

引用时, 务请用英文版信息(见本页底部)!

电离层与太阳活动性关系

刘立波^{①②}, 万卫星^①, 陈一定^①, 乐会军^①^① 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京空间环境国家野外科学观测研究站, 北京 100029;^② 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

E-mail: liul@mail.iggcas.ac.cn

2010-07-15 收稿, 2010-09-07 接受

国家自然科学基金(40725014)和空间天气学国家重点实验室专项基金资助项目

摘要 兼含着不同时间尺度的太阳电磁辐射变化无疑会调制电离层. 作为电离层物理的核心问题之一, 电离层对太阳活动性的依存关系是认知电离层结构与演变的基础. 本文简要地综述最近一些年在电离层的太阳活动性依赖特性方面取得的进展, 涉及的内容包括: (1) 在太阳辐射的观测与太阳活动指数方面, 以电离层研究的视角评述了太阳活动指数存在的问题, 统计证实了太阳活动指数与 EUV 辐射通量间的非线性关系, 以及改进太阳活动指数的一些努力; (2) 阐述了在不同高度电离层的太阳活动性依赖性的工作进展, 特别是最近的统计研究发现, 随着太阳 EUV 辐射通量变化, 电离层电子密度变化趋势与所在纬度、季节、地方时和高度有关, 可区分为准线性、放大和饱和 3 种类型, 取决于不同的主控物理过程; (3) 太阳活动历史序列和 23/24 太阳活动周极值展示出太阳活动性存在极端现象, 讨论了太阳辐射极端条件下的电离层状态; (4) 在电离层的耀斑响应方面, 对全球观测数据的分析研究揭示出耀斑期间电离层响应与一些太阳参数的统计关系, 特别是修正了以往关于电离层响应与天顶角无关的错误论断. 利用电离层模式成功模拟了耀斑期间电离层响应的季节、地方时变化和高度差异等的观测特征. 以上相关工作有助于理解电离层的基本过程, 并为电离层建模、预报和相关工程应用提供指导.

关键词

电离层
太阳活动性
太阳 EUV 辐射
太阳活动指数
电离层指数

通常谈到的太阳活动可能包含两种含义: 其一为太阳活动性, 专指太阳电磁辐射的变化, 在 X 射线和极紫外(EUV)辐射谱段更明显; 其二指太阳活动事件, 其标志是伴随有强烈的粒子辐射爆发, 如日冕物质抛射、太阳高能质子事件等. 两者有密切的联系, 也有明显的区别. 尽管太阳活动事件非常重要, 能对地球空间环境产生严重的后果(如电离层暴、热层暴), 但是本文不涉及这些事件所带来的电离层变化. 本文的焦点是评述太阳 XUV(X 射线和 EUV)辐射变化对电离层的影响.

地球高层大气在太阳 XUV 辐射的作用下被加热、解离, 还被部分电离形成了电离层. 观测研究表明, 太阳 XUV 辐射具有包括约 11 年太阳黑子周和准

27 天自转周在内的不同时间尺度的规则变化^[1~5], 还有瞬时的强烈爆发(如太阳耀斑事件), 太阳 XUV 辐射通量强度可以变化几倍, 在有的波段甚至上万倍(短波变幅大, 长波变幅小). 伴随着太阳活动性变化, 电离层/热层参数, 如等离子体和中性大气密度, 中性温度、离子温度和电子温度, 风场和电场等, 也表现有相应时间尺度的变化特征^[6,7].

图 1 给出了太阳 10.7 cm 辐射通量 $F_{10.7}$ 和武汉电离层台站测高仪 1957~2005 年期间探测得到的电离层 F2 层最大电子密度 N_mF2 的功率谱. 从图 1 可以清楚地看到, $F_{10.7}$ 有显著的约 11 年的太阳黑子周和准 27 天的太阳自转周变化, 武汉地区 N_mF2 在这两种时间尺度上有相应显著的变化外, 还有丰富的其

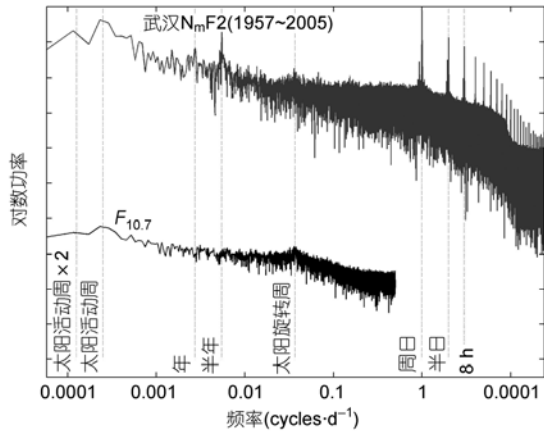


图1 太阳 10.7 cm 辐射通量 $F_{10.7}$ 和武汉地区 F2 层电离层最大电子密度 N_mF_2 (1957~2005 年)的功率谱

他变化分量。

我们知道，电离层以热层为背景，处在一个既与中性大气(包括底层大气)又与磁层发生耦合的开放式系统中，在这个系统中发生着丰富的光化学、化学反应和动力学、电动力学过程，进行着复杂的物质、动量和能量交换^[6]。太阳活动的多周期成分规则变化和其他非规则变化无疑会作用这个复杂系统本身，调制系统中的化学过程与动力学、电动力学过程，从而对电离层与高层大气的结构与演变产生十分重要的影响。因此，各种电离层参量的太阳活动性变化特征及其机理是相当复杂的，一直受到电离层物理学者的关注。

揭示电离层如何受到太阳活动性的调制，能深化对电离层结构及演变、电离层气候学特性等问题的了解，进而探索电离层长期变化趋势，推进对电离层化学、光化学过程和动力学、电动力学过程的认识；在应用层面上，电离层对太阳活动性的依存关系是电离层经验模式的基础问题，是模式最应该考虑的问题之一，对其表达的优化将提升模式的预报水平。人们已经意识到，需要在电离层气候学的基础上更深刻地认识电离层的空间天气特性。

最近一些年，学者们在这方向上开展了大量的研究，本文将简要地介绍这些相关研究的进展，更多地侧重于中国学者的工作。涉及的一些工作可以概括为：(1) 从电离层研究的角度评述太阳辐射观测与太阳活动指数；(2) 不同高度电离层的太阳活动性

依赖特征及物理机理；(3) 极端太阳活动性条件下的电离层；(4) 电离层耀斑效应。

1 太阳辐射的观测与活动指数

来自太阳的 XUV 辐射被高层大气所吸收，电离中性大气产生大量的自由电子和离子，形成了电离层等离子体。要考察太阳辐射变化对电离层的调制，首要的是了解太阳 XUV 辐射谱及其强度变化。太阳 XUV 辐射受到地球中高层大气强烈的吸收，难以到达地面，所以我们不能在地面直接监测太阳 XUV 辐射，需要借助间接的方法，或者通过火箭或卫星空间探测来获取太阳 XUV 辐射谱及其强度的信息。

来自早年探空火箭与 AE 系列卫星的探测数据是认识太阳 XUV 辐射谱和构建相关经验模型的基础^[8]。近年来，NOAA/GOES, Yohkoh/SXT, SNOE/SXP, SOHO/SEM 和 TIMED/SEE 等卫星设备以及一些探空火箭的相关观测极大地丰富了我们对于太阳辐射谱及其强度变化的了解^[9-13]。其中，AE 和 SOHO 卫星等提供了时间跨度较长、连续性的太阳 XUV 辐射观测，是认识太阳活动性宝贵的资料^[14]。关于太阳 XUV 历史观测，有兴趣的读者请参阅文献[5,15]。

基于太阳 XUV 辐射的观测资料，先后构建了几个太阳 XUV 辐射参考谱和一系列经验模型^[8,15-17]。使用较广泛的太阳 XUV 辐射经验模型有 HFG^[8], EUVAC^[10]及其高分辨率版本 HEUVAC^[11], EUV 模式和改进版本 Solar2000^[15]等。

因为空间探测的费用高昂，有关太阳 EUV 辐射谱的观测通常是短期的和间断性的。在大多数时候，我们缺乏太阳 EUV 辐射谱的观测资料，需要借助指数来衡量太阳活动性强度^[5,18]。常用到的太阳活动指数有太阳黑子数，10.7 cm 射电通量 $F_{10.7}$, He 1083 指数和 Mg II 指数等^[12,18-22]。这些活动指数由一些机构公开发布，可以从相应的网站下载获得。在这些指数中，太阳黑子数观测时间最长，已经超过了 400 年；其次是 $F_{10.7}$ ，从 1947 年起有记录，连续性好。太阳黑子数和 $F_{10.7}$ 等太阳指数能够作为太阳活动性的指示，缘于两方面的原因：(1) 来源于日球大气不同高度区域的辐射的强度具有较好的相关性，即太阳黑子数、 $F_{10.7}$ 和 EUV 辐射强度在统计上是相关的； $F_{10.7}$ 和太阳黑子尽管不对电离层和高层大气产生直接作用，但是它们可以指示太阳活动性变化过

程^[10,11,15]。(2) 太阳黑子数和 $F_{10.7}$ 等可以在地面进行常规观测。此外,近年来基于对一些太阳特征辐射线的观测,人们还提出用辐射特征谱线强度来度量太阳辐射水平^[12],如 He 1083 和基于 280 nm 附近谱结构构建的 Mg II 指数^[12,13]等。它们与 EUV 辐射的相关性也很好^[5,12,13],能够指示太阳 EUV 辐射的强度变化,遗憾的是,到现在为止它们只在很少数的几项工作中得到采用。

早期电离层研究和经验模式普遍采用年均相对太阳黑子数表征太阳活动水平,但后来的工作表明,相对于太阳黑子数而言, $F_{10.7}$ 表征太阳 EUV 辐射的优势明显^[1]。不过,太阳黑子数和 $F_{10.7}$ 在统计上与 EUV 辐射强度的关系都呈现非线性^[8,10],而且在较短时间尺度上两者与 EUV 辐射的相关性也不太理想^[17],这主要是因为不同波长的辐射在地球上源区不大相同,时间演变特征也存在差异。最近,有人提出了改进的太阳活动指数,如 $E_{10.7}$ 和 $F_{10.7P}$ 指数。 $E_{10.7}$ 指数^[15,19]基于对太阳辐射模式 EUV 功率密度谱的积分,并按 $F_{10.7}$ 的单位进行转换得到,是对 EUV 辐射谱单一指数化的结果,在较长的时间尺度上与 $F_{10.7}$ 有很好的相关性^[19]。它考虑了对高层大气的加热效应,可用于模式中来计算大气密度^[15]。另一个改进的指数是 $F_{10.7P}=(F_{10.7}+F_{10.7A})/2$,它是在 $F_{10.7}$ 和其 81 天滑动平均值 $F_{10.7A}$ 的基础上构建的。值得谈及的是, $F_{10.7P}$ 已经应用于太阳 XUV 辐射的经验模型(如 HFG 和 EUVAC)^[8,10],在一些电离层问题的研究中也采用它来表征太阳活动性水平。通过与 AE 和 SOHO/SEM 数据的对比分析发现,相对于 $F_{10.7}$ 而言, $F_{10.7P}$ 与 EUV 辐射更好的线性相关^[10,18,23],在统计上能更好地表征太阳 EUV 辐射水平。因此,我们推荐把 $F_{10.7P}$ 作为新的太阳活动指数在电离层研究中使用^[23]。

除了从太阳观测资料来提取太阳活动指数的努力以外,从 50 年代起陆续有人尝试基于电离层观测数据发展等效的太阳活动指数^[18,24-27]。这方面代表性的工作有基于 foF2 月中值的 IG_{12} ^[24],澳大利亚 T 指数和 MF2 指数^[26]。E 层临界频率 foE 密切地跟随天顶角变化^[27],从 foE 也可以得到太阳辐射的等效信息^[28]。值得提及的是,利用 GPS-TEC 的全球覆盖优势,从区域或全球积分的 TEC 也能很好地得到太阳辐射的变化信息^[29-31]。相类似的工作还有,基于几个电离层测高仪台站数据,构建一个电离层改正指

数,为预报区域电离层提供参考^[18,32]。对空间天气监测和电离层预报来说,以上这些工作具有潜在的应用价值,值得精细化与完善,并运用到电离层模式中去。

对太阳活动进行有效的预报,特别是对太阳黑子周趋势的预测,无疑是非常重要的。现在有代表性的预报方法有神经网络方法、相似周法、自然经验正交法、小波变换等^[33]。在太阳活动第 23 周快结束的时候,国际上对第 24 太阳活动周峰年的强度和出现时间进行了大量的预报。但是,发布的预测结果很不一致,大致存在两种不同的趋势:一种认为第 24 太阳活动周是一个低太阳周^[33];另一种则认为比第 23 周还要强 30%~50%^[34]。预报结果存在这样大的差异,说明了对太阳活动规律的认识与预报在目前仍然是非常有挑战、有待解决的问题。

2 电离层的太阳活动性依赖特性

2.1 F2 层峰区电离层的太阳活动性依赖性

F2 层峰区是最关键的电离层区域,研究最多,其中对 F2 峰区电离层参数的太阳活动性依赖性也已经有了比较长的研究历史。最近工作涉及的参数包括电离层 F 层临界频率(foF2)或峰值电子浓度(N_mF2)^[23,35-44]、电子总含量(TEC)^[29-31,45-51]、峰值高度(h_mF2)^[6,23,40]、等离子体温度和剖面标高^[40,51],有的还涉及热层中性风场^[52-55]、中性大气密度和温度^[55-57]。这些研究所探讨的问题有:电离层有怎样的太阳活动性依赖趋势?受到影响的幅度有多大,呈现怎样的地方时、季节特性和空间分布特征?其中起关键作用的物理过程有哪些?在电离层经验模式中如何有效表达这些特性?

前面已经谈及,太阳黑子数和 $F_{10.7}$ 指数有比较完整的观测记录,在电离层研究中常用它们来表征太阳活动水平。早期的研究中选用资料所涉及的台站数往往很少,时间跨度也比较短。这些工作指出 TEC 或 N_mF2 与 $F_{10.7}$ 呈线性。近些年来发现 N_mF2 (或 foF2)和 TEC 与 $F_{10.7}$ (或太阳黑子数)的关系存在非线性特征^[35-38,58,59]。具体地说,从统计上来看,在较低的或中等太阳活动水平时 N_mF2 跟随 $F_{10.7}$ 线性增长;但是,随着 $F_{10.7}$ 进一步增大,当超过某个阈值后, N_mF2 和 TEC 增幅逐渐变小,甚至无明显增长或转为下降,即“饱和”现象。

饱和现象及其机理是最近争论的焦点. Balan 等人^[58-60]认为 N_mF2 或 TEC 与 EUV 辐射通量是线性的, 饱和现象不过是由太阳 EUV 辐射与 $F_{10.7}$ 指数间的非线性引起的. 对于之前工作中报道的线性特征, 他们解释可能是由于资料中太阳活动水平不够高, 从而非线性特征没能呈现出来. Liu 等人^[35]考察了日间 foF2 的太阳活动性变化, 发现非线性特征在 foF2 和 EUV 通量之间依然存在, 且在赤道异常驼峰区最为明显. 非线性的程度和所处纬度位置有关, 这有力地说明了 EUV 辐射与 $F_{10.7}$ 的非线性关系不是唯一的因素. Liu 等人^[23]收集了 $120^\circ E$ 子午链上 20 个测高仪台站完整的 foF2 历史数据(有的台站数据时间跨度超过 60 年. 这是迄今能公开得到的最长数据序列了)和太阳 EUV 观测资料, 系统地分析了日间 N_mF2 的太阳活动性依赖特性. 结果进一步证实 N_mF2 随 EUV 辐射通量变化的非线性特征确实是存在的, 呈现出的非线性程度及 N_mF2 的增幅存在纬度和季节的差异. 通过引入对峰高和 $[O]/[N_2]$ 变化, 分析发现动力学过程与中性成分随太阳活动水平改变, 进而对饱和效应有重要的贡献. 换言之, 中性成分、化学过程和动力学过程也是引起饱和效应的重要因素.

N_mF2 和特定高度上电子密度对太阳 XUV 的响应大小存在纬度和季节的差异. Kane^[14]感到困惑的是, EUV 本身的变化不足以解释 N_mF2 的增幅. 他发现, 在 1996~2000 年期间, 太阳 EUV 大约增加了 150%, 而在所选的 7 个台站 N_mF2 的增幅为 210%到 290%. 实际上, 现在的电离层模式, 自洽地考虑了大气密度和化学过程、动力学过程的太阳活动性效应, 能够重现观测结果所展示出的这些纬度和季节差异^[23,31,60]. 这进一步说明了, 不同的太阳活动水平不仅仅是带来 XUV 的光电离率改变, 它还会同时调控地球空间系统中的许多因素和过程.

最重要的进展有, 对全球 TEC 和夜间 N_mF2 的分析, 揭示出 TEC 和 N_mF2 对太阳活动性依存趋势存在线性、放大和饱和共 3 种类型, 具体呈现何种依存趋势与所在纬度、地方时和季节有关^[30,37,48]. 譬如, 夜间 N_mF2 随 $F_{10.7}$ 在夏季继续保持白天的饱和特征, 在春秋呈现线性, 而在冬季则有放大趋势. Chen 等人^[37]提出, 动力学过程(磁赤道垂直漂移的日落反转增强、中性风等)和背景大气变化引起了夜间 N_mF2 太阳活动性依赖性的季节差异. Liu 等人^[48]首次给出了 3 种特征在全球的分布以及 TEC 随太阳活动性变

化的全球性定量描述, 显示饱和特征倾向于分布在赤道异常纬度, 结果得到 Ma 等人^[61]工作的印证. Ma 等人^[61]给出了测高仪 N_mF2 的太阳活动性非线性系数随纬度的双峰结构.

通过对 TEC 全球平均值和高、中、低纬三个纬度带平均值的分析, 发现随着太阳 EUV 辐射增强, 纬度带平均的 TEC 有放大趋势, 放大程度也依赖于纬度, 在高纬最强^[30]. 有趣的是, 纬度带平均 TEC 与 $F_{10.7}$ 却呈现饱和关系, 纬度越低, 饱和特征越强烈. 除约 11 年的太阳黑子周变化, 日面活动区在太阳自转过程中对电离层产生明显的准周期性调制, 从而引起周期约 27 天的电离层变化^[29-31]. 相对局地 TEC 而言, 全球、区域或纬度带平均的 TEC 通过对 TEC 的平均处理, 有效地削弱了局地起伏变化带来的污染, 能更好地凸显出太阳辐射变化中的这些长、短周期分量^[1,14,22].

一个尚未解决的难题是, 峰区电离层存在“磁滞效应”现象^[41,46,62,63], 类似于铁磁性材料的磁滞特性. “磁滞效应”现象的表现是, 尽管处于相同季节、地方时和太阳活动水平, foF2 (或 TEC 等)在太阳活动周上升、下降相的量值有明显差异. 对这一现象的解释目前尚无定论, 值得研究. Mikhailov 等人^[41]认为可能与太阳活动上升相与下降相地磁活动的差异有关, 下降相地磁活动要强于上升相. Kane^[21]则认为与太阳 EUV 辐射变化对 $F_{10.7}$ 变化的延迟有关. 尽管有工作^[36]企图在模式中考虑太阳活动的历史状态对电离层的影响, 但是“磁滞效应”现象仍然难以在模式中有效地体现出来, 因而成为制约电离层长期预报精度的瓶颈之一.

电离层参数对太阳活动性的依赖关系是电离层经验模式的关键点之一. IRI 系列模式^[18]采用折线模型来描述电离层电子密度的太阳活动性依赖. 在折线模型中, 当滑动年均 $F_{10.7}$ 或太阳黑子数低于一个阈值时, 采用线性关系; $F_{10.7}$ 或太阳黑子数达到阈值后, foF2 取定值. 在一些 foF2 和 TEC 统计模式中, 甚至简单地采用线性模型. 最近的工作^[48]表明, 从统计的角度看, 二次多项式能够比较准确地描述电离层的太阳活动性依赖关系, 可以有效改善预报精度, 建议在电离层统计模式中采用. 更高阶的近似^[64]不再显著地提升模式的预报能力, 因而工程意义不突出.

电离层以热层为背景, 热层成分改变会显著地

影响到电离层,如 $[O]/[N_2]$ 对 N_mF_2 有重要的影响.遗憾的是,目前仍缺乏对 $[O]/[N_2]$ 长期变化的观测研究.由于受EUV辐射加热和离子拖曳作用,热层温度和大气密度也会随太阳活动性而增加^[56,56].Heidin^[65]在分析热层密度与EUV和 $F_{10.7}$ 短期变化的关系时,发现密度与EUV有更高的相关性.对CHAMP卫星观测数据推算的中性大气密度进行分析,发现400 km高度中性密度在低纬也出现类似于等离子体密度赤道异常的双峰结构,且这种双峰结构在太阳活动高年更强^[74].此外,在太阳活动高年,振动激发态 N_2 会显著增加,从而提高 O^+ 的复合速率.模拟结果也显示,振动激发态 N_2 会强化 N_mF_2 随 $F_{10.7}$ 的非线性变化特征^[67].

热层温度随着太阳活动性水平的变化,会体现在电离层 h_mF_2 和电子剖面结构上.以武汉为例,测高仪 h_mF_2 和剖面标高均显示出跟随太阳活动性增加的特性^[23,68].相同的特性也曾在Arecibo及磨石山非相干散射雷达资料中看到^[40,51].当然, F_2 层高度上中性风场也对电离层的变化起着重要作用.日间极向风场的增强将会导致 F_2 层峰的下降,加快复合损失,进而使得电子密度下降;反之,强度减弱的极向风场等效于抬升 F_2 层峰,减缓复合损失并增加电子密度.尽管缺乏 F_2 峰区中性风场的全球观测,从电离层 h_mF_2 推演的等效风场结果^[52-54]来看,中、低纬地区子午向风场,特别是其周日分量的幅度,随太阳活动性增强有减弱趋势.在磁赤道上空,垂直漂移和场向扩散在白天引起喷泉效应,是低纬地区电离层重要的动力学过程.基于卫星探测和非相干散射雷达的观测结果,显示出垂直漂移在日间对太阳活动性的依赖不明显,但日落前反转有增强,并随 $F_{10.7}$ 有线性趋势^[69].垂直漂移的日落反转前增强现象对夜间电离层有重要的影响,会导致太阳高年期间赤道异常在夜间持续很长时间^[66].

2.2 不同高度电离层太阳活动依存的差异

测高仪只能给出底部电离层的信息,GPS等只能给出电波在电离层穿过路径上的整体信息(电子总含量,TEC),但是顶部电离层参数的获取需要借助于非相干散射雷达和卫星探测等手段.通过与等离子体层离子(H^+ , He^+)的化学交换($O+H^+\leftrightarrow O^++H$, $He^++N_2\rightarrow N^++N+He$),顶部电离层与等离子体层有着密切的耦合.日间能量通过 O^+ 与 H^+ 之间的转化从顶

部电离层注入等离子体层,夜间能量则再从等离子体层回注到顶部电离层.随着太阳活动性增强,从 O^+ 到 H^+ 的转化高度增加,固定高度上的离子成分(O^+ , H^+ , He^+ , N^+)也会发生变化^[70-74].这样,在太阳活动低年以轻离子为主的高度上,有可能在太阳活动高年转变为以 O^+ 为主;换句话说,上过渡高度(在该高度上,轻离子和 O^+ 密度相等)增加了.Zhao等人^[74]考察了800 km高度等离子体组分的季节和太阳活动性特性,还采用自然正交方法对等离子体密度进行了经验建模.Liu等人^[75,76]进一步分析DMSP卫星的等离子体观测数据,得到了顶部800 km高度等离子体密度的气候学特征.

考察不同高度上电离层的太阳活动性依赖性有助于认识电离层的结构和化学、动力学过程的高度特性.Su等人^[77]基于日本MU雷达非相干散射观测资料,分析了在MU雷达上空不同高度电离层电子密度对 $F_{10.7}$ 的依赖,发现其特性存在高度差异:在低高度为饱和;随高度增加,在顶部逐渐变为线性.

在扩散平衡假设下,顶部电离层等离子体密度分布受 h_mF_2 , N_mF_2 和等离子体标高等因素影响^[66,76].等离子体标高是顶部电离层一个极重要的参数^[73],对电离层结构和动力学研究有重要意义.基于非相干散射雷达观测,用变标高Chapman函数拟合观测的电子浓度剖面,可以得到峰区参量、顶部标高等信息.Lei等人^[40]和Liu等人^[51]利用Arecibo和磨石山非相干散射雷达的电子、离子温度和电子密度剖面的历史观测数据,系统地揭示了电离层标高的周日、季节和太阳活动性等气候学特征,发现这些标高均随 $F_{10.7}$ 线性增长,其变化特征和电离层热结构、动力学过程等有关.他们还研究了电离层标高和电子浓度剖面参数间的统计关系,能为电离层建模提供指导.

与MU雷达结果不同的是,800 km高度等离子体密度随太阳活动性非线性增长,在磁赤道更显著^[75].在800 km高度上,等离子体密度以年变化分量为主,并且显示出随着太阳活动性增强的年度不对称特征^[74,76].令人意外的是,ROCSAT-1卫星探测到的600 km高度等离子体密度展示出复杂的太阳活动性依赖,存在线性、放大和饱和3种变化趋势^[66].在太阳活动高年的日落时段,600 km高度等离子体密度的纬度结构清楚地显示出赤道异常特征.这也说明赤道区垂直漂移在高年有所增强.随着高度进一步下降,如在400 km高度,电子密度表现为饱和

特征^[66]

Liu 等人^[48,75]和 Chen 等人^[67]基于电离层关键参数(F层最大密度、峰值高度和电离层标高)的太阳活动性依赖特性,提出从 Chapman 剖面出发来理解为何 TEC 和不同高度电子浓度可能存在的3种太阳活动性依赖特性.他们认为,在较高高度(如800 km)标高是最主控的因素:标高的太阳活动性变化以指数形式加剧了那里的等离子体密度随太阳活动性的增长;而在 ROCSAT-1 卫星所在高度,等离子体密度随太阳活动性的变化趋势受到标高、峰高和峰值电子浓度随太阳活动性变化的共同影响,其中赤道地区垂直漂移使得峰高增长,对变化趋势产生很重要的影响,进而呈现有明显纬度差异的变化趋势.

Rich 等人^[78]研究了太阳自转对顶部电离层等离子体密度和温度的影响.相对于峰区电离层,顶部电离层受到的太阳辐射准27天周期变化调制更加明显.前面已经提到,这种准27天周期的调制在全球或纬度带平均的TEC中也非常强^[29-31].

3 极端太阳活动性水平下的电离层

太阳活动性本身是一个非常复杂的问题,存在一些极端现象.已有太阳黑子记录显示,在公元1645~1715年期间,太阳黑子数几乎为零,这一时期称为 Maunder 极小期.基于同位素¹⁴C序列和树轮资料重构的记录^[79],揭示在1100~1250年存在称为 Grand Maximum 黑子极大期.在2007~2009年,太阳活动也处于异常低的水平,如2008年有266天无太阳黑子,位于年无太阳黑子天数50年榜首,100年第二.为此,国际启动“Deep Solar Minimum”计划,开展在极低太阳活动条件下空间物理的相关研究.在这样极端的太阳活动水平下的电离层、热层状态及其过程值得关注.

Smithtro 等人^[80]假设太阳活动性极端条件下 EUV 辐射谱结构,利用一个一维电离层—热层模式模拟了在不同太阳活动条件下全球平均的电离层、热层的行为.他们的模拟结果表明,在极低太阳活动条件下,中性温度和 F2 层峰高 h_mF2 随 EUV 通量近似线性地下降.在 F2 层峰附近中性分子(N_2 , O_2)密度变得很高,引起电子复合损失加剧, N_mF2 也变得很低.同时, O^+ 密度比分子离子密度下降更强烈,以致 N_mF2/N_mF1 (N_mF1 为 F1 层峰处的电子浓度)接近于

1. 这种现象类似于电离层在某些磁暴事件中出现的“G”现象.有趣的是,在超过现在太阳活动性的条件下, Smithtro 等人^[80]的模拟结果显示非线性的增加趋势.这和 TEC 纬度带平均值随太阳 EUV 辐射的放大趋势相似^[30].国际一些机构正在利用 CHAMP 和 GRACE 等卫星资料进行2007~2009年太阳活动异常低条件下热层中性密度和电离层电子密度的相关研究,如发现400 km高度上大气总密度比以往太阳活动低年要低近30%.尽管他们的文章尚未正式发表,相关进展值得关注.

有趣的是,如果将 TEC 对 EUV 辐射通量的拟合结果向低端线性外推,在太阳 EUV 辐射很弱的情况下,得到的 TEC 外推结果将是负值^[30].当然,这是非物理的(TEC 不应该为负).但是,这说明了一点:在极端低的太阳辐射水平,电离层的过程要不同于通常的情况.遗憾的是,目前我们还缺乏极端太阳活动条件下太阳辐射谱结构的信息.值得注意、需要探索的相关科学问题有:在极端太阳活动情况下,太阳 EUV 谱是怎样的,电离层的状态又是怎样的,哪些物理过程起着主控的作用,是否会对全球气候及长期趋势变化等过程带来严重的影响等.

伴随极端高的太阳活动性,也存在极端的太阳活动事件,如著名的2000年巴士底事件、2003年万圣节事件^[81]和1859年事件^[82](1859年9月1日在印度 Bombay 记录到 $\Delta H = -1600$ nT 的超强磁暴).尽管在电离层暴方面进行了大量的个例分析和统计研究,目前还难以从统计学的角度来可靠地回答:如果与这些事件相当或更强的太阳爆发能量输入到地球空间时,电离层响应的精确图像如何.

4 电离层耀斑效应

耀斑是一种常见的太阳活动事件,频繁发生,尤其是在太阳活动高年,几乎每天都会发生不同强度的耀斑事件.太阳耀斑爆发时,太阳能量突然释放,覆盖射电、可见光和 XUV 等波段的太阳辐射会有不同程度的增强,持续的时间在约 10 min~1 h 范围内变化^[83].它们以光速传播,在 8 min 左右到达地球,导致向日侧电离层/热层结构和状态发生改变,引起电离层突然骚扰现象^[84](包括由 D 区电子密度突然增加导致的宇宙噪声吸收 SCNA、突然频率吸收 SWF、突然相位异常 SPA、突然天电噪声增强 SEA,

与 E 和 F 区有关的突然频移 SFD、磁钩扰 SFE, 和主要由 F 区电子密度增强贡献的 TEC 突然增加 SITEC^[85]等).

自 20 世纪 60 年代以来, 人们利用各种观测设备, 广泛地研究了太阳耀斑所引起的电离层变化. Davies 等人^[84]总结了太阳耀斑期间向日面电离层的突然扰动现象. 不过, 以往的研究关注的大多是特大型耀斑事件, 还有台站数目少的局限性. GPS-TEC 数据具有观测精度高、空间覆盖范围大、时间连续性好等优点. 随着 GPS 技术的发展与普及, 通过合理布局 GPS 观测点, 用 GPS-TEC 数据来监测太阳耀斑爆发和电离层突然骚扰, 可以定量地揭示出与太阳耀斑爆发相关的电离层扰动, 应该成为电离层空间天气监测与研究的重要内容.

近些年很多学者开展了耀斑期间 SITEC 变化的全球观测和研究^[86-98]. 这些工作的主要贡献有: (1) 发现 GPS-TEC 对太阳耀斑相当敏感, 利用 GPS-TEC 可以监测 M 级以上太阳耀斑事件; (2) 修正了以往认为 SITEC 与太阳天顶角没有明显相关性^[85]的错误观点; (3) 热层大气密度可能有强烈的耀斑响应^[88].

Zhang 和 Xiao^[95]分析了 2001 年 4 月 15 日耀斑期间 53 个 GPS 台站的 TEC 数据, 揭示出 SITEC 与太阳天顶角有明显的负相关性. 基于电离层 Chapman 电离理论, Wan 等人^[86]认为耀斑爆发引起的 TEC 时间变化率与太阳耀斑的有效辐射通量成正比, 与依赖太阳天顶角 χ 的 Chapman 函数 $ch(\chi)$ 成反比, 这一结论得到 2000 年 7 月 14 日耀斑 GPS-TEC 数据的验证. 陈斌等人^[89]对 1996 到 2003 年期间 X 级大耀斑事件 SITEC 的统计分析, 发现 TEC 增量与日地距离和耀斑持续时间都存在负相关性. 张东和和肖佐^[91-94]的结果展示出耀斑引起的 TEC 绝对增幅呈现关于正午的不对称: 在夏季相同天顶角时刻, 下午的绝对增幅高于上午, 而这种不对称性在冬季和春秋分正好相反. 电离层响应还与耀斑爆发的日面位置有关^[83,92]. 张东和等人^[92]的结果表明, 太阳经度角越小, SITEC 将越大. 但是, 目前还不清楚耀斑日面位置是如何影响电离层响应大小的.

到目前为止, 有关电离层耀斑效应的模拟工作还很少. Le 等人^[97]构建了一个适用于强耀斑事件太阳辐射谱演变的简化模型, 借助一个电离层理论模式, 他们系统地模拟计算了不同高度电离层如何响应耀斑辐射变化, 结果证实太阳天顶角是决定耀斑

电离层效应大小的重要因素. 他们的模拟结果还说明, 观测所呈现出耀斑期间电离层响应的地方时和季节差异与背景热层条件有关. 基于 2000 年 7 月 14 日耀斑期间的 XUV 观测, Huba 等人^[98]实现了耀斑引起的电离层变化的首次全球尺度模拟, 而 Meier 等人^[99]估计了此次耀斑期间 XUV 辐射各谱段演变, 还模拟了电离层的响应图像.

最近, 热层在耀斑期间的响应也引起了关注. 以往的观点认为, 中性大气的时间常数大, 对于太阳耀斑期间的辐射短时改变, 热层的响应应该很迟缓. 有趣的是, 基于 GRACE 和 CHAMP 卫星在 2003 年 10 月 28 日 X17.2 级耀斑和随后 11 月 4 日 X28 级耀斑事件的观测数据, Sutton 等人^[100]发现这两次耀斑期间热层温度分别增加了 125~175 和 100~125 K, 中性密度响应的区域在低到中纬度地区, 最大响应时间较耀斑爆发时间有 72 min 的延迟. 令人意外的是, 中性大气密度在 2003 年 10 月 28 日事件中最大增幅达到了 50%~60%, 而在更强的 11 月 4 日耀斑事件期间最大增幅才为 35%~45%. 耀斑强度与中性密度变化幅度间的关系目前还不清楚. 这些令人意外的结果, 启发我们应该更多地关注耀斑事件期间热层大气的变化特性.

太阳耀斑常伴随高能质子爆发, 即太阳质子事件^[81]. 这些粒子产生的效应会迭加在耀斑的电离层效应上, 这是未来相关的研究工作应该关注的. 太阳质子事件中, 带电粒子流主要沿磁力线进入地球极盖区大气层, 对极区中性大气及电离层有重要的影响, 如持续数小时甚至数日大幅增加中间层及平流层顶 HO_x(H, OH, HO₂)和 NO_x(N, NO, NO₂)等成分密度, 进而会减小臭氧 O₃ 密度^[101]. 穿透到极区电离层 D 层的高能粒子会大幅提升 D 区离化度, 导致 D 层对电波的吸收增强, 产生极盖吸收事件^[102,103].

5 小结

太阳 XUV 辐射电离高层大气形成了电离层^[6], 对不同高度的电离层而言, 其能量主要来自不同波段的太阳辐射. 这些源自日球不同区域的辐射在时间上不是很同步的^[5]. 因而, 如何构建更合理的太阳活动指数来比较全面的反映太阳活动性变化对电离层的影响有待进一步研究. 同时, 除了 XUV 光电离直接作用以外, 电离层还受化学过程、动力学过程与电动力学过程的控制. 未来仍需探索如何更合理的

描述这些复杂过程受太阳活动性的影响。

太阳活动性变化对电离层的影响是全球性的,而化学、动力学过程有不同尺度的变化,会引起局域性的影响。因而,需要结合整体和局部两个方面来加深对电离层太阳活动性依赖的认识。尽管中性大气和动力学因素对电离层起重要作用,但仍缺乏对全球热层和中性风场等的长期观测研究,这方面应该在将来得到加强。另外,极区电离层还受到粒子沉降和焦耳加热影响,如何区分极区电离层中各个因素在太阳活动性依赖特征中的贡献,是值得关注的。

总的来说,随着探测手段的提升、探测数据的大

量积累、太阳辐射模式和电离层模式的不断完善,人们从不同角度对电离层太阳活动性依赖性的认识正不断深入。但是,有待解决的问题还很多。譬如,太阳活动性周期长度的差异会引起怎样的电离层变化^[104]? 本文只简要地评述了在电离层的太阳活动性依赖特性问题上最近的一些研究工作。最重要的进展是发现了 TEC 和 N_mF_2 对太阳活动性存在线性、放大和饱和共 3 种类型的依存趋势,还得到了不同高度电离层的太阳活动性趋势的更精细的全球图像。想指出的是,在电离层空间天气、电离层与低层大气的耦合过程等方向上,也取得了大量的研究进展。因篇幅的限制,本文没有涉及这些方面工作的评述介绍。

参考文献

- Pap J, Bouwer S D, Tobiska W K. Periodicities of solar irradiance and solar activity indices. *Solar Phys*, 1990, 129: 165–189
- Lundstedt H, Liszka L, Lundin R. Solar activity explored with new wavelet methods. *Ann Geophys*, 2005, 23: 1505–1511
- Moussa X, Polygiannakis J M, Preka-Papadema P, et al. Solar cycles: A tutorial. *Adv Space Res*, 2005, 35: 725–738
- Lean J. Solar ultraviolet irradiance variations: A review. *J Geophys Res*, 1987, 92: 839–868
- Lean J L, White O R, Livingston W C, et al. Variability of a composite chromospheric irradiance index during the 11-year activity cycle and over longer time periods. *J Geophys Res*, 2001, 106: 10645–10658
- Gorney D J. Solar cycle effects on the near-earth space environment. *Rev Geophys*, 1990, 28: 315–336
- Forbes J M, Bruinsma S, Lemoine F G. Solar rotation effects in the thermospheres of Mars and Earth. *Science*, 2006, 312: 1366–1368
- Hinteregger H E, Bedo D E, Manson J E. The EUV spectrophotometer on Atmosphere Explorer. *Radio Sci*, 1973, 8: 349–359
- Ogawa H S, Judge D L, McMullin D R, et al. First-year continuous solar EUV irradiance from SOHO by the CELIAS/SEM during 1996 solar minimum. *J Geophys Res*, 1998, 103: 1–6
- Richards P G, Fennelly J A, Torr D G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations. *J Geophys Res*, 1994, 99: 8981–8992
- Richards P G, Woods T N, Peterson W K. HEUVAC: A new high resolution solar EUV proxy model. *Adv Space Res*, 2006, 37: 315–322
- Floyd L, Newmark J, Cook J, et al. Solar EUV and UV spectral irradiances and solar indices. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 2005, 67: 3–15
- Viereck R A, Puga L, McMullin D, et al. The Mg II index: A proxy for solar EUV. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 1343–1346
- Kane R P. Solar EUV and ionospheric parameters: A brief assessment. *Adv Space Res*, 2003, 32: 1713–1718
- Tobiska W K, Woods T, Eparvier F, et al. The SOLAR2000 empirical solar irradiance model and forecast tool. *J Atmos. Solar-Terr*, 2000, 62: 1233–1250
- Bailey S M, Woods T N, Barth C A, et al. Measurements of the solar soft X-ray irradiance by the Student Nitric Oxide Explorer: First analysis and underflight calibrations. *J Geophys Res*, 2000, 105: 27179–27193
- Lean J L, Warren H P, Mariska J T, et al. A new model of solar EUV irradiance variability 2. Comparisons with empirical models and observations and implications for space weather. *J Geophys Res*, 2003, 108: 1059, doi: 10.1029/2001JA009238
- Bilitza D. The Importance of EUV Indices for the International Reference Ionosphere. *Phys Chem Earth (C)*, 2000, 25: 515–521
- Tobiska W K. Validating the Solar EUV Proxy, E10.7. *J Geophys Res*, 2001, 106: 29969–29978
- Barth C A, Tobiska W K, Rottman G J, et al. Comparison of 10.7 cm radio flux with SME solar Lyman-alpha flux. *Geophys Res Lett*, 1990, 17: 571–574
- Kane R P. Hysteresis and non-linearity between solar EUV and 10.7 cm fluxes. *Ind J Radio Space Phys*, 2005, 34: 161–170
- Kane R P. Fluctuations in the ~27-day sequences in the solar index F10 during solar cycles 22–23. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 2003, 65: 1169–1174
- Liu L, Wan W, Ning B, et al. Solar activity variations of the ionospheric peak electron density. *J Geophys Res*, 2006, 111: A08304, doi:10.1029/2006JA011598
- Liu R, Smith P, King J. A new solar index to improve foF2 prediction using the CCIR Atlas. *Telecomm J*, 1983, 50: 408–413

- 25 Ortikov M Yu, Shemelov V A, Shishigin I V, et al. Ionospheric index of solar activity based on the data of measurements of the spacecraft signals characteristics. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 2003, 65: 425–430
- 26 Mikhailov A, Mikhailov V. A new ionospheric index MF₂. *Adv Space Res*, 1995, 15: 93–97
- 27 Yue X, Wan W, Liu L, et al. An empirical model of ionospheric f_oE over Wuhan. *Earth Planets Space*, 2006, 58: 323–330
- 28 Nusinov A A. Ionosphere as a natural detector for investigations of solar EUV flux variations. *Adv Space Res*, 2006, 37: 426–432
- 29 Afraimovich E L, Astafyeva E I, Oinats A V, et al. Global electron content: A new conception to track solar activity. *Ann Geophys*, 2008, 26: 335–344
- 30 Liu L, Wan W, Ning B, et al. Climatology of the mean TEC derived from GPS Global Ionospheric Maps. *J Geophys Res*, 2009, 114: A06308, doi:10.1029/2009JA014244
- 31 余承莉, 万卫星, 徐桂荣. 电离层全球电子总含量的气候学特性分析与经验模式构建. *科学通报*, 2007, 52: 2876–2881
- 32 Liu R, Xu Z, Wu J, et al. Preliminary studies on ionospheric forecasting in China and its surrounding area. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 2005, 67: 1129–1136
- 33 王家龙. 第 24 太阳周将是一个低太阳周? *科学通报*, 2009, 54: 3664–3668
- 34 Dikpati M, de Toma G, Gilman P A. Predicting the strength of solar cycle 24 using a flux- transport dynamo-based tool. *Geophys Res Lett*, 2005, 33: L05102, doi:10.1029/2005GL025221
- 35 Liu J Y, Chen Y I, Lin J S. Statistical investigation of the saturation effect in the ionospheric foF2 versus sunspot, solar radio noise, and solar EUV radiation. *J Geophys Res*, 2003, 108: 1067, doi: 10.1029/2001JA007543
- 36 Liu L, Wan W, Ning B. Statistical modeling of ionospheric foF2 over Wuhan. *Radio Sci*, 2004, 39: RS2013, doi: 10.1029/2003RS003005
- 37 Chen Y, Liu L, Le H. Solar activity variations of nighttime ionospheric peak electron density. *J Geophys Res*, 2008, 113: A11306, doi: 10.1029/2008JA013114
- 38 Chen Y I, Liu J Y, Chen S C. Statistical investigation of the saturation effect of sunspot on the ionospheric foF2. *Phys Chem Earth (C)*, 2000, 25: 359–362
- 39 Kane R P. Sunspots, solar radio noise, solar EUV and ionospheric foF2. *J Atmos Terr Phys*, 1992, 54: 463–466
- 40 Lei J, Liu L, Wan W, Zhang S R. Variations of electron density based on long-term incoherent scatter radar and ionosonde measurements over Millstone Hill. *Radio Sci*, 2005, 40: RS2008, doi: 10.1029/2004RS003106
- 41 Mikhailov A V, Mikhailov V V. Solar cycle variations of annual mean noon foF2. *Adv Space Res*, 1995, 15: 79–82
- 42 Xu T, Wu Z S, Wu J, et al. Solar cycle variation of the monthly median foF2 at Chongqing station, China. *Adv Space Res*, 2008, 42: 213–218
- 43 Richards P G. Seasonal and solar cycle variations of the ionospheric peak electron density: Comparison of measurement and models. *J Geophys Res*, 2001, 106: 12803–12819
- 44 Sethi N K, Goel M K, Mahajan K K. Solar cycle variations of foF2 from IGY to 1990. *Ann Geophys*, 2002, 20: 1677–1685
- 45 Bhonsle R V, Da Rosa A V, Garriott O K. Measurements of the total electron content and equivalent slab thickness of the mid-latitude ionosphere. *Radio Sci*, 1965, 69: 929–939
- 46 Chakraborty S K, Hajra R. Solar control of ambient ionization of the ionosphere near the crest of the equatorial anomaly in the Indian zone. *Ann Geophys*, 2008, 26: 47–57
- 47 Huang Y N. Solar cycle variation in the total electron content at Sagamore Hill. *J Atmos Terr Phys*, 1978, 40: 733–739
- 48 Liu L, Chen Y. Statistical analysis on the solar activity variations of the TEC derived at JPL from global GPS observations. *J Geophys Res*, 2009, 114: A10311, doi: 10.1029/2009JA014533
- 49 Titheridge J E. The electron content of the southern mid-latitude ionosphere, 1965–1971. *J Atmos Terr Phys*, 1973, 35: 981–1001
- 50 Yeh K C, Flaherty B J. Ionospheric electron content at temperate latitudes during the declining phase of the sunspot cycle. *J Geophys Res*, 1966, 71: 4557–4570
- 51 Liu L, Le H, Wan W, et al. An analysis of the scale heights in the lower topside ionosphere based on the Arecibo incoherent scatter radar measurements. *J Geophys Res*, 2007, 112: A06307, doi:10.1029/2007JA012250
- 52 Liu L, Luan X, Wan W, et al. Solar activity variations of equivalent winds derived from global ionosonde data. *J Geophys Res*, 2004, 109: A12305, doi: 10.1029/2004JA010574
- 53 Liu L, Wan W, Luan X, et al. Solar activity dependence of effective winds derived from ionospheric data at Wuhan. *Adv Space Res*, 2003, 32: 1719–1924
- 54 Igi S, Oliver W L, Ogawa T. Solar cycle variations of the thermospheric meridional wind over Japan derived from measurements of h_mF₂. *J Geophys Res*, 1999, 104: 22427–22431
- 55 Hedin A E, Buonsanto M J, Codrescu M, et al. Solar activity variations in midlatitude thermospheric meridional winds. *J Geophys Res*,

- 1994, 99: 17601–17608
- 56 Guo J, Wan W, Forbes J M, et al. Effects of solar variability on thermosphere density from CHAMP accelerometer data. *J Geophys Res*, 2007, 112: A10308, doi: 10.1029/2007JA012409
- 57 Liu H, Lüth H, Watanabe S. Climatology of the equatorial thermospheric mass density anomaly. *J Geophys Res*, 2007, 112: A05305, doi: 10.1029/2006JA012199
- 58 Balan N, Bailey G J, Jenkins B, et al. Variations of ionospheric ionization and related solar fluxes during an intense solar cycle. *J Geophys Res*, 1994, 99: 2243–2253
- 59 Balan N, Bailey G J, Su Y Z. Variations of the ionosphere and related solar fluxes during solar cycles 21 and 22. *Adv Space Res*, 1996, 18: 11–14
- 60 Balan N, Bailey G J, Moffett R J. Modeling studies of ionospheric variations during an intense solar cycle. *J Geophys Res*, 1994, 99: 17467–17475
- 61 Ma R, Xu J, Wang W, et al. Seasonal and latitudinal differences of the saturation effect between ionospheric NmF2 and solar activity indices. *J Geophys Res*, 2009, 114: A10303, doi: 10.1029/2009JA014353
- 62 Ortiz de Adler N, Manzano J R. Solar cycle hysteresis on F-region electron concentration peak heights over Tucuman. *Adv Space Res*, 1995, 15: 83–88
- 63 Trísková L, Chum J. Hysteresis in dependence of foF2 on solar indices. *Adv Space Res*, 1996, 18: 145–148
- 64 Kouris S S, Bradley P A, Dominici P. Solar-cycle variation of the daily foF2 and M(3000)F2. *Ann Geophys*, 1998, 16: 1039–1042
- 65 Hedin A E. Correlations between thermospheric density and temperature, solar EUV flux, and 10.7-cm flux variations. *J Geophys Res*, 1984, 89: 9828–9834
- 66 Liu H, Stolle C, Förster M, et al. Solar activity dependence of the electron density in the equatorial anomaly regions observed by CHAMP. *J Geophys Res*, 2007, 112: A11311, doi: 10.1029/2007JA012616
- 67 Chen Y, Liu L, Wan W, et al. Solar activity dependence of the topside ionosphere in low latitudes. *J Geophys Res*, 2009, 114: A08306, doi: 10.1029/2008JA013957
- 68 Liu L, Wan W, Ning B. A study of the ionogram derived effective scale height around the ionospheric h_mF_2 . *Ann Geophys*, 2006, 24: 851–860
- 69 Fejer B G, Farley D T, Woodman R F, et al. Dependence of equatorial F-region vertical drifts on season and solar cycle. *J Geophys Res*, 1979, 84: 5792–5796
- 70 González S A, Sulzer M P, Nicolls M J, et al. Solar cycle variability of nighttime topside helium ion concentrations over Arecibo. *J Geophys Res*, 2004, 109: A07302, doi: 10.1029/2003JA010100
- 71 Truhlík V, Trísková L, Šmilauer J. Manifestation of solar activity in the global topside ion composition- a study based on satellite data. *Ann Geophys*, 2005, 23: 2511–2517
- 72 West K H, Heelis R A, Rich F J. Solar activity variations in the composition of the low-latitude topside ionosphere. *J Geophys Res*, 1997, 102: 295–305
- 73 Kutiev I S, Marinov P G, Watanabe S. Model of topside ionosphere scale height based on topside sounder data. *Adv Space Res*, 2006, 37: 943–950
- 74 Zhao B, Wan W, Liu L, et al. Statistical characteristics of the total ion density in the topside ionosphere during the period 1996–2004 using empirical orthogonal function (EOF) analysis. *Ann Geophys*, 2005, 23: 3615–3631
- 75 Liu L, Wan W, Yue X, et al. The dependence of plasma density in the topside ionosphere on solar activity level. *Ann Geophys*, 2007, 25: 1337–1343
- 76 Liu L, Zhao B, Wan W, et al. Yearly variations of global plasma densities in the topside ionosphere at middle and low latitudes. *J Geophys Res*, 2007, 112: A07303, doi: 10.1029/2007JA012283
- 77 Su Y Z, Bailey G J, Fukao S. Altitude dependencies in the solar activity variations of the ionospheric electron density. *J Geophys Res*, 1999, 104: 14879–14891
- 78 Rich F J, Sultan P J, Burke W J. The 27-day variations of plasma densities and temperatures in the topside ionosphere. *J Geophys Res*, 2003, 108: 1297, doi: 10.1029/2002JA009731
- 79 Eddy J A. The Maunder minimum. *Science*, 1976, 192: 1189–1202
- 80 Smithtro C G, Sojka J J. Behavior of the ionosphere and thermosphere subject to extreme solar cycle conditions. *J Geophys Res*, 2005, 110: A08306, doi: 10.1029/2004JA010782
- 81 Dmitriev A V, Yeh H C, Chao J K, et al. Top-side ionosphere response to extreme solar events. *Ann Geophys*, 2006, 24: 1469–1477

- 82 Tsurutani B T, Gonzalez W D, Lakhina G S, et al. The extreme magnetic storm of 1–2 September 1859. *J Geophys Res*, 2003, 108: 1268, doi: 10.1029/JA009504
- 83 Tsurutani B T, Judge D L, Guarnieri F L, et al. The October 28, 2003 extreme EUV solar flare and resultant extreme ionospheric effects: Comparison to other Halloween events and the Bastille Day event. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L03S09, doi: 10.1029/2004GL021475
- 84 Davies K. *Ionospheric Radio*. Exeter: Short Run Press Ltd., 1990
- 85 Mendillo M, Klobuchar J A, Fritz R B, et al. Behavior of the ionospheric F region during the greatest solar flare of August 7, 1972. *J Geophys Res*, 1974, 79: 665
- 86 Wan W, Liu L, Yuan H, et al. The GPS measured SITEC caused by the very intense solar flare on July 14, 2000. *Adv Space Res*, 2005, 36: 2465–2469
- 87 Afraimovich E L. GPS global detection of the ionospheric response to solar flares. *Radio Sci*, 2000, 35: 1417–424
- 88 Liu H, Lühr H, Watanabe S, et al. Contrasting behavior of the thermosphere and ionosphere in response to the 28 October 2003 solar flare. *J Geophys Res*, 2007, 112: A07305, doi: 10.1029/2007JA012313
- 89 陈斌, 刘立波, 万卫星, 等. 1996~2003 年大耀斑事件引起的 TEC 突然增强的统计分析. *空间科学学报*, 2005, 25: 6–16
- 90 Liu J Y, Lin C H, Tsai H F, et al. Ionospheric solar flare effects monitored by the ground-based GPS receivers: Theory and observation. *J Geophys Res*, 2004, 109: A01307, doi: 10.1029/2003JA009931
- 91 Zhang D H, Xiao Z. Study of the ionospheric TEC using GPS during the large solar flare burst on Nov. 6, 1997. *Chinese Sci Bull*, 2000, 45: 1749–1752
- 92 张东和, 肖佐. 常青耀斑的日面位置与电离层 SITEC 的关系. *科学通报*, 2000, 46: 1339–1341
- 93 张东和, 肖佐. 太阳耀斑期间向日面电离层相关扰动现象与分析. *科学通报*, 2002, 47: 96–98
- 94 Zhang D H, Xiao Z, Igarashi K, et al. GPS-derived ionospheric total electron content response to a solar flare that occurred on 14 July 2000. *Radio Sci*, 2002, 37: 1086, doi: 10.1029/2001RS002542
- 95 Zhang D H, Xiao Z. Study of the ionospheric total electron content response to the great flare on 15 April 2001 using the International GPS Service network for the whole sunlit hemisphere. *J Geophys Res*, 2003, 108: 1330–1340
- 96 Zhang D H, Xiao Z. Study of ionospheric response to the 4B flare on 28 October 2003 using International GPS Service network data. *J Geophys Res*, 2005, 110: A03307, doi: 10.1029/2004JA010738
- 97 Le H, Liu L, Chen B, et al. Modeling the responses of the middle latitude ionosphere to solar flares. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 2007, 69: 1587–1598
- 98 Huba J D, Warren H P, Joyce G, et al. Global response of the low-latitude to midlatitude ionosphere due to the Bastille Day flare. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L15103, doi: 10.1029/2005GL023291
- 99 Meier R R, Warren H P, Nicholas A C, et al. Ionospheric and dayglow responses to the radiative phase of the Bastille Day flare. *Geophys Res Lett*, 2002, 29, 1461, doi:10.1029/2001GL013956
- 100 Sutton E K, Forbes J M, Nerem R S, et al. Neutral density response to the solar flares of October and November, 2003. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L22101, doi: 10.1029/2006GL027737
- 101 Jackman C H, DeLand M T, Labow G J, et al. Influence of several very large solar proton events in years 2000–2003 on the neutral middle atmosphere. *Adv Space Res*, 2005, 35: 445–450
- 102 Shea M A, Smart D F. A summary of major solar proton events. *Solar Phys*, 1990, 127: 297–320
- 103 Osepian A, Kirkwood S, Dalin P. The influence of ozone concentration on the lower ionosphere-modelling and measurements during the 29–30 October 2003 solar proton event. *Ann Geophys*, 2009, 27: 577–589
- 104 de Adler N O, Elías A G, Manzano J R. Solar cycle length variation: Its relation with ionospheric parameters. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 1997, 59: 159–162