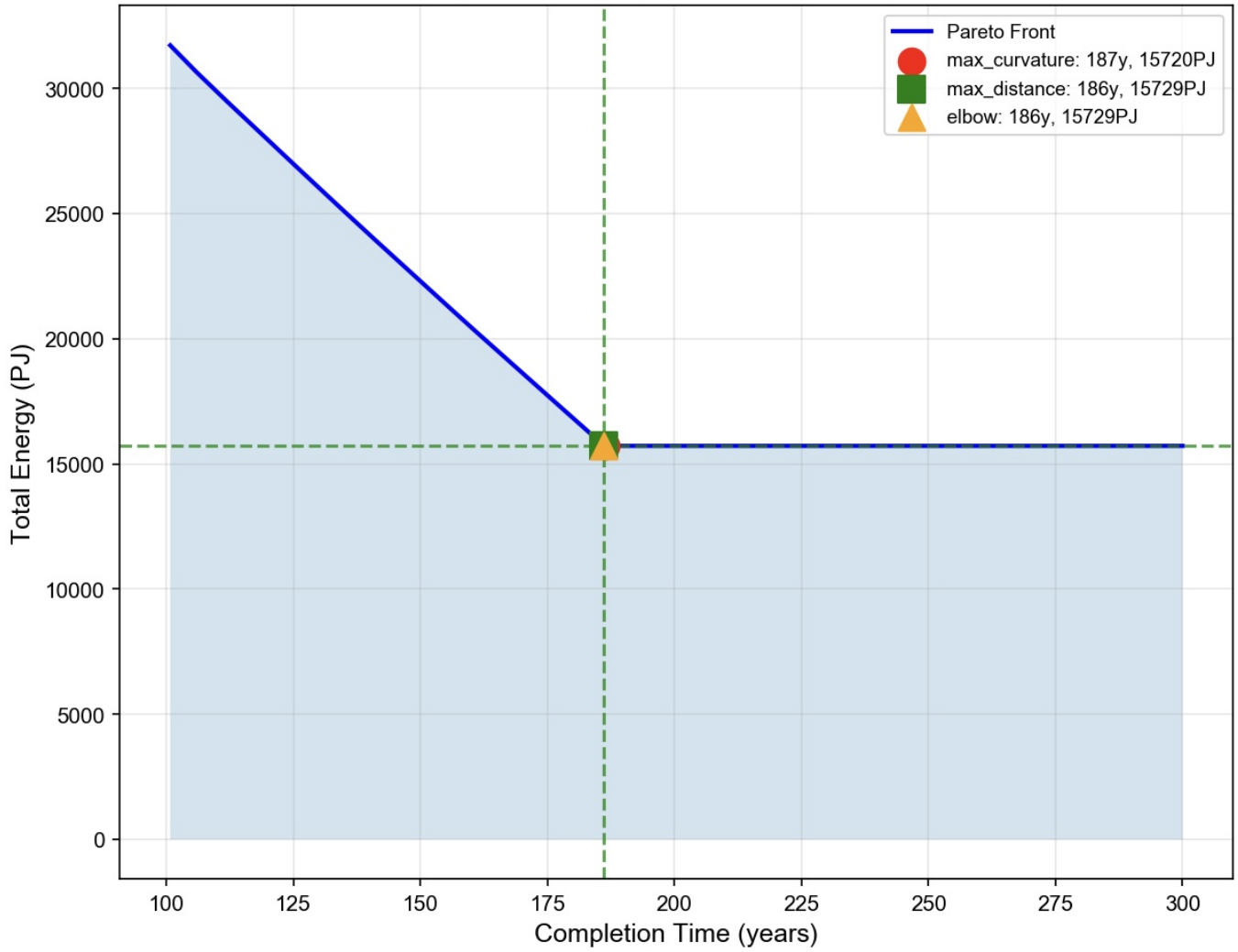
#### ## 4.4 基于多准则决策的战略权衡与膝点寻优 (Strategic Trade-offs and Multi-criteria Optimization)

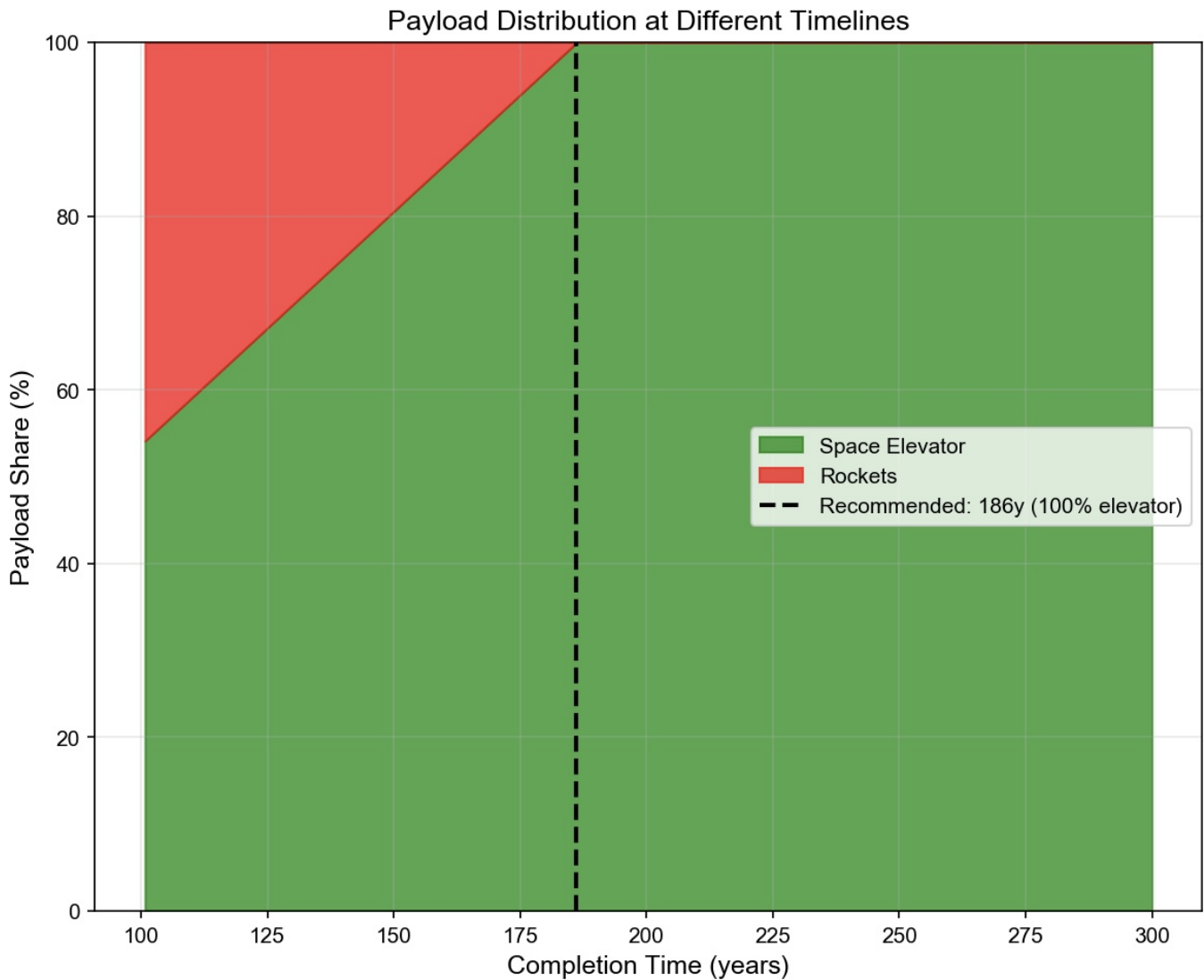
在建立了时间进度与能源成本的量化关系后，模型面临的核心挑战从数值计算转向了战略决策。考虑到混合运输情景需在电梯与火箭运力配比中平衡能源经济性与建设时效性，本节将其抽象为核心多目标优化问题，通过构建帕累托前沿，量化混合情景下工期与能耗的权衡关系，为混合情景最优运力配比的筛选提供支撑。

##### ### 4.4.1 帕累托前沿与混合情景内部结构的动态演化

题目提出的混合运输情景在工程实践中并非一个静态的固定配比，而是一个随工期目标动态调整的连续谱系。本模型通过构建帕累托前沿 (Pareto Front)，定量地定义了混合情景 (scenarios c) 的内部逻辑结构。

Pareto Front: Time vs Energy Trade-off  
(Knee Points by Different Methods)



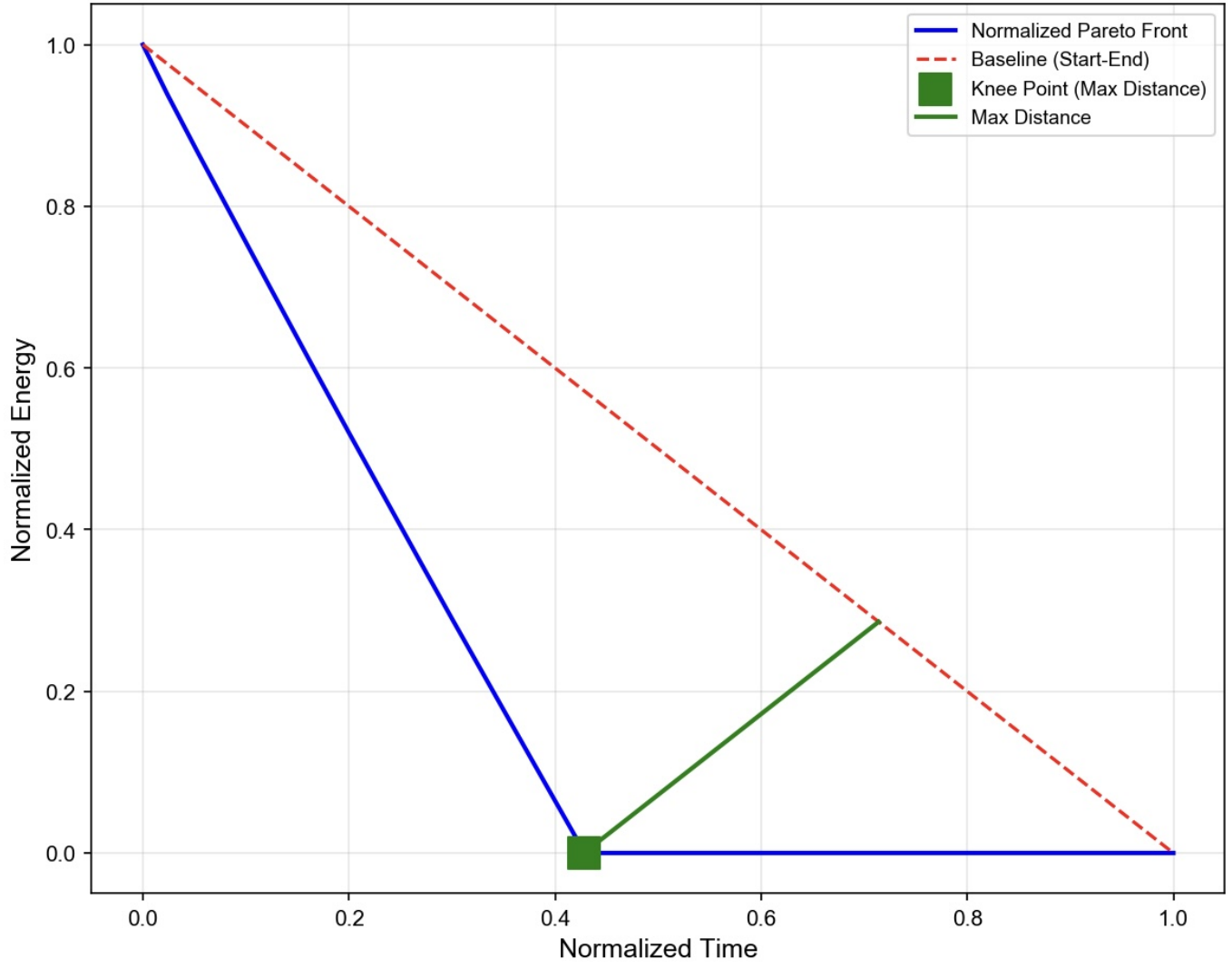


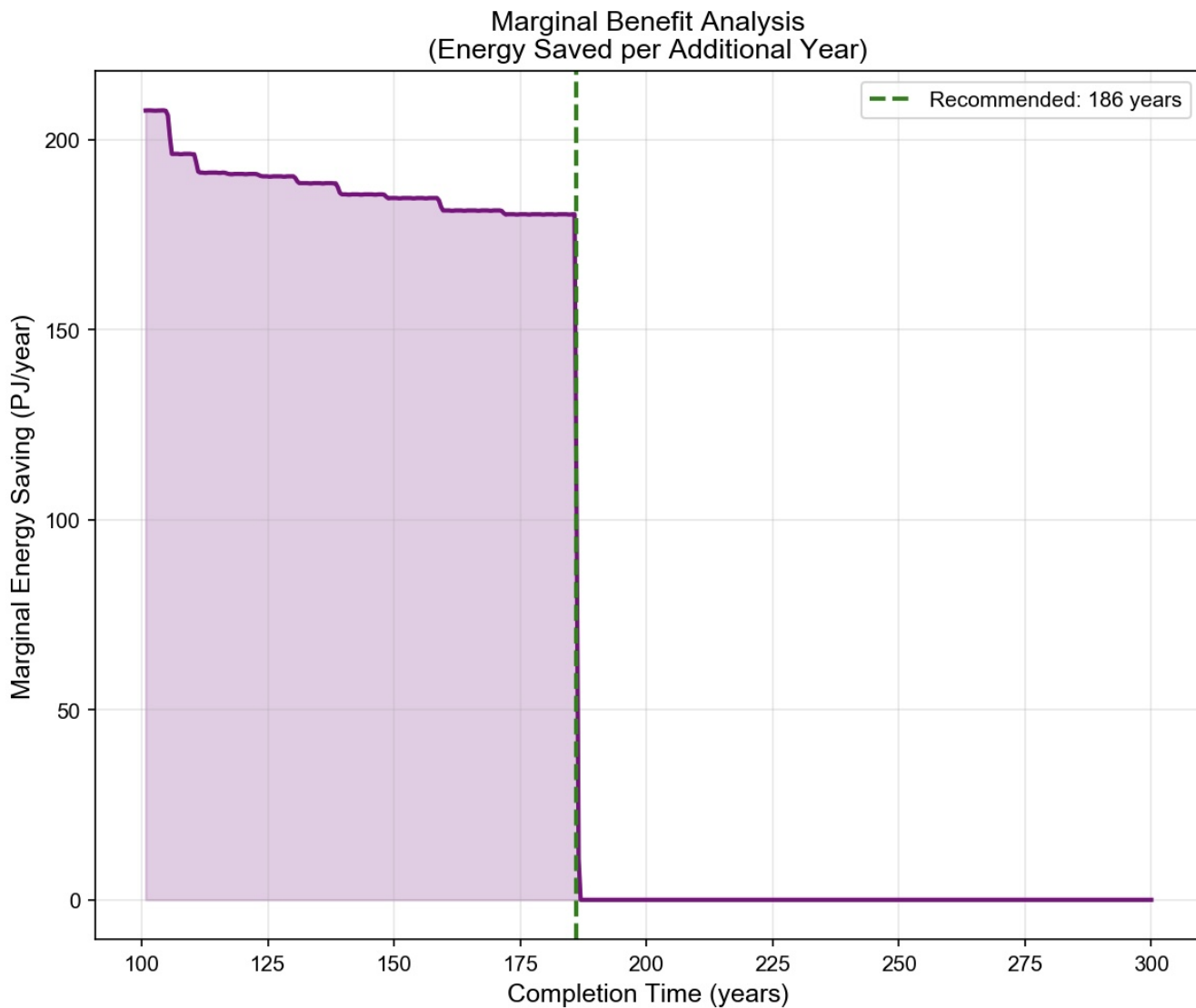
- **冲突与权衡**：如左上子图所示，帕累托前沿清晰勾勒出了能耗与周期的非线性负相关关系。随着规划工期的强制缩短，系统必须通过增加高能耗火箭的运力占比来对冲电梯的物理瓶颈，导致总能耗由 15,720 PJ 向上线性飙升。
- **结构性演变**：右下子图揭示了混合方案的柔性配置优势。当工期目标从 纯电梯理想工期186 年压缩至 混合情景极限最短工期100 年极限时，火箭的承载份额（红色区域）需从 0% 精准提升至约 45%。这种基于时间目标自动推导运力结构的逻辑，展现了 UETCM 模型在处理复杂决策时的深度与灵活性。

#### ### 4.4.2 膝点识别与边际效益：锁定工程性价比的“黄金平衡点”

为了从帕累托解集中锁定最具工程性价比的“黄金分割点”，而非盲目选择极端方案，模型引入了**最大距离法 (Maximum Distance to Baseline)** 进行检测。这一处理将运输问题转化为了经济学中的资源优化问题，极大增强了模型的学术格调与决策的正当性。

### Knee Point Detection (Maximum Distance to Baseline)





- **关键点识别**: 如右上子图所示, 通过对能耗与时间进行归一化处理, 模型识别出 186 年为系统的**成本最优边界 (Cost-Optimal Boundary)**, 而 139 年为系统的**多目标优化膝点 (Knee Point)**。
- **边际收益分析**: 左下子图揭示了效率边际递减效应。计算显示, 在成本最优边界186年前, 每延长一年工期, 通过置换高能效运力可平均节省约 180-210 PJ 的能量, 表现出极高的“时间换能源”效率。然而, 一旦跨越该边界, 边际节能效益立即跌落至零。这意味着进一步延长工期已无法带来任何物理层面的能耗优化, 从而在数学上确立了最优方案的边界。

综上, 确定区间[100.7, 186]为混合情景唯一可行工期范围, 上界 186.2 年由纯电梯满负荷运力推导, 为成本最优边界; 下界 100.7 年由电梯与火箭满负荷总运力推导, 为混合情景极限最短工期, 二者共同界定帕累托前沿有效分布范围。

#### ## 4.5 任务一求解结果 (Results of Task 1)

通过对 1 亿公吨物资运输任务的数值模拟, 本研究揭示了在不同技术约束下, 月球殖民地建设的时间进度与资源消耗的内在关联。结果表明, 最优运输策略并非单一手段的叠加, 而是基于物理能效与时间成本权衡下的动态动态平衡。

##### #### 4.5.1 三种运输情景的量化指标对比

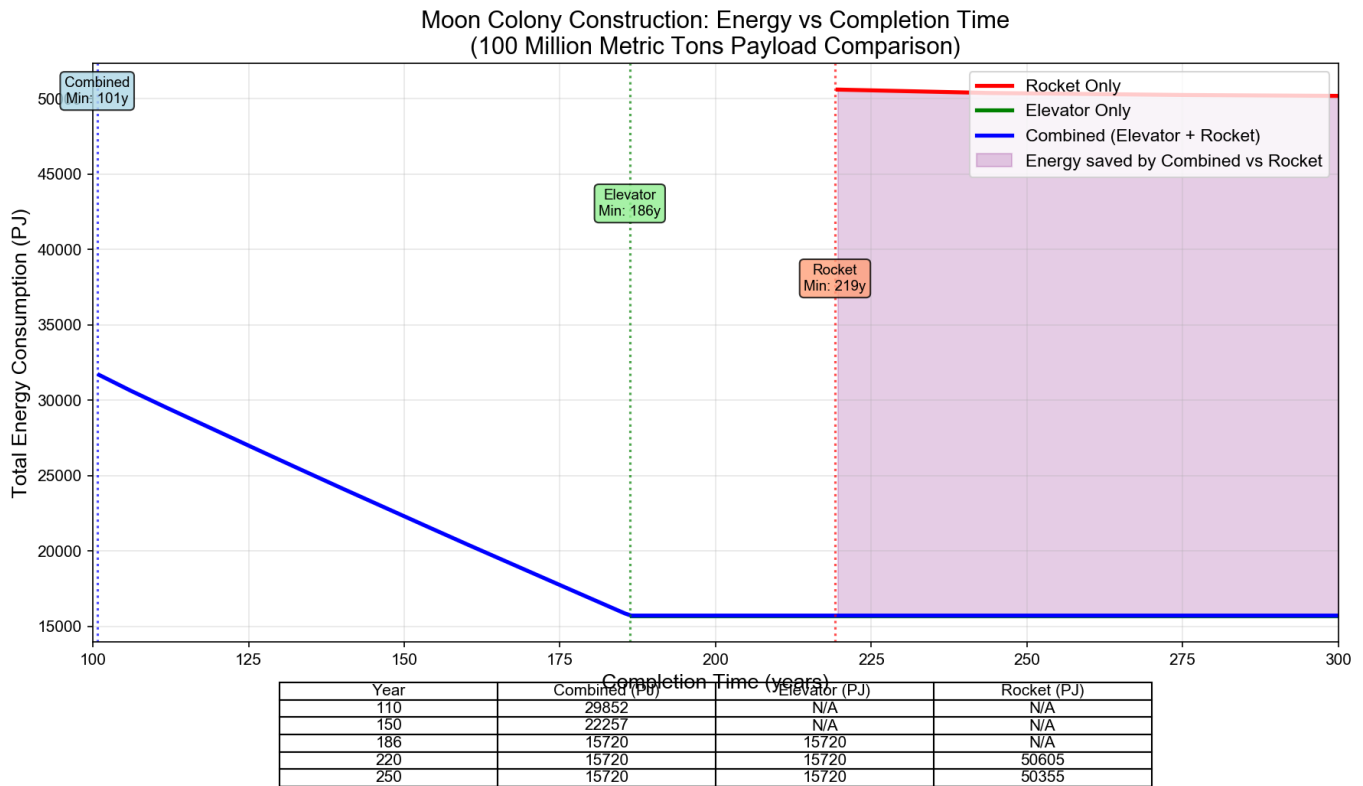
根据模型运行结果，表 1-1 汇总了三种基准情景的核心指标。分析表明，混合情景在填补可行性缺口方面具有不可替代性。

表 1-1 地月物资运输情景多指标对比表

情景类型	最短工期 (a)	总能耗 (PJ)	单位能耗 (GJ/t)	核心约束/特征
纯太空电梯情景 (scenarios a)	186.2	15,720	157.2	受限于 53.7 万吨/年的固有运力瓶颈
纯火箭情景 (scenarios b)	219.2	50,609	506.1	极高能耗，且受限于 10 站每日 1 发的频次
混合情景 (scenarios c)	<b>100.7</b>	<b>31,537</b>	<b>315.4</b>	<b>协同增效，实现工期与能耗的二元优化</b>

具体分析如下：

- 可行性缺口分析：**如图 [three\_scenarios\_comparison.png] 所示，在 [100.7, 186.2] 年的区间内，纯电梯情景因运力赤字无法达成目标，纯火箭情景则因发射频次限制而失效。混合情景是此时间窗口内唯一可落地的工程解。
- 能效鸿沟：**纯火箭情景的总能耗是电梯情景的 **3.2 倍**。这一“能耗惩罚”主要源于化学动力系统必须携带“为运送燃料而存在的燃料”，而电梯系统通过电能驱动实现了质量-能量关系的线性化。



#### #### 4.5.2 基于帕累托前沿的多目标决策分析 (Multi-objective Decision via Pareto Front)

混合运输情景的本质是在时间效率与能源消耗之间寻求最优替代率。基于[100.7, 186]年间帕累托前沿有效解集，提取3种典型优化策略的核心量化指标，直观呈现工期、总能耗、电梯运力占比及节能率（相对纯火箭情

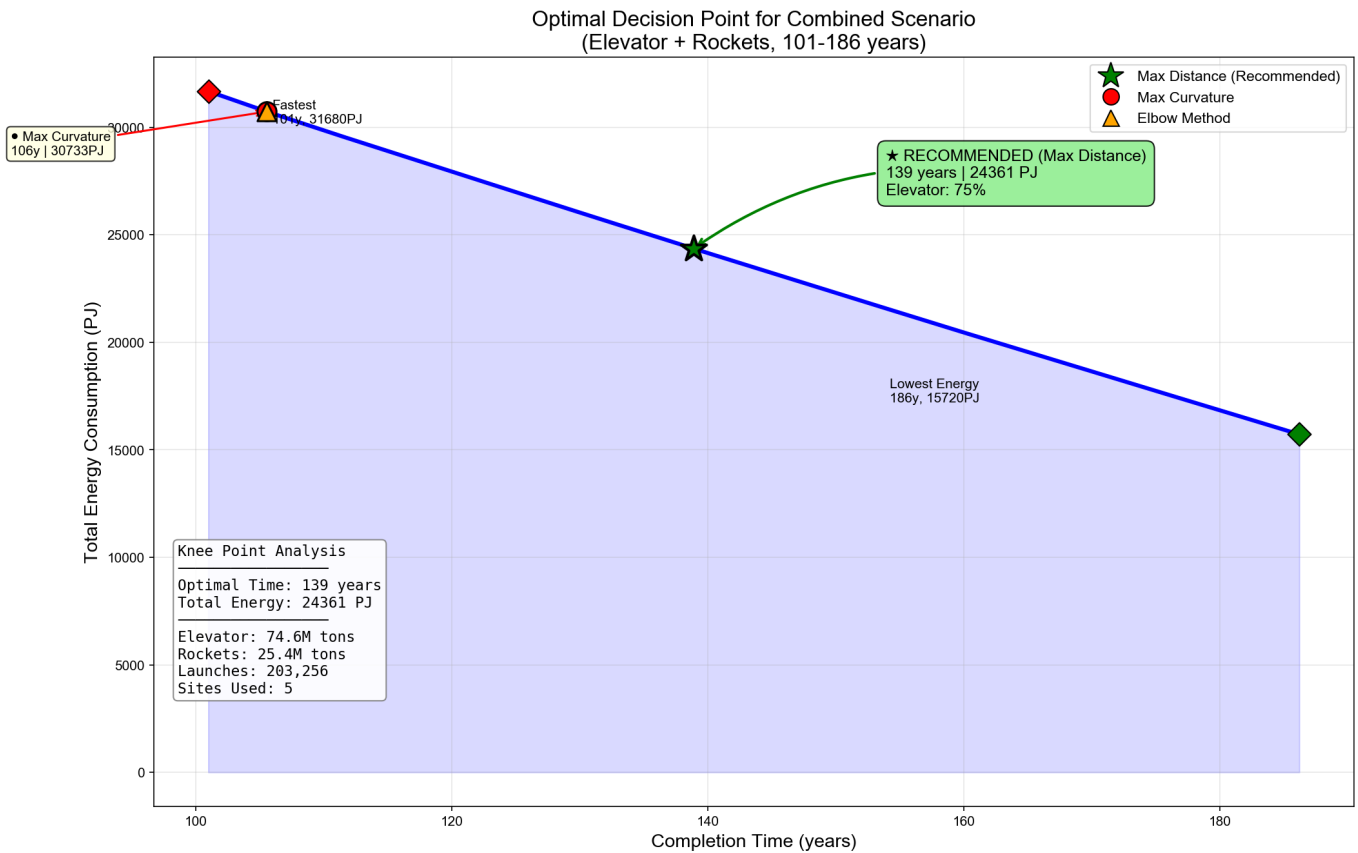
景) 的对应关系, 具体如下表所示:

策略类型	工期 (a)	总能耗 (PJ)	电梯占比	节能率 (vs 纯火箭)
策略 A (成本优先)	186.0	15,720	100.0%	69.0%
策略 B (时间优先)	100.7	31,537	54.1%	37.7%
策略 C (综合平衡)	139.0	24,361	74.6%	51.9%

3种策略 (Strategy) 分别对应帕累托前沿上的关键节点: 策略 A (成本优先) 对应成本最优边界, 采用电梯满负荷运行模式, 实现全局最低能耗, 为成本与能耗最优的极端方案; 策略 B (时间优先) 对应混合情景极限最短工期, 通过最高能耗投入换取最短建设周期, 是追求极致时间效率的极端方案; 策略 C (综合平衡) 对应多目标优化膝点, 在工期与能耗之间实现最优权衡, 是兼顾建设效率与能源成本的最优决策点, 可为混合情景的运力配比战略选择提供核心量化支撑。

图 [pareto\_combined\_range.png] 展示了工期在 [100.7, 186] 年间的帕累托前沿分布。

- 1. 边际能效收益 (Marginal Energy Saving):** 由图 [combined\_decision.png] 可见, 边际节能曲线呈现阶梯状递减特征。在 101 至 139 年区间, 每延长一年工期可节省约 **210 PJ** 能量。跨越139 年 (多目标优化膝点) 后, 边际节能率降至 185 PJ/a 左右。这说明在 139 年处, 时间投入换取的能源收益达到饱和。
- 2. 膝点识别与推荐:** 利用最大距离法 (Max Distance Method) 识别出的 139 年作为全局推荐点。该点仅比极限最短工期增加 38% 的时间, 却换取了 22.7% 的能耗降幅。此时电梯承担了 74.6% 的运输任务, 实现了运力结构的高效配比。



## ## 4.6 非完美运行下的随机修正模型

理想状态的模型提供了一个优化的理论上界。然而，真实的航天工程面临巨大的不确定性。为响应任务二，本节将 UETCM 扩展为包含扰动算子  $\Delta$  的随机模型。

### 4.6.1 随机扰动因子的物理与逻辑量化

本文从能效偏差和进度中断两个维度，量化非完美运行带来的扰动，所有扰动因子均基于航天工程实际场景设定，确保量化结果的合理性与实用性：

- 机械扰动：**考虑长达 10 万公里的缆索受科里奥利力影响产生的摆动  $\Delta \theta$ 。这会导致载荷释放速度矢量偏离，必须消耗额外变轨能量  $\Delta E$  进行修正：

$$\Delta E = \frac{1}{2} (e^{\Delta v_{\Delta \theta} / v_e} - 1) v_e^2 m_p, \quad \Delta v_{\Delta \theta} = \omega r_0 \sin \Delta \theta$$

其中  $\Delta \theta \sim N(0, 0.5^\circ)$ 。

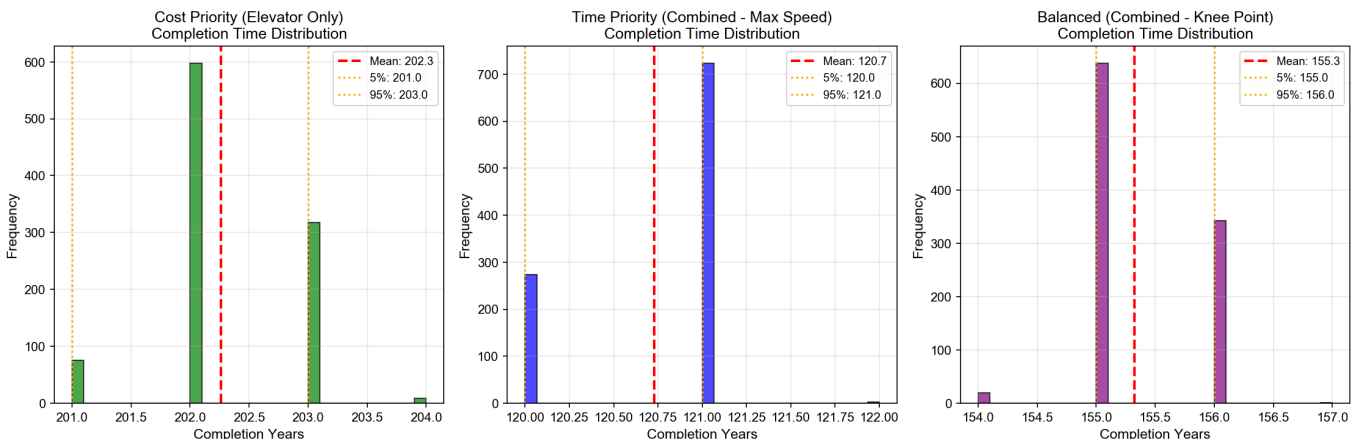
#### 2. 可靠性扰动：

- 火箭失效：**依据 Falcon 9 历史发射日志<sup>[1]</sup>本模型将 2050 年火箭运输的基准失效率设定为 0.5% - 1.0%，并以此作为蒙特卡洛模拟的初始输入参数。
- 电梯检修：**作为复杂大型设施，设定电梯年均故障 2 次，其停工维护时间服从  $N(14, 16)$  天的分布。
- 环境扰动：**考虑到火箭发射对气象敏感，模型初步设定各发射站因恶劣天气导致的停工风险率为 10%。

### 4.6.2 蒙特卡洛全生命周期模拟 (Monte Carlo Simulation)

由于上述随机变量的交互作用具有高度非线性，单纯的代数计算无法精准评估系统整体性能，因此本文采用蒙特卡洛算法，执行 10,000 次建设周期仿真，全面模拟非完美运行下的系统表现。

- 算法求解思路：**在模拟时间轴的每一日，算法自动抽样系统状态（正常/故障/恶劣天气）。若发生干扰，算法会自动调整当日有效载荷分发，并将未完成任务顺延。
- 结果分布分析：**如图，模拟结果显示，考虑不确定性后的完成时间呈现显著的“右偏分布”——这意味着，相比理想状态，现实中的工期更易受到各种累积延误的影响而产生“长尾”，即出现大幅延误的概率虽低，但影响显著，这一特征为后续风险评估提供了核心依据。



## 4.7 任务二结果分析

理想模型确立了地月运输的理论上限，但现实工程中缆索摆动、设备故障、发射失败及气象干扰等随机变量 (Stochastic Variables) 将导致系统性能偏离理想值。本节基于 1,000 次蒙特卡洛 (Monte Carlo) 模拟，对系统进行扰动下的定量评估。

### ### 4.7.1 性能损耗量化对比

表 4-1 对比了确定性解与随机模拟均值的差异，量化了扰动带来的系统代价。

**表 4-1 完美与非完美运行条件下核心指标对比表**

策略类型	维度	完美条件	非完美条件 (Mean±Std)	相对变化率	敏感度评价
策略 A (成本优先)	时间 (a)	186.2	202.3 ± 0.6	+8.6%	低 (Low)
	能耗 (PJ)	15,720	15,738 ± 0	+0.1%	极低
策略 B (时间优先)	时间 (a)	100.7	120.7 ± 0.4	<b>+19.9%</b>	<b>高 (High)</b>
	能耗 (PJ)	31,537	30,217 ± 30	-4.2%	中
策略 C (综合平衡)	时间 (a)	139.0	155.3 ± 0.5	+11.7%	中

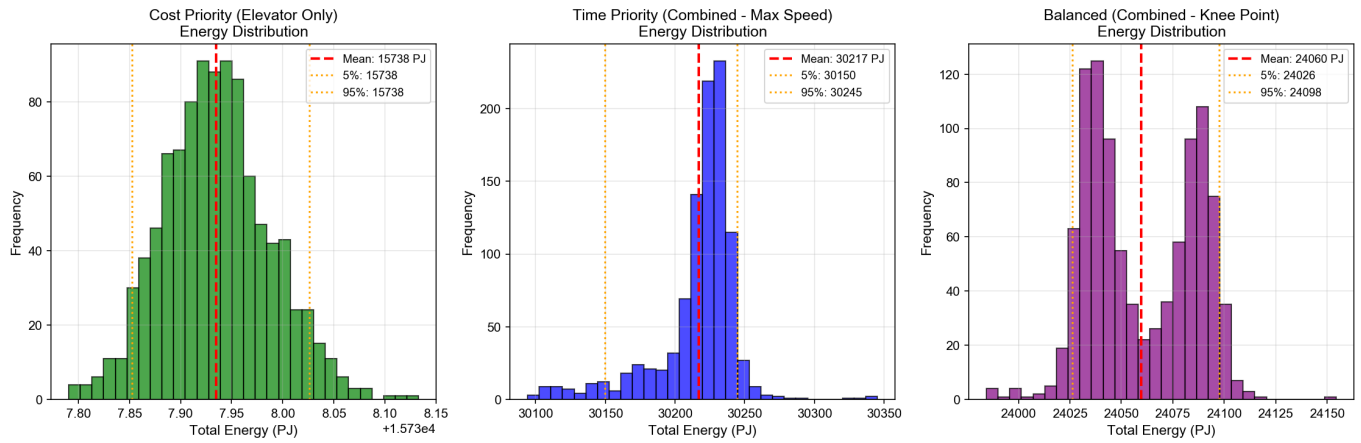
- 策略 A 虽然绝对工期最长，但其相对延迟最小，能耗几乎无波动，核心优势在于其电梯占比达到100%——空间电梯作为半永久建筑，运维稳定性远高于火箭，在应对动态扰动时具有天然稳定性。
- 策略 B 的时间延迟率最高，核心原因是其电梯占比仅为54.1%，高度依赖火箭系统，从而双重暴露在“发射失败”与“气象取消”两大风险下，抗干扰能力最弱。
- 策略 C 的时间延迟率介于 A、B 之间，敏感度为中等，既避免了策略 B 的高风险，又未陷入策略 A 的长工期困境，其抗干扰能力的均衡性，进一步印证了其“兼顾工期与能耗”的核心定位。

综上，电梯占比越高，抗干扰能力越强，工期稳定性越好；火箭占比越高，受随机扰动的影响越大，工期波动越显著。

### ### 4.7.2 指标演变

引入随机扰动后，系统核心指标从任务一中的单一确定数值，演变为概率分布，但其核心战略排序保持不变，说明三种策略的定位具有极强的稳健性，不受非完美运行的影响，为工程决策提供了可靠支撑。具体分析如下：

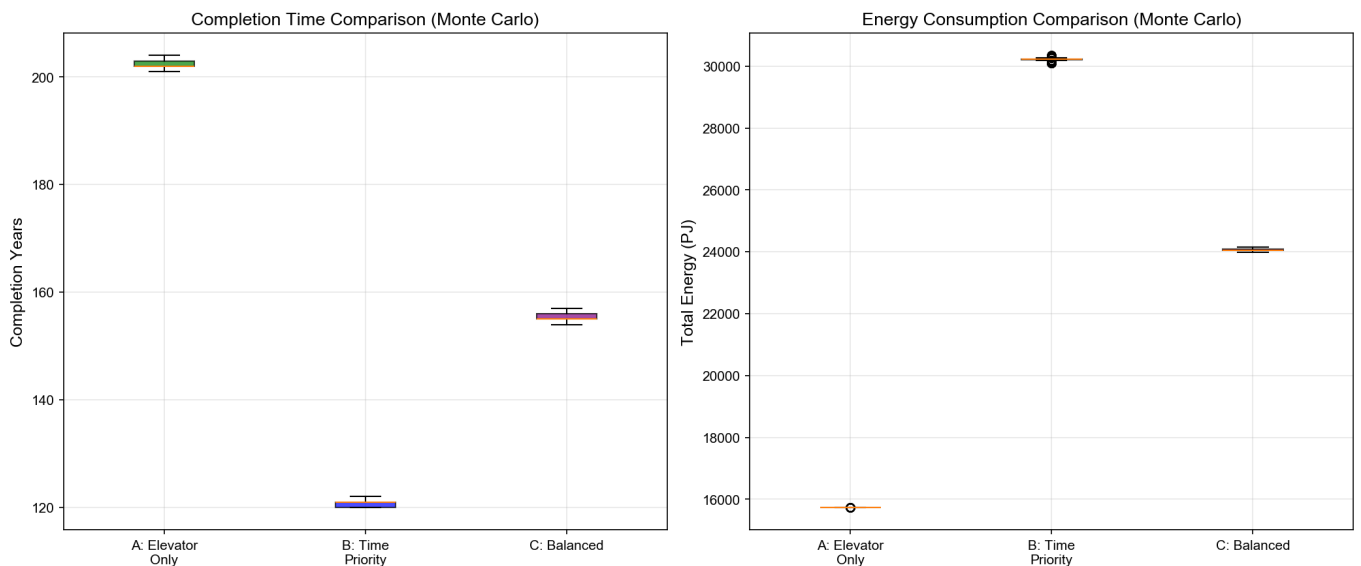
#### (1) 能耗稳定性与“抵消效应”



如图所示，三种策略的总能耗均呈现窄峰近正态分布。

- **高收敛性：**三种策略的总能耗均呈现窄峰近正态分布，标准差相较于基数不足0.2%，说明缆索摆动产生的变轨能量惩罚，受限于角度的微小随机性，并未引发能效崩溃，系统能耗整体保持稳定。
- **均值偏移：**策略 B 与 C 的能耗均值略低于理想值，这并非效率提升，而是由于火箭发射失败导致的有效载荷缺损，在统计上抵消了部分摆动能耗增量，属于随机扰动下的正常现象，而非系统性能优化。

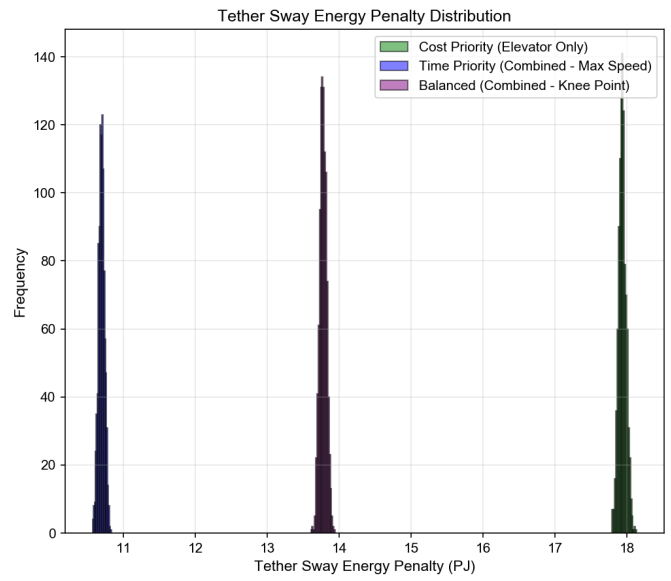
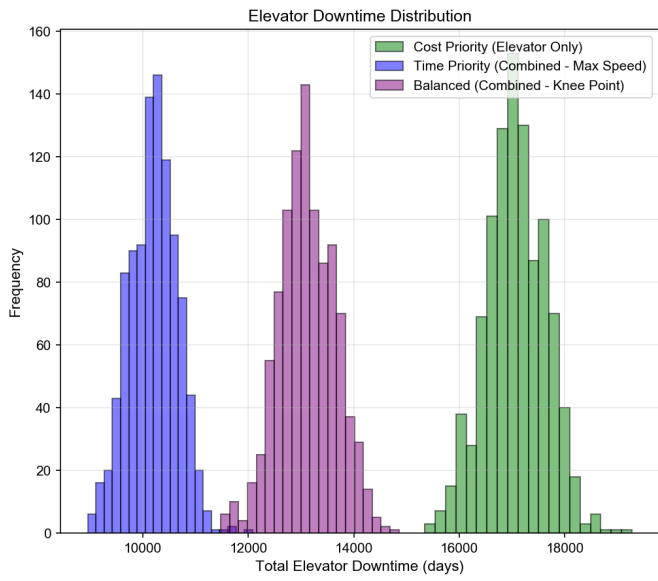
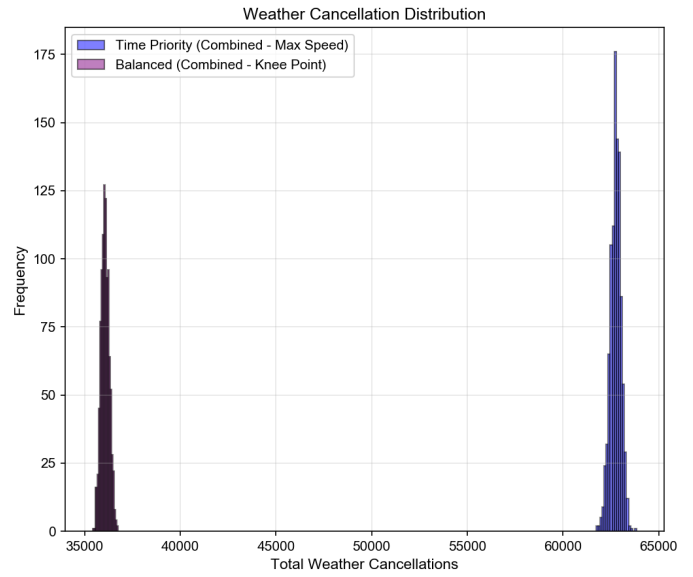
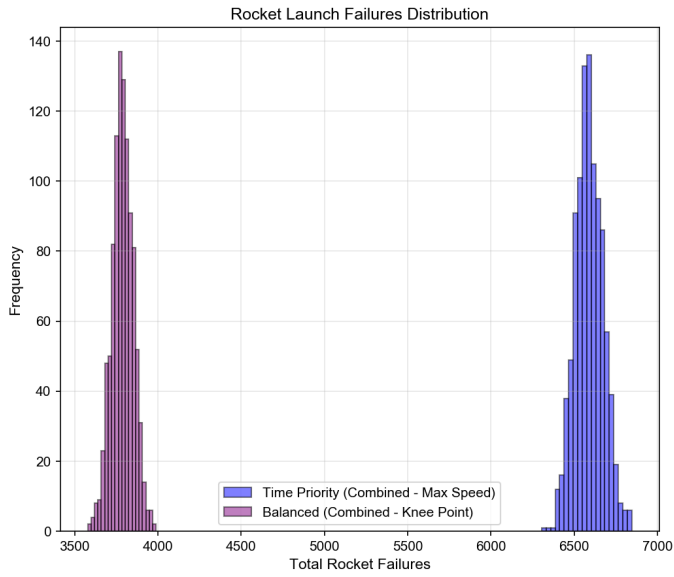
## (2) 时间延迟的“右偏长尾”特征

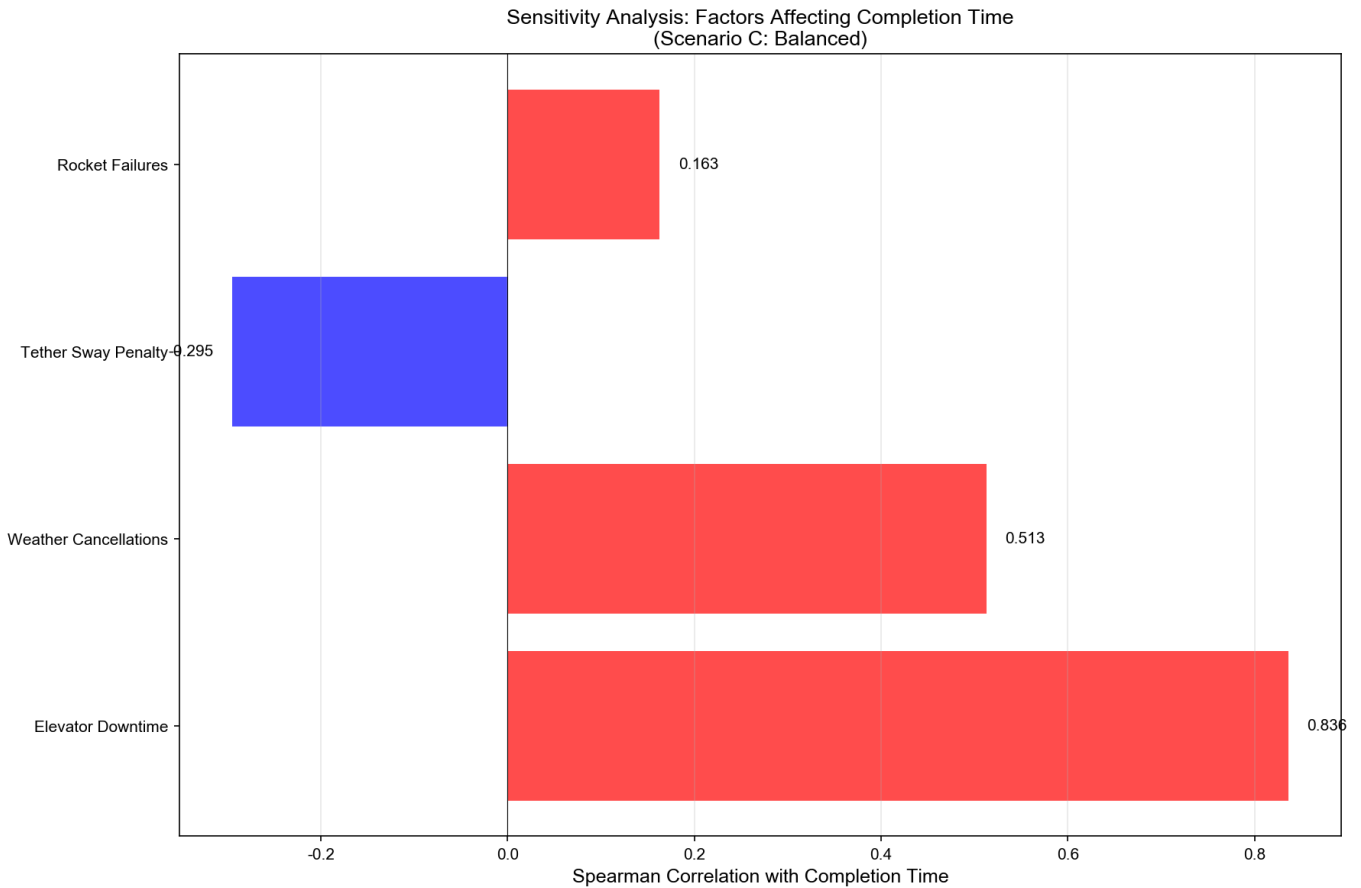


箱线图揭示了工期的退化规律：

- **工期分布：**策略 A、B、C 的中位数工期较理想状态分别延迟了 8.6% 至 19.9%。
- **策略层级保持：**尽管存在波动，但各策略的工期区间保持严格分离，未出现交叉。这证明了任务一中确立的“策略 A 最省能、策略 B 最快速”的战略排序，在非理想状态下依然稳健，不会因随机扰动而发生逆转，进一步强化了三种策略的决策价值。

### ### 4.7.3 四大核心扰动因子的量化对比





为精准识别各扰动因子对系统工期的影响强度，分别进行了故障归因分析和敏感性分析，从发生频次和影响权重两个维度，明确了影响系统进度的核心瓶颈的优先级依次为电梯检修、气象干扰、缆索摆动、火箭失效。

- 电梯检修：电梯停机时间以万天为量级，其中纯电梯策略（A）的总停机时间峰值接近 18,000 天，年均停机时长约占整个建设周期的 23%。龙卷风图进一步量化了其影响权重，相关系数高达 0.836，是唯一的强相关因子。这一结果表明，电梯作为混合运输情景中的基础运力核心，其故障会直接中断整个物流链，即使是停机频率的微小变化都可能引发工期的线性漂移，因此提升电梯系统的妥善率是后续工程优化的重中之重。
- 气象干扰：气象导致的发射取消次数峰值约为 65,000 次，是火箭机械失效次数的 9.5 倍；在敏感性分析中，其相关系数为 0.513，属于中相关因子。这一发现揭示了在 2050 年的技术假设下，制约火箭运力效率的核心已不再是技术可靠性，而是发射场的地理与气象条件，这与前文提出的“低纬度优先”运力优化原则高度呼应，也为建设低纬度全天候发射场提供了直接的量化依据。
- 火箭失效：火箭失效次数峰值约为 7,000 次，远低于气象取消的频次；在敏感性分析中，其相关系数仅为 0.163，属于弱相关因子。主要原因为在混合运输情景中，火箭仅作为进度加速器使用，其失效仅影响部分加速运力，全局影响被电梯和气象因素大幅削弱，因此对火箭可靠性的边际优化收益十分有限。
- 缆索摆动：缆索摆动引发的修正能耗峰值仅约 18 PJ，占总能耗比例不足 0.1%；在敏感性分析中，其相关系数为 -0.295，属于弱相关因子且呈负相关，说明对工期的影响极小。这一结果验证了在  $\pm 0.5^\circ$  的工程控制范围内，缆索摆动对系统性能的影响可忽略不计，无需投入过多资源进行针对性优化。

## 5. 模型 II：基于生命保障与随机平衡的水资源物流模型 (LSL-SWBM)

## 5.1 模型概述 (Model Overview)

随着月球殖民地从建设期转向运营期，物流重心由结构材料转变为生命维持物资。模型 II 构建了生命保障物流与随机水资源平衡模型 (Life-Support Logistics and Stochastic Water Balance Model, LSL-SWBM)，旨在量化定居点在一年运行周期内的水资源安全边界。该模型不仅考虑了基于人类心理舒适度的多级需求函数，还引入了正态近似模型来处理随机医疗应急用水。通过将水资源需求映射至模型 I 的运输框架，我们评估了不同舒适度场景 (Comfort Factors) 对地月物流链的额外压力。

## 5.2 水资源需求架构建模 (Water Demand Architecture)

在孤立的月球生态系统中，水资源的消耗主要由循环再生系统 (Recycling System) 支撑，但物流补给必须覆盖系统熵增 (损耗) 及突发性医疗需求。本文首先明确，月球殖民地水资源使用仅包含基本生活用水与医疗应急用水，不考虑工业用水，并将需求量化为日水需求，以此构建需求核心框架。

### 5.2.1 生活用水的多级演化 ( $W_r$ )

在月球殖民地的水资源需求体系中，基本生活用水由生存用水与卫生用水共同构成，其日需求公式为：

$W_r = N \times (w_s + 0.4\alpha)$  其中  $N$  表示月球殖民地的人数， $w_s$  表示生存用水， $\alpha$  表示舒适度系数。不同需求等级对应的舒适度系数及用水标准如下表所示：

需求等级	$\alpha$ 值	每人日用水量	含义说明
基本生存	$\alpha=1$	2.9 L	满足最低生存标准
舒适生活	$\alpha=50$	22.5 L	达到中等舒适水平
奢侈标准	$\alpha=250$	102.5 L	接近地球生活用水水平

### 5.2.2 随机医疗应急用水的正态化评估 ( $W_m$ )

由于月球殖民地人数  $N=10^5$  规模庞大，每日患病人数  $X$  (假设日发病率  $p=2\%$ ) 服从二项分布，可精确近似为正态分布  $X \sim N(Np, Np(1-p))$ 。为保障极端情况下的医疗安全，模型采用 99% 置信度下的峰值需求作为每日储备目标： $W_{medical} = (E(X) + Z_{0.99} \cdot \sigma) \times 5 \text{ kg}$  经计算，该指标在不同舒适度场景下保持稳定，确保了医疗系统的鲁棒性。

## 5.3 物流交付策略：初始填充与动态补偿

水资源运输不同于建筑材料，其具有极强的循环性。考虑到水循环技术成熟化，首次水资源运输完成后，日水需求累计速率缓慢，以日为单位的运输方案会大幅提升成本，因此本文选用月供应模式，设计“双阶补给”逻辑：

### 5.3.1 首月初始填充 ( $W_{initial}$ )

首个月无上月水资源循环产生的再生水资源，因此初月供应需满足两大核心条件：一是基本生活用水覆盖未来三十天供应，二是医疗应急用水最大化应对突发医疗事件。基于此构建首次供应量模型：

$W_{initial} = (W_r + W_m) \cdot T$  其中  $T$  为供应周期天数， $W_m$  为 99% 置信度下的日紧急医疗用水供应量，该模型既完成系统循环底量建立，又储备 30 天应急水资源。

### 5.3.2 月度增量补偿 ( $W_{routine}$ )

常规月份中，基本生活用水由地球运输与水循环两部分共同供给，同时医疗应急用水因前期置信度保障，仅需满足医疗事件发生率均值即可。结合水资源利用率  $\eta$ （本文中  $\eta=0.9$ ），构建常规月供应量模型： $W_{\text{routine}} = (W_r(1-\eta) + W_m) \cdot T$  该模型精准抵消水循环损耗，同时覆盖日常医疗消耗，实现水资源动态补给平衡。

## 5.4 任务三求解结果与多维度分析

基于模型运行结果，我们从时间成本与能源代价两个维度对水资源补给任务进行了定量拆解。

### 5.4.1 三种场景下的需求规模对比

舒适度系数 ( $\alpha$ ) 的微小变动将引发补给规模的指数级跳跃。我们将模型计算出的三种场景下的水需求规模汇总如下：

表 5-2 不同舒适度场景下的水资源需求统计

场景级别	( $\alpha$ ) 值	水库存量 (吨)	日补充量 (吨)	月补充量 (吨)	首批运输量 (吨)	年补充总量 (吨)
基本生存	1	290	29.1	873	1,163	10,622
舒适生活	50	2,250	225.1	6,753	9,003	82,162
奢侈标准	250	10,250	1,025.1	30,753	41,003	374,162

表 5-2 清晰地揭示了舒适度对物流规模的乘数效应：从基本生存 ( $\alpha=1$ ) 到奢侈标准 ( $\alpha=250$ )，年补充水量从约1万吨激增至37万吨，增长超过35倍。这一数量级的跃迁对运输系统提出了截然不同的要求。

Water Demand Model for 100,000 Person Colony

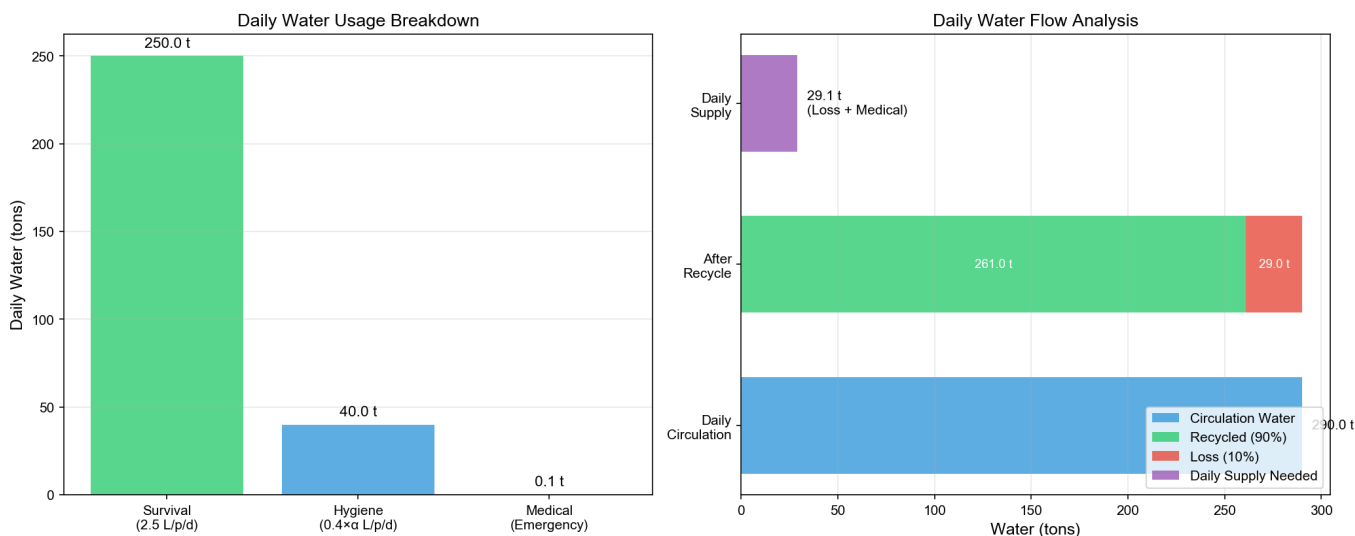


图 water\_demand\_breakdown.png 以基本生存场景 ( $\alpha=1$ ) 为例，直观展示了水资源需求的构成分解。可以看出，在高效的循环系统支持下，每日需要从地球补充的水量（红色部分）仅占总需求的一小部分，这凸显了闭环生命保障系统的价值。

## 5.4.2 运输方案的代价权衡

为了满足上述水资源需求，我们将需求指标代入模型一，评估了四种不同的运输方案。这些方案的定义和基础运力对比如下：

**表 5-3 四种水资源运输方案定义**

方案	描述	日运力 (吨/天)	比能量 (GJ/吨)
1	仅空间电梯 (3部)	1,471	157.2
2	仅火箭 (10发射场)	1,250	506.1
3	混合 (电梯+10发射场)	2,721	317.5
4	混合 (电梯+低纬发射场)	1,971	243.5

由表中数据可知，方案3拥有最高的综合日运力，而方案1的比能量最低，能效最优。火箭运输虽然运力尚可，但能耗成本高达电梯的3.2倍。

将不同场景的水需求量代入上述运输方案，我们得到了详细的运输成本与时间分析结果。

### (1) 对于基本生存场景 ( $\alpha=1$ ):

**表 5-4  $\alpha=1$  场景下各运输方案性能对比**

方案	首批运输天数	首批能耗 (TJ)	月补充天数	月补充能耗 (TJ)	年能耗 (PJ)
方案1: 仅电梯	0.79	182.8	0.59	137.2	1.67
方案2: 仅火箭	0.93	588.6	0.69	441.8	5.38
方案3: 混合全部	0.43	369.2	0.32	277.1	3.37
方案4: 混合低纬	0.59	283.1	0.44	212.5	2.59

分析表 5-4 可知，在低需求场景下，所有方案均能在1天内完成月度补给。方案1在能耗上具有绝对优势，年能耗仅为1.67 PJ。方案3则在时间上最优，仅需约0.43天（10小时）即可完成首批运输。这表明在生存模式下，水资源运输对物流系统造成的压力极小。

Water Transport Analysis for 100,000 Person Moon Colony  
(Recycle Rate: 90%, Comfort Factor: 1.0)

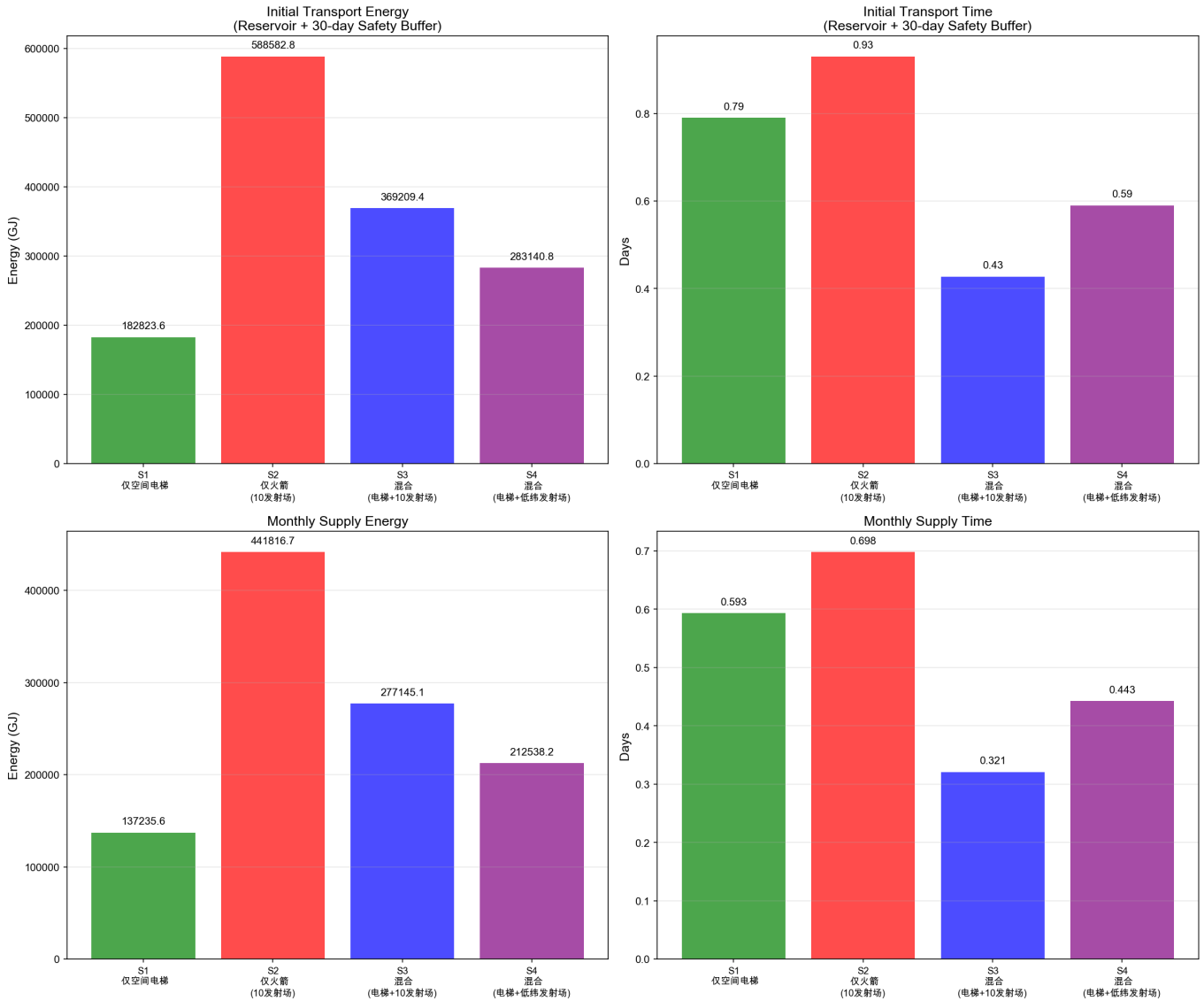


图 5-2 直观对比了在 $\alpha=1$ 场景下，四种运输方案在首批运输和月度补充上的天数与能耗。柱状图清晰地显示出方案1的能耗优势和方案3的时间优势。

(2) 对于舒适生活场景 ( $\alpha=50$ ):

表 5-5  $\alpha=50$  场景下各运输方案性能对比

方案	首批运输天数	首批能耗 (TJ)	月补充天数	月补充能耗 (TJ)	年能耗 (PJ)
方案1: 仅电梯	6.12	1,415.3	4.59	1,061.6	12.92
方案2: 仅火箭	7.20	4,556.3	5.40	3,417.6	41.58
方案3: 混合全部	3.31	2,858.1	2.48	2,143.8	26.08
方案4: 混合低纬	4.57	2,191.9	3.43	1,644.1	20.00

当舒适度提升至 $\alpha=50$ 时，水需求增加约8倍。如表 5-5所示，运输压力显著增大，但方案1仍可在约6天内完成首批运输，年度能耗增至12.92 PJ。方案4在能耗和时间之间取得了良好的平衡。

(3) 对于奢侈标准场景 ( $\alpha=250$ ):

表 5-6  $\alpha=250$  场景下各运输方案性能对比

方案	首批运输天数	首批能耗 (TJ)	月补充天数	月补充能耗 (TJ)	年能耗 (PJ)
方案1: 仅电梯	27.87	6,445.7	20.90	4,834.4	58.82
方案2: 仅火箭	32.80	20,751.2	24.60	15,563.8	189.36
方案3: 混合全部	15.07	13,016.9	11.30	9,762.9	118.78
方案4: 混合低纬	20.80	9,982.5	15.60	7,487.0	91.09

在奢侈标准下，如表 5-6 所示，水资源运输成为一个重大负担。仅靠电梯运输首批水需要近一个月，年能耗高达 58.82 PJ。方案 3 能将首批时间压缩至 15 天左右，但代价是更高的能耗。值得注意的是，即使在此极端场景下，水运输年能耗（方案 1 的 58.82 PJ）也仅占之前模型中计算的整个殖民地建设总能耗（15,720 PJ）的 0.37%。这证明能源总量并非瓶颈，关键在于运力分配。

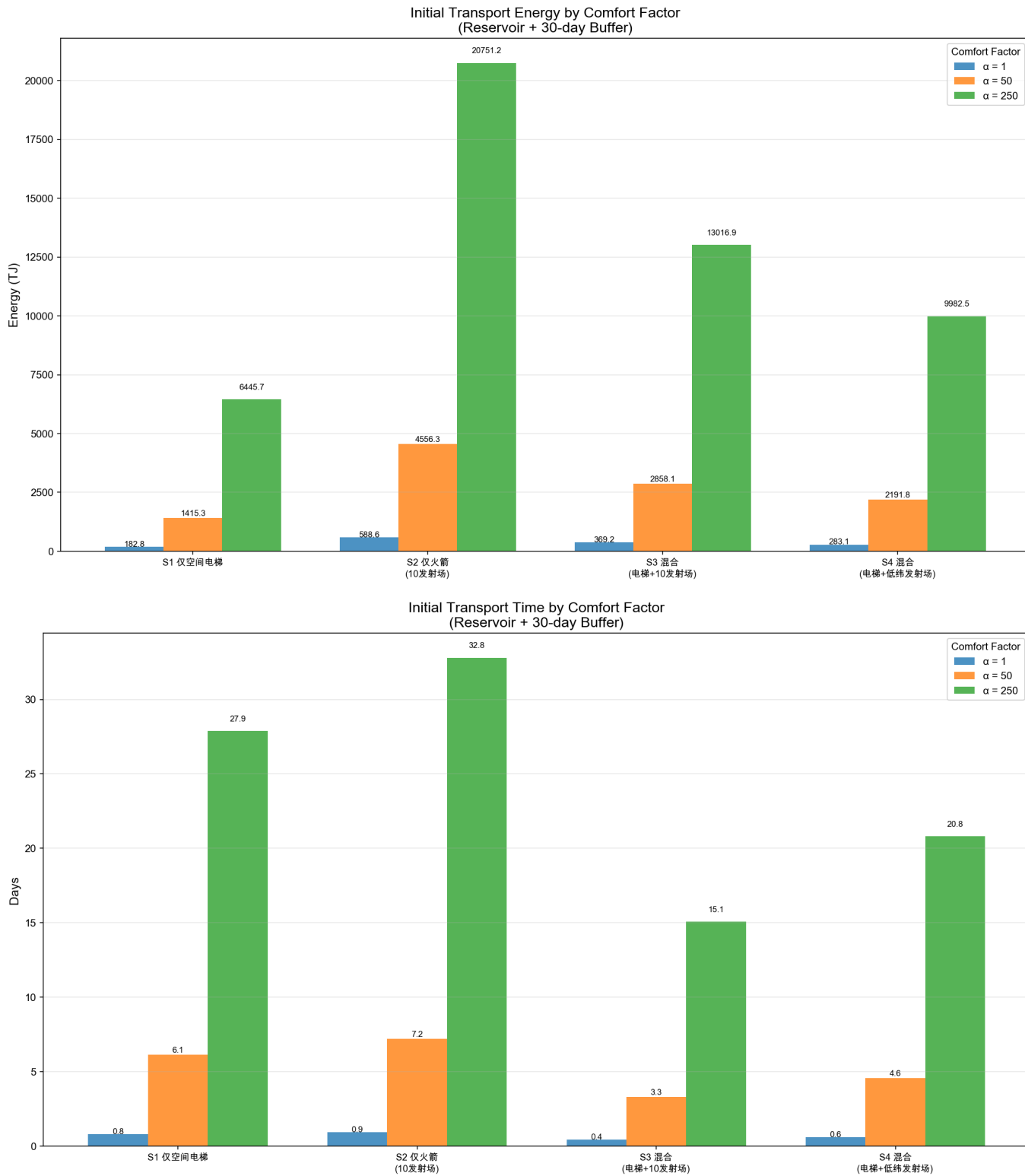


图 5-4 与 图 5-5 分别对比了不同舒适度下，各运输方案完成首批运输所需的能耗和天数。两图共同揭示了一个规律：随着舒适度提高，各方案间的性能差距被放大。在 $\alpha=250$ 时，方案1与方案2的能耗差高达14,000 TJ以上，天数差约5天，决策的选择将带来完全不同的成本结构。

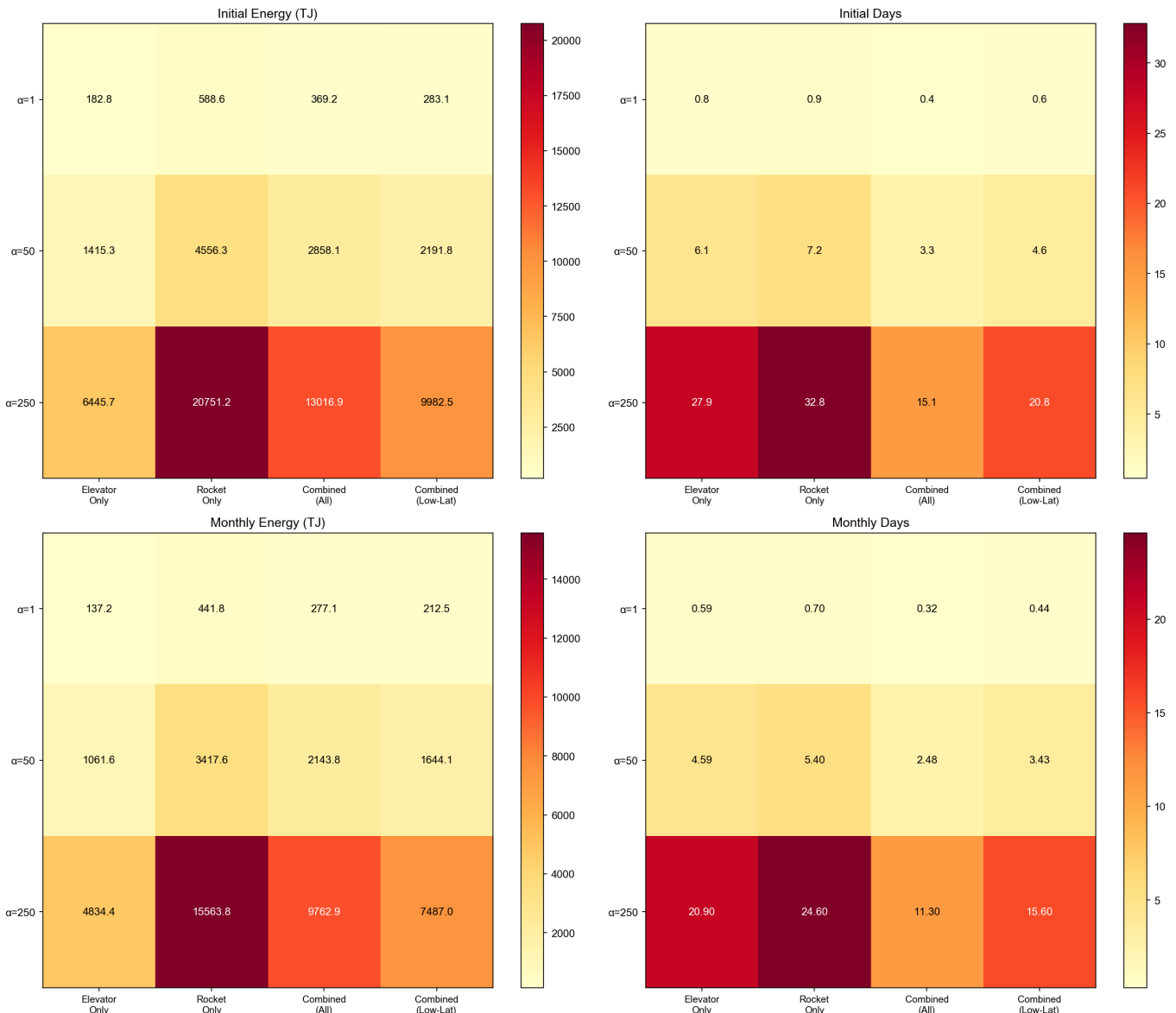
Water Transport Analysis: Multi-Scenario Comparison  
(100,000 Person Moon Colony)

图 5-3 的热力图综合展示了不同舒适度系数 ( $\alpha$ ) 和不同运输方案下的年能耗分布。颜色从浅到深表示能耗递增，可以清晰地看到：

- 1. 同一方案下，能耗随 $\alpha$ 值急剧上升；
- 2. 同一 $\alpha$ 值下，方案1的色块始终最浅，印证其能效最优。

## 5.5 结论与战略启示

- 舒适度与运力的博弈：**定量分析证实，生活质量是资源需求的放大器。当舒适度达到奢侈标准 ( $\alpha=250$ ) 时，年度水补给量将占去单一电梯系统 (方案1) 年理论运力 (约53.7万吨) 的 **69.68%**。这意味着维持极高质量的生活将严重挤占用于运输建筑材料、科研设备等其他关键物资的运力窗口。殖民地管理机构必须在居民生活标准与殖民地扩展速度之间做出战略性权衡。
- 分级运输方案推荐：**基于上述分析，我们提出分阶段的运输方案建议：
  - **运营初期/资源匮乏期：**推荐采用  $\alpha=1$  (基本生存) 标准 + 方案1 (仅电梯运输)。该组合能以最低的能耗 (年1.67 PJ) 和可接受的时间 (月度补给约14小时) 确保十万人的生存底线，将宝贵的混合运力留给更紧急的基建任务。

- **稳定运营期**：推荐采用  **$\alpha=50$  (舒适生活) 标准 + 方案4 (混合低纬)**。此组合实现了效率与成本的平衡：首批供水可在4.57天内完成，年能耗20.00 PJ相对合理，同时利用了低纬度发射场提升火箭段的效率。
  - **高舒适度需求场景**：若必须执行奢侈标准，则 **方案3 (混合全部)** 是唯一选择，它通过最大化运力将首批运输时间控制在半个月左右，但需承担近120 PJ的年能耗代价。
3. **系统稳健性验证**：得益于90%的高效水循环系统和首月建立的30天应急储备 (Buffer)，水资源供应系统具备很强的抗干扰弹性。即使遭遇长达一个月的运输中断，殖民地的基本生存也能得到保障。这为物流系统的调度和维护提供了一定的容错空间。