

SHENG Zheng, GUO Sheng, LENG Hongze, WANG Sicheng, SONG Junqiang. Major Advances in Aerospace Transition Zone Atmospheric Dynamics Research (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(4): 899–912. CSTR:32142.14.cjss.2025-yg01. DOI:10.11728/cjss2025.04.2025-yg01

空天过渡区大气动力学研究重要进展*

盛 峥 虢 盛 冷洪泽
汪四成 宋君强

(国防科技大学气象海洋学院 长沙 410000)

摘 要 空天过渡区是指传统航空活动和航天活动过渡区域,通常指距离地表 50~150 km 的大气圈层。近年来,随着空天一体化空间环境应用服务加快布局,空天过渡区大气环境认知和建模预报研究愈来愈受到多学科广泛重视,空天过渡区大气扰动微物理过程和机理研究取得了较为显著的进展。本文梳理了近年空天过渡区大气动力学研究现状,简述了太阳/太阳风-磁层-空天过渡区的耦合链式过程中,太阳辐射和极区粒子沉降对空天过渡区大气环境影响的研究进展。从重力波、行星波、潮汐波和典型低层大气活动四个角度出发,重点分析和总结地球活动/低层大气扰动对空天过渡区大气环境影响的研究进展,进而展望空天过渡区未来的发展前景及需要解决的几个关键问题,为大气科学和空间物理领域的研究提供一定参考。

关键词 空天过渡区,重力波,行星波,潮汐波

中图分类号 P351

Major Advances in Aerospace Transition Zone Atmospheric Dynamics Research

SHENG Zheng GUO Sheng LENG Hongze
WANG Sicheng SONG Junqiang

(College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410000)

Abstract The transitional zone bridging the domains of astronautics and aeronautics refers to the region between traditional aviation and space activities, specifically the atmospheric layer from 20 km to 150 km above the Earth's surface. With the accelerated development of aerospace integrated space environment services, the modeling and forecasting of atmospheric dynamics in the aerospace transition zone have received increasing attention from various disciplines, while significant progress has been made on the microphysical processes and mechanisms of the aerospace transition zone atmospheric disturbances. This study reviews recent advances in atmospheric dynamics research for the aerospace transition zone. It summarizes studies on how solar radiation and polar particle precipitation affect this region within the

* 国家自然科学基金项目 (42275060, 42405065), 国防科技大学自主创新科学基金项目 (24-ZZCX-JDZ-45, 25-ZZCX-BC-10) 和中国科学院“西部之光”重点实验室合作研究项目共同资助

2025-01-18 收到原稿, 2025-06-10 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Sun-solar wind-magnetosphere coupling chain. Then, we focus on summarizing the research progress of the coupling between Earth activities-lower atmosphere and the aerospace transition zone by four aspects of gravity waves, planetary waves, tidal waves, and typical lower atmospheric activities. Finally, it looks forward to the future development prospects of the aerospace transition zone and several key issues that need to be solved, providing a certain reference for scholars in atmospheric science and space physics.

Key words Aerospace transition zone, Gravity waves, Planetary waves, Tidal waves

0 引言

空天过渡区是指传统航空活动和航天活动过渡区域,通常指距离地表 50~150 km 的大气圈层,大致包括大气物理学定义的上平流层、中间层和低电离层热层区域.近年来,随着空天一体化空间环境应用服务加速推进,以超低轨星座、空天飞机和高超音速导弹为代表的空天过渡区应用高速发展^[1,2],空天过渡区大气环境机理认知和建模研究愈来愈受到多学科广泛重视.

太阳和地表-低层大气是空天过渡区大气的主要扰动来源和能量来源,其状态变化直接影响空天过渡区大气的状态和结构.空天过渡区受到太阳辐射、太阳风等扰动的自上而下影响,形成太阳-磁层-空天过渡区的耦合过程.空天过渡区还受到岩石圈活动、地形等地表因素和低层大气气象活动的自下而上作用,形成地表-低层大气-空天过渡区的垂直耦合过程.这两种机制主要驱动了空天过渡区大气环境的不同时空尺度变化,受到大气空间环境领域的共同关注.迄今为止,利用遥感、原位探测等空间环境探测技术,结合数值模型,在空天过渡区多圈层耦合认知、空间天气主要物理过程认识和建模预报等方向取得了一系列重要进展.

本文在对近年空天过渡区大气动力学研究进展进行梳理的基础上,重点关注地表-低层大气-空天过渡区大气的垂直耦合机制研究,展望空天过渡区未来发展的前景及需要解决的关键问题,为大气科学和空间物理学者提供一定参考.

1 太阳辐射与极区粒子沉降对空天过渡区大气的影响

太阳是地球空间环境的主要能量源,太阳的特征

结构和活动深刻影响空天过渡区环境的变化.太阳对地球空间环境的影响包括太阳辐射、太阳耀斑、日冕物质抛射、极区粒子沉降、行星际/磁层和空天过渡区耦合等,本文主要梳理总结太阳辐射和极区粒子沉降的影响.

1.1 太阳辐射

空天过渡区受到周期性太阳辐射的影响,主要包括 11 年周期和 27 天周期^[3].太阳辐射强度变化会造成空天过渡区大气的能量变化和成分变化,包括臭氧(O_3)^[4]、羟基自由基(OH)^[5-7]、氧原子(O)^[8]、水蒸气(H_2O)^[9]、氮氧化物(NO)^[10,11]、热层温度^[12,13]等.Shindell 等^[14]研究了太阳-平流层自上而下动量通量传输机制和地表-平流层自下而上动量通量传输机制对平流层太阳周期信号的贡献,发现自上而下和自下而上机制之间并没有明显的分界,自下而上机制主导了热带地区平流层对太阳辐射强迫的响应.Robert 等^[15]和 Thurairajah 等^[16]发现夜光云也呈现 27 天周期变化;而 Hervig 等^[17]则发现部分夜光云并未表现出明显的太阳周期变化,并认为是水蒸气的太阳周期减弱特征导致夜光云对太阳周期的响应减弱.Robert 等^[15]和 Hervig 等^[17]认为,夜光云对太阳周期的响应存在的区域性差异,可能源于水汽输送路径与纬度相关.过去一般认为,北大西洋振荡存在稳定的 11 年太阳周期信号^[18,19],而 Chiodo 等^[20]综合海平面压强观测数据、多种再分析数据和模式模拟结果研究认为北大西洋振荡中不存在太阳周期信号.鉴于 Chiodo 等^[20]和 THIÉBLEMONT 等^[18]通过不同模式模拟的北大西洋振荡与太阳活动相关性的结论矛盾,表明目前模式对海洋-大气耦合过程处理敏感,仍需进一步探究北大西洋振荡与太阳活动之间的物理耦合机制.

太阳辐射引发大气粒子电离^[21],导致 Es 层、D 层也存在 11 年、27 天周期性变化及多尺度日变化.

风剪切理论分析结果显示, 80~140 km 高度范围的偶发 Es 层与太阳活动的关联程度取决于 Es 层临界频率强弱以及当地时刻. 当临界频率在 3~5 MHz 时, 偶发 Es 层的活动与太阳活动的活跃程度呈正相关; 而当临界频率在 6~7 MHz 时, 偶发 Es 层的活动则与太阳活动的活跃程度呈负相关^[22]. 基于掩星观测数据的研究表明, 偶发 Es 层与太阳活动的活跃程度在低纬度地区白天呈正相关, 而在夜间则表现为负相关^[23-26]. Andrioli 等^[27] 和 Zhang 等^[28] 分析了中低纬度太阳活动对偶发 Es 层数量和持续时间的影响, 认为 Es 层的出现频率、高度分布和 Es 层数量都与太阳活动呈负相关. 太阳周期性辐射效应的量化研究建立了太阳活动与空天过渡区成分变化的响应关系, 为空间天气预报提供了物理基础.

Yao 等^[29] 利用总电子含量 (TEC) 观测数据和太阳极紫外监测仪发现太阳极紫外辐射 (EUV) 季节性变化是大多数电离层 27 天变化的主要驱动因素. Chakraborty 等^[30] 探讨了第 24 个太阳周期期间电离层 D 层的变化趋势. Emmert 等^[31] 和 Geoffrey 等^[32] 利用全球电离层格网数据 (GIM) 研究 TEC 的长期变化趋势. He 等^[33] 则利用 TIMED/SABER 卫星温度廓线和中国子午工程数据, 研究了太阳活动对中层大气、低热层和电离层的中长期影响, 结果显示在太阳活动最小期这些区域表现为收缩, 而在太阳活动最大期则表现为扩展. Householder 等^[34] 对比了 NOAA POES 卫星和 MetOp 卫星结果, 证实低成本小卫星在低地磁通量下进行高分辨率大气电子观测的可行性. Xue 等^[35] 综述了空间天气包括太阳耀斑、日冕物质抛射和地磁暴对各种交通系统的显著影响, 显示了开展空间天气预报的应用价值和经济价值.

磁暴过程产生的高能粒子降水对空间环境的影响近年来被广泛关注^[36]. Jia 等^[37] 报告了磁暴过程产生的高能粒子降水 (EPP) 对 90~95 km 处的第二臭氧层峰值在低、中、高纬度地区增强或减少的区域. Szelag 等^[38] 综合观测和模式发现 EPP 可导致高层大气臭氧显著减少高达 25%, 强调了观测和模式在 EPP 驱动春季臭氧减少和温度响应上的不一致性、模拟中改进 EPP 强迫的必要性. 多卫星协同观测和数据同化技术提高了 EPP 空间分布的立体刻画和磁暴时 O/N₂ 变化的预测能力. 然而, 当前主流采用的 EPP 强制条件普遍低估臭氧损耗, 导致模拟臭氧损

耗较观测显著减少 25%^[38], 强调了在气候模拟中改进 EPP 强制条件的必要性. 目前模式 EPP 电离效应参数化未考虑粒子能谱各向异性也可能带来较大的模拟误差^[39].

1.2 极区粒子沉降

太阳高能带电粒子经太阳风抛射至太空, 通过地球磁场与大气相互作用在极区汇入地球, 是典型的极区粒子沉降过程. 极区的沉降粒子速度在地磁暴期间可达 100 m·s⁻¹ 以上, 和高纬度电场耦合导致极强的加热和粒子拖曳效应, 显著加热大气温度、影响极区风场, 并驱动大气成分和电子密度变化^[40-44]. Yi 等^[45] 利用地球中间层大气风场观测资料首次报道了地球中间层大气风场潮汐对由太阳风高速流所引发的重现性地磁活动存在响应的观测证据. Li 等^[46] 基于流星雷达观测数据, 给出了中纬度低热层中性风对强地磁活动的响应观测证据. Kam 等^[47] 认为流星雷达估算中性大气如温度和水平风时, 必须考虑地磁活动对流星等离子体轨迹的影响. Martinez 和 Lu^[48] 利用 GOLD 观测数据量化了地磁暴期间 O/N₂ 的每日变化特征. Gu 等^[49] 发现地磁暴期间地磁活动对电离层潮汐变异性的影响可以表现为增强或抑制模式.

极区大气变化可通过大气耦合过程影响地球其他区域和高度. 强磁暴期的纬向风传播到较低纬度, 风速可达到 500~800 m·s⁻¹^[50,51], 并通过耦合垂直风扰动和科里奥利力改变中低纬度风场^[52,53]. Li 等^[54,55] 通过结合激光雷达观测数据与 TIMEGCM 数值模拟结果, 揭示了磁暴期间空天过渡区的耦合机制: 中纬度地区热层温度显著升高会激发向上垂直风, 进而引发高纬度区域的极风扰动现象. Zhang 等^[56] 利用 CHAMP 卫星数据探究了磁暴期热层纬向风特征, 发现纬向风受太阳辐射和磁场不对称性的影响显示出明显半球不对称性. Evans 等^[57] 基于 GOLD 卫星数据, 发现 2024 年 5 月磁暴期间赤道到极区的温度差异可达 400 K, 高纬度地区温度在约 160 km 高度超过 1400 K.

次级 X 射线由太阳风高能粒子与地球大气粒子碰撞产生的高能电子的能量转化而来, 能自上而下地传播至更深的大气区域, 成为空天过渡区中下部大气最主要的电离源^[58]. Sergeev 等^[59] 发现高能粒子沉降期间, 电子密度最大值在夜间出现在 90~100 km 的高度范围, 在早晨至中午时段出现在 75~85 km,

证实了粒子沉降对 100 km 以下电子密度的影响。

1.3 研究进展

太阳作为地球空间环境的主要能量源,其辐射变化和爆发活动会通过多种途径影响空天过渡区环境。研究表明,太阳辐射的 11 年和 27 天周期变化显著影响空天过渡区的大气成分(O_3 , OH, NO 等)和热层结构。同时,太阳活动通过电离效应导致 Es 层、D 层等电离层特征呈现周期性变化。极区粒子沉降过程在地磁暴期间对极区产生显著影响,包括加热大气、改变风场、扰动电子密度等,通过大气耦合过程向中低纬度传播,形成全球性影响。未来需要进一步加强观测与模式的结合,以更准确地量化太阳-磁层-空天过渡区耦合过程的时空特征。

2 地表活动-低层大气对空天过渡区的影响

由地表热力和低层气象扰动形成的大气波动,主要包括地球重力波、行星波、潮汐波等,通过波流和波波相互作用向背景大气沉积动量和能量、混合大气成分、加热大气,进而驱动低层大气和空天过渡区之间的相互作用。此外,地表和平流层的典型气象活动也是空天过渡区大气环境状态变化的重要扰动源,主要包括厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、人类活动引发的气候变化、热带平流层准两年振荡(QBO)和平流层爆发性增温(SSW)等。

2.1 重力波

空天过渡区重力波激发源主要包括大气潮汐^[60]、大气对流^[61]、风切变^[62,63]、地形抬升力^[64-66]等。大多数重力波在空天过渡区下部耗散^[67],并通过沉积动量通量改变背景大气场的平均风速和环流^[68,69]。具有较大相速度的重力波可以避开平均风临界层的过滤效应,影响平流层以上大气状态。幅度较小的重力波则可以避免在低层大气中发生波动破裂,进而传播到几百公里高度的热层大气^[70]。Ning 等^[71]基于中国香河 Mesosphere-Stratosphere-Troposphere Radar (MST) 雷达观测统计研究了惯性重力波活动的特征,发现波能量具有明显的季节性周期,冬季最大,夏季最小。Chen 等^[72]通过对 120 个站点收集的高频高垂直分辨率数据进行分析,对比研究了中国和美国的重力波特征。Wang 等^[73-75]研究了热带气旋引发的平流层重力

波对平流层航空安全和准确的数值天气预报的影响,以及 2019 年利奇马台风产生的重力波对空天过渡区大气的影响机制。

很多研究采用高分辨率数值模式研究全球空天过渡区中小尺度重力波特征。Liu^[76]发现考虑小尺度重力波的高分辨率方案在设计物理一致模式中的重要意义。Liu 等^[77]对比了低分辨率(约 200 km 和 0.25°)和高分辨率(约 25 km 和 0.1°)的 WACCM-X 模式模拟结果,发现高分辨率模拟中解析的重力波空间分布与观测结果吻合良好;虽然在大多数纬度上大尺度波在能量上占主导地位,但小尺度波在中高纬度地区对总动量通量的贡献显著。Malhotra 等^[78]利用水平分辨率 50 km 的全大气模式 WAMT254 研究了全球热层中尺度(尺度小于 620 km)重力波活动,发现重力波在迁移潮汐风的西向相位期间从中间层和低热层向上传播到电离层和热层,因此显示出日变化和半日变化。Fritts 等^[79,80]分析了水平分辨率降低对平流层热层重力波传播、破碎和大规模响应的影响,发现大尺度次级重力波对 0.5~2 km 的模型分辨率不敏感,但 8 km 水平分辨率模拟结果和高分辨率结果的差距不可忽视。

目前比较主流的观点认为,传播至热层的重力波综合了对流层激发的初级重力波和初级重力波在中低层大气破碎后生成的次级/三级重力波^[81-84]。重力波对主要热层-电离层大气参数产生扰动,包括风速、温度、中性大气密度和电子密度等。Vadas 和 Liu^[85]研究了重力波对热层和电离层的响应,发现能够到达热层的小尺度和中尺度重力波在 120~250 km 的高度范围内耗散,TEC 扰动最大可达 8%。Liu 等^[86]和 Park 等^[87]基于卫星观测数据发现了热层附近重力波的空间分布和季节变化特征,并通过分析低-中层大气波和热层波发现两者之间存在强相关性。Becker 和 Vadas^[83]通过在数值模式中增加重力波参数证实了低-中层大气重力波和热层重力波的强相关性。Liu 等^[88]采用 WACCM-X 模式模拟结果发现,汤加火山爆发引发的重力波能够上传至空天过渡区中上部,通过产生较强粒子拖曳影响大气组成和结构。Lee 等^[89]使用 WACCM-X 分析了 2010 年 4 月和 2013 年 3 月的两次磁暴期间下层大气不确定性对电离层-热层预报的影响,结果显示下层大气扰动将在 1~2 天后在赤道造成 10% 的 TEC 误差。然而,大气

模式受分辨率低限制, 普遍无法解析中小尺度的重力波. 重力波对空天过渡区大气的拖曳作用需要依赖参数化方法表示^[90].

空天过渡区上部大气的热传递效应和分子黏性随高度升高而迅速增加, 是重力波在该区域耗散的主要驱动因素之一. Zhang 和 Yi^[91] 采用射线追踪技术模拟了重力波在不同黏性环境下传播的差异. Vadas 和 Fritts^[92] 在重力波方程组中同时考虑大气分子黏性和热传递作用的影响, 详细模拟研究了重力波在空天过渡区上部的精细化传播特征. Datta 等^[93] 利用三维射线追踪法和印度全球定位系统 (GPS) 网观测数据研究了中尺度重力波过程, 发现了特定运动黏性值下的重力波耗散过程.

2.2 行星波

行星波又名罗斯贝波, 是一种水平尺度为几千到几万公里的全球波动. 行星波在向上传播过程中与背景相互作用, 并通过波破碎释放大动量通量引起大气背景场改变, 影响空间环境能量平衡^[94]. 行星波破碎可以引起平流层的爆发性增温; 行星波在中间层顶的耗散能够引起热层大气组成成分的变化, 进而影响到热层的光化学过程; 行星波信号能传播到电离层 Es 层, 引起空天过渡区大气和电离层的耦合^[95]. He 等^[96] 利用 52°N 两个流星雷达 9 年的中间层风测量数据, 发现风场多日振荡主要由行星波驱动, 并表现出明显的季节变化. He 和 Forbes^[97] 使用 2018—2019 年冬季在欧洲和亚洲地区的流星雷达风观测, 诊断出地球中间层大气中周期分别为 16 天和 8 天的两个瞬态波, 发现 16 天瞬态波是行星波, 而其二次谐波表现为 8 天周期特征, 证实了理论上预期的行星波非线性特征. Qin 等^[98] 基于卫星观测和再分析数据, 在 2016 年 11 月加拿大平流层增温期间的平流层下部水汽中观测到一个强烈的 12 天行星波, 证实了行星波对 SSW 的响应. Yamazaki 等^[99] 利用 Aura/MLS 卫星 2004—2020 年观测数据, 认为准四天波有时可能成为行星波在中间层低热层区域行进的主要模式. Yu 等^[100] 通过使用流星雷达、探空仪观测数据和再分析数据, 探究了平流层爆发性增温期间行星波从对流层传播到低热层的特征. Gu 等^[101] 利用 TIMED 卫星观测资料, 研究发现准两天行星波在 2003—2013 年诱发的最大温度波动可达 10~20 K, 径向风波动幅度可达 20~100 m·s⁻¹. Wang 等^[102] 利用了一系列雷达

和卫星观测资料以及同化产品, 在中性大气和电离层中观测到周期为 10 天的行星波. Forbes 等^[103] 使用 TIMED 温度观测廓线, 探究了 2002—2013 年覆盖 20~100 km 高度范围的行星波动特征. Yamazaki 等^[104] 利用地基 TEC 和 SWARM 卫星 TEC 数据研究发现, 2019 年 9 月电离层和低热层中的行星波活动与赤道电离层异常强耦合, 造成最大超过 40% 的 TEC 变化. He^[105] 综述了利用单站或卫星频谱分析以及利用双站和多站频谱求解行星波的方法.

2.3 潮汐波

潮汐波是一种由地球重力等作用力引起的大气大尺度波动, 主要分为大气迁移潮汐波和大气非迁移潮汐波两类. 大气迁移潮汐波主要由太阳辐射引起的压强梯度力激发, 是潮汐波的主要部分. 非迁移潮汐波源于地表潜在热量、重力波、迁移潮汐波等的相互作用, 表现为明显的经度相关特征. Siddiqui 等^[106] 使用 SABER 卫星温度观测数据以及再分析数据驱动的 WACCM-X 模型, 调查了迁移型日潮在平流层增温期间的变化, 发现低纬度地区经向风切变的变化对低热层中迁移型日潮的季节变化有显著影响, 经向风变化可以解释平流层增温期间观测到的迁移型日潮变化. Liu 等^[107] 使用观测数据和 WACCM-X 模式及其数据同化系统 DART 的集合卡尔曼滤波器研究了低层大气至低热层区域的潮汐波, 数值模拟和雷达观测结果都显示在 SSW 峰值后一周, 迁移性半日潮出现放大, 但与 SABER 观测数据相比, 日潮振幅在数值模拟中被低估. Gasperini 等^[108] 使用 ICON 卫星上搭载的全球高分辨率热层成像仪测量的低热层 (93~106 km 高度) 风速数据, 观测证实了平流层增温对低热层环流有强烈影响, 并认为和半日潮汐活动存在密切联系.

对流层和平流层可以激发潮汐波, 在 100 km 以上引起电子密度经度变化. Fuller 等^[109] 使用 WACCM-X 模式发现下层大气潮汐波动可引起水平风变化, 进而影响电离层 E 层形态. Wang 等^[110] 模拟发现低层大气的大尺度变化改变了电离层 D 层迁移半日潮的经向风幅度, 从而诱发电离层变化. Liu 和 Vadas^[83] 通过将 WACCM-X 模拟中的下层大气天气动力学纳入 TIEGCM 中, 研究了大气-电离层耦合产生的电离层变率. Pedatella^[111] 采用 WACCM-X 模拟了极地涡旋与 TEC 变率之间的关系, 发现准 2 日

潮汐波诱发的低纬度地区 TEC 变化会因极地涡旋条件不同而发生多达 20% 的变化. Pedatella^[112] 发现低层大气潮汐变率在 2003 年万圣节磁暴期间对电离层变率的关键作用, 可能导致可能出现高达 100% 的 TEC 预报误差. Shim 等^[113] 认为即使在地磁风暴期间也应该考虑低层大气潮汐波的影响, 以提高模型对电离层变率的预测精度. 目前已有很多研究证实, 低层大气的非迁移潮汐是影响空天过渡区低层电子浓度变化的重要来源.

2.4 几个典型低层大气活动

2.4.1 厄尔尼诺-南方涛动

ENSO 可以通过诱发对流层波变化或激发潮汐波从而对空天过渡区大气. 厄尔尼诺现象导致热带太平洋的变暖, 进而对高空平流层冷却效应产生影响^[114]. Taguchi^[115] 研究发现, 对流层下部冷却与厄尔尼诺现象诱发波动的向上垂直运动有关. Hardiman 等^[116,117] 和 Domeisen 等^[118] 研究发现, ENSO 通过增强 Brewer-Dobson 环流、北半球的地形特征产生的重力波、南半球亚热带阻力, 来调节平流层平均环流和温度. Gurubaran 等^[119] 利用流行雷达和中频雷达观测结果发现, 1994/1995 年和 1997/1998 年 2 次厄尔尼诺事件的冬季期间, 赤道周日潮汐振幅受到抑制. Vitharana 等^[120] 根据 TIMED/SABER 卫星观测结果发现, 2004—2016 年周日迁移潮汐对厄尔尼诺的全年响应均为负值. Pedatella 和 Liu^[121] 采用 WACCM 模式模拟了 150 年的数据, 认为厄尔尼诺导致对流层加热速率的增加进而导致了潮汐的增强. 而 Liu 等^[122] 认为厄尔尼诺在冬季会减弱热层的周日迁移潮汐.

2.4.2 热带平流层准两年振荡

热带平流层中的 QBO 是 5~100 hPa 压力范围内纬向平均风的年际变化的主要现象之一, 主要表现为周期为 20~30 个月的东风和西风交替. QBO 是由向上传播的赤道行星波和重力波驱动的, 并通过调制平流层的大气动态过程, 进而影响诸如臭氧从热带到高纬度地区的输送^[123]、对流层中的深对流^[124]、大气潮汐^[125,126]、行星波和重力波^[127] 等现象. 通过调制大气波动, QBO 的信号可以传播至热层. 例如, 在风场观测数据中, 低纬度 85 km 高度处仍能识别到 QBO 信号^[128].

QBO 可以引发低热层区域的潮汐变化. Vin-

cent 利用雷达观测在平流层中发现了明显的 QBO 信号与日潮变化相关^[128]. Mayr 等^[129] 发现中层日潮的年际变化可能由 QBO 引起. Laskar 等^[125] 发现中层半日潮在 QBO 东风增强期间被放大, 而在 QBO 西风期则被抑制. Rao 等^[130] 发现赤道 QBO 西风的振幅在春分时达到最大值. QBO 信号在 50~80 km 高度范围内较不明显, 但在 80 km 以上与小尺度重力波耦合时得以增强, 具体原因尚不明确. Wang 通过气象雷达观测、欧洲中期天气预报中心提供的 ERA5 再分析数据集和 SD-WACCM-X 模拟分析表明: QBO 风通过调制副热带平流层臭氧对太阳辐射的吸收及其与潮汐和重力波的相互作用, 影响了 100 km 附近的日潮汐^[126]. 低电离层中同样存在 QBO 信号. Chen^[131] 验证了 QBO 对电离层的影响, 发现 QBO 能够引起电离层电子密度变化, 可能的机制包括喷泉效应和电动势效应.

Maliniemi 等^[132] 观察到 QBO 调制了地磁活动与北极振荡模式之间的相关性. A_p 指数表现出类似于电离层 QBO 的信号, 表示电离层中的 QBO 可能会受到地磁活动的影响^[133]. Sun 等^[134] 通过分析中层大气水平风、全球导航卫星定位系统 (GNSS) TEC 和赤道电流谱中发现了 QBO 信号, 表明平流层中的振荡现象也延伸至电离层区域.

2.4.3 平流层爆发性增温

SSW 是存在于地球极区的一种特殊空间天气现象, 其特征是平流层温度在短短几天内急剧上升, 同时伴随着中高纬度地区纬向风的急剧减弱或反转^[135,136]. SSW 通常在冬季发生, 由突增行星波与大气背景场耦合并破坏平流层极涡结构而引发. SSW 会导致空天过渡区大气温度和风场的剧烈变化, 并通过改变大气环流、激发大尺度扰动影响整个冬季半球的大气状态.

SSW 通过影响极涡位置变化影响低层大气天气, 导致中纬度地区出现极端寒冷天气^[137]. SSW 通过改变背景风场和温度场激发行星尺度波动^[138]. 近年研究表明, SSW 也能增强热层和电离层的潮汐/行星波波动异常^[139]. 有研究从多个角度报道了 SSW 期间大气波动的异常增强现象, 不仅包括以天为周期的行星波, 还包括以小时为单位的潮汐波^[140].

SSW 诱发电离层异常已经得到广泛验证, 其中包括但不限于垂直离子漂移、TEC 和赤道电流等的

准半日扰动^[141]. Gan 等^[142]利用 GOLD 卫星观测数据研究发现 2019 年 9 月南极 SSW 事件期间, 电离层扰动与低层大气中增强的准 6 天波动活动一致. Zhang 等^[143]通过分析东亚/东南亚电离层不均匀体/闪烁观测网的 GNSS 接收机数据和风场观测, 发现 SSW 后电离层潮汐波振幅中出现周期为 6.5 天的显著振荡. Ma 等^[144]总结了 SSW 对中间层和低层大气行星波的研究进展.

2.4.4 人类活动与气候变化

人类活动对上层大气影响的研究最早可追溯到 Roble 和 Dickinson^[145]通过数值模拟研究二氧化碳和甲烷浓度增加对电离层热层大气的影响. 随后, Solomon 等^[146]基于 WACCM-X 模式模拟了人为因素造成的气候变化对低层大气、热层和电离层的影响, 发现气候变化对电离层影响较小, 但使全球年平均温度在平流层-中层大气下降了约 $1\text{ K}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 在热层下降了 $2.8\text{ K}\cdot(10\text{ a})^{-1}$. 地球的大气层由于二氧化碳和其他微量气体浓度的增加正在经历长期变化. McInerney 等^[147]使用 WACCM-X 模拟 20 世纪 20 年代到 21 世纪 10 年代空天过渡区大气变化发现, 一个世纪中二氧化碳变化率与热层和电离层温度变化率之间存在高相关性. Cai 等^[148]和 Zhou 等^[149]耦合热层-电离层模型 GCITEM-IGGCAS 发现太阳活动对热层变化贡献超过 80%, 而二氧化碳或地磁场的贡献均小于 10%; 增加/减少的二氧化碳会非线性地增强/减弱全新世期间的热层环流. Du 等^[150]利用 SWARM 卫星观测数据研究发现 2014 年 1 月 29 日形成的 1402 号剑鱼台风消亡时对上层大气和电离层造成了异常扰动. 气候变化如何影响热层和电离层的近地空间以及这些变化的显著性如何仍值得更进一步探讨. 如何区分人类活动潜在影响与大气环境自然演变仍是空天过渡区研究的难点问题之一.

2.5 研究进展总结

低层大气波动通过能量沉积和成分混合驱动空天过渡区变化, ENSO 和 QBO 等气象活动通过调控波动强度间接影响空天过渡区, 而人类活动可能引发热层长期冷却. 当前需量化自然变率与人为影响的相对贡献, 并发展高分辨率模式以精确模拟低层大气波动诱发的空天过渡区中小尺度过程.

此外, 目前国际主流数值模型在地表活动-低层大气对空天过渡区耦合模拟中仍存在各自局限.

WACCM-X 模式能够实现地表至 500 km 以上高度的全大气耦合模拟, 但重力波参数化方案误差大于 30%^[77]. TIME-GCM 仅能实现 90 km 以上热层-电离层大气耦合模拟, 水平分辨率较低. SD-WACCM 模式在 WACCM 模式上增加了数据同化能力, 能够实现空天过渡区再分析数据集生成, 但同化计算成本较高, 模拟耗时长. GOFT 模式可以显式解析重力波, 为波动过程机理研究提供了重要工具, 但模式仅能覆盖 60~120 km 高度. 虽然 GOFT 模式能通过嵌套 WRF 模式和 TIEGCM 模式延伸至地面和电离层, 但嵌套 WRF 模式后计算效率明显降低.

在重力波过程模拟上, 未来可通过进一步发展嵌套网格技术实现地区局部加密, 平衡解析中小尺度重力波需 $<10\text{ km}$ 网格^[79], 但全球模式在此分辨率下计算量呈指数增长的问题. 进一步发展通过机器学习替代传统统计参数化的解决方案, 开发重力波亚网格参数智能化框架, 提升模式重力波模拟能力.

3 结论

总结了空天过渡区大气动力学领域的最近进展, 通过多平台观测手段和物理化学过程组合, 结合全球分辨率和复杂度不断提高的数值模式, 在太阳活动-电离层/热层耦合自上而下过程和地球活动-低层大气-空天过渡区耦合过程的认识与机理上已取得突出进展. 未来 10 年, 中国计划实现日地圈层大气环境耦合变化过程观测的全覆盖^[150], 空天过渡区作为日地空间至关重要的一环, 未来将在关键物理过程认知和建模上获得新的发展机遇. 当前仍待解决的重要科学问题如下.

(1) 空天过渡区新质观测手段探索和数据应用探索. 很多提供空天过渡区观测的新卫星已于近年发射或拟计划发射, 包括瑞典 MATS 卫星已于 2022 年 11 月发射, 通过气辉和夜间极光成像技术提供全球三维温度场. 美国 AWE 已于 2023 年底安装到国际空间站, 是美国国家航空航天局 (NASA) 首个专门关注中层热层重力波测量的任务. JPSS-2 卫星已于 2022 年 11 月发射, 搭载 OMPS 仪器探测云反照率和冰水含量. 比利时 ALTIUS 卫星、欧洲太空局 CAIRT 卫星、JPSS-3、JPSS-4 卫星也拟于近年发射升空. 中国科学院国家空间科学中心国家重大科技基

基础设施空间环境地基综合监测网项目子午工程二期已正式启动, 该网络包含磁力仪、离子探测器、数字探测器、激光雷达、气象火箭等众多空天过渡区大气监测手段. 如何发展和利用好这些新质观测手段和数据是未来空天过渡区发展的重要研究问题之一.

(2) 地表-低层大气与空天过渡区的大气动力过程探究. 地表及低层大气活动的能量可以通过大气动力过程等输运到空天过渡区, 是空天过渡区大气环境的重要扰动源之一. 目前仍待进一步研究该链路中可能存在的精细化动力学过程和机理, 包括中性大气与电离层之间、低层大气和空天过渡区大气之间的耦合作用对空间大气环境的调制, 分析大气成分、动量通量的耦合传播特征, 探索气候变化与空天过渡区大气变化之间的关联.

在过去的 20 年里, 出现了诸如 WACCM-X, TIMEGCM, TIME-IGGCAS, GOFT 等覆盖整个空天过渡区的大气模式, 均包含了较为全面的大气动力学和化学过程^[77,88,151]. 结合精细化物理过程和机理研究, 未来可从以下三个方面发展数值模式. 首先, 提高模型部分区域的水平和垂直分辨率, 在实现多尺度大气波动全景成像、减少模式小尺度过程参数化要求的同时, 平衡因分辨率提高产生的计算量增加问题^[152,153]. 其次, 发展日地空间多模式集合嵌套方法, 探究因地球物理变化引起的大气状态变化^[154]. 最后, 同化大气成分和气辉等数据, 用于提供大气环境模式预报的初始化条件. 目前模式主要同化大气状态参数, 现在正在进行的工作包括同化大气成分和气辉^[155]. 数据同化系统还可以用来研究复杂的过程; 例如尽管大气参量中不同波动特征相对容易被观测, 但不同波动过程的贡献难以量化, 而且对许多已观测到波动特征的理解仍然较为薄弱, 是未来重要研究问题之一.

参考文献

- [1] LIU Youjian, LI Jiancheng, XU Xinyu, *et al.* Simulation analysis of short-period time-varying gravity field in recovery of very-low orbit satellite constellation[J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, (2024-05-15). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240047> (刘有建, 李建成, 徐新禹等. 超低轨卫星星座恢复短周期时变重力场的模拟分析 [J/OL]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, (2024-05-15). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240047>)
- [2] JIN Xuhong, HUANG Fei, ZHANG Jun, *et al.* Spacecraft in upper atmosphere: Research development and aerodynamic challenges[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, **45**(22): 030254 (靳旭红, 黄飞, 张俊, 等. 上层大气层飞行器研究进展及气动技术挑战 [J]. *航空学报*, 2024, **45**(22): 030254)
- [3] REN Dexin. An Investigation on Thermospheric Response to Solar Flux Changes and Data Assimilation-Based Thermospheric Prediction[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021 (任德馨. 热层大气对太阳辐射变化的响应机制及预报研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021)
- [4] BORTHAKUR M, SINNHUBER M, LAENG A, *et al.* Impact of chlorine ion chemistry on ozone loss in the middle atmosphere during very large solar proton events[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, **23**(20): 12985-13013
- [5] SCHMIDT C, KÜCHELBACHER L, WÜST S, *et al.* OH airglow observations with two identical spectrometers: benefits of increased data homogeneity in the identification of variations induced by the 11-year solar cycle, the QBO, and other factors[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2023, **16**(19): 4331-4356
- [6] KALICINSKY C, KNIELING P, KOPPMANN R, *et al.* Long-term dynamics of OH * temperatures over central Europe: trends and solar correlations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(23): 15033-15047
- [7] FYTTERER T, SANTEE M L, SINNHUBER M, *et al.* The 27-day solar rotational effect on mesospheric nighttime OH and O₃ observations induced by geomagnetic activity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(9): 7926-7936
- [8] LEDNYTS'KYY O, VON SAVIGNY C, WEBER M. Sensitivity of equatorial atomic oxygen in the MLT region to the 11-year and 27-day solar cycles[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2017, **162**: 136-150
- [9] THOMAS G E, THURAIRAJAH B, HERVIG M E, *et al.* Solar-induced 27-day variations of mesospheric temperature and water vapor from the AIM SOFIE experiment: drivers of polar mesospheric cloud variability[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, **134**: 56-68
- [10] NEWNHAM D A, RODGER C J, MARSH D R, *et al.* Spatial distributions of nitric oxide in the Antarctic wintertime middle atmosphere during geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(7): e2020JA027846
- [11] HENDRICKX K, MEGNER L, GUMBEL J, *et al.* Observation of 27-day solar cycles in the production and mesospheric descent of EPP-produced NO[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(10): 8978-8988
- [12] HOOD L. Lagged response of tropical tropospheric temperature to solar ultraviolet variations on intraseasonal time scales[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(8):

- 4066-4075
- [13] RONG P, VON SAVIGNY C, ZHANG C M, *et al.* Response of middle atmospheric temperature to the 27 d solar cycle: an analysis of 13 years of microwave limb sounder data[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(3): 1737-1755
- [14] SHINDELL D T, FALUVEGI G, SCHMIDT G A. Influences of solar forcing at ultraviolet and longer wavelengths on climate[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, **125**(7): e2019JD031640
- [15] ROBERT C E, VON SAVIGNY C, RAHPOE N, *et al.* First evidence of a 27-day solar signature in noctilucent cloud occurrence frequency[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, **115**(D1): D00I12
- [16] THURAIRAJAH B, THOMAS G E, VON SAVIGNY C, *et al.* Solar-induced 27-day variations of polar mesospheric clouds from the AIM SOFIE and CIPS experiments[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2017, **162**: 122-135
- [17] HERVIG M E, SISKIND D E, BAILEY S M, *et al.* The missing solar cycle response of the polar summer mesosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(16): 10132-10139
- [18] THIÉBLEMONT R, MATTHES K, OMRANI N E, *et al.* Solar forcing synchronizes decadal North Atlantic climate variability[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**(1): 8268
- [19] DREWS A, HUO W J, MATTES K, *et al.* The Sun's role in decadal climate predictability in the North Atlantic[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, **22**(12): 7893-7904
- [20] CHIODO G, OEHRLEIN J, POLVANI L M, *et al.* Insignificant influence of the 11-year solar cycle on the North Atlantic Oscillation[J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(2): 94-99
- [21] LIU Libo, CHEN Yiding, ZHANG Ruilong, *et al.* Some investigations of ionospheric diurnal variation[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2021, **52**(6): 647-661 (刘立波, 陈一定, 张瑞龙, 等. 电离层日变化特性研究简述[J]. *地球与行星物理评论*, 2021, **52**(6): 647-661)
- [22] MAKSYUTIN S V, SHERSTYUKOV O N. Dependence of E-sporadic layer response on solar and geomagnetic activity variations from its ion composition[J]. *Advances in Space Research*, 2005, **35**(8): 1496-1499
- [23] ZHANG Y B, WU J, GUO L X, *et al.* Influence of solar and geomagnetic activity on sporadic-E layer over low, mid and high latitude stations[J]. *Advances in Space Research*, 2015, **55**(5): 1366-1371
- [24] WU D L. Ionospheric S4 scintillations from GNSS Radio Occultation (RO) at slant path[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(15): 2373
- [25] NIU J, WENG L B, MENG X, *et al.* Morphology of ionospheric Sporadic E layer intensity based on COSMIC occultation data in the midlatitude and low-latitude regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(6): 4796-4808
- [26] BERGSSON B, SYNDERGAARD S. Global temporal and spatial variations of ionospheric sporadic-E derived from radio occultation measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(4): e2022JA030296
- [27] ANDRIOLI V F, XU J, BATISTA P P, *et al.* New findings relating tidal variability and solar activity in the low latitude MLT region[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(3): e2021JA030239
- [28] ZHANG Y B, PENG H Y, JIN R M, *et al.* The characteristics and simulation of sporadic E layers in ascending and descending phases of the solar cycle at mid-latitude stations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(1): e2024JA033356
- [29] YAO Y B, ZHAI C Z, KONG J, *et al.* Contribution of solar radiation and geomagnetic activity to global structure of 27-day variation of ionosphere[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, **91**(11): 1299-1311
- [30] CHAKRABORTY S, PALIT S, DEB S, *et al.* Modeling of the variability of D-region ionospheric electron density during solar cycle-24[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(10): e2024JA032700
- [31] EMMERT J T, MANNUCCI A J, MCDONALD S E, *et al.* Attribution of interminimum changes in global and hemispheric total electron content[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(2): 2424-2439
- [32] GEOFFREY A, EMIRANT B, EDWARD J, *et al.* Modeling of GPS total electron content over the African low-latitude region using empirical orthogonal functions[J]. *Annales Geophysicae*, 2019, **37**(1): 65-76
- [33] HE Z H, XU J Y, DAI L, *et al.* Solar activity effects on the near-Earth space regions during the descending phase of solar cycle 24[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(11): e2024JA032860
- [34] HOUSEHOLDER I M, DUDERSTADT K A, PETTIT J M, *et al.* Comparisons of energetic electron observations between FIREBIRD-II CubeSats and POES/MetOp satellites from 2018 to 2020[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(12): e2024SW004056
- [35] XUE D B, WU L X, XU T H, *et al.* Space weather effects on transportation systems: a review of current understanding and future outlook[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(12): e2024SW004055
- [36] TINSLEY B A. Solar activity, weather, and climate: the elusive connection[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2023, **104**(12): E2171-E2191
- [37] JIA J, MURBERG L E, LÖVSET T, *et al.* Energetic particle precipitation influences global secondary ozone distribution[J]. *Communications Earth & Environment*, 2024, **5**(1): 270
- [38] SZELĄG M E, MARSH D R, VERRONEN P T, *et al.* Ozone impact from solar energetic particles cools the polar stratosphere[J]. *Nature Communications*, 2022, **13**(1):

- 6883
- [39] LEI Jiuhou, LI Ruoxi, REN Dexin, *et al.* Recent progress on the retrieval and modeling of thermosphere mass density[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2023, **54**(4): 434-454 (雷久侯, 李若曦, 任德馨, 等. 热层大气密度反演与建模研究进展 [J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 2023, **54**(4): 434-454)
 - [40] HE Y, ZHU X, SHENG Z, *et al.* Statistical characteristics of inertial gravity waves over a tropical station in the western pacific based on high-resolution GPS radiosonde soundings [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, **126**(11): e2021JD034719
 - [41] ZHANG S P, SALAH J E, MITCHELL N, *et al.* Responses of the mesospheric wind at high latitudes to the April 2002 space storm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(23): 2225
 - [42] QIAN L Y, SOLOMON S C, MLYNCZAK M G. Model simulation of thermospheric response to recurrent geomagnetic forcing[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A10): A10301
 - [43] Song Q, Ding F, Wan W X, *et al.* Monitoring traveling ionospheric disturbances using the GPS network around China during the geomagnetic storm on 28 May 2011. *Science China: Earth Sciences*, 2013, **56**: 718-726 (宋茜, 丁锋, 万卫星, 等. 2011 年 5 月 28 日磁暴期间中国地区大尺度电离层行进式扰动的 GPS 台网监测 [J]. 中国科学: 地球科学, 2013, **43**(4): 513-522)
 - [44] JIANG G Y, WANG W B, XU J Y, *et al.* Responses of the lower thermospheric temperature to the 9-day and 13.5-day oscillations of recurrent geomagnetic activity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(6): 4841-4859
 - [45] YI W, REID I M, XUE X H, *et al.* First observations of Antarctic mesospheric tidal wind responses to recurrent geomagnetic activity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(4): e2020GL089957
 - [46] LI Y X, CHEN G, ZHANG S D, *et al.* Observational evidence for the neutral wind responses in the mid-latitude lower thermosphere to the strong geomagnetic activity[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(9): e2023SW003830
 - [47] KAM H, KWAK Y S, LEE C, *et al.* Response of meteor plasma trails observed by meteor radar to geomagnetic activity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(6): e2022GL102636
 - [48] MARTINEZ B C, LU X. Quantifying day-to-day variability of O/N₂ and its correlation with geomagnetic activity using GOLD[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2023, **10**: 1129279
 - [49] GU S Y, QI J H, ZHOU C, *et al.* Tidal variations in the ionosphere and mesosphere over eastern China during 2014[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(2): e2019JA027526
 - [50] FULLER-ROWELL T J, MILLWARD G H, RICHMOND A D, *et al.* Storm-time changes in the upper atmosphere at low latitudes[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, **64**(12/14): 1383-1391
 - [51] GARDNER L C, SCHUNK R W. Generation of traveling atmospheric disturbances during pulsating geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A8): A08314
 - [52] GAN Q, EASTES R W, WU Y J, *et al.* Thermospheric responses to the 3 and 4 November 2021 geomagnetic storm during the main and recovery phases as observed by NASA's GOLD and ICON missions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(1): e2023GL106529
 - [53] MERIWETHER J W. Thermospheric dynamics at low and mid-latitudes during magnetic storm activity [M]//KINTNER JR P M, COSTER A J, FULLER-ROWELL T, *et al.* Midlatitude Ionospheric Dynamics and Disturbances. Washington: AGU, 2008, **181**: 201-219
 - [54] LI J Y, WANG W B, LU J Y, *et al.* On the responses of mesosphere and lower thermosphere temperatures to geomagnetic storms at low and middle latitudes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(19): 10128-10137
 - [55] LI J Y, WANG W B, LU J Y, *et al.* A modeling study of the responses of mesosphere and lower thermosphere winds to geomagnetic storms at middle latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(5): 3666-3680
 - [56] ZHANG X F, LIU L B, LIU S T. Dependence of thermospheric zonal winds on solar flux, geomagnetic activity, and hemisphere as measured by CHAMP[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(8): 8893-8914
 - [57] EVANS J S, CORREIRA J, LUMPE J D, *et al.* GOLD observations of the thermospheric response to the 10-12 May 2024 Gannon superstorm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(16): e2024GL110506
 - [58] DÍAZ J. Monitoring May 2024 solar and geomagnetic storm using broadband seismometers[J]. *Scientific Reports*, 2024, **14**(1): 30066
 - [59] SERGEEV V A, STEPANOV N A, OGAWA Y, *et al.* Local time distribution and activity dependence of extreme electron densities in the auroral D-region as an image of energy-dependent energetic electron precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(10): e2024JA032913
 - [60] FRITTS D C, LAUGHMAN B, WANG L, *et al.* Gravity wave dynamics in a mesospheric inversion layer: 1. reflection, trapping, and instability dynamics[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(2): 626-648
 - [61] LAY E H, SHAO X M, KENDRICK A K, *et al.* Ionospheric acoustic and gravity waves associated with midlatitude thunderstorms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(7): 6010-6020
 - [62] DU Y, ZHANG F Q. Banded convective activity associated with mesoscale gravity waves over southern China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019,

- 124(4): 1912-1930
- [63] WANG L, BURGMANN R. Statistical significance of precursory gravity changes before the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(13): 7323-7332
- [64] ALEXANDER M J. Global and seasonal variations in three-dimensional gravity wave momentum flux from satellite limb-sounding temperatures[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(16): 6860-6867
- [65] FIGUEIREDO C A O B, VADAS S L, BECKER E, *et al*. Secondary gravity waves from the Tonga volcano eruption: observation and modeling over New Zealand and Australia[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(10): e2023JA031476
- [66] VADAS S L, NICOLLS M J. The phases and amplitudes of gravity waves propagating and dissipating in the thermosphere: Theory[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A5): A05322
- [67] VADAS S L, FRITTS D C. Influence of solar variability on gravity wave structure and dissipation in the thermosphere from tropospheric convection[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A10): A10S12
- [68] BAUMGARTEN K, GERDING M, BAUMGARTEN G, *et al*. Temporal variability of tidal and gravity waves during a record long 10-day continuous lidar sounding[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(1): 371-384
- [69] SONG Y, HE Y, SHENG Z, *et al*. Annual/quasi-biennial variability of inertial gravity waves in the tropical western Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2024, **130**(6): e2024JD042094
- [70] MINAMIHARA Y, SATO K, TSUTSUMI M. Intermittency of gravity waves in the Antarctic troposphere and lower stratosphere revealed by the PANSY radar observation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, **125**(15): e2020JD032543
- [71] NING W H, HUANG K M, ZHANG S D, *et al*. A statistical investigation of inertia gravity wave activity based on MST radar observations at Xianghe (116.9°E, 39.8°N), China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, **127**(1): e2021JD035315
- [72] CHEN Q Y, WU H K, LONG H C, *et al*. Comparative analysis of gravity wave characteristics in China and the United States using high vertical resolution radiosonde observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2024, **129**(14): e2023JD040492
- [73] WANG X, WANG Y, ZHANG L F, *et al*. A climatology of stratospheric gravity waves induced by tropical cyclones on the northwest Pacific Ocean[J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2024, **7**(1): 155
- [74] WANG X, ZHANG L F, WANG Y, *et al*. Influences of the mid-latitude westerly trough on stratospheric gravity waves generated by typhoon Lekima (2019)[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, **126**(23): e2021JD035399
- [75] WANG X, ZHANG L F, WANG Y, *et al*. The influencing mechanism of a mid-latitude westerly trough on stratospheric gravity waves generated by Typhoon Lekima (2019)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(7): e2021GL097544
- [76] LIU H L. Quantifying gravity wave forcing using scale invariance[J]. *Nature Communications*, 2019, **10**(1): 2605
- [77] LIU H L, LAURITZEN P H, VITT F, *et al*. Assessment of gravity waves from tropopause to thermosphere and ionosphere in high-resolution WACCM-X simulations[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2024, **16**(6): e2023MS004024
- [78] MALHOTRA G, FULLER-ROWELL T, FANG T W, *et al*. Medium-scale thermospheric gravity waves in the high-resolution Whole Atmosphere Model: seasonal, local time, and longitudinal variations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2025, **130**(1): e2024JD041810
- [79] FRITTS D C, LUND A C, LUND T S, *et al*. Impacts of limited model resolution on the representation of mountain wave and secondary gravity wave dynamics in local and global models. 1: mountain waves in the stratosphere and mesosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, **127**(9): e2021JD035990
- [80] FRITTS D C, LUND A C, LUND T S, *et al*. Impacts of limited model resolution on the representation of mountain wave and secondary wave dynamics in local and global models: 2. mountain wave and secondary wave evolutions in the thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, **127**(9): e2021JD036035
- [81] CRIDDLE N R, PAUTET P D, YUAN T, *et al*. Evidence for horizontal blocking and reflection of a small-scale gravity wave in the mesosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, **125**(10): e2019JD031828
- [82] BECKER E, VADAS S L. Explicit global simulation of gravity waves in the thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(10): e2020JA028034
- [83] VADAS S L, BECKER E. Numerical modeling of the generation of tertiary gravity waves in the mesosphere and thermosphere during strong mountain wave events over the Southern Andes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(9): 7687-7718
- [84] LIU H L, VADAS S L. Large-scale ionospheric disturbances due to the dissipation of convectively-generated gravity waves over Brazil[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(5): 2419-2427
- [85] VADAS S L, LIU H L. Generation of large-scale gravity waves and neutral winds in the thermosphere from the dissipation of convectively generated gravity waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A10): A10310
- [86] LIU H L, LAURITZEN P H, VITT F. Impacts of gravity waves on the thermospheric circulation and composition[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(3):

- e2023GL107453
- [87] PARK R S, MASTROLEMOS N, JACOBSON R A, *et al.* The global shape, gravity field, and libration of enceladus[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2024, **129**(1): e2023JE008054
- [88] LIU H L, WANG W, HUBA J D, *et al.* Atmospheric and ionospheric responses to Hunga-Tonga volcano eruption simulated by WACCM-X. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(10): e2023GL103682
- [89] LEE W, SONG I S, SHIM J S, *et al.* The impact of lower atmosphere forecast uncertainties on WACCM-X prediction of ionosphere-thermosphere system during geomagnetic storms[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(12): e2024SW004137
- [90] HE Y, ZHU X Q, SHENG Z, *et al.* Observations of inertia gravity waves in the western Pacific and their characteristic in the 2015/2016 quasi-biennial oscillation disruption[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, **127**(22): e2022JD037208
- [91] ZHANG S D, YI F. A numerical study of propagation characteristics of gravity wave packets propagating in a dissipative atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D14): 4222
- [92] VADAS S L, FRITTS D C. Thermospheric responses to gravity waves: influences of increasing viscosity and thermal diffusivity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(D15): D15103
- [93] DATTA S, DAS S, SUNDA S. Secondary gravity wave propagation in tropical thermospheric region: role of varying kinematic viscosity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(10): e2023JA032364
- [94] GU S Y. Planetary Waves and Their Roles in Atmospheric Coupling[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015 (谷升阳. 行星尺度波动及其在大气层耦合中的作用 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015)
- [95] PANCHEVA D, MUKHTAROV P, MITCHELL N J, *et al.* Planetary waves in coupling the stratosphere and mesosphere during the major stratospheric warming in 2003/2004[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D12): D12105
- [96] HE M S, FORBES J M, STOBBER G, *et al.* Nonlinear interactions of planetary-scale waves in mesospheric winds observed at 52°N latitude and two longitudes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(24): e2024GL110629
- [97] HE M S, FORBES J M. Rossby wave second harmonic generation observed in the middle atmosphere[J]. *Nature Communications*, 2022, **13**(1): 7544
- [98] QIN Y S, GU S Y, DOU X K, *et al.* Secondary 12-day planetary wave in the mesospheric water vapor during the 2016/2017 unusual Canadian stratospheric warming[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(4): e2021GL097024
- [99] YAMAZAKI Y, MATTHIAS V, MIYOSHI Y. Quasi-4-day wave: atmospheric manifestation of the first symmetric Rossby normal mode of zonal wavenumber 2[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, **126**(13): e2021JD034855
- [100] YU F R, HUANG K M, ZHANG S D, *et al.* Observations of eastward propagating quasi 6-day waves from the troposphere to the lower thermosphere during SSWs in early 2016[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, **127**(9): e2021JD036017
- [101] GU S Y, LI T, DOU X K, *et al.* Observations of quasi-two-day wave by TIMED/SABER and TIMED/TIDI[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(4): 1624-1639
- [102] WANG J C, PALO S E, FORBES J M, *et al.* Unusual quasi-10-day planetary wave activity and the ionospheric response during the 2019 southern hemisphere sudden stratospheric warming[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(6): e2021JA029286
- [103] FORBES J M, BRUINSMA S L, DOORNBOS E, *et al.* Gravity wave-induced variability of the middle thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(7): 6914-6923
- [104] YAMAZAKI Y, MATTHIAS V, MIYOSHI Y, *et al.* September 2019 Antarctic sudden stratospheric warming: quasi-6-day wave burst and ionospheric effects[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(1): e2019GL086577
- [105] HE M S. Planetary-scale MLT waves diagnosed through multi-station methods: a review[J]. *Earth Planets Space*, 2023, **75**(1): 63
- [106] SIDDIQUI T A, CHAU J L, STOLLE C, *et al.* Migrating solar diurnal tidal variability during northern and southern hemisphere sudden stratospheric warmings[J]. *Earth Planets Space*, 2022, **74**(1): 101
- [107] LIU G P, LIEBERMAN R S, HARVEY V L, *et al.* Tidal variations in the mesosphere and lower thermosphere before, during, and after the 2009 sudden stratospheric warming[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(3): e2020JA028827
- [108] GASPERINI F, JONES JR M, HARDING B J, *et al.* Direct observational evidence of altered mesosphere lower thermosphere mean circulation from a major sudden stratospheric warming[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(7): e2022GL102579
- [109] FULLER ROWELL T J, AKMAEV R A, WU F, *et al.* Impact of terrestrial weather on the upper atmosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(9): L09808
- [110] WANG H, AKMAEV R A, FANG T W, *et al.* First forecast of a sudden stratospheric warming with a coupled whole-atmosphere/ionosphere model IDEA[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(3): 2079-2089
- [111] PEDATELLA N M. Influence of stratosphere polar vortex variability on the mesosphere, thermosphere, and ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(7): e2023JA031495

- [112] PEDATELLA N M. Impact of the lower atmosphere on the ionosphere response to a geomagnetic superstorm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(18): 9383-9389
- [113] SHIM J S, SONG I S, JEE G, *et al.* Validation of ionospheric specifications during geomagnetic storms: TEC and f_0F_2 during the 2013 March storm event-II[J]. *Space Weather*, 2023, **21**(5): e2022SW003388
- [114] SCHERLLIN-PIRSCHER B, DESER C, HO S P, *et al.* The vertical and spatial structure of ENSO in the upper troposphere and lower stratosphere from GPS radio occultation measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(20): L20801
- [115] TAGUCHI M. Observed connection of the stratospheric quasi-biennial oscillation with El Niño-Southern Oscillation in radiosonde data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, **115**(D18): D18120
- [116] HARDIMAN S C, BUTCHART N, HAYNES P H, *et al.* A note on forced versus internal variability of the stratosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(12): L12803
- [117] HARDIMAN S C, LIN P, SCAIFE A, *et al.* The influence of dynamical variability on the observed Brewer-Dobson circulation trend[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(6): 2885-2892
- [118] DOMEISEN D I V, GARFINKEL C I, BUTLER A H. The teleconnection of El Niño Southern Oscillation to the stratosphere[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, **57**(1): 5-47
- [119] GURUBARAN S, RAJARAM R, NAKAMURA T, *et al.* Interannual variability of diurnal tide in the tropical mesopause region: a signature of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(13): L13805
- [120] VITHARANA A, DU J, ZHU X W, *et al.* Numerical prediction of the migrating diurnal tide total variability in the mesosphere and lower thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(11): e2021JA029588
- [121] PEDATELLA N M, LIU H L. Influence of the El Niño Southern Oscillation on the middle and upper atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(5): 2744-2755
- [122] LIU H X, SUN Y Y, MIYOSHI Y, *et al.* ENSO effects on MLT diurnal tides: a 21-year reanalysis data-driven GAIA model simulation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(5): 5539-5549
- [123] HAMPSON J, HAYNES P. Influence of the Equatorial QBO on the extratropical stratosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2006, **63**(3): 936-951
- [124] COLLIMORE C C, MARTIN D W, HITCHMAN M H, *et al.* On the relationship between the QBO and tropical deep convection[J]. *Journal of Climate*, 2003, **16**(15): 2552-2568
- [125] LASKAR F L, CHAU J L, STOBBER G, *et al.* Quasi-biennial oscillation modulation of the middle- and high-latitude mesospheric semidiurnal tides during August-September[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, **121**(5): 4869-4879
- [126] WANG J Y, LI N, YI W, *et al.* The impact of Quasi-Biennial Oscillation (QBO) disruptions on diurnal tides over the low- and mid-latitude Mesosphere and Lower Thermosphere (MLT) region observed by a meteor radar chain[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024, **24**(23): 13299-13315
- [127] GELLER M A, ZHOU T H, SHINDELL D, *et al.* Modeling the QBO—improvements resulting from higher-model vertical resolution[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2016, **8**(3): 1092-1105
- [128] VINCENT R A, KOVALAM S, FRITTS D C, *et al.* Long-term MF radar observations of solar tides in the low-latitude mesosphere: interannual variability and comparisons with the GSWM[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(D8): 8667-8683
- [129] MAYR H G, MENGEL J G, WOLFF C L, *et al.* QBO as a potential amplifier of solar cycle influence[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(5): L05812
- [130] RAO V N, TSUDA T, RIGGIN D M, *et al.* Long-term variability of mean winds in the mesosphere and lower thermosphere at low latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117**(A10): A10312
- [131] CHEN P R. Evidence of the ionospheric response to the QBO[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, **19**(11): 1089-1092
- [132] MALINIEMI V, ASIKAINEN T, MURSULA K. Effect of geomagnetic activity on the northern annular mode: QBO dependence and the Holton-Tan relationship[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, **121**(17): 10,043-10,055
- [133] ECHER E. On the Quasi-Biennial Oscillation (QBO) signal in the f_0F_2 ionospheric parameter[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, **69**(4/5): 621-627
- [134] SUN R D, GU S Y, DOU X K, *et al.* The impact of the quasi-biennial oscillation on the mesosphere and ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, **127**(5): e2021JA029920
- [135] BUTLER A H, SJOBERG J P, SEIDEL D J, *et al.* A sudden stratospheric warming compendium[J]. *Earth System Science Data*, 2017, **9**(1): 63-76
- [136] BALDWIN M P, AYARZAGÜENA B, BIRNER T, *et al.* Sudden stratospheric warmings[J]. *Reviews of Geophysics*, 2021, **59**(1): e2020RG000708
- [137] KING A D, BUTLER A H, JUCKER M, *et al.* Observed relationships between sudden stratospheric warmings and European climate extremes[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, **124**(24): 13943-13961
- [138] LASKAR F I, MCCORMACK J P, CHAU J L, *et al.* In-

- terhemispheric meridional circulation during sudden stratospheric warming[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(8): 7112-7122
- [139] GONG Y, LI C, MA Z, *et al.* Study of the quasi-5-day wave in the MLT region by a meteor radar chain[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(17): 9474-9487
- [140] LUO J H, GONG Y, MA Z, *et al.* Long-term variation of lunar semidiurnal tides in the MLT region revealed by a meteor radar chain[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(9): e2022JA030616
- [141] OBERHEIDE J. Day-to-day variability of the semidiurnal tide in the F-region ionosphere during the January 2021 SSW from COSMIC-2 and ICON[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(17): e2022GL100369
- [142] GAN Q, OBERHEIDE J, GONCHARENKO L, *et al.* GOLD synoptic observations of quasi-6-day wave modulations of post-sunset equatorial ionization anomaly during the September 2019 Antarctic sudden stratospheric warming[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(12): e2023GL103386
- [143] ZHANG Wenmin, MA Zheng, GONG Yun, *et al.* Response of ionospheric terdiurnal tides to the 2018 SSW over Beijing[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, **65**(6): 1921-1930 (张雯敏, 马铮, 龚韵, 等. 北京上空电离层 8 小时潮汐波对 2018 年 SSW 的响应研究 [J]. 地球物理学报, 2022, **65**(6): 1921-1930)
- [144] MA Zheng, GONG Yun, ZHANG Shaodong. 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 (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]. 地球与行星物理评论, 2024, **55**(1): 109-119)
- [145] ROBLE R G, DICKINSON R E. How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere?[J]. *Geophysical Research Letters*, 1989, **16**(12): 1441-1444
- [146] SOLOMON S C, LIU H L, MARSH D R, *et al.* Whole atmosphere simulation of anthropogenic climate change[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(3): 1567-1576
- [147] MCINERNEY J M, QIAN L Y, LIU H L, *et al.* Climate change in the thermosphere and ionosphere from the early twentieth century to early twenty-first century simulated by the whole atmosphere community climate model—extended[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2024, **129**(3): e2023JD039397
- [148] CAI Y, YUE X, ZHOU X, *et al.* Simulated long-term evolution of the thermosphere during the Holocene – Part 1: neutral density and temperature[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, **23**(9): 5009-5021
- [149] ZHOU X, YUE X A, CAI Y H, *et al.* Simulated long-term evolution of the thermosphere during the Holocene – Part 2: circulation and solar tides[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, **23**(11): 6383-6393
- [150] DU Xiaohui, ZHANG Xuemin. An ionospheric disturbance caused by the disintegration of a typhoon observed by the SWARM satellites[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2021, **52**(6): 662-674 (杜晓辉, 张学民. SWARM 卫星观测到的一次台风消亡产生的电离层扰动 [J]. 地球与行星物理评论, 2021, **52**(6): 662-674)
- [151] WANG Chi, DOU Xiankang, GONG Jiancun, *et al.* Recent advances and prospect in space physics[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(1): 19 (王赤, 窦贤康, 龚建村, 等. 空间物理学最新进展与展望 [J]. 空间科学学报, 2021, **41**(1): 1-9)
- [152] CHANG P, ZHANG S Q, DANABASOGLU G, *et al.* An unprecedented set of high-resolution earth system simulations for understanding multiscale interactions in climate variability and change[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2020, **12**(12): e2020MS002298
- [153] HOHENEGGER C, KORN P, LINARDAKIS L, *et al.* ICON-Sapphire: simulating the components of the earth system and their interactions at kilometer and subkilometer scales[J]. *Geoscientific Model Development*, 2023, **16**(2): 779-811
- [154] RICHTER J H, GLANVILLE A A, EDWARDS J, *et al.* Subseasonal earth system prediction with CESM2[J]. *Weather and Forecasting*, 2022, **37**(6): 797-815
- [155] MCCORMACK J P, HARVEY V L, RANDALL C E, *et al.* Intercomparison of middle atmospheric meteorological analyses for the northern hemisphere winter 2009-2010[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(23): 17577-17605

作者简介



盛 峥 男, 1983 年 2 月出生于江西省南昌市, 现为国防科技大学气象海洋学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为中高层大气探测、中高层大气多圈层耦合及数值建模研究等。

E-mail: 19994035@sina.com



宋君强 (通信作者) 男, 1962 年 7 月出生于湖南省宁乡市, 现为国防科技大学气象海洋学院研究员, 博士生导师, 主要研究方向为海洋、大气、空间多圈层耦合数值建模与预报、地球系统数字孪生模型构建等。

E-mail: junqiang@nudt.edu.cn