中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 9 期: 1863 ~ 1883
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

评 述

中国高层大气与电离层耦合研究进展

万卫星[①*], 徐寄遥[②]

① 中国科学院地质与地球物理研究所地球与行星物理重点实验室, 北京 100029;
② 中国科学院空间科学与应用研究中心空间天气学国家重点实验室, 北京 100190
* E-mail: wanw@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2014-03-14; 接受日期: 2014-05-26; 网络版发表日期: 2014-07-22
中国科学院重点部署项目(批准号: KZZD-EW-01-2)、国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2011CB811405)和国家自然科学基金项目(批准号: 41131066, 41321003)资助

摘要 近年来, 地球高层大气与电离层之间的耦合研究为众多学者所关注. 在回顾这一领域国际上若干研究方向进展的基础上, 着重介绍了中国学者的近期研究工作与贡献. 首先, 扼要介绍了中国高层大气观测的新发展, 包括激光雷达、FP 干涉仪、全天空气辉成像仪等光学探测, MST 雷达、全天空流星雷达等无线电探测手段. 在高层大气变化特性研究中, 介绍了高层大气的气候学及各种大气波动的研究进展. 在高层大气与低电离层的耦合研究方面, 介绍了突发钠层及低热层钠层的观测研究和钠层模式的研究进展, 以及突发 E 层与大气行星波之间的耦合研究工作. 在高层大气波动过程与电离层 F2 层耦合研究中, 着重介绍了电离层四波经度结构与高层大气非迁移潮汐之间的耦合特性与机理研究. 在热层与电离层耦合的研究方向上, 介绍了热层背景大气风场和重力波对电离层的作用、带电粒子对赤道热层的影响与热层赤道异常的形成机理研究等热层电离层相互耦合工作. 综合认为, 近年来中国学者在高层大气与电离层耦合的研究领域进行了大量工作, 包括实验观测及数据分析、模式化与理论研究等. 中国学者取得的研究成果为这一领域近年来的进展与突破做出了重要贡献.

关键词
高层大气
电离层
垂直耦合

电离层具有变化性, 包括相对短时间尺度的电离层空间天气和长时间尺度的电离层空间气候. 现已认识到, 引起电离层变化的三类主要外部驱动源是: 来自上面的太阳活动、太阳风与磁层扰动、以及来自下面的大气波动(Robert 和 Pfaff, 2012). 大量观测表明, 上述三类外部源在驱动电离层变化时大体上具有同等重要性(Forbes 等, 2000; Rishbeth 和 Mendillo, 2001; Rishbeth, 2006). 因此, 源于低层大气与地面的扰动被认为也是影响电离层空间天气和空间气候学的重要来源之一.

大气波动驱动电离层变化时涉及到大气层-电离层系统的垂直耦合(Vertical coupling in the atmosphere-ionosphere system), 这也是近年来高层大气物理学(aeronomy)研究中颇受关注的领域. 为此, 国际大地测量与地球物理联合会(IUGG)下属的国际地磁与高层大气物理学协会(IAGA)已经组织了多次专题学术讨论会, 并在 JASTP 上出版了 3 个专辑(Pancheva 等, 2006, 2007, 2012), 出版了相关专著(Abdu 等, 2011). 在国际日地物理联合会(SCOSTEP)先后两次组织的“日地系统的气候与天气研究计划(CAWSES,

中文引用格式: 万卫星, 徐寄遥. 2014. 中国高层大气与电离层耦合研究进展. 中国科学: 地球科学, 44: 1863–1883
英文引用格式: Wan W X, Xu J Y. 2014. Recent investigation on the coupling between the ionosphere and upper atmosphere. Science China: Earth Sciences, 57: 1995−2012, doi: 10.1007/s11430-014-4923-3

CAWSES-II)”中, 设立了专门的工作组(TG4)研究地球空间对低层大气的响应(Schmieder 等, 2004; Basu 和 Pallamraju, 2006).

在大气层与电离层组成的系统中, 低层大气的各种活动, 如平流层臭氧对太阳紫外辐射的吸收、对流层中的各种剧烈气象活动、以及对流层与海陆地形之间的相互作用等, 导致近地区域中产生各种扰动, 所释放的能量以重力波、潮汐、行星波等形式向上传播. 大部分大气波动的能量只能传播至中层顶及低热层(MLT)区域, 这是因为, 一方面, 由于背景大气密度ρ_0 随高度增加而减少, 大气波动在向上传播过程中的波幅度(如风场 w)必须随高度增加而增加, 以保持波的能量密度(如动能 $1/2\rho_0 w^2$)守恒; 另一方面, 在 MLT 及以上高度上, 背景大气温度 T_0 随高度迅速增加, 导致背景大气的粘滞性及导热性(二者均正比于 $T_0^{2/3}$, 反比于背景大气密度ρ_0)随高度增加, 从而引起波幅度(如风场 w)随高度迅速衰减.

观测研究已发现, 高层大气与电离层之间的耦合有下述形式: (1) MLT 区域的大气波动与附近的低电离层相互作用, 如通过风剪切导致中纬电离层E层(其高度与 MLT 区域有重叠)的金属离子电荷堆积形成突发 E 层(Es 层)等不均匀体; (2) MLT 大气波动的能量继续上传(或泄露)到上热层/电离层 F2 层, 通过中性粒子与带电粒子的碰撞激发电离层等离子体密度的波状起伏, 同时在低纬和赤道区触发等离子体不稳定性而产生电离层不均匀体; (3) 在中、低纬地区, MLT 大气波动驱动带电粒子运动, 切割背景磁场的磁力线, 通过发电机效应产生电离层电场, 并沿磁力线映射到低纬或赤道上空的 F2 层, 引起等离子体漂移, 导致赤道异常等大尺度电离层不均匀分布.

近年来, 国际学术界在高层大气与电离层耦合这一研究领域中取得了明显进展, 这主要得益于迅速发展的高层大气观测. 在天基探测中, 利用 TIMED 卫星的 GUVI, SABER 和 TIDI 等仪器(Yee 等, 1999; Christensen 等, 1994; Russell 等, 1999; Killeen 等, 1999, 2005)分别对全球 MLT 区域的大气温度、密度、成分和风场进行了长期的高精度观测(目前已经积累了一个太阳周的观测数据), 利用 CHAMP 和 GRACE 等卫星上的相关仪器对全球上热层区域的风场、密度进行了数年观测(Reigber 等, 2002; Guo 等, 2007; Liu H X 等, 2007), 所取得的资料对高层大气动力学及其效应的近期研究起到了至为关键的作用. 在地基观测方面, 以高空激光雷达为主的光学观测技术以及全天空流星雷达等无线电探测技术得到了持续发展和推广应用, 获得了大量的 MLT 区域及上热层的中性大气参量(Gardner 和 Voelz, 1987; She 等, 1992; Yu 和 She, 1993; Gong 等, 2003; Yu 等, 2013). 在此基础上, 对重力波的传播、衰减、非线性作用及电离层响应, 对大气潮汐与电离层、热层的耦合, 对行星波与电离层、热层相互作用进行了大量研究.

中国电离层及高层大气领域的学者紧跟国际高层大气与电离层耦合这一研究前沿, 在相关观测与研究工作中做出了巨大贡献. 本文将在回顾国际上这一领域主要研究方向进展的基础上, 着重介绍中国学者的研究工作, 其中, 关于电离层方面的工作已有专文介绍(参考刘立波等(2011)及其所引用的文献), 因此下面的介绍将偏重于高层大气方面的工作.

1 高层大气观测

实验观测在高层大气与电离层耦合的研究中具有关键作用. 电离层观测已有成熟的观测技术和悠久的观测历史, 但与之相比, 高层大气的观测手段和观测数据一直较为缺乏, 这曾是高层大气与电离层耦合研究历史上的一个局限. 近年来, 国际上高层大气的观测技术迅速发展. 天基探测中, 热层-电离层-中层能量与动力学(TIMED)卫星装配了大量的高层大气观测设备(Yee 等, 1999), 其中的全球紫外成像仪(GUVI)用于测量低热层的成分与温度(Christensen 等, 1994), 大气宽带辐射(SABER)仪器能测量平流层、中层和低热层的压力、温度、大气成分及大气辐射(Russell 等, 1999), 多普勒干涉仪(TIDI)测量 MLT 区间的水平风场矢量(Killeen 等, 1999, 2005). 此外, CHAMP 和 GRACE 等卫星的加速度计还可对全球热层高度的风场、密度进行就地测量(Sutton 等, 2007). 这些仪器分别对全球 MLT 及热层等区域的大气温度、密度和风场进行了长期的高精度观测, 所取得的资料对高层大气的动力学研究具有重大意义.

在地基观测方面, 以高空激光雷达、法布里-珀罗干涉仪(FP 干涉仪)、全天空气辉成像仪等为代表的光学观测技术得以迅速发展. 高空激光雷达用于测量平流层、中间层和低热层的温度、风场及 MLT 区域的金属密度(Gardner 和 Voelz, 1987; She 等, 1992;

Yu 和 She 等, 1993); FP 干涉仪测量热层高度(~250 km)及 MLT 高度(~87 和~97 km)的风场(Niciejewski 等, 1994; Wu 等, 2004); 全天空气辉成像仪能够给出中层顶附近的 OH 和 OI(绿光)气辉辐射以及热层中(~250 km)的 OI(红光)气辉辐射的水平结构(Peterson 和 Kieffaber, 1973; Peterson, 1979; Taylor, 1997); 全天空流星雷达、中间层-平流层-对流层(MST)雷达等地基无线电探测技术也日臻完善, 并得到广泛应用, 目前已获得了大量的 MLT 区中性大气风场等参量.

近年来, 中国多家单位在对高层大气进行地基观测方面投入了大量资源, 尤其是国家重大科技基础设施项目"子午工程"的顺利实施和成功运行, 在 17 个观测站上装配了 29 套高层大气观测设备(参见表 1).

中国的高空激光雷达研制工作起源于 20 世纪末, 中国科学院武汉物理与数学研究所龚顺生等(1997)首先研制了宽带钠激光雷达, 用于武汉上空金属钠层探测. 在此基础上, 龚顺生等后来又发展了双波长钠原子激光雷达技术, 大大提高了高层大气密度的测量精度与覆盖范围(Gong 等, 2003). 此外, 他们还发展了钠原子激光雷达白天观测技术, 提高了观测时间的覆盖范围. 武汉大学在研制钠原子激光雷达的基础上, 成功研制了铁玻尔兹曼激光雷达、钙荧光共振激光雷达等多部激光雷达, 实现了高层大气温度以及多种金属原子/离子的共体观测(Yi 等, 2008, 2009; Chen 和 Yi, 2011).

表 1　中国现有高层大气台站与设备分布 [a)]

台站	位置	设备	探测参量	探测高度(km)	单位
漠河	53.5°N, 122.3°E	流星雷达	*U*, *V*, *T*	75~110	IGGCAS
河北兴隆	40.4°N, 117.6°E	FP 干涉仪	*U*, *V*, *T*	87, 94, 250	CSSAR
		全天空气辉成像仪	{OH}, {O}	87, 94, 250	
北京延庆	40.2°N, 116.2°E	瑞利-钠激光雷达	*T*, ρ, [Na]	30~70, 80~110	CSSAR
河北廊坊	39.5°N, 116.7°E	窄带钠激光雷达	ρ, [Na]	80~110	CSSAR
		全天空气辉成像仪	{OH}	87	
		中频雷达	*U*, *V*	80~100	
北京	40.3°N, 116.2°E	流星雷达	*U*, *V*, *T*	75~110	IGGCAS
河北香河	39.8°N, 116.9°E	MST 雷达	*U*, *V*	10~40, 70~120	IAPCAS
山西岢岚	38.7°N, 111.6°E	FP 干涉仪	*U*, *V*, *T*	250, 97, 87	NCSW
山西五寨	38.9°N, 111.8°E	中频雷达	*U*, *V*	60~100	NCSW
青岛	36.0°N, 120.2°E	钠激光雷达	ρ, [Na]	80~100	CIRWP
合肥	31.8°N, 117.3°E	瑞利-钠激光雷达	*T*, ρ, [Na]	30~70, 80~110	USTC
		测风激光雷达	*U*, *V*	0~60	
		窄带钠激光雷达	*U*, *V*, *T*, [Na]	80~105	
		全天空气辉成像仪	{OH}, {O}	87, 94, 250	
武汉	30.5°N, 114.4°E	钠激光雷达	*T*, ρ, [Na]	30~70, 80~110	WHU
		铁激光雷达	*T*, [Fe]	0~70, 80~110	
		钙激光雷达	[Ca], [Ca+]	80~110	
		MST 雷达	*U*, *V*	10~40, 70~120	
武汉	30.5°N, 114.4°E	瑞利-钠双波长激光雷达	*T*, ρ, [Na]	30~70, 80~110	WIPM
武汉	30.5°N, 114.4°E	流星雷达	*U*, *V*, *T*	75~110	IGGCAS
云南曲靖	25.6°N, 103.8°E	流星雷达	*U*, *V*, *T*	75~110	CIRWP
		中频雷达	*U*, *V*	60~100	
云南曲靖	25.6°N, 103.8°E	全天空气辉成像仪	{OH}, {O}	87, 94, 250	CSSAR
海口	20.0°N, 110.4°E	瑞利-钠激光雷达	*T*, ρ, [Na]	30~70, 80~110	CSSAR
富克	19.5°N, 109.1°E	流星雷达	*U*, *V*	80~100	CSSAR
		全天空气辉成像仪	{OH}, {O}	87, 94, 250	
三亚	18.2°N, 109.3°E	流星雷达	*U*, *V*, *T*	75~110	IGGCAS

a) *U*: 东西向风; *V*: 南北向风; *T*: 大气温度; ρ: 大气密度; [*x*]: 金属成分密度; {*x*}气辉辐射强度. IGGCAS: 中国科学院地质与地球物理研究所; CSSAR: 中国科学院空间科学与应用研究中心; IAPCAS: 中国科学院大气物理研究所; USTC: 中国科学技术大学; WHU: 武汉大学; NCSW: 国家空间天气监测预警中心; WIPM: 中国科学院武汉物理与数学研究所; CIRWP: 中国电波传播研究所

中国科学技术大学在研制钠原子激光雷达的基础上, 着重发展了激光雷达测风技术. 研制成功我国首台可探测至平流层高度的多普勒测风激光雷达, 探测高度可至 40 km, 该雷达已在中国新疆进行了连续 2 个月的观测(Xia 等, 2012; Shu 等, 2012). 近来, 他们又研制成功车载多普勒测风激光雷达系统, 探测高度可至 60 km, 如图 1 所示, 同时, 可同时探测 80~110 km 大气的风场、温度和钠原子数密度(Li T 等, 2012a).

在"子午工程"中, 中国科学院空间科学与应用研究中心、中国科技大学、武汉大学分别在北京、合肥、武汉和海口建设了 4 台瑞利-钠荧光激光雷达, 构成一个横跨南北的激光雷达子午观测链, 主要观测 30~70 km 高度大气的密度、温度和 80~110 km 高度的钠原子数密度(Wang 等, 2012; Gong S H 等, 2013). 此外, 中国电波传播研究所在青岛建立了 1 台钠荧光激光雷达.

除上述激光雷达之外, 中国科学院空间科学与应用研究中心和国家空间天气监测预警中心还分别在北京和山西岢岚建立了两台 FP 干涉仪, 用于测量热层高度(250 km)及 MLT 区域(87 和 94 km)的大气风场(袁韦华等, 2010; Yuan 等, 2013; Jiang 等, 2012). 中国科学院空间科学与应用研究中心分别在河北兴隆和廊坊建成了全天空气辉成像仪, 用于观测中层顶附近的 OH 气辉辐射的水平结构, 从这些水平结构中可以提取该高度上的重力波活动特征(涂翠等, 2009; Li Q 等, 2011, 2013). 中国科学院空间科学与应用研究中心还在子午工程兴隆台站建成了大气辐射光谱仪, 通过观测 OH 气辉辐射光谱反演该高度上气辉层的温度(Zhu 等, 2012).

在"子午工程"中, 分别由中国科学院大气物理研究所和武汉大学负责, 在河北香河和湖北武汉建立了两台中层-平流层-对流层(MST)雷达. MST 雷达通过测量大气湍流散射的超高频(~50 MHz)回波, 反演观测站上空的风场矢量高度剖面, 观测高度可覆盖对流层、平流层(10~45 km)和部分中间层.

全天空流星雷达是一种探测 MLT 风场的有效手段, 雷达采用全天空天线发射、空间天线阵接收方式, 通过测量高层大气高度上流星尾迹散射的超高频(~30 MHz)回波的多普勒频移及到达角, 来反演观测站上空的背景风场矢量的高度剖面; 同时还通过测量流星尾迹回波的弛豫时间来估算观测站上空的背景温度. 当前全天空流星雷达技术得到了很好的发展, 已成为高层大气探测的常规设备. 中国于 2001 年首次在武汉建立流星雷达观测站, 开展高层大气风场的全天空流星雷达观测, 取得了将近 3 年的观测资料, 并发表了一系列文章(如 Xiong 等, 2004; Niu 等, 2005; Zhao 等, 2005a, 2005b). 近年来, 中国科学院地质与地球物理研究所先后在漠河、北京、武汉和三亚等地建立了全天空流星雷达, 构成了一个跨越北半球中、低纬地区的流星雷达子午链, 用于探测台站上空 70~110 km 的高层大气风场矢量(Yu 等, 2013), 同时还可反演高层大气温度分布. 基于该台链的观测数据, 采用经典大气潮汐理论, Yu 等(2013)重构了北半球东经 120°子午面内的风场矢量分布与变化. 此外, 中国电波传播研究所在云南曲靖也建立了一台

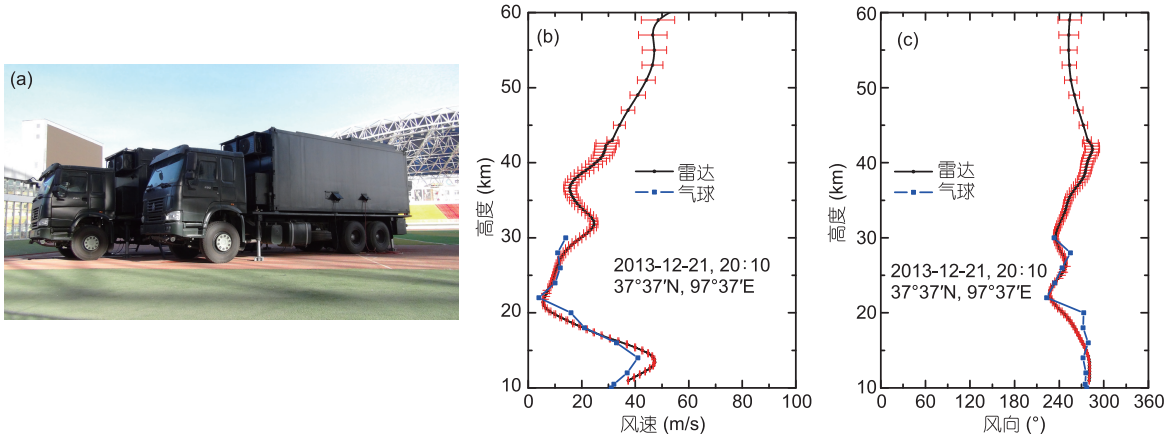

图 1　中国科学技术大学 60 km 测风激光雷达(a)2013 年在青海外场观测期间获得的风速(b)和风向(c)与探空气球的对比

由窦贤康(2014, 私人通信)提供

全天空流星雷达.

另外, 中国电波传播研究所、中国科学院空间科学与应用研究中心及国家空间天气监测预警中心分别在云南曲靖、河北廊坊和山西五寨各建立了一个中频雷达观测站. 中频雷达通过探测低电离层(60~100 km)的不均匀结构的散射回波测量背景大气风场.

2　高层大气变化性研究

在高层大气与电离层的耦合过程中, 高层大气本身的变化具有决定性作用. 高层大气的变化包括反映其背景长时间尺度的气候学变化和反映其短时间尺度变化的大气波动, 都是当前高层大气物理的主要研究方向. 利用多种卫星和地基观测数据, 结合大气环流模式模拟的结果, 国际上对背景高层大气中不同参量(例如温度、风场、密度场等)的季节和年际的变化做了详细的研究, 获得了一系列的进展(Garcia 等, 1997; Leblanc 等, 1998). 中国学者近年来进行了大量工作, 取得了一批研究成果.

利用激光雷达长期观测的夜晚中高层大气温度数据, 结合 SABER 卫星观测的全球温度数据, Dou 等(2009a)对北半球低纬和中纬地区 20~80 km 高度的背景大气温度的半年振荡(SAO)和年振荡(AO)进行了详细研究, 并与同纬度 SABER 观测的全球纬向平均温度的结果进行了比较. 图 2 给出了激光雷达和 SABER 卫星在美国加州南部地区(34°N)观测的高层大气温度和潮汐振幅的 AO 和 SAO. 由图可见激光雷达和 SABER 观测的 AO 在中间层存在明显的差异, 这与较强的周日潮汐 AO 有关, 也证明了周日潮汐对激光雷达观测的中间层夜晚平均温度产生了重要影响. 此外, Li T 等(2011)还利用长期的激光雷达观测数据研究了平流层和中间层大气温度的长期变化趋势以及太阳活动变化的影响.

利用 TIMED/SABER 观测的温度数据, Xu 等(2006a, 2007a, 2007b)获得了中层顶温度结构的全球分布, 中层顶背景大气温度的半年振荡(SAO)、全年振荡(AO)和准两年振荡(QBO)的特征, 及大气温度随着太阳活动变化特性的全球分布, Gan 等(2012)揭示了不同纬度中间层逆温的特性和形成机制. 利用美国夏威夷地区激光雷达 14 年的观测数据, Li T 等(2008) 研究了低纬地区高层大气温度的 QBO 现象, 高层大气温度对厄尔尼诺南方涛动(ENSO)和 11 年太阳活动周期的响应. Li T 等(2013)利用 TIMED/SABER 卫星观测的 11 年全球温度数据, 并结合美国国家大气科学研究中心的全大气环流模式(WACCM)模拟的 53 年结果, 进一步揭示了南北半球高层大气在 ENSO 事件期间的耦合机制.

高层大气变化的另一个重要方面是大气波动, 包括各种尺度的重力波(Fritts 和 Alexander, 2003)、全球尺度的潮汐(Chapman 和 Lindzen, 1970)和行星波(Andrews 等, 1987)等, 以及在波动传播过程中发生的耗散或破碎及相互作用等非线性过程(Lindzen, 1981;

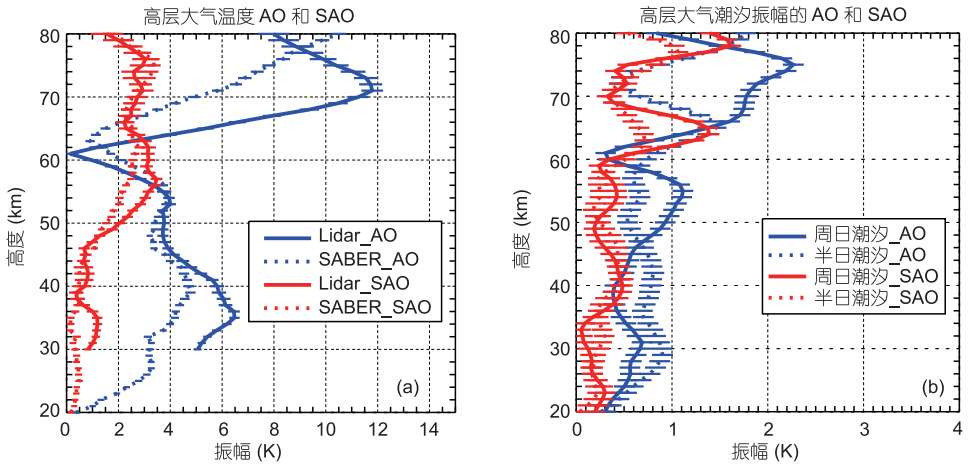

图 2　激光雷达和 SABER 卫星在加州南部地区(34°N)观测的高层大气温度的 AO 和 SAO 的振幅(a), 以及 SABER 卫星观测的周日和半日潮汐振幅的 AO 和 SAO 幅度(b)

图取自 Dou 等(2009a)

Holton, 1982; Holton 和 Alexander, 2000).

在高层大气重力波等研究方面, Dou 等(2010b)分析了 5 年全天空成像仪在 Colorado 北部观测的 OH 气辉中的重力波数据, 揭示了重力波的传播方向有明显的季节变化, 即夏季趋于极向传播, 而冬季趋于赤道向传播, 这种方向趋势可能与位于低纬地区夏季深对流产生的重力波和位于高纬冬季风暴产生的制导波(Ducted wave)有关. 结合附近 MF 雷达观测的中间层顶风场数据, Tang 等(2014)进一步定量的计算了 OH 全天空成像仪观测的重力波动量通量, 结果表明大气潮汐对重力波动量通量有明显的调制, 同时也发现了重力波的传播方向和动量通量在平流层爆发性增温事件前后发生了明显的变化. Li Q 等(2011)统计了兴隆站 OH 全天空气辉成像仪观测的中间层顶重力波的季节变化特征, 结果表明北京地区重力波在冬(夏)季主要向西南(东北)方向传播, 而在其它季节的传播方向并没有明显的偏向. 其原因一方面与背景大气风场滤波作用有关, 另一方面与重力波的破碎直接驱动或改变中间层大气背景结构和大气的湍流分布有关(Xu 等, 2009b; Li T 等, 2007, 2010, 2012b). Zhang Y 等(2012)利用 TIMED/SABER 全球温度数据对重力波在平流层的空间、时间分布特征及其相对应的波源进行了研究. Wu 和 Xu (2006)则利用大量的火箭观测数据研究了中层顶附近大气重力波的垂直波数谱. 此外, Li Q (2013)针对兴隆站观测的一次特殊的强孤波(Bore)事件, 结合 TIMED/SABER 观测的温度剖面以及北京站流星雷达的风场数据和激光雷达 Na 密度数据, 分析了 Bore 的产生机制及其对 Na 密度的影响.

由于重力波主要产生于低层大气, 因此研究激发源及附近重力波特性, 对于了解高层大气重力波的传播和耗散特性具有重要的意义. Zhang S D 等(2010, 2012, 2013)利用无线电探空数据研究了低层大气重力波的特性, 并得到了惯性重力波周期、波相速度、垂直波长等波参量随纬度、高度的分布及随季节的变化特征. 陈丹等(2011)则利用中尺度模式(WRF)模拟了热带气旋中产生的重力波过程. Huang K M 等(2009, 2010, 2013a)模拟了非线性共振情况下产生的重力波以及重力波反射, 并指出这种相互作用可能对于高层大气重力波的谱分布有重要的决定作用. Liu X 等(2009)利用高分辨率数值模式给出了大气重力波的 Kelvin-Helmholtz 不稳定的演化过程以及对背景大气的作用.

在高层大气潮汐研究方面, 利用地基流星雷达数据, Xue 等(2007, 2008)将典型相关分析(CCA)方法运用与分析武汉流星雷达的周日和半日潮汐风场数据, 结果表明潮汐的变化与太阳 27 天自转周期和行星波的调制有关. 利用近年来建成的由漠河、北京、武汉和三亚 4 站构成的流星雷达子午链观测, Yu 等(2013)采用经典潮汐理论 Hough 模分解方法, 得到了北半球中低纬地区 120°E 附近子午面内潮汐风场的二维分布. 此外, Jiang 等(2009)对 Maui 台站(20.75°N, 156.43°W)流星雷达观测的风场进行分析, 发现该台站的 8 小时潮汐非常规则, 有明显的半年变化. 姜国英等(2010)还利用海南地区流星雷达的风场观测数据, 给出了我国低纬地区高层大气周日潮汐、半日潮汐的变化情况. 另外, Zhao 等(2012)利用曲靖中频雷达观测的风场资料分析了大气周日潮汐和半日潮汐随高度和季节的变化特征.

利用 TIMED 卫星观测数据, Xu 等(2009a)提取了温度、压力和风场的纬圈平均和迁移潮汐, 给出了潮汐振幅季节变化和准两年变化的全球分布. 随后, Xu 等(2009b)在模式中引入了等效 Rayleigh 耗散系数, 结合 TIMED/TIDI 的风场探测, 给出了大气耗散系数的季节变化和全球分布. 潮汐的全球结构和季节特征还受到激发源的影响. Xu 等(2010a, 2012a)进一步分析了激发潮汐的平流层臭氧加热, 揭示了臭氧加热产生的周期从 24 小时到 6 小时潮汐驱动源的全球分布以及季节变化, 并给出了实测的 8 小时和 6 小时潮汐波臭氧驱动源的全球分布特征. Xu 等(2010b)通过卫星观测资料分析发现大气气辉强烈地受到大气非迁移和迁移潮汐的调制, Xu 等(2012b)则对气辉辐射机制进行了研究. 利用 TIMED/SABER 卫星观测的温度数据, 陈泽宇和吕达仁(2008)分析了非迁移潮汐波 DE3 在高层大气中的传播特性.

在行星波的研究方面, Jiang 等(2008)综合利用位于赤道和中纬地区的 6 个台站上雷达的观测结果, 对 2003 年 4~5 月期间的一次较强的 6.5 日波事件进行了详细研究. 利用近 11 年 TIMED/SABER 卫星观测的全球温度数据, Gu 等(2013a)以及 Huang Y Y 等(2013)研究了 20~120 km 全球准两日波(QTDW)的空间结构及季节和年际变化. 结果表明 s=–3 和 s=–4 的 QTDW 的振幅有明显的季节变化, 这与激发它的中间层夏季东风激流的强弱有关, 也与平流层爆发性增温和

太阳活动强弱有一定的关系. 另外, Gu 等(2013b)利用夏威夷 MF 雷达观测的十几年中间层风场数据, 研究了 QTDW 波幅度的季节和年际变化, 及其对 ENSO 和太阳 11 年周期的响应. Gan 等(2012)利用卫星观测数据研究了 s=1 的准静态波和 16 日行星波对中间层温度翻转的影响.

在大气波动的波波相互作用研究方面, Li T 等(2009)研究了 Na 激光雷达观测的周日潮汐和半日潮汐的剧烈逐日变化, 与全天空成像仪观测的重力波传播方向和强度有紧密的关系. 另外模拟结果也表明了重力波与潮汐之间的非线性相互作用能够有效改变潮汐的振幅使之发生剧烈的逐日变化(Liu X 等, 2008). 另一方面, Huang C M 等(2013)的数值模拟则表明时变潮汐风场会改变重力波频率, 从而导致重力波穿透潮汐风场的临界层; Liu 等(2012, 2013)的模拟研究也表明非等温的背景大气会严重影响重力波的垂直传播并影响了其垂直波长. 另一方面, 准静态行星波与迁移潮汐的相互作用也能够产生较强的非迁移潮汐, 进而导致潮汐发生剧烈的逐日变化(Liu 和 Hagan, 1998). Xu J Y 等(2014)利用卫星探测数据, 也给出了大气行星波与迁移潮汐非线性相互作用产生非迁移潮的证据, 并指出该机制很可能是大气非迁移潮汐的重要的产生源. Huang K M 等(2013b)利用流星雷达在美国夏威夷观测的风场数据, 发现观测的 16.2 和 15.8 小时波是由于两天波与潮汐之间的非线性相互作用而产生的. Huang C M 等(2012)利用 Arcebo 非相干散射雷达观测的热层中性风研究了潮汐和行星尺度波, 结果表明这一区域主要的振荡是潮汐, 同时存在较强的重力波、潮汐和行星尺度波之间的相互作用. Huang C M 等(2009)利用加密探空资料研究了低层大气潮汐、行星波及其相互作用. Gong 和 Zhou (2011), Gong Y 等(2013)和 Huang K M 等(2013c)利用 Arecibo 非相干散射雷达数据分析了低纬电离层高度上的潮汐、行星波活动以及它们之间的非线性相互作用. 另外, Huang K M 等(2012)利用二维模式研究了重力波与重力波之间的非线性相互作用.

3 高层大气与低电离层及金属层的耦合

中间层顶区域是大气光化学和动力学过程表现最为复杂的区域, 也是高层大气与电离层耦合过程的关键节点. 此外, 流星注入和烧蚀对这一区域也具有重要作用, 在烧蚀过程中流星体的金属原子或离子能在中间层顶(80~105 km)形成金属原子和离子(如钠、铁、钙、钙离子等)富集的“金属层”. 20 世纪 70 年代以来, 人们开始利用荧光共振激光雷达探测研究高层大气中的金属层. 在对金属层的激光雷达观测中, 常常观测到某一高度的金属原子密度在短时间内呈现出密度几倍甚至十几倍的增长, 这种现象被称为突发金属层. 另一方面, 在背景大气风场剪切作用下, 中纬度金属层中的离子可能会汇聚于很小的高度范围, 在电离层E区背景之上产生一个高密度的薄层, 即突发 E 层(Es). 突发金属层与 Es 的关系, 一直是学者们关注的问题.

20 世纪 50 年代以来, 人们对中纬 Es 层进行了广泛的研究探讨, 总结出其许多出现与分布特征, 并提出了不同的产生机理, 但至今也有诸如“夏季异常”(中纬 Es 在夏季出现率奇高)等多种现象没有得到合理的解释. 由于大气波动能直接影响到高层大气风剪切, 从而可能与 Es 的生成密切相关, 因此近年来开始探索利用大气波动的季节异常来解释“夏季异常”等 Es 现象. Zuo 和 Wan (2008)通过分析武汉地区的电离层测高仪观测及 MLT 中性风场的流星雷达观测, 揭示了高层大气准 6 日行星波与电离层 Es 出现率之间的密切关系. 在此基础上, Zuo 等(2009)利用全球不同地区的若干电离层测高仪的 Es 观测数据, 估算出该准6日行星波为经度波数等于1并向东传播的行星波. 此外, Zhao 等(2008)研究了一类低纬电离层静日暴事件, 发现静日暴发生前 Es 层亦大幅增加, 并且通过比较低高度 Es 层的逐日变化特征, 间接指出这种磁静日电子密度的增加可能与低层大气两日行星波有关. 这些工作确认了大气行星波与电离层 Es 之间的密切关系, 并为解释 Es 出现率的夏季异常等年变化特征提供了一种新的可能机制.

在金属层中, 钠原子由于具有较高的丰度和较大的后向荧光共振散射截面, 从而成为最早也是最广泛被探测的金属原子. 突发钠层(SSL)是一种突发金属层现象, 对其形成机制目前国际上还存在很多争论. Dou 等(2009b, 2010a)通过使用多种手段的探测数据, 如合肥钠荧光共振激光雷达 SSL 观测数据、武汉流星雷达全天空流星注入数据以及掩星观测电子浓度剖面, 统计研究了 SSL 和 Es 以及流星注入之间的关系, 发现流星雷达所探测到的流星注入数目在夏季呈现最大值, 冬季呈现最低值, 这与 SSL 和 Es

的季节变化规律具有较好的相关性. 从统计观点来看, 存在一个“流星-Es-SSL”的因果链, 即如果假定流星注入是源的话, 通过风场剪切导致从流星中电离出来的金属离子汇聚在低电离层而形成Es层, 然后通过大气波动的下行相位传播, 将进一步引发 SSL.

事实上, 几乎各个纬度的钠荧光共振激光雷达都曾观测到 SSL. 图 3 给出了“子午工程”在北京、合肥、武汉和海口安装的 4 套同类型的钠荧光共振激光雷达所观测的 SSL 个例. 利用这 4 套激光雷达及北京、武汉和海口的 3 套电离层数字测高仪的观测资料, Dou 等(2013)研究了 SSL 和 Es 在不同纬度地区的相关性, 发现四个站 SSL 都显示了与 Es 在夏季的强相关性, 表明大尺度 SSL 在水平方向上至少可扩展数百公里, 但在北京的发生频率远低于合肥、武汉和海口的 SSL 发生频率; SSL 在合肥-武汉、合肥-海口的同步观测的相关度要优于合肥-北京. 这些结果显示了北京地区的高层大气在动力学/光化学特性上与其他站点的差异.

近年来的一些观测表明金属层可延伸至热层高度(~120~170 km), 更新了之前人们对金属层仅局限于中间层顶(80~105 km)的认识(Höffner 和 Friedman, 2004, 2005; Chu 等, 2011; Friedman 等, 2013). Gong S S 等(2003)曾经利用武汉的钠荧光共振激光雷达探测报道了热层金属钠层的首次个例观测结果. Wang 等(2012)通过分析北京钠荧光共振激光雷达 300 多个夜间观测结果, 证认了 17 次热层钠层(也被作者称为“双钠层”)事件, 其高度范围覆盖了 105~130 km, 主要集中出现在春季和夏季. 最近, Xue 等(2013)利用位于丽江的 1 台大口径(1.8 m)钠荧光共振激光雷达观测到了两次热层钠层. 结合昆明无线电探测手段(电离层数字测高仪、流星雷达)以及掩星的同步观测, Xue 等(2013)定量地分析了热层钠层的成因, 并认为

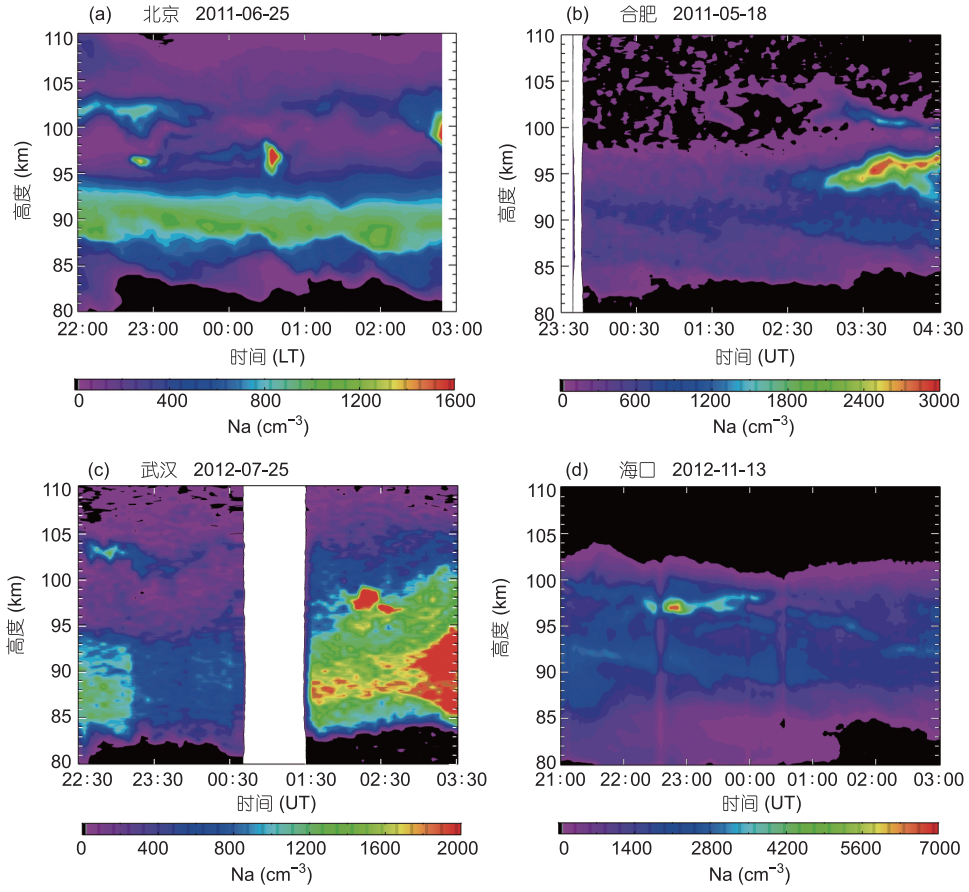

图 3 北京(a)、合肥(b)、武汉(c)和海口(d)钠荧光共振激光雷达分别观测的突发钠层(SSL)事例
图中给出的利用激光雷达反演的高度 80~110 km 范围内钠原子的数密度. 图取自 Dou 等(2013)

观测到的热层钠层事件与主钠层中 SSL 具有相同的“Es-热层钠层”因果链成因, 即由潮汐风场汇聚效应引发电离层 Es 层, 进而通过 Na^+的化学过程而形成热层钠层, 如图 4 所示.

除钠层以外, 金属层中其他成分的探测研究也一直是学者们比较关注的课题. Yi 等(2013)报道了钠、铁和钙/钙离子 3 套激光雷达观测的中间层顶的突发金属层现象. 3 套激光雷达同步探测到了金属原子/离子密度增强的现象, 并且突发钠层、突发铁层以及突发钙/钙离子层出现高度范围相当, 演化过程也非常类似, 这表明突发金属层是多种金属原子和离子物质的混合层, 并且所有这些金属成分在混合层中具有相同或相似的源过程.

国际上目前已经发展各种金属层/突发金属层的化学/光化学、动力学模式(Collins 等, 2002; Plane, 2004), 并在美国国家大气科学研究中心的 WACCM 模式中加入了金属层模式, 用于研究全球金属层的变化规律(Feng 等, 2013; Marsh 等, 2013). Xu 和 Smith

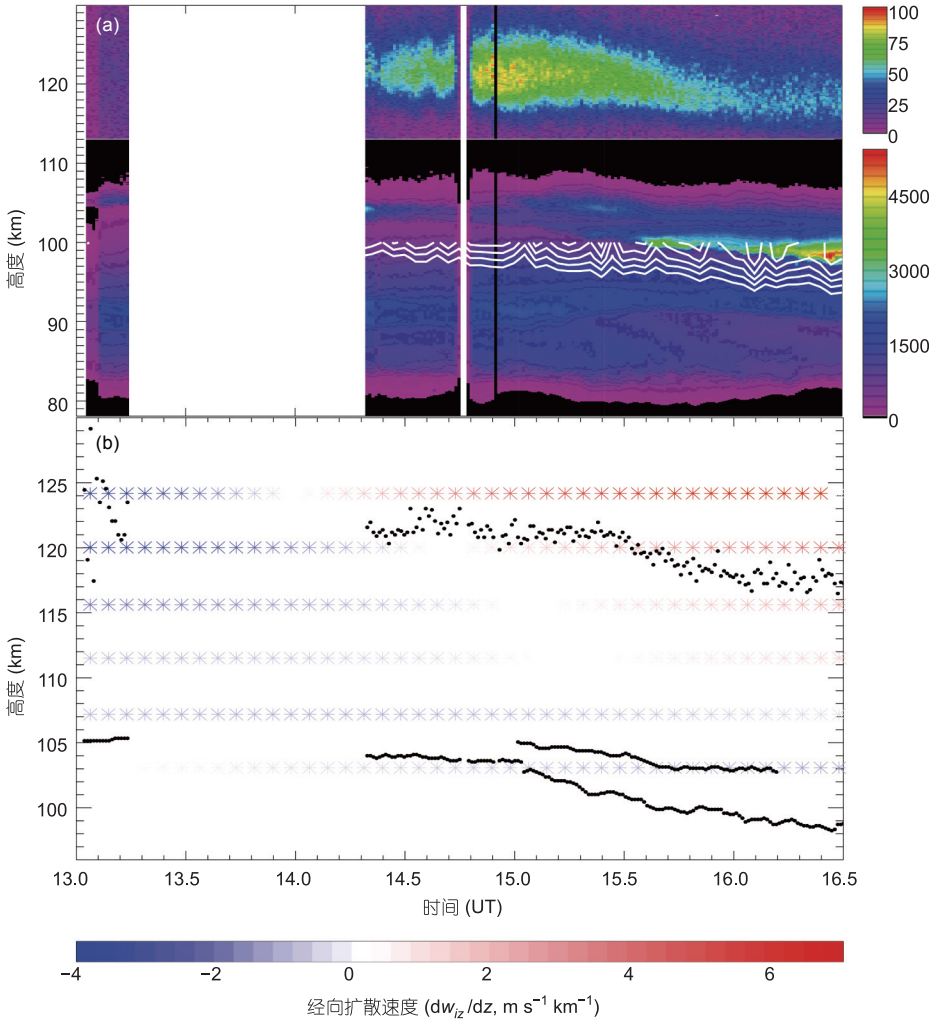

图 4　丽江大口径钠荧光共振激光雷达观测到的发生在 2012 年 3 月 10 日的热层钠层和突发钠层及其可能成因分析

(a) 大口径钠荧光共振激光雷达探测 80~125 km 钠原子数密度, 110 km 以上存在一个明显的热层钠层, 逐渐加强后衰减; 110 km 以下的主钠层的突发钠层则不断增强. 图中的空白区域源于观测站上空的云层覆盖. 白线为中频雷达回波功率在 10000~30000 (arbitrary unit)等值线, 间隔为 5000. (b) 利用模式延拓的流星雷达潮汐风场剪切计算得到的离子垂直运动的汇聚(蓝色星号)和发散区域(红色星号), 以及热层钠层和突发钠层峰值高度演化趋势(黑色圆点). 热层钠层由离子汇聚区逐渐进入发散区, 从而密度先增强而后减弱; 突发钠层在观测期间一致位于汇聚区, 从而得以不断加强. 图取自 Xue 等(2013)

(2003, 2005)利用本征值方法分析钠层的光化学寿命, 他们的研究指出在主钠层附近, 钠原子具有很长的光化学寿命, 所以可以用来作为大气动力学过程(例如重力波等)的示踪. Xu 等(2006b)将钠层光化学模式加入到二维、时变、非线性、非静力平衡的重力波模式(Xu 等, 2003)中. 应用该模式, 并结合窄带钠激光雷达的钠密度和温度观测, Xu 等(2006b)模拟了多个尺度大气重力波对钠层的影响. 该研究表明, 模拟的钠层密度、混合率和位温对重力波的响应与激光雷达观测符合得很好. 在钠层光化学理论研究的基础上, Xu 等(2005)还提出了利用臭氧密度、温度和夜间 Na 气辉辐射率反演全球夜间 Na 密度的新的卫星探测方法.

4 大气潮汐与电离层 F2 层耦合

大气波动将能量从低层大气带到高层大气和电离层, 在大气层与电离层(F2 层)的耦合过程中起关键作用. 在大气波动中, 潮汐是一种较为规则的每日波动, 对大气层能量自下至上的传播极为重要.

研究大气潮汐与电离层 F2 层耦合的困难在于, 作为主要潮汐成分的迁移潮汐与由太阳辐射引起的电离层周日变化有相似特征, 即二者均随太阳同步运动和变化, 因此很难将迁移潮汐的贡献从电离层周日变化中分离. 另一方面, 大气非迁移潮汐随太阳非同步变化, 其贡献较易从电离层周日变化中分离出. 例如, 2005 年发现的电离层经度四波结构(WN4), 被认为与 DE3 模的大气非迁移潮汐有关, 是电离层与大气层耦合过程的一种重要体现(Sagawa 等, 2005; Immel 等, 2006). 这种新的电离层分布现象可能更清晰地揭示电离层-大气层耦合过程和机理, 因而得到了国际电离层物理界的广泛关注. 我国科学家也在该领域开展了大量工作, 进行了系统研究.

在电离层 WN4 的初期分析研究中, 限于所用卫星观测数据在时空分辨率和覆盖长度的不足, 既不能研究 WN4 的周日变化等短期行为, 也不能研究其年变化等气候学特性. 为此, Wan 等(2008)利用具有高时空分辨率和长观测时间覆盖的全球电离层地图(GIMs)数据, 研究了电离层总电子含量(TEC)的经度四波结构. 如图 5 所示, 首先, 在对周日变化的分析中, Wan 等(2008)发现了 WN4 的波形随当地时间以平均每天 90°的速度向东漂移, 表明这种经度变化可能由大气非迁移潮汐 DE3 引起; 白天的波形漂移慢于夜间, 可以用电离层垂直电场(水平漂移)的日变化来解释. 其次, 在 WN4 的气候学分析中, 发现四波结构具有明显的季节变化, 即在北半球晚春开始出现, 夏季和秋季时波幅很强, 冬季基本消失; 此外还发现 WN4 受太阳活动的弱调制, 随太阳活动增加而增强.

为了进一步验证电离层 WN4 结构是否为大气非迁移潮汐所激发, Wan 等(2010)进一步将上述电离层 TEC 的 WN4 与同期 TIMED/TIDI 卫星大气风场的 DE3 模的观测数据进行了相关分析, 发现 WN4 与高层大气东西向风场的 DE3 模具有十分相似的年变化与年际变化, 其相关系数高达 90%以上; 与此同时, WN4 与高层大气南北向风场的 DE3 模却不具有相关性. 为解释这一观测事实, Wan 等(2010)根据 DE3 与 WN4 耦合的电离层发电机理论, 提出高层大气东西向风场的 DE3 模具有南北半球对称结构, 其在两个半球发电机区产生的电场沿磁力线映射到 F2 区后会因方向相同而相互叠加, 因而能有效产生 WN4; 反之, 高层大气南北向风场的 DE3 模具有南北半球反对称结构, 其在两个半球发电机区产生的电场沿磁力线映射到 F2 区后会因方向相反而相互抵消, 因而不能有效产生 WN4.

在 DE3 与 WN4 耦合的电离层发电机效应解释中, 电离层等离子体垂直漂移起到了关键作用. Ren 等(2009a)利用 ROCSAT-1 卫星观测数据给出了垂直漂移的 WN4 日变化和年变化特征, 结果其与 Wan 等(2008)给出的电离层 TEC 相应变化非常一致. 此外, Ren 等(2009a)还发现垂直漂移 WN4 的年变化与高层大气 DE3 潮汐的温度与纬向风场相似. Ren 等(2010)进一步利用电离层发电机模式, 模拟重现了垂直漂移四波结构的年变化和相移, 并证实了 Wan 等(2010)提出的 MLT 区域 DE3 的南北半球对称分量能有效激发 WN4, 而反对称分量不能有效激发 WN4 的结论.

除发电机效应外, 最近也有人提出 DE3 潮汐也能直接传播到电离层/热层高度驱动相应的 WN4 结构. Ren 等(2011a)利用全球电离层/热层耦合模式 GCITEM-IGGCAS 模拟了大气非迁移潮汐对赤道区低热层 NO 数密度经度变化的影响, 发现 3~10 月由 DE3 潮汐在 NO 数密度中驱动了一个经度四波结构, 而 11~2 月主要由 DE2 潮汐在 NO 数密度中驱动出一个经度三波结构. 进一步分析表明, 大气非迁移潮汐主要通过调节 NO 产生率来驱动 NO 数密度的经度变

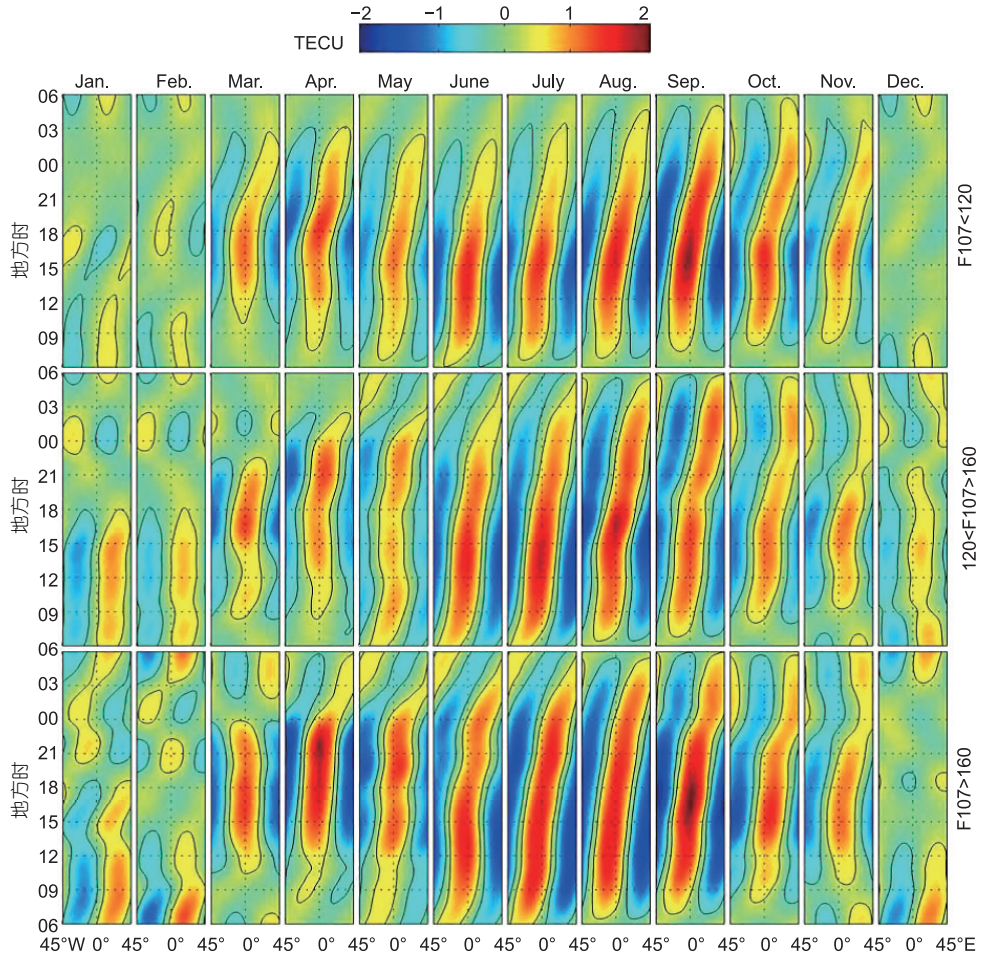

图 5　低纬电离层 TEC 的纬度积分中经度四波结构(WN4)强度随经度和地方时变化

由于四波良好的经度重现性, 图中仅给出了 45°W~45°E 之间的波形, 即四波中一波的结果. 图中自上至下 3 行分别对应低、中和高太阳活动条件; 自左至右 12 列代表 1~12 月. 引自 Wan 等(2008)

化. Ren 等(2012a) 还模拟了大气非迁移潮汐对赤道 E 区电子密度经度变化的影响, 也发现了类似的结果. Wan 等(2012)采用控制模拟方法, 系统研究了激发电离层与热层 WN4 结构的两种机制, 结果发现, 热层 WN4 结构在低太阳活动期间主要由潮汐波的直接垂直传播所激发, 电动力学耦合也有一定贡献; 在中等太阳活动时两种机制有同等重要贡献; 在高太阳活动期间则来自于电动力学耦合的贡献. 依据上述结果, Wan 等(2012)提出了一种电离层/热层经度变化四波结构耦合的新模式.

另外, 在电离层与高层大气的 WN4 结构研究中, Ren 等(2008)利用 DMSP 卫星黄昏时段(17:45LT)的观测数据发现, 顶部电离层电子密度和电子温度也存在经度四波结构. Liu L B 等(2008, 2009, 2010a, 2010b) 利用掩星数据分析发现, 电离层年谐波成分、顶部标高、底部 B0 和 B1 参数等都有明显的四波结构. 此外, Zhao 等(2011a, 2011b)和 Li G Z 等(2008)还分别发现电离层 F3 层及赤道等离子体泡发生率的四波结构, He 等(2010)利用 GUVI 数据得到了热层积分 O/N_2 比中的四波结构, 穆文峰等(2011)还进一步研究了电离层 3 波结构(WN3)与高层大气中另一非迁移模 DE2 之间的关系.

大气潮汐不仅驱动了电离层/热层的空间变化, 也影响了电离层/热层的气候学特征. Ren 等(2011b) 利用 ROCSAT-1 卫星数据研究了电离层等离子体电动力学垂直漂移的春秋分不对称性, 发现该不对称性明显依赖于地方时和经度, 与 Liu (2010b)的观测结果一致. 利用获得的漂移数据和 TIDM-IGGCAS 电

离层模式, Ren 等(2011b)还模拟了这个春秋分不对称对电离层等离子体密度春秋分不对称的影响. 发现白天垂直等离子体漂移的不对称性能够部分解释 Liu 等(2010b)的观测结果. 进一步, Ren 等(2012b)利用 TIDM-IGGCAS-II 电离层发电机模式模拟了低热层风对赤道区垂直等离子体漂移春秋分不对称性的影响, 发现 DW1, SW2, DE3 和 DW2 四种潮汐主要驱动了春秋分不对称. Lei 等(2011, 2013)利用卫星观测并结合数值模拟, 分别研究低层大气潮汐对低热层大气的纬度结构影响并甄别了日地距离、地球磁场位形与低层大气潮汐对产生 6 月与 12 月期间热层大气差异性的贡献. Luan 等(2012)分析了 1999~2011 年全球电离层 TEC 中 8 小时潮汐分量随纬度、季节和太阳活动周期的变化, 发现潮汐分量的幅度随纬度和太阳活动周期变化显著. 该潮汐分量最高幅度在磁赤道最大, 在太阳活动高年最大可达 8 TEC 单位, 在太阳活动低年最小为 1.5 TEC 单位. 在春秋季, 8 小时潮汐分量的幅度在南北半球的中纬区域也出现峰值.

此外, 在平流层爆发性增温事件(SSW)对电离层的影响的研究中, Xiong 等(2013)利用北京站观测数据研究了 2009 年 1~2 月的平流层增温事件, 发现事件中电离层 TEC 的半日变化显著增强且发生了相移. 通过对比同时期的中间层风场观测数据, 他们发现中间层的太阳半日潮汐和太阴半日潮汐对 TEC 的半日变化都有一定贡献, 而太阴半日潮的增强能够较好地解释 TEC 半日变化的相移. Mo 等(2014)对 2005~2006 年平流层增温期间电离层赤道异常峰形态进行了研究, 发现在此期间电离层赤道异常峰存在着振幅达 2°左右的准 16 天周期的经向运动现象, 且这种赤道异常峰的经向周期运动是全球性的.

5 热层与电离层之间的耦合

带电粒子与背景中性气体之间的碰撞是电离层高度最为重要的基本物理过程之一, 这一过程使得电离层的电离部分与热层背景大气之间产生相互作用和相互控制, 形成了非常繁多和复杂的电离层与热层现象.

热层风场与地磁场变化一起驱动和控制电离层等离子体, 产生电离层大尺度的分布与变化, 形成所谓地区性的电离层异常. 近年来, 中国学者在电离层对热层风场响应方面开展了系列研究. 利用掩星观测, He 等(2009)研究了电离层“威德尔海异常”现象和中纬度地区电离层夜间演化过程, 并将“威德尔海异常”作为地区性“电离层夜间增强”的特例, 归因于热层中性风的周日演化和特殊的地磁场位型之间的作用. Ren 等(2012c)模拟了在真实地磁场条件下中纬夏季“电离层夜间增强”现象, 发现该类异常现象主要发生在东亚、北美和北大西洋和南太平洋区, 其物理原因主要由热层风和地磁场的共同作用所驱动. Zhao 等(2013) 利用远东地区三对测高仪及掩星资料研究了该区域东西部电离层差异. 如图 6 所示, 远东地区 5~9 月的电离层电子浓度白天西部高于东部, 而夜间东部高于西部; 西部白天电离层峰值高度高于东部约 30~50 km. 通过提取峰高和模式计算的漂移贡献推算, 该区域差异可由地磁偏角分布调制的垂直风场漂移引起. Xu J S 等(2014)也分析不同经度的电离层电子总含量 TEC, 得出不同区域的 TEC 存在不同的经度变化特性, 他们进一步分析发现, 该经度变化可能与地磁场磁偏角以及纬向风场共同作用有关. Luan 和 Dou (2013)运用掩星群观测电离层最大电子密度和峰值高度数据, 分析电离层最大电子密度和 F2 层中性风的经度与季节变化; 研究了风力漂移对该区域夜间电离层形态和变化的影响, 以及地磁场形态对东西和南北向风力漂移的调制作用.

除大尺度背景风场外, 热层中的大气重力波也是引起电离层变化的重要因素. 基于全球的 GPS 及测高仪台网观测, Ding 等(2012, 2013)和 Song 等(2012)揭示了中国和美国地区大尺度电离层行进式扰动的传播特性, 并分析了传播过程和机理. Ding 等(2011)

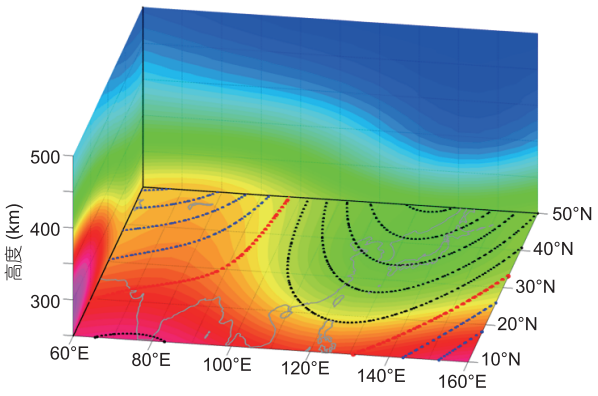

图 6 2007~2008 年夏季远东地区电离层的三维分布和地磁偏角变化(虚线)

摘自 Zhao 等(2013)

还利用测高仪链等综合观测手段, 研究了中尺度电离层扰动在中国区域的地域特性, 分析了中尺度电离层行进式扰动在中低纬地区的激发机理、经纬度分布以及变化特征, 并认为夜间的行扰与电离层 F 区不规则体有关. Song 等(2013)利用中国的 GPS 及测高仪台网观测研究了日夜交替线引起的电离层扰动的季节变化特性. 最近, Ding 等(2014)利用中国陆态网及国家气象局的有关 GPS 网络的总共近 800 台 GPS 接收机的观测, 报道了神州 10 号飞船发射导致的电离层扰动. Xu 等(2008)研究了东亚地区的 TEC 与青藏高原周边对流层环流的关系, 发现 TEC 的逐日变化与亚洲纬向环流指数正相关, 并认为这可能与高原周边对流层激发的内重力波有关. Li G Z 等(2012)利用三亚 VHF 雷达观测研究了中国低纬大尺度波动结构(LSWS)和赤道扩展 F(ESF)出现率的统计相关性, 揭示出 LSWS 是 ESF 发生的必要(非充分)条件. Li G Z 等(2013a)进一步利用 EAR 雷达和三亚 VHF 雷达的联合观测, 发现区域范围内 ESF 的发生差异可能与小尺度波动结构(SSWS)有关, 当 SSWS 与 LSWS 同时存在时更容易触发产生 ESF 结构. Li G Z 等(2013b)还发现在电离层谷区不均匀体发生前 150 km 高度存在密度增加的薄层结构, 认为低纬三亚谷区不均匀体可能由重力波驱使的交互式梯度漂移不稳定性触发产生. 此外, 利用电离层高频多普勒观测资料, Xiao 等(2007), Xiao 等(2009)以及 Hao 等(2012)分别研究了台风、地震等激发的电离层扰动, 他们将观测到的扰动归因于大气声重力波的传播.

在大气层与电离层耦合研究中, 电离层的电离部分对热层背景大气的作用也是近年来的另一研究热点. 电离层带电粒子通过与中性大气的碰撞, 可以产生阻碍背景大气运动的摩擦力, 从而影响热层大气状态. Lei 等(2012a, 2012b)通过完善现有的全球电离层热层耦合模式, 并结合多年的卫星观测数据, 详细研究了热层赤道异常的形成机制. 他们研究发现, 热层赤道异常槽和驼峰的形成原因不同. 离子与中性大气的场向拖曳作用形成热层赤道槽, 而离子与中性气体相互碰撞引起的能量交换是热层赤道异常驼峰的形成原因. 如图 7 所示, 热层赤道异常的驼峰-槽温度差为 46 K, 400 km 高度对应的热层密度的峰-槽比为 1.06, 而且热层赤道异常驼峰位于电离层赤道异常驼峰的外侧. 这些特征与卫星观测较为一致

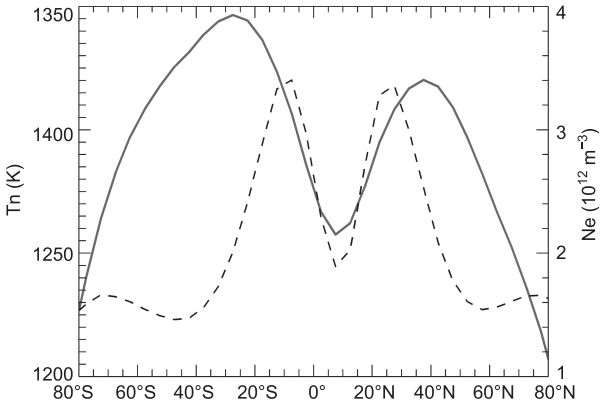

图 7　理论模式模拟包括场向离子拖曳及离子-中性碰撞加热作用条件下热层大气温度随地理纬度的分布

间断线表示电离层 F2 层最大电子浓度(单位为 10^{12} m^{-3}). 地方时为 14:00 点, 经度为 110°E

(Liu 等, 2007; Lei 等, 2010a, 2012c). 另外, Ma 等(2010)和 Liu 等(2011)分析卫星观测数据显示夜间也出现类似白天的热层赤道异常结构, 尽管夜间驼峰现象出现几率较低. 夜间热层赤道异常结构是否由于电离层-热层相互作用引起也是进一步需要研究的科学问题.

电离层与热层相互耦合过程除了上述动量交换之外, 两者间的能量传递也能导致高层大气呈现复杂的变化. Ruan 等(2013)研究表明, 电离层共轭电子加热使得日落电子温度升高, 并通过等离子体-中性大气碰撞加热进一步加热离子与中性大气, 形成子夜前中性大气增温现象. 磁暴期间, 与粒子沉降相关的电离层电导率增加, 同时由于增强的电离层对流导致焦耳加热等大量能量的注入, 引起热层大气的剧烈变化(Richmond 和 Lu, 2000; Lei 等, 2010b, 2012d). Xu 等(2013a, 2013b)利用卫星探测资料的分析发现, 在地磁宁静条件下, 极光加热对热层大气结构仍具有显著影响. 极光加热会在高纬热层大气引起 10%~20%的纬圈变化结构, 并且极光加热的效应可以穿透到 105 km 的中性大气.

由于热层与电离层之间的耦合表现为相互作用, 其物理过程极为复杂, 因此开发实用的电离层热层理论模式, 不仅是电离层热层耦合研究中重要的基础性工作, 也是深入研究热层电离层耦合机理, 理解相关观测现象的重要途径. 最近, Ren 等(2009b)新开发了一个时变三维的全球电离层/热层耦合模式. 该模式采用基于高度网格的地理坐标系, 自适应计算

电离层/热层区域的中性成分和电子的数密度, 电子、离子和中性温度, 中性风场和电离层电场的时变三维结构, 能够模拟 90~600 km 高度之间全球电离层/热层区域的物理、化学过程. 该模式已被用来模拟高层大气变化对电离层的作用(Ren 等, 2011a, 2012a; Wan 等, 2012).

6 总结

高层大气与电离层的耦合, 主要表现为地面附近的能量向电离层高度的传输, 这种传输揭示了电离层空间天气的另一个来源, 即大气层-电离层垂直耦合, 这一来源有别于传统的太阳活动及太阳风-磁层-电离层耦合. Forbes 等(2000)及 Rishbeth 和 Mendillo (2001)曾经提出, 来自下面与来自上面的两个空间天气源的贡献相当, 因此高层大气和电离层的耦合研究在当前的空间天气研究中具有重要作用.

本文综述了高层大气与电离层耦合研究的近期进展, 着重强调了中国学者的工作, 总结如下:

(1) 近年来, 通过国家重大科技基础设施项目"子午工程"等的支持, 中国在完善了电离层地基观测的同时, 新建立了一批用于高层大气观测的地基设备. 其中, 建立了由北京、合肥、武汉和海口等台站的激光雷达等构成的光学观测链, 及漠河、北京、武汉和三亚等台站的流星雷达、MST 雷达等组成的无线电雷达子午链, 为中国的中高层大气研究提供了高质量的一手数据.

(2) 利用中国地基探测数据及国际卫星探测数据, 在高层大气若干气候学特征研究中, 得到了高层大气季节变化与年际变化特征及其对 ENSO, QBO, AO 和 SAO 等低层大气现象的响应; 与此同时, 还着重揭示了重力波、潮汐和行星波等大气波动在高层大气中传播和耗散的特性.

(3) 利用中国自主的光学和无线电探测资料, 发现并研究了电离层突发 E 层与大气行星波之间的耦合现象; 研究了突发金属层(特别是突发钠层, SSL)与流星注入、电离层突发 E 层的因果链关系; 统计研究了我国低热层钠层的观测特征, 揭示了中纬度低热层钠层与潮汐风场导致的电离层 E 区离子汇聚的可能关联.

(4) 利用全球 TEC 探测数据分析揭示了电离层四波经度结构(WN4)日变化与气候学(季节变化、太阳活动依赖)特性, 从对观测数据的统计分析中证实了 WN4 与高层大气非迁移潮汐 DE3 模之间的联系, 提出了一些新的 DE3-WN4 耦合的机理和模型.

(5) 利用观测数据和数值模拟探讨了热层风场引起的中纬电离层夜间异常增强的贡献, 并揭示离子与中性大气的场向拖曳作用是形成热层赤道槽的机制, 揭示了离子与中性气体相互碰撞引起的能量交换是热层赤道异常驼峰的形成机制.

综上所述, 近年来中国学者在高层大气与电离层的耦合研究领域的各个方面进行了大量工作, 包括实验观测及数据分析、模式化与理论研究等, 为这一领域近年来的进展与突破做出了巨大贡献.

致谢 本文写作过程中与窦贤康、雷久侯、李陶、任志鹏、薛向辉、张绍东等进行了讨论, 并使用了他们提供的材料, 在此致谢.

参考文献

陈丹, 陈泽宇, 吕达仁. 2011. 台风"麦莎"(Matsa)诱发平流层重力波的数值模拟. 中国科学: 地球科学, 41: 1786–1794
陈泽宇, 吕达仁. 2008. DE3 潮汐的全球结构. 科学通报, 53: 2940–2946
龚顺生, 曾锡之, 薛新建, 等. 1997. 中国武汉上空钠层的首次激光雷达观测. 中国科学 A 辑, 40: 369–373
姜国英, 徐寄遥, 史建魁, 等. 2010. 我国海南上空中高层大气潮汐风场的首次观测分析. 科学通报, 55: 923–930
刘立波, 万卫星, 陈一定, 等. 2011. 电离层与太阳活动性关系. 科学通报, 56: 477–487
穆文锋, 万卫星, 任志鹏, 等. 2011. 电离层经度变化波数谱成分与高层大气潮汐模的相关性. 科学通报, 56: 35–43
涂翠, 胡雄, 闫召爱, 等. 2009. 中国首次中层顶大气重力波成像观测实验. 科学通报, 54: 3784–3789
袁韦华, 徐寄遥, 马瑞平, 等. 2010. 我国光学干涉仪对中高层大气风场的首次观测. 科学通报, 55: 3378–3383
Abdu M A, Pancheva D, Bhattacharyya A. 2011. Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere. Heidelberg: Springer

Andrews D G, Holton J R, Leovy C B. 1987. Middle Atmosphere Dynamics. San Diego: Academic Press
Basu S, Pallamraju D. 2006. Science rationale for CAWSES (Climate and Weather of the Sun-Earth System): SCOSTEP's interdisciplinary program for 2004–2008. Adv Space Res, 38: 1781–1791
Chapman S, Lindzen R S. 1970. Atmospheric Tides. Norwell: Reidel Mass
Chen L, Yi F. 2011. Average properties and small-scale variations of the mesospheric Na and Fe layers as observed simultaneously by two closely collocated lidars at 30°N. Ann Geophys, 29: 1037–1048
Christensen A B, Walterscheid R L, Ross M N, et al. 1994. Global Ultraviolet Imager (GUVI) for the NASA Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) mission. Proc SPIE, 2266: 451–466
Collins S C, Plane J M C, Kelley M C, et al. 2002. A study of the role of ion-molecule chemistry in the formation of sporadic sodium layers. J Atmos Sol-Terr Phy, 64: 845–860
Chu X Z, Yu Z B, Gardner C S, et al. 2011. Lidar observations of neutral Fe layers and fast gravity waves in the thermosphere (110–155 km) at McMurdo (77.8°S, 166.7°E), Antarctica. Geophys Res Lett, 38: L23807
Ding F, Wan W X, Xu G R, et al. 2011. Climatology of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by a GPS network in central China. J Geophys Res, 116: A09327
Ding F, Wan W X, Ning B Q, et al. 2012. Two-dimensional imaging of large-scale traveling ionospheric disturbances over China based on GPS data. J Geophys Res, 117: A08318
Ding F, Wan W X, Ning B Q, et al. 2013. Observations of poleward-propagating large-scale traveling ionospheric disturbances in southern China. Ann Geophys, 31: 377–385
Ding F, Wan W X, Mao T, et al. 2014. Ionospheric response to the shock and acoustic waves excited by the launch of the Shenzhou 10 spacecraft. Geophys Res Lett, 41, doi: 10.1002/2014GL060107
Dou X K, Li T, Xu J Y, et al. 2009a. Seasonal oscillations of middle atmosphere temperature observed by Rayleigh lidars and their comparisons with TIMED/SABER observations. J Geophys Res, 114: D20103
Dou X K, Xue X H, Chen T D, et al. 2009b. A statistical study of sporadic sodium layer observed by sodium lidar at Hefei (31.8°N, 117.3°E). Ann Geophys, 27: 2247–2257
Dou X K, Xue X H, Li T, et al. 2010a. Possible relations between Meteors, enhanced electron density layers and sporadic sodium layers. J Geophys Res, 115: A06311
Dou X K, Li T, Tang Y H, et al. 2010b. Variability of gravity wave occurrence frequency and propagation direction in the upper mesosphere observed by the OH imager in Northern Colorado. J Atmos Sol-Terr Phy, 72: 457–462
Dou X K, Qiu S C, Xue X H, et al. 2013. Sporadic and thermospheric enhanced sodium layers observed by a lidar chain over China. J Geophys Res-Space, 118: 6627–6643
Feng W H, Marsh D R, Chipperfield M P, et al. 2013. A global atmospheric model of meteoric iron. J Geophys Res, 118: D50708
Forbes J M, Palo S E, Zhang X L. 2000. Variability of the ionosphere. J Atmos Sol-Terr Phy, 62: 685–693
Friedman J S, Chu X, Brum C G M, et al. 2013. Observation of a thermospheric descending layer of neutral K over Arecibo. J Atmos Sol-Terr Phy, doi: 10.1016/j.jastp.2013.03.002
Fritts D C, Alexander M J. 2003. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. Rev Geophys, 41: 1003
Gan Q, Zhang S D, Yi F. 2012. TIMED/SABER observations of lower mesospheric inversion layers at low and middle latitudes. J Geophys Res, 117: D07109
Garcia R R, Dunkerton T J, Lieberman R S, et al. 1997. Climatology of the semiannual oscillation of the tropical middle atmosphere. J Geophys Res, 102: 26019–26032
Gardner C S, Voelz D G. 1987. Lidar studies of the nighttime sodium layer over Urbana, Illinois, 2: Gravity waves. J Geophys Res, 92: 4673–4693
Gong S H, Yang G T, Xu J Y, et al. 2013. Statistical characteristics of atmospheric gravity wave in the mesopause region observed with a sodium lidar at Beijing, China. J Atmos Sol-Terr Phy, 97: 143–151
Gong S S, Yang G T, Wang J M, et al. 2003. A double sodium layer event observed over Wuhan China by lidar. Geophys Res Lett, 30: 1209
Gong Y, Zhou Q H. 2011. Incoherent scatter radar study of the terdiurnal tide in the E- and F-region heights at Arecibo. Geophys Res Lett, 38: L15101
Gong Y, Zhou Q H, Zhang S D. 2013. Atmospheric tides in the low latitude E- and F-region and their response to a sudden stratospheric warming in January 2010. J Geophys Res-Space, 118: 7913–7927
Gu S Y, Li T, Dou X K, et al. 2013a, Observations of quasi-two-day wave by TIMED/SABER and TIMED/TIDI. J Geophys Res-Atmos, 118: 1624–1639

Gu S Y, Li T, Dou X K, et al. 2013b. Long-term observations of the quasi two-day wave by Hawaii MF radar. J Geophys Res-Space, 118: 7886–7894

Guo J P, Wan W X, Forbes J M, et al. 2007. Effects of solar variability on thermosphere density from CHAMP accelerometer data. J Geophys Res, 112: A10308

Hao Y Q, Xiao Z, Zhang D H. 2012. Multi-instrument observation on co-seismic ionospheric effects after great Tohoku earthquake. J Geophys Res, 117: A02305

He M S, Liu L B, Wan W X, et al. 2009. A study of the Weddell Sea Anomaly observed by FORMOSAT-3/COSMIC. J Geophys Res, 114: A12309

He M S, Liu L B, Wan W X, et al. 2010. Longitudinal modulation of the O/N_2 column density retrieved from TIMED/GUVI measurement. Geophys Res Lett, 37: L20108

Höffner J, Friedman J S. 2004. Metal layers at high altitudes: A possible connection to meteoroids. Atmos Chem Phys Discuss, 4: 399–417

Höffner J, Friedman J S. 2005. The mesospheric metal layer topside: Examples of simultaneous metal observations. J Atmos Sol-Terr Phy, 67: 1226–1237

Holton J R. 1982. The role of gravity wave induced drag and diffusion in the momentum budget of the mesosphere. J Atmos Sci, 39: 791–799

Holton J R, Alexander M J. 2000. The role of waves in the transport circulation of the middle atmosphere. In: Atmospheric Science Across the Stratopause. Geophys Monogr Ser, 123: 21–35

Huang C M, Zhang S D, Yi F. 2009. Intensive radiosonde observations of the diurnal tide and planetary waves in the lower atmosphere over Yichang (111°18′E, 30°42′N). Ann Geophys, 27: 1079–1095

Huang C M, Zhang S D, Zhou Q, et al. 2012. Atmospheric waves and their interactions in the thermospheric neutral wind as observed by the Arecibo incoherent scatter radar. J Geophys Res, 113: D02102

Huang C M, Zhang S D, Yi F, et al. 2013. Frequency variations of gravity waves interacting with a time-varying tide. Ann Geophys, 31: 1731–1743

Huang K M, Zhang S D, Yi F. 2009. Gravity wave excitation through resonant interaction in a compressible atmosphere. Geophys Res Lett, 36: L01803

Huang K M, Zhang S D, Yi F. 2010. Reflection and transmission of atmospheric gravity waves in a stably sheared horizontal wind field. J Geophys Res, 115: D16103

Huang K M, Liu A Z, Zhang S D, et al. 2012. Spectral energy transfer of atmospheric gravity waves through sum and difference nonlinear interactions. Ann Geophys, 30: 303–315

Huang K M, Zhang S D, Yi F, et al. 2013a. Third-order resonant interaction of atmospheric gravity waves. J Geophys Res-Atmos, 118: 2197–2206

Huang K M, Liu A Z, Lu X, et al. 2013b. Nonlinear coupling between quasi two-day wave and tides based on meteor radar observations at Maui. J Geophys Res, 118: 10936–10943

Huang K M, Liu A Z, Zhang S D, et al. 2013c. A strong nonlinear interaction event between 16-day wave and diurnal tide from meteor radar observations. Ann Geophys, 31: 2039–2048

Huang Y Y, Zhang S D, Yi F, et al. 2013. Global climatological variability of quasi-two-day waves revealed by SABER/TIMED observations. Ann Geophys, 31: 1061–1075

Immel T J, Sagawa E, England S L, et al. 2006. Control of equatorial ionospheric morphology by atmospheric tides. Geophys Res Lett, 33: L15108

Jiang G Y, Xu J Y, Xiong J, et al. 2008. A case study of the mesospheric 6.5-day wave observed by radar systems. J Geophys Res, 113: D16111

Jiang G Y, Xu J Y, Franke S J. 2009. The 8-h tide in the mesosphere and lower thermosphere over Maui (20.75°N, 156.43°W). Ann Geophys, 27: 1989–1999

Jiang G Y, Xu J Y, Yuan W, et al. 2012. A comparison of mesospheric winds measured by FPI and meteor radar located at 40ºN. Sci China Tech Sci, 55: 1245–1250

Killeen T L, Skinner W R, Johnson R M, et al. 1999. The TIMED doppler interferometer (TIDI). Proc SPIE, 3756: 289–303

Killeen T L, Wu Q, Solomon S C, et al. 2005. TIMED Doppler interferometer: Overview and recent results. J Geophys Res, 111: A10S01

Leblanc T, McDermid I S, Keckhut P, et al. 1998. Temperature climatology of the middle atmosphere from long-term lidar measurements at middle and low latitudes. J Geophys Res, 103: 17191–17204

Lei J H, Thayer J P, Forbes J M. 2010a. Longitudinal and geomagnetic activity modulation of the equatorial thermosphere anomaly. J Geophys Res, 115: A08311

Lei J H, Thayer J P, Burns A G, et al. 2010b. Wind and temperature effects on thermosphere mass density response to the November 2004

geomagnetic storm. J Geophys Res, 115: A05303
Lei J H, Forbes J M, Liu H L, et al. 2011. Latitudinal variations of middle thermosphere: Observations and modeling. J Geophys Res, 116: A12306
Lei J H, Thayer J P, Wang W, et al. 2012a. Simulations of the equatorial thermosphere anomaly: Field-aligned ion drag effect. J Geophys Res, 117: A01304
Lei J H, Thayer J P, Wang W, et al. 2012b. Simulations of the equatorial thermosphere anomaly: Physical mechanisms for crest formation. J Geophys Res, 117: A06318
Lei J H, Matsuo T, Dou X, et al. 2012c. Annual and semiannual variations of thermospheric density: EOF analysis of CHAMP and GRACE data. J Geophys Res, 117: A01310
Lei J H, Burns A G, Thayer J P, et al. 2012d. Overcooling in the upper thermosphere during the recovery phase of the 2003 October storms. J Geophys Res, 117: A03314
Lei J H, Dou X K, Burns A G, et al. 2013. Annual asymmetry in thermospheric density: Observations and simulations. J Geophys Res-Space, 118: 2503–2510
Li G Z, Ning B Q, Liu L B, et al. 2008. Correlative study of plasma bubbles, evening equatorial ionization anomaly, and equatorial prereversal E×B drifts at solar maximum. Radio Sci, 43: RS4005
Li G Z, Ning B Q, Abdu M A, et al. 2012. Precursor signatures and evolution of post-sunset equatorial spread-F observed over Sanya. J Geophys Res, 117: A08321
Li G Z, Ning B Q, Abdu M A, et al. 2013a. Longitudinal characteristics of spread F backscatter plumes observed with the EAR and Sanya VHF radar in Southeast Asia. J Geophys Res-Space, 118: 6544–6557
Li G Z, Ning B Q, Patra A K, et al. 2013b. On the linkage of daytime 150km echoes and abnormal intermediate layer traces over Sanya. J Geophys Res-Space, 118: 7262–7267
Li Q, Xu J Y, Yue J, et al. 2011. Statistical characteristics of gravity wave activities observed by an OH airglow imager at Xinglong, in northern China. Ann Geophys, 29: 1401–1410
Li Q, Xu J Y, Yue J, et al. 2013. Investigation of a mesospheric bore event over northern China. Ann Geophys, 31: 409–418
Li T, She C Y, Liu H L, et al. 2007. Evidence of a gravity wave breaking event and the estimation of wave characteristics from sodium lidar observation over Fort Collins, CO (41°N, 105°W). Geophys Res Lett, 34: L05815
Li T, Leblanc T, McDermid I S. 2008. Interannual variations of middle atmospheric temperature as measured by the JPL lidar at Mauna Loa Observatory, Hawaii (19.5°N, 155.6°W). J Geophys Res, 113: D14109
Li T, She C Y, Liu H L, et al. 2009. Observation of local tidal variability and instability, along with dissipation of diurnal tidal harmonics in the mesopause region over Fort Collins, CO (41°N, 105°W). J Geophys Res, 114: D06106
Li T, Leblanc T, McDermid I S, et al. 2010. Seasonal and inter-annual variability of gravity wave activity revealed by long-term lidar observations over Mauna Loa Observatory, Hawaii. J Geophys Res, 115: D13103
Li T, Leblanc T, McDermid I S, et al. 2011. Middle atmosphere temperature trend and solar cycle revealed by long-term Rayleigh lidar observations. J Geophys Res, 116: D00P05
Li T, Fang X, Liu W, et al. 2012a. Narrowband sodium lidar for the measurements of mesopause region temperature and wind. Appl Opt, 51: 5401–5411
Li T, Liu A Z, Lu X, et al. 2012b. Meteor-radar observed mesospheric semi-annual oscillation (SAO) and quasi-biennial oscillation (QBO) over Maui, Hawaii. J Geophys Res, 117: D05130
Li T, Calvo N, Yue J, et al. 2013. Influence of El Niño-Southern Oscillation in the mesosphere. Geophys Res Lett, 40: 3292–3296
Lindzen R S. 1981. Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown. J Geophys Res, 86: 9707–9714
Liu H L, Hagan M E. 1998. Local heating/cooling of the mesosphere due to gravity wave and tidal coupling. Geophys Res Lett, 25: 2941–2944
Liu H X, Lühr H, Watanabe S. 2007. Climatology of the equatorial thermospheric mass density anomaly. J Geophys Res, 112: A05305
Liu J, Liu L B, Zhao B Q, et al. 2011. On the relationship between the post midnight thermospheric equatorial mass anomaly and equatorial ionization anomaly under geomagnetic quiet conditions. J Geophys Res, 116: A12312
Liu L B, He M S, Wan W X, et al. 2008. Topside ionospheric scale heights retrieved from Constellation Observing System for meteorology, ionosphere, and climate radio occultation measurements. J Geophys Res, 113: A10304
Liu L B, Zhao B Q, Wan W X, et al. 2009. Seasonal variations of the ionospheric electron densities retrieved from Constellation Observing System for meteorology, ionosphere, and climate mission radio occultation measurements. J Geophys Res, 114: A02302
Liu L B, Wan W X, Ning B Q, et al. 2010a. Longitudinal behaviors of the IRI-B parameters of the equatorial electron density profiles retrieved from FORMOSAT-3/COSMIC radio occultation measurements. Adv Space Res, 46: 1064–1069
Liu L B, He M S, Yue X A, et al. 2010b. Ionosphere around equinoxes during low solar activity. J Geophys Res, 115: A09307

Liu X, Xu J Y, Liu H L, et al. 2008. Nonlinear interactions between gravity waves with different wavelengths and diurnal tide. J Geophys Res, 113: D08112

Liu X, Xu J Y, Gao H, et al. 2009. Kelvin-Helmholtz billows and their effects on mean state duringgravity wave propagation. Ann Geophys, 27: 2789–2798

Liu X, Zhou Q H, Yuan W, et al. 2012. Influences of non-isothermal atmospheric backgrounds on variations of gravity wave parameters. Sci China Tech Sci, 55: 1251–1257

Liu X, Xu J Y, Yue J, et al. 2013. Numerical modeling study of the momentum deposition of small amplitude gravity waves in the thermosphere. Ann Geophys, 31: 1–14

Luan X L, Dou X K, Lei J H, et al. 2012. Terdiurnal migrating-tide signature in ionospheric total electron content. J Geophys Res, 117: A11302

Luan X L, Dou X K. 2013. Seasonal dependence of the longitudinal variations of nighttime ionospheric electron density and equivalent winds at southern midlatitudes. Ann Geophys, 31: 1699–1708

Ma R P, Xu J Y, Wang W B, et al. 2010. Variations of the nighttime thermospheric mass density at low and middle latitudes. J Geophys Res, 115: A12301

Marsh D R, Janches D, Feng W, et al. 2013. A global model of meteoric sodium. J Geophys Res-Atmos, 118: 11442–11452

Mo X H, Zhang D H, Goncharenko L P, et al. 2014. Quasi-16-day periodic meridional movement of the equatorial ionization anomaly. Ann Geophys, 32: 121–131, doi:10.5194/angeo-32-121-2014

Niciejewski R J, Killeen T L, Turnbull M. 1994. Ground-based fabry-perot interferometry of the terrestrial nightglow with a bare charge-coupled device: Remote field site deployment. Opt Eng, 33: 457–465

Niu X J, Xiong J G, Wan W X, et al. 2005. Lunar tidal winds in the mesosphere over wuhan and adelaide. Adv Space Res, 36: 2218–2222

Pancheva D V, Fejer B G, Garcia R R, et al. 2006. Vertical coupling in the atmosphere/ionosphere system. J Atmos Sol-Terr Phy, 68: 245–598

Pancheva D V, Haldoupis C, Marsh D R, et al. 2007. Vertical coupling in the atmosphere/ionosphere system. J Atmos Sol-Terr Phy, 69: 2081–2522

Pancheva D, Shiokawa K, Knizova P, et al. 2012. Recent progress in the vertical coupling in the atmosphere-ionosphere system. J Atmos Sol-Terr Phy, 90-91: 1–222

Peterson A W, Kieffaber L M. 1973. Infrared photography of OH airglow structures. Nature, 242: 321–322

Peterson A W, 1979. Airglow events visible to the naked eye. Applied Optics, 18: 3390–3393

Plane J M C. 2004. A new time-resolved model of the mesospheric Na layer: Constraints on the meteor input function. Atmos Chem Phys Discuss, 4: 39–69

Reigber C, Lühr H, Schwintzer P. 2002. CHAMP mission status, Adv Space Res, 30: 129–134, doi: 10.1016/S0273-1177(02)00276-4

Ren Z P, Wan W X, Liu L B, et al. 2008. Longitudinal variations of electron temperature and total ion density in the sunset equatorial topside ionosphere. Geophys Res Lett, 35: L05108

Ren Z P, Wan W X, Liu L B, et al. 2009a. Intra-annual variation of wave number 4 structure of vertical E×B drifts in the equatorial ionosphere seen from Rocsat-1. J Geophys Res, 114: A05308

Ren Z P, Wan W X, Liu L B. 2009b. GCITEM-IGGCAS: A new global coupled ionosphere-thermosphere-electro dynamics model. J Atmos Sol-Terr Phy, 71: 2064–2076

Ren Z P, Wan W X, Xiong J G, et al. 2010. Simulated wave number 4 structure in equatorial F-region vertical plasma drifts. J Geophys Res, 115: A05301

Ren Z P, Wan W X, Liu L B. et al. 2011a. Simulated longitudinal variations in the lower thermospheric nitric oxide induced by nonmigrating tides. J Geophys Res, 116: A04301

Ren Z P, Wan W X, Liu L B. et al. 2011b. Equinoctial asymmetry of ionospheric vertical plasma drifts and its effect on F-region plasma density. J Geophys Res, 116: A02308

Ren Z P, Wan W X, Liu L B. et al. 2012a. Simulated longitudinal variations in the E-region plasma density induced by non-migrating tides. J Atmos Sol-Terr Phy, 90-91: 68–76

Ren Z P, Wan W X, Xiong J G. et al. 2012b. Simulated equinoctial asymmetry of the ionospheric vertical plasma drifts. J Geophys Res, 117: A01301

Ren Z P, Wan W X, Liu L B. et al. 2012c. Simulated midlatitude summer nighttime anomaly in realistic geomagnetic fields. J Geophys Res, 117: A03323

Richmond A D, Lu G. 2000. Upper-atmospheric effects of magnetic storms: A brief tutorial. J Atmos Sol-Terr Phy, 62: 1115–1127

Rishbeth H. 2006. F-region links with the lower atmosphere? J Atmos Sol-Terr Phy, 68: 469–478

Rishbeth H, Mendillo M. 2001. Patterns of F2-layer variability. J Atmos Sol-Terr Phy, 63: 1661–1680

Robert F, Pfaff R F. 2012. The near-earth plasma environment. Space Sci Rev, 168: 23–112

Ruan H B, Lei J H, Dou X K, et al. 2013. Enhancements of nighttime neutral and ion temperatures in the Fregion over Millstone Hill. J Geophys Res-Space, 118: 1768–1776

Russell III J M, Mlynczak M G, Gordley L L, et al. 1999. Overview of the SABER experiment and preliminary calibration results. Proc SPIE, 3756: 277–288

Sagawa E T, Immel J, Frey H U, et al. 2005. Longitudinal structure of the equatorial anomaly in the nighttime ionosphere observed by IMAGE/FUV. J Geophys Res, 110: A11302

Schmieder B, Vincent B, Baumjohann W, et al. 2004. Climate and weather of the sun-earth system: Cawses. Adv Space Res, 34: 443–448

She C Y, Yu J R, Latifi H, et al. 1992. High-spectral-resolution fluorescence light detection and ranging for mesospheric sodium temperature measurements. Appl Optics, 31: 2095–2106

Shu Z F, Dou X K, Xia H Y, et al. 2012. Low stratospheric wind measurement using mobile rayleigh doppler wind lidar. J Opt Soc Korea, 16: 141–144

Song Q, Ding F, Wan W X, et al. 2012. Global propagation features of large-scale traveling ionospheric disturbances during the magnetic storm of 7–10 November 2004. Ann Geophys, 30: 683–694

Song Q, Ding F, Wan W X, et al. 2013. Statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances generated by the solar terminator over China. J Geophys Res-Space Physics, 118: 4583–4593

Sutton E K, Nerem R S, Forbes J M. 2007. Density and winds in the thermosphere deduced from accelerometer data. J Spacecraft Rockets, 44: 1210–1219

Tang Y H, Dou X K, Li T, et al. 2014. Gravity wave characteristics in the mesopause region revealed from OH airglow imager observations over Northern Colorado. J Geophys Res-Space Physics, 119: 630–645, doi: 10.1002/2013JA018955

Taylor M J. 1997. A review of advances in imaging techniques for measuring short period gravity waves in the mesosphere and lower thermosphere. Adv Space Res, 19: 667–676

Wan W X, Liu L B, Pi X Q, et al. 2008. Wavenumber-4 patterns of the total electron content over the low latitude ionosphere. Geophys Res Lett, 35: L12104

Wan W X, Xiong J, Ren Z P, et al. 2010. Correlation between the ionospheric WN4 signature and the upper atmospheric DE3 tide. J Geophys Res, 115: A11303

Wan W X, Ren Z P, Ding F. et al. 2012. A simulation study for the couplings between DE3 tide and longitudinal WN4 structure in the thermosphere and ionosphere. J Atmos Sol-Terr Phy, 90-91: 52–60

Wang J H, Yang Y, Cheng X W, et al. 2012. Double sodium layers observation over Beijing, China. Geophys Res Lett, 39: L15801

Wu Q, Gablehouse D, Solomon S C, et al. 2004. A new Fabry-Perot interferometer for upper atmospheric research. Proc SPIE, 5660: 218–227

Wu Y F, Xu J Y. 2006. Comparison of horizontal velocity spectra derived from chaff rockets with saturation models. J Geophys Res, 111: D13109

Xia H Y, Dou X K, Sun D S, et al. 2012. Mid-altitude wind measurements with mobile rayleigh doppler lidar incorporating system-level optical frequency control method. Opt Express, 20: 15286–15300

Xiao Z, Xiao S G, Hao Y Q, et al. 2007. Morphological features of ionospheric response to typhoon. J Geophys Res, 112: A04304

Xiao S G, Xiao Z, Shi J K, et al. 2009. Observational facts in revealing a close relation between acoustic-gravity waves and midlatitude spread *F*. J Geophys Res, 114: A01303

Xiong J G, Wan W X, Ning B Q, et al. 2004. First results of the tidal structure in the MLT revealed by Wuhan meteor radar (30°40′N, 114°30′E). J Atmos Sol-Terr Phy, 66: 675–682

Xiong J G, Wan W X, Ding F, et al. 2013. Coupling between mesosphere and ionosphere over Beijing through semidiurnal tides during the 2009 sudden stratospheric warming. J Geophys Res-Space, 118: 2511–2521

Xu G R, Wan W X, She C L, et al. 2008. The relationship between ionospheric total electron content (TEC) over East Asia and the tropospheric circulation around the Qinghai-Tibet Plateau obtained with a partial correlation method. Adv Space Res, 42: 219–223

Xu J Y, Smith A K. 2003a. Perturbations of the sodium layer: Controlled by chemistry or dynamics? Geophys Res Lett, 30: 2056, doi: 10.1029/2003GL018040.

Xu J Y, Smith A K, Ma R. 2003b. A numerical study of the effect of gravity-wave propagation on minor species distributions in the mesopause region. J Geophys Res-Atmos, 108: 4119

Xu J Y, Smith A K. 2005a. Evaluation of processes that affect the photochemical timescale of the sodium layer. J Atmos Sol-Terr Phy, 67: 1216–1225

Xu J Y, Smith A K, Wu Q. 2005b. A retrieval algorithm for satellite remote sensing of the nighttime global distribution of the sodium layer. J Atmos Sol-Terr Phy, 67: 739–748

Xu J Y, She C Y, Yuan W, et al. 2006a. Comparison between the temperature measurements by TIMED/SABER and lidar in the midlatitude. J Geophys Res, 111: A10S09

Xu J Y, Smith A K, Collins R L, et al. 2006b. Signature of an overturning gravity wave in the mesospheric sodium layer: Comparison of a nonlinear photochemical-dynamical model and lidar observations. J Geophys Res, 111: D17301

Xu J Y, Liu H L, Yuan W, et al. 2007a. Mesopause structure from termosphere, ionosphere, mesosphere, energetics, and dynamics (TIMED)/sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry (SABER) observations. J Geophys Res, 112: D09102

Xu J Y, Smith A K, Yuan W, et al. 2007b. Global structure and long-term variations of zonal mean temperature observed by TIMED/SABER. J Geophys Res, 112: D24106

Xu J Y, Smith A K, Liu H L, et al. 2009a. Seasonal and quasi-biennial variations in the migrating diurnal tide observed by thermosphere, ionosphere, mesosphere, energetics and dynamics (TIMED). J Geophys Res, 114: D13107

Xu J Y, Smith A K, Liu H L, et al. 2009b. Estimation of the equivalent rayleigh friction in mesosphere/lower thermosphere region from the migrating diurnal tides observed by TIMED. J Geophys Res, 114: D23103

Xu J Y, Smith A K, Jiang G Y, et al. 2010a. Seasonal variation of the hough modes of the diurnal component of ozone heating evaluated from aura microwave limb sounder observations. J Geophys Res, 115: D10110

Xu J Y, Smith A K, Jiang G Y, et al. 2010b. Strong longitudinal variations in the OH nightglow. Geophys Res Lett, 37: L21801

Xu J Y, Smith A K, Jiang G Y, et al. 2012a. Features of the seasonal variation of the semidiurnal, terdiurnal and 6-h components of ozone heating evaluated from Aura/MLS observations. Ann Geophys, 30: 259–281

Xu J Y, Gao H, Smith A K, et al. 2012b. Using TIMED/SABER nightglow observations to investigate hydroxyl emission mechanisms in the mesopause region. J Geophys Res, 117: D02301

Xu J Y, Wang W B, Gao H. 2013a. The longitudinal variation of the daily mean thermospheric mass density. J Geophys Res-Space, 118: 515–523

Xu J Y, Smith A K, Wang W B, et al. 2013b. An observational and theoretical study of the longitudinal variation in neutral temperature induced by aurora heating in the lower thermosphere. J Geophys Res-Space, 118: 7410–7425

Xu J Y, Smith A K, Liu M H, et al. 2014. Evidence for nonmigrating tides produced by the interaction between tides and stationary planetary waves in the stratosphere and lower mesosphere. J Geophys Res-Atmos, 119: 471–489

Xu J S, Li X J, Liu Y W, et al. 2014. TEC differences for the mid-latitude ionosphere in both sides of the longitudes with zero declination. Adv Space Res, doi: dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.01.010

Xue X H, Wan W X, Xiong J G, et al. 2007. Diurnal tides in mesosphere/low-thermosphere during 2002 at Wuhan (30.6°N, 114.4°E) using canonical correlation analysis. J Geophys Res, 112: D06104

Xue X H, Wan W X, Xiong J G, et al. 2008. The characteristics of the semi-diurnal tides in mesosphere/low-thermosphere (MLT) during 2002 at Wuhan (30.6°N, 114.4°E)—Using canonical correlation analysis technique. Adv Space Res, 41: 1415–1422

Xue X H, Dou X K, Lei J H, et al. 2013. Lower thermospheric-enhanced sodium layers observed at low latitude and possible formation: Case studies. J Geophys Res-Space, 118: 2409–2418

Yee J H, Cameron G E, Kusnierkiewicz D Y. 1999. Overview of TIMED. Proc SPIE, 3756: 244–254

Yi F, Zhang S D, Yue X C, et al. 2008. Some ubiquitous features of the mesospheric Fe and Na layer borders from simultaneous and common-volume Fe and Na lidar observations. J Geophys Res, 113: A04S91

Yi F, Yu C M, Zhang S D, et al. 2009. Seasonal variations of the nocturnal mesospheric Na and Fe layers at 30°N. J Geophys Res, 114: D01301

Yi F, Zhang S D, Yu C M, et al. 2013. Simultaneous and common-volume three-lidar observations of sporadic metal layers in the mesopause region. J Atmos Sol-Terr Phy, 102: 172–184

Yu J R, She C Y. 1993. Lidar-observed temperature structures and gravity-wave perturbations of the mesopause region in the springs of 1990–1992 over Fort Collins, CO. Appl Phys B-Photo, 57: 231–238

Yu Y, Wan W X, Ning B Q, et al. 2013. Tidal wind mapping from observations of a meteor radar chain in december 2011. J Geophys Res-Space, 118: 2321–2332

Yuan W, Liu X, Xu J Y, et al. 2013. FPI observations of nighttime mesospheric and thermospheric winds in China and their comparisons with HWM07. Ann Geophys, 31: 1365–1378

Zhang S D, Yi F, Huang C M, et al. 2010. Latitudinal and seasonal variations of lower atmospheric inertial gravity wave energy revealed by US radiosonde data. Ann Geophys, 28: 1065–1074

Zhang S D, Yi F, Huang C M, et al. 2012. High vertical resolution analyses of gravity waves and turbulence at a midlatitude station. J Geophys Res, 117: D02103

Zhang S D, Yi F, Huang C M, et al. 2013. Latitudinal and altitudinal variability of lower atmospheric inertial gravity waves revealed by U.S. radiosonde data. J Geophys Res-Atmos, 118: 7750–7764

Zhang Y, Xiong J G, Liu L B, et al. 2012. A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the 8-year SABER/TIMED data. J Geophys Res, 117: D21101, doi:10.1029/2012JD017676

Zhao B Q, Wan W X, Liu L B, et al. 2008. Anomalous enhancement of ionospheric electron content in the Asian-Australian region during a geomagnetically quiet day. J Geophys Res, 113: A11302

Zhao B Q, Wan W X, Reinisch B, et al. 2011a. Features of the F3 layer in the low-latitude ionosphere at sunset. J Geophys Res, 116: A01313

Zhao B Q, Wan W X, Yue X A, et al. 2011b. Global characteristics of occurrence of an additional layer in the ionosphere observed by COSMIC/FORMOSAT-3. Geophys Res Lett, 38: L02101

Zhao B Q, Wang M, Wang Y G, et al. 2013. East-west differences inf-region electron density at midlatitude: Evidence from the far east region. J Geophys Res-Space, 118: 542–553

Zhao G X, Liu L B, Ning B Q, et al. 2005a. The terdiurnal tide in the mesosphere and lower thermosphere over wuhan (30°N, 114°E). Earth Planets Space, 57: 393–398

Zhao G X, Liu L B, Wan W X, et al. 2005b. Seasonal behavior of meteor radar winds over wuhan. Earth Planets Space, 57: 61–70

Zhao L, Chen J S, Ding Z H, et al. 2012. First observations of tidal oscillations by an MF radar over Kunming (25.6°N 103.8°E). J Atmos Sol-Terr Phy, 78-79: 44–52

Zhu Y J, Xu J Y, Yuan W, et al. 2012. First experiment of spectrometric observation of hydroxyl emission and rotational temperature in the mesopause in China. Sci China Tech Sci, 55: 1312–1318

Zuo X M, Wan W X. 2008. Planetary wave oscillations in sporadic E layer occurrence at Wuhan. Earth Planets Space, 60: 647–652

Zuo X M, Wan W X, Zhao G X. 2009. An attempt to infer information on planetary wave by analyzing sporadic E layers observations. Earth Planets Space, 61: 1185–1190