0254-6124/2026/46(5)-1173-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

XU Jiyao, YUAN Wei, LI Qinzeng, SUN Longchang, WU Kun, LIU Weijun. Propagation of Waves in the Middle and Upper Atmosphere Excited by Intense Events at the Earth's Surface and in the Lower Atmosphere (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1173–1182. CSTR:32142.14.cjss.2025–0154. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0154

地表和低层大气剧烈事件激发的波动在中高层大气中的传播*

徐寄遥　袁　韦　李钦增
孙龙昌　吴　坤　刘伟军

(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室　北京　100190)

摘　要　地表与低层大气中的剧烈事件激发的波动以声波和重力波的形式向中高层大气和电离层传播, 并对中高层大气及电离层产生显著影响. 此类事件为研究地球各圈层耦合的物理机制提供了典型样本. 本文回顾了肖佐教授等关于地震、台风等剧烈事件对电离层影响的观测与研究成果, 重点介绍了所建立的覆盖中国上空的双层气辉观测台网, 以及依托该探测系统, 针对火山爆发、台风和雷暴等事件激发的重力波在中高层大气与电离层中的传播特性及其效应开展的相关研究. 研究结果表明, 尽管火山爆发产生的重力波难以直接长距离、大范围地在中高层大气中传播, 但通过海–气相互作用可以实现长距离大范围的传播. 背景大气结构对重力波传播具有重要影响, 其中大气波导可支持重力波发生反常的长距离、大范围的传播; 中小尺度重力波虽难以直接上传至热层, 但二次波机制可有效促进重力波从中层大气向高层大气传播; 针对台风事件开展的研究, 为探究低层大气剧烈事件对高层大气和电离层的影响提供了直接的观测证据.

关键词　气辉, 重力波, 火山爆发, 台风, 雷暴, 中高层大气, 电离层, 不规则体

中图分类号　P351.5, P356

Propagation of Waves in the Middle and Upper Atmosphere Excited by Intense Events at the Earth's Surface and in the Lower Atmosphere

XU Jiyao　YUAN Wei　LI Qinzeng
SUN Longchang　WU Kun　LIU Weijun

(*State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract　Severe events at the Earth's surface and in the lower atmosphere—such as volcanic erup-

* 国家自然科学基金项目 (42374205, 42374207) 和国家重大科技基础设施子午工程项目共同资助

2025-09-01 收到原稿, 2025-10-27 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

tions, earthquakes, typhoons, thunderstorms, and anthropogenic explosions—can excite various types of waves. These waves propagate into the middle/upper atmosphere and ionosphere in the form of acoustic and gravity waves, exerting significant impacts on these regions. Such events provide typical case studies for investigating the physical mechanisms of coupling between Earth's various spheres. This paper reviews the observational and research findings of Professor Xiao Zuo's team regarding the effects of severe events like earthquakes and typhoons on the ionosphere. The paper also highlights the establishment of a dual-layer airglow observation network over China and the utilization of this detection system to study the propagation characteristics and effects of gravity waves excited by events such as volcanic eruptions, typhoons, and thunderstorms in the middle/upper atmosphere and ionosphere. The research results reveal that although gravity waves generated by volcanic eruptions cannot propagate directly over long distances in the middle and upper atmosphere, they can achieve extensive and long-range transmission through ocean-atmosphere interactions. The background atmospheric structure plays a crucial role in gravity wave propagation, with atmospheric waveguides enabling anomalous long-distance propagation of gravity waves. Although small- to medium-scale gravity waves have difficulty directly propagating upward to the thermosphere, secondary wave mechanisms can effectively facilitate their propagation from the middle atmosphere to the upper atmosphere. Furthermore, studies on typhoon events provide direct observational evidence of how severe lower atmospheric events influence the upper atmosphere and ionosphere.

Key words Airglow, Gravity waves, Volcanic eruptions, Typhoons, Thunderstorms, Middle and upper atmosphere, Ionosphere, Irregularity

0 引言

大气中的各种波动是大气科学研究的关键研究对象, 对大气动力学、光化学、辐射传输以及电离层过程均具有重要影响. 在动力学层面, 波动是能量和动量输送、不同圈层间物质交换以及调控大气环流的关键机制. 同时, 波动引起的温度、压强和大气成分扰动还会显著影响光化学反应和辐射传输过程. 目前, 大气波动的精确参数化仍是全球大气模式研究面临的主要挑战之一. 当大气波动传播至电离层时, 会通过动力学和电动力学过程引起电离层电子密度的变化, 甚至激发诸如行进式电离层扰动 (TIDs) 和电离层等离子体泡等不规则结构的形成. 这些扰动可能导致全球导航卫星系统 (GNSS) 信号发生闪烁, 进而影响通信质量和定位精度. 因此, 大气波动不仅是实现跨圈层耦合的重要纽带, 也是空间天气和气候预测研究中不可忽视的关键因素.

火山爆发、地震、台风和雷暴等极端事件是大气波动的重要激发源, 对中高层大气和电离层具有显著影响. 这些强烈的自然活动通过释放巨大能量, 能够在短时间内激发包括声波与重力波在内的多种大气波动. 例如, 火山喷发产生的强烈热量释放和物质喷射形成强烈上升气柱, 进而激发大气中的声波和重力波; 而台风和雷暴中的强对流活动与闪电放电过程也能够激发多种波动, 从而调制中高层大气的动力学和热力学结构. 这些波动进一步向上传播至电离层高度时, 会通过中性成分与带电粒子之间的相互作用、电磁场扰动等机制, 引起电离层电子密度等参数的显著变化, 并可能引发诸如行进式电离层扰动 (TIDs) 和等离子体泡等异常现象. 因此, 此类极端事件可作为理想的自然实验案例, 对深入理解中高层大气与电离层的演变规律及其与低层大气之间的耦合过程具有重要意义.

北京大学肖佐教授[1] 领导的研究团队利用电离层高频多普勒探测、GNSS-TEC、次声波探测以及地磁探测等多项技术, 对地震、台风和火山爆发等剧烈事件对电离层的扰动开展了一系列高时间分辨率的观测和研究.

在电离层对台风剧烈事件响应机制研究方面, Xiao 等[2] 对 1988 年和 1990 年两次强台风期间的电离层多普勒观测数据以及台风资料进行了详细的分析, 揭示了近海强台风通过声重波机制影响电离层的

动态演化的完整过程. 观测表明, 在强台风过境期间, 电离层出现显著波动. 这类波动的时间演化具备两项明显特征: 幅度逐步增大、频率由高频向低频转变; 该特征表明波动与台风激发的重力波密切相关. 随后, Xiao 等[3] 利用 1987—1992 年间 24 个强台风事件的气象资料, 结合同期电离层高频多普勒频移连续观测数据, 针对台风事件对电离层的影响开展了统计研究, 首次系统揭示了台风激发电离层下部扰动的完整形态特征及其演化规律. 研究发现, 台风活动期间, 电离层普遍存在中等尺度行进式电离层扰动 (MSTIDs), 其扰动强度在台风中心接近或登陆大陆海岸线时达到峰值; 日落后时段, 出现的电离层大振幅扰动与中纬度扩展 F(Spread-F) 现象存在显著时空关联性, 从而证明这些扰动可能通过电离层等离子体不稳定性激发电离层不规则体. 这些物理过程被后来的 Song 等[4] 利用密集的 GNSS 台网的二维观测和研究所证实, 并给出了 MSTIDS 的传播方向和速度.

在地震引起的电离层扰动的研究方面, Xiao 等[5] 对 2011 年 3 月 11 日在日本东海岸发生的 9 级大地震激发的各种波动以及引起的电离层扰动开展了详细的研究, 研究发现, 地震激发的次声波上传可产生电离层扰动现象. 同时, 利用中国中东部地区约 470 台 GPS-TEC 观测台站数据, 首次揭示了地震波–电离层耦合扰动的大尺度远场区域二维空间结构特征[6]. 研究发现, 地震产生的瑞利波引起的总电子含量 (Total Electron Content, TEC) 的扰动在中纬度区域呈现明显的条带状分布[6]. 另外, 研究还发现, 在日本大地震发生后, 在距离震中 2000～4000 km 的东亚地区的地面, 地磁台网记录到了地震磁异常信号, 并将其定义为远震磁扰 (TMD), 据此提出了 TMD 是地震波激发的声重力波在电离层产生的地震行进式电离层扰动 (STID) 所引发的地磁场扰动[7]. 对 2008 年汶川和 2015 年加德满都大地震的观测和研究, 再次证明, 地震产生的各种波动能够引起电离层的强烈扰动[8,9]. 这些发现不仅为理解地震电磁耦合机制提供了新的观测证据, 更重要的是揭示了固体地球–大气–电离层多圈层耦合的新途径, 对完善地震电磁学理论体系具有重要科学意义.

2022 年 1 月 15 日发生的剧烈的汤加火山喷发事件, 为研究地表的剧烈事件对中高层大气和电离层影响提供了重要的研究案例. 全球相关学者通过全球导航卫星系统 (GNSS)、电离层测高仪、卫星和地面雷达等数据, 观测到电离层总电子含量 (TEC) 的扰动以火山为中心向外传播, 幅度达 1～5 TECU, 并且扰动以 300～350 m·s^{-1} 的速度传播, 火山爆发产生的兰姆波通过大气–电离层耦合机制 (例如中性粒子与电离层电子的碰撞) 将能量传递至电离层, 导致 TEC 的周期性振荡, 从而证明了兰姆波在火山喷发导致的全球中高层大气和电离层扰动中的重要作用[10–16].

相对于声波的传播, 重力波在传播过程中速度较慢且易耗散, 并且受到背景大气的强烈影响. 通常情况下, 地表和低层大气剧烈事件产生的重力波很难直接在中高层大气中大范围、长距离传播, 但可以在有限空间的近场产生显著影响. 此外, 高层大气因其分子扩散和黏性较强, 对重力波尤其是中小尺度的重力波产生高耗散, 抑制了重力波向上传播.

本文介绍所建立的覆盖中国上空的双层气辉台网, 以及利用该观测系统对剧烈事件 (火山爆发、台风、雷暴等) 所激发的重力波在中高层大气中的传播特性及其效应的系列研究进展, 主要聚焦剧烈事件产生的重力波能够影响的范围、如何有效传播到热层大气以及如何对电离层产生影响等科学问题.

1 覆盖中国上空的双层气辉台网

气辉是地球中高层大气中由光化学反应产生的微弱发光现象, 其表现为持久的非热辐射, 覆盖紫外至近红外波段, 是研究中高层大气物理化学过程的重要窗口. 全天空气辉成像仪通过捕捉气辉辐射的时空变化, 可以研究中高层大气的波动过程 (例如重力波、潮汐波、行星波等) 以及引起的光化学反应过程. 气辉的成像探测虽然受到天气因素和城市光污染的影响, 并且仅能在夜间进行, 但其具有时空分辨率高、时间连续性好以及长期监测能力强等优势. 因此, 气辉是研究中高层大气动力学 (例如波动传播)、成分变化和能量输运的天然显示屏.

由于受到大气透过率的限制, 根据气辉光化学辐射分布的特点, 气辉的地基探测仅仅能够在可见光到近红外波段开展, 主要的探测高度集中在两个区域. 一个是中层顶区域 (大约 80～100 km), 比较强的辐射主要包括氧原子、氧分子、OH 分子以及钠原子等

的辐射; 另一个是大约 200～300 km 的热层大气区域, 较强的辐射是氧原子的辐射.

近些年的观测和研究表明, 中高层大气的各种变化具有鲜明的地域特征, 受地形地貌、海陆分布等因素影响. 中国地形地貌复杂多样, 拥有世界海拔最高的高原, 分布高山、丘陵、平原等多种地形, 且海岸线漫长, 具备全球独一无二的地理环境特征. 这一环境造就了中国上空高层大气扰动易受剧烈天气事件、地形变化强迫、上下大气层耦合过程影响的特点, 使该区域成为研究大气波动的天然实验室.

基于气辉分布的特点和全天空气辉成像仪的探测优势, 本研究提出了气辉的双通道网络化联合探测新方案, 突破了单台站单波段气辉地基探测的有限视场范围和单一探测高度的瓶颈. 从 2010 年开始, 研究团队在国家大科学工程——子午工程、国家自然科学基金委员会、空间天气学国家重点实验室等大力支持下, 自主研发了全天空气辉成像仪和气辉光谱仪等观测设备, 根据一定的科学目标布局了近 20 个观测台站, 并且在一些关键区域建立了布局密集且包含多种气辉探测手段的综合观测台站, 实现对气辉辐射和大气扰动精细结构的准三维 CT 扫描探测. 为避免城市灯光对观测的光污染, 这些台站大多分布在远离城市的山区. 此外, 为了研究喜马拉雅山南麓和孟加拉湾附近的强对流过程, 研究团队还在境外的尼泊尔建立了气辉观测台站. 至此, 本研究建成了国际上首个双通道网络化气辉成像探测系统. 该探测台网覆盖中国大陆上空, 形成了在国际上独具特色的探测系统. 该系统可以对中层顶区和热层大气开展大面积双层二维探测. 图 1(a) 给出的是 OH 气辉台网, 探测的气辉峰值高度约为 87 km, 单台观测的有效范围为直径约 800 km 的圆形区域; 图 1(b) 给出的是红光 (OI 630 nm) 气辉台网, 探测的气辉峰值高度约为 250 km, 单台观测的有效范围为直径约 1800 km 的圆形区域. 部分内容可参考文献 [17].

2 对剧烈事件产生重力波的观测

地表和低层大气极端事件 (例如地震、火山、台风、雷暴等) 产生的大气波动在传播过程中将其动量和能量从波源区域传输到高层大气, 从而对高层大气动力学结构和化学成分以及电离层的分布产生重要影响. 此外, 大气波动通过动力学过程、光化学过程以及电动力学过程, 在上下层大气之间以及中性大气和电离层之间的耦合过程中扮演着重要角色, 并对中性大气和电离层产生显著影响.

然而, 受背景大气和重力波本身传播特性的影响, 在理论上,剧烈事件产生的中小尺度重力波直接传播的范围较为有限; 而分子黏性随高度升高呈指数

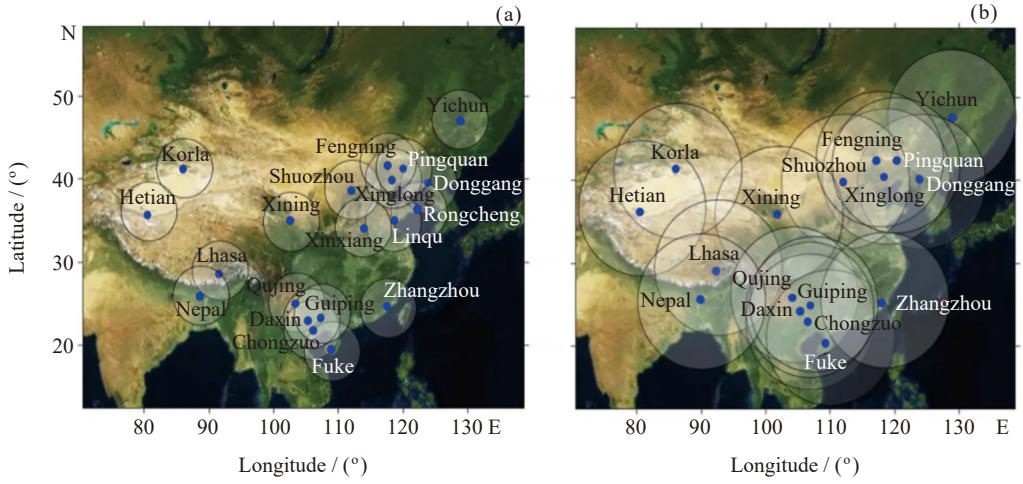


图 1 双层气辉台网布局. (a) 探测高度约为 87 km 的 OH 气辉台网, (b) 探测高度约为 250 km 的红光 (OI 630 nm) 气辉台网

Fig. 1 Layout of the double-layer airglow observation network. (a) OH airglow network with a detection altitude of approximately 87 km, (b)red-line (OI 630 nm) airglow network with a detection altitude of approximately 250 km

增长, 会造成重力波在热层大气中迅速耗散. 因此, 大气重力波如何从对流层传播至热层大气一直是中高层大气研究的核心难题之一. 学术界普遍关注剧烈事件产生的重力波传播相关问题, 包括重力波的传播与影响范围有多大, 重力波如何有效地传播至热层大气和电离层以及如何对电离层产生作用.

本研究将火山爆发、雷暴以及台风等地表和低层大气的剧烈事件作为样本, 对在中高层大气中产生的重力波的传播及其效应开展了系列研究.

2022 年 1 月 15 日 04:14:54 UT, 位于南太平洋的汤加王国境内 Hunga Ha'apai 火山岛附近的海底火山 (175.39°W, 20.55°S) 发生猛烈喷发 (火山喷发强度指数 VEI=6). 此次喷发将水气和火山灰推送至平流层, 并激发出强烈的声波与重力波. 本次汤加火山喷发事件, 为探索声波和重力波在岩石圈、水圈以及大气各圈层的耦合机制提供了天然观测范例.

基于 TIMED 卫星搭载的 SABER 探测器 2022 年 1 月观测的温度数据集, 研究了汤加火山喷发在其上空平流层、中间层与低热层产生的近场重力波活动[18]. 观测发现, 火山喷发激发的重力波温度振幅超过 30 K (是通常状况的 2 倍以上). 与其他的火山和低层大气剧烈事件进行对比研究发现, 汤加火山喷发引起的动量通量是 2021 年 8 月 31 日 Fukutoku-Okanoba 火山 (141.49°E, 24.28°N) 喷发 (VEI=4) 以及 2016 年 10 月超强飓风 Matthew 引起的动量通量的 3～10 倍. 研究表明, 该近场重力波属于强振幅、相对慢速的重力波, 明显不同于对地观测卫星和 GNSS-TEC 观测中发现的水平相速度约为 310 $m{\cdot}s^{-1}$ 的兰姆波 (Lamb Wave).

大气重力波由于受自身传播特性与背景大气的影响, 很难实现大范围、长距离的直接传播. 此次汤加火山喷发激发的重力波能够在多大范围内对中高层大气产生影响, 是一项十分重要的研究课题. 汤加火山喷发区域距离中国约 10000 km, 理论分析表明, 火山喷发激发的重力波难以实现如此大范围、远距离的直接传播.

利用双层气辉台网对这一问题进行观测研究[19]. 利用气辉台网观测到中层顶高度存在两类不同的大气波动. 一类是大气声波模式的兰姆波, 该类波动已被广泛报道[10–16]; 另一类是更晚到达的强烈的大气波动模式——重力波. 通过对火山喷发引发的海洋波动的模拟、重力波射线追踪理论以及波动参数的时空匹配分析, 发现气辉台网观测到中高层大气中的大气重力波的激发源是汤加火山喷发激发的海波. 汤加火山喷发激发了两种类型的海波: 一种是由大气压力波引发的快速传播的海波, 速度接近声速; 另一种是火山喷发本身直接导致的海面位移所引发的海波 (见图 2, 图中的时间是从火山喷发开始的计时时间). 这两种海洋波动会在中高层大气中产生两拨大气重力波 (见图 3, 图中的时间是从火山喷发开始的计时时间). 研究发现, 火山喷发可以通过海–气相互作用引起中高层大气重力波大范围、长距离的传播.

低层大气雷暴事件是另一种强烈的事件, 其激发的重力波如何在中高层大气中传播是一项非常重要的研究课题. 利用气辉台网对 2013 年 8 月 13 日中国北方地区一次强烈雷暴事件的观测发现, 雷暴产生的重力波在中层顶区域产生了上千公里的大范围反常传播[20], 利用搭载在 TIMED 卫星上的 SABER 温度探测和流星雷达风场探测数据, 分析发现, 中层顶区域的大气波导致重力波大范围、长距离的反常传播. 因此, 背景大气的结构对重力波的传播具有非常强烈的影响.

台风是另一类低层大气剧烈事件, 其可以激发大量强烈的重力波. 这些重力波是如何传播到热层大气, 并对电离层产生影响, 是一项重要的研究课题.

基于双层气辉网的观测, 结合再分析数据、重力波色散理论以及射线追踪方法, 对 2016 年 9 月 24 日至 10 月 7 日的第 18 号超强台风暹芭激发的重力波是如何从对流层传播至平流层、中间层, 直至热层的传播过程进行研究, 发现台风激发的重力波通过平流层和中间层进入中层顶区域, 同时发现台风激发的重力波在中层顶区域出现强烈的破碎现象, 通过射线追踪理论证明, OI 630 nm 的气辉台网观测到的 250 km 附近热层的重力波源自于中层顶区域, 而非来自于台风激发的重力波的直接传播. 这一发现证实, 中层顶区域重力波经过破碎、耗散和非线性相互作用激发的二次波, 导致其向高层大气接力式上传 (见图 4). 分析表明, 二次波是重力波传播的重要物理机制之一[21].

利用双层气辉台网针对台风激发的重力波对低纬电离层的影响进行观测研究, 2014 年为第 24 太阳活动周峰年, 中国低纬地区的电离层赤道等离子体泡

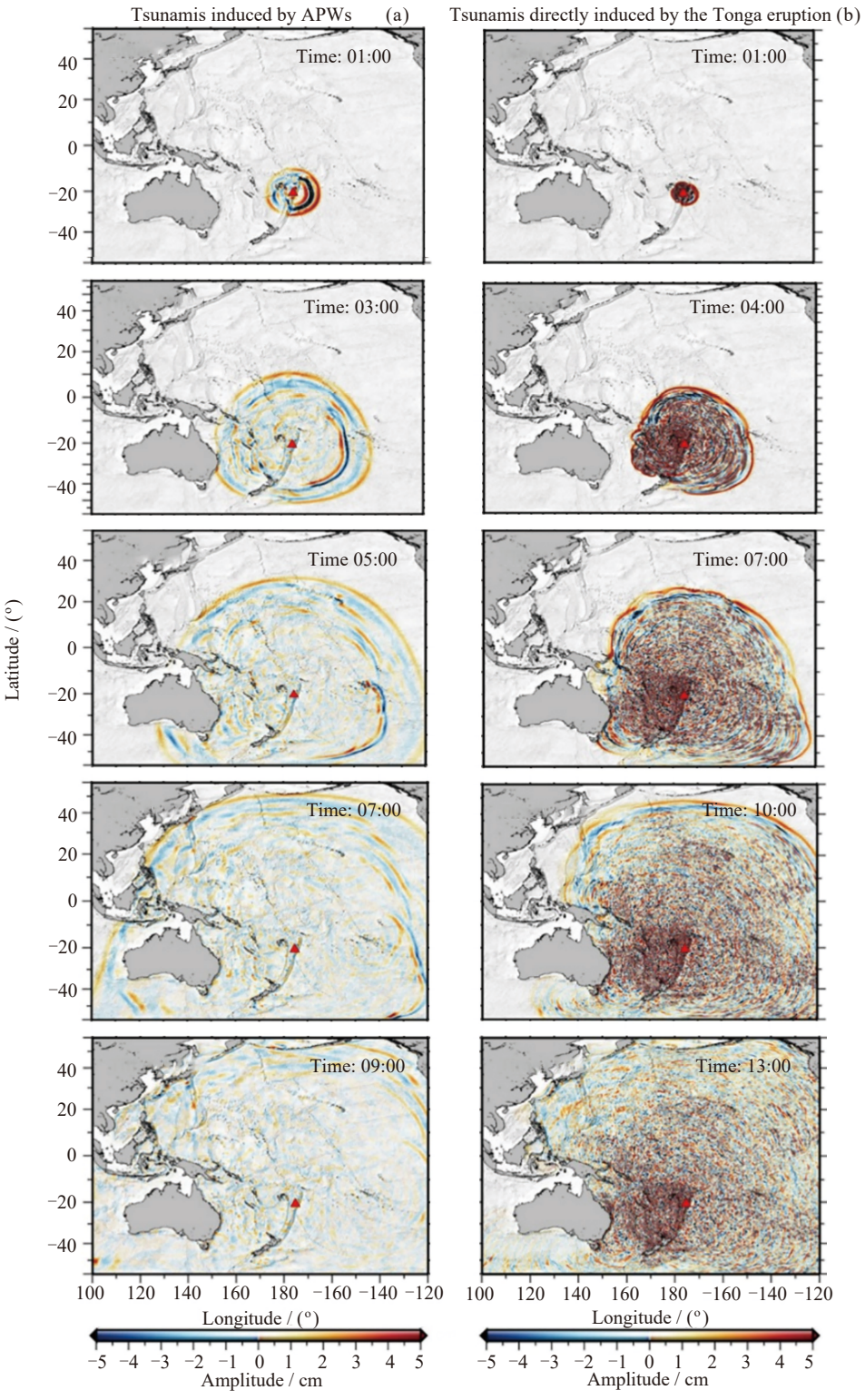


图 2 汤加火山引发的两种海波随时间演化的模拟结果[19]. (a) 大气压力波激发的海波, (b) 汤加火山喷发直接引发的海波

Fig. 2 Simulation results of two types of sea waves induced by the Hunga Tonga volcanic eruption[19]. (a) Sea waves excited by atmospheric pressure waves, (b) sea waves directly induced by the Hunga Tonga volcanic eruption

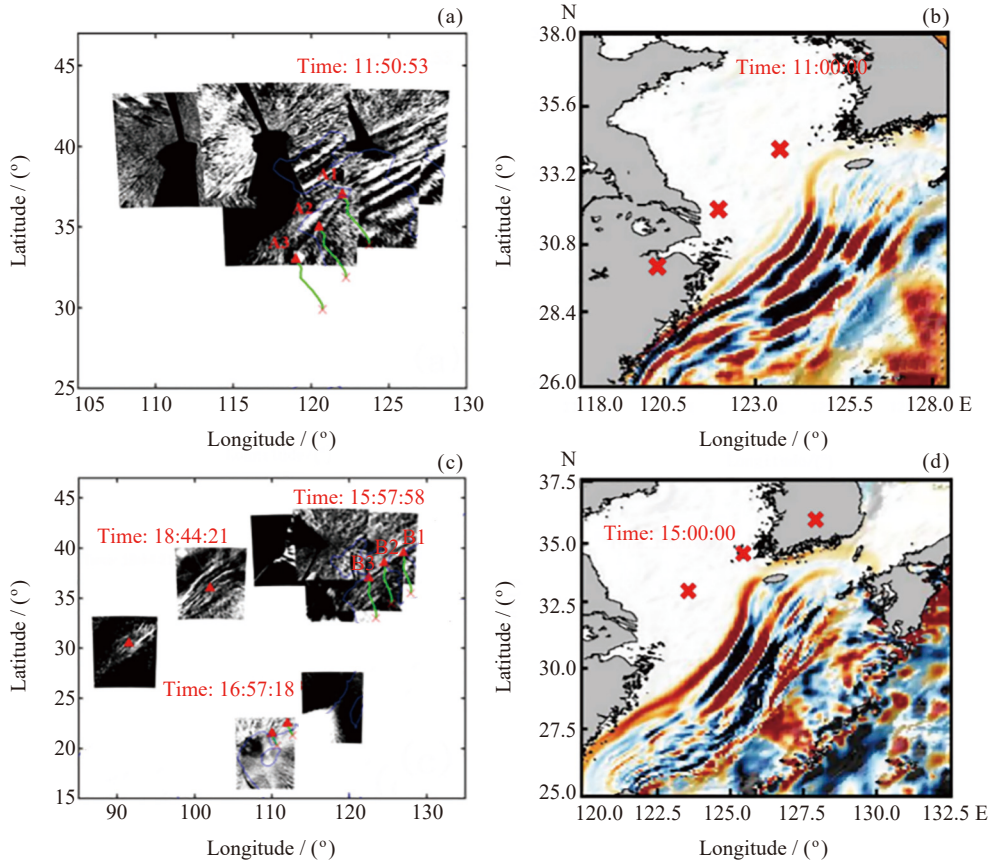


图 3 汤加火山喷发引发的两类海洋波动及其在中层顶区域激发的重力波[19]. (a) 气辉台网观测到的中层顶区域重力波及 (b) 大气压力波激发的海洋波动; (c) 气辉台网观测到的中层顶区域重力波及 (d) 汤加火山喷发直接引发的海洋波动

Fig. 3 Two types of ocean waves induced by the Hunga Tonga volcanic eruption and the associated gravity waves generated in the mesopause region [19]. (a) Gravity waves in the mesopause region observed by the airglow imager network and (b) ocean waves excited by atmospheric pressure waves; (c) gravity waves in the mesopause region observed by the airglow imager network and (d) ocean waves directly generated by the Hunga Tonga volcanic eruption

(EPB) 在春分和秋分季节正处于高发期[22]. 赤道等离子体泡 (EPB) 在瑞利–泰勒不稳定性和大气扰动的激发下产生, 并从赤道上空延伸至低纬地区的等离子体密度衰减区域. 通常情况下, 当赤道等离子体泡向低纬度延伸时呈现出分叉 (bifurcation) 的树状结构. 利用 2013 年 10 月第 23 号强台风菲特 (Typhoon Fitow) 作为研究案例, 研究了在强台风菲特期间电离层不规则体的演化特征. 基于双层气辉台网的观测数据, 首次观测到台风引起的特殊波状电离层等离子体泡 (Wave-like EPBs)[23](见图 5). 基于台风的卫星探测数据以及对流层和平流层再分析资料研究发现, 波状结构的等离子泡的波长和到达时间等参数与台风激发的重力波的特性基本一致, 从而给出了对流层强烈事件对电离层影响的观测证据.

3 结语

地表和低层大气剧烈事件 (例如人为爆炸、火山爆发、地震、台风、雷暴等) 对中高层大气和电离层具有不同程度的影响, 是研究多圈层耦合的理想案例. 肖佐教授等对于地震、台风等剧烈事件对电离层的影响进行了高时间分辨率的观测与研究, 系统揭示了剧烈事件激发的电离层下部扰动的完整形态特征及其演化规律.

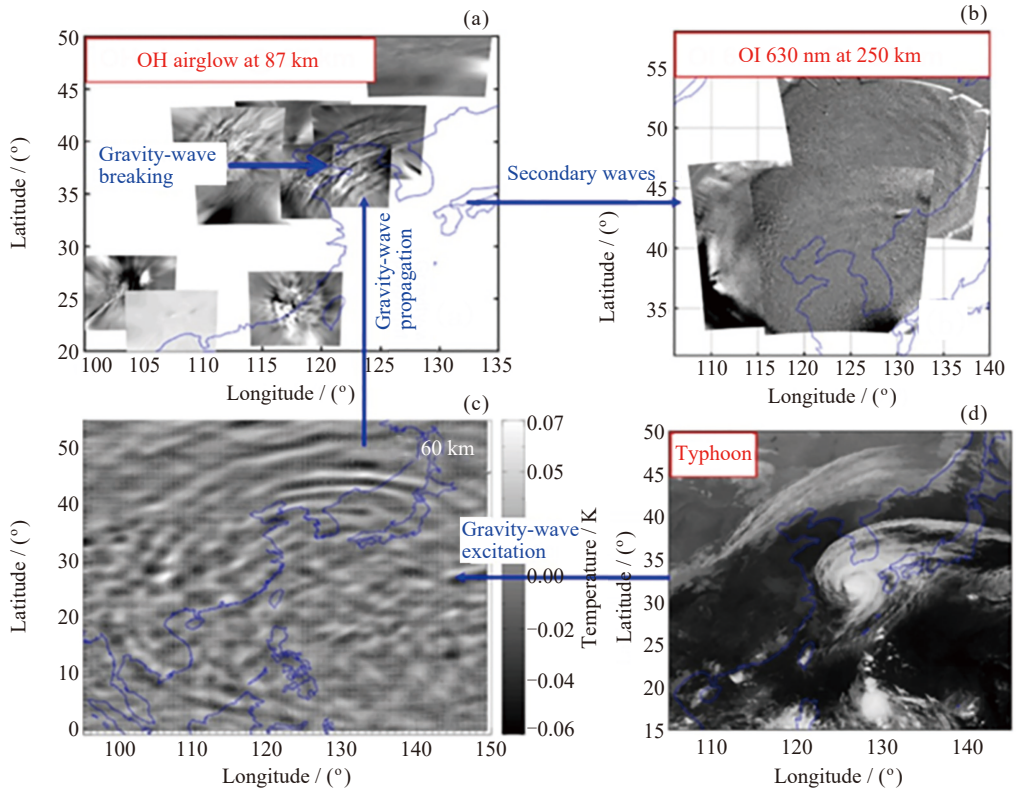


图 4 台风激发的重力波及其从对流层经平流层向中层顶和热层区域传播的观测结果[21]. (a) OH 气辉台网观测的中层顶区域重力波及其破碎, (b) OI 630.0 nm 气辉台网观测的热层次级重力波, (c) ERA5 再分析数据揭示的平流层重力波, (d) 卫星观测的台风云系

Fig. 4 Typhoon-generated gravity waves and their propagation from the troposphere through the stratosphere to the mesopause and thermosphere [21]. (a) Gravity waves and their breaking in the mesopause region observed by the OH airglow imager network, (b) secondary gravity waves in the thermosphere observed by the OI 630.0 nm airglow imager network, (c) stratospheric gravity waves revealed by ERA5 reanalysis data, and (d) the typhoon cloud system observed by satellite

近些年来, 研究团队基于覆盖中国上空的双层气辉台网的观测数据, 对此类事件产生的剧烈扰动对中高层大气和电离层的影响进行了系列研究. 主要结论如下.

(1) 对汤加火山爆发的研究表明, 海–气相互作用可能造成重力波大范围、长距离传播.

(2) 对雷暴事件的分析研究表明, 背景大气波导可能造成重力波大范围的反常传播.

(3) 二次波是重力波从中低层大气向热层大气进行传播非常有效的传播机制.

(4) 低层大气剧烈事件产生的重力波, 可通过调制电离层不稳定性, 可能诱发特殊形态的电离层不规则体.

这些发现加深了人类对地表和低层大气剧烈事件产生的重力波的传播特性以及各大气圈层相互耦合的认识, 完善了低层扰动向上向中高层大气、电离层传导的物理认知, 可为空间天气扰动分析提供参考.

医学伦理 研究不涉及人体或动物实验.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] XIAO Zuo, LIU Kaijun, ZHANG Donghe. Some typical records of ionospheric Doppler shift and their significance in the study of ionospheric morphology[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2002, **22**(4): 321-329 (肖佐, 刘凯军, 张东和. 典型电离层多普勒记录及其讨论 [J]. 空间科学学报, 2002, **22**(4): 321-329)

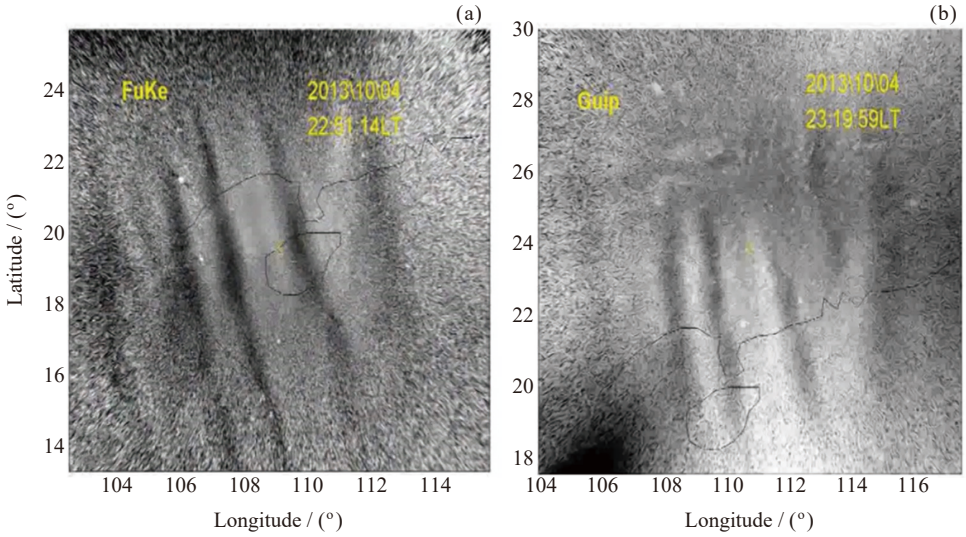


图 5 2013 年 10 月第 23 号强台风菲特在 10 月 4 日产生的特殊波状等离子体泡.
(a) 海南台站观测结果, (b) 广西台站观测结果[23]

Fig. 5 Special wavelike equatorial plasma bubbles generated by Typhoon Fitow (No.23) on 4 October 2013.
(a) Observation results from Hainan station, (b) observation results from Guangxi station [23]

[2] XIAO Saiguan, HAO Yongqiang, ZHANG Donghe, *et al*. A case study on whole response processes of the ionosphere to typhoons[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, **49**(3): 623-628 (肖赛冠, 郝永强, 张东和, 等. 电离层对台风响应的全过程的特例研究 [J]. 地球物理学报, 2006, **49**(3): 623-628)

[3] XIAO Z, XIAO S G, HAO Y Q, *et al*. Morphological features of ionospheric response to typhoon[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A4): A04304

[4] SONG Q, DING F, ZHANG X X, *et al*. GPS detection of the ionospheric disturbances over China due to impacts of Typhoons Rammasum and Matmo[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(1): 1055-1063

[5] HAO Y Q, XIAO Z, ZHANG D H. Multi-instrument observation on co-seismic ionospheric effects after great Tohoku earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A2): A02305

[6] HAO Yongqiang, LI Quanhan, GUO Jianguang, *et al*. Imaging of the large-scale ionospheric disturbances induced by seismic waves using GPS network in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, **64**(11): 3925-3932 (郝永强, 李泉翰, 郭建广, 等. 利用中国 GPS 站网对地震波引发的大尺度电离层扰动的观测 [J]. 地球物理学报, 2021, **64**(11): 3925-3932)

[7] HAO Y Q, XIAO Z, ZHANG D H. Teleseismic Magnetic Effects (TMDs) of 2011 Tohoku earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(6): 3914-3923

[8] ZHAO B Q, HAO Y Q. Ionospheric and geomagnetic disturbances caused by the 2008 Wenchuan earthquake: a revisit[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(7): 5758-5777

[9] LIU H T, DING F, ZHAO B Q, *et al*. Ionospheric response following the M_W 7.8 Gorkha earthquake on 25 April 2015[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(6): 6495-6507

[10] ZHANG S R, VIERINEN J, AA E, *et al*. 2022 Tonga volcanic eruption induced global propagation of ionospheric disturbances *via* Lamb waves[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2022, **9**: 871275

[11] WRIGHT C J, HINDLEY N P, ALEXANDER M J, *et al*. Surface-to-space atmospheric waves from Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption[J]. *Nature*, 2022, **609**(7928): 741-746

[12] THEMENS D R, WATSON C, ŽAGAR N, *et al*. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(7): e2022GL098158

[13] MATOZA R S, FEE D, ASSINK J D, *et al*. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga[J]. *Science*, 2022, **377**(6601): 95-100

[14] WRIGHT C J, HINDLEY N P, ALEXANDER M J, *et al*. Surface-to-space atmospheric waves from Hunga Tonga–Hunga Ha'apai eruption [J]. *Nature*, 2022, **609**(741). https://doi.org/10.1038/s41586-022-05012-5

[15] LIU H L, WANG W, HUBA J D, *et al*. Atmospheric and ionospheric responses to Hunga-Tonga volcano eruption simulated by WACCM-X[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(10): e2023GL103682

[16] AA E, ZHANG S R, WANG W B, *et al*. Pronounced suppression and X-pattern merging of equatorial ionization an-

omalies after the 2022 Tonga volcano eruption[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(6): e2022JA030527

[17] XU J Y, LI Q Z, SUN L C, *et al*. The ground-based airglow imager network in China[M]//WANG W B, ZHANG Y L, PAXTON L J. Upper Atmosphere Dynamics and Energetics. American Geophysical Union, 2021: 365-394. DOI: 10.1002/9781119815631.ch19

[18] LIU X, XU J Y, YUE J, *et al*. Strong gravity waves associated with Tonga volcano eruption revealed by SABER observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(10): e2022GL098339

[19] LI Q Z, XU J Y, GUSMAN A R, *et al*. Upper-atmosphere responses to the 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha'apai volcanic eruption via acoustic gravity waves and air–sea interaction[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024, **24**(14): 8343-8361

[20] XU J Y, LI Q Z, YUE J, *et al*. Concentric gravity waves over northern China observed by an airglow imager network and satellites[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(21): 11058-11078

[21] LI Q Z, XU J Y, LIU H L, *et al*. How do gravity waves triggered by a typhoon propagate from the troposphere to the upper atmosphere[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, **22**(18): 12077-12091

[22] SUN L C, XU J Y, WANG W B, *et al*. A statistical analysis of equatorial plasma bubble structures based on an all-sky airglow imager network in China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(11): 11495-11517

[23] WU K, XU J Y, WANG W B, *et al*. Interesting equatorial plasma bubbles observed by all-sky imagers in the equatorial region of China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(10): 10596-10611

作者简介



徐寄遥 男, 1959 年 1 月出生, 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、光化学, 以及辐射过程的探测方法、数值模拟、数据反演和分析方面的研究.
E-mail: jyxu@spaceweather.ac.cn