

环境—技术—管理协同的临近(天)空间分区框架

蔡榕

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
2. 中国科学院大学 星际航行学院, 北京 100049

摘要: 临近空间范围的科学界定是支撑相关行业有序发展的一项基础性工作。由于历史界定标准不一, 且传统界定与当前发展需求之间存在失配, 临近空间的明确界定至今仍存在模糊性。本文基于连续大气环境变化及其对飞行平台的设计约束, 提出临近空间“气动域(低临空间 18—80 km)—过渡域(中临空间 80—200 km)—摄动域(高临空间 200—300 km)”三段分区框架, 并耦合学科内涵、平台技术与空域管理的先验知识展开讨论。研究从自然科学视角出发, 分析了临近空间覆盖从平流层到电离层 F 层峰值的连续大气物理与空间环境变化状况。从工程技术视角出发, 通过分析各分区内典型飞行平台, 揭示了 18 km 作为长航时飞行可行下界、300 km 作为气动效应显著影响轨道飞行寿命实际上界的工程依据, 阐述了临近空间飞行器合理部署空间及其在遥感等应用领域的优势。从空域管理视角出发, 阐明了模型衔接现行空管体系、界定空天法律模糊地带的治理价值。本研究突破了传统卡门线的局限, 为临近空间的科学研究、技术发展及规则制定等提供了科学支撑。

关键词: 临近空间, 空间界定, 自然科学, 工程技术, 空域管理

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 蔡榕. 2026. 环境—技术—管理协同的临近(天)空间分区框架. 遥感学报, 30(6): 1527–1543

Cai R. 2026. Near-space partition framework based on environment–technology–administration. National Remote Sensing Bulletin, 30(6): 1527–1543 [DOI: 10.11834/jrs.20266035]

1 引言

临近空间(Near Space)通常指航空空间与航天空间之间的过渡区域。这一空间区域既不同于以空气动力主导的航空环境, 也不同于以轨道力学主导的航天环境(黄宛宁等, 2019)。因此传统航空器与航天器均难以在临近空间长期稳定运行, 导致临近空间未被充分认知与利用。

随着空天技术发展, 临近空间作为衔接空中与太空的战略通道, 其价值日益凸显(杨君琳等, 2024a)。虽然各国在临近空间开展了一系列研究活动, 但对于临近空间的界定, 目前尚无各界公认的定义。明确临近空间的界定范围, 能够为行业发展、科学技术及法律法规建设等提供基础依据。

当前行业较为公认的临近空间范围, 是距地面约 18 km (或更普遍的 20 km 高度) 至 100 km 之

间的空域。这一界定主要源于两项国际标准的衔接: 首先是国际民航组织 ICAO (International Civil Aviation Organization) 将航空区域的上限定为 60000 英尺 (约 18 km) (Rezo 等, 2025); 其次是国际航空联合会 FAI (Fédération Aéronautique Internationale) 将距地 100 km 的“卡门线”确立为航天活动的起始边界 (Fédération Aéronautique Internationale, 2018)。图 1 展示了目前普遍认知的临近空间范围及活跃其中的典型飞行器。

后续一系列研究与国际会议进一步明确了这一范围。在 2006 年 4 月于北京举行的国内首届关于临近空间的专题研讨会上, 中国学者曾对“近空间”与“临近空间”两种称谓进行讨论, 倾向于认为“近空间”在表述上更为准确(詹世革, 2006)。2009 年, 美国空军研究实验室的 Young 等 (2009) 发表名为《临近空间系统高级概念综述》的报告。该报告认为, 临近空间在性质上应高于

收稿日期: 2026-01-22; 预印本: 2026-05-06

基金项目: 中国科学院空天信息创新研究院科学与颠覆性技术研究基金(编号: 2025-AIRACS-SDPT-09)

第一作者简介: 蔡榕, 研究方向为浮空器系统总体设计和遥感应用。E-mail: cairong@aircas.ac.cn

商业航空飞机的常规飞行空域,同时低于人造卫星运行的轨道空间;在具体高度上,则常被界定为18—100 km。2013年,土耳其空军学院的Özdemir (2013)发表题为《临近空间使用的概念变化》的报告,指出该区域因大气过于稀薄而不适于传统航空飞行,同时因高度不足而难以维持卫星长期在轨运行,并同样将范围划定为18—100 km。

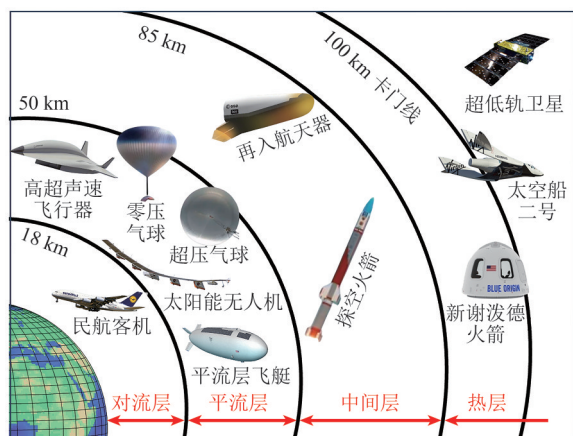


图1 目前普遍认知的临近空间范围及活跃其中的典型飞行器

Fig.1 The generally recognized range of near space and typical vehicles operating therein

关于临近空间的具体边界,实际上存在多个参考数值。尤其在上界方面,除被广泛引用的100 km卡门线外,绕轨物体仍然能够在80—90 km高度附近经历多次近地点穿越而幸存(Park等, 2018, 2021),美国“宇航员之翼”勋章的授予以80 km高度为标准(Langston和Pell, 2015),而航天飞机再入大气层时在约122 km高度开始受到气动加热影响(Scott, 1985)。这些数值在不同语境下均被视作相关的边界参考。

历史上,所谓的“冯·卡门线”并未正式发表,只是源于一次会议讨论(Bérend, 2022a)。卡门线的具体高度在理论计算中也并非整数。依据冯·卡门原始理论,当航空器依靠空气动力维持飞行所需的速度,恰好等于该高度圆周轨道速度的临界点时,其实际对应的位置为83.6—84 km(Bérend, 2022b)。其本人也指出这条线随着天气和航天器技术的发展而变化。FAI出于实用与统一的目的,将这一理论值取整为100 km,并将其确立为“卡门线”的国际标准(Gangale, 2016)。对此,McDowell (2018)根据飞行器受到的重力与

气动阻力的比值定义了卡门参数 R ,并根据典型卫星参数,计算得出大气中间层顶所在的80 km高度更为合理。

在行业实践层面,更广泛的空域范围已被纳入考量。例如,早在2004年就有披露,美国军方在其战略框架中将临近空间范围扩展至20—300 km的空域,视其为航空与航天活动之间的关键“作战缝隙区”(Dinerman, 2004)。从工程操作角度看,约200 km高度是卫星发射后的关键停泊轨道节点(张景瑞等, 2015),此区域的飞行活动兼具大气层内飞行特征与轨道任务的起始属性,“临近”特性较为显著。

Dempsey和Manoli (2017)从功能主义、空间主义以及国家主权层面研究了空气空间和外层空间的定界(杨君琳等, 2024b)。功能主义方法主要考虑飞行器的职能或活动,其并不认为航天器的位置是问题关键。空间主义理论则认为,应在空气空间和外层空间之间确定一个具体的界限,如卡门线。但对于空气空间和外层空间的分界线在哪里没有达成共识,法律制度仍然模糊不清。

在国家主权层面,1919年的《巴黎公约》宣布各国对其领土上空享有完全且排他的主权,但并没有规定这一主权延伸至领土上空多高的高度(Abdurrasyid, 2009)。而《外层空间条约》则禁止国家对外层空间拥有主权,但是条约中也没有界定外层空间的起点(Kaul, 2024)。例如,穿越此区域的亚轨道飞行器,其活动属性难以被现行航空法或外层空间条约清晰界定(杨彩霞和蔡芳菲, 2017)。同样具备长航时飞行功能的平流层浮空器与超低轨卫星,却可能因高度不同而被归入迥异的法律制度,引发管辖权与管理体的混乱。

从行星科学视角对比,以火星为例,其因缺乏臭氧层而未形成类似地球的平流层结构(Blanchard等, 1989)。这表明,基于地球特定大气结构的高度划分可能不具备普适性,需构建更具一般性的工程与科学定义,更侧重于依据克努森数、大气密度剖面等物理参数,以及再入走廊、动力飞行段等任务功能剖面。

因此,本文提出临近空间“气动域—过渡域—摄动域”的三段分区方案,并给出具体高度区间建议。之后从自然科学、工程技术及空域管理3个维度展开交叉讨论,分别对应着临近空间界定的空间主义、功能主义及国家主权层面。本文以期

突破传统单一界限划定的局限，为临近空间的科学认知、技术探索与规则构建提供参考。

此外，“临近空间”一词因参照对象不明而存在语义模糊，若采用“临天空间”的表述则更为清晰。本文后续论述即采用“临天空间”作为该空域的统称。

2 临天空间分区框架的提出

在技术层面，18—100 km的传统界定与物理环境及工程实践的连续性存在矛盾。传统大气分层模型依据温度结构划分（Kuprikov, 2023），而对临近空间则建议采用密度作为分层依据，因其是表征从航空飞行向航天轨道飞行过渡的核心物理参数。临近空间的下边界（约18 km）源自ICAO对航空区域的法定上限，具有明确的法律基础。而卡门线主要依据特定的空气动力学临界条件划定，在物理意义上存在一定模糊性，且难以全面涵盖当前日益活跃的超低轨航天活动。

一方面，基于流体力学原理，大气从连续介质流向自由分子流的过渡是一个连续谱系，其关键表征参数克努森数（ $Kn = \text{大气分子平均自由程} \lambda / \text{流动特征长度} L$ ）所对应的流态转变区域实际延伸至200 km以上（Fadgyas 等, 2018），如图2所示。将临天空间上限定为100 km（ $Kn \approx 1$ ）在物理上人为截断了这一连续环境，错误暗示该高度以上气动效应可忽略。事实上，100 km以上仍属过渡流至自由分子流区，气动对航天器再入、轨道衰减等过程具有不可忽视的影响。

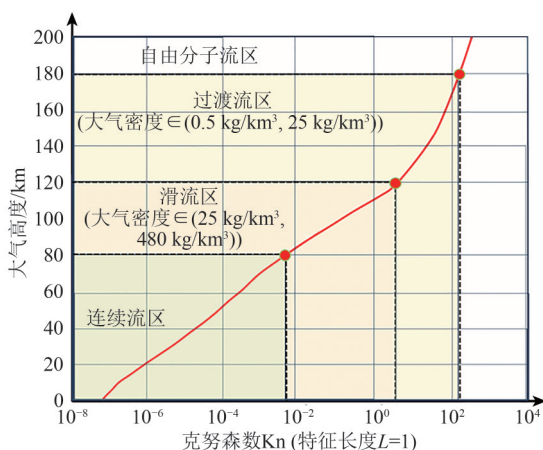


图2 克努森数所对应的大气流态转变区域 (Fadgyas 等, 2018)

Fig.2 Flow regime transition zones of the atmosphere corresponding to Knudsen number (Fadgyas et al., 2018)

另一方面，运行于200—300 km高度的超低轨道卫星，虽属航天器范畴，但其在轨期间不仅需持续应对稀薄大气阻力、原子氧剥蚀等效应，同时也可利用稀薄大气进行必要的姿态控制或轨迹调整（Yakunchikov等, 2025），这在物理学意义上与传统临天空间环境研究内容接近。现有界定人为割裂了对此类飞行器运行环境的系统性认知与技术支持。

图3为近地点接近300 km及以下共91颗卫星目标飞行周期的统计。绝大多数卫星选择在300 km以上运行，其目的正是为了避免受到大气阻力对轨道寿命的影响（Walsh等, 2021）。这也较为直接地说明，直至300 km高度，稀薄大气仍是制约卫星轨道设计的关键因素。

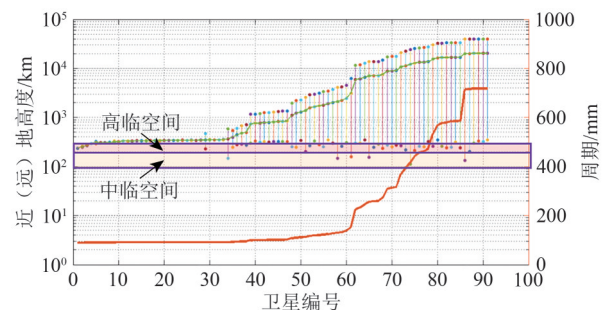


图3 近地点低于300 km的在轨卫星统计 (数据截至2017年10月16日)

Fig.3 Statistics of on-orbit satellites with perigee below 300 km (Data as of October 16, 2017)

同时，以空间碎片为例，如图4所示，低于300 km高度的碎片密度迅速下降，200 km以下完全被烧毁（庞宝君等, 2016）。这标志着200—300 km是一个自然的大气效应显著边界，低于此高度，轨道物体都无法长期稳定存在。因此，将临天空间边界上延，以与实际的空间物体存续物理边界相符。

为此，本文提出一个涵盖连续大气环境变化与飞行平台特点的临天空间分区框架，如图5所示，框架主要包括以下3部分。

(1) 临天空间气动域（低临空间（Aeronautic-Near Space），18—80 km）：涵盖平流层及中间层，大气呈连续流态，空气动力学完全有效，是高空长航时浮空器、太阳能无人机及高超声速飞行器依赖气动飞行的主要空域。

(2) 临天空间过渡域（中临空间（Mesospace），80—200 km）：此区域大气从连续流向自由分子流

过渡,空气动力与轨道力学耦合,是再入式航天器及空天跨域飞行器经历气动加热与轨道调整(停泊)的关键区域。同时200 km也是目前大多数卫星运行高度的下限。

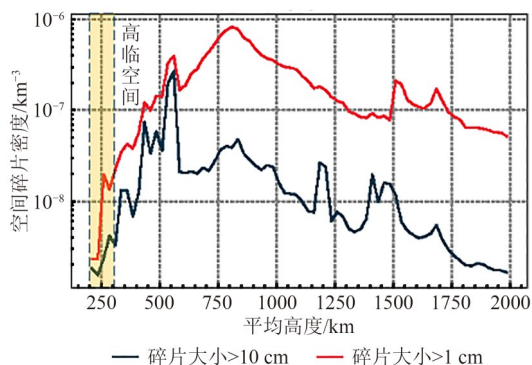


图4 近地轨道空间碎片分布密度分布(数据截至2024年8月1日,来源于European Space Agency(2025))

Fig.4 Spatial debris density distribution in low earth orbit (Data as of August 1 2024; European Space Agency, 2025)

(3) 临天空间摄动域(高临空间(Astronautic-Near Space), 200—300 km): 该区域大气处于自由分子流态,会对在此飞行的超低轨卫星产生阻力与原子氧剥蚀,须依靠推进力持续补偿轨道衰减。

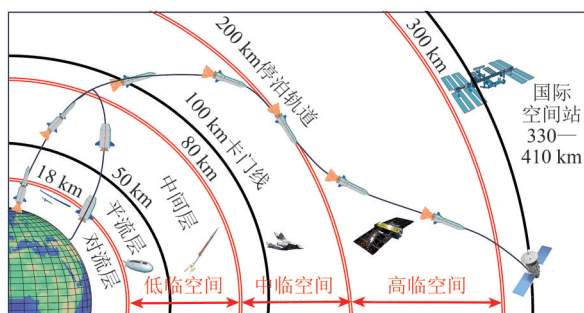


图5 临天空间分区框架构建框架

Fig.5 The near-space partition framework

3 基于自然科学角度的分区框架研究

3.1 大气科学角度

大气学科体系本身并未将“临天空间”作为独立的分层概念,认为临天空间并不是一个科学发现的“层”,而是一个从功能主义出发定义的人类活动的“域”(Su, 2013)。然而,从平流层至热层的广泛区域,确实存在着区别于常规航空与航天环境的连续参数分布。

3.1.1 大气环境参数变化

地球重力场是维持大气垂直分层的基础,但其有效性在临天空间上界附近逐渐被其他力所平衡或超越(吕达仁等, 2009)。低临空间内,大气基本处于流体静力平衡状态,气压梯度力与重力基本平衡,大气结构主要由温度和平均分子量决定。因此,可使用基于流体力学和热力学的经典大气模型来描述大气结构。

到达中临空间及以上,分子扩散逐渐取代湍流运动,成为控制大气垂直分布的主要机制,不同成分(如原子氧、氮、氢)按其分子量和温度各自遵循扩散平衡分布。高临空间顶部已接近散逸层底部。在此高度,气体粒子(特别是氢、氦等轻质成分)的动能足以使其运动轨迹成为围绕地球的弹道轨道或逃逸轨道,碰撞频率极低,连续介质假设彻底失效。

在温度维度上,分区框架完整覆盖从平流层下部的 -50°C ,经中间层顶骤降至 -100°C — -150°C 的地球大气最低温区,再经热层升温的过程(都亨和叶宗海, 1996),如图6所示。平流层底部18—20 km存在温度极小值区,其附近的水平温度梯度与垂直风切变均较弱,有利于出现如图7所示的“准零风层”(胡耀月等, 2022)。该区域已成为当前太阳能无人机及平流层飞艇主要的飞行区域。

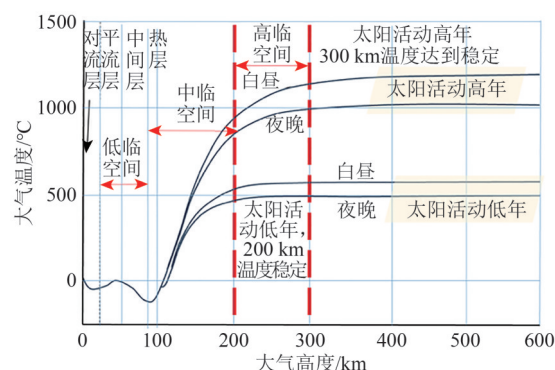


图6 大气温度变化曲线图(Doornbos, 2009)

Fig.6 Atmospheric temperature profile (Doornbos, 2009)

太阳活动低年时,大气温度在约200 km高度处稳定至 500°C 左右。太阳活动高年时,高温层则延伸至300 km,温度升至 1000°C 左右(Rhoden等, 2000)。温度梯度在80 km和200 km(高年时为300 km)处出现拐点,前者标志着臭氧加热终

止与CO₂辐射冷却主导机制的转换 (Dickinson 等, 1987), 后者则对应原子氧吸收太阳紫外辐射趋于饱和、温度达到动态稳定边界 (Hudson 和 Mahle, 1972)。

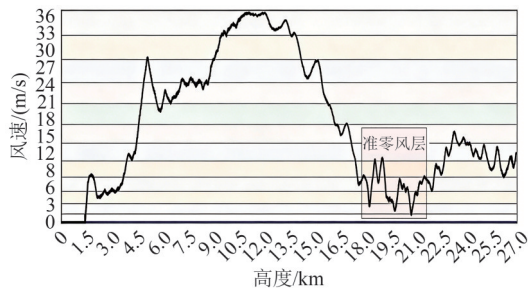


图7 大气风速随高度变化曲线图

Fig.7 Atmospheric wind speed profile

3.1.2 大气组成成分变化

临天空间分区框架完整涵盖了物质状态从分子态到原子态再到等离子体态的三级跃迁链条, 且300 km边界对应中性大气与空间等离子体环境的转换边界 (Liu 等, 2022)。图8为大气组成成分变化曲线。在低临空间内, N₂与O₂中性分子占比稳定, 为臭氧(O₃)的生成提供了物质基础。尽管在18—30 km的臭氧层中, O₃浓度仅约为10×10⁻⁶, 但其仍对飞行器器件构成氧化降解威胁 (杨秉 等, 2008)。

继而向上至中临空间, 太阳紫外辐射驱动O₂分子光致离解, 在80 km以上开始出现原子氧AO (Atom Oxygen), 并随高度增加逐渐成为大气主要成分 (Ashruf 等, 2024)。300 km处O₂分子已完全消散 (陶瑞灵和王智慧, 2025)。这一成分剧变体现了大气从分子态向原子态的转化。因AO具有极高的化学活性, 当与速度不低于7.8 km/s的与飞行器碰撞时, 可产生约5 eV的能量 (Seo 等, 2024), 引发飞行器聚合物材料化学键断裂与挥发性氧化物剥蚀。

3.2 地球物理学科角度

3.2.1 主导动力学机制与能量来源的垂直变化

临天空间的动力学机制与能量来源在垂直方向上呈现系统性转变, 契合三层分区框架。在低临空间, 动力学主要受源自对流层重力波及其在中间层顶附近的破碎过程主导, 重力波破碎所

沉积的动量是驱动该层大气环流的关键 (Garcia 和 Solomon, 1985)。太阳辐射日周期激发的大气潮汐在此域影响显著, 构成环境预报的主要不确定源 (Xu 等, 2014)。在中临空间, 源自下层的重力波已基本耗散, 动力学主导机制转变为太阳极紫外辐射直接激发的热层潮汐, 以及初显的电离层—热层电动力学耦合 (Vadas 等, 2014)。至高临空间, 动力学完全由强烈的电动力学耦合主导, 中性风场与电离层等离子体在地磁场作用下相互作用, 该过程受太阳与地磁活动影响 (Cosgrove 和 Tsunoda, 2002)。

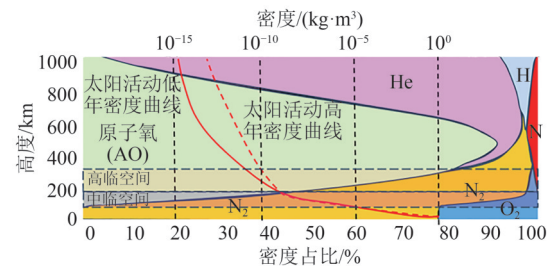


图8 大气组成成分变化(Weerasinghe 等, 2023)

Fig.8 Variation of atmospheric composition
(Weerasinghe et al., 2023)

3.2.2 地磁场控制与电离层耦合的关键高度

地磁场对等离子体的控制程度是界定空间物理环境的判据之一, 其转变临界点位于分区框架的分层边界附近。在低临空间及中临空间下部 (<150 km), 中性粒子密度高, 带电粒子运动由碰撞主导, 形成非磁化等离子体, 地磁场影响微弱 (Guo 等, 2024)。从中临空间上部延伸至整个高临空间 (150—300 km), 碰撞频率降低, 带电粒子回旋频率超过碰撞频率, 等离子体行为转为地磁场主导, 呼应了大气成分从N₂/O₂→O→e⁻/⁺的转化规律。特别是高临空间恰好对应电离层F层的峰值区 (Qian 等, 2011), 如图9所示 (图中红色/深色区域对应密度最高的峰值区, 绿色/浅色区域对应高空低密度区。foF₂是F2层临界频率 (critical frequency of the f2 layer), 代表电离层反射无线电波的“上限能力”: 低于该频率的无线电波会被反射回地面, 从而实现远距离 (全球) 通信; 高于该频率的无线电波则会直接穿透电离层进入太空)。

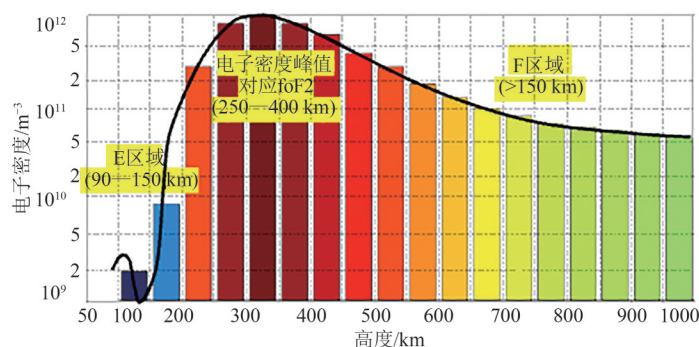


图9 电离层典型电子密度—高度剖面(Qian等,2011)

Fig.9 Typical electron density-altitude profile of the ionosphere (Qian et al., 2011)

3.3 高能物理学科角度

从高能(粒子)物理视角审视,临天空间构成了一个天然的宇宙线作用垂直剖面,对应了“初级粒子”到“次级粒子”的完整环境谱,如图10所示(Garzón等,2017)(图中“ $10^3/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ”对应的是高能宇宙射线粒子在单位体积内单位时间的发生率(即通量密度),通常用于描述高空的粒子密度;“ $1/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ”对应的是单位面积上每年接收到的粒子数,用于描述中高空的粒子通量;“ $1/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ”对应的是单位面积上每年接收到的粒子数,用于描述地面附近极稀有的大能量事件;横轴中的“1 J”对应的是约 6.24×10^{18} eV的能量)。在高临空间,初级宇宙射线及太阳高能粒子几乎未经大气衰减,是导致航天器单粒子效应的主要“源区”(Kuznetsov和Nymmik,1996)。在中临空间,初级粒子开始与稀薄大气发生核相互作用,产生并衰变出大量穿透性强的缪子(μ 子)(Pyras等,2023)。高空科学气球在此域下部的观测表明, μ 子通量随高度降低而逐渐主导辐射场(Bellotti等,1999),这标志着由初级粒子场向次级粒子场的过渡。在低临空间(18—80 km),级联反应充分发展,次级粒子通量于约20 km处达到峰值(Pfotzer最大值)(Zhou等,2024)。科学气球在30—40 km高度的直接原位测量证实,此处是以中子通量为主导的强次级粒子场(Zábori等,2016)。

4 基于工程技术角度的分区框架研究

从工程技术维度审视,临天空间分区框架的价值在于不同分区独特的物理环境决定了与之适配的飞行平台类型、载荷能力与应用模式,从而

形成差异化的技术发展路径。本节基于低临空间、中临空间、高临空间三段分区框架,分析各分区适宜部署的平台、应用优势及技术特征。

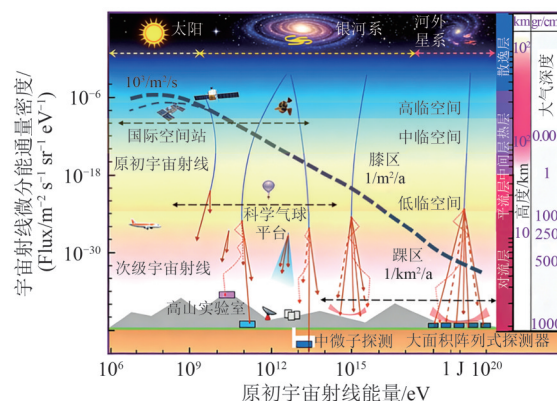


图10 初级及次级宇宙射线穿越临天空间 (Garzón等,2017)

Fig.10 Primary and secondary cosmic rays traversing near space (Garzón et al., 2017)

4.1 低临空间平台及载荷应用

太阳能无人机和浮空飞行器是低临空间低动态飞行器的典型代表(肖振等,2024),其设计与飞行模式体现了该区域独特的环境约束特点。为适应18—30 km高度大气稀薄的环境,太阳能无人机采用超大展弦比与轻质复合材料结构,以实现低动压条件下的持续飞行(李广佳等,2024)。图11为空中客车公司研制的“Zephyr S”及“Zephyr T”系列太阳能无人机。当高度超过约30 km后,太阳能无人机气动与推进效率的急剧衰减将抵消太阳能收集效率的增益,使其无法实现持续飞行。因此,太阳能无人机的最优工作区与性能极限被自然约束在临天空间的下部。

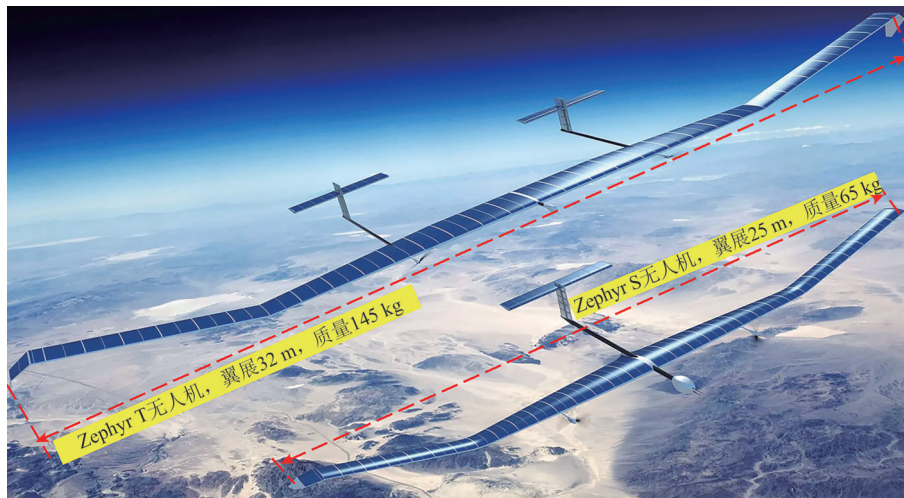


图11 Zephyr太阳能无人机(Sustainable Skies, 2017)

Fig.11 Zephyr solar-powered unmanned aerial vehicle (Sustainable Skies, 2017)

浮空器是目前较为成熟的、可实现低临空长期驻留与科学实验的平台。目前平流层浮空器主要包括飞艇和科学气球两大类，如图12所示。平流层飞艇主要活跃于20 km高度附近，依托该高度稳定的准零风层与足够的空气密度，通过浮力与太阳能实现数月级定点驻留（史小康等，2023）。高空科学气球则可上升至50 km高度以上，覆盖平流层中上部并触及中间层底部。科学气球按结构形式可分为零压气球（Zhang等，2021）与超压气球（Zhang等，2024）。作为临天空间目前唯一成熟且商业化运营的飞行器，其为临天空间探索（蔡榕等，2025）、科学研究（胡雄等，2022）及工程试验等（Zhang等，2023）提供了理想的科学实验平台。此外，新兴的中间层光泳浮空器从原理上提出利用光泳力而非浮力在稀薄大气中飞行，目前包括纳米卡板（Schafer等，2025）和聚酯薄膜（Celenza等，2024）两种结构形式。其理论上具备在50—80 km高度实现长期可控运行的潜力，使该高度层成为新型浮空飞行动力开发的前沿探索方向。

高动态平台以高超声速飞行器为代表，要求飞行速度大于5 Ma（马赫数）（Peters等，2024），在设计层面需承受极端环境带来的综合挑战。稀薄大气与剧烈气动加热构成核心矛盾，使得飞行器普遍采用乘波构型（如图13中的X-51A和研制中的SR-72）以在低密度下维持升阻比，并依赖超燃冲压等特定发动机在狭窄的“动力窗口”内工作（Musa等，2022）。高超声速飞行器的飞行上界为中临空间底部。此处大气极为稀薄，连续流假

设逐渐失效，传统气动控制面效率骤降，同时超燃冲压发动机也面临熄火风险。高度变化引起的流态与物理机制转变，加之地面试验难以完全模拟真实环境（Gu和Olivier，2020），凸显了临天空间环境对高超声速技术发展的制约。

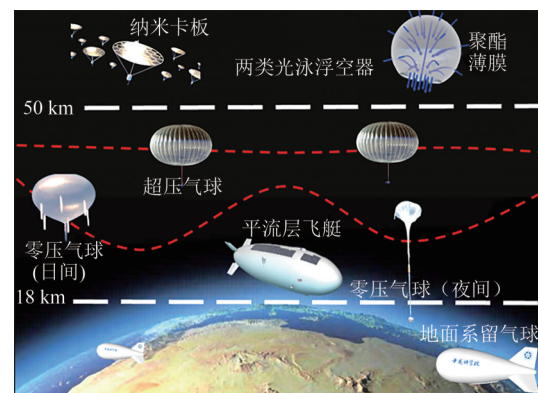


图12 临天空间各类浮空器

Fig.12 Various types of near space aerostats

在应用方面，根据被动光学遥感几何成像模型（Ulla等，2022）和光学衍射极限理论（Choi等，2024），飞行高度与光学传感器成像的地面分辨率呈严格的正比例关系。因此，在光学载荷像元尺寸和焦距确定的情况下，飞行高度降低一半，空间分辨率数值也降低一半（即对地观测分辨能力增强），反之亦然。但是，即使光学载荷单个像元尺寸无限小，受限于光波的衍射物理特性，光学系统仍存在理论上的分辨极限。其能分辨的最小角分辨率由波长和光学系统入瞳直径共同决定（Wang等，2025）。传统卫星若要获得亚米级的高

分辨率,就须配备“大口径”相机。而低临空间平台将观测高度从星载的500 km级压缩至20 km级,从而能够在不依赖超大口径反射镜的前提下,突破分辨率瓶颈,实现10—30 cm级地面分辨率的对地观测(Liu等,2025)。例如,Zephyr(西风)太阳能平流层无人机,在约21 km的运行高度上,仅搭载微型光学载荷,相机体积和口径极小,官方

标称其地面采样距离GSD(Ground Sampling Distance)可达18 cm(Airbus,2024)。以中国科学院“鸿鹄专项”高空气球平台为例,假设满足相似传感器的对比条件,其在40 km驻留高度下,对地观测空间分辨率为36 cm;若飞行器达到低临空间上线(80 km)附近,分辨率则会降低至约72 cm。



(a) X-51A(乘波者)(U.S. Air Force,2011)

(a) X-51A (Waverider) (U.S. Air Force, 2011)



(b) 研制中的SR-72概念图(Macias,2018)

(b) Conceptual image of the SR-72 (Macias, 2018)

图13 高超声速飞行器

Fig.13 Hypersonic vehicles

考虑到35 km高度已处于99%大气层以上,低临空间飞行器具备了实现高分辨率遥感的“准静止观测”条件,也为其与天基遥感协同奠定了基础。美国国家航空航天局NASA(National Aeronautics and Space Administration)于2013年和2014年先后开展了两次基于高空科学气球平台的辐射基准载荷原理验证试验(Kopp等,2014,2017)。中国在“十三五”国家重点研发计划“地球观测与导航”重点专项中,也开展了基于高空科学气球平台的临近空间辐射基准传递定标试验,并正进一步探索建立国际上首个临近空间光学辐射计量系统。临近空间浮空器飞行于绝大部分大气质量和天气现象之上,且具有区域驻留能力强、便于与大量中低轨道卫星高频交会的优势。将临近空间辐射基准传递至不同卫星,可有效降低常规场地辐射定标中因大气辐射传输路径长所引入的不确定性,从而提升卫星辐射定标的精度及多源卫星数据的一致性(王宁等,2023;马灵玲等,2023)。

在低通信延迟与高数据传输率通信中继方面,低临空间平台可作为区域性通信枢纽,以较低能耗实现对地面网络盲区的持久覆盖(Uyeda等,2022)。此外,在低临空间,大气已较为稀薄,其密度、压力、太阳辐照及粒子辐射环境与近地轨道相似,同时保留了可利用的微弱气动效应和实现低成本可靠回收的物理基础。这是地面设施和

轨道环境均难以同时提供的独特条件。高空气球平台可在低临空间稳定驻留,提供持续的准微重力(Ishikawa等,2009)与强辐照环境(王辉等,2025),充当临天空间天文台(李一健等,2024)。此外,借助“大气质量近乎为零”(AM0)的高度环境,适合开展空间材料性能标定(Xu等,2023)及生命科学研究(Smith和Sowa,2017)等需长期暴露的实验。

4.2 中临空间平台及载荷应用

亚轨道飞行器作为中临空间的典型平台,其飞行剖面对应了从“气动域”经“过渡域”至“摄动域”的动力学环境转变。其任务过程并非绕地运行,而是沿弹道轨迹飞行至数百千米高度后返回(dos Santos和Oliveira,2024)。在类别上,此类飞行器通常包括探空火箭、商业亚轨道火箭、有翼亚轨道飞行器和几乎所有的弹道导弹(陆晓磊等,2024),如图14所示。

在上升段,飞行器首先穿越低临空间,此阶段气动力仍起主导作用。当越过约80 km高度进入中临空间后,气流逐渐从连续流向稀薄流过渡,空气动力与轨道力学开始耦合,飞行控制需从纯气动转向复合方式。飞行器顶点通常位于高临空间,此处大气已处于自由分子流态,不足以维持长期轨道。设定300 km为临天空间上界,正对应了“亚轨道”与“稳定轨道”的物理分水岭。

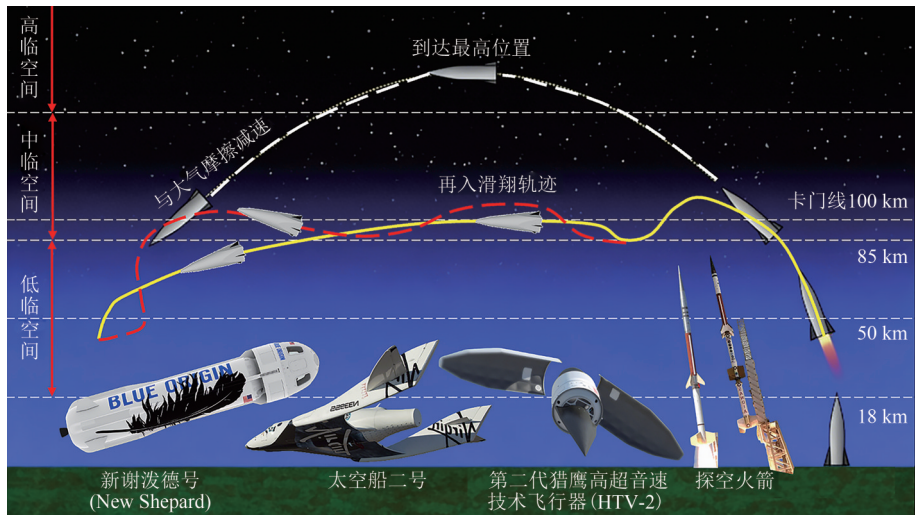


图 14 亚轨道飞行器(Blue Origin, 2024; Virgin Galactic, 2024; Space.com Staff, 2011)
Fig.14 Suborbital vehicles (Blue Origin, 2024; Virgin Galactic, 2024; Space.com Staff, 2011)

NASA 下属戈达德太空飞行中心 GSFC (Goddard Space Flight Center) 的沃洛普斯飞行基地 WFF (Wallops Flight Facility) 将抛物线飞机、高空气球和火箭动力飞行器统一划分为亚轨道飞行器，以区别于轨道飞行器。(Hammoudi 和 Schaire, 2022)。这是一种典型的以平台任务为导向的分类方式。此外，近些年亚轨道飞行器的应用方向之一为开展“点对点火箭运输”(End-to-End) (Newman, 2026)，该方向的兴起尤其受到星舰系统可重复使用技术的促进作用，丰富了临天空间的活动内容与技术边界。

在中临空间应用方面，从光学成像角度来看，使用小口径相机可实现亚米级观测。以日本宇宙航空研究开发机构 JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) 的 SLATS (super low altitude test satellite, 昵称“Tsubame”) 超低轨道技术试验卫星为例，其利用离子发动机克服稠密大气阻力，成功在 167.4 km 的极低轨道上实现了长期驻留 (Japan Aerospace Exploration Agency, 2019)。其搭载的 SHIROP 小型高分辨率光学传感器，相机光学有效口径仅为 20 cm。Tellus 平台 (Tellus, 2019) 上公开的数据显示，其分辨率可达 0.46—1 m (随具体下潜高度浮动)。若在常规的 600 km 太阳同步轨道上获得 0.5 m 级的地面高分辨率影像，通常需要直径约 60 cm 的巨大反射镜，如 WorldView 系列卫星的庞大尺寸 (European Space Agency, 2022)。中临空间飞行平台则利用了高度缩减优势，仅使用 20 cm 口径的微型镜头即可实现亚米级观测 (此上

一也等, 2023)。

中临空间作为亚轨道飞行与再入返回的必经通道，为高动态机动观测提供了不可替代的时空窗口。探空火箭可在此层域开展探测，获取逼近真实轨道环境的光学背景辐射与粒子环境数据，为星载遥感器的地面验证与在轨性能预测提供关键支撑。亚轨道飞行器在上升段与再入段可实施对热点区域的快速机动侦察，其弹道式飞行剖面虽难以实现持续覆盖，但对于时间敏感目标的应急成像具有不可替代的价值 (He 等, 2024)。历史实践亦表明，亚轨道平台携带光学侦察载荷对轨道目标实施抵近监视的技术可行性早已得到验证—20 世纪 60 年代美国即采用雷神运载火箭将改自科罗纳侦察卫星的光学相机送入亚轨道，对在轨目标实现了飞越成像 (Molczan, 2016)。

此外，中临空间还可作为高速跨域平台的中继与快速接入空域 (Lou 等, 2023)，为各类飞行器提供通信支持。在新技术验证方面，探空火箭可在此层域开展探测，获取逼近真实轨道环境的光学背景辐射与粒子环境数据，为星载遥感器的地面验证与在轨性能预测提供关键支撑 (Wijtvliet 等, 2020)。

4.3 高临空间平台及载荷应用

超低轨卫星是高临空间飞行器的典型代表，其设计、运行与失效机制均受制于此高度的大气环境，因而在工程本质上属于临天空间飞行器范畴。图 15 展示了超低轨卫星的代表——“重力场与稳态洋流探测器”号 GOCE (Gravity field and

steady-state Ocean Circulation Explorer) 卫星 (Steiger 等, 2013) 与力星一号 (张俊 等, 2024)。将超低轨卫星纳入临天空间体系, 并非单纯的空

间扩展, 而是基于物理作用机制。在该高度, 大气已处于自由分子流态, 密度虽极低, 却仍对卫星产生重要影响。



(a) GOCE 卫星(高度 250—300 km)
(European Space Agency, 2009)
(a) GOCE satellite (altitude 250—300 km)
(European Space Agency, 2009)



(b) 力星一号卫星(高度 100—150 km)(Institute of
Microsatellite Innovation, Chinese Academy of Sciences, 2021)
(b) Lixing-1 satellite (altitude 100—150 km) (Institute of
Microsatellite Innovation, Chinese Academy of Sciences, 2021)

图 15 超低轨卫星

Fig.15 Very-low earth orbit (VLEO) satellites

传统卫星可忽略大气阻力, 而超低轨卫星则必须主动利用并持续对抗这一环境 (Chen 等, 2026)。其本体与太阳能帆板常被设计为可产生气动力的构型, 通过姿态调整进行气动辅助轨道维持与离轨 (潘彦达 等, 2025)。以美国 GOCE 卫星为例, 其在 250—300 km 高度运行期间, 既需每日进行轨道维持, 又需持续应对原子氧剥蚀及微弱气动力矩干扰, 为此采用了气动—推进复合控制策略保证姿态指向稳定 (Canuto, 2008)。此外, 2022 年太空探索技术公司 (SpaceX) 的“星链”卫星因地磁暴引发的高层大气密度骤增而导致卫星批量异常陨落事件 (Drescher 等, 2023), 同样揭示了超低轨卫星的轨道寿命与姿态控制受到临天空间顶部大气环境的影响。

在高临空间应用方面, 此层域运行的超低轨卫星凭借其极低的轨道高度, 在空间分辨率与传输延迟两个维度上显著优化了传统遥感星座的性能边界。相比传统轨道的遥感卫星, 在相同口径光学系统条件下, 超低轨卫星的空间分辨率可提升至少一倍 (Najafabadi 和 Kazemi, 2024), 可在较小口径载荷条件下实现亚米级成像, 为载荷小型化与卫星低成本化开辟了新的技术路径。以阿尔贝多航天 (Albedo Space) 公司的 Clarity-1 卫星为例, 其运行轨道高度为 275 km, 相较于太阳同步轨道卫星高度, 距离地表极近, 因此, 实现了

10 cm 级对地观测的高空间分辨率, 也为部署高频重访的广域遥感星座奠定了基础 (Albedo Space Corporation, 2025)。

此外, 高临空间的超低轨卫星星座, 则能进一步将通信延迟压缩至毫秒级 (Ullah 等, 2025)。例如据中国航天科工集团有限公司发布的“楚天”超低轨通遥一体星座建设计划, 至 2030 年完成 300 颗星在轨组网后, 可实现全球 15 min 响应能力, 最终具备达到 10 min 以内的即时业务响应能力 (Zhao, 2024)。在新技术验证方面, 高临空间能够完整体验大气遮挡为零的光照条件与自由分子流态下的气动—轨道耦合效应, 可实现对超低轨卫星组件、气动辅助轨道变换等关键技术的在轨前验证 (Kimoto 等, 2022)。

5 基于分区框架的空域管理探讨

本文提出的“气动域—过渡域—摄动域”三层分区框架, 能够为建立清晰、可操作的法律与管理框架提供科学支撑。如图 16 所示, 参考《联合国海洋法公约》UNCLOS (United Nations Convention on the Law of the Sea) 分段管理办法 (WIPO, 1982), 依据临天空间不同层域的物理特性和平台能力, 提出以下分类管理体系。

(1) 低临空间可明确为“国家主权延伸与优先管制空域”。其下界 (18 km) 与现行航空管理

(Bakowski等, 2024)上限自然衔接。国家在此空域对浮空器、高空无人机等平台享有基于安全和经济资源的准入与运行管理权。

(2) 中临空间应界定为“国际协调的飞行通道”。作为亚轨道飞行和再入返回的核心区域,可借鉴“无害通过”原则(Baiocco等, 2024),由国际社会共同制定通行规则,以实现航空与航天管理范式的过渡与协同。此外,为衔接下部主权区,可参照海洋管理毗连区制度,划分出主权毗连区。

(3) 高临空间则属于“受空间条约约束的轨道环境区域”。该区域明确适用外层空间条约(Pic等, 2023),同时其独特的大气摄动效应为将空间物体登记、碎片减缓等规则延伸至超低轨卫星提供了直接依据。

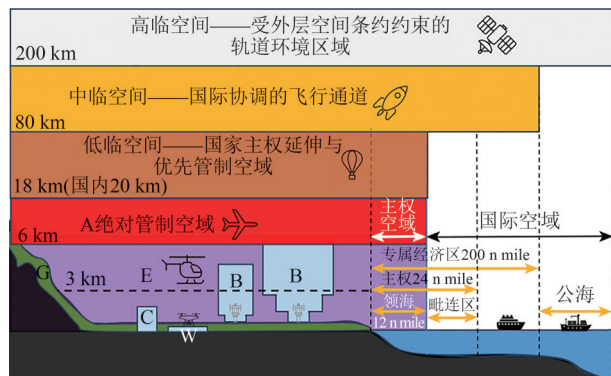


图16 基于分区框架的空域管理探讨

Fig.16 Airspace management framework based on the partition model

6 结 语

本文突破了以单一“卡门线”划分临天空间的传统认知,构建了一个更具解释力、前瞻性和可操作性的“气动域—过渡域—摄动域”三层分区框架,主要结论如下。

(1) 分区框架的科学性得到了大气物理、地球物理到高能物理的多维度印证。18—300 km区间涵盖了大气参数渐变、主导物理过程连续变更的完整地球系统。其中,低临空间、中临空间与高临空间分别对应了从连续流气动主导、到气动—轨道耦合过渡、直至稀薄大气摄动主导的物理分区。

(2) 对太阳能无人机、浮空器、高超声速飞行器、亚轨道飞行器及超低轨卫星等5类平台的分析表明,18 km是传统航空技术上界与临天空间飞

行可行下界的工程交汇点。而300 km则是大气阻力成为轨道动力学决定性摄动因素的临界高度。特别是将超低轨卫星作为高临空间飞行器代表,从而完整衔接了从航空到航天的连续空域。基于上述分析,临天空间各类平台在高分辨率区域监视与遥感、时间敏感目标应急成像乃至全球覆盖高分辨率遥感应用方面逐渐展现出应用潜力,成为弥补传统空天遥感能力,打造全天时、全覆盖、高分辨遥感探测体系的重要环节。此外,临天平台技术的进步亦将推进通信中继及新技术验证等领域的发展。

(3) 该三层分区框架为衔接现行航空管理框架与应对外层空间法律模糊地带提供了清晰的技术基准。

临天空间的界定本身就可作为一项研究内容,为行业未来发展及科学与技术研究等划定活动范围与蓝图。在技术发展方面,分区框架基于物理机制的分区,清晰划分了临天空间各类飞行器的特点与种类,有助于行业避免技术路径的盲目探索,形成从“航空气动主导”向“航天轨道主导”阶梯式突破的研发路线图。在标准制定层面,分区框架有利于为三层空间分别确立差异化的适航认证、环境适应性和通信导航遥感等标准,结束长期以来用单一航空或航天标准覆盖全空域的模糊局面。在国际合作层面,分区框架有助于构建开放包容的临天空间治理新范式,使各国能够根据自身工业能力选择合作区域,降低技术门槛,实现各国互补性的“分层协作”。

因此,本文并非单纯扩展当前18—100 km的临天空间范围,而在于通过建立“气动域—过渡域—摄动域”这一分区框架,从环境与任务耦合的视角,为临天空间的系统性认知与差异化利用提供理论基础,旨在释放临天空间更大的探索与应用潜力。

志 谢 在本文的构思与撰写过程中,中国科学院空间中心胡雄研究员、中国科学院高能物理研究所姜鲁华研究员、中国科学院力学研究所孙泉华研究员给予了宝贵建议,中国科学院空天信息创新研究院十部张航悦等同事也在数据收集与图表绘制方面提供了支持,在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- Abdurasyid P. 2009. State sovereignty in airspace. *Indonesian Journal of International Law*, 6(4): 1 [DOI: 10.17304/ijil.vol6.4.215]
- Airbus. 2024. Zephyr high altitude platform station (HAPS)[EB/OL]. [2026-03-09]. <https://www.airbus.com/en/products-services/defence/uas/zephyr>
- Albedo Space Corporation. 2025. Albedo's Clarity-1 satellite successfully launches, establishes first contact, and enters VLEO-specific protect mode[EB/OL]. [2026-03-11]. <https://www.businesswire.com/news/home/20250317584103/en/>
- Ashruf A M, Vineeth C and Pant T K. 2024. On the variability of the atomic oxygen density in the upper atmosphere under different solar activity and geomagnetic conditions and its impacts on satellite drag. *Advances in Space Research*, 73(9): 4499-4518 [DOI: 10.1016/j.asr.2024.01.059]
- Baiocco P, Chemoul B, Martinez S, Moore S, Payot F, Lagadec K, Santoro F, Gregori C and Marzioli P. 2024. Context and perspectives of sub-orbital activities and transit through airspace/ground support activities. *Acta Astronautica*, 225: 285-294 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2024.09.011]
- Bakowski D, Lee P U, Evans M and Brasil C L. 2024. Identifying information needs and tools to support interactions between upper class E Traffic Management (ETM) operations and the Air Traffic System (ATS)//AIAA Aviation Forum and Ascend 2024. Las Vegas: AIAA: AIAA 2024-4538 [DOI: 10.2514/6.2024-4538]
- Bellotti R, Cafagna F, Circella M, De Marzo C N, Golden R L, Stochaj S J, De Pascale M P, Morselli A, Picozza P, Stephens S A, Hof M, Menn W, Simon M, Mitchell J W, Ormes J F, Streitmatter R E, Finetti N, Grimani C, Papini P, Piccardi S, Spillantini P, Basini G and Ricci M. 1999. Balloon measurements of cosmic ray muon spectra in the atmosphere along with those of primary protons and helium nuclei over midlatitude. *Physical Review D*, 60: 052002 [DOI: 10.1103/PhysRevD.60.052002]
- Bérend N. 2022a. The missing calculation behind the original “Kármán line” definition – A credible hypothesis//55th IAA History of Astronautics Symposium 2021. Dubai: [s.n.]: 45-67.
- Bérend N. 2022b. A variant of the Kármán line theory facilitating the identification of a precise altitude boundary//73rd International Astronautical Congress. Paris: [s.n].
- Blamont J E, Chassefiere E, Goutail J P, Mege B, Nunes-Pinharanda M, Souchon G, Krasnopolsky V A, Kryskot A A and Moroz V I. 1989. Vertical profiles of dust and ozone in the martian atmosphere deduced from solar occultation measurements. *Nature*, 341 (6243): 600-603 [DOI: 10.1038/341600a0]
- Blue Origin. 2024. New glenn[EB/OL]. [2026-03-11]. <https://www.blueorigin.com/zh-CN/new-glenn>
- Cai R, Yang Y C, Jiang L H, Zhang T H, Xu G N, Zhang X Q, Zhou J H, Miao J G, Gong Z Q, Wang S, Li Z J, Ma L L, Zhu R C, Zhang H Y, Feng H, He Z Q, Wang Q, Zhang D H, Liu Q, Yan F, He X H, Wang N, Huang W N, Xu W K, Nie Y, Wang B C, Zhang Y L and Zhu Y. 2025. Research progress of high-altitude scientific balloons in Chinese Academy of Sciences. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1502-1514 (蔡榕, 杨燕初, 姜鲁华, 张泰华, 徐国宁, 张向强, 周江华, 苗景刚, 宫泽奇, 王生, 李兆杰, 马玲灵, 祝榕辰, 张航悦, 冯慧, 何泽青, 王谦, 张冬辉, 刘强, 闫峰, 何小辉, 王宁, 黄宛宁, 徐文宽, 聂营, 王保成, 张衍奎, 朱殷. 2025. 中国科学院高空科学气球研究进展. *遥感学报*, 29(6): 1502-1514 [DOI: 10.11834/jrs.20255099])
- Canuto E. 2008. Drag-free and attitude control for the GOCE satellite. *Automatica*, 44(7): 1766-1780 [DOI: 10.1016/j.automatica.2007.11.023]
- Celenza T, Eskenazi A and Bargatin I. 2024. Three-dimensional photophoretic aircraft made from ultralight porous materials can carry kilogram-scale payloads in the mesosphere. *Physical Review Applied*, 22(5): 054081 [DOI: 10.1103/PhysRevApplied.22.054081]
- Chen G Z, Li Z R, Feng G H, Li W H and Yue Y X. 2026. Evolution analysis of orbital characteristics of VLEO satellites in long-term flight under the influence of atmospheric winds. *Acta Astronautica*, 240: 481-496 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2025.12.009]
- Zhao L. 2024. Launch to pave way for remote-sensing network[EB/OL]. [2026-03-09]. <https://www.chinadaily.com.cn/a/202404/24/WS66286bc0a31082fc043c3b0a.html>
- Choi H, Choi S, Menart P, Deka A and Jacob Z. 2024. Telescope imaging beyond the Rayleigh limit in extremely low SNR. *New Journal of Physics*, 26(9): 093019 [DOI: 10.1088/1367-2630/ad6a7d]
- Cosgrove R B and Tsunoda R T. 2002. Wind-shear-driven, closed-current dynamos in midlatitude sporadic *E*. *Geophysical Research Letters*, 29(2): 1020 [DOI: 10.1029/2001GL013697]
- Space.com Staff. 2011. Gallery: DARPA's Falcon Hypersonic Glider's Mach 20 Launch Test[EB/OL]. [2026-03-11]. <https://www.space.com/12604-darpa-hypersonic-glider-falcon-htv2-photos.html>
- Dempsey P S and Manoli M. 2017. Suborbital flights and the delimitation of air space vis-à-vis outer space: functionalism, spatialism and state sovereignty. Office for Outer Space Affairs, United Nations Office.
- Dickinson R E, Roble R G and Bougher S W. 1987. Radiative cooling in the NLTE region of the mesosphere and lower thermosphere—Global energy balance. *Advances in Space Research*, 7(10): 5-15 [DOI: 10.1016/0273-1177(87)90069-X]
- Dinerman T. 2004. “Near Space”: a new area of operations or a new Pentagon buzzword?[EB/OL]. [2026-03-11]. <https://www.thespacereview.com/article/230/1>.
- Doornbos E. 2009. Atmospheric temperature changes with altitude[EB/OL]. [2026-03-11]. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2009/06/Atmospheric_temperature_changes_with_altitude.
- dos Santos P and Oliveira P. 2024. Integrated architecture for navigation and attitude control of low-cost suborbital launch vehicles. *Acta Astronautica*, 222: 52-68 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2024.05.039]
- Drescher L, Kroisz S, Krauss S, Temmer M, Suesser-Rechberger B and Strasser A. 2023. Forecasting ICME induced Satellite Orbit Decays//25th EGU General Assembly. Vienna: [s. n.]: EGU23-

- 5613 [DOI: 10.5194/egusphere-egu23-5613]
- Du H and Ye Z H. 1996. Manual of Space Environment for Low-Orbit Spacecraft. Beijing: National Defense Industry Press (都亨, 叶宗海). 1996. 低轨道航天器空间环境手册. 北京: 国防工业出版社)
- European Space Agency. 2009. GOCE Overview [EB/OL]. [2026-03-11]. <https://earth.esa.int/eogateway/missions/goce>
- European Space Agency. 2022. WorldView series overview[EB/OL]. [2026-03-11]. <https://earth.esa.int/eogateway/missions/worldview/description>
- European Space Agency. 2025. ESA space environment report 2025 [EB/OL]. [2026-03-11]. https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/ESA_Space_Environment_Report_2025
- Fadgyas M C, Pricop M V, Niculescu M L, Cojocaru M G and Dumitrache A. 2018. Semi-empirical relations for pressure distributions in hypersonic regime. AIP Conference Proceedings, 1978(1): 370007 [DOI: 10.1063/1.5043975]
- Fédération Aéronautique Internationale (FAI). 2018. Statement about the Karman line[EB/OL]. [2026-03-11]. <https://www.fai.org/news/statement-about-karman-line>.
- Gangale T. 2016. The non Kármán line: an urban legend of the space age. Journal of Space Law, 41(2): 151-178 [DOI: 10.5281/zenodo.18928865]
- Garcia R R and Solomon S. 1985. The effect of breaking gravity waves on the dynamics and chemical composition of the mesosphere and lower thermosphere. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 90(D2): 3850-3868 [DOI: 10.1029/JD090iD02p03850]
- Garcón J A, Collazo J, Cuenca-García J, García Castro D, Otero J, Yermo M, Blanco J J, Kurtukian T, Morozova A, Pais M A, Blanco A, Fonte P, Lopes L, Kornakov G, Álvarez-Pol H, Cabanelas P, Pazos A, Seco M, Riádigos I, Pérez Muñuzuri V, Gómez-Tato A, Mouriño J C, Rey P and Taboada J. 2017. TRAGALDABAS. First results on cosmic ray studies and their relation with the solar activity, the Earth magnetic field and the atmospheric properties. arXiv preprint: arXiv: 1701.07277 [DOI: 10.48550/arXiv.1701.07277]
- Gu S D and Olivier H. 2020. Capabilities and limitations of existing hypersonic facilities. Progress in Aerospace Sciences, 113: 100607 [DOI: 10.1016/j.paerosci.2020.100607]
- Guo W, Hu Y P, Shen F F and Xiao P. 2024. Polarization characteristics distortion for L-band fully polarimetric radar subject to magnetized plasma sheath. Remote Sensing, 16(12): 2061 [DOI: 10.3390/rs16122061]
- Hammoudi A and Schaire S H. 2022. Wallops flight facility integration and testing customer handbook. NASA/TM-20220017691. NASA
- He Z X, Tang S Y, Jiang C H, Huang Y, Du W W, Wang D W, Chen H M and Zhang L R. 2024. Processing of hypersonic glide vehicle-borne SAR data with spiral trajectory. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 62: 5222215 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3459951]
- Hu Y Y, Wang D H, Wu Z Z, Zhang C Y, Zeng Z L and Wan Y J. 2022. Analysis of the observational characteristics of the quasi-zero wind layer in the near space over China. Chinese Journal of Space Science, 42(3): 383-395 (胡耀月, 王东海, 吴珍珍, 张春燕, 曾智琳, 万轶婧. 2022. 中国区域临近空间准零风层的观测特征. 空间科学学报, 42(3): 383-395) [DOI: 10.11728/cjss2022.03.210303022]
- Huang W N, Zhang X J, Li Z B, Wang S, Huang M and Cai R. 2019. Development status and application prospect of near space science and technology. Science and Technology Review, 37(21): 46-62 (黄宛宁, 张晓军, 李智斌, 王生, 黄旻, 蔡榕. 2019. 临近空间科学技术的发展现状及应用前景. 科技导报, 37(21): 46-62) [DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.21.005]
- Hudson R D and Mahle S H. 1972. Photodissociation rates of molecular oxygen in the mesosphere and lower thermosphere. Journal of Geophysical Research, 77(16): 2902-2914 [DOI: 10.1029/JA077i016p02902]
- Hui X, Wei F, Li L, Chen T, Zhou B, Song L, Wei F, Wang X Y, Zhu X and Tao M Z. 2022. In-situ environmental detecting payloads onboard the floating platform in near-space. Aerospace Technology, (3): 95-104 (胡雄, 韦峰, 李磊, 陈涛, 周斌, 宋亮, 韦飞, 王馨悦, 朱翔, 陶孟泽. 2022. 浮空平台临近空间环境探测载荷技术研究. 空天技术, (3): 95-104) [DOI: 10.16338/j.issn.2097-0714.20220621]
- Institute of Microsatellite Innovation, Chinese Academy of Sciences. 2021. Lixing-1[EB/OL]. [2026-03-11]. http://www.microsate.com/wn/cgyhj/202112/t20211228_6328583.html (中国科学院微小卫星创新研究院. 2021. 力星一号[EB/OL]. [2026-03-11]. http://www.microsate.com/wn/cgyhj/202112/t20211228_6328583.html)
- Ishikawa T, Hashimoto T, Sawai S, Saito Y, Inatomi Y, Yoshimitsu T, Sakai S, Kobayashi H, Fujita K and Bando N. 2009. Microgravity experiment system using free-fall capsule from a high altitude balloon (result of the 2nd test flight). Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan, 7(ists26): Ph_29-Ph_33 [DOI: 10.2322/tstj.7.Ph_29]
- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). 2019. Super low altitude test satellite (SLATS) "TSUBAME" has set a GUINNESS WORLD RECORDS(R) [EB/OL]. [2026-03-11]. <https://global.jaxa.jp/press/2019/12/20191224a.html>
- Kaul R. 2024. Outer Space: is it a global common? Frontiers in Space Technologies, 5: 1411610 [DOI: 10.3389/frspt.2024.1411610]
- Kimoto Y, Tsuchiya Y, Miyazaki E, Goto A, Yukumatsu K and Imamura S. 2022. Analysis of upper atmospheric effects on material per onboard atomic oxygen monitor system of SLATS. Frontiers in Space Technologies, 3: 891753 [DOI: 10.3389/frspt.2022.891753]
- Konoue K, Hayato A and Sasaki M. 2023. Onorbit operational results of small and high resolution optical sensor (SHIROP). Aeronautical and Space Sciences Japan, 71(1): 1-8 (此上一也, 早藤麻美, 佐々木雅範. 2023. 「つばめ」搭載小型高分解能光学センサ(SHIROP)の開発と観測成果. 日本航空宇宙学会誌, 71(1): 1-8) [DOI: 10.14822/kjsass.71.1_1]
- Kopp G, Belting C, Castleman Z, Drake G, Espejo J, Heuerman K, Lamprecht B, Lanzi J, Smith P, Stuchlik D and Vermeer B. 2014. First results from the hyperspectral imager for climate science

- (HySICS)/Proceedings of SPIE 9088, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XX. Baltimore: SPIE: 90880Q [DOI: 10.1117/12.2053426]
- Kopp G, Smith P, Belting C, Castleman Z, Drake G, Espejo J, Heuerman K, Lanzi J and Stuchlik D. 2017. Radiometric flight results from the HyperSpectral Imager for Climate Science (HySICS). *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 6(1): 169-191 [DOI: 10.5194/gi-6-169-2017]
- Kuprikov N M. 2023. International standard atmosphere - a tool for technological measurement sovereignty in the aerospace industry. *E3S Web of Conferences*, 460: 07022 [DOI: 10.1051/e3sconf/202346007022]
- Kuznetsov N V and Nymmik R A. 1996. Single event upsets of spacecraft microelectronics exposed to solar cosmic rays. *Radiation Measurements*, 26(6): 959-965 [DOI: 10.1016/S1350-4487(96)00122-9]
- Langston S and Pell S J. 2015. What is in a name? Perceived identity, classification, philosophy, and implied duty of the 'astronaut'. *Acta Astronautica*, 115: 185-194 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2015.05.028]
- Li G J, Wang H B, Zhang K and Yi Z S. 2024. Lift enhancement and drag reduction technologies of solar powered unmanned aerial vehicles in near space: review. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 45(5): 529644 (李广佳, 王红波, 张凯, 仪志胜. 2024. 临近空间太阳能无人机增升减阻技术综述. *航空学报*, 45(5): 529644) [DOI: 10.7527/S1000-6893.2023.29644]
- Li Y J, Huang W N, Zhou J H, Zhang X J and Zhang H Y. 2024. Development status and prospects of near space observatories. *Chinese Journal of Space Science*, 44(6): 1068-1085 (李一健, 黄宛宁, 周江华, 张晓军, 张航悦. 2024. 临近空间天文台发展现状与展望. *空间科学学报*, 44(6): 1068-1085) [DOI: 10.11728/cjss2024.06.2023-0145]
- Liu G, He T B, Li X G, Jiang T C and Wen D S. 2025. Recent advances in segmented planar imaging technology. *Optics and Laser Technology*, 187: 112795 [DOI: 10.1016/j.optlastec.2025.112795]
- Liu Z Y, Zong Q G, Rankin R, Zhang H, Wang Y F, Zhou X Z, Fu S Y, Yue C, Zhu X Y, Pollock C J, Fuselier S A and Le G. 2022. Simultaneous macroscale and microscale wave-ion interaction in near-earth space plasmas. *Nature Communications*, 13(1): 5593 [DOI: 10.1038/s41467-022-33298-6]
- Macias A. 2018. Weapons of the future: Here's the new war tech Lockheed Martin is pitching to the Pentagon[EB/OL]. [2026-03-11]. <https://www.cnn.com/2018/03/06/future-weapons-lockheed-martin-pitches-new-war-tech-to-pentagon.html>
- Lou Z Y, Belmekki B E Y and Alouini M S. 2023. HAPS in the non-terrestrial network nexus: prospective architectures and performance insights. *IEEE Wireless Communications*, 30(6): 52-58 [DOI: 10.1109/MWC.004.2300198]
- Lü D R, Chen Z Y, Guo X and Tian W S. 2009. Recent progress in near space atmospheric environment study. *Advances in Mechanics*, 39(6): 674-682 (吕达仁, 陈泽宇, 郭霞, 田文寿. 2009. 临近空间大气环境研究现状. *力学进展*, 39(6): 674-682) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0992.2009.06.008]
- Lu X L, Li H G, Li X J, Te R G L, Geng J and He X Y. 2024. Near space development and utilization. *Aerospace China*, (11): 6-20 (陆晓磊, 李红光, 李新军, 特日格乐, 耿嘉, 贺小艳. 2024. 临近空间开发与利用. *中国航天*, (11): 6-20) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-7742.2024.11.002]
- Ma L L, Wang N, Gao C X, Zhao Y G, Yang B Y, Wang X H, Han Q J, Xu N, Song P L and Liu Y K. 2023. On-orbit absolute radiometric calibration for optical remote sensing satellites: progress and trends. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(5): 1061-1087 (马玲玲, 王宁, 高彩霞, 赵永光, 杨本永, 王新鸿, 韩启金, 徐娜, 宋培兰, 刘耀开. 2023. 光学遥感卫星在轨绝对辐射定标: 进展与趋势. *遥感学报*, 27(5): 1061-1087) [DOI: 10.11834/jrs.20222117]
- McDowell J C. 2018. The edge of space: revisiting the Karman Line. *Acta Astronautica*, 151: 668-677 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.07.003]
- Molczan T. 2016. Program 437AP: a sub-orbital corona-derived satellite inspector[EB/OL]. [2026-03-11]. <http://www.satobs.org/Program437AP/Program437AP.html>
- Musa O, Huang G P and Yu Z H. 2022. Assessment of new pressure-corrected design method for hypersonic internal waverider intake. *Acta Astronautica*, 201: 230-246 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.09.001]
- Najafabadi M A and Kazemi I. 2024. Systemic design of the very-high-resolution imaging payload of an optical remote sensing satellite for launch into the VLEO using a small launch vehicle. *Heliyon*, 10(6): e27404 [DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27404]
- Newman C J. 2026. Point-to-point rocket transportation systems: jurisdiction, regulation and liability for high-altitude transportation. *Acta Astronautica*, 239: 618-626 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2025.11.037]
- Özdemir M C. 2013. Conceptual changes by use of near space//2013 IEEE/AIAA 32nd Digital Avionics Systems Conference (DASC). Syracuse: IEEE: 3E3-1-3E3-10 [DOI: 10.1109/DASC.2013.6712573]
- Pan Y D, Xiao X X and Li W H. 2025. Analysis and optimization of energy balance feasible domain for very-low-earth-orbit satellite flight. *Journal of Astronautics*, 46(4): 688-697 (潘彦达, 肖歆昕, 李文皓. 2025. 超低轨卫星飞行能量平衡可行域解析与优化. *宇航学报*, 46(4): 688-697) [DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2025.04.004]
- Pang B J, Xiao W K, Peng K K and Wang D F. 2016. An engineering model of space debris environment: SDEEM 2015. *Spacecraft Environment Engineering*, 33(4): 343-348 (庞宝君, 肖伟科, 彭科科, 王东方. 2016. SDEEM 2015 空间碎片环境工程模型. *航天器环境工程*, 33(4): 343-348) [DOI: 10.12126/sec.2016.04.001]
- Park S H, Kim H D and Park G. 2018. Orbit, orbital lifetime, and reentry survivability estimation for orbiting objects. *Advances in Space Research*, 62(11): 3012-3032 [DOI: 10.1016/j.asr.2018.08.016]
- Park S H, Navarro Laboulais J, Leyland P and Mischler S. 2021. Reentry survival analysis and ground risk assessment of space debris

- considering by-products generation. *Acta Astronautica*, 179: 604-618 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.09.034]
- Peters A B, Zhang D J, Chen S, Ott C, Oses C, Curtarolo S, McCue I, Pollock T M and Premeela S E. 2024. Materials design for hypersonics. *Nature Communications*, 15(1): 3328 [DOI: 10.1038/s41467-024-46753-3]
- Pic P, Evoy P and Morin J F. 2023. Outer space as a global commons: an empirical study of space arrangements. *International Journal of the Commons*, 17(1): 288-301 [DOI: 10.5334/ijc.1271]
- Pyras L, Glaser C, Hallmann S and Nelles A. 2023. Atmospheric muons at PeV energies in radio neutrino detectors. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2023: 43 [DOI: 10.1088/1475-7516/2023/10/043]
- Qian L Y, Laštovička J, Roble R G and Solomon S C. 2011. Progress in observations and simulations of global change in the upper atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116 (A2): A00H03 [DOI: 10.1029/2010JA016317]
- Rezo Z, Bagarić T and Steiner S. 2025. Profiling of the environmental conditions for high-altitude pseudo satellites operations. *Transportation Research Procedia*, 91: 45-52 [DOI: 10.1016/j.trpro.2025.10.007]
- Rhoden E A, Forbes J M and Marcos F A. 2000. The influence of geomagnetic and solar variabilities on lower thermosphere density. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62(11): 999-1013 [DOI: 10.1016/S1364-6826(00)00066-3]
- Schafer B C, Kim J H, Sharipov F, Hwang G S, Vlassak J J and Keith D W. 2025. Photophoretic flight of perforated structures in near-space conditions. *Nature*, 644(8076): 362-369 [DOI: 10.1038/s41586-025-09281-8]
- Scott C D. 1985. Effects of nonequilibrium and wall catalysis on Shuttle heat transfer. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 22(5): 489-499 [DOI: 10.2514/3.25059]
- Seo J H, Choi J Y, Seok J H, Cha J H, Kim J Y, Kim Y G, Lee H J, Kim C G, Chung K J and Kim Y. 2024. Piezoelectric energy harvesting from the atomic oxygen hypervelocity impact in low Earth orbit. *Acta Astronautica*, 223: 585-593 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2024.07.027]
- Shi X K, Hu Y B, Wang P F, Zhang W J and Liu B. 2023. Research progress on the stratospheric quasi-zero wind layer. *Advances in Earth Science*, 38(9): 916-930 (史小康, 胡艳冰, 王攀峰, 张文军, 刘博. 2023. 平流层准零风层的研究进展. *地球科学进展*, 38 (9): 916-930) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2023.051]
- Smith D J and Sowa M B. 2017. Ballooning for biologists: mission essentials for flying life science experiments to near space on NASA large scientific balloons. *Gravitational and Space Research*, 5(1): 52-73 [DOI: 10.2478/gsr-2017-0005]
- Steiger C, Romanazzo M, Emanuelli P P, Floberghagen R and Fehring-er M. 2013. Flying at the edge - extremely low altitude operations for ESA's drag-free gravity mission GOCE//AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference. Boston: AIAA: 2013-4772 [DOI: 10.2514/6.2013-4772]
- Su J Y. 2013. Near space as a *sui generis* zone: a tri-layer approach of delimitation. *Space Policy*, 29(2): 90-92 [DOI: 10.1016/j.spacepol.2013.03.009]
- Sustainable Skies. 2017. Airbus, williams team to expand zephyr program[EB/OL]. [2026-03-11]. <https://sustainableskies.org/airbus-williams-team-after-more-records/>
- Tao R L and Wang Z H. 2025. Molecular dynamics study of gas-surface interactions in upper atmosphere. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 57(1): 65-78 (陶瑞灵, 王智慧. 2025. 上层大气层气固相互作用的分子动力学研究. *力学学报*, 57(1): 65-78) [DOI: 10.6052/0459-1879-24-284]
- Tellus. 2019. SLATS_1B[EB/OL]. [2026-03-11]. https://www.tellusx-dp.com/en-us/catalog/data/slats_1b.html
- Ullah M A, Souza R D, Pasolini G Sant'ana J M D S, Höyhtyä M, Mikhaylov K, Alves H, Paolini E and Al-Hourani A. 2025. Extending the LoRa direct-to-satellite limits: Doppler shift pre-compensation. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 6: 2256-2273 [DOI: 10.1109/OJCOMS.2025.3554077]
- U.S. Air Force. 2011. X-51A waverider[EB/OL]. [2026-03-11]. <https://permanent.access.gpo.gov/websites/dodandmilitaryejournals/www.af.mil/information/factsheets/factsheet.asp?fsID=17986.htm>
- Ulla C S, Dashora A, Reddy L C and Kulkarni A V. 2022. Analysis of ground sampling distance of convergent images for Keypoints detection for close-range photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2022: 93-98 [DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-93-2022]
- Uyeda F, Alvidrez M, Kline E, Petrini B, Barritt B, Mandle D and Alexander A C. 2022. SDN in the stratosphere: loon's aerospace mesh network//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference. Amsterdam: Association for Computing Machinery: 264-280 [DOI: 10.1145/3544216.3544231]
- Vadas S L, Liu H L and Lieberman R S. 2014. Numerical modeling of the global changes to the thermosphere and ionosphere from the dissipation of gravity waves from deep convection. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(9): 7762-7793 [DOI: 10.1002/2014JA020280]
- Virgin Galactic. 2024. Virgin Galactic Spaceflight Expeditions[EB/OL]. [2026-03-11]. <https://www.virgingalactic.com/gallery>
- Walsh J, Berthoud L and Allen C. 2021. Drag reduction through shape optimisation for satellites in Very Low Earth Orbit. *Acta Astronautica*, 179: 105-121 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.09.018]
- Wang H, Zhang C F, Cao Y X, Jiang X, Zheng D X and Yang Q. 2025. Progress in experimental research on flexible solar cells for near space application. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 51(8): 2632-2641 (王辉, 张春福, 曹越先, 姜箫, 郑德旭, 杨琦. 2025. 面向临近空间应用的柔性太阳能电池试验研究进展. *北京航空航天大学学报*, 51(8): 2632-2641) [DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0949]
- Wang N, Ma L L, Liu Q, Zhao Y G, Teng G E, Liu Y K, Gao C X, Liu E C, Zhang D H, Li J M, Wang R F, Zhang B B, Gao H L, Wu H, Han Q J, Zhang T H, Yang Y C, Niu Y F, Zheng Q C and Ouyang G Z. 2023. The near-space altitude experiment for satellite radio-

- metric calibration and the first results. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(5): 1177-1193 (王宁, 马灵玲, 刘强, 赵永光, 腾格尔, 刘耀开, 高彩霞, 刘恩超, 张东辉, 黎荆梅, 王任飞, 张贝贝, 高海亮, 吴骅, 韩启金, 张泰华, 杨燕初, 牛沂芳, 郑青川, 欧阳光洲. 2023. 临近空间高度卫星光学载荷辐射定标试验与初步结果. *遥感学报*, 27(5): 1177-1193 [DOI: 10.11834/jrs.20222070])
- Weerasinghe J, Prasad K, Mathew J, Trifoni E, Baranov O, Levchenko I and Bazaka K. 2023. Carbon nanocomposites in aerospace technology: a way to protect low-orbit satellites. *Nanomaterials*, 13 (11): 1763 [DOI: 10.3390/nano13111763]
- Wijtvliet M, Pont B, Brinkerink C, Pourshaghagh H R, Jordans R, Hörandel J, Beurskens J, Bouma R, Dalderup J, Dolron P, Gubbels J, Gomez Medina V M, van Harten L, Hermesen T, Jansen I, Kapitein D, Koedam M, Maximidis R, Morren W, Oudman F, Stränz S, Szalas-Motesiczky D, van Vliet T, Witteman J, van Zanten A and Zoontjens K. 2020. PR³: a system for radio-interferometry and radiation measurement on sounding rockets. *Microprocessors and Microsystems*, 77: 103163 [DOI: 10.1016/j.micpro.2020.103163]
- WIPO. 1982. United Nations convention on the law of the sea[EB/OL]. [2026-03-11]. <https://www.wipo.int/wipolex/en/treaties/text-details/12689>
- Xiao Z, Ji R X, Chen A H, Qi Z, Chi F H and Li L. 2024. Current status and prospects of the development on low speed aircraft in near space. *Aerospace China*, (11): 21-31 (肖振, 姬瑞雪, 陈安宏, 齐征, 赤丰华, 李磊. 2024. 临近空间低速飞行器发展现状与展望. *中国航天*, (11): 21-31) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-7742.2024.11.003]
- Xu J Y, Smith A K, Liu M H, Liu X, Gao H, Jiang G Y and Yuan W. 2014. Evidence for nonmigrating tides produced by the interaction between tides and stationary planetary waves in the stratosphere and lower mesosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(2): 471-489 [DOI: 10.1002/2013JD020150]
- Xu Z H, Xu G N, Luo Q, Han Y F, Tang Y, Miao Y, Li Y X, Qin J, Guo J B, Zha W S, Gong C, Lu K, Zhang J Q, Wei Z X, Cai R, Yang Y C, Li Z J and Ma C Q. 2023. *In situ* performance and stability tests of large-area flexible polymer solar cells in the 35-km stratospheric environment. *National Science Review*, 10(4): nwac285 [DOI: 10.1093/nsr/nwac285]
- Yakunchikov A, Kosyanchuk V, Filatyev A and Golikov A. 2025. Simulation of rarefied gas flow inside the satellite air intake in ultra-low Earth orbit. *Acta Astronautica*, 226(Pt 2): 102-112 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2024.11.041]
- Yang B, Yang J, Li X J and Zhao Y Y. 2008. The operating environment of near-space and its effects on the airship. *Spacecraft Environment Engineering*, 25(6): 555-557 (杨秉, 杨健, 李小将, 赵云祎. 2008. 临近空间飞艇运行环境及其影响. *航天器环境工程*, 25(6): 555-557) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2008.06.013]
- Yang C X and Cai F F. 2017. Regulation of suborbital commercial flights. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition)*, 30(2): 23-31 (杨彩霞, 蔡芳菲. 2017. 亚轨道商业飞行的法律规制. *北京航空航天大学学报(社会科学版)*, 30(2): 23-31) [DOI: 10.13766/j.bhsk.1008-2204.2017.0019]
- Yang J L, Jiang C W, Zhu M and Wang Z L. 2024a. Development of near space: current status, problems, and countermeasures. *Strategic Study of CAE*, 26(5): 128-136 (杨君琳, 蒋崇文, 祝明, 王自力. 2024a. 临近空间发展现状、问题及对策研究. *中国工程科学*, 26(5): 128-136) [DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.05.013]
- Yang J L, Yang J F, Liu D X, Zhang W Q and Li L J. 2024b. Competition pattern and coping strategies in near space. *Strategic Study of CAE*, 26(5): 137-145 (杨君琳, 杨静帆, 刘东旭, 张文清, 李立京. 2024b. 临近空间竞争格局与应对策略. *中国工程科学*, 26(5): 137-145) [DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.05.014]
- Young M, Keith S and Pancotti A. 2009. An overview of advanced concepts for near space systems//45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Denver: AIAA: 2009-4805 [DOI: 10.2514/6.2009-4805]
- Zábori B, Hirn A, Deme S, Apáthy I, Csöke A, Pázmándi T and Szántó P. 2016. Space dosimetry measurements in the stratosphere using different active and passive dosimetry systems. *Radiation Protection Dosimetry*, 171(4): 453-462 [DOI: 10.1093/rpd/ncv442]
- Zhan S G. 2006. "Symposium on development trends and major basic scientific issues of near space vehicles" held in Beijing. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*(4): 232 (詹世革. 2006. “临近空间飞行器的发展趋势和重大基础科学问题研讨会”在京召开. *中国科学基金*(4): 232) [DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2006.04.012]
- Zhang H Y, Yang Y C and Cai R. 2023. Dynamics simulation of folding wing UAVs launched from a high-altitude balloon platform. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 237(13): 3072-3091 [DOI: 10.1177/09544100231181218]
- Zhang H Y, Yang Y C and Cai R. 2024. Application of mass particle methods in the shape design for scientific balloons. *Journal of Aircraft*, 61(3): 988-1005 [DOI: 10.2514/1.c037587]
- Zhang H Y, Yang Y C, Cai R and Zhao R. 2021. Numerical simulation of the dynamic launching process for high-altitude balloons. *Advances in Space Research*, 68(9): 3677-3699 [DOI: 10.1016/j.asr.2021.06.038]
- Zhang J, Jiang Y F, Chen S and Li S H. 2024. Overview of aerodynamic drag calculation and reduction design for very low Earth orbit satellites. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 45(21): 29796 (张俊, 蒋亦凡, 陈松, 李帅辉. 2024. 超低轨卫星气动阻力计算与减阻设计研究综述. *航空学报*, 45(21): 29796) [DOI: 10.7527/S1000-6893.2023.29796]
- Zhang J R, Zeng H and Li M T. 2015. Hierarchical differential correction based transfer trajectory design for Halo orbit with multiple constraints. *Journal of Astronautics*, 36(10): 1114-1124 (张景瑞, 曾豪, 李明涛. 2015. 日地Halo轨道的多约束转移轨道分层微分修正设计. *宇航学报*, 36(10): 1114-1124) [DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2015.10.004]
- Zhou W X, Zhang X X, Guo J G, Yang G L, Zong W G, Yu Q L and Yang Y G. 2024. Measurement of atmospheric neutron spectrum

at near-space altitudes using a CLYC(Ce) detector. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 73: 1007706 [DOI:

10.1109/TIM.2024.3449976]

Near-space partition framework based on environment – technology – administration

CAI Rong

1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Science, Beijing 100094, China;
2. School of Space Exploration, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The scientific delineation of near-space boundaries is a fundamental prerequisite for the orderly development of related industries. Persistent inconsistencies in historical demarcation criteria and a mismatch between traditional definitions and current technological needs have left the concept of near space ambiguous. This study aims to transcend the limitations of the traditional Kármán line by proposing a new, multidimensional partition framework. The objective is to provide a coherent, scientifically grounded definition that integrates atmospheric physics, engineering constraints, and airspace management principles to guide future research, technology development, and rulemaking.

This study proposes a three-segment partition framework for near space—the aerodynamic domain (lower near space: 18–80 km), the transition domain (middle near space: 80–200 km), and the perturbation domain (upper near space: 200–300 km)—based on the continuous variation in the atmospheric environment and its consequent design constraints on flight platforms. The methodology integrates prior knowledge from three distinct perspectives: (1) natural science, analyzing the continuous evolution of atmospheric physics and space environment from the stratosphere to the ionospheric F-layer peak; (2) engineering and technology, evaluating typical flight platforms (solar-powered drones, stratospheric aerostats, hypersonic vehicles, suborbital vehicles, and very low Earth orbit satellites) to determine operational boundaries; and (3) airspace management, assessing the framework’s value in bridging current air traffic control systems and resolving legal ambiguities between air and space.

The study’s findings corroborate the framework’s scientific validity across multiple dimensions. (1) The 18–300 km range represents a complete Earth system characterized by gradual atmospheric parameter changes and a continuous evolution of dominant physical processes—from continuum flow aerodynamics, through an aerodynamics – orbit coupling transition, to a rarefied atmosphere perturbation regime. (2) Engineering analysis of five platform types indicates that 18 km is the feasible lower boundary for long-endurance flight (the upper limit of conventional aviation), and 300 km is the practical upper boundary where atmospheric drag becomes the decisive perturbation factor on orbital lifetime. This framework seamlessly connects the continuum from aviation to astronautics. (3) The three-tier partition provides a clear technical benchmark for bridging the current aviation management framework and addressing legal ambiguities in outer space.

This definition of near space serves as a research subject that delineates the operational scope for future industry development. For technology development, the framework, grounded in physical mechanisms, helps the industry avoid blind exploration by forming a stepwise R&D roadmap from “aviation aerodynamics-dominated” to “astronautic orbit-dominated” technologies. For standard setting, it facilitates differentiated airworthiness certification, environmental adaptability, and communication standards for each of the three layers. For international cooperation, the “lower – middle – upper near-space” framework enables a new paradigm of “layered collaboration,” allowing nations to select zones matching their industrial capabilities. Therefore, this study does not merely extend the current 18–100 km cognitive range; by establishing the “aerodynamic – transition – perturbation domain” framework, it provides a theoretical foundation for the systematic understanding and differentiated utilization of near space from an environment – mission coupling perspective.

Key words: near-space, space demarcation, natural science, engineering technology, airspace management

Supported by AIRCAS Disruptive Innovation Fund (No. 2025-AIRCAS-SDTP-09)