

基于 Swarm 卫星的逃逸层温度在太阳活动低年平静时期的夜间增强现象

林莹莹^{1, 2} 徐寄遥^{1, 2} 任志鹏³

1(中国科学院国家空间科学中心 北京市 100190)

2(中国科学院大学 北京市 100049)

3(中国科学院地质与地球物理研究所 北京市 100029)

摘要 逃逸层大气温度的夜间增强现象是高层大气温度变化特征的重要组成部分，对该现象的研究有助于增加对大气温度的认识以及对大气中性模式的完善。先前，由于高热层温度数据的匮乏，对中性温度夜间增强现象的研究主要基于单点及联合观测的地基 FPI 台站以及各种中性大气模式完成现象及影响机制的研究。本文基于 Swarm 卫星加速度计的中性密度反演的逃逸层温度探究了不同太阳活动条件下平静时期的温度夜间增强现象的全球变化和季节变化。结果显示，温度的夜间增强现象存在季节和经度依赖性，并在不同太阳活动条件下表现不同：当 F10.7 为 80-100 之间时，夜间增强的季节依赖性体现在强度上，夏冬至出现得更早，强度更大，春秋分则更晚，其经度依赖性也体现在强度上，不同扇区增强的强度存在差异，整体上 SAA 扇区更强；当 F10.7 小于 80 时，夜间增强的季节依赖性体现在形态和强度上，春秋分夜间增强出现得更早，形态更多样，其经度依赖性则受季节影响，在春秋分增强的经度依赖性体现在形态上，不同扇区向中高纬延展的形态不同，而夏冬至则体现在强度上，在太平洋扇区和 SAA 扇区较强，其余扇区较弱甚至不出现增强。

关键词 中性温度，逃逸层，太阳活动低年，平静时期，夜间增强，经度变化

中图分类号 (高层大气物理 P351)

Nighttime Exospheric Temperature Maximum During Quiet Time of Solar Minimum Period Based on Swarm Satellites

Lin Yingyun^{1, 2} Xu Jiyao^{2^{1, 2}} Ren Zhipeng^{2^{2, 3}}

1 (National Space Science Center, Chinese Academy of Science, Beijing, 100190)

* 基金项目：41831073

投稿日期：2024 年 3 月 7 日

E-mail: yylin@spaceweather.ac.cn

2 (University of Chinese Academy of Science, Beijing, 100049)

3 (Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100029)

Abstract The nighttime exospheric temperature maximum is an important part of the characteristics of upper atmospheric temperature variations, the study of it contributes to the understanding of atmospheric temperature and the improvement of the neutral atmosphere model. Previously, due to the scarcity of upper thermosphere temperature observations, studies of the nighttime exospheric temperature maximum were mainly based on single-site and joint observation of ground-based FPI stations as well as model simulations to accomplish the phenomena and mechanisms. This paper explores the global and seasonal variations of the nighttime exospheric temperature maximum during quiet time under different solar activity conditions based on the exospheric temperature obtained from the neutral density of the Swarm satellite accelerometer. The results show that the nighttime exospheric temperature maximum is seasonally and longitudinally dependent, and behaves differently under different solar activity conditions: when F10.7 is between 80 and 100, the seasonal dependence of the temperature maximum is reflected in the intensity, with the summer and winter solstices appearing earlier and stronger, and the spring and autumn equinoxes appearing later; and the longitudinally dependence of the temperature maximum is reflected in the intensity, with the maximum differing from one sector to another, and the SAA sector being stronger in general; for F10.7 less than 80, the seasonal dependence of temperature maximum is reflected in the morphology and intensity, with it appearing earlier and in more diverse morphologies in spring and autumn equinoxes, and its longitude dependence is affected by seasons, with the longitudinal dependence of enhancement in the spring and autumn equinoxes reflected in the morphology and the morphology of the extension to the mid to high latitudes in different sectors is different, and that of summer and winter solstices is reflected in the intensity, which is stronger in the Pacific and SAA sectors and weaker or even no maximum in the rest of the sectors.

Key words Neutral Temperature, Exosphere, Solar Minimum, Quiet Time, Nighttime Temperature Maximum, Longitudinal Variation

0 引言

二十世纪七十年代以来,地面台站和卫星观测均显示在午夜前后的赤道附近,热层存在大气温度的小幅度升高,这一现象被称为温度的夜间增强现象。随后几十年的研究结果显示,这一现象产生的原因可能为来自低层大气向上传播的潮汐的相互作用。1972年Harper等人首次提出了温度夜间增强现象的概念^[1],他们在Arecibo的非相干散射雷达探测的离子温度中发现了位于LT2的微弱波动。紧接着,Sobral在Arecibo台站的630 nm气辉辐射中同样发现了气辉辐射强度的夜间增强现象^[2],并研究了非相干散射雷达、Ionosonde显示的电离层下沉现象对应的气辉辐射夜间增强的方向和相速度。结果显示,在LT23-2增强的传播主要为南北向,在LT2-4传播主要为东西向,二者的作用机制不同。1979年Spencer通过AE-E卫星的NATE设备,首次在中性温度中发现夜间增强现象^[3],观测显示这一现象在子夜前后持续出现,且出现频率大概为统计观测时间的50%,Spencer认为子夜前出现的赤道向的汇聚中性风在随后转向导致的绝热加热可能是温度增强产生的原

因。随后, Burnside 基于 Arecibo 的 Fabry-Pérot Interferometer (FPI) 的中性温度和气辉强度^[4]讨论了温度、经向和纬向风场在夜间的变化, 观测显示中性温度在 LT1-2 有增强, 北向增强比南向增强大 40 K。而后, Herrero 基于长时间观测的 AE-E 卫星的中性温度数据^[5], 在 1982 年首次刻画了较为完整的温度夜间增强现象, 结果显示, 相比冬季半球, 夏季半球夜间增强现象出现得更早, 振幅更大, 其温度扰动也更大; 同时, 在分日, 夜间增强现象在赤道最先出现, 随后向两个半球延展, 两个半球的夜间增强现象出现的时刻相当; 另一方面, 夜间增强现象既存在先在赤道出现, 而后向中高纬度发展的“V”型, 也存在先在中纬度出现而后延伸至赤道的情况。

自 Spencer 在观测中发现温度夜间增强现象后, 许多研究利用 FPI、非相干散射雷达等观测设备探究了温度的夜间增强随纬度、季节、太阳活动等参数的变化。其中, Colerico 基于南半球五个 FPI 台站观测的气辉强度发现, 夜间增强主要发生在低纬地区的子夜附近^[6], 最初形成于地理赤道并逐渐向两极传播, 除了赤道以外的强度最大值出现在 $\pm 15^\circ$ 附近。这一工作扩展了夜间增强现象纬度变化特征研究上的界限, 同时, Colerico 还发现除了由赤道向两极传播外, 还存在从两个半球传播向赤道的夜间增强, 他把这两种夜间增强定义为 Midnight Brightness Wave (MBW) 和 Pre-Midnight Brightness Wave (PMBW) 事件。Oliver 基于非相干散射雷达的 350 km 的离子温度数据^[7], 发现夜间离子温度的局部增强只在冬季发生, 其平均振幅为 40 K, 最高增幅大于 100 K。该局部增强在 LT4 附近达到峰值, 整体持续时间为 4 个小时, Oliver 认为这一现象的产生可能为冬季时台站正好旋转至全球气压最低的位置, 此时全球风的汇聚导致低纬地区夜间增强现象向中纬流动。Ruan 基于非相干散射雷达和 FPI 的数据^[8]对比了中性温度和离子温度的夜间增强现象, 结果显示在 LT3-4 附近的冬季中性温度和离子温度均表现出增强现象, 增强的幅度约为 30-90 K, 但在夏季的夜间相同 LT 时刻的增强仅出现在中性温度上。Faivre 基于秘鲁的 FPI 温度数据^[9]发现夜间增强的振幅和出现时刻随季节变化, 在冬至峰值出现在 LT0-3, 晚于春秋分; 同时振幅随年积日变化出现很弱的半年振荡, 在春分附近峰值为 150-200 K, 而在冬至附近存在一个 50-70 K 左右的次极大值。另一方面, 该工作还显示夜间温度增强的振幅变化和太阳活动以及地磁活动相关性不强。

另一方面, 一些研究基于模式探究了夜间增强的产生机制和影响因素。Fesen 基于 TIEGCM 模式^[10]发现温度夜间增强现象中起主导作用的可能是来自低层大气的上行半日潮, 模拟结果显示, 半日潮的两个波模在夏季相互增强, 而在冬季相互抵消, 造成了温度夜间增强在夏季夜间出现得更早、更强; 并且, 这一工作显示不同半球的夜间增强现象对地磁活动的敏感性不同, 北半球不敏感但南半球表现出一定的上升; Spencer 的工作也显示地磁活动对温度的夜间增强现象存在影响^[3]; Bamgboye 的研究则显示夜间增强现象与地磁活动关联很小^[11], 对经度变化也不敏感。Akmaev 利用 WAM 模式发现^[12, 13]温度夜间增强的影响因素可能是低层大气上行的 8 小时潮汐, 这一潮汐的主要来源是中低层大气其他潮汐的相互作用。Ruan 利用 TIEGCM 区分了向上传播的潮汐以及热层激发的潮汐之间的相互作用^[14], 他发现日潮、半日潮、8 小时潮共同决定了高热层中密度夜间增强的形成和结构, 其中, 半日潮和 8 小时潮汐控制夜间增强的形成, 并且 8 小时潮汐控制夜间增强的振幅强度和延展的宽度; 这一工作还讨论了这几个潮汐的形成机制, 并发现半日潮主要来源于 Mesosphere and Lower Thermosphere (MLT) 区向上传播的潮汐, 8 小时潮汐主要来源于局地热激发和日潮与半日潮的相互作用产生的离子拖曳效应的共同作用, 这些结果在一定程度上也指示了温度夜间增强的影响因素。

由于观测数据的限制, 迄今为止对夜间增强现象的经度结构以及太阳活动变化对夜间增强形态的影响的相关讨论尚不充分, 基于这一现状, 本文利用 Swarm 卫星提供的加速度计衍生的中性密度反演的逃逸层温度, 探究了对太阳活动低年时期的夜间增强现象随太阳活动变化、随经度变化以及季节变化的特征。本文的第一章为温度夜间增强的背景介绍, 第二章为反演中使用的数据的介绍, 温度的反演方法以及对反演结果的评估, 第三章为温度夜间增强现象的观测和讨论, 第四章为结论。

1 数据和方法

1.1 Swarm 卫星数据

1.1.1 分布特征

Swarm 卫星^[15]于 2013 年发射，共包括三颗卫星，其中 Swarm A 和 Swarm C 在下方，Swarm B 在上方，它们的轨道于 2014 年 4 月中旬达到稳定。Swarm 卫星的产品包括精密定轨反演的中性密度^[16]以及原轨道加速度计反演的中性密度^[17]，精密定轨的数据在反演中加入了模式的参数，因此本工作使用的是原轨道加速度计反演的中性密度，其分布如图 1。图 1 中 (a) 和 (b) 分别为 Swarm 卫星自 2014 年 2 月至 2022 年 10 月的密度和高度分布，其中，玫红色为 Swarm A 的密度，绿色为 Swarm B 的密度（仅有 2015 年 3 月），红色为 Swarm C 的密度。图 1 中 (c) 为 Swarm 卫星加速度计的密度和精密定轨反演的密度在 2014 年 12 月 22 日随 UT 时间变化的图像，其中红色为加速度计的密度，黑色为精密定轨反演的密度，蓝色为纬度随 UT 的变化。图 1 显示加速度计的密度和精密定轨反演的密度整体变化趋势是一致的，且离散型较低，说明加速度计的密度数据的质量足以支撑后续的反演工作。

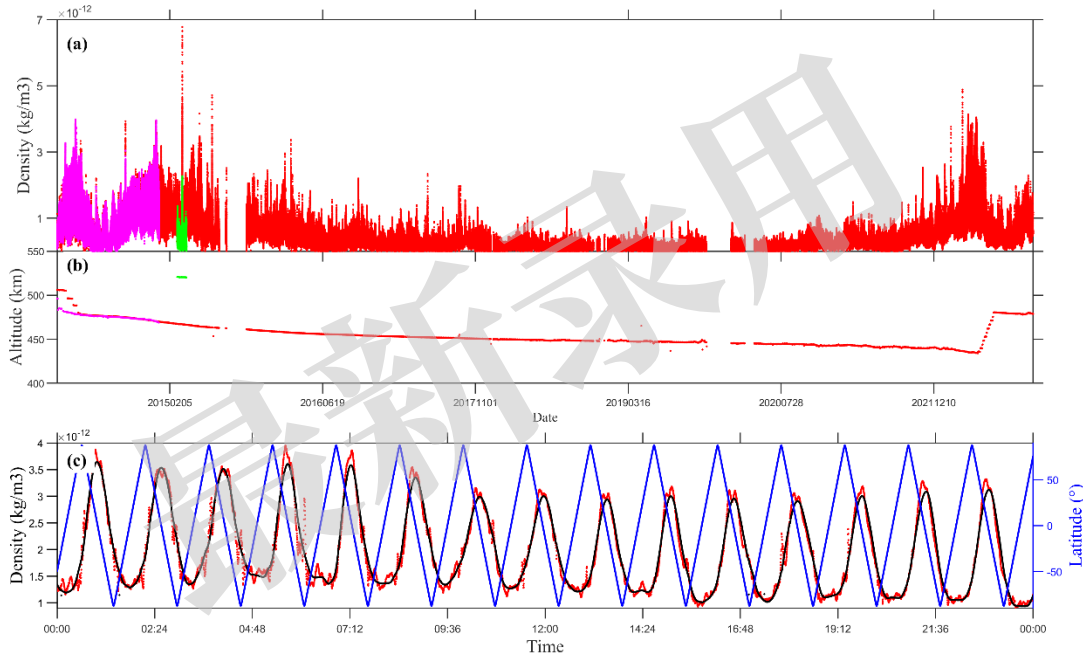


图 1 Swarm 卫星加速度计数据的密度 (a)、轨道高度 (b) 分布状况和 Swarm 卫星加速度计密度与精密定轨反演密度对比状况 (c)

1.1.2 统计窗口

这一工作使用了 2016 年 2 月到 2021 年 10 月的平静时期的数据，为了避免磁暴扰动干扰统计结果，本文在后续的统计中排除了 Dst 指数小于 -30，Ap 指数大于等于 10 的数据。

另一方面，图 2 显示，太阳活动高年时期 F10.7 的变化区间很大，由于季节窗口的覆盖需要几年的数据，因而在太阳活动高年时期窗口内的温度变化较大，进而影响到后续的平均结果，因此本文只统计了太阳活动低年时期 ($F10.7 \leq 100$) 的数据。同时，为了探究太阳活动变化对夜间增强现象的影响，本文将低年时期的数据分为两个 F10.7 区间： $80 < F10.7 \leq 100$ ； $F10.7 \leq 80$ 。

随后，本文按不同的经度将所有温度数据划分为五个经度扇区：太平洋扇区 ($150^\circ \sim -120^\circ$)、美洲扇区 ($-120^\circ \sim -60^\circ$)、南大西洋异常区 (SAA) ($-60^\circ \sim 10^\circ$)、欧洲扇

区 ($10^{\circ} \sim 60^{\circ}$)、亚洲扇区 ($60^{\circ} \sim 120^{\circ}$)，同时纬度和 LT 则分别按 5° 、 0.5 h 的间隔和 5° 、 1.25 h 的步长划分滑动窗口，并将所有数据在窗口内进行平均。

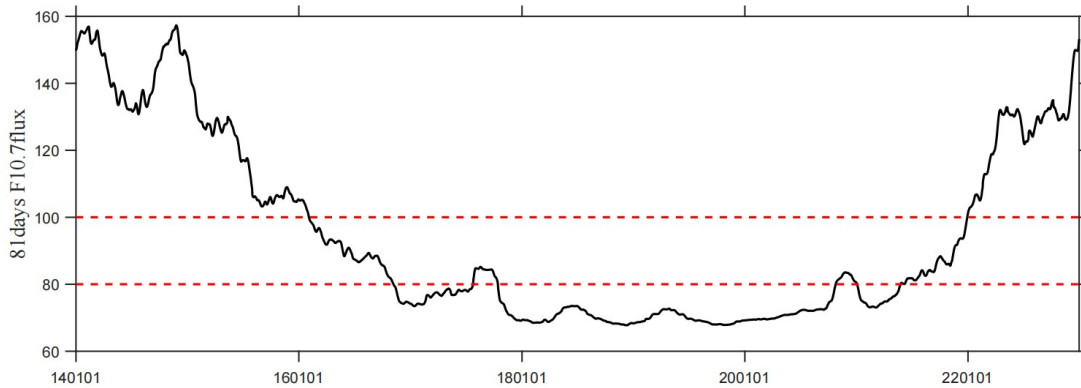


图 2 2014 年-2022 年的 81 天平均的 F10.7 通量变化

1.2 反演方法与反演数据的评估

本文的温度反演方法是 Forbes 的潮汐分析工作中使用的逃逸层温度反演方法^[18]。逃逸层高度的温度特征显示温度的变化与高度基本无关，同时标高一定，因此通过中性密度数据和模式就能反演得到逃逸层温度。Forbes 在反演中使用的数据是 CHAMP/GRACE 提供的中性密度数据，使用的模式为 NRL-MSISE00 (MSIS) 模式^[19]。其中，MSIS 的输入参数为 Day of year (Doy)，UT(s)，LT(h)，纬度，经度，高度，F10.7 通量，Ap 指数，Forbes 通过迭代 F10.7 通量，使得模式的中性密度逼近实测密度值，此时的模拟温度即为对应的逃逸层温度。

本文基于这一方法获得了 2016-2021 年的逃逸层温度，在统计之前，先对反演进行评估，本文主要使用 FPI 的夜间观测温度与双层密度反演的温度对反演结果进行评估，图 3 为反演温度和不同 FPI 台站的温度以及基于双层中性密度反演的逃逸层温度对比的散点图。其中横坐标为反演的温度，子图 (a) - (k) 的纵坐标为 FPI 的温度，子图 1 的纵坐标为基于双层中性密度反演逃逸层温度的方法^[20]得到的反演温度。虽然反演结果和 FPI 的高度相差了约 250 km，但由于目前只有这一观测数据，同时 MSIS 模拟的不同太阳活动、不同季节的温度变化也显示在夜间这两个高度的温度差别很小，因此用 FPI 台站的温度来评估反演结果具有可行性。图 3 显示，反演温度和 FPI 数据对比的相关性基本在 0.6 以上，同时散点图拟合斜率多在 0.7-1.1 附近，说明反演结果和 FPI 的夜间温度较为一致。

同时，从子图 1 可以发现，与基于双层密度反演的温度对比的散点图拟合斜率为 1.11，相关系数为 0.82，同时二者温差的系统偏差和标准差为 $-17 \pm 86.52 \text{ K}$ 。

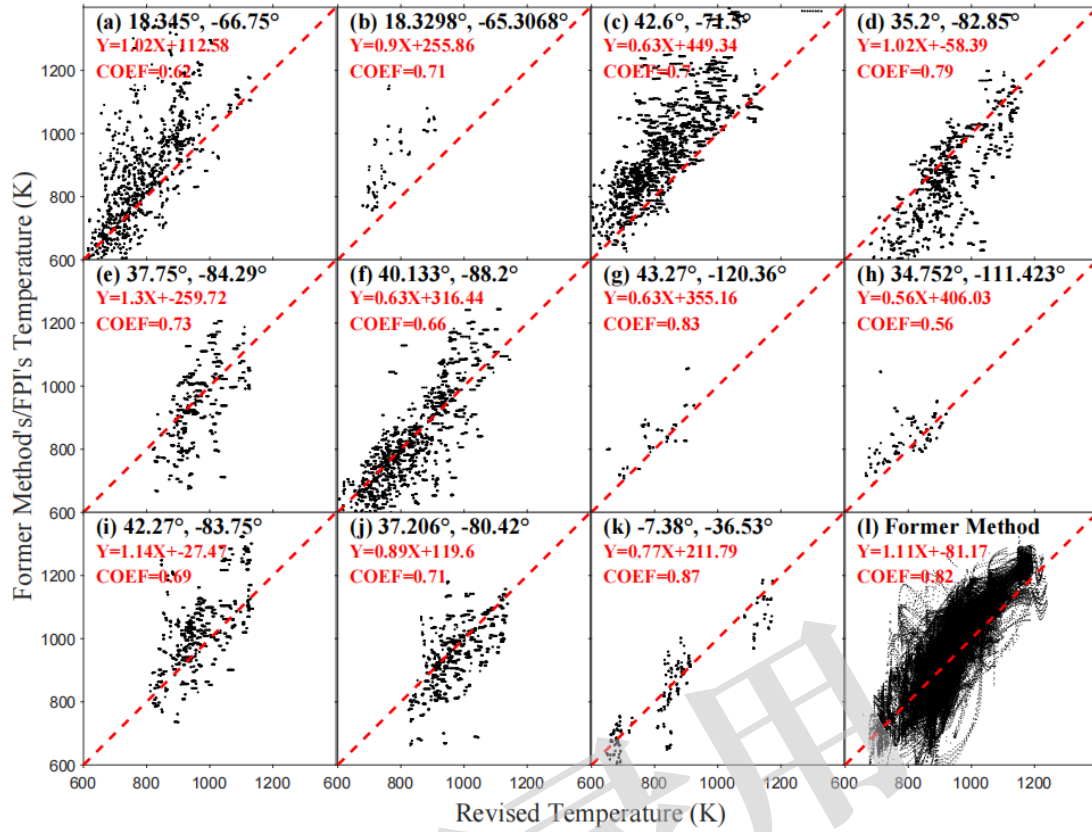


图3 反演温度与 FPI 台站的温度和基于双层中性密度反演的逃逸层温度对比的散点图

综合上述的评估情况，与 FPI 对比或与其他反演温度对比的结果均显示本文中的反演结果是可信的，数据质量足以支撑后续的夜间增强现象的统计。

2 太阳活动低年夜间增强现象的观测与讨论

在温度的夜间增强现象中，大气潮汐的作用不可忽略，因此在开始统计之前，本文通过 MSIS 简单模拟了不同潮汐分量控制下的 2018 年夏至不同扇区的逃逸层夜间温度变化，以说明实际本文统计的增强现象的确为夜间增强现象所表现出的增幅，而非常规大气背景温度随地方时的变化。图 4 的横坐标为地方时，纵坐标为纬度，五个子图分别为不同扇区的夜间温度变化，子图 (f) - (j) 为背景潮汐（日潮、半日潮和 8 小时潮）作用下的夜间温度变化，子图 (a) - (e) 则为除去半日潮作用下的夜间温度变化。子图 (a) - (e) 显示，当模拟中不加入半日潮时，逃逸层温度在子夜附近的增强现象消失，这在一定程度上说明增强现象受到部分潮汐的相互作用的影响。同时，两种模拟结果在形态和振幅上均与本文在图 5-图 8 中的统计结果显示的增强现象存在较大的差异，说明本文的统计结果并非常规大气背景温度变化，而是温度的夜间增强现象，同时也说明夜间增强现象统计工作具有重要意义。

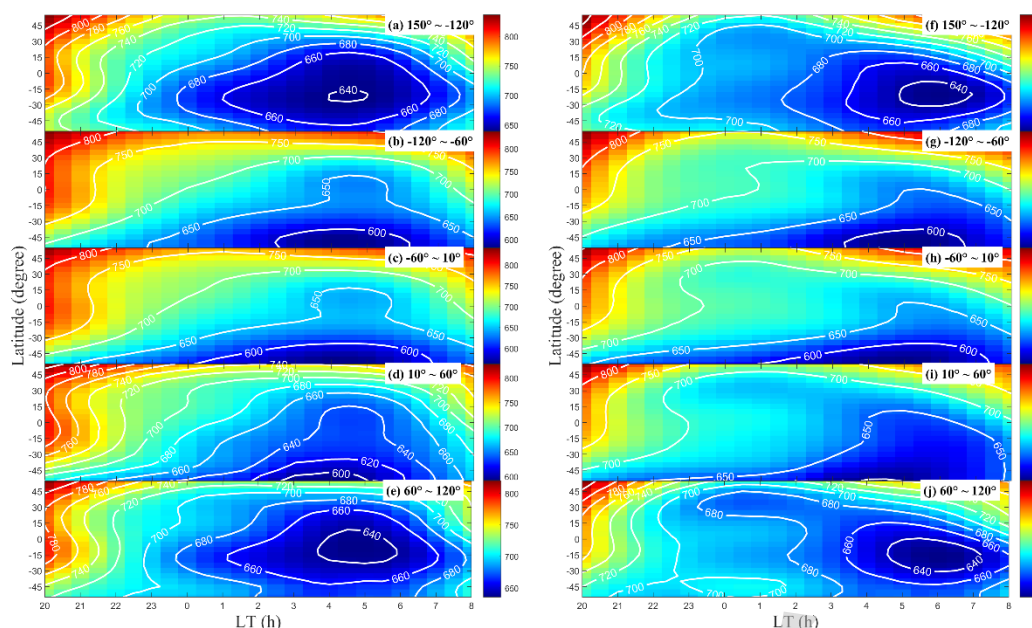


图4 MSIS 模拟的不同潮汐分量控制下的 2018 年夏至日在不同扇区的夜间增强现象

图5-图8为分别为四个季节的不同扇区的夜间增强现象。其中横坐标为LT，纵坐标为纬度。需要声明的是，由于本文的统计数据为六年（2016-2021年）的数据混合，其统计现象与FPI等设备直接观测的数据显示的现象不同，本文的结论为统计平均结果，仅指示相应地球物理条件下温度夜间增强现象的强弱。

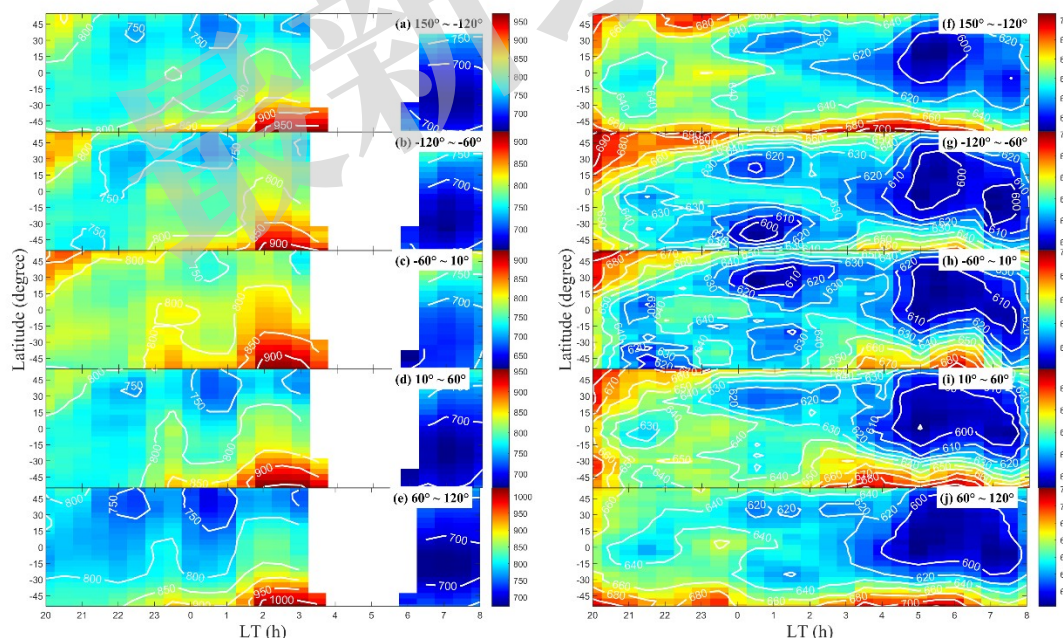


图5 F10.7 在 80-100 范围内（左）和 F10.7 小于 80（右）的春季夜间逃逸层温度随纬度和 LT 变化

图5左图显示F10.7在80-100范围内的春季，在LT23-0和LT2-3都出现了夜间增强现象。其中SAA扇区的夜间增强强度最大，平均比其他扇区大~20 K左右，美洲扇区次之。在不同的经度扇区，夜间增强的形态和强度不同。在太平洋扇区和美洲扇区，前半夜的赤道夜间增强与中高纬的增强相对独立，而其他扇区的赤道与中高纬的增强则在区域上相接。其次，欧洲扇区和亚洲扇区的前半夜夜间增强的LT持续时间小于其他扇区。在后半夜，夜

间增强的走向趋势显示，所有扇区的夜间增强可能为先在低纬和赤道地区出现，随后扩展至中高纬地区的同时强度突然增大，此时夜间增强的峰值 LT 更晚，约在 LT3 左右，但强度更大，最高比 LT2 的赤道夜间增强大了接近 200 K，该现象与 Colerico^[21]用南半球气辉台站观测到的夜间增强随纬度发展的现象较为一致。

而图 5 右图显示，春季 F10.7 小于 80 时，在太平洋扇区、美洲扇区和亚洲扇区，夜间增强形态为带状，并随着 LT 的变化逐渐向两个半球的中纬地区移动，振幅也逐渐下降，此时夜间增强现象的发展呈现出“V”型，与 Herrero^[5]通过 AE-E 卫星的温度数据观测到的夜间增强现象类似，并且美洲扇区的夜间增强强度在三个扇区中最小。在峰值 LT 上，所有扇区的增强均在 LT22 附近产生，在 LT2-3 附近欧洲扇区和 SAA 扇区的南半球还存在另一个幅度大于夜间增强的增强，可能为低纬和赤道地区夜间增强的延展。

整体上，春季的夜间增强都出现于温度极小值之前，且在太阳活动更高时夜间增强的强度更大。另一方面，夜间增强在不同太阳活动时期也表现出不同的经度依赖性，在太阳活动更高时，夜间增强的经度依赖性主要表现为强度上存在差异，但在形态上不同扇区的夜间增强现象较为一致；而在太阳活动更低时，夜间增强的经度依赖性则体现在形态上，这可能与不同太阳活动下大气背景温度的差异有关，太阳活动更高时大气背景温度更高，夜间增强的形态差异不明显。

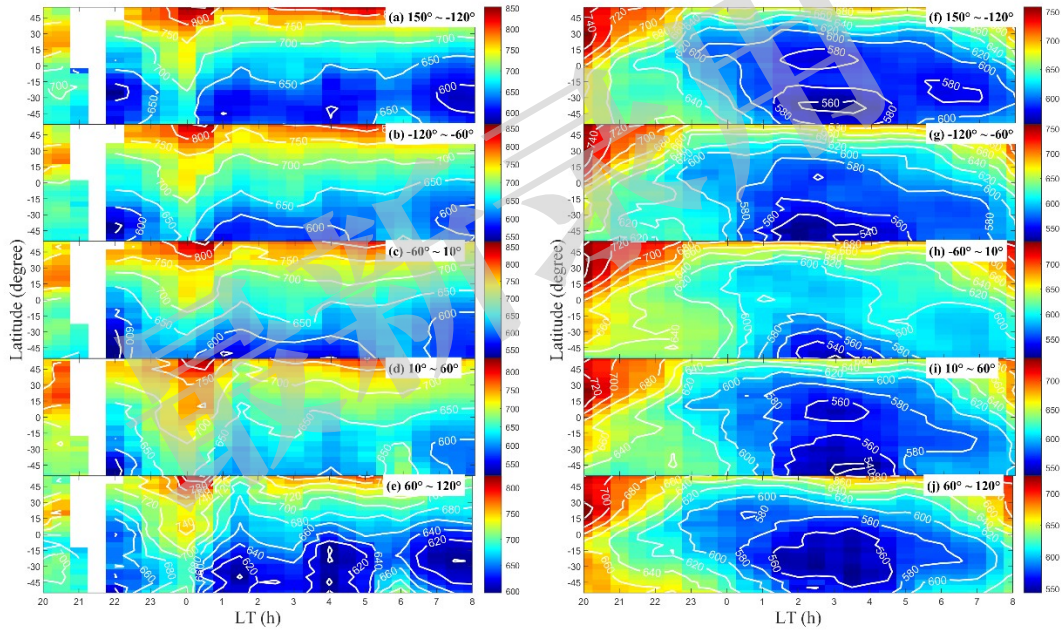


图 6 F10.7 在 80-100 范围内（左）和 F10.7 小于 80（右）的夏季夜间逃逸层温度随纬度和 LT 变化

图 6 左图为当 F10.7 处于 80-100 左右时夏季的夜间增强状况，所有经度扇区的夜间增强均发生在 LT23-1 附近，并且在位置上更偏向于北半球，Ruan^[14]通过 TIEGCM 模式的研究显示，8 小时潮和 12 小时潮调制夜间增强现象的生成，8 小时潮调制夜间增强现象的形态，因此出现增强偏向北半球的情况可能是由于此时为 8 小时潮主导，12 小时潮较弱。同时，在太平洋扇区、欧洲扇区和亚洲扇区，南半球 -30° ~ -45° 的 LT6 附近，也存在温度的增强现象，可能为日出前的温度升高导致。

图 6 右图显示，当 F10.7 在 80 以下时，夏季的夜间增强很弱，只有太平洋扇区和欧洲扇区在 LT2-4 出现较弱的夜间增强，平均强度为 20 K 左右。SAA 扇区在 LT4 之后存在从低纬延伸至南北半球的增强，太平洋扇区的夜间增强在 LT4-6 延伸至南半球中纬。

图6显示,夏季温度夜间增强的经度依赖性主要体现在强度上,且受太阳活动影响较大,太阳活动更高时,不同经度扇区的夜间增强现象形态一致,强度略有差异,而太阳活动更低时,只有部分扇区存在夜间增强现象。

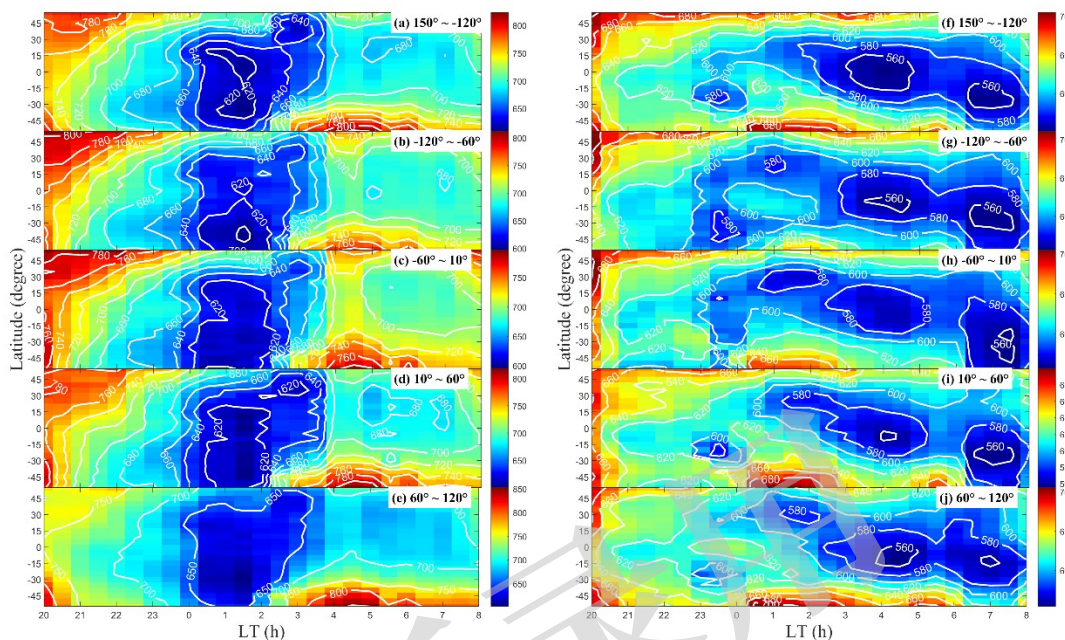


图7 F10.7在80~100范围内(左)和F10.7小于80(右)的秋季夜间逃逸层温度随纬度和LT变化

图7左图为F10.7处于80~100左右时秋季的夜间增强现象,此时所有扇区在LT23~0附近存在较弱的夜间增强,同时在LT4附近也存在夜间增强现象,该增强在SAA扇区强度最大,太平洋扇区和亚洲扇区较不明显。与春季相同的是,南北半球均出现了中纬的极大值,可能为低纬度的夜间增强延伸至中纬导致。

图7右图为F10.7小于80时秋季的夜间增强现象,此时的夜间增强非常明显。在太平洋扇区、欧洲扇区和亚洲扇区,夜间增强出现在LT23~1附近,并且随着LT的变化,夜间增强在延伸至南半球的同时强度也随之增大;在美洲扇区,夜间增强则表现为赤道地区LT峰值在LT0~2的带状,平均幅度为20 K左右,并随着LT变化逐渐偏向南半球;在SAA扇区, $-15^{\circ}\text{S} \sim -45^{\circ}\text{S}$ 存在峰值LT位于LT21~23的夜间增强,在LT0~2附近也存在偏向南半球的增强,并随着LT变化向两个半球的中纬延展。同时,在这几个扇区的LT5~6附近都存在平均幅度为20 K的温度增强。

图7显示,秋季的温度夜间增强现象的经度依赖性仍受到太阳活动的影响,在太阳活动更高时表现为强度上的差异,且前后半夜均有出现,在太阳活动更低时则表现为形态上的差异,且主要出现在前半夜。

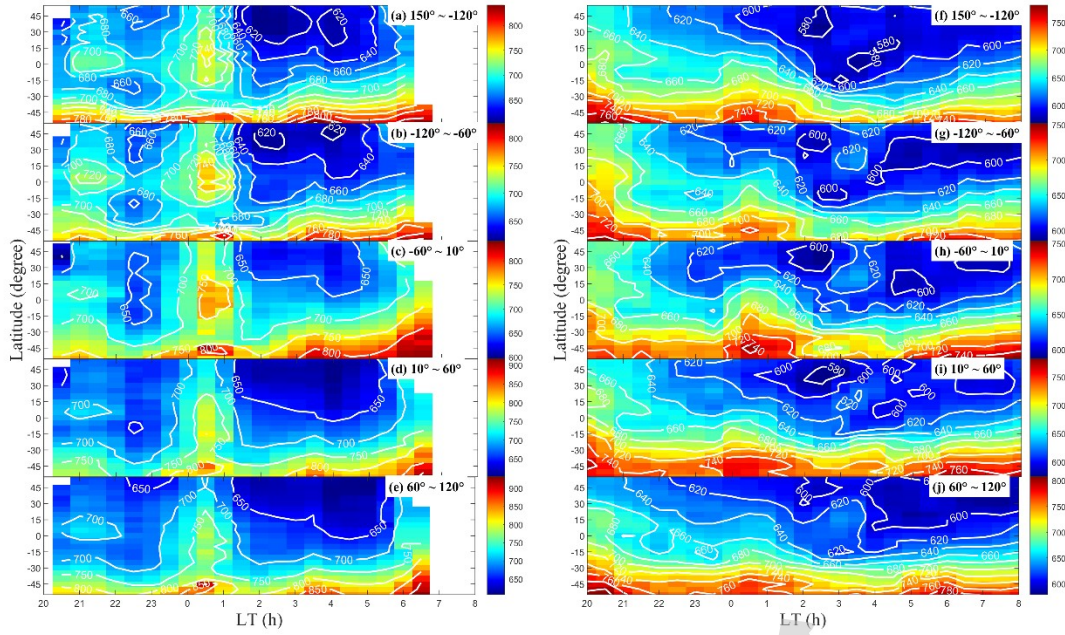


图8 F10.7 在 80-100 范围内 (左) 和 F10.7 小于 80 (右) 的冬季夜间逃逸层温度随纬度和 LT 变化

图8左图显示, 当F10.7为80-100时的冬季, 在LT21-22和LT0-1存在非常明显的夜间增强现象, 且在后半夜夜间增强的强度要明显大于前半夜。同时, 前半夜的夜间增强在太平洋扇区、美洲扇区和SAA扇区都明显存在传播至中纬的形态; 到了后半夜, 为先在赤道 $\pm 15^\circ$ 内产生, 而后沿着纬度逐渐减弱的形态, 其平均幅度约为50 K左右。

当F10.7小于80时, 前半夜太平洋扇区, 美洲扇区和SAA扇区都存在以LT0-1为中心的, 偏向南半球的夜间增强, 符合夏季半球的情况; 后半夜除了太平洋扇区以外, 其余扇区在LT3附近都有较弱的夜间增强, 平均幅度约为20 K左右。

图8显示, 整体上冬季夜间增强现象的经度依赖性仍受太阳活动的影响, 在太阳活动更高时经度依赖性表现为强度差异, 且在多个LT时刻出现峰值, 而太阳活动更低时则表现为形态差异。

3 结论

通过对 Swarm 中性密度和 MSIS 联合反演的 2016-2021 年中的平静时期太阳活动较低时的逃逸层温度的分析, 我们得到了以下的结论:

(1) 温度的夜间增强现象存在季节和经度依赖性, 并且二者受太阳活动影响较大。另一方面, 太阳活动更高时, 夜间增强强度更大, 在前后半夜同时出现了夜间增强现象。

(2) 温度夜间增强的季节依赖性主要体现在强度上, 在太阳活动更高 ($80 < F10.7 \leq 100$) 时, 在夏至夜间增强出现得更早, 大多为前半夜, 且强度更大, 同时, SAA扇区在南半球夏季时夜间增强的强度大于其他季节; 而在春秋分夜间增强出现得更晚, 强度更小; 在太阳活动更低 ($F10.7 \leq 80$) 时, 夜间增强的季节依赖性主要体现在形态和强度上, 在春秋分夜间增强形态更多样, 且强度大于夏至, 峰值出现的LT时刻也更早, 夏至的夜间增强现象形态则较为一致, 且较春秋分不明显。

(3) 温度夜间增强的经度依赖性在不同的太阳活动条件下表现不同, 在太阳活动较高 ($80 < F10.7 \leq 100$) 时, 经度依赖性主要体现在强度上, 不同经度扇区的夜间增强现象的形态大致相同, 但强度存在差异, 整体上夜间增强在SAA扇区较强; 在太阳活动更低

($F10.7 \leq 80$) 时, 夜间增强的经度依赖性主要体现在形态和强度上, 且受季节影响较大, 在春秋分夜间增强的经度依赖性体现在形态上, 不同经度扇区夜间增强向南北半球延展的形态存在很大差异, 但均主要表现为随 LT 的变化由赤道逐渐向中高纬延展的形态; 而夏至则体现在强度上, 太平洋扇区和 SAA 扇区的夜间增强较强, 其余扇区较弱甚至不出现夜间增强现象。

参考文献

- [1] HARPER R M. Observation of a large nighttime gravity wave at Arecibo[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, **77**(7): 1311-1315
- [2] SOBRAL J H A, CARLSON H C, FARLEY D T, *et al.* Nighttime dynamics of the *F* region near Arecibo as mapped by airglow features[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1978, **83**(A6): 2561-2566
- [3] SPENCER N W, CARIGNAN G R, MAYR H G, *et al.* The midnight temperature maximum in the earth's equatorial thermosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 1979, **6**(6): 444-446
- [4] BURNSIDE R G, HERRERO F A, MERIWETHER J W, *et al.* Optical observations of thermospheric dynamics at Arecibo[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1981, **86**(A7): 5532-5540
- [5] HERRERO F A, SPENCER N W. On the horizontal distribution of the equatorial thermospheric midnight temperature maximum and its seasonal variation[J]. *Geophysical Research Letters*, 1982, **9**(10): 1179-1182
- [6] COLERICO M J, MENDILLO M. The current state of investigations regarding the thermospheric midnight temperature maximum (MTM)[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, **64**(12/13/14): 1361-1369
- [7] OLIVER W L, MARTINIS C R, HICKEY D A, *et al.* A nighttime temperature maximum in the thermosphere above Saint Santin in winter[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A6): A06324
- [8] RUAN H B, LEI J H, DOU X K, *et al.* Enhancements of nighttime neutral and ion temperatures in the *F* region over Millstone Hill[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(4): 1768-1776
- [9] FAIVRE M, MERIWETHER J W, FESEN C G, *et al.* Climatology of the midnight temperature maximum phenomenon at Arequipa, Peru[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A6): A06302
- [10] FESEN C G. Simulations of the low-latitude midnight temperature maximum[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1996, **101**(A12): 26863-26874
- [11] BAMGBOYE D K, MCCLURE J P. Seasonal variation in the occurrence time of the equatorial midnight temperature bulge[J]. *Geophysical Research Letters*, 1982, **9**(4): 457-460
- [12] AKMAEV R A, WU F, FULLER-ROWELL T J, *et al.* Midnight temperature maximum (MTM) in whole atmosphere model (WAM) simulations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(7): L07108
- [13] AKMAEV R A, WU F, FULLER-ROWELL T J, *et al.* Midnight density and temperature maxima, and thermospheric dynamics in whole atmosphere model simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A8): A08326
- [14] RUAN H B, DU J, COOK M, *et al.* A numerical study of the effects of migrating tides on thermosphere midnight density maximum[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(8): 6766-6778
- [15] SIEMES C, DE TEIXEIRA DA ENCARNACÃO J, DOORNBOS E, *et al.* Swarm accelerometer data processing from raw accelerations to thermospheric neutral densities[J]. *Earth, Planets and Space*, 2016, **68**(1): 92
- [16] VAN DEN IJSSEL J, DOORNBOS E, IORFIDA E, *et al.* Thermosphere densities derived from Swarm GPS observations[J]. *Advances in Space Research*, 2020, **65**(7): 1758-1771
- [17] DOORNBOS E, VAN DEN IJSSEL J, LUHR H, *et al.* Neutral density and crosswind determination from arbitrarily oriented multi-axis accelerometers on satellites[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2010, **47**(4): 580-589
- [18] FORBES J M, BRUINSMA S L, ZHANG X L, *et al.* Surface-exosphere coupling due to thermal tides[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(15): L15812
- [19] PICONE J M, HEDIN A E, DROB D P, *et al.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A12): 1468
- [20] LIN Y Y, XU J Y, VAN DEN IJSSEL J, *et al.* A novel method to derive exospheric temperatures from swarm thermospheric densities during quiet times[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(21): 5382

[21] COLERICO M J, MENDILLO M, FESEN C G, *et al.* Comparative investigations of equatorial electrodynamics and low-to-mid latitude coupling of the thermosphere-ionosphere system[J]. *Annales Geophysicae*, 2006, **24**(2): 503-513

通讯作者简介:

徐寄遥, 男, 1959 年出生, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为中高层大气动力学的观测和模拟研究、大气遥感技术和数据反演、中高层大气被动光学观测设备研制及其对观测结果的分析研究等。

第一作者简介:

林莹璠, 女, 1995 年出生, 现为中国科学院国家空间科学中心博士研究生, 主要研究方向为大气温度的反演及大气温度与密度变化特征。

最新录用