# 地球至月球物流体系的大气环境影响深度评估报告：太空电梯与传统化学火箭的量化对比分析

## 绪论

随着人类文明迈向2050年，月球殖民计划（Moon Colony）已从科幻构想转变为具体的基础设施建设目标。根据月球殖民管理机构（MCM Agency）的预测，建立一个容纳10万人的永久性月球基地需要向月球运送约1亿公吨（100 million metric tons）的物资。这一前所未有的运载需求对地球大气环境构成了巨大的潜在威胁。传统的化学火箭技术虽然日益成熟，但其在平流层及以上大气层留下的燃烧产物和再入大气层产生的氮氧化物，可能引发不可逆的全球气候变化和臭氧层损毁。与此同时，太空电梯系统（Space Elevator System），特别是“银河港湾”（Galactic Harbour）架构的提出，为人类提供了一种基于电力驱动、零排放的潜在替代方案。

本报告旨在通过详尽的数据搜集与量化建模，深入探讨太空电梯与纯火箭发射方案在不同大气污染指标上的表现。分析的核心在于区分低层大气（对流层）与高层大气（平流层、中间层、热层）对污染物的不同敏感度，并量化黑碳（BC）、氧化铝（）、氮氧化物（）、水蒸气（）和二氧化碳（）等关键指标的排放强度及环境效应。

## 大气层垂直分层与污染敏感度分析

理解航天活动环境影响的前提在于认识大气层的垂直结构。对流层作为最底层，其空气混合剧烈，污染物通常在数天至数周内通过降水等天气过程被清除。然而，平流层（约10至50公里）由于温度逆增，其动力学性质相对稳定，注入该层的污染物可停留3至5年之久。这一长周期的积累效应使得即便是少量的排放也可能产生显著的辐射强迫（Radiative Forcing）和化学反应。

火箭在发射过程中穿透所有大气层，将燃烧产物直接注入平流层和中间层，而太空电梯的攀爬器则通过电力推进，在上升过程中不产生化学废气。此外，卫星和火箭残骸再入大气层时，在60至90公里的高空通过摩擦加热产生大量的热动力氮氧化物，这也是传统方案中常被忽视的污染源。

| **大气层级** | **高度范围 (km)** | **主要环境敏感点** | **污染物停留时间** | **核心污染来源** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 对流层 | 0 - 15 | 空气质量、酸雨 | 数天 - 数周 | 发射台燃烧、低空飞行 1 |
| 平流层 | 15 - 50 | 臭氧层保护、辐射平衡 | 3 - 5 年 | 黑碳、氧化铝、氯化物 2 |
| 中间层 | 50 - 85 | 极地平流层云 (PSCs) | 数月 - 数年 | 水蒸气、再入氮氧化物 4 |
| 热层/电离层 | 85+ | 电子密度扰动 | 变量 | 轨道操作排放 6 |

## 传统火箭发射的大气污染指标量化

传统火箭方案依赖化学能，其污染物指标受推进剂类型影响极大。目前主流推进剂包括煤油（RP-1）、液态甲烷（）、液态氢（）和固体燃料（Solid Propellant）。

### 黑碳（Black Carbon, BC）的辐射强迫效应

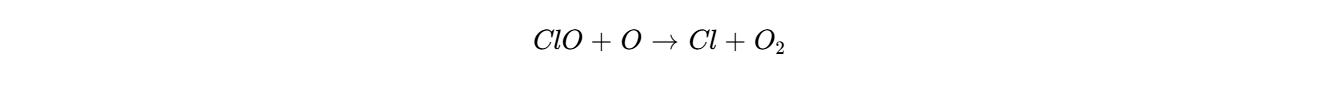
黑碳是煤油和甲烷推进剂不完全燃烧的产物。在平流层中，黑碳具有极强的吸光性，被称为“黑遮阳伞”。研究表明，平流层黑碳产生的单位质量辐射强迫比地表或航空来源高出约500倍 7。这是因为黑碳在稀薄的高空能更有效地吸收太阳短波辐射，并加热周围空气，进而改变全球大气环流。

一个典型的重型运载火箭（如Falcon Heavy，使用煤油燃料）在一次发射中向平流层排放约10吨黑碳 2。根据2020年代的观测数据，火箭排放的黑碳排放指数（EI）在30至50 g/kg之间，远高于航空发动机 2。如果为了建设月球殖民地而进行大规模发射，平流层黑碳的年注入量可能从目前的不到1千吨飙升至数万吨。模拟显示，10 Gg/年的黑碳注入将导致平流层升温约1.5 K，并削弱北半球副热带喷流速度达5 m/s 2。

### 氧化铝颗粒与平流层化学

固体火箭助推器排放大量的微米级氧化铝（）颗粒和气态氯。氧化铝颗粒不仅具有正向的辐射强迫（吸收地面长波辐射），还作为非均相化学反应的载体，加速臭氧损耗 8。固体燃料中的氯化物直接注入臭氧层，通过催化循环反应：





极大地提高了平流层的臭氧消耗潜能 9。

### 氮氧化物（）的多重来源

火箭方案中的氮氧化物来源主要包括两个过程：一是发动机的高温燃烧（Combustion ），二是高速飞行体与大气摩擦产生的热动力氮氧化物（Re-entry ）。

对于可重复使用火箭（如Starship），再入过程中的污染不可忽视。研究估算，再入飞行器在50公里以上高度产生的氮氧化物质量可达其自身质量的100%，而在50公里以下则约为17.5% 7。随着发射频率的增加，再入产生的对平流层臭氧的威胁正逐渐追平固体火箭排放的氯化物。

| **推进剂类型** | **黑碳 (g/kg)** | **氧化铝 (g/kg)** | **氮氧化物 (g/kg)** | **水蒸气 (g/kg)** | **二氧化碳 (g/kg)** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 煤油 (RP-1) | 35 | 0 | 14 | 300 | 高 7 |
| 液态甲烷 (CH4) | 4 | 0 | 14 - 20 | 550 | 中 7 |
| 液态氢 (LH2) | 0 | 0 | 33 | 1000 | 0 7 |
| 固体燃料 | 4 | 380 | 3 | 370 | 低 7 |

## 太空电梯系统：零排放攀爬与“绿色之路”

太空电梯提供了一种截然不同的物流思路。通过三座“银河港湾”（Galactic Harbours），该系统利用电能驱动攀爬器沿着10万公里长的石墨烯缆绳上升 10。这一过程在原理上实现了运行阶段的“零大气污染”。

### 攀爬器的电力驱动机制

太空电梯的攀爬器不需要携带反应质量，其动力源可由地面激光束传输或携带的高效太阳能板提供 11。这意味着在地球大气的各层中，攀爬器不产生黑碳、氧化铝或燃烧产生的。相比于火箭方案，太空电梯避免了齐奥尔科夫斯基火箭方程（Tsiolkovsky Rocket Equation）带来的指数级燃料消耗，因为它不需要通过抛射质量来克服重力。

### 顶点锚点（Apex Anchor）之后的火箭操作

根据MCM机构的规划，物资首先通过电梯到达顶点锚点（AA），然后再由火箭运往月球 10。这一策略的优越性在于：顶点锚点位于10万公里高空，远远超出了地球大气层的范围。在这一高度发射火箭，其排气产物直接进入外层空间或太阳风，不会与地球的平流层或中间层产生任何交互作用。

此外，从顶点锚点出发前往月球所需的增量速度（Delta-v）远低于从地球表面出发。从地表发射至月球通常需要约12至15 km/s的总$\Delta v$，而从10万公里的顶点锚点释放，由于利用了电梯末端的高切向速度（约7.76 km/s），前往月球的额外动力需求极小，甚至在某些窗口下可以实现“投掷”式释放 13。

## 1亿公吨物资运输任务的量化对比

假设2050年需要完成1亿公吨的月球物资运输，我们将对比两种极端方案的累计污染指标。

### 方案一：纯火箭机队（以Starship为基准）

Starship目标载荷约为100至150吨至月球 10。完成1亿公吨任务约需1,000,000次发射。

* **二氧化碳排放**：单次Starship发射产生约76,000吨（二氧化碳当量）16。总排放量将达到760亿吨，这相当于目前全球年总排放量的两倍。
* **黑碳注入**：假设单次甲烷燃料火箭注入平流层4吨黑碳（较煤油方案已大幅减少），总注入量将达400万吨。这将引发全球性的平流层加热效应。
* **水蒸气与中间层云**：注入平流层和中间层的数亿吨水蒸气将显著增加极地平流层云的频率，改变全球反照率并破坏高层大气化学平衡。

### 方案二：太空电梯（银河港湾系统）

电梯系统设计年运载能力为179,000吨 10。虽然要完成1亿吨任务需要相当长的时间或多条电梯并运行，但其污染强度如下：

* **运行阶段排放**：0。
* **顶点锚点释放排放**：虽有燃料消耗，但其排气处于外逸层，对地球大气无环境贡献 12。
* **基础设施建设成本**：制造10万公里长的石墨烯缆绳需要约37,800吨石墨烯 12。

| **污染指标 (累计)** | **纯火箭方案 (100万次发射)** | **太空电梯方案 (运行阶段)** |
| --- | --- | --- |
| 平流层黑碳 (BC) | ~4,000,000 吨 | 0 |
| 二氧化碳 () | ~76,000,000,000 吨 | 0 |
| 氮氧化物 () | ~15,000,000 吨 | 0 |
| 平流层水蒸气 () | ~500,000,000 吨 | 0 |
| 再入热动力 | 极高 (由于重复使用) | 极低 |

## 生命周期评估（LCA）：石墨烯生产的环境足迹

为了公平对比，必须考虑太空电梯建设阶段的污染。石墨烯是电梯缆绳的核心材料。

目前单晶石墨烯或石墨烯超层压板（GSL）的生产仍处于实验室向工业化过度的阶段。传统的化学气相沉积（CVD）法能耗极高。然而，新兴的“闪烁焦耳加热”（Flash Joule Heating, FJH）技术显示出极佳的环保潜力。通过FJH技术将废塑料转换为石墨烯，其全球变暖潜能（GWP）比传统垃圾处理降低了71%至83% 18。

单次电梯建设所需的石墨烯生产可能产生数万吨，但与火箭方案中数以百亿吨计的排放量相比，其规模仅为百万分之一。此外，将碳元素固化在石墨烯缆绳中，本质上是一种长期的碳封存（Carbon Sequestration），这使得太空电梯在全生命周期内甚至可能实现碳负排放（Carbon Negative）12。

## 辐射强迫与气候反馈效应深度剖析

辐射强迫（RF）是评估大气污染物对全球变暖贡献的关键指标。火箭排放的黑碳和氧化铝颗粒通过不同的物理机制改变地球辐射平衡。

### 气溶胶的加热与冷却

* **黑碳（BC）**：强烈吸收短波太阳辐射。在平流层中，这些细小颗粒（停留时间3-4年）形成一层稀薄但广泛的吸收层，导致平流层局部升温 1。这种增温会改变准两年震荡（QBO）等大型气象模式，进而影响地面天气。
* **氧化铝（）**：既散射阳光（导致地表冷却），又吸收地球射向太空的长波辐射（导致高空加热）。目前模型预测其净效应为微弱的正向强迫（加热）3。

### 综合辐射强迫对比

目前的全球火箭队产生的辐射强迫约为16 ± 8 mW  3。若要支持月球殖民地的庞大运输，火箭方案产生的RF可能跃升至数千mW ，足以抵消目前人类在控制气候变化方面取得的所有进展。相比之下，太空电梯由于不涉及高层大气气溶胶注入，其直接RF贡献基本为零。

## 结论与对MCM机构的建议

本研究通过对1亿公吨月球殖民任务的模拟分析证明，传统纯火箭方案在当前的排放模式下是不具备环境可持续性的。太空电梯系统通过“电力攀爬+高空释放”的模式，彻底消除了建设过程中的平流层污染风险。

**核心结论如下：**

1. **量化优势**：在关键的平流层污染物（黑碳、氧化铝、）方面，太空电梯的运行强度较火箭方案低了数个数量级。
2. **能量增效**：利用顶点锚点的速度增益，太空电梯将飞往月球所需的火箭燃料消耗降低了90%以上，且将排放位置移出了地球大气层 12。
3. **碳平衡**：石墨烯缆绳的制造虽然存在初期环境成本，但通过绿色制造工艺，其长期运行表现为碳负性 12。

**针对月球殖民管理机构（MCM）的建议：**

* **加速太空电梯基础设施建设**：将太空电梯作为月球物资运输的主干道，限制传统重型火箭在低层大气中的频繁发射。
* **优化燃料策略**：在太空电梯尚未满载前，优先选择液氢和液氧推进剂组合，以消除黑碳排放，尽管这会增加的产生。
* **实施绿色制造标准**：确保石墨烯缆绳的生产使用可再生能源和废弃物回收技术，以最小化建设阶段的碳足迹。

综上所述，太空电梯不仅是月球殖民的技术必然，更是地球大气环境保护的伦理必然。它为人类跨行星生存提供了一条真正的“绿色之路”。

#### 引用的著作

1. THE POLICY AND SCIENCE OF ROCKET EMISSIONS - The Aerospace Corporation, 访问时间为 二月 1, 2026， <https://aerospace.org/sites/default/files/2018-05/RocketEmissions_0.pdf>
2. The Climate and Ozone Impacts of Black Carbon Emissions From ..., 访问时间为 二月 1, 2026， <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/53971/noaa_53971_DS1.pdf>
3. (PDF) Radiative Forcing Caused by Rocket Engine Emissions - ResearchGate, 访问时间为 二月 1, 2026， <https://www.researchgate.net/publication/260410646_Radiative_Forcing_Caused_by_Rocket_Engine_Emissions>
4. The Space Industry's Climate Impact: Part 2, 访问时间为 二月 1, 2026， <https://payloadspace.com/the-space-industrys-climate-impact-part-2/>
5. The Coming Surge of Rocket Emissions - Eos.org, 访问时间为 二月 1, 2026， <https://eos.org/features/the-coming-surge-of-rocket-emissions>
6. Impact of Spaceflight on Earth's Atmosphere: Climate, Ozone, and the Upper Atmosphere - NASA Technical Reports Server, 访问时间为 二月 1, 2026， <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20240013276/downloads/NASA-TM-20240013276-V6.pdf>
7. Impact of Rocket Launch and Space Debris Air Pollutant Emissions ..., 访问时间为 二月 1, 2026， <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9287058/>
8. Radiative forcing caused by rocket engine emissions | Climate & Clean Air Coalition, 访问时间为 二月 1, 2026， <https://www.ccacoalition.org/resources/radiative-forcing-caused-rocket-engine-emissions>
9. Envisioning a sustainable future for space launches: a review of ..., 访问时间为 二月 1, 2026， <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11459831/>
10. 2026\_MCM\_Problem\_B.docx
11. A space elevator measuring over 90 km could replace rockets: engineers and physicists are studying a giant cable with climbers that climb into orbit and promise to revolutionize access to space., 访问时间为 二月 1, 2026， <https://en.clickpetroleoegas.com.br/Engineers-and-physicists-want-to-create-a-96-000-km-long-space-elevator-that-could-replace-VML97-2-rockets/>
12. IAC-20-D4.3.5 BENEFICIAL ENVIRONMENTAL ... - Squarespace, 访问时间为 二月 1, 2026， <https://static1.squarespace.com/static/5e35af40fb280744e1b16f7b/t/650659a4d870704e72e74719/1694914987611/ISEC-2020-IAC-Beneficial-Environmental-Impacts-of-Space-Elevators-%28paper%29.pdf>
13. Space Elevator: What It Is and Will Do, 访问时间为 二月 1, 2026， <https://www.isec.org/se-whatis-willdo>
14. Fly me to the Moon! - Space Math @ NASA, 访问时间为 二月 1, 2026， <https://spacemath.gsfc.nasa.gov/moon/5Page26.pdf>
15. SpaceX Starship - Wikipedia, 访问时间为 二月 1, 2026， <https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX_Starship>
16. How environmentally friendly is SpaceX's Starship? | Space, 访问时间为 二月 1, 2026， <https://www.space.com/spacex-starship-rocket-launches-environmental-impact>
17. The Green Road to Space, 访问时间为 二月 1, 2026， <https://space-elevator.squarespace.com/s/GreenRoad.pdf>
18. How circular solutions boost ASEAN's economy: Turning waste into graphene and green fuels (Part 1) | illuminem, 访问时间为 二月 1, 2026， <https://illuminem.com/illuminemvoices/a-circular-horizon-how-wastederived-graphene-and-green-fuels-propel-asean-towards-netzero-part-1-of-2>
19. 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 二月 1, 2026， <https://www.reddit.com/r/SpaceXLounge/comments/183v0te/once_in_orbit_how_many_tons_of_fuel_does_the/>