

临近空间环境及其影响分析

陈凤贵¹, 陈光明¹, 刘克华²

(1. 北京应用气象研究所, 北京 100029; 2. 中国人民解放军94683部队, 福建 晋江 362001)

摘要: 介绍了临近空间和临近空间环境的概念, 分析了临近空间大气温度、风场、大气波动、电磁特征和光化学作用、电离层与中性大气的耦合、电流和高能粒子加热等物理变化过程, 总结了临近空间天气探测、预报手段和技术, 讨论了临近空间天气对飞行平台和仪器设备的影响。

关键词: 临近空间; 空间环境; 影响

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.04.017

中图分类号: V321.2⁺12; V321.2⁺13 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)04-0071-05

Analysis of Near Space Environment and Its Effect

CHEN Feng-gui¹, CHEN Guang-ming¹, LIU Ke-hua²

(1. Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China;

2. Unit94683 of PLA, Jinjiang 362001, China)

Abstract: The concepts of near space and near space environment were introduced. The character of air temperature, wind, atmospheric fluctuation, electromagnetic and photochemical processes, the coupling between the ionosphere and neutrality, electricity and heating and other high energy particles in the near space were analyzed. The method and technology of near space weather exploration and forecast was summarized. The influences of near space weather on flying platform and equipment were discussed.

Key words: near space; space environment; influence

从传统意义上讲, 临近空间位于天基卫星平台和航空飞机平台之间的地球大气空域, 处于稠密大气层到稀薄大气太空层的过渡区, 长期以来没有像中低空(对流层)和太空那样得到充分重视和应用, 对其认识、研究和应用相对落后。临近空间在军事应用上具有巨大的潜在价值, 这部分空间的大气密

度比较稀薄, 世界上绝大部分的固定翼飞机和地空导弹都无法到达如此高度, 处于临近空间的飞行器受到攻击的可能性较低; 同时由于这部分空间的高度远低于一般卫星的运行高度, 给情报侦查、收集和通讯提供了有利条件。近年来, 各军事大国纷纷对临近空间及其飞行器的研制、部署及作战使用开展

收稿日期: 2013-02-20

作者简介: 陈凤贵(1967—)男, 河南卫辉人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为气象水文装备论证。

了相应研究。2005年1月,美军确定了在临近空间飞行器的10个应用方向,开始了试验工作。俄、英、德、日等国家在飞艇研制和新概念临近空间飞行器研制方面也积累了一些技术和经验。为此,分析探讨临近空间环境及其对飞行器、仪器设备的影响意义重大。

1 临近空间

临近空间是指介于普通航空飞行器最高飞行高度和天基卫星最低轨道高度之间的空域。天基卫星的最低轨道约为200 km,航空飞机的最大飞行高度约为20 km,但从应用上讲,由于100 km以下为临近空间飞行器的主要活动区域,故在国内一般定义临近空间为离地球表面约20~120 km的空域,美军定义为20~100 km的空域。过去所称的“近空间”、“亚轨道”、“空天过渡区”、“亚太空”、“超高空”或“高高空”等区域,都是指临近空间。

2 临近空间环境

2.1 临近空间环境的概念

临近空间环境是指临近空间区域大气活动的变化状态以及可影响该空间与地面技术系统的运行和可靠性、危及人类健康和生命的状态。临近空间大气是地球中高层大气的重要组成部分,相对于低层的对流层大气、上部的电离层及以上空间环境,对临近空间环境的了解较少。临近空间环境同样涉及与日地关系、气象变化相关的复杂大气现象,存在着同低电离层之间及同对流层之间的耦合,这与太阳辐射引起的大气能量通量和动量传输有关,其复杂的状态变化和动力学扰动直接影响临近空间飞行器安全、航空航天活动和无线信息传输等。

2.2 临近空间环境参数

临近空间环境参数是描述临近空间环境状态及其变化的物理量,包括大气密度、大气温度、大气压力、大气风场、氧原子密度、臭氧含量、电子密度、气辉辐射、中子辐射、钠离子密度和流星通量等。

2.3 临近空间环境特征

2.3.1 临近空间环境基本特征

临近空间处于“空天过渡区”,从下到上跨越了大气平流层、中间层和热层的低层区域,与对流层相比,临界空间环境有着许多不同的特征。临近空间包括平流层、中间层和低热层。临近空间的下部是平流层,在平流层温度随高度增加而增加,到层顶达到最大,这是由于臭氧层吸收太阳紫外辐射加热大气造成的。随着高度的进一步增加,臭氧含量逐渐减少,中间层的大气温度随高度逐渐减小,到层顶达到最小,这部分也是全球大气最冷的地方。中间层以上是热层,这层大气吸收了太阳的远紫外辐射而发生部分电离,且随高度增加电离程度逐渐增强,因而温度随高度急剧增加。临近空间大气温度随高度变化如图1所示,平流层的温度随高度增加而增加,中间层的温度随高度减小,热层的温度再次随高度增加而增加。

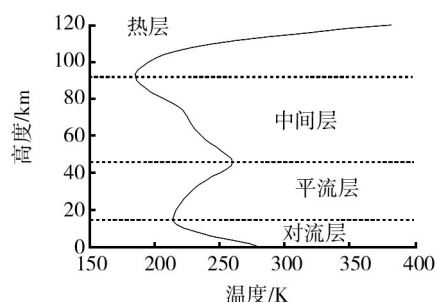


图1 临界空间大气温度的高度变

Fig. 1 Altitude variations of atmospheric temperature in the near space

临近空间的空气极为稀薄,但主要成分与对流层相似,仍以氮、氧等为主,另外还含有臭氧、水气、钠、铁等微量成分,其中臭氧的存在使得平流层的温度明显提高。相对于对流层而言,临界空间环境含水气极少,没有雨雪等现象,但在极区有夜光云的存在。由于太阳光紫外线的照射,大气开始电离,所以存在电子、离子成分,另外临界空间还存在着由外层空间进入的高能质子和中子。

平流层和热层的对流运动很小,而中间层有较强烈的对流运动。临近空间的水平平均风场在-200~200 m/s之间,风场的风向会随高度变化,因

而会有零风层的存在,即可能在某个高度上风速为0 m/s。除了环流之外,临界空间大气的波动特征极为明显,这些波动包括重力波、潮汐波和行星波等。

由于大气发电机的作用,临界空间中存在很强的电流,尤其是在磁暴期间,这种电流会有明显的增强。临界空间还存在着很多光学现象,包括中层大气闪电、气辉、极光、夜光云、流星等。

2.3.2 临近空间大气中的物理过程

影响临近空间环境的物理过程主要包括光化学作用、电离层与中性大气的耦合、低层大气波动、电流和高能粒子加热。

大气吸收和散射太阳光辐射,发生光化学反应,受太阳活动的影响很大;大气吸收太阳能后,还会发光,产生极光、气辉等,从而散失能量。临近空间的上部大气发生电离,形成对流层,电离层会与中性大气相互耦合,从而改变大气的温度场和风场。对流层无法将能量直接传导给临近空间大气,一般通过重力波、行星波、潮汐波等形式把能量传输给上层大气,将能量释放于临近空间。下层大气的波动能量上传对中层影响很大,能够改变中层的风场结构。中高层大气的电流主要集中在90~140 km,尤其是在赤道附近和极区,电流很大,这种电流和极区的高能粒子加热是影响临近空间大气结构的重要能源。

受太阳辐射等因素的影响,临界空间的大气参数有明显的季节变化特征。温度在各高度上的季节变化如图2^[1]所示,可以看出温度有明显的季节变化,并且在不同的高度有不同的特征。在85 km高度上,春秋季节的温度明显高于冬季和夏季的温度;在70 km高度上,冬季和夏季的温度明显高于春秋季节的温度,尤其是冬季的温度比较高,这是由于平流层爆发性增温的影响。

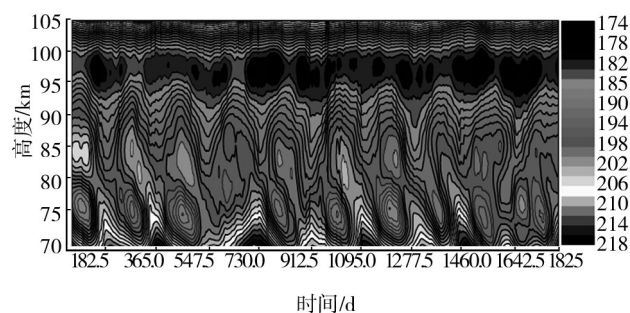


图2 各高度上温度的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of temperature at different height

临界空间的大气参数还有明显的潮汐波动特征。中国海南地区流星雷达观测到的经向风场潮汐特征如图3^[2]所示,可以看出白天和晚上的风场有明显不同。不同高度上的风场也明显不同,随高度的增加风速明显增加,在95 km高度上风场的平均速度为0~150 m/s,85 km上的风场为0~100 m/s。

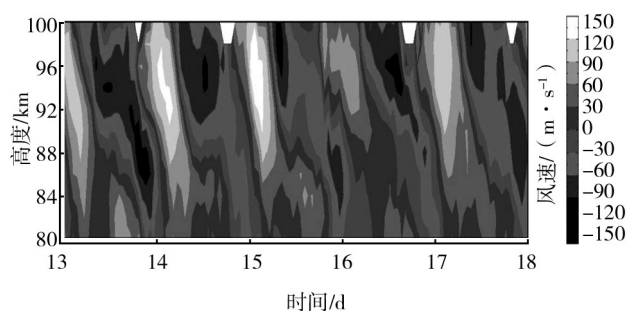


图3 富克流星雷达观测的经向小时风场^[2]

Fig. 3 Hourly meridional wind field by fuke meteor radar

临界空间大气的状态与太阳活动有关,由于高层大气通过臭氧和电离等吸收了大量的太阳紫外辐射,而太阳的紫外辐射与太阳活动密切相关,所以临近空间的大气参数也会受到太阳活动的影响。557.7 nm气辉辐射强度与太阳F10.7指数的相关关系如图4^[3]所示,可以看出两者有很好的正相关特性,说明气辉辐射强度受到太阳活动的影响。

空间环境的突变也会明显改变临近空间大气的状态。如在地磁暴发生时,会有大量能量通过焦耳加热或高能粒子沉降等方式注入到极区的中层大气,能明显改变中层大气的环流,进而改变全球大气环流状态。120 km高度上温度与地磁指数有明显的正相关关系,如图5所示^[4]。太阳质子事件引起的臭氧含量变化如图6^[5]所示,在1972年的第218天发生了一次太阳质子事件,事件发生后,平流层的臭氧含量受到了明显影响,在各纬度上臭氧含量都有不同程度的降低。

2.4 临近空间环境探测

根据探测平台的区别,临近空间环境探测可以分为地基探测、空基探测和天基探测。

2.4.1 地基探测

地基探测的仪器多种多样,大致可以分为两类。

1) 光谱学探测方法。由于大气会吸收太阳光

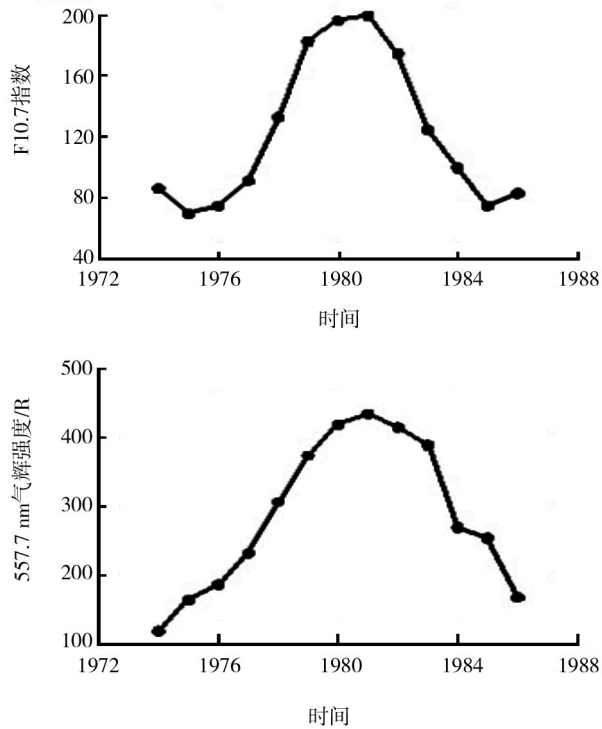
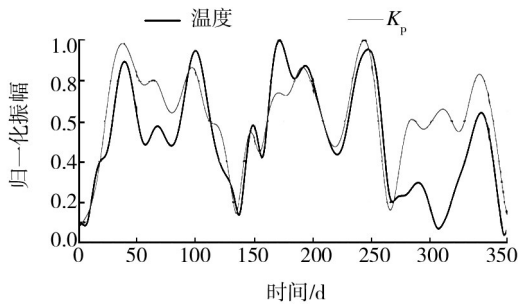


图4 557.7 nm气辉强度与太阳F10.7指数的相关关系

Fig. 4 The relation between 557.7 nm airglow intensity and solar flux (F10.7) variations

图5 120 km高度上温度与地磁指数(K_p)的相关关系Fig. 5 Relation between temperature and K_p at 120 km height

谱,并辐射出光谱,所以可以利用光谱分析反演大气温度分布、大气化学成分分布。气辉现象的观测和研究有利于分析大气的波动和时间变化特征,极光的观测和研究有利于粒子沉降与地磁等观测相配合,研究日-地耦合过程。另外,还有专门的仪器对中层大气闪电进行观测。

2) 各种雷达系统,包括VHF雷达、中频雷达、激光雷达、流星雷达和非相干散射雷达等。VHF(甚高频)雷达,又叫MST(中间层-平流层-对流层)雷达,

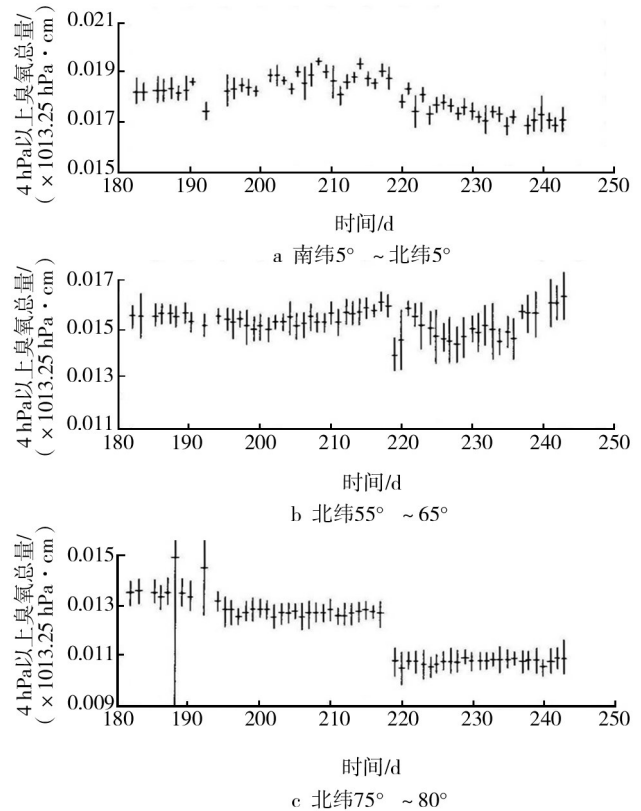


图6 太阳质子事件引起的臭氧含量变化

Fig. 6 The variations of ozone concentrations caused by solar proton event

可以探测20~110 km大气波动与湍流、风场矢量等的结构;中频雷达(MF雷达),可以探测60~110 km的风场电子密度;激光雷达可以探测0.5~100 km大气密度、温度剖面、风场;流星雷达可以探测80~110 km的风场;非相干散射雷达可以探测90 km以上的电子密度、离子密度、离子温度、电子温度、离子速度、大气温度等参数。

2.4.2 空基探测

空基探测主要有两种,第一种是火箭与下投式探空仪探测,利用火箭将探测仪器带到临界空间进行成分、光谱、气辉等直接测量。探测时常常在火箭飞到最高点向上或者平抛出探空仪设备,探空仪在下落时可以得到大气温度、压力、风场廓线。

另一种方法是气球搭载探测,利用氦气球可以达到60 km左右的高空,可进行温度、湿度、压力、风场、大气微量成分、大气雷电、GPS掩星、掩日观测、气辉等的遥感和原位测量,具有较高的垂直分辨率,如大气风场观测的垂直分辨率可达25 m。

2.4.3 天基探测

天基探测即卫星探测,可以分为垂直探测和临边探测。垂直探测一般利用搭载在卫星上的光学仪器垂直向下探测,如 Nimbus-7 卫星的 TOMS, SBUV 仪器,这种方法的缺点是不能得到整条廓线。临边探测利用光学仪器沿大气水平方向或侧向探测,可以探测到温度、成分、气辉、风场等的廓线,自从 1981 年的 SME 卫星发射以来,已经有 UARS, TIMED, ENVISAT, AURA 等卫星用于临近空间的临边探测。GPS 掩星观测,实质上也是一种临边探测,但与一般的光谱方法探测不同,它利用无线电波的折射率反演大气参数,可以得到地面至 60 km 高度的温度、水气、密度、气压等参数的廓线,还可以提供电离层 90 km 以上的电子密度剖面。至今已经有 Microlab-I, Oersted, SUN SAT, SAC-C, CHAMP, GRACE, ACE+, COSMIC 等卫星或星座用于掩星大气观测^[6]。

2.5 临近空间环境预报

用于分析预报的模式包括经验模式和数值模式两种,经验模式是利用观测数据和经验公式建立的,这些观测数据一般包括火箭、探空气球、中频雷达、非相干散射雷达、UARS 卫星等的观测数据。NASA 开发的质谱非相干散射模式(MSIS)可以计算 0~2000 km 大气的温度和成分,水平风场模式(HWM)可以计算 0~500 km 的风场。这两个模式也被国际空间研究委员会选取为国际参考大气模式。

数值模式。传统的大气环流模式只包括对流层大气或者热层大气模式,后来逐渐加进中层大气。整个中层大气的数值模式通常被简化为二维,甚至是一维的。事实上,即便是一维的中层大气模式也很复杂。随着计算机计算能力的不断提高,在过去的几十年内,逐渐发展了一系列的二维与三维基于大气环流模式的中层大气模式。数值模式大多模拟平流层内大气动力和化学过程,另有少数包括了热层的动力和化学过程。美国 NCAR 开发的 TIME-GCM 模式包括热层、电离层、中间层和平流层,技术较为先进。中科院空间中心开发了三维光化动力模式。

经验模式和数值模式都有优缺点。利用经验模式,可以比较快速、准确地计算各参数在平均状态下

的数值,但在特殊条件下以及无观测数据区域则误差较大。成熟的数值模式有计算极端条件下空间环境的能力,在现阶段数值模式还不成熟,虽然模式很多,但很少有能够应用于业务预报的模式,很多数值模式得到的基本温度和风场结构与观测值存在较明显的不一致。这主要因为现有模式分辨率低,无法考虑重力波等小尺度波动的影响;观测值误差大,边值条件不够准确,现有模式只能大量采用参数化的方法。

3 临近空间环境对飞行平台和仪器设备的影响

临界空间的大气密度很小,给飞行器正常工作带来影响。飞行平台的工作高度和尺寸大小受大气密度的控制,大气密度越小,在同等有效载荷条件下飞行平台所需的体积越大,飞行高度越低。大气密度会对飞行平台的动力和推进系统造成影响。临近空间,普通燃油发动机无法正常工作,只能采用带压缩机的涡轮增压发动机或电动机来提供动力。低密度还会严重降低热传导效果,使整个仪器设备系统的热环境控制变得复杂,如解决发动机散热等问题比在地面的难度大得多。在平流层的底部,大气密度较大,温度很低,需要考虑低温下设备的工作问题。

临近空间的风场一般在 0~200 m/s 之间,较大的风速会明显影响平台的飞行速度,给飞行平台的机动带来挑战。

太阳辐照会影响仪器设备的正常工作。飞行平台主要吸收太阳紫外波段和可见光波段的能量,影响飞行平台的温度;太阳紫外线会干扰电磁系统,使光学玻璃、太阳能电池盖板等改变颜色,改变瓷质绝缘的介电性质,使高分子聚合材料分解、裂析、变色、弹力和抗拉强度降低等,紫外线还会改变热控涂层的光学性质,提高太阳辐照的吸收率,影响仪器设备的温度控制。

在平流层高度,电子、光子、中子、质子等高能粒子的辐射强度较地面大大增加,它们对遥感仪器的运行影响较大。高能粒子诱发单粒子效应,导致单粒子翻转,对电子仪器设备造成损坏。

电离层 D 层、E 层和偶发 E 层高度在 60~120 km

(下转第 85 页)

于SO₂和Cl⁻沉降量都很低的大气环境,碳钢在SO₂污染环境中的腐蚀率计算值明显偏低,对环境腐蚀性的评估结果也偏低。

2) 在响应函数计算值的基础上计算置信区间,根据置信区间所评估的大气环境腐蚀性比直接使用计算值评估的结果更准确。

3) ISO 9223—1992 中的关键因素法与 ISO/FDIS 9223:2011E 中的剂量响应函数法对大气环境腐蚀性的评估精度相当。

4) 剂量响应函数中温度、湿度对污染物腐蚀作用的影响还有待进一步研究和验证。

参考文献:

- [1] ISO/FDIS 9223:2011E, Corrosion of Metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheres—Classification, Determination and Estimation[S].
- [2] ISO 9223—1992, Corrosion of Metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheres—Classification[S].
- [3] 叶堤,赵大为,张冬保. 金属材料大气腐蚀破坏的剂量响应函数研究[J]. 中国腐蚀与防护学报,2006,26(6):351.
- [4] KAZUO SATO. Automotive Engine Exhaust Gas Environmental Pollution and Environmental Control Measures[J]. Shibaura Inst of Technol,2002,38(11):176—180.
- [5] MIKHAILOV A A. Dose-response Functions as Estimates of the Effect of Acid Precipitates on Materials[J]. Protection of Metals,2001,37(4):357—366.
- [6] 戴明安,刘珍芳. 碳钢大气腐蚀与环境因素的关联度分析[J]. 腐蚀与防护,2000,21(4):147—148.
- [7] 马小彦,屈祖玉,李长荣. BP神经网络在碳钢及低合金钢大气腐蚀预测中的应用[J]. 腐蚀科学与防护技术,2002,14(1):52—54.
- [8] 梁彩凤,侯文泰. 钢的大气腐蚀预测[J]. 中国腐蚀与防护学报,2006,26(3):129—135.
- [9] 王成章,汪学华,秦晓洲. 碳钢及低合金钢在重庆和万宁地区大气腐蚀规律研究[J]. 装备环境工程,2006,3(2):23—28.
- [10] 初世宪,王洪仁. 工程防腐蚀指南:设计·材料·方法·监理检测[M]. 化学工业出版社,2006.
- [11] 丁国清,张波. 几种典型钢在西部大气环境中的腐蚀行为及预测研究[J]. 腐蚀科学与防护技术,2011,23(1):69—74.
- [12] 唐其环. 润湿时间统计方法研究[J]. 环境技术,2003,21(2):18—20.
- [13] MENDOZA A R, CORVO F. Outdoor and Indoor Atmospheric Corrosion of Carbon Steel[J]. Corrosion Science, 1999,41(1):75—86.
- [14] 叶堤,赵大为,李娟,等. 大气污染对碳钢的腐蚀影响研究[J]. 重庆建筑大学学报,2005,27(1):80—83.

(上接第75页)

之间,仪器设备在该区域高速运行时,会产生等离子体鞘,对无线电信号产生屏蔽;电离层闪烁干扰导航通信。在80~150 km高度区域,电离层发电机效应产生的电流,可使电子设备的电路受损。

参考文献:

- [1] XU J, SMITH A K, YUAN W, et al. Global Structure and Long-term Variations of Zonal Mean Temperature Observed by TIMED/SABER[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2007,112:24.
- [2] JIANG G Y, XU J Y, SHI J K, et al. The First Observation of the Atmospheric Tides in the Mesosphere and Lower Thermosphere over Hainan, China[J]. Chinese Science Bulletin,2010,55(11):1059—1066.
- [3] THAYER Jeff, LEI J, CHANG L, et al. Recurrent Geomagnetic Activity Driving a Multi-day Response in the Thermosphere and Ionosphere[EB/OL]. <http://www.acd.ucar.edu/Events/Meetings/HEPPA/program.html>. (余不详)
- [4] MCPETERS R D, JACKMAN C H, STASSINOPOULOS E G. Observations of Ozone Depletion Associated with Solar Proton Events[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1981,86(12):12071—12081.
- [5] MIKHALEV A V, STOEVA P, MEDVEDEVA I V, et al. Behavior of the Atomic Oxygen 557.7 nm Atmospheric Emission in the Current Solar Cycle 23[J]. Advances in Space Research,2008,41(4):655—659.
- [6] CHEN Guang-ming. Advancement in GNSS Occultation for Sounding Atmosphere[J]. Meteorological Equipments, 2004(1):23—24.
- [7] 陈光明. GNSS掩星大气探测的进展[J]. 气象仪器装备技术,2004(1):23—24.