

吴叩天, 徐小航, 姜俊南, 沈敖. 2024. 探索空间奥秘, 开启科研之旅——2022 年空间科学与技术专业实践教育后记. 地球与行星物理论评 (中英文), 55(1): 144-152. doi: [10.19975/j.dqyxx.2023-019](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2023-019).

Wu K T, Xu X H, Jiang J N, Shen A. 2024. A summary report on the Space Physics practical education in 2022. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(1): 144-152 (in Chinese). doi:[10.19975/j.dqyxx.2023-019](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2023-019).

探索空间奥秘, 开启科研之旅 ——2022 年空间科学与技术专业实践教育后记

吴叩天*, 徐小航, 姜俊南, 沈 敖

中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

摘要: 空间科学与技术专业实践教育对于本科生空间物理学习具有重要意义。近年来, 中国科学技术大学地球和空间科学学院空间科学与技术专业基于国家大型空间环境地基综合监测系统——子午工程的链条观测优势, 开展全方位、多角度的本科生暑期专业实践教育。在实践教育中, 老师们生动详实地为同学们讲解实习的各项内容, 带领同学们学习观测数据的处理与分析, 并且参观子午工程台站; 同学们使用多种观测设备, 学习了光学、无线电和磁场等不同探测技术, 了解了不同探测仪器的探测原理, 掌握了科研软件的使用方法, 并可视化分析空间天气事件期间近地空间环境的变化特征。最后, 同学们还进行了实践教育总结汇报。通过参加空间科学与技术专业实践教育, 同学们真正接触科研工作, 成功地克服了初次尝试科研时的“忐忑不安”, 不仅提升了自主学习、小组分工合作等实践能力和科学素养, 而且开阔了眼界, 为更深入地了解空间物理学打下基础。

关键词: 实践教育; 空间物理; 子午工程

doi: [10.19975/j.dqyxx.2023-019](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2023-019) 中图分类号: P35 文献标识码: B

A summary report on the Space Physics practical education in 2022

Wu Koutian*, Xu Xiaohang, Jiang Junnan, Shen Ao

School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: Hands-on education is of great importance for undergraduate students studying Space Physics. In recent years, the School of Earth and Space Sciences at the University of Science and Technology of China has conducted extensive undergraduate summer professional practical education based on the advantages of the Chinese Meridian Project's chain observation. Teachers guide students in learning about the processing and analysis of observation data, take them to the Chinese Meridian Project sites, and thoroughly explain to them the numerous facets of practical education. Students learn many detecting technologies, including optical, radio, and magnetic fields, as well as the concepts of various instruments used for detection, as well as how to use scientific data and research tools and visualize the change characteristics of the near-Earth space environment during space weather events through data analysis. Finally, the students conducted a summary report of their practical education. Through participating in space physics practical education, students truly engage in scientific research, successfully overcoming the "anxiety" of initial attempts at scientific research. This not only improves their practical abilities and scientific literacy such as independent learning and teamwork but also broadens their horizons and establishes a foundation for further understanding of Space Physics.

收稿日期: 2023-04-03; 录用日期: 2023-04-11

*通信作者: 吴叩天 (2003-), 主要从事空间物理学研究. E-mail: wukoutian@mail.ustc.edu.cn



Keywords: practical education; Space Physics; Chinese Meridian Project

0 引言

“那些日子, 我记忆犹新: 我们在漠河野外观测站经历了 9 天的实践教育。这里是中国的北极村, 北望俄罗斯, 南靠大陆。漠河不仅是空间天气的重要门户, 更是中国空间科学研究的理想场所。我们与中国科学院地质与地球物理研究所的研究生们一起, 监测和研究来自地球北极地区空间环境的扰动和传播, 收获颇丰”。一位曾参加 2019 年在漠河举办的空间科学与技术专业(后文简称“空间物理专

业”)实践教育的学姐告诉我们。而另一位曾参加 2021 年在北京举办的空间物理专业实践教育的学长则这样对我们说道: “北京, 这座承载着政治文化与科技前沿的城市, 让我们心潮澎湃。在这里, 我们参观了中国科学院地质与地球物理研究所, 感受到了大科学工程‘子午工程’的震撼; 参观了中国科学院空间科学中心, 了解了我们国家第一颗人造卫星的故事; 我们还参观了中国气象局, 气象局的工作人员们为我国的空间天气预报事业做出了重要贡献。在老师带领下, 我们在这 7 天的空间物理专业实践中收获了宝贵的经验和知识。”



图 1 漠河与北京实践教育剪影

Fig. 1 Snapshots from Space Physics education at Mohe and Beijing

在中国科学技术大学地球和空间科学学院空间物理专业, 暑期专业实践教育是一门重要的课程。我们在安徽蒙城地球物理国家野外观测研究站、黑龙江漠河地球物理国家野外观测研究站、北京空间环境国家野外观测研究站等教学实习基地, 以国家大型空间环境地基综合监测系统——子午工程为基础, 进行全方位、多角度的专业实践教育(如图 1 所示)。作为中国空间科学领域的国家重大科技基础设施, 子午工程一期于 2012 年建成运行, 实现了中国地基空间环境监测的跨越式发展, 其地理范围从漠河经过北京、武汉, 南至海南, 并延伸至南

极的中山站, 东起上海, 西至拉萨。该项目主要通过在中国东经 120° 和北纬 30° 建设两条地基观测链, 以链为主、链网结合, 系统运用无线电、地磁、光学和探空火箭等多种探测手段, 连续监测从大气层、电离层和磁层, 乃至十几个地球半径以外的行星际空间环境中的有关物理参数(刘立波和万卫星, 2014; 王赤等, 2009; Wang, 2010)。子午工程二期于 2019 年开始建设, 在一期 15 个观测台站基础上新增 16 个台站, 进一步拓展成为覆盖全国范围的空间环境监测网, 实现全链条监测从太阳表面到地球大气(Wang et al., 2020; 王赤等, 2021)。通过对

多种探测设备的实地学习，同学们了解了空间物理探测基本原理，开展探测数据处理与分析，认识空间天气事件的传播和演化过程。

由于疫情原因，2022年空间物理专业实践教育于7月14日至7月19日在本专业实验室举行。我们对于专业实践教育充满期待，因为它是真正接触实践的机会。我们希望通过本次实践教育，能够学到更多科研技能和经验，提高自己的专业素养和实践能力，同时也增强自己的能力和素质。然而，我们也对实践教育中可能遇到的挑战感到忐忑不安，例如如何解决技术困难和应对综合性的实践教育任务等。但我们相信，通过与老师和同学的交流合作，我们一定能够克服这些挑战，将所学的理论知识与实际应用相结合。

尽管实践教育时间不长，但实践教育内容非常丰富。老师们带领我们学习太阳活动观测数据的处理与分析，让我们更清晰地了解数据处理。通过形象生动的“量体裁衣”比喻，带领我们领略了空间指数和地磁指数分析的魅力；在地空楼16层的天台，我们亲手记录激光雷达观测数据；共同观测流星雨，学习分析流星雷达数据；参观KSPEX实验室，聆听各种等离子体仪器的介绍和使用，并处理实验室模拟电离层空洞的数据；老师们手把手教我们如何使用SAO-Explorer（Huang and Reinisch, 1996）进行电离层测高仪数据分析；学习GNSS数据的处理；老师们还带领我们了解“天问一号”火星磁强计的全貌，并示范进行磁场探测实验。通过老师们生动详实的讲解和自己实地收集与处理数据，我们仿佛置身于科学的海洋中，收获颇丰。

1 基于子午工程数据的空间天气事件分析

2022年2月4日，38颗星链卫星被地磁风暴摧毁，给金融、航空航天和公众带来了重大影响。由太阳风驱动的模型模拟表明，2月3—4日的地磁风暴在卫星附近造成了密度增加，引起的卫星轨道衰减是这次星链卫星坠毁事件的罪魁祸首（Dang et al., 2022）。因此，我们对太阳爆发现象充满了好奇，利用观测设备对该事件期间日地空间全链条响应进行分析，可以更加直观地观察和记录地磁暴的变化过程，进而深入了解其规律和特点。实践教育期间，我们针对2022年2月地磁暴事件，分析了太阳观测、地磁观测、电离层测高仪、

GNSS-TEC和流星雷达等数据，开展了太阳爆发影响地球近地空间环境的空间天气因果链分析。我们学习了地磁指数，还通过使用地磁观测数据，了解了通过观测数据得出地磁扰动程度的简捷方法。利用SAO-Explorer软件处理电离层测高仪探测数据，得到了包括hmF2、foF2和TEC等电离层参数数据。通过编程处理原始RINEX文件，计算伪距TEC和相位TEC，得到斜向TEC基本形态；去除野点和周跳现象，进行硬件偏差估算，最后获得电离层TEC变化（如图2所示）。使用漠河、北京、蒙城、武汉四个观测站的流星雷达观测数据，反演出了高层大气风场速度。基于上述多种观测信息，我们得以认识太阳爆发活动对地球不同圈层的影响过程。

1.1 太阳观测、地磁探测与空间科学指数

老师首先向我们介绍了有关太阳观测的知识，让我们更深入地了解了太阳的结构和相关的物理过程。我们对太阳的壮阔美丽深深着迷，认识太阳不仅有助于我们更好地预测太阳活动对地球的影响，还可以为解决核聚变问题提供有用信息。图3展示了太阳爆发事件时SDO卫星于2022年1月31日23:50观测的不同波段日面成像。

在学习地磁指数时，我们了解了如何利用台站观测数据获得地磁扰动强度信息，这些指数如同从沙石中淘出的黄金，在空间天气研究中起到重要作用。老师还向我们介绍了空间科学研究中使用的量化指数。例如通过观察极光、环电流和地磁扰动等现象来了解磁暴，因此科学家们设计了极光电急流指数（AU、AL、AE）、中纬地磁扰动指数（Ap、Kp）和环电流指数（Dst、SYM-H）等指数来描述地球空间环境变化和磁暴强度。此外，还可以通过地面台站测量的10.7 cm太阳辐射获得F10.7指数，描述影响近地空间环境的太阳短波辐射强度。在老师的指导下，我们掌握了这些指数的特点，并使用软件将磁暴事件中的多个指数绘制成图表。图4展示了2022年2月1—8日期间Kp、Ap、Dst和F10.7指数随时间的变化情况。从这些指数中我们可以清晰看到，2月3—4日期间连续发生了两次地磁暴事件。

我们了解到，地磁指数是通过不同纬度的地球磁场变化情况得到的。因此，我们利用子午工程布设在北京、乐东和漠河等台站的地磁探测数据，进一步绘制了地磁场水平（H）分量随时间的变化，

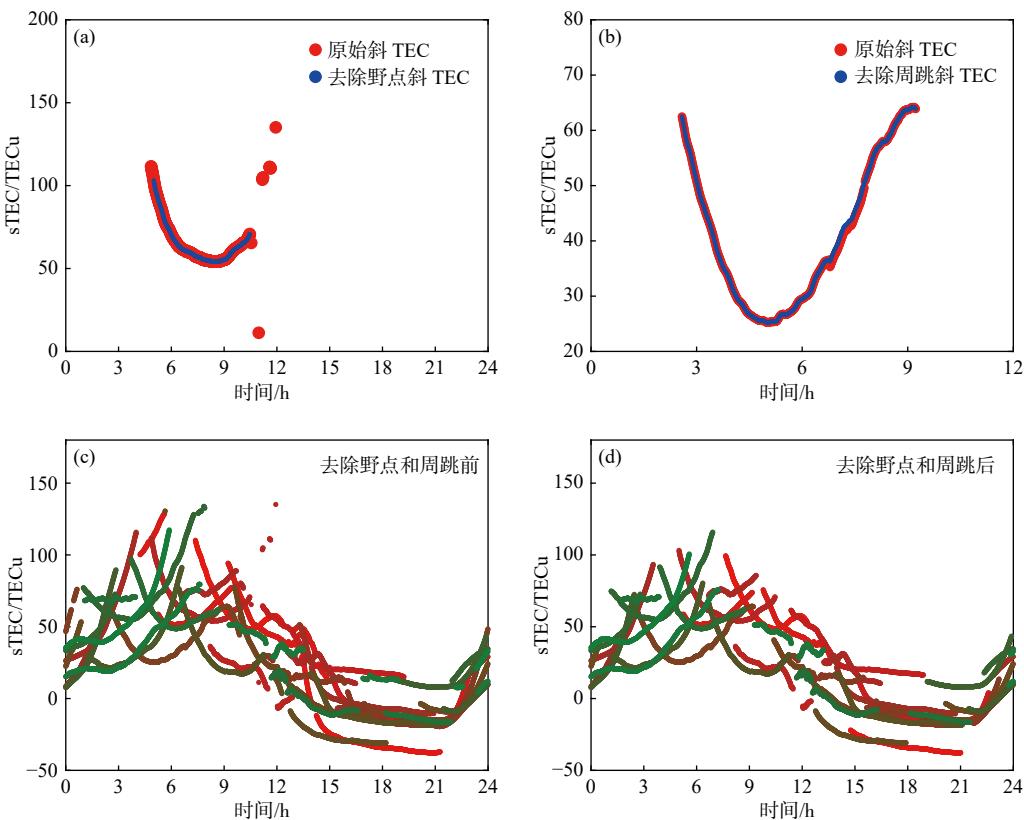


图 2 通过 GNSS 信号获取电离层斜向 TEC 的处理流程是: 基于原始 RINEX 文件计算伪距 TEC 和相位 TEC, 得到斜向 TEC 的基本形态, 再通过去除野点和周跳, 获得电离层斜向 TEC 变化. (a, b) 表示一个弧段去除野点和周跳前后斜向 TEC 结果; (c, d) 表示 PIMO 站 ($14.6^{\circ}\text{N}, 121.1^{\circ}\text{E}$) 在 2022 年 2 月 1 日观测的去除野点和周跳前后的斜向 TEC 变化

Fig. 2 The processing flow for obtaining slant TEC from GNSS signals is as follows: Based on the original RINEX file, the pseudo-range TEC and phase TEC is used to obtain slant TEC. (a, b) Show one arc before or after outliers and cycle slips are removed. (c, d) Show the changes in slant TEC observed by the PIMO station ($14.6^{\circ}\text{N}, 121.1^{\circ}\text{E}$) on the whole day, February 1, 2022 before and after eliminating outliers and cycle slips

如图 5 所示, 可以看到, 地磁场水平分量的变化与 Dst 和 Ap 等指数有很好的一致性. 通过对地磁观测数据的分析, 我们对空间科学中的指数有了更深的认识.

1.2 测高仪与 GNSS 观测电离层

老师为我们讲解了电离层测高仪的原理和使用方法, 以及相关电离层数据的处理. 图 6 展示了处理漠河站电离层测高仪数据得到的电离层变化信息. 通过利用电离层折射率与电磁波频率的关系, 电离层测高仪从地面发射无线电波, 通过接收信号的时间延迟获得电离层高度分布信息. 然后, 老师指导我们下载 SAO-Explorer 软件并使用该软件处理和展示电离层频高图数据. 通过对频高图标定, 得到了电离层参数和电子密度剖面数据. 其中 hmF2 为 F2 层峰值电子密度对应的高度, foF2 为电离层 F2 层的临界频率, TEC 为电离层总电子含量. 从漠河站的测量结果可以看出, 电离层 F2 层峰

值电子密度在白昼远大于夜间, 这是因为白昼的太阳辐射将中性气体电离, 电子密度增加, 而夜间电子与离子重新复合, 密度回落. 不过, 电子密度在夜间也同样有少量增加, 说明即使没有太阳辐射, 地球夜侧的电子密度依然存在并通过输运和化学过程发生变化.

实际上, 从电离层测高仪计算得到的 TEC 数据不能非常准确反映顶部的电离层信息. 因此, 需要通过全球卫星导航系统 (GNSS) 信号, 获得整体的电离层变化信息.

利用 GNSS 测量电离层的原理是利用电磁波在不同介质中传播速度存在差异, 但是处理过程却较为复杂. GNSS 探测利用全球卫星导航系统与地面基站间的电磁波通讯, 来得到电磁波沿路径传播的时间, 并通过电离层折射率公式计算相应路径的总电子含量, 最终得到电离层 TEC. 图 7 展示了我们通过北斗地球同步轨道卫星 (C03) 信号获得的电离层 TEC 随时间的变化. 听完老师讲解后, 我们对

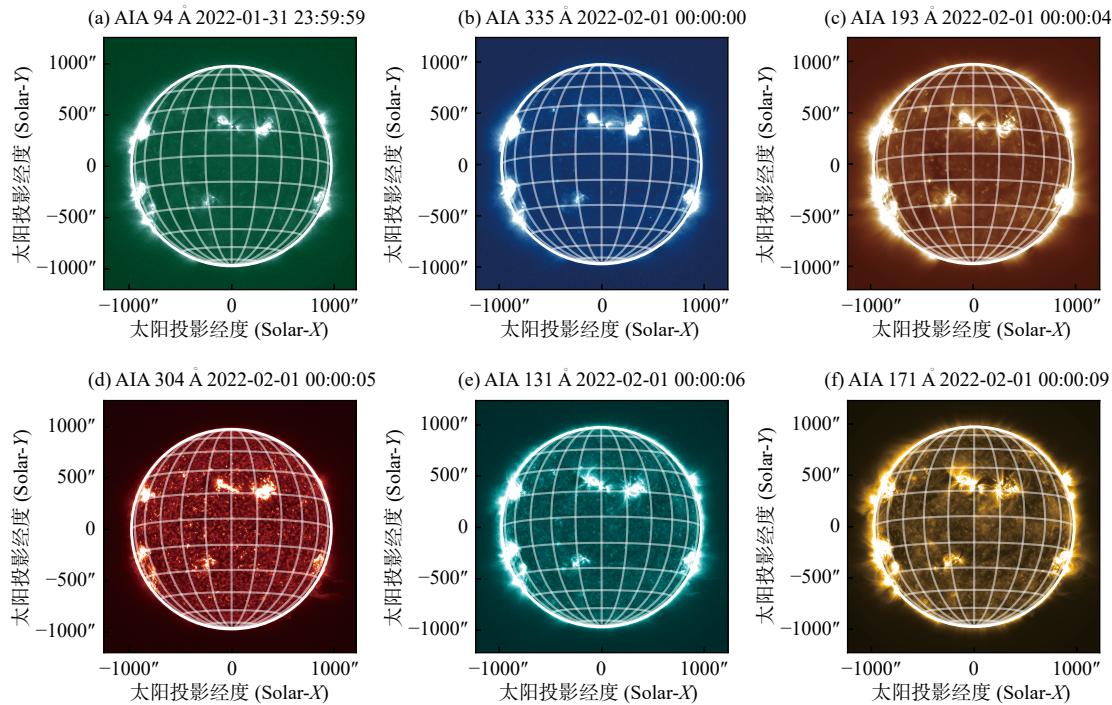


图 3 SDO 卫星于 2022 年 1 月 31 日 23:59:59 UT 至 2 月 1 日 00:00:09 UT 观测的不同波段日面图像. (a-f) 分别为 94 Å、335 Å、193 Å、304 Å、131 Å、171 Å 波段

Fig. 3 Images of solar disk at different bands observed by the SDO satellite from 23:59:59 UT on January 31 to 00:00:09 UT on February 1, 2022. Panels (a) to (f) show the images in the 94 Å, 335 Å, 193 Å, 304 Å, 131 Å and 171 Å wavelength bands, respectively

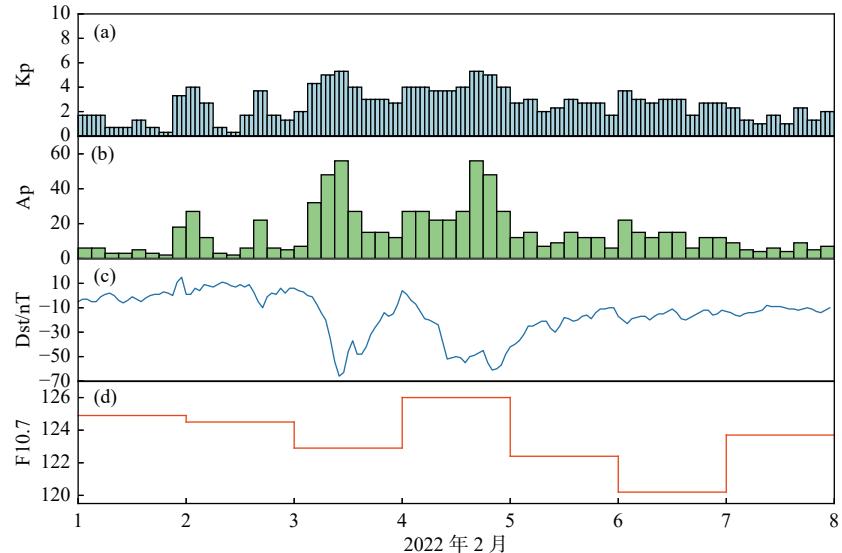


图 4 2022 年 2 月 1—8 日期间 K_p 、 A_p 、 Dst 和 $F10.7$ 指数随时间的变化

Fig. 4 Variations in K_p , A_p , Dst , and $F10.7$ indices during February 1-8, 2022

全球卫星导航系统有了更深入的认识，它不仅可以作为军用、民用定位卫星，还可以为科学研究所做出重要的贡献。我们认识到了为什么地球卫星轨道能作为重要的战略资源，以及我国北斗卫星计划的重要性。

1.3 流星雷达探测中性大气

作为对流星和流星雨非常感兴趣的空间物理

专业学生，听到将利用流星雷达进行研究时，我们感到非常欣喜和激动。这是一个难得的机会，让我们有机会深入研究这些神奇的天体现象，探索它们的形成和演化过程。我们通过测量大量流星体的径向速度、到达角和高度等信息，可以反演得到大气的纬向风场和经向风场。在老师讲解原理后，我们参照示例代码，进行数据处理和分析。我们使用漠河、北京、蒙城、武汉四个观测

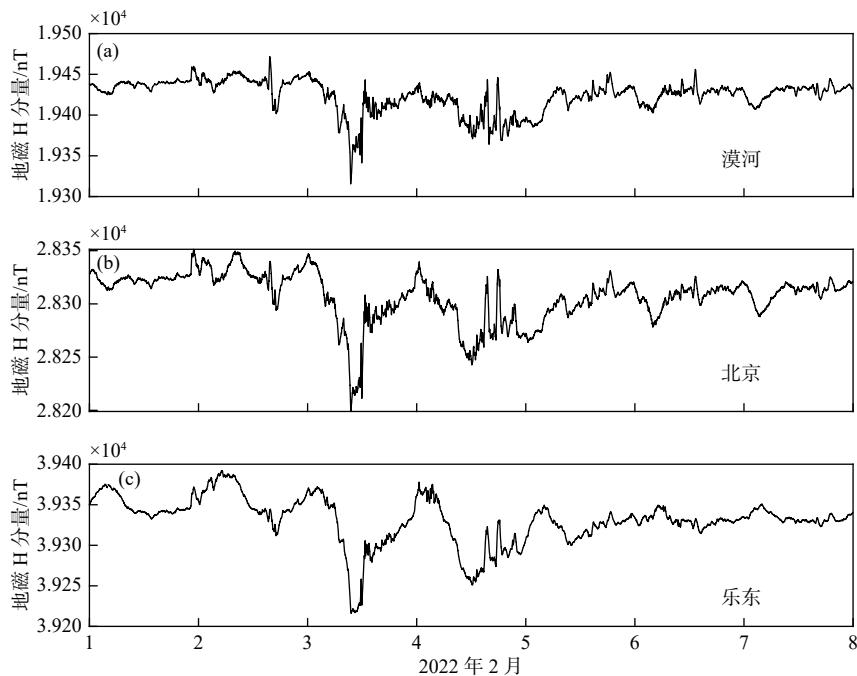


图 5 2022 年 2 月 1—8 日期间北京、乐东、漠河三站地磁场 H 分量随时间的变化

Fig. 5 Variation of H component of the geomagnetic field at Beijing, Ledong, and Mohe stations during February 1-8, 2022

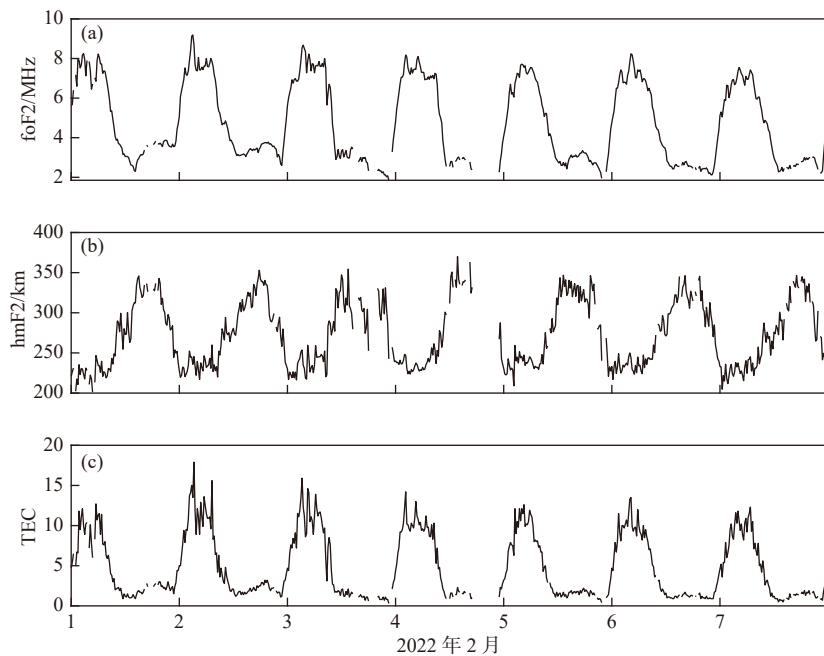


图 6 2022 年 2 月 1—8 日期间漠河站电离层测高仪观测的 foF2、hmF2 和 TEC 随时间的变化

Fig. 6 Variations of foF2, hmF2, and TEC observed by the ionosonde at Mohe Station with time during February 1-8, 2022

站的流星雷达观测数据作图, 结果如图 8 所示。可以看到, 无论是经向风还是纬向风, 均可以发现半日潮汐的特征。而流星雷达测量的风场位于中间层顶区域, 在 2022 年 2 月 3—4 日地磁暴事件期间未看到明显的磁暴引起的扰动。这可能是由于此次地磁暴不够强, 从而太阳爆发活动难以影响到中低层大气。

2 总结与思考

通过对多种观测信息的整合和分析, 我们初步认识了太阳爆发对地球近地空间环境的影响。在实践教育结束前, 我们对前面几天开展的空间天气因果链进行分析、总结汇报。为了呈现一个精彩的故事, 而不仅仅是简单地罗列数据, 我们进行了时间

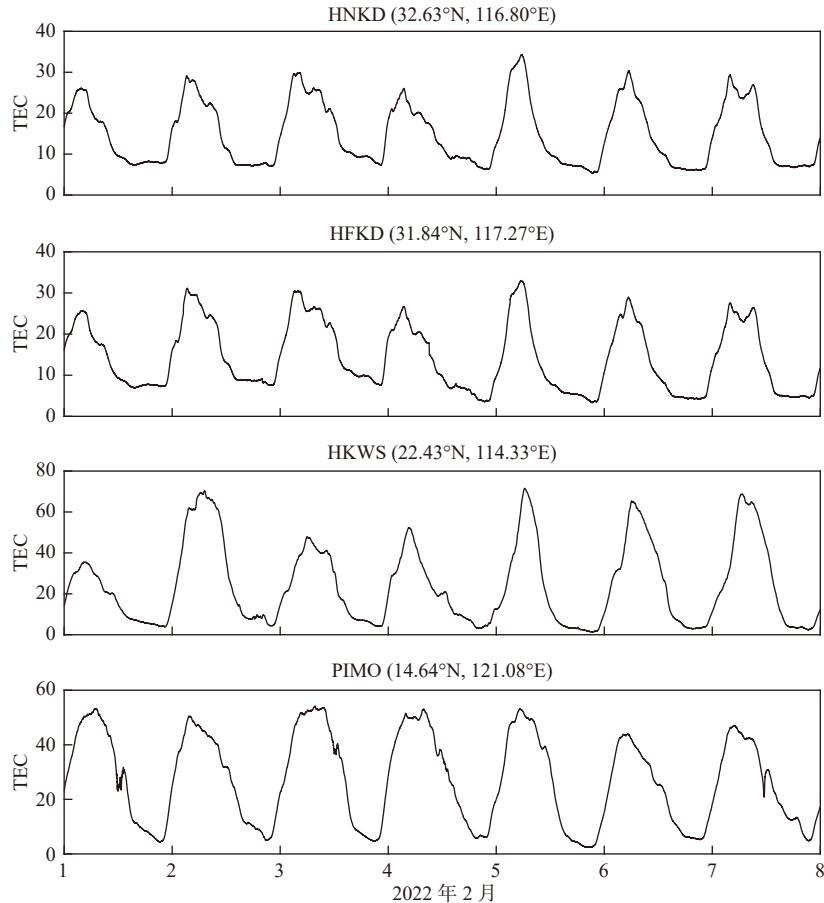


图 7 2022 年 2 月 1—8 日期间 4 个不同台站观测到的北斗地球同步轨道卫星 (C03) TEC 随时间的变化
Fig. 7 TEC variations of Beidou geostationary satellite (C03) observed by 4 different stations during February 1-8, 2022

和内容上的统筹规划。由于我们每个人都有自己擅长的领域，在小组中，分工明确可以让我们更高效地完成任务。同时，小组成员的互帮互助相比单干让我们能更加齐心协力地解决问题，也增强了大家的默契。小组内以及小组间的讨论和交流，让我们更加深入地思考这些事件的特征及其物理过程。在最后的整理中，我们努力将自己的抽象思维转化为具象的语言，让其他同学更容易理解。

最终，通过集中交流和汇总结果，我们完成了大部分汇报演示文稿，并在实验室尝试做了一次汇报。针对汇报中出现的问题，我们互相提出了很多有建设性的意见并加以修改。同在一个实验室的其他组同学也提供了很大的帮助，我们也积极向老师请教。针对汇报时长的限制，我们进行了时间内容上的安排与协调。在汇报评比中，各个小组展现出了丰富多样的才能和特长。最后的评比中，我们小组荣幸地获得了一等奖（如图 9 所示）。

本次实践教育让我们认识到，仅仅完成数据和图片的处理是不够的，必须梳理清楚其背后的物理

机制。通过不断地交流、分享、领悟，我们才能更好地完成实践教育任务，乃至于更好地进行日后的科研工作。

宋代诗人陆游曾写道：“纸上得来终觉浅，绝知此事要躬行”。仅仅从书本上获取知识是不够深刻的，必须通过实践来真正理解知识的精髓。在本次实践教育之前，我们作为大二和大三的学生，主要通过课本和老师的讲解来学习空间物理专业的理论知识。通过本次实践教育，我们初步接触到科研，了解到空间科学研究中观测数据的来之不易。

本次实践教育不仅锻炼了我们自主学习的能力，还提升了小组分工合作能力。通过参加实践教育，我们也学会了科学计算软件的基本使用，这对于以后进行科研工作很有帮助；成功地克服了初次尝试科研时的“忐忑不安”，通过亲手操作各种高科技设备和研究分析，感受到了空间科学的无限魅力，更加期待在未来进一步探索空间科学壮阔而隽美的蓝图。

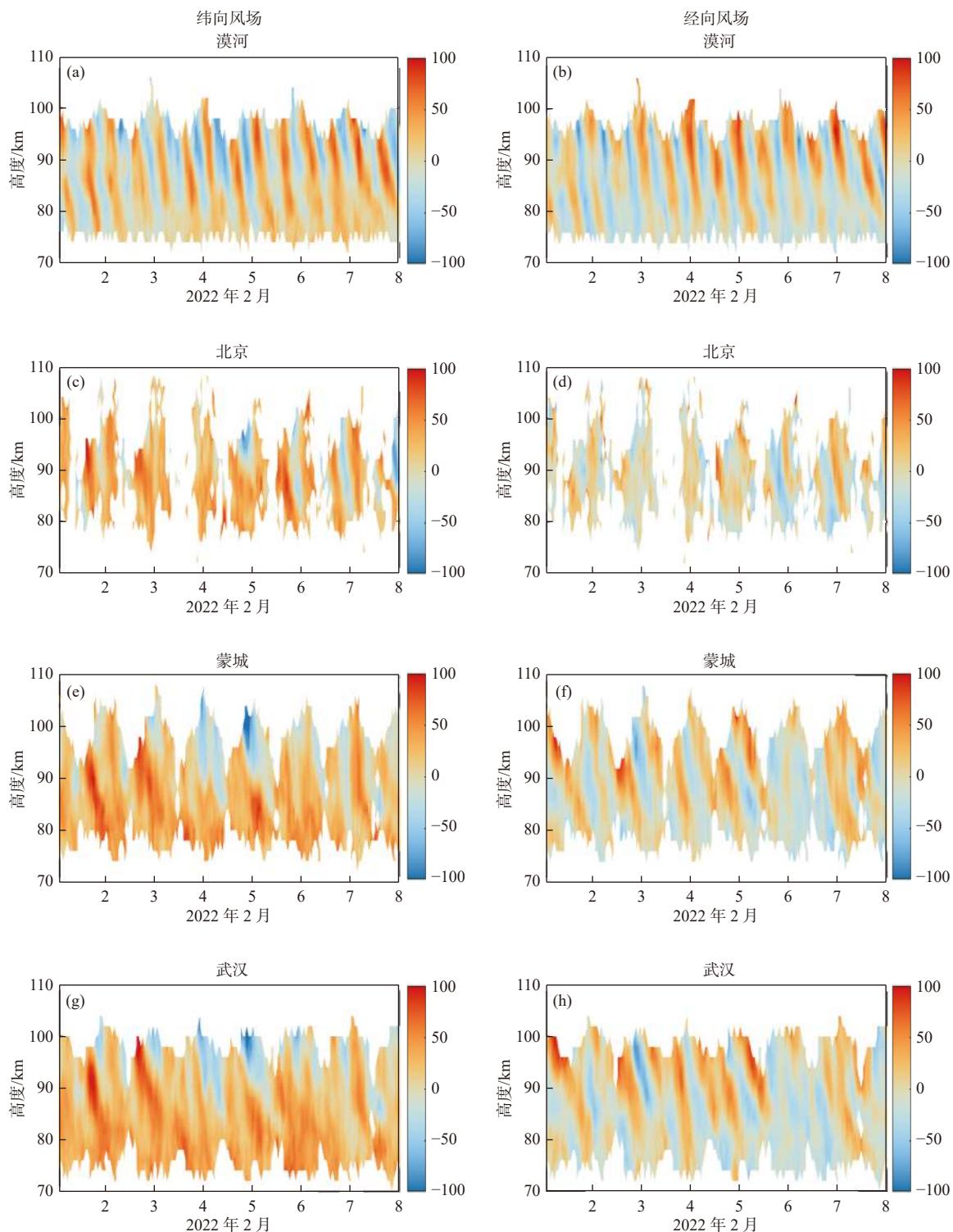


图 8 2022 年 2 月 1—8 日期间漠河、北京、蒙城、武汉站流星雷达观测的纬向风场和经向风场随时间和高度的变化

Fig. 8 Variation of zonal and meridional wind as a function of date and altitude observed by the meteor radars at Mohe, Beijing, Mengcheng, and Wuhan Stations during February 1–8, 2022



图 9 同学们分组汇报实践教育总结

Fig. 9 Each group to give a summary report of the practical education

数据与来源

本次实践教育中主要使用的子午工程数据来自子午工程数据中心：<https://data2.meridianproject.ac.cn/>.

致谢

感谢中国科学技术大学地球和空间科学学院雷久侯教授、任德馨博士、中国科学院地质与地球物理研究所刘立波研究员等老师在实践教育和论文撰写中提供的大量指导。感谢子午工程为本次实践教育提供观测数据。感谢安徽蒙城地球物理国家野外观测研究站、黑龙江漠河地球物理国家野外观测研究站、北京空间环境国家野外观测研究站等提供教学实习。

References

- Dang T, Li X, Luo B, et al. 2022. Unveiling the space weather during the Starlink satellites destruction event on 4 February 2022[J]. *Space Weather*, 20: e2022SW003152. DOI: [10.1029/2022SW003152](https://doi.org/10.1029/2022SW003152).
- Huang X, Reinisch B W. 1996. Vertical electron density profiles from the Digisonde network[J]. *Advances in Space Research*, 18(6): 121-129. DOI: [10.1016/0273-1177\(95\)00912-4](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00912-4).
- Liu L B, Wan W X. 2014. A brief overview on the issue on Space Physics and space weather[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(11): 3493-3501 (in Chinese). DOI: [10.6038/cig20141101](https://doi.org/10.6038/cig20141101).
- Wang C, Feng X S, Wan W X, et al. 2009. The Meridian chain of comprehensive ground-based space environment monitors in the Eastern Hemisphere[J] *Recent Developments in World Seismology*, 37(6): 32-38 (in Chinese).
- Wang C. 2010. New chains of space weather monitoring stations in China[J]. *Space Weather*, 8: S08001.
- Wang C, Chen Z Q, Xu J Y. 2020. Introduction to Chinese Meridian Project –Phase II[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 40(5): 718-722.
- Wang C, Chen Z Q, Hu L H, et al. 2021. Development and prospect of China's space-based and ground-based space environment monitoring platforms[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 38(3): 225-239 (in Chinese).

附中文参考文献

- 刘立波, 万卫星. 2014. 我国空间物理研究进展[J]. *地球物理学报*, 57(11): 3493-3501.
- 王赤, 冯学尚, 万卫星, 等. 2009. 东半球空间环境地基综合监测子午链简介 [J]. 国际地震动态, 37 (6): 32-38
- 王赤, 陈志青, 胡连欢, 等. 2021. 我国空间环境天/地基监测平台的发展态势和展望[J]. *航天器环境工程*, 38(3): 225-239.