

人工智能赋能空天过渡区战场环境信息应用、对抗与挑战

盛 峥,张焕炜,冷洪泽,韩志铭,宋君强*
(国防科技大学 气象海洋学院,湖南 长沙 410073)

摘要:空天过渡区位于50~250 km高度区间,是高超音速武器突防与电子战博弈的战略要域,更是影响作战效能的关键战场。人工智能(artificial intelligence, AI)正深度赋能该区域的信息对抗体系,推动其向动态化、智能化演进。本文系统综述了AI在“感知—融合—预测—对抗”全链条中的关键技术与应用:依托深度学习实现环境参数的高效反演;利用智能融合构建战场环境数字孪生;借助物理信息提升预报精度;发展自主学习与博弈决策能力,支撑精准认知与抗干扰。同时,本文聚焦于AI赋能下信息对抗中的核心难题:环境感知不确定性、模型可解释性弱、跨域迁移困难与数据获取受限等。最后,对未来发展方向进行了展望,并强调AI正从技术工具演变为核心驱动力。

关键词:人工智能;空天过渡区;信息对抗

中图分类号:V19 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2026)02-163-15

Artificial intelligence-empowered applications, countermeasures, and challenges in battlefield environment information for aviation and aerospace transition zones

SHENG Zheng, ZHANG Huanwei, LENG Hongze, HAN Zhiming, SONG Junqiang*

(College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The aviation and aerospace transition zone, spanning altitudes between 50~250 km, constitutes a strategic arena for hypersonic weapon penetration and electronic warfare operations, serving as a critical battlefield that significantly impacts operational effectiveness. AI (artificial intelligence) is profoundly empowering the region's information warfare systems, driving their evolution toward dynamic and intelligent capabilities. Key AI technologies and applications across the entire “perception-fusion-prediction-countermeasure” chain are systematically reviewed: relying on deep learning for efficient inversion of environmental parameters; utilizing intelligent fusion to construct digital twins of battlefield environments; enhancing forecast accuracy through physical information; and developing autonomous learning and game-theoretic decision-making capabilities to support precise cognition and counter-interference. The core challenges facing AI-enabled information warfare include environmental perception uncertainty, weak model interpretability, difficulties in cross-domain transfer, and restricted data acquisition. Finally, the outlook for future development is presented, emphasizing that AI is evolving from a technical tool into a core driving force.

Keywords: artificial intelligence; aviation and aerospace transition zone; information countermeasure

空天过渡区(aviation and aerospace transition zones, AATZ)位于50~250 km高度区间,是介于传统航空与航天活动之间的战略空域,其下界延伸至平流层顶,上界逼近近地轨道,以卡门线(100 km)为核心过渡^[1]。与现有文献集中讨

论的20~100 km的临近空间不同,空天过渡区向上覆盖100~250 km的电离层-热层耦合带,是迄今综述尚未系统触及的真空空域。随着高超声速武器突防、天基侦察部署与电子战博弈的日益频繁,该区域已成为大国战略竞争

收稿日期:2025-10-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42275060,42405065,42474225,42305048);国防科技大学自主创新科学基金资助项目(24-ZZCX-JDZ-45,25-ZZCX-BC-10)

第一作者:盛峥(1983—),男,江西南昌人,教授,博士,博士生导师,E-mail:19994035@sina.com

*通信作者:宋君强(1962—),男,湖南长沙人,教授,硕士,博士生导师,E-mail:junqiang@nudt.edu.cn

引用格式:盛峥,张焕炜,冷洪泽,等. 人工智能赋能空天过渡区战场环境信息应用、对抗与挑战[J]. 国防科技大学学报, 2026, 48(2): 163-177.

Citation: SHENG Z, ZHANG H W, LENG H Z, et al. Artificial intelligence-empowered applications, countermeasures, and challenges in battlefield environment information for aviation and aerospace transition zones[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2026, 48(2): 163-177.

的核心空域,其复杂多变的大气、电离层与电磁环境正从作战背景演变为可被主动利用的对抗性变量。美国、俄罗斯等国已将该空域列为未来空天作战的关键领域,并积极推进高空长航时平台、定向能武器与高超音速拦截系统等能力建设^[2]。我国亦在《中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定》^[3]中明确提出发展新域、新质作战力量,凸显抢占这一战略制高点的紧迫性。

空天过渡区具有独特的物理特性和电磁环境,其大气密度低于对流层但高于外层空间,气象条件复杂多变,电离层效应显著,且电磁波传播环境复杂多样^[1]。这些特征使得该区域成为导弹中段飞行、高超声速武器及高空侦察平台活动的关键战场空间。然而,传统信息对抗手段应对这种高度非线性、强动态性的环境日益乏力。如何实现对复杂战场环境的精准感知、快速融合、超前预测与智能对抗,已成为提升空天作战体系效能全新的发展态势。在此背景下,人工智能(artificial intelligence, AI)技术凭借其强大的非线性建模、多源数据融合与自主决策能力,正深度赋能“感知—融合—预测—对抗”全链条,推动信息对抗模式从静态响应向动态自适应跃迁。

近年来,深度学习、强化学习与生成模型等 AI 技术已在环境参数反演、多源信息融合、短临态势预测与智能抗干扰等领域取得显著进展^[4]。例如,端到端神经网络提升了电离层状态反演效率,生成对抗网络(generative adversarial network, GAN)增强了电子战欺骗信号的拟真度^[5]。然而,AI 在这些领域的应用仍面临模型可解释性不足、小样本鲁棒性差、跨域迁移困难、对抗攻击脆弱及计算资源受限等严峻挑战,制约了其从技术演示向实战部署的跨越。因此,尽管 AI 为破解空天过渡区信息对抗难题提供了全新路径,但其在高动态、高对抗性环境下的可靠性、适应性与安全性仍面临严峻考验^[6]。

综上,AI 赋能空天过渡区战场环境信息对抗的关键技术及其应用,具有重要的战略意义和现实价值,但目前尚缺乏对该领域技术路径、应用场景与核心挑战的系统性综述。本文围绕“感知—融合—预测—对抗”技术链条,从多角度梳理了相关研究进展,剖析当前瓶颈,并展望可信 AI、物理信息融合等未来方向,旨在为智能化空天作战体系的构建提供理论参考。本综述可为研究人员、工程师与战略决策者提供全景式洞察,推动该

领域的协同创新。

1 空天过渡区战场环境的时空分布特征

空天过渡区作为连接航空与航天活动的战略空域,其内部环境已超越传统气象学范畴,演变为影响国家安全与战略行动的关键变量。

在动力学结构方面,行星波、潮汐波以及重力波是影响空天过渡区最主要的动力学过程,这些波动在传播过程中通过波-波、波-流相互作用将能量释放在背景大气中,随着能量的累积最终导致大气环流形式和结构的改变^[7-13]。在平流层风场的滤波作用下,上传至中间层的重力波相速分布被改变,而破碎的重力波会对背景气流施加反向阻力^[14-15],这正是导致低空天过渡区 50 ~ 100 km 区域夏季与冬季风反转的主要因素^[16]。在空天过渡区的中高层,东向传播的非迁移潮汐波耗散会强烈加速纬向平均风,使低纬度急流的高度和强度发生改变^[17]。潮汐波向上传播过程中,会将季节内振荡(intraseasonal oscillations, ISO)、热带平流层准两年振荡(quasi-biennial oscillation, QBO)以及南方涛动(southern oscillation, SO)等低层大气事件的信号传输到空天过渡区,引起背景大气的温度和风场以及电离层改变^[18-21]。

此外,空天过渡区还存在复杂的化学过程,以金属原子、金属离子和气辉为主。在 75 ~ 110 km 高度范围,存在一个含有一定丰度、多种金属原子(如 Fe、Mg、K、Na、Ca 等)的大气层,称为大气金属层,一般被认为是宇宙尘埃和流星消融形成的^[22-23]。钠原子层的数密度随高度变化呈现近似单峰的高斯分布,其变化特征受大气动力学、大气化学及太阳辐射等多种因素影响^[24-25]。目前针对突发钠层成因的解释主要包括流星直接注入、高能极光粒子轰击尘埃表面释放自由钠原子、偶发 E 层(sporadic-E layer, Es 层)中的电子与金属离子中和,以及由重力波破碎导致当地升温,影响化学反应速率,从而生成钠原子^[26-29]。在 95 ~ 120 km 的高度区域中,存在厚度为 1 ~ 2 km 的电离增强结构,即偶发 E 层^[30-31]。Es 层的发生具有显著的地方时和季节依赖性,其在夏季的发生率明显较高^[32-34]。Es 层的形成机制复杂,涉及电离层电场和水平中性风的联合效应以及金属离子的化学反应等多种物理、化学现象^[35-36],而且不同纬度地区 Es 层的形成和时空变化机制不同^[37-40]。气辉可分为昼辉和夜辉,分别受太阳辐射和复杂的光化学反应控制。基于卫星观测揭示了气辉存在显著的时空特征,并将其归因于大气

重力波、潮汐波和行星波对反应物种分布的调制^[41-42]。此外,气候变化可能影响气辉化学过程,因为中间层温度和成分的变化影响反应速率和发射强度^[43]。

综上所述,空天过渡区受多种大气活动(详见图 1)与化学反应的影响,且呈现强烈的高度分层、区域异质与强耦合特征。这些分布特点不仅是平台运行与武器突防的物理约束基础,更是信息对抗中可被主动识别、预测、利用甚至诱导的重

要环境变量。深入剖析其内部机理、空间结构与演化规律,是构建智能化战场环境认知与对抗能力的前提。

1.1 垂直分层

空天过渡区在垂直方向上可划分为多个具有独特物理化学属性的子层,各层之间存在明显的参数跃变与过程转换,构成天然的梯度带,详见表 1。

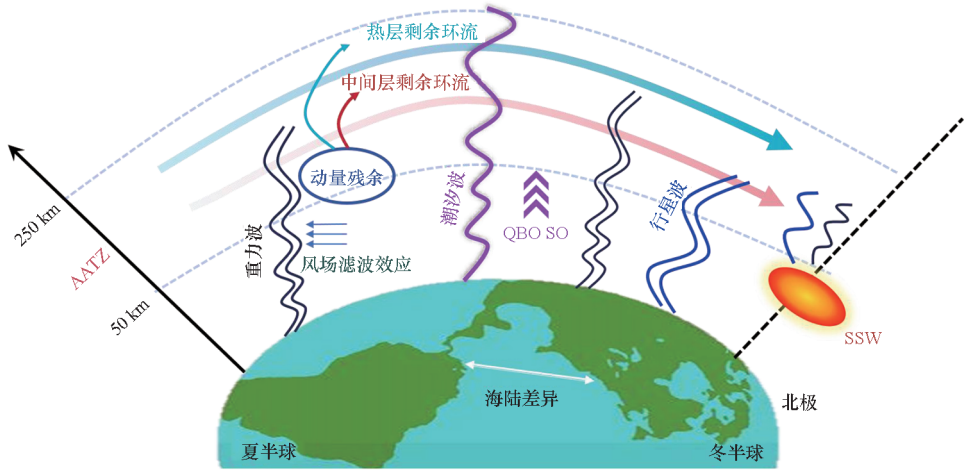


图 1 空天过渡区多尺度波动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-scale fluctuations of AATZ

表 1 空天过渡区战场环境垂直分层特征

Tab. 1 Vertical stratification characteristics of the AATZ battlefield environment

分布区间/km	典型现象	驱动机制
50 ~ 80	中间层冷却、重力波破碎、SSW 向上传播效应	行星波与重力波上传、CO ₂ 辐射冷却、平流层风场滤波
80 ~ 100	中间层顶低温极小值、金属原子层聚集区、风场转向	重力波临界层耗散、宇宙尘埃消融、太阳辐射与光化学反应、潮汐/行星波调制
100 ~ 120	Es 层高频出现、金属离子层	中性风切变(中纬)、电动力学过程(赤道)、高能粒子沉降(极区)、流星注入金属源
120 ~ 250	F 层主体形成、电子密度峰值与陡梯度	太阳活动与电磁辐射,中性风、电场、光化学反应与粒子沉降多重耦合

50 ~ 80 km(中间层):温度随高度递减,以 CO₂ 辐射冷却为主导,是大气温度最低的区域之一^[44-45]。中间层的冷却趋势随纬度、季节和高度而发生变化,南半球的冷却强度高于北半球^[46-47],而且高纬度区域的冷却趋势具有更大的不确定性^[48-51]。一方面,高纬度地区的大气动力学活动更为活跃,例如春季的极地涡旋破裂和冬季的平流层爆发性增温(sudden stratospheric warmings, SSW);另一方面,高纬度地区观测数据的稀缺限制了对其温度变化的准确描述。值得注意的是,该区域顶部接近湍流层顶(通常位于

80 ~ 120 km)^[1,52-53]。湍流层顶的高度随季节、纬度和太阳活动动态变化,直接影响金属离子的垂直混合效率与 Es 层的稳定^[1]。

80 ~ 100 km(中间层顶):全球大气温度最小处,辐射与动力过程达到平衡。中间层顶高度和温度表现出显著的“高纬度夏季低中间层顶”现象,即夏季极区中间层顶高度下降、温度更低^[54-55]。这一特征对太阳活动响应敏感,在中低纬度还观测到与 11 年太阳周期相近的温度振荡^[50,55-56]。由于其极端低温环境,中间层顶成为研究大气冷却趋势和温室气体效应的关键指示

器,对长期战场环境评估具有战略意义。此区域还是金属原子层(如 Na、Fe、K)的主要聚集区,可通过激光雷达观测到强烈的气辉辐射^[57-58]。金属原子层可以作为大气动力过程的示踪剂;同时,该层也是流星烧蚀、宇宙尘埃沉积的主要区域^[1,22],可持续为电离层提供金属离子源。不仅如此,在重力波上传过程中,由于临界层滤波作用,与空天过渡区下方急流反向的重力波能够上传至更高高度,破碎耗散后沉积动量和能量,产生反方向的拖曳力,促使风场在该区域逐渐转向^[59-62]。

100 ~ 120 km(低热层/电离层 D 和 E 层过渡区):氧原子吸收太阳极紫外辐射,温度开始回升。电离过程增强,电子密度快速上升,等离子体密度梯度大,是极区等离子体云等电离层不规则体的萌发区,易引发射频信号闪烁、多路径效应与相位畸变,严重影响卫星导航与通信链路的稳定^[63-64]。此区域已进入电离层主体,金属离子(如 Fe^+ 、 Mg^+ 、 Na^+)通过流星烧蚀持续注入,并与大气分子相互作用,通过复杂的化学反应影响内部化学成分的组成和结构,并改变电子密度梯度^[65-68]。Es 层也位于该高度区间,且其形成机制在中纬度以风切变理论为主^[67-68],但在赤道和

极区则分别受电动力学过程和高能粒子沉降主导^[40,68-73]。这种机制的区域差异性为实施差异化电子战策略提供了物理基础。

120 ~ 250 km(热层下部至中部/电离层 E 和 F 层过渡区至 F 层主体):该区域横跨热层下部向中热层的过渡带,大气温度随高度迅速上升。在太阳极紫外辐射的作用下,空气分子和原子开始电离。电离过程在此高度区间发生结构性转变,约 160 km 以上空域构成 F 层主体,是全球电子密度最大、梯度最陡的区域之一,其电子密度分布受中性风、电场、光化学反应及粒子沉降等多重因素耦合调控^[73]。太阳活动对该层有很大影响,突出的是电离层突然扰动(sudden ionospheric disturbances, SID)。不仅如此,在磁暴期间,高纬电场可穿透至中低纬,引发大范围电离层扰动,可为实施广域电子干扰或通信阻断提供天然掩护^[74-76]。

1.2 水平分布

空天过渡区环境参数在水平方向上并非均匀分布,而是表现出强烈的纬度带状结构与局地突发性,从而构成空间异质性战场,详见表 2。

表 2 空天过渡区战场环境水平分布特征

Tab. 2 Horizontal distribution characteristics of AATZ battlefield environment

纬度区域	典型现象	驱动机制
赤道区域	赤道等离子体泡、Es 层高频出现	赤道电急流与瑞利-泰勒不稳定性、非迁移潮汐波耗散加速纬向风、SAO 形成强风切变
中纬度区域	结构复杂的 Es 层、电离层扰动和多路径传播效应	多尺度波动共同调制、纬向风切变为主、SSW 的向上传播
高纬/极区	极光带与极盖吸收、大范围通信中断	地磁活动与高能粒子沉降、极区波导与极涡相互作用、风-电场强耦合

赤道区域:在空天过渡区中高层,东向传播的非迁移潮汐波耗散会强烈加速纬向平均风场,使低纬度急流的高度和强度发生改变^[17]。另外,受赤道电急流与瑞利-泰勒不稳定性主导,易形成赤道等离子体泡(equatorial plasma bubbles, EPBs),导致全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)信号剧烈闪烁与中断^[77-78]。同时,赤道半年振荡(the semiannual oscillation, SAO)在 80 ~ 100 km 高度形成强风切变,是 Es 层高频出现区;该区域环境扰动具有强日变化与季节性规律,可预测性相对较高^[1,79]。

中纬度区域:受行星波、重力波与大气潮汐的共同调制,Es 层出现频次高、结构复杂,其临界频率与高度具有显著日夜、季节变化^[1,80-81]。相关

研究指出在中纬度地区,Es 层的高度与大气潮汐中较强的垂直切变相关,且纬向风切变比经向风切变更重要,尤其是在低海拔地区^[37,82-84]。SSW 向上传播时,可在中纬度产生显著的温度/风场异常^[1],进而调制电离层电子密度,形成电离层扰动和多路径传播效应,对 GNSS 定位精度产生厘米至米级误差。因而中纬度的空天过渡区表现为强带状结构叠加局部突发扰动,为气象-电磁协同干扰提供可预测的作战窗口。

高纬/极区:在极区,行星波从对流层向上传播并在极地波导与极区急流的相互作用下,使西风急流减弱或逆转、极区温度在数天内跃升,形成典型的 SSW 现象。SSW 期间的波动能量主要在高纬波导中汇聚并沉积动量^[85-87]。另外,受地磁

活动与粒子沉降直接影响,该纬度区也是极光带、极盖吸收与极区 Es 层的主要发生区^[88]。磁暴期间,极区电场增强可驱动全球尺度的电离层扰动,形成大范围通信中断区;同时,极区中性风场与电场耦合可形成薄而密的金属离子层^[35],其空间结构可通过雷达与光学手段联合探测,具备潜在的环境标记。

1.3 时间演化

空天过渡区环境参数在时间维度上呈现多尺度嵌套、非平稳突变的演化特征,从分钟级瞬态事件到年际振荡均有体现,从而构成了高动态演变的战场环境。

短时扰动:瞬态动力学过程常以秒至数分钟的时间尺度出现,表现为强局部的非线性突变。典型的短时扰动包括流星烧蚀产生的金属层、重力波破碎导致的局部风切变以及强对流系统激发的中尺度电离层扰动^[88-91]。此外,强对流产生的重力波在破碎后会产生次级波,其尺度更短、能量更集中,同样能够产生局部的风切变与温度异常^[1,92]。这些短时扰动的空间尺度从几千米到数十千米不等,持续时间短暂,却足以在超视距雷达、GNSS 定位以及高超声速飞行器的气动热防护中产生显著的瞬时效应,构成突袭式电子干扰或临时通信掩护的技术窗口。

日月尺度变化:受太阳极紫外辐射、半日潮汐以及月潮的共同调制,呈现相对规律的日变化和月变化。诸如温度、Es 层的发生频率呈现强烈的季节性变化;纬向反转环流则表现为冬弱夏强的季节性特征。此外,钠原子的季节变化呈现年或半年变化的特性,昼夜变化呈现明显的周日潮和半日潮的变化趋势,钠原子层还对 27 天的太阳自转周期有响应^[93-97]。空天过渡区在日月尺度上呈现极紫外辐射驱动的季节温度振荡、半日潮与月潮共同调制的风场与金属离子供给、钠层的多周期波动,这些相互耦合的过程共同塑造了该高度层的时空异质性,为雷达、通信及高超声速平台的作战环境提供了可预见的季节性窗口。

年际尺度变化:受太阳活动周期、QBO 以及 SSW 等过程的耦合作用,表现为多年的趋势性和间歇性波动^[98-99]。太阳活动(以太阳黑子数、F10.7 射电通量等表征)具有约 11 年的周期性变化,直接影响空天过渡区的能量输入和化学过程,中间层顶高纬度夏季低的现象也与太阳活动响应强烈^[1]。QBO 虽发生在低层,但可通过调制重力波上传影响空天过渡区。模拟和观测均表明,QBO 不同相位下 70 ~ 120 km 空域的纬向风结构、

温度场和经向环流存在显著差异,如 QBO 西风相位常伴随中间层西风增强^[99-100]。SSW 主要发生在北半球冬季(1—2 月),但其发生频率、强度和持续时间具有年际变化,进而导致空天过渡区响应的年际差异,且 SSW 的发生概率既受 QBO 相位调制(如 QBO 东风相位更易触发 SSW)也受太阳活动调制,形成多因子耦合的年际变率^[101-102]。

综上,空天过渡区战场环境的分布特点具有垂直分层性、水平异质性、时间动态性三大核心属性,其对抗特征则体现为感知—预测—利用—诱导的递进式能力需求。AI 技术的引入,正是为了破解其高维度、非线性、强扰动的建模难题,将复杂的环境分布图谱转化为可计算、可推演、可操控的数字战场,最终实现以天制天、以境制敌的战略目标。

2 AI 赋能空天过渡区战场环境信息对抗的关键技术与应用

空天过渡区作为临近空间与低地球轨道的交叠区域,兼具稀薄大气动力学、电离层等离子体扰动与复杂电磁传播特性,已成为高超音速武器突防、天基侦察平台部署及电子战对抗的战略制高点。该区域环境高度动态、非线性强、多物理场耦合,传统基于静态模型与经验规则的信息获取与对抗体系已难以支撑未来智能化战争对“环境感知—决策—行动”闭环的毫秒级响应需求,详见图 2。在此背景下,AI 正驱动信息对抗范式从规则驱动向环境自适应跃迁,通过将大气密度扰动、电离层闪烁、电离层电子总含量(total electron content, TEC)梯度等环境变量转化为可计算、可预测、可操控的战术资源,催生以天制天、以境制敌的新型智能对抗形态。

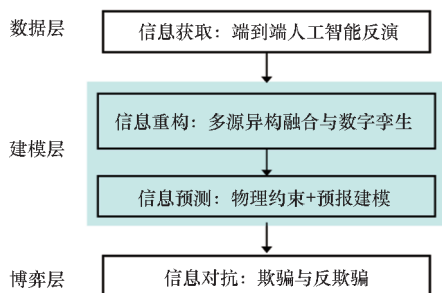


图 2 AI 驱动的空天过渡区多物理场信息对抗范式
Fig. 2 AI-driven AATZ multi-physics information warfare paradigm

2.1 智能信息获取:从物理反演到端到端感知

传统空天环境参数反演依赖多源探测平台,

如 GNSS 掩星、地基雷达、光学遥感和探空火箭等,并结合复杂的物理正演模型,如国际参考电离层模型(international reference ionosphere model, IRI)、MSIS 大气模型(mass spectrometer and incoherent scatter model)等。但这不仅需要整合多源观测数据、依赖复杂约束的数据同化方法生成大气初始状态,还需依赖专用超级计算机,计算成本极高且各模块迭代优化难度大^[103]。这种长链条的处理方法会导致误差的逐级累积,且结果对先验假设和模型参数设定高度敏感。特别是在应对诸如 Es 层、等离子体泡等瞬态扰动,或高超音速飞行器尾迹等非稳态现象时,传统方法难以实时捕捉关键物理特征,导致感知延迟和精度下降。

AI 驱动的端到端深度反演架构可以从本质上改变这一模式,它通过构建从原始观测信号到物理场参数的直接映射,显著缩短了处理链路^[104-105]。以 U-Net 为代表的神经网络架构,利用其独特的跳跃连接(skip connections)机制,能够在数据处理过程中保留高频空间细节,这对于精确刻画 TEC 的精细化结构至关重要,其不仅能够成功去除电离层污染,形成校正结果良好的 TEC 图像,还能够适应不同电离层扰动场景^[106]。而 Transformer 架构,凭借其自注意力机制(self-attention)能够有效建模数据之间的长程依赖关系,在处理全球稀疏分布的观测数据时,可展现出卓越的全局信息整合能力和泛化性能^[107-108]。将自注意力机制嵌入空间嵌入层,构建空间嵌入的 Transformer 模型,具备更稳健的误差抑制能力^[109]。

近期研究表明,卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)能够从稀疏的电离层观测数据中提取全局空间特征,实现对 Es 层参数的高精度分类与反演,如 Ellis 等在基于 GNSS 掩星剖面的二分类模型中实现了约 74% 的分类准确率,并将 Es 层的临界频和层高的平均绝对误差分别压缩至 0.63 MHz 与 5.81 km^[110];与此同时,长短记忆(long short-term memory, LSTM)网络在 GNSS 接收机钟差建模中表现出显著优势,监督学习-LSTM 在 7~31 天的训练窗口上可实现均方根误差(root mean square error, RMSE)约为 2.11×10^{-11} s 的预测精度,优于传统小波神经网络和自回归综合移动平均值等方法;在该网络的损失函数中引入高斯负对数似然(Gaussian negative log-likelihood),可将输出视为高斯分布的均值与方差,从而在预测点值的同时量化不确定性^[111-112]。CNN 的全局空间感知与 LSTM

的时序记忆及不确定性评估相结合,为 Es 层临界频率与高度的动态建模提供了可迁移的技术路径,使得电子战系统能够依据实时电离层状态预测结果动态规避通信黑洞频段,或主动将敌方通信诱导至高衰减频段,实现环境致盲的作战需求。

2.2 智能信息重构:多源异构数据融合与战场环境数字孪生

在空天过渡区实现全域感知的关键在于多源异构数据的时空对齐与物理一致性保障。传统的数据同化(data assimilation, DA)方法在空天过渡区面临三重根本性挑战。①模型受先验假设影响显著:现有大气-电离层耦合模型对空天过渡区中的中小尺度波动过程参数化不足,导致背景场系统性偏离较大且不可控^[113]。②计算复杂度高:集合卡尔曼滤波等方法需要运行大量模型集合以估计误差协方差,导致高维运算开销巨大,难以满足战场瞬时的更新需求^[114-115]。③异构数据融合能力有限:不同传感器时空分辨率、观测维度、误差结构差异悬殊(如 GNSS 提供路径积分 TEC,而雷达提供局部电子密度剖面),传统 DA 框架难以有效处理非高斯噪声、缺失模态与非线性观测算子,导致信息利用率低下。

近年来,深度学习驱动的多源异构数据融合逐步突破了上述限制。利用 Transformer 骨干网络可整合星载遥感与地基原位观测数据,对非网格数据进行定义、有效处理缺失值,生成大气初始状态格点数据,并结合轻量级卷积 U-Net 架构,完美将稀疏观测数据与现有再分析进行整合^[103],实现对中纬度与热带大尺度大气特征的精准捕捉。扩散模型(diffusion model)通过模拟数据的扩散过程有效整合不同来源的数据以生成高质量的融合结果,为重构模型提供可信数据支撑,成功捕获了 SSW 事件的中小尺度现象^[114]。深度神经网络 DeepONet 可以映射多输入的数据特征,解决不同时空分辨率下的数据映射问题,可以灵活应对多源数据、多时空信息的高维特征问题,较 ERA5 数据集,在有效提升垂直分辨率的同时,重构数据的 RMSE 和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)分别降低了 19.3%、25.1%^[116-118]。这种精细化的空天环境重构模型为空天过渡区实时态势感知提供了亚千米级、分钟级更新的底图。在此基础上,数字孪生(digital twin)将静态融合结果转化为可交互、可预测的作战平台关键枢纽。通过实时感知层将统一对齐的多源观测流式注入数字孪生系统,结合物理信息神经网络(physics-

informed neural networks, PINNs) 实现对密度扰动、TEC 等关键要素的毫秒级预测。当系统检测到物理约束残差超阈值时,可自动触发冗余观测或模型自适应校正,实现闭环自我纠错^[119]。

需要强调的是,数字孪生与传统环境仿真模拟的直接区别是前者为全要素集成,并非孤立的气象或电离层模型;不仅如此,数字孪生系统的核心在于实现物理战场与数据链的实时交互与持续更新。综上,从线性同化向 AI 驱动的多源异构融合再到数字孪生闭环的技术链路,既克服了传统同化在模型偏差、计算复杂度和观测稀疏性方面的根本瓶颈,又通过物理约束正则化保证了重构场的可信度,为空天过渡区的实时战场感知、任务规划与智能对抗提供了坚实的数据与模型支撑。

2.3 智能信息预测:物理信息约束下的高精度短临预报

在空天过渡区实现分钟级、百米级短临预报的关键在于把大气与电离层的高分辨率物理场统一到一个 AI 驱动的数字孪生环境中。

近期的气象大模型已经展示了利用自注意力机制捕获全局时空依赖的强大能力:Pangu-Weather 通过 3D Swin-Transformer 架构与守恒律耦合,在 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率下的 0~7 天预报精度全面超越 ECMWF IFS,并实现千倍推理加速^[120];GraphCast 采用编码—处理—解码的图神经网络(graph neural networks, GNN)在 0.25° 的网格上实现 10 天全球中期预报,误差比传统 HRES 低 10% 以上,尤其在热带气旋和气象河流等极端天气上表现突出^[121];FuXi 系列(含 FuXi 2.0)通过级联 CNN-Transformer 显式约束大尺度环流,能够在 15~60 天的全球天气指标上保持 0.25° 高分辨率,显著提升中长期预报的准确性^[122];FengWu 则基于多模态—多任务 Transformer 跨模态融合器,并引入不确定性损失与回放缓冲机制,使有效预报时长延伸至 10.75 天,80% 的预报目标上优于 GraphCast,单卡推理仅约 30 s ^[123];国家空间天气监测预警中心牵头,联合南昌大学与华为技术有限公司共同研发的全球首个空间天气链式 AI 预报模型——Fengyu,在长达 1 年的预测性能测试中,对太阳风、磁层和电离层各区域的 24 h 短临预测能力表现卓越^[124]。这些模型在将观测数据映射到物理场参数时,都通过守恒律、能量闭合等物理约束和自适应加权抑制噪声与时空失配,实现分钟级、百米级的短临预报能力。

在电离层层面,AI 同样取得了突破:LSTM 模型能够在 1~2 天延迟的情况下实现实时垂向

TEC 预测, RMSE 约 0.8 TECU,显著优于传统广播模型;引入注意力机制后,对电离层短期波动的捕获更为精准,24 h 预测误差进一步降低 15%^[125];Transformer 网络也被用于全球 TEC 预测,单步误差在低纬度可控制在 0.6 MHz、层高误差在 6 km 以内,能够保留高频空间细节^[126];为克服单一 LSTM 模型的局部最优问题,研究提出 LSTM-DNN 混合模型,通过多层 LSTM 捕获长短期垂向 TEC 变化,再结合深度全连接网络学习非线性空间特征,使 48 h 预测相对精度从 79.30% 提升至 81.18%,144 h 预测相对精度从 64.97% 提升至 77.64%^[127];针对 Spread-F 等局部离子层异常,利用 CNN-Transformer 对离子图像进行特征提取和时序建模,可在 5 天尺度上实现 0.6 MHz 的临界频率误差和 6 km 的层高误差^[126]。

若将上述气象大模型与电离层 AI 预测融合到同一数字孪生平台,或在 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的网格上实现 0~6 h 中间层顶温度、TEC、极区等离子体云边界等参数的百米、分钟级实时更新,当高超声速飞行器遭遇大气密度扰动时,轨迹规划系统可依据数字孪生中 AI 驱动的 TEC 与等离子体边界预报,迅速从预计算的最优策略库中选取匹配的攻角与倾侧角指令,实现热流、动压与过载约束的即时耦合,真正实现以境制敌的全新作战优势。

2.4 智能信息对抗:环境信息的欺骗与反欺骗

在空天过渡区作战时,环境信息的真实性已成为决定性资源。未来战争是机械化、信息化、智能化融合的体系对抗,其核心正是 AI 对侦察员、作战员和指挥员的全面赋能,实现人与 AI 的融合协同。在这一框架下,认知域的敌我对抗已从传统的信号欺骗干扰,直接上升到信息内容层面的认知欺骗,并演变为独立的军事欺骗与反欺骗作战样式^[128]。空天过渡区首当其冲:敌方若能够获取或篡改大气密度、TEC、离子层风暴等关键预报,就能在高超声速飞行、电子战、导弹制导等环节制造致命误判。典型的欺骗手段包括:向敌方情报链注入伪造的电离层平静预报,诱导其启用高频通信;发布低密度大气剖面,使对手的弹道模型误以为热防护负荷充足,实际进入高密度区导致热冲击失效。

近年来出现的对抗性欺骗(adversarial deception):利用 GAN 在生成过程加入物理约束(守恒律等),确保伪造的环境场在空间分辨率、统计特性上与真实观测一致,从而在多源融合的注意力加权阶段仍能通过^[129-130]。与此同时,防御侧已同步发展。联邦学习(federated learning)

的分布式验证网络能够在不共享原始观测数据的前提下,跨站点聚合残差特征,实现对异常预报的快速检测^[128-131]。随着美国防部发布人工智能伦理五项原则,以及美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)成立人工智能安全研究所并推动相关风险管理框架落地,全球军事智能领域正加速构建可信 AI 体系^[132]。据此,本文将军事领域的可信 AI 概括为以安全可控为底线、以可解释且可验证为交付标准、以人在回路和持续对抗验证为工程常态的全生命周期可信框架,即所有模型必须支持人类实时干预,部署前须通过系统性攻防演练与第三方验证。

可信 AI 框架可以通过注意力热力图与特征归因可视化,帮助操作员直观判断预报结果的置信度,当注意力分布异常集中于单一传感器时,系统自动触发冗余校验或剔除该节点数据^[133-134]。此外,残差分析与物理约束残差阈值结合的自适应阈值机制,使得即使对手使用物理约束-GAN 生成高保真伪装,也能在误差累积在极小阈值范围内被捕获^[130,135]。综合来看,智能信息对抗正从单点欺骗向体系对抗演进。人与 AI 的融合协同让认知决策对抗首次具备与火力对抗、信息对抗同等的直接性与致命性,也进一步模糊了战争与非战争的界限——通过非武力的智能欺骗行动即可达成“上兵伐谋”的终极效果。

综上所述,AI 正深刻重塑空天过渡区战场环境信息对抗的技术范式与作战逻辑。从智能信息获取的端到端反演,到多源异构融合驱动的数字孪生重构,再到物理约束下的高精度短临预报,最终延伸至环境信息的欺骗与反欺骗对抗,AI 不仅突破了传统数据同化在模型偏差、计算瓶颈与异构融合方面的固有局限,更将大气密度扰动、电离层闪烁、TEC 梯度等环境变量转化为可感知、可预测、可操控的战术资源。这一技术链条的闭环演进,标志着信息对抗已从被动响应迈向主动设伏,从信号域干扰跃升至认知域操控。未来,随着物理信息融合、可信 AI 与人机协同决策的持续深化,空天过渡区将真正成为以天制天、以境制敌的智能化作战主战场,为夺取空天信息优势提供决定性支撑。

3 AI 在空天过渡区战场环境信息对抗中面临的挑战

复杂的大气环境是空天过渡区信息保障与军事对抗技术落地的核心挑战。尽管当前阶段出现

了大量基于 AI 的气象预报与环境建模技术,但在空天过渡区这种极端、动态且高度不确定的环境中应用时仍面临诸多严峻挑战,尤其是在信息对抗和国防安全层面,其局限性更为凸显。

首先,物理过程认知不足制约了模型的进一步发展。空天过渡区环境涉及复杂的化学、物理和动力过程,这些过程之间的相互作用尚未被完全认识。中间层和低热层区域的能量平衡、大气波动传播与耗散、光化学过程等关键物理机制仍需深入研究。对基本物理过程认识不足直接限制了物理模型预报精度的提高。不仅如此,多尺度过程耦合又是一大挑战。空天过渡区环境变化涉及从分子尺度到全球尺度的广泛时空范围,不同尺度过程之间的相互作用复杂而微妙。如何准确描述这些多尺度过程的耦合效应,是空天过渡区模式发展的技术难点。现有的参数化方案在刻画跨尺度过程方面仍有较大改进空间,如何将 AI 方法与参数化方案结合,构建物理与数据双轮驱动的可微分参数化框架,使 AI 在保持计算效率的同时自动挖掘跨尺度耦合函数、在线校正物理闭合误差,并实现可解释性约束下的参数反演与不确定性量化,已成为突破空天过渡区多尺度模拟瓶颈的核心任务。

其次,单一数据驱动导致的模型可解释性差,严重制约了高风险国防决策中的可信部署。在空天过渡区的信息对抗场景中,敌我双方围绕信息权展开激烈博弈,涉及雷达、通信、导航与电子战系统的复杂交互。若 AI 系统基于黑箱模型做出关键决策(如目标识别、干扰策略选择或突防路径规划),而无法向操作员清晰解释其判断依据,则极易引发误判或信任危机^[136-138]。例如,在强电磁干扰环境下,若 AI 错误地将虚假信号识别为真实威胁并触发防御响应,可能导致资源浪费甚至暴露己方部署。这种决策黑箱特性或在需要人机协同、权限动态切换的未来空天作战体系中构成重大安全隐患。

再者,模型多样化导致的评估体系紊乱直接影响国家层面的信息对抗能力建设与标准化进程。当前各类智能算法在不同平台上独立开发,缺乏统一的对抗基准和测试标准。这不仅造成各兵种间技术路线难以兼容,更使得在跨域联合作战中难以实现 AI 系统的交互操作与协同。尤其在空天防御体系中,若预警卫星、高空长航时无人机与地面雷达站所搭载的 AI 处理模块采用异构架构且评估标准不一,将极大削弱整个“侦—控—打—评”闭环的响应效率与协同精度,难以

应对高超声速武器、临近空间机动飞行器等新型威胁的快速突防^[139]。

更为关键的是,模型的可迁移性不足和小样本条件下模型构建的鲁棒性薄弱,已成为 AI 在空天过渡区实战化应用的瓶颈。空天过渡区处于传统航空与航天系统的交界地带,飞行器需在稀薄大气中维持气动控制与轨道机动的平衡,环境参数剧烈变化且难以精确建模。现有 AI 模型大多在理想化或低维仿真环境中训练,一旦部署于真实空天过渡区,面对气动热效应、等离子鞘套导致的通信中断/黑障、强背景噪声干扰等问题时,其感知与决策性能急剧下降^[140-141]。此外,高成本、高风险使得真实飞行数据极其稀缺,传统的深度学习方法难以在此类小样本条件下稳定收敛。若无法实现从仿真到实装的高效迁移,AI 系统将难以胜任对高超声速滑翔体、可重复使用空天飞行器等目标的跟踪、识别与拦截任务,严重影响国家空天防御体系的完整性与威慑力。

尤为严峻的是,当前国际战略竞争加剧,关键技术领域封锁严重,导致建模所需的核心数据难以获取;尤其对于电离层而言,掩星观测数据本身存在的偏差量级与物理模型精度相当,导致本就稀缺的数据可用性大大降低。空天过渡区作为大国战略博弈的前沿阵地,相关飞行器性能参数、气动热力学特性、材料响应行为以及真实电磁环境数据均属于高度敏感的军事机密。美国、俄罗斯等国对其高超声速试验、临近空间平台测试数据严格保密,形成了数据壁垒。在此背景下,单纯依赖公开文献与数值模拟构建的训练数据集,难以

完全覆盖真实战场的复杂动态特征,致使 AI 模型在跨域泛化能力与实战适应性方面存在不确定性。因此,如何在数据受限条件下,突破小样本学习、物理信息融合等关键技术,提升模型的鲁棒性与可信度,已成为核心议题。

综上所述,在空天过渡区这一战略制高点,将 AI 纳入现有物理认知与观测体系,形成可解释、可控制、可演变的系统,或将成为决定未来信息主导权和战略主动权的核心要素。面对可解释性不足、评估体系割裂、迁移能力弱、小样本鲁棒性差以及关键数据获取受限等多重挑战,必须加快构建面向实战的可信 AI 框架,推动标准化测试环境建设,并发展元学习、离线强化学习、物理信息神经网络等前沿技术^[142-144],同时加强自主数据采集能力建设,突破数据封锁,以确保智能系统在复杂电磁环境、动态威胁格局和有限数据条件下仍能稳定、安全、高效地支撑国家空天防御与信息对抗能力建设。

4 总结与展望

文章系统探讨了 AI 在空天过渡区战场环境信息对抗中的关键技术、应用前景与核心挑战。空天过渡区作为高超音速武器突防、天基侦察部署与电子战博弈的战略要地,其复杂多变的大气、电离层与电磁环境已从传统的作战背景演变为可被主动利用的对抗性变量。AI 技术凭借其强大的非线性建模、多源数据融合与自主决策能力,正深度赋能“感知—融合—预测—对抗”全链条,推动信息对抗模式实现从静态规则驱动向动态环境自适应的范式跃迁,如图 3 所示。

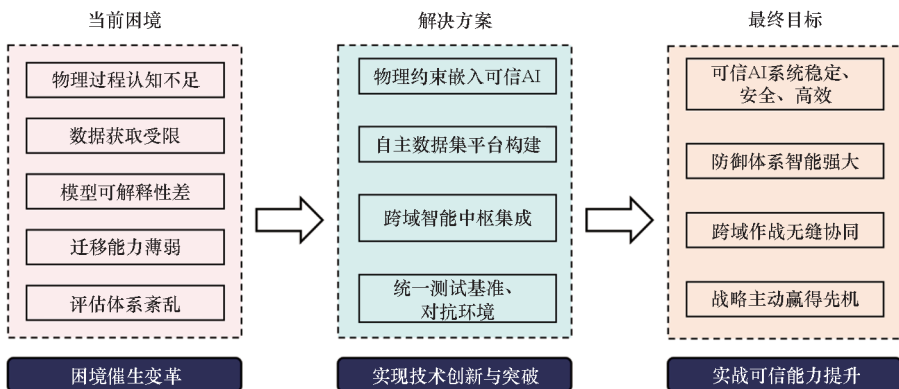


图 3 空天过渡区 AI 信息对抗链路图

Fig. 3 AI information warfare chain diagram of the AATZ

在技术层面,AI 通过端到端反演架构显著提升了空天环境参数的获取效率与精度;借助 GNN 与注意力机制,实现多源异构数据的智能融合,构

建面向作战任务的空天战场数字孪生;依托物理约束的 AI 气象大模型,为短临环境预报提供了分钟级、百米级的高精度支撑;通过强化学习、生成

对抗网络等技术,催生一点一策、一时一策的精准化、博弈式智能抗干扰与认知电子战能力。这些进展标志着 AI 正将环境变量转化为对抗优势,使以天制天、以境制敌的新型战术成为可能。

然而,技术潜力的释放仍面临严峻瓶颈,可解释性不足导致决策黑箱,制约高风险场景下的可信部署;评估体系紊乱阻碍了跨平台、跨军兵种的协同互操作;模型可迁移性差与小样本鲁棒性弱使得仿真成果难以向真实战场转化;国际数据封锁造成的数据饥渴则从根本上限制了我国自主可控智能系统的训练质量与战术预判能力。这些挑战共同构成了 AI 从技术可用迈向作战可信的关键鸿沟。

面向未来,AI 在空天过渡区的应用将朝着更深层次发展。首先,可信 AI 将成为核心发展方向,需融合物理机理与数据驱动,发展物理信息神经网络、元学习、离线强化学习等技术,在提升模型性能的同时增强其可解释性与安全性。其次,标准化建设亟待加强,应推动建立统一的测试基准与对抗环境,促进各军兵种 AI 系统的互联互通与协同演化。再者,自主数据采集能力建设是破局关键,应加速发展临近空间飞行器、高超声速试验平台与量子传感技术,突破数据封锁,夯实智能系统训练根基。最后,随着太赫兹通信、激光武器与空天集群等新技术的成熟,AI 将作为智能中枢,整合多物理域信息,支撑认知电子战与跨域协同拦截等高级作战形态,真正实现从制信息权向制智能权的战略跃升。

具体而言,AI 不仅是提升空天过渡区作战效能的技术工具,更是重塑未来战争形态的核心驱动力。唯有正视挑战、系统布局、协同攻关,方能在这一战略制高点上赢得先机,构建起具备强大威慑力与实战能力的新一代智能化空天防御与对抗体系。综上,本文在系统梳理空天过渡区环境特征与 AI 技术进展的基础上,首次将综述讨论边界拓展至 50 ~ 250 km 全高度空域,提出三维不确定性耦合的创新视角,并给出如图 3 所示的四条未来技术路线——物理约束嵌入的可信 AI、统一测试基准与对抗环境、自主数据集平台及跨域智能中枢集成,为从制信息权迈向制智能权提供可操作、可验证、可迭代的研究蓝图。

参考文献 (References)

- [1] SHENG Z, HE Y, WANG S C, et al. Dynamics, chemistry, and modeling studies in the aviation and aerospace transition zone[J]. *Innovation*, 2025, 6(8): 101012.
- [2] SHAUD J A, LOWTHER A B. An air force strategic vision for 2020—2030 [J]. *Strategic Studies Quarterly*, 2011, 5(1): 8—31.
- [3] 《人民日报》报社. 中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定[J]. *党建*, 2024(8): 8—24. *People's Daily Newspaper. Resolution of CPC Central Committee on further deepening reform comprehensively to advance Chinese modernization* [J]. *Party Building*, 2024(8): 8—24. (in Chinese)
- [4] 张凯, 王凯迪, 杨曦, 等. 基于 DNET 的空中红外目标抗干扰识别算法[J]. *航空学报*, 2021, 42(2): 324223. ZHANG K, WANG K D, YANG X, et al. Anti-interference recognition algorithm based on DNET for infrared aerial target[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(2): 324223. (in Chinese)
- [5] 王晓丹, 向前, 李睿, 等. 深度学习研究及军事应用综述[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2022, 23(1): 1—11. WANG X D, XIANG Q, LI R, et al. Review of deep learning research and application of new scientific discoveries to military[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2022, 23(1): 1—11. (in Chinese)
- [6] 张驰, 郭媛, 黎明. 人工智能神经网络模型发展及应用综述[J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(11): 57—69. ZHANG C, GUO Y, LI M. Review of development and application of artificial neural network models[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(11): 57—69. (in Chinese)
- [7] HE Y, ZHU X Q, SHENG Z, et al. Resonant waves play an important role in the increasing heat waves in Northern Hemisphere mid-latitudes under global warming[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(14): e2023GLI04839.
- [8] HE Y, ZHU X Q, SHENG Z, et al. Identification of stratospheric disturbance information in China based on the round-trip intelligent sounding system [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024, 24(6): 3839—3856.
- [9] HOLTON J R. The role of gravity wave induced drag and diffusion in the momentum budget of the mesosphere [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1982, 39(4): 791—799.
- [10] FRITTS D C, ALEXANDER M J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere[J]. *Reviews of Geophysics*, 2003, 41(1): 2001RG000106.
- [11] LINDZEN R S. Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1981, 86(C10): 9707—9714.
- [12] LIU H L. Effective vertical diffusion by atmospheric gravity waves [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(1): e2020GL091474.
- [13] SMITH A K. Global dynamics of the MLT [J]. *Surveys in Geophysics*, 2012, 33(6): 1177—1230.
- [14] ERN M, PREUSSE P, GILLE J C, et al. Implications for atmospheric dynamics derived from global observations of gravity wave momentum flux in stratosphere and mesosphere [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D19): D19107.
- [15] SMITH A K, GARCIA R R, MARSH D R, et al. WACCM simulations of the mean circulation and trace species transport in the winter mesosphere [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D20): D20115.

- [16] HOLTON J R. The influence of gravity wave breaking on the general circulation of the middle atmosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, 40(10): 2497–2507.
- [17] HAGAN M E, MAUTE A, ROBLE R G. Tropospheric tidal effects on the middle and upper atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, 114 (A1): A01302.
- [18] HAGAN M E, FORBES J M. Migrating and nonmigrating diurnal tides in the middle and upper atmosphere excited by tropospheric latent heat release[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107 (D24): ACL 6 – 1 – ACL 6 – 15.
- [19] YANG C Y, SMITH A K, LI T, et al. The effect of the Madden-Julian oscillation on the mesospheric migrating diurnal tide: a study using SD-WACCM[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(10): 5105–5114.
- [20] CEN Y T, YANG C Y, LI T, et al. Suppressed migrating diurnal tides in the mesosphere and lower thermosphere region during El Niño in northern winter and its possible mechanism[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, 22(12): 7861–7874.
- [21] IMMEL T J, SAGAWA E, ENGLAND S L, et al. Control of equatorial ionospheric morphology by atmospheric tides[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(15): L15108.
- [22] PLANE J M C. The chemistry of meteoric metals in the earth's upper atmosphere[J]. *International Reviews in Physical Chemistry*, 1991, 10(1): 55–106.
- [23] YI F, ZHANG S D, ZENG H J, et al. Lidar observations of sporadic Na layers over Wuhan (30.5°N, 114.4°E)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(9): 59–1–59–4.
- [24] PLANE J M C. Atmospheric chemistry of meteoric metals[J]. *Chemical Reviews*, 2003, 103(12): 4963–4984.
- [25] YI F, KOUČKÁ KNÍŽOVÁ P, GEORGIEVA K, et al. A review of vertical coupling in the atmosphere-ionosphere system: effects of waves, sudden stratospheric warmings, space weather, and of solar activity[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2016, 141: 1–12.
- [26] BAN C, LI T, FANG X, et al. Sodium lidar-observed gravity wave breaking followed by an upward propagation of sporadic sodium layer over Hefei, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, 120(9): 7958–7969.
- [27] WANG X D, YI F, HUANG K M. Double sporadic metal layers as observed by collocated Fe and Na lidars at Wuhan, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, 122(2): 2237–2248.
- [28] JIAO J, YANG G, WANG J, et al. Observations of dramatic enhancements to the mesospheric K layer[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(24): 12,536–12,542.
- [29] CHEN X C, HUANG W T, BAN C, et al. Dynamic properties of a sporadic sodium layer revealed by observations over Zhongshan, Antarctica: a case study[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, 126(11): e2021JA029787.
- [30] ALI ABDU M, PANCHEVA D. *Aeronomy of the earth's atmosphere and ionosphere*[M]. Dordrecht: Springer, 2011.
- [31] ZENG Z, SOKOLOVSKIY S. Effect of sporadic E clouds on GPS radio occultation signals[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(18): L18817.
- [32] ARRAS C, WICKERT J, BEYERLE G, et al. A global climatology of ionospheric irregularities derived from GPS radio occultation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(14): L14809.
- [33] CHU Y H, WANG C Y, WU K H, et al. Morphology of sporadic E layer retrieved from COSMIC GPS radio occultation measurements: wind shear theory examination[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, 119(3): 2117–2136.
- [34] TANG Q, ZHAO J Q, YU Z B, et al. Occurrence and variations of middle and low latitude sporadic E layer investigated with longitudinal and latitudinal chains of ionosondes[J]. *Space Weather*, 2021, 19(12): e2021SW002942.
- [35] WU J F, FENG W H, LIU H L, et al. Self-consistent global transport of metallic ions with WACCM-X[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(20): 15619–15630.
- [36] PLANE J M C. Cosmic dust in the earth's atmosphere[J]. *Chemical Society Reviews*, 2012, 41(19): 6507–6518.
- [37] CARTER L N, FORBES J M. Global transport and localized layering of metallic ions in the upper atmosphere[J]. *Annales Geophysicae*, 1999, 17(2): 190–209.
- [38] KIRKWOOD S, NILSSON H. High-latitude sporadic-E and other thin layers – the role of magnetospheric electric fields[J]. *Space Science Reviews*, 2000, 91(3): 579–613.
- [39] LI G Z, NING B Q, OTSUKA Y, et al. Challenges to equatorial plasma bubble and ionospheric scintillation short-term forecasting and future aspects in east and Southeast Asia[J]. *Surveys in Geophysics*, 2021, 42(1): 201–238.
- [40] TIAN P H, YU B K, YE H L, et al. Ionospheric irregularity reconstruction using multisource data fusion via deep learning[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, 23(20): 13413–13431.
- [41] GAO H, XU J Y, WU Q. Seasonal and QBO variations in the OH nightglow emission observed by TIMED/SABER[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, 115(A6): A06313.
- [42] WÜST S, BITTNER M, ESPY P J, et al. Hydroxyl airglow observations for investigating atmospheric dynamics: results and challenges[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, 23(2): 1599–1618.
- [43] PERMINOV V I, PERTSEV N N, DALIN P A, et al. Long-term temperature trend in the mesopause region from observations of hydroxyl airglow in Zvenigorod[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2024, 64(1): 84–93.
- [44] 师宇. 平流层爆发性增温和行星波对中高纬度大气的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- SHI Y. Sudden stratospheric warmings and planetary waves influence on middle and high latitude atmosphere[D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)
- [45] ZHAO X R, SHENG Z, LI J W, et al. Determination of the “wave turbopause” using a numerical differentiation method[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(20): 10592–10607.
- [46] SHE C Y, BERGER U, YAN Z A, et al. Solar response and long-term trend of midlatitude mesopause region temperature based on 28 years (1990–2017) of Na lidar observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, 124(8): 7140–7156.
- [47] DALIN P, PERMINOV V, PERTSEV N, et al. Updated long-term trends in mesopause temperature, airglow emissions, and noctilucent clouds[J]. *Journal of Geophysical*

- Research; Atmospheres, 2020, 125(5): e2019JD030814.
- [48] FUNATSU B M, CLAUD C, KECKHUT P, et al. Regional and seasonal stratospheric temperature trends in the last decade (2002—2014) from AMSU observations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(14): 8172–8185.
- [49] YU W D, GARCIA R, YUE J, et al. Mesospheric temperature and circulation response to the Hunga Tonga-Hunga-Ha'apai volcanic eruption[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2023, 128(21): e2023JD039636.
- [50] LIU X, XU J Y, YUE J, et al. Trends in the high-latitude mesosphere temperature and mesopause revealed by SABER[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2024, 24(17): 10143–10157.
- [51] ZHAO X R, SHENG Z, SHI H Q, et al. Middle atmosphere temperature changes derived from SABER observations during 2002–20[J]. Journal of Climate, 2021, 34(19): 7995–8012.
- [52] BISHOP R L, LARSEN M F, HECHT J H, et al. TOMEX: mesospheric and lower thermospheric diffusivities and instability layers [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D2): D02S03.
- [53] HALL C M, MANSON A H, MEEK C E. Seasonal variation of the turbopause: one year of turbulence investigation at 69°N by the joint University of Tromsø/University of Saskatchewan MF radar[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103(D22): 28769–28773.
- [54] ZHAO X R, SHENG Z, SHI H Q, et al. Long-term trends and solar responses of the mesopause temperatures observed by SABER during the 2002—2019 period [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(11): e2020JD032418.
- [55] YI W, XUE X H, REID I M, et al. Climatology of interhemispheric mesopause temperatures using the high-latitude and middle-latitude meteor radars [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126(6): e2020JD034301.
- [56] TANG C L, LIU D, WEI H L, et al. The response of the temperature of cold-point mesopause to solar activity based on SABER data set[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2016, 121(7): 7245–7255.
- [57] SINGH R P, PALLAMRAJU D, SURYAWANSHI P, et al. Studies of atmospheric waves by ground-based observations of OH(3–1) emission and rotational temperature using PRL airglow InfraRed spectrograph (PAIRS) [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2023, 244: 106039.
- [58] WANG W J, LUO H Y, LI Z W, et al. Algorithm for retrieval of temperature in mesosphere and lower thermosphere from O₂ A-band night glow [J]. Applied Sciences, 2023, 13(6): 3916.
- [59] STOCKWELL R G, LOWE R P. Airglow imaging of gravity waves: 2. Critical layer filtering[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D15): 17205–17220.
- [60] HEALE C J, SNIVELY J B. Gravity wave propagation through a vertically and horizontally inhomogeneous background wind [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(12): 5931–5950.
- [61] YUE X C, YI F. Propagation of gravity wave packet near critical level[J]. Science in China Series E Engineering & Materials Science, 2005, 48(5): 538–555.
- [62] ECKERMANN S D, HIROTA I, HOCKING W K. Gravity wave and equatorial wave morphology of the stratosphere derived from long-term rocket soundings [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1995, 121(521): 149–186.
- [63] MCGRANAGHAN R M, MANNUCCI A J, WILSON B, et al. New capabilities for prediction of high-latitude ionospheric scintillation: a novel approach with machine learning[J]. Space Weather, 2018, 16(11): 1817–1846.
- [64] TIAN Y, LI S H, SHEN H, et al. Comparative analysis of BDGIM, NeQuick-G, and Klobuchar ionospheric broadcast models [J]. Astrophysics and Space Science, 2022, 367(8): 78.
- [65] BEHNKE R A, VICKREY J F. Radar evidence of Fe⁺ in a sporadic-E layer[J]. Radio Science, 1975, 10(3): 325–327.
- [66] BEDEY D F, WATKINS B J. Seasonal occurrence of thin metallic ion layers at high latitudes[J]. Geophysical Research Letters, 1996, 23(20): 2789–2792.
- [67] BEDEY D F, WATKINS B J. Diurnal occurrence of thin metallic ion layers in the high-latitude ionosphere [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(20): 3767–3770.
- [68] TURUNEN T, NYGRÉN T, HUUSKONEN A, et al. Incoherent scatter studies of sporadic-E using 300 m resolution[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1988, 50(4/5): 277–287.
- [69] KIKUCHI T, LÜHR H, SCHLEGEL K, et al. Penetration of auroral electric fields to the equator during a substorm[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2000, 105(A10): 23251–23261.
- [70] ABDU M A, MACDOUGALL J W, BATISTA I S, et al. Equatorial evening prereversal electric field enhancement and sporadic E layer disruption: a manifestation of E and F region coupling [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2003, 108(A6): SIA 8–1–SIA 8–13.
- [71] CARRASCO A J, BATISTA I S, ABDU M A. Simulation of the sporadic E layer response to prereversal associated evening vertical electric field enhancement near Dip equator [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2007, 112(A6): A06324.
- [72] ABDU M A, DE SOUZA J R, BATISTA I S, et al. The role of electric fields in sporadic E layer formation over low latitudes under quiet and magnetic storm conditions [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2014, 115/116: 95–105.
- [73] RAGHAVARAO R, PATRA A K, SRIPATHI S. Equatorial E region irregularities: a review of recent observations[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2002, 64(12/13/14): 1435–1443.
- [74] 牛有田, 张安琪, 赵歌歌, 等. 太阳耀斑对无线电导航通信的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 151–156.
- NIU Y T, ZHANG A Q, ZHAO G G, et al. Effects of solar flares on radio navigation and communication[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2025, 53(1): 151–156. (in Chinese)
- [75] YACoub M, ABDELWAHAB M, SHIOKAWA K, et al. Estimating the drift velocity of plasma bubbles in airglow images using the scale invariant feature transform and the

- speeded up robust feature algorithms[J]. *Advances in Space Research*, 2025, 75(2): 2391–2402.
- [76] CHEN Z, WANG K, LI H M, et al. Storm-time characteristics of ionospheric model (MSAP) based on multi-algorithm fusion [J]. *Space Weather*, 2024, 22(1): e2022SW003360.
- [77] PATIL A S, NADE D P, TAORI A. et al. A brief review of equatorial plasma bubbles [J]. *Space Science Reviews*, 2023, 219: 16.
- [78] 蒋琪琪. 天文喷流中瑞利泰勒不稳定性的解析和数值研究[D]. 昆明: 云南大学, 2023.
JIANG Q Q. Analytical and numerical studies of Rayleigh-Taylor instability in astrophysical jets[D]. Kunming: Yunnan University, 2023. (in Chinese)
- [79] ERN M, DIALLO M, PREUSSE P, et al. The semiannual oscillation (SAO) in the tropical middle atmosphere and its gravity wave driving in reanalyses and satellite observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(18): 13763–13795.
- [80] GUO Y F, LIU A Z. Seasonal variation of vertical heat and energy fluxes due to dissipating gravity waves in the mesopause region over the Andes[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(3): e2020JD033825.
- [81] YU B K, SCOTT C J, XUE X H, et al. Derivation of global ionospheric sporadic E critical frequency (f_oE_s) data from the amplitude variations in GPS/GNSS radio occultations [J]. *Royal Society Open Science*, 2020, 7(7): 200320.
- [82] KUNDURI B S R, ERICKSON P J, BAKER J B H, et al. Dynamics of mid-latitude sporadic-E and its impact on HF propagation in the north American sector [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, 128(9): e2023JA031455.
- [83] EARLE G D, KANE T J, PFAFF R F, et al. Ion layer separation and equilibrium zonal winds in midlatitude sporadic E[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(4): 461–464.
- [84] YAMAZAKI Y, ARRAS C, ANDOH S, et al. Examining the wind shear theory of sporadic E with ICON/MIGHTI winds and COSMIC-2 radio occultation data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(1): e2021GL096202.
- [85] 邓淑梅, 陈月娟, 陈权亮, 等. 平流层爆发性增温期间行星波的活动[J]. *大气科学*, 2006, 30(6): 1236–1248.
DENG S M, CHEN Y J, CHEN Q L, et al. Planetary wave activity during stratospheric sudden warming [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(6): 1236–1248. (in Chinese)
- [86] 王睿, 张绍东, 易帆. 高纬地区低层大气行星波的无线电探空仪观测研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(5): 603–617.
WANG R, ZHANG S D, YI F. Radiosonde observations of high-latitude planetary waves in the lower atmosphere [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2010, 40(5): 603–617. (in Chinese)
- [87] 马铮, 龚韵, 张绍东. 平流层爆发性增温期间中高层大气行星波研究进展[J]. *地球与行星物理论评(中英文)*, 2024, 55(1): 109–119.
MA Z, GONG Y, ZHANG S D. Recent research progress on planetary waves in the middle and upper atmosphere during sudden stratospheric warmings [J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2024, 55(1): 109–119. (in Chinese)
- [88] WANG Y, JAYACHANDRAN P T, THEMENS D R, et al. A case study of polar cap sporadic-E layer associated with TEC variations[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(7): 1324.
- [89] 吴小成, 胡雄, 闫召爱, 等. 大气金属层探测卫星研究[J]. *测绘通报*, 2014(增刊1): 73–75.
WU X C, HU X, YAN Z A, et al. Atmospheric metal layer detection satellite [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014(Suppl 1): 73–75. (in Chinese)
- [90] 常舒捷. 基于多源资料的中层大气重力波分析及其对臭氧的影响[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
CHANG S J. Analysis of gravity waves in the middle atmosphere based on multi-source data and its impact on ozone[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021. (in Chinese)
- [91] 王金勇. 基于 GNSS 层析技术的电离层扰动特征分析[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
WANG J Y. Analysis of ionospheric disturbance characteristics based on GNSS tomography [D]. Changsha: Central South University, 2023. (in Chinese)
- [92] LANE T P, SHARMAN R D. Gravity wave breaking, secondary wave generation, and mixing above deep convection in a three-dimensional cloud model [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(23): L23813.
- [93] GARDNER C S, PLANE J M C, PAN W L, et al. Seasonal variations of the Na and Fe layers at the south pole and their implications for the chemistry and general circulation of the polar mesosphere [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D10): D10302.
- [94] SHE C Y, SHERMAN J, YUAN T, et al. The first 80-hour continuous lidar campaign for simultaneous observation of mesopause region temperature and wind [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(6): 2002GL016412.
- [95] WU J, FENG W, XUE X, et al. The 27-day solar rotational cycle response in the mesospheric metal layers at low latitudes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(13): 7199–7206.
- [96] CLEMESHA B R, SIMONICH D M, BATISTA P P, et al. The diurnal variation of atmospheric sodium [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1982, 87(A1): 181–186.
- [97] GARDNER C S, VOELZ D G, SECHRIST C F, Jr, et al. Lidar studies of the nighttime sodium layer over Urbana, Illinois; 1. Seasonal and nocturnal variations [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1986, 91(A12): 13659–13673.
- [98] LI B, CUI R F, WENG L B. Investigation of the solar activity and QBO effects on the near-space environment [J]. *Acta Geophysica*, 2025, 73(2): 2127–2136.
- [99] 盛峥, 虢盛, 冷洪泽, 等. 空天过渡区大气动力学研究重要进展[J]. *空间科学学报*, 2025, 45(4): 899–912.
SHENG Z, GUO S, LENG H Z, et al. Major advances in aerospace transition zone atmospheric dynamics research [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(4): 899–912. (in Chinese)
- [100] BALDWIN M P, GRAY L J, DUNKERTON T J, et al. The quasi-biennial oscillation [J]. *Reviews of Geophysics*, 2001, 39(2): 179–229.
- [101] LIFAR V D, DIDENKO K A, KOVAL A V, et al. Numerical simulation of QBO and ENSO phase effect on the

- propagation of planetary waves and the evolution of sudden stratospheric warming[J]. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2024, 37(3): 415–421.
- [102] BALDWIN M P, AYARZAGÜENA B, BIRNER T, et al. Sudden stratospheric warmings[J]. *Reviews of Geophysics*, 2021, 59(1): e2020RG000708.
- [103] ALLEN A, MARKOU S, TEBBUTT W, et al. End-to-end data-driven weather prediction[J]. *Nature*, 2025, 641(8065): 1172–1179.
- [104] GUO R, ZHOU H Y, WEI X L, et al. Deep joint inversion of multiple geophysical data with U-net reparameterization[J]. *Geophysics*, 2025, 90(3): WA61-WA75.
- [105] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[C]// *Proceedings of Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention- MICCAI 2015*, 2015: 234–241.
- [106] GUO J W, SHI H Y, YANG T, et al. Ionospheric correction in P-band ISAR imaging based on polar formatting algorithm and convolutional neural network[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2020, 14(7): 1098–1104.
- [107] THUNDIYIL S, SHALAMZARI S S, PICONE J, et al. Transformers for modeling long-term dependencies in time series data: a review[C]// *Proceedings of the IEEE Signal Processing in Medicine and Biology Symposium (SPMB)*, 2023: 1–5.
- [108] MOU C, ZHANG J. TransCL: transformer makes strong and flexible compressive learning[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2023, 45(4): 5236–5251.
- [109] LIN M Y, ZHU X F, TU G Y, et al. Optimal transformer modeling by space embedding for ionospheric total electron content prediction[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1–14.
- [110] ELLIS J A, EMMONS D J, COHEN M B. Detection and classification of sporadic E using convolutional neural networks[J]. *Space Weather*, 2024, 22(1): e2023SW003669.
- [111] HUANG B H, JI Z X, ZHAI R J, et al. Clock bias prediction algorithm for navigation satellites based on a supervised learning long short-term memory neural network[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(2): 80.
- [112] BHATT A, MEHTA I, PATIDAR P. Leveraging LSTM for predictive modeling of satellite clock bias[C]// *Proceedings of the 8th International Conference on Data Science and Machine Learning Applications (CDMA)*, 2025: 25–30.
- [113] HOUTEKAMER P L, ZHANG F Q. Review of the ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation[J]. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(12): 4489–4532.
- [114] ZHANG H W, HE Y, SHENG Z, et al. Refined reconstruction of multimodal mesospheric temperature fields based on diffusion model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, 52(19): e2025GL118581.
- [115] ZHAO Z X, BAI H W, ZHU Y Z, et al. DDFM: denoising diffusion model for multi-modality image fusion[C]// *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2023: 8048–8059.
- [116] LU L, MENG X H, CAI S Z, et al. A comprehensive and fair comparison of two neural operators (with practical extensions) based on FAIR data[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2022, 393: 114778.
- [117] LU L, JIN P Z, PANG G F, et al. Learning nonlinear operators via DeepONet based on the universal approximation theorem of operators[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2021, 3(3): 218–229.
- [118] CHEN B, SHENG Z. Super-resolution reconstruction of near-space global-scale temperature fields (50–80 km) utilizing an extendable multi-input operator neural network based on reanalysis data and satellite observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, 52(11): e2024GL114413.
- [119] LIU X H, GAO Z, WAN Z W, et al. Toward near-space communication network in the 6G and beyond era[J]. *Space: Science & Technology*, 2025, 5: 0337.
- [120] BI K F, XIE L X, ZHANG H H, et al. Pangu-Weather: a 3D high-resolution model for fast and accurate global weather forecast[EB/OL]. (2022–11–03) [2025–08–15]. <https://arxiv.org/abs/2211.02556>.
- [121] LAM R, SANCHEZ-GONZALEZ A, WILLSON M, et al. Learning skillful medium-range global weather forecasting[J]. *Science*, 2023, 382(6677): 1416–1421.
- [122] CHEN L, ZHONG X H, ZHANG F, et al. FuXi: a cascade machine learning forecasting system for 15-day global weather forecast[J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2023, 6: 190.
- [123] CHEN K, HAN T, GONG J C, et al. FengWu: pushing the skillful global medium-range weather forecast beyond 10 days lead[EB/OL]. (2023–04–06) [2025–08–15]. <https://arxiv.org/abs/2304.02948>.
- [124] 中国气象报社. 空间天气链式 AI 预报模型“风宇”发布[EB/OL]. (2025–07–26) [2025–08–15]. https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202507/t20250726_7236553.html. China Meteorological Press. “Fengyu” of CMA, a full-chain AI forecasting model for space weather released[EB/OL]. (2025–07–26) [2025–08–15]. https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202507/t20250726_7236553.html. (in Chinese)
- [125] CHEN J P, GAO Y. Real-time ionosphere prediction based on IGS rapidproducts using long short-term memory deep learning[J]. *Journal of the Institute of Navigation*, 2023, 70(2): navi.581.
- [126] CHEN Z, LIAO W T, LI H M, et al. Prediction of global ionospheric TEC based on deep learning[J]. *Space Weather*, 2022, 20(4): e2021SW002854.
- [127] 廖文梯, 陈洲, 赵瑜馨, 等. 利用混合模型 LSTM-DNN 进行全球电离层 TEC map 的中短期预报[J]. *航天器环境工程*, 2021, 38(3): 281–286. LIAO W T, CHEN Z, ZHAO Y X, et al. Short-and medium-term forecasting of global ionospheric TEC map based on hybrid model LSTM-DNN[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(3): 281–286. (in Chinese)
- [128] 杨俊岭, 周宇, 周嘉申. 美军智能欺骗与反欺骗技术发展[J]. *国防科技*, 2022, 43(4): 48–53. YANG J L, ZHOU Y, ZHOU J S. Development of intelligent deception and anti-deception technology in the U. S. army[J]. *National Defense Science & Technology*, 2022, 43(4): 48–53. (in Chinese)
- [129] CHEN Z, DENG Y, WANG J S, et al. Applying LSTM and GAN to build a deep learning model (TGAN-TEC) for

- global ionospheric TEC [J/OL]. EGU General Assembly; EGU2020 - 6688 (2024 - 01 - 07) [2025 - 08 - 17]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-6688>.
- [130] YANG D, FANG H X, LIU Z D. Completion of global ionospheric TEC maps using a deep learning approach [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2022, 127(5): e2022JA030326.
- [131] ZHANG T, HE C Y, MA T H, et al. Federated learning for Internet of things: a federated learning framework for on-device anomaly data detection [EB/OL]. (2021 - 10 - 18) [2025 - 08 - 17]. <https://arxiv.org/abs/2106.07976>.
- [132] 王亚坤, 陈浩, 葛悦涛, 等. 2023 年人工智能领域科技发展综述 [J]. 战术导弹技术, 2024(1): 20 - 32, 67. WANG Y S, CHEN H, GE Y T, et al. Overview of artificial intelligence science and technology development in 2023 [J]. Tactical Missile Technology, 2024(1): 20 - 32, 67. (in Chinese)
- [133] FRANCIS J K, DARR M J. Interpretable AI for time-series: multi-model heatmap fusion with global attention and NLP-generated explanations [EB/OL]. (2025 - 06 - 30) [2025 - 08 - 17]. <https://arxiv.org/abs/2507.00234>.
- [134] LUNDBERG S M, LEE S I. A unified approach to interpreting model predictions [C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems, 2017: 4768 - 4777.
- [135] WANG G, ZHANG Y N, LU M F, et al. Hierarchical graph neural network with adaptive cross-graph fusion for remaining useful life prediction [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(5): 055112.
- [136] SOLDATENKO S A. Artificial intelligence and its application in numerical weather prediction [J]. Russian Meteorology and Hydrology, 2024, 49(4): 283 - 298.
- [137] 黄知涛, 王翔, 赵雨睿. 认知电子战综述 [J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(5): 1 - 11. HUANG Z T, WANG X, ZHAO Y R. Overview of cognitive electronic warfare [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(5): 1 - 11. (in Chinese)
- [138] 赵伟, 叶军, 王邠. 基于人工智能的智能化指挥决策和控制 [J]. 信息安全与通信保密, 2022(2): 2 - 8. ZHAO W, YE J, WANG B. Intelligentized command and control based on artificial intelligence [J]. Information Security and Communications Privacy, 2022(2): 2 - 8. (in Chinese)
- [139] POURPANAH F, ABDAR M, LUO Y X, et al. A review of generalized zero-shot learning methods [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2023, 45(4): 4051 - 4070.
- [140] 孙智孝, 杨晟琦, 朴海音, 等. 未来智能空战发展综述 [J]. 航空学报, 2021, 42(8): 525799. SUN Z X, YANG S Q, PIAO H Y, et al. A survey of air combat artificial intelligence [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(8): 525799. (in Chinese)
- [141] 刘卓. 高超声速飞行器气动热与激光辐照热效应研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2021. LIU Z. Research on the aerodynamic heat and thermal effect of laser irradiation of hypersonic aircraft [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021. (in Chinese)
- [142] 罗俊仁, 张万鹏, 苏炯铭, 等. 面向智能博弈的决策 Transformer 方法综述 [J]. 指挥与控制学报, 2023, 9(1): 9 - 22. LUO J R, ZHANG W P, SU J M, et al. On decision-making Transformer methods for intelligent gaming [J]. Journal of Command and Control, 2023, 9(1): 9 - 22. (in Chinese)
- [143] 夏文钊, 王嫚屿, 刘欣然, 等. 高超声速飞行器等离子体成鞘特性仿真研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(12): 183 - 189. XIA W Z, WANG M Y, LIU X R, et al. Simulation of plasma sheath formation characteristics of hypersonic vehicle [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(12): 183 - 189. (in Chinese)
- [144] 徐志雄, 王锋. 基于元权值学习方法的智能博弈对抗研究 [J]. 军事运筹与评估, 2022, 37(3): 31 - 36. XU Z X, WANG F. Meta deep reinforcement learning based on the gradients of past action trajectory and its application in intelligent game confrontation [J]. Military Operations Research and Assessment, 2022, 37(3): 31 - 36. (in Chinese)