

# 极区太阳能量粒子沉降对高纬臭氧含量影响研究进展

黄聪<sup>1,2</sup> 张效信<sup>1</sup> 曹冬杰<sup>1</sup> 王维和<sup>1</sup> 黄富祥<sup>1</sup> 肖子牛<sup>3</sup> 林冠宇<sup>4</sup> 刘丹丹<sup>1</sup>

(1 国家卫星气象中心空间天气室, 北京 100081;

2 中国科学院近地空间环境重点实验室, 中国科学技术大学, 合肥 230026;

3 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 4 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130000)

**摘要:** 在极区, 太阳能量粒子沉降对于臭氧的影响一直是国际空间科学界研究的热点。介绍了太阳能量粒子沿地球磁场磁力线进入极区后造成高纬地区臭氧含量损耗的机制, 典型太阳能量粒子沉降事件造成臭氧损耗的观测研究以及国际上对于沉降粒子与臭氧损耗的模式模拟。讨论了目前应用大气化学耦合模式在分析太阳能量粒子沉降造成的臭氧损耗为气候变化带来的影响方面的工作, 及一些极端空间天气事件的模拟结果。

**关键词:** 太阳能量粒子, 臭氧, 大气化学, 空间天气

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.04.005

## Advances in Study of Solar Energetic Particle Precipitations Impact on Polar Ozone

Huang Cong<sup>1,2</sup>, Zhang Xiaoxin<sup>1</sup>, Cao Dongjie<sup>1</sup>, Wang Weihe<sup>1</sup>, Huang Fuxiang<sup>1</sup>, Xiao Ziniu<sup>3</sup>, Lin Guanyu<sup>4</sup>, Liu Dandan<sup>1</sup>

(1 Space Weather Division, National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

2 CAS Key Laboratory of Geospace Environment, University of Science & Technology of China, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026 3 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

4 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000)

**Abstract:** How solar energetic particles impact on polar ozone content is a highlight of space science study. This article introduces the mechanism that solar energetic particle precipitations induce the depletion of ozone when these particles go into the atmosphere along the magnetic lines, the observations on typical ozone depletions caused by particle precipitations and the modeling results. We also discuss the applications of atmospheric chemistry coupling models on how ozone depletions caused by particle precipitations impact on climate change and the model simulations of extreme space weather events.

**Keywords:** solar energetic particles, ozone, atmospheric chemistry, space weather

### 1 引言

在诸多太阳活动影响地球气候的理论中, 作为通过地球磁力线开放区域——极区而进入到地球大气的太阳能量粒子沉降 (Solar Energetic Particle Precipitation, SEPP), 可以直接作用于大气, 改变其

中的成分从而调制大气中臭氧含量的驱动机制, 成为了近年来国际上的一个研究热点。

在剧烈的空间天气事件期间, 大量高能粒子从地球磁力线开放区域进入到极盖区大气。随着能量的增加, 这些粒子甚至可以达到20km的高度<sup>[1]</sup>。粒子的电离作用会产生大量的奇氮 (NO<sub>x</sub>) 物质, 这些物质是大气中臭氧的消耗源, 而这样的事件一般会持续几小时到几天。高能粒子沉降对高空大气臭氧含量影响较大, 对40km以下大气中的臭氧含量影响则较小。但在剧烈的磁暴活动中, 随着进入大气的高能粒子能量的增加, 40km以下大气中的臭氧含量也会有明显的消耗 (10%~20%), 且持续时间较长 (1~2个月)。作为平流层主要热源的臭氧含量的改变, 势必影响到平

收稿日期: 2013年12月27日; 修回日期: 2014年3月12日  
第一作者: 黄聪 (1978—), Email: huangc@cma.gov.cn  
资助信息: 国家重大科学研究计划项目 (2012CB957801, 2012CB957803); 国家重点基础研究发展计划项目 (2011CB811400), 国家高技术研究发展计划 (2010AA122205, 2012AA121000), 国家自然科学基金项目 (41004085, 41074126), 中科院重点实验室专项基金资助项目

流层的热平衡和大气环流,这种改变再通过某种大气波动机制传导到对流层大气从而影响到地球的天气气候。但太阳能量粒子沉降对臭氧含量的具体调制程度和量化驱动机制,还需要大量的数据去验证和统计分析。

自20世纪80年代以来,国际上对极区高能粒子沉降特别是在剧烈空间天气事件期间的太阳能量粒子沉降事件对高纬地区臭氧含量的调制作用开展了大量的理论和模拟研究。近年,我国国家重点基础研究发展计划(973计划)也支持了相关的研究工作,探讨关键的天文因子对地球气候的影响。本文从观测事例、作用机制、模式模拟3个方面概述了极区太阳能量粒子沉降对高纬臭氧含量的影响研究,最后对目前研究的成果做了总结与讨论。

## 2 观测事例

自Weeks等<sup>[2]</sup>在1969年11月2日太阳质子事件(Solar Proton Event, SPE)后通过火箭的探测资料,首次发现52km高度的臭氧含量的损耗与SPE有明显相关以来,学者们利用“云雨”系列卫星的观测资料陆续发现了SPE发生后高纬地区臭氧含量的明显减少<sup>[3-5]</sup>。Jackman等<sup>[6-9]</sup>对第21, 22, 23太阳活动周的SPE和大气臭氧含量进行了分析,发现这些SPE对50km以上的臭氧有明显的消耗并且与太阳天顶角有强相关。Seppälä等<sup>[10-12]</sup>对2003—2004年间北极地区的观测资料进行分析后发现,两次较大的能量粒子沉降(Energetic Particle Precipitation, EPP)事件(“万圣节风暴”期间的EPP增强)使40km高度的臭氧损耗30%和17%,他们还利用GOMOS卫星2002—2006年间的观测资料发现了由EPP产生的奇氮物质在南北极区夜间上层大气中的储运过程。Verronen等<sup>[13]</sup>利用POES系列卫星搭载的粒子探测器和微波辐射计资料,首次发现了在中间层大气中由外辐射带高能电子沉降生成的奇氮物质。

国内学者在太阳能量粒子沉降调制臭氧含量方面的工作基本集中于对太阳质子事件与臭氧含量变化的相关分析方面,叶宗海等<sup>[14]</sup>统计分析了1960—1982年间1级以上的太阳质子事件与4个不同地理纬度大气臭氧含量的相互关系,结果表明,只有3、4级的大事件才对臭氧含量产生扰动且有明显的纬度效应;在极区1级以上质子事件对臭氧含量有影响,且随质子事件级别的增高其臭氧含量的扰动也加大,通常,太阳质子事件的当天,臭氧含量开始下降,扰动持续数天;冬天太阳质子事件对臭氧的扰动大于夏天的扰动。言穆弘等<sup>[15]</sup>对太阳活动、平流层臭氧和温度进行了相关分析,认为这种相关关系在年时间尺度和日时间尺度上

均存在,在高纬地区明显。

对于典型空间天气事件造成太阳能量粒子沉降及对高纬地区臭氧损耗的后效的观测基本依靠卫星数据,这方面的文章还有很多。本文列出3个典型的空间天气事件,来分析粒子沉降对于臭氧含量的影响,其中在2012年的事件分析中加入了国家卫星气象中心的研究团组(以下称:我们)应用我国风云三号卫星(FY-3)观测资料所做的分析工作。

### 2.1 “万圣节风暴”

“万圣节风暴”是第23太阳活动周中最强的一次太阳活动事件,发生于2003年10月19日—11月21日期间,是有观测数据以来拥有最大的黑子面积、最快的CME激波、最强的太阳质子事件和GLE(Groud Level Event,地面宇宙线增强)、最大的射电突变、最高的南向太阳风速度和特强的地磁场扰动的一次空间天气事件。从10月19日开始太阳活动区连续爆发143个耀斑,其中11月4日爆发X28级耀斑,伴随着耀斑共有80次CME喷发,其中最快的激波速度为 $2459\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ,这些CME中造成激波速度 $>2000\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的有7次,最强的激波能量为 $1.2\times 10^{33}\text{erg}$ 。由于CME造成的强激波对太阳风阳离子和电子进行加速,形成了5个大的太阳质子事件,其中最大的太阳质子事件发生在10月28日,大于10MeV的质子流量峰值达到33600pfu(proton flux unit,质子流量单位)。万圣节风暴期间,伴随着耀斑、CME和激波等太阳扰动,共造成了3次大磁暴。强磁暴期间,出现白日极光现象,极光增强6倍,北极区热层底部和上平流层臭氧损耗50%~70%,时间持续两周,南极情况类似、但损耗较小。图1为NOAA-16卫星SBUV仪器探测的0.5hPa高度处臭氧受太阳质子事件的损耗过程。

### 2.2 “中国龙”事件及3月事件

“中国龙”事件是发生于2012年1月下旬的一次强空间天气事件,由于这次事件正值中国农历“龙年”,因此被称为“中国龙”事件。这次事件中所发生的太阳质子事件(1月23日)流量峰值达到了6310pfu,是有观测以来第13大质子事件。“中国龙事件”期间分别在1月23日和27日发生两次太阳质子事件,其中27日的太阳质子事件流量虽然不及前次,但能谱较“硬”(能量大于100MeV的质子比23日的事件流量高),因此在较低高度上的臭氧观测中两次事件有不同的表现。3月事件是2012年3月发生的强空间天气事件,这次事件期间也有两次太阳质子事件发生,其中3月7日发生的太阳质子事件峰值流量达到了6530pfu,是有观测以来第12大质子事件,能量超过

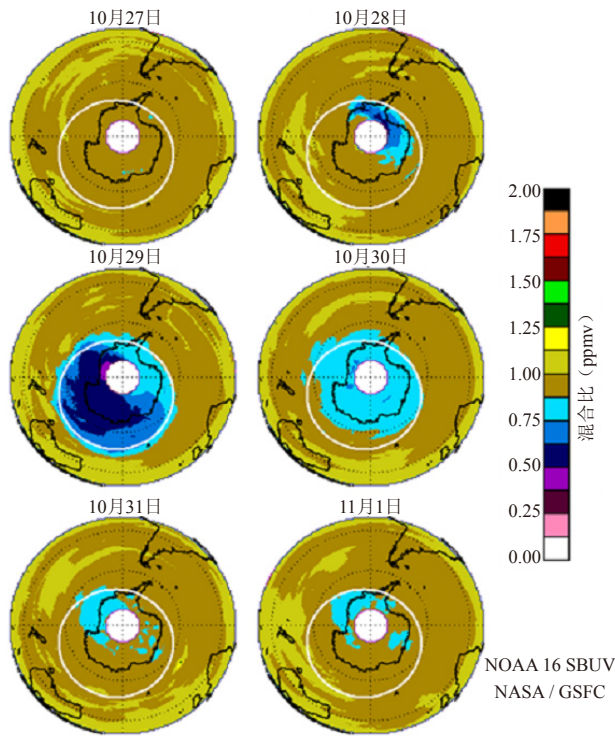


图1 “万圣节风暴”中太阳质子事件对南极区臭氧损耗过程。2003年10月28日的强太阳质子事件后，南极区0.5hPa处的臭氧迅速损耗并形成明显的臭氧洞，图中白圈表征地磁纬度60°S。图片引自 Jackman等<sup>[16]</sup>

100MeV的质子流量达到70pfu，会对较低高度大气中的臭氧产生明显影响。

图2是风云三号B星空间环境监测器探测到的极区质子事件。图3是我们应用风云极轨气象卫星搭载的臭氧总量探测器(TOU)探测的2012年1—3月的臭氧总量，其中南北极的臭氧在2月份都出现了大约4%的损耗，但因为臭氧含量具有季节变化的特点，而且2012年1月北半球的平流层出现增温现象，而质子事件是发生在增温现象结束后，这时中间层生成的大量NO<sub>x</sub>物质与质子事件的效应混淆在一起，使得损耗事件的分析变得复杂。图4是在质子事件期间，我们

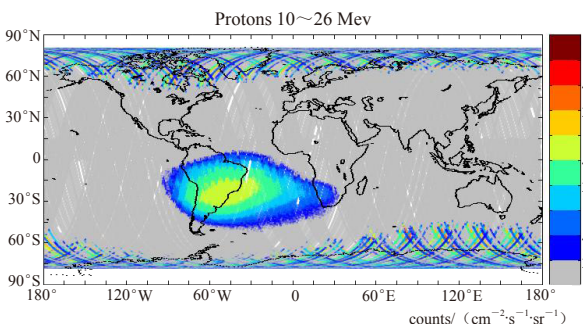


图2 2012年1月15—31日FY-3B高能粒子监测数据，在中国春节期间的太阳爆发造成地球极区10MeV能量以上质子流量超过6000pfu

应用风云三号卫星搭载的臭氧垂直探测仪(SBUS)探测的30km高度处分层臭氧厚度的观测结果，采用30km高度的数据是因为两次空间天气事件中都有100MeV以上质子的流量增强，但增强的幅度不同，100MeV以上能量的质子可以直接到达30km以下的大气并产生短时效应，这样可以和臭氧季节变化中一些长期效应区分开，此外还可以观测100MeV以上能量质子流量变化对30km处臭氧含量的不同影响。图4a是“中国龙”事件中产生两次质子事件对30km处臭氧含量的影响观测图，可以看出23日的质子事件并没有对30km处臭氧含量带来明显影响，而27日的质子事件则有一个较明显的影响，这是因为27日的质子事件中，能谱较“硬”，大于100MeV能量质子流量要比23日的质子事件高；图4b是3月事件中两次质子事件对30km高度处臭氧含量的影响观测，可以看出由于7日爆发的质子事件能谱很“硬”，对30km高度处臭氧的含量产生了明显的影响，臭氧分布也有改变，而13日的事件虽然臭氧的含量也有一定损耗，但由于大于100MeV质子流量不如7日的事件，因此对30km的臭氧影响就不如7日的事件明显。

图5是我们应用SBUS的观测数据计算得到的臭氧在南北极区(60°—90°N, 60°—90°S)内分层臭氧含量距平时序变化图，从图5上可以看出北半球由于1月的平流层突然增温事件，在2月中平流层的位置由于中间层的富NO<sub>x</sub>物质的沉淀导致了一个较长时间损耗，在1月23日的事件发生后在中上平流层都出现了

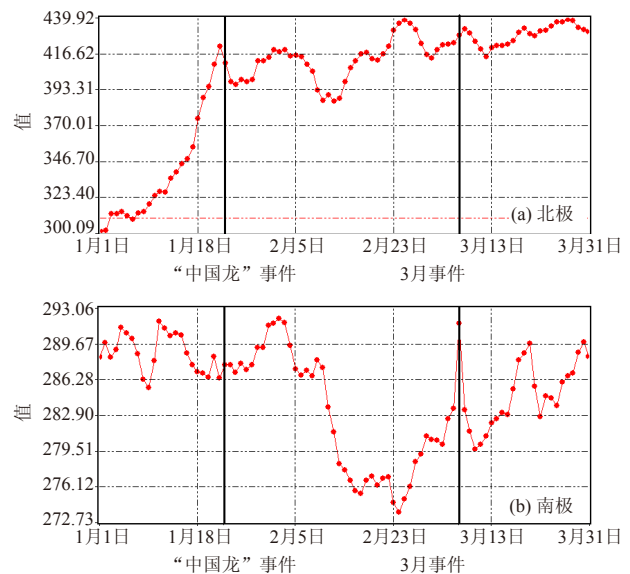


图3 FY-3A TOU观测的2012年1—3月的南北极区臭氧总量数据，图中臭氧总量数据单位为DU。在2月南北极区的臭氧总量大致有一个4%的损耗，损耗的原因包含了北半球的平流层突然增温、南半球平流层顶持续降温和太阳质子事件的影响

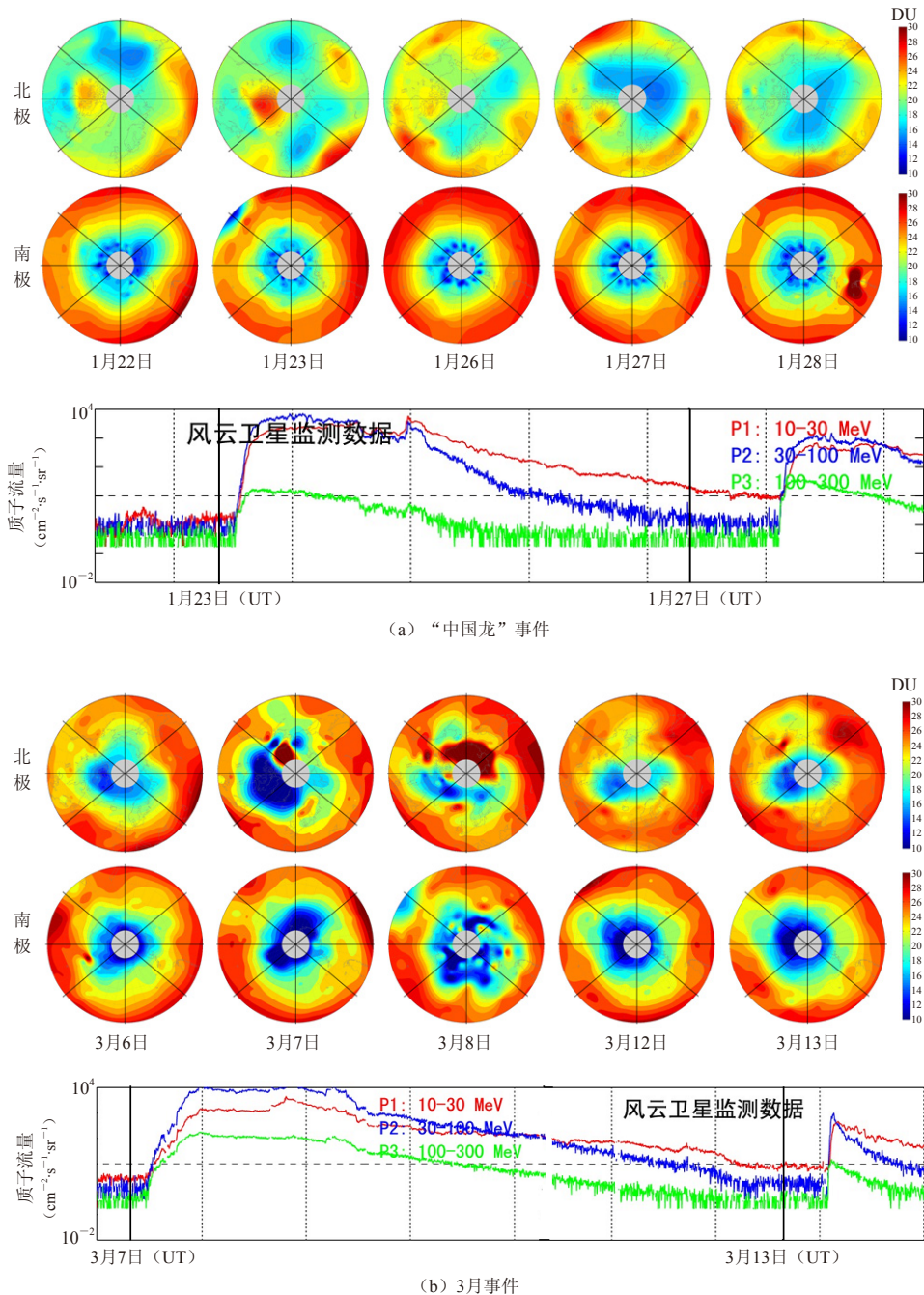


图4 风云三号气象卫星臭氧垂直探测仪器探测的两次事件中30km高度处、南北极区（纬度60°以上地区）臭氧含量的变化

一个大约-10%的距平变化，而在3月事件发生后，中上平流层不仅出现了短时的损耗，并且在事件后还有一个持续到3月底的向下传播的损耗影响。由于混杂了其他事件的影响，质子事件的长期效应不易单独分离出来；在南半球的距平图上因为平流层顶的持续降温事件，使“中国龙”事件的影响难于分辨，但在3月事件发生后，上平流层臭氧出现了持续2~3天的损耗变化。总体上看，北半球高纬地区平流层臭氧损耗

对于这两次事件的响应要比南半球显著一些。

### 3 作用机制

在太阳能量粒子沉降影响臭氧含量的驱动机制研究中，极区的能量粒子沉降会在中层大气中引起离子化学反应，产生奇氮、奇氢物质，再通过光化学反应，消耗高纬地区平流层和中间层大气中的臭氧。以下从粒子成分、光化学损耗机制和储运过程3个方面介绍太阳能量粒子沉降对臭氧的损耗机制。

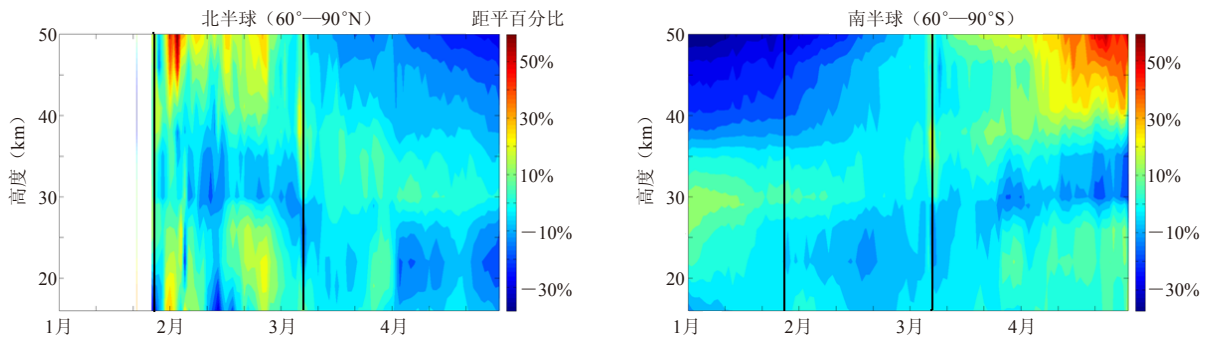


图5 应用风云三号气象卫星臭氧垂直探测数据得到的南北半球高纬地区臭氧含量的距平变化，黑竖线表明两次事件的发生时间位置

### 3.1 粒子成分

太阳能量粒子 (Solar Energetic Particle, SEP) 的成分包括质子和电子。太阳高能质子主要由太阳耀斑或者CME (Coronal Mass Ejection, 日冕物质抛射) 激波产生, 能量由几MeV到500MeV, 一般来说10MeV质子就可以到达65km的高度<sup>[17]</sup>, 30MeV质子可以达到50km的高度, 100MeV以上的质子可以达到30km以下的平流层大气。太阳高能质子事件的发生频率与太阳活动呈正相关。

太阳能量粒子中的电子随能量的不同分为低能电子 (1~30keV) 和中一高能电子 (30keV到几MeV)。低能电子主要由地球磁层的等离子片内产生<sup>[18]</sup>, 存在于极光电子沉降带中, 所能达到的大气高度为90km以上的区域, 受地磁扰动影响明显, 它的流量峰值时间区间存在于太阳活动周的下降时段<sup>[19-20]</sup>。中一高能电子主要来源于地球的外辐射带, 它是由太阳风高速流 (High-Speed Solar Wind Stream, HSSWS) 或者CME带来的, 存在于亚极光纬度带内, 它可以到达的大气区域从90km (30Kev) 高度直到50km (2MeV) 以下。中一高能电子事件的发生频率比较复杂, 它是由CME和HSSWS共同驱动的, CME的发生频次与太阳活动正相关, 一般认为HSSWS的发生频次峰值是在太阳活动周的下降时段<sup>[21]</sup>。在最近的研究中, 有些学者认为中一高能电子事件在气候变化中的作用要超过SPE, 原因在于SPE的发生频率和流量比中一高能电子事件要低很多。

### 3.2 损耗机制

SEP由于粒子能量的限制 (<500MeV), 无法像银河宇宙线 (Galaxy Cosmic Ray, GCR) 那样可以无视地球磁场的刚度到达地球低纬度地区。SEP进入大气的途径是沿地球磁场磁力线进入地球极区大气, 并通过电离作用产生大量的次级电子与大气主要成分作

用形成 $N_2^+$ 、 $N^+$ 、 $NO^+$ 、 $O^+$ 、 $O_2^+$ 等离子物质, 这些离子通过电荷交换和复合反应产生一些奇氮 ( $NO_x$ ) 物质和奇氢 ( $HO_x$ ) 物质, 这些奇氮和奇氢产生物会参与到臭氧的光化学反应过程中, 充当化学反应中的催化剂, 最终的反应结果为:



因此, SEP进入极区大气后通过这些离子化学反应, 导致了这一区域内臭氧的损耗。但由于SEP成分和能量的不同, 所能进入的大气的深度也不同, 而且奇氮、奇氢物质的存在寿命也不一样, 受大气环流的影响, 这些“损耗源”的输运和存储过程就比较复杂。

### 3.3 储运过程

奇氢、奇氮物质的储运过程取决于这些物质的光化学寿命与大气环流运动的典型时间尺度。其中奇氢物质由于存在时间短, 在中间层的寿命大概只有几个小时, 在平流层更是以分钟计算, 因此奇氢物质造成的影响是短暂的。而奇氮物质由于存在的寿命长, 在平流层高度奇氮物质的寿命可以长达几十天甚至年的量级, 因此由太阳能量粒子沉降造成的奇氮物质在大气环流的输运下, 可以扩散到更广大的区域, 产生更深远的影响。表1列出了奇氢、奇氮物质寿命和环流运动的典型时间尺度, 当两者的时间尺度可比拟或者光化学寿命超过运动的典型时间尺度时, 物质的输运过程才是有效的。此外, 由于奇氮物质的化学反应链中需要氧原子的参与, 由于地球大气背阳面缺乏日光, 奇氮物质在反应中转变成 $NO_2$ 分子后, 由于氧原子的耗尽无法进行下一步反应, 则太阳能量粒子对臭氧的损耗影响以“ $NO_2$ ”的形式存储起来, 待到有日光照射大气生成氧原子后再继续对臭氧的损耗反应。奇氮物质的这一“黑夜存储”特点, 在奇氮物质的输运过程中是很重要的特点, 它使奇氮物质在环流搬运的作用下在远离产生地点的位置继续对臭氧产生破

表1 氧、奇氮和奇氢物质光化学寿命与大气环流运动的典型时间尺度对比

	类别	40km	60km	80km	100km
光化学寿命	Ox	天级别	小时级别	小时级别	月级别
	NOx	月级别	月级别	月级别	天级别
	HOx	分钟级别	小时级别	天级别	年级别
典型时间尺度	纬向环流	小时级别	小时级别	天级别	天级别
	经向环流	月级别	天级别	天级别	多天级别
	垂直运动	月级别	月级别	月级别	月级别

注：数据引自Brasseur and Solomon<sup>[18]</sup>

坏作用。奇氮物质的向低纬的水平运输要靠Brewer-Dobson环流来完成，向下的扩散过程则是通过极涡的大气向下运动。

#### 4 模式模拟

近些年，已有不少研究<sup>[22-24]</sup>关注了“万圣节风暴”事件中的太阳质子事件对高纬地区臭氧含量的影响。剧烈的空间天气事件中，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 HOx (H, OH, HO<sub>2</sub>) 和 NOx (N, NO, NO<sub>2</sub>) 等成分的密度（中间层和上平流层中的臭氧主要损耗源为HOx，中平流层以下的臭氧损耗源为NOx<sup>[25]</sup>），进而会减小臭氧密度并有调制大气动力结构的迹象，导致低中间层的环流和气温变化<sup>[24, 26-27]</sup>。很多学者以SPE、臭氧的观测数据和光化学反应的理论，建立模型去模拟大型SPE对臭氧含量的影响，例如1989年10月和2003年的“万圣节风暴”等剧烈的空间天气事件<sup>[28-36]</sup>。

在极端空间天气事件模拟研究中，Thomas等<sup>[37]</sup>的模拟结果显示，1859年“卡林顿（Carrington）”事件中EPP对极区臭氧造成的影响是1989年10月SPE对臭氧的损耗量的3.5倍；Rodger等<sup>[38]</sup>的模拟研究表明在类似“卡林顿”事件级别的空间天气事件中，由于能量大于30MeV质子流量的大幅增加，上对流层臭氧损耗可达40%。国际早期的研究集中于SPE与臭氧的相关关系，近年来，随着近地卫星对地球极区辐射带的探测资料和全球臭氧观测资料的丰富，国际上学者的研究更多地去分析能量粒子沉降（Energetic Particle Precipitation, EPP）对臭氧含量的影响，从高能粒子的流量、分布及能谱出发可以更好地了解能量粒子沉降调制臭氧含量的驱动机制，模拟空间天气事件中EPP带来的高纬地区臭氧含量变化及极盖气温的改变。Brasseur等<sup>[18]</sup>认为带电高能粒子在大气中会产生奇氮物质（NOx），这种物质对臭氧损耗起到催化的作用。Rozanov等<sup>[39]</sup>利用NOAA TIROS卫星的高能电子沉降（Energetic Electron Precipitation, EEP）

探测结果模拟了NOx的产生率并把它加到他们的化学—气候模型中，得到了极盖区气温会因此改变2K的结果，他们认为EPP在这一区域的作用有可能超过了太阳活动周内紫外辐射波动对臭氧含量的影响。

Randall等<sup>[40-41]</sup>认为高能粒子沉降给极区平流层上层大气中的臭氧含量带来了明显损耗，并且奇氢物质造成的臭氧损耗和恢复时间很短，但奇氮物质造成的臭氧损耗时间却可长达几月甚至一年的量级，他们还利用1992—2005年间卫星观测资料对南半球平流层中EPP-NOx效应结合太阳活动周作了年变化分析，指出EPP-NOx效应的年变化并不和太阳活动周一一对应，在2002年（太阳活动峰年）极区出现的气旋异常反而有可能是这一年EPP流量较低引起的。Rozanov等<sup>[39]</sup>认为EPP通过对平流层臭氧含量的调制，可以影响到平流层的热辐射平衡从而导致气候变化。在较长的时间尺度上，Sinnhuber等<sup>[42]</sup>发现极区臭氧含量损耗了20%，并且这与太阳活动造成的EPP流量的年代际变化有关。但对于EPP在年代际尺度上对极区臭氧含量的调制效果以及对气温的影响，学者们还是有争议的<sup>[43-45]</sup>。目前，欧洲的气象研究机构（ECMWF）正在对由磁暴引起的EPP对臭氧含量的影响导致的极区气温改变的模拟结果<sup>[39]</sup>进行观测数据上的分析和验证<sup>[46]</sup>。以下，我们通过3个研究事例去介绍太阳能量粒子沉降对臭氧损耗和气候变化影响的数值模拟工作。

#### 4.1 臭氧损耗模拟

由于有大量的观测研究证实太阳能量粒子沉降的确会对高纬地区的臭氧含量产生损耗影响，并且粒子沉降产生的奇氮物质由于存在寿命长和“黑夜存储”特性可以受到环流的输运，从而在更广阔的区域来调制臭氧的含量，那么根据观测数据和大气光化学理论对粒子沉降和臭氧损耗之间的关系进行量化模拟，则顺理成章。太阳能量粒子沉降对于臭氧损耗的数值模拟主要是结合能量粒子进入大气后产生的离子对所生成的奇氢、奇氮物质（损耗源）的生成量和离子化学反应方程式来计算臭氧的损耗，再加上损耗源物质的传输过程的动力过程，建立大气化学—传输模型。其中，奇氢、奇氮物质的生成量取决于进入大气的太阳能量粒子的流量和能谱（即注入的总能量和到达的高度），一般来说35eV可以产生一个离子对<sup>[47]</sup>，而每个离子对所能生成的奇氢、奇氮物质是有一个函数关系的，其中奇氢物质的生成量取决于高度，而奇氮物质取决于反应生成的激发态氮原子N(<sup>2</sup>D)和基态氮原子N(<sup>4</sup>S)的分支比，目前一般认为每个离子对可以生成1.25个奇氮分子，即N(<sup>2</sup>D)与N(<sup>4</sup>S)的分支比为

0.55/0.45<sup>[47]</sup>。损耗源物质的传输过程则是根据奇氢、奇氮物质的光化学寿命和“黑夜存储”的特点，考虑大气扩散、环流和季节因素来计算臭氧损耗的水平与垂直传输过程。

国际上对于粒子沉降造成的化学影响的建模工作已开展了20多年，取得了很多进展。其中，Funke等<sup>[48]</sup>、Jackman等<sup>[30, 49]</sup>做了大量工作，他们针对近几个太阳活动周中重要的太阳质子事件结合他们建立的多维光化学—传输模型进行了大量的观测试验与数值模拟，得到了一些重要结果，比如：粒子沉降中产生激发态和基态的氮原子的分支比，即每个离子对生成的氮分子数在1.5个以下；质子事件中，奇氮物质的光化学寿命长，有足够长的存在时间沉淀到平流层作为平流层臭氧的消耗源，奇氢物质与之相反；超强的太阳质子事件在大气中产生的影响会持续几个月甚至年的时间量级等。这方面的一些最新进展可以参考Jackman等<sup>[49]</sup>、Reddmann等<sup>[50]</sup>、Egorova等<sup>[51]</sup>的工作。图6是Jackman等<sup>[16]</sup>对“万圣节风暴”中超强SPE的模拟结果，可以看到超强SPE造成的奇氮物质在北半球大气中所持续存在的时间长达2年，这个模拟结果是观测相印证的。

## 4.2 极端事件模拟

由于高度量化的太阳活动观测始于卫星时代，故目前积累的空间天气事件观测事例也只有50多年的数据。而在卫星时代之前，也曾发生过极端的空间天气事件，其剧烈程度可能超过有观测以来任何一次事件。那么这些极端事件对臭氧的影响究竟如何，需要研究者们来建模模拟极端事件的效应。但对于卫星时代之前的极端事件的模拟，困难之处在于缺乏全面和精密量化的观测数据，对于极端事件的程度估算只

能依靠当时一些文献的记载。近些年，国际上有些学者对于发生在1859年的一次非常剧烈的空间天气事件开展了分析，这次事件史称“卡林顿”事件，事件的名称来源于卡林顿和Hodgson观测到了这一事件并在1860年的文献中记载了下来<sup>[52-53]</sup>。“卡林顿”事件始于1859年9月1日的一次长达5分钟太阳耀斑，17小时后高速的CME达到近地空间导致了长达2小时的剧烈地磁暴。这次地磁暴如此剧烈，据文献中记载，中纬度地区的人们可以看到极光现象，美国和欧洲的电报系统由于地磁感应电流的影响而起火燃烧。Thomas等<sup>[37]</sup>采用沉淀在格陵兰岛冰雪中的氮化物含量，估算了“卡林顿”事件中太阳能量粒子的流量，这次事件中大于30MeV的质子流量是1989年造成加拿大魁北克省大停电的“魁北克事件”的6.5倍左右。Thomas等<sup>[37]</sup>采用“卡林顿”事件中估算的质子流量结合大气化学—传输模型计算了“卡林顿”事件对大气中的臭氧带来的损耗影响。图7是他们的模拟结果，可以看到，“卡林顿”事件这种级别的极端事件会造成长达4年的臭氧损耗影响，影响的区域可以从高纬区扩展到30°的低纬区。

## 4.3 气候变化模拟

前文提到过，臭氧作为平流层的主要热源，它的含量的改变会影响到平流层的热平衡，改变环流状态，这样的扰动会调制极涡的动力学状态并对地面气温产生影响。那么如何量化这种影响，太阳能量粒子沉降究竟会对地球气候变化带来怎样的效应，这是目前学界热烈探讨的问题。在这方面，已经有很多学者结合大气化学—传输模式和气候耦合模式（统称化学—气候模式，Chemistry-Climate Model, CCM）计算了能量粒子沉降对气温的影响。Langematz等<sup>[54]</sup>发

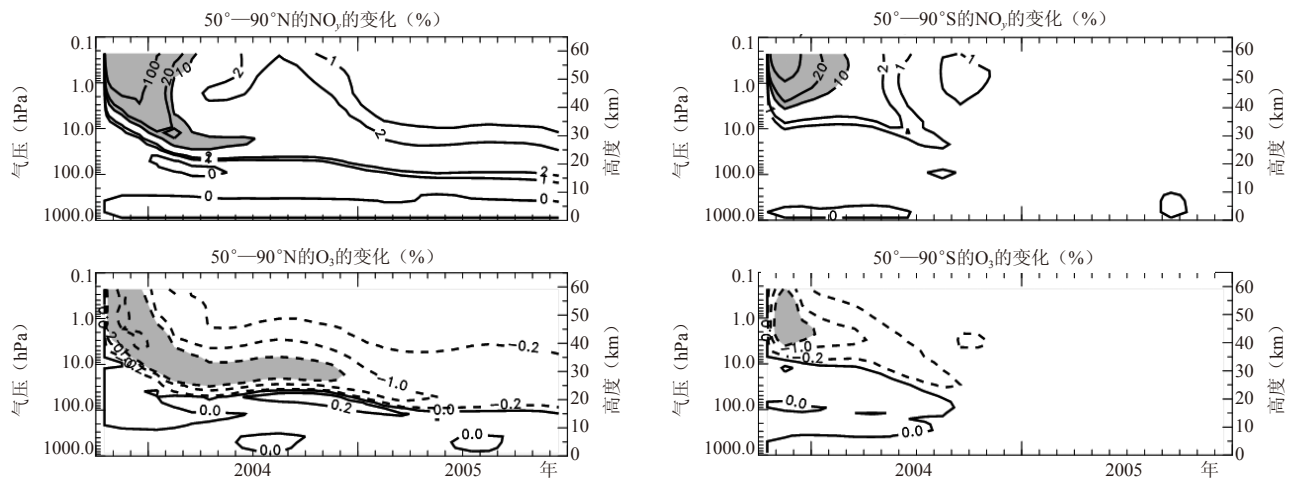


图6 Jackman等<sup>[16]</sup>对“万圣节风暴”中的SPE效应的模拟。由于“万圣节风暴”发生在2003年10月底，北半球正值冬季，日光照射偏少，由于奇氮物质的“黑夜存储”效应使得SPE对北半球大气臭氧的影响持续时间要比南半球长得多

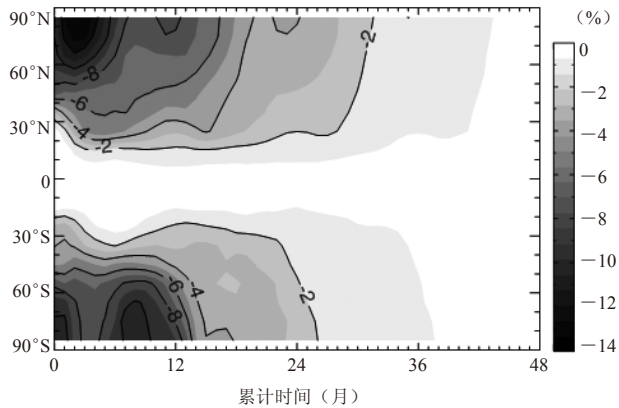


图7 Thomas等对“卡林顿”事件造成的臭氧损耗的48个月的臭氧纬向变化<sup>[37]</sup>

现低能电子沉降可能会对平流层的臭氧带来明显影响。Rozanov等<sup>[39]</sup>利用卫星探测的低能和高能电子沉降数据模拟了粒子沉降对气候的影响，发现极盖区气温会因此改变2K，这与太阳活动周中紫外辐射的变幅对极区的影响相当。Jackman等<sup>[33]</sup>对SPE的长期气候效应做了模拟，发现SPE对气候的长期效应并不显著，这可能与强的太阳质子事件的发生频率较低有关。最近，有些学者研究低—中能电子沉降造成的奇氮物质对臭氧和气候的影响<sup>[20, 55-56]</sup>，发现模拟结果中电子沉降带来的极区冬季臭氧损耗以及地表气温和海面气压的后效变化与先前一些关于气候和地磁活动相关的研究结论是相互符合的。Semeniuk等<sup>[57]</sup>对多种粒子沉降效应的模拟，发现南半球冬季平流层臭氧因能量粒子沉降而损耗10%左右并且会带来平流层动力结构的改变。Rozanov等<sup>[58]</sup>也模拟了多种粒子沉降的效应，并给出了地表气温对粒子沉降的响应，图8是他们模拟的气温改变的结果。

## 5 结论与讨论

从大量的观测研究中，我们知道太阳能量粒子沉降对于臭氧含量影响是确实存在的，并且由于粒子沉降产生的奇氮物质的特性，这些物质可以被存储、并被大气环流运输到别的区域产生后续影响。在化学—气候模式模拟中，剧烈的粒子沉降事件会对臭氧的含量产生持续和深远的影响，并通过平流层和对流层的动力耦合过程影响到地表气温乃至地球气候，这在气候变化研究中是需要探索的领域。高纬地区的臭氧含量与该区域内的平流层温度息息相关，图9是应用多年卫星资料得到的高纬地区臭氧总量与平流层温度的对比关系图，二者的相关系数约为0.75。图10是利用1982—2012年南极10月臭氧洞数据绘制的臭氧洞特征图，可以看到，随着时间的推移，臭氧洞特征值

呈逐渐增加趋势。然而，在2011—2012年，臭氧洞特征值有一个突变，2012年臭氧洞特征值又变为近年最低。臭氧洞特征值在最近几年的跳跃变化也许与气候异常有所关联。虽然臭氧洞特征值的逐年变化包含了人类活动的贡献，但是某几年的突变则应该寻找自然归因。

在近年的观测和模拟研究中，学界的主要观点趋向于太阳风和CME带来的电子沉降事件的长期效应要超过质子沉降事件，原因在于强的质子事件发生频率和流量都较低。电子沉降的影响，其分析难点在于电子沉降事件的发生频率并不和太阳活动正相关，反而在太阳活动周的下降段内，电子沉降事件的发生频率是增加的。此外，沉降电子的分能谱流量探测数据目前并不全面，这就难于量化和分离粒子沉降和其他事件的影响。

2000年3月，美国航空航天局（NASA）在亚利桑那大学召开了一次关于太阳—气候关系专题的工作讨论会，在这次讨论会上关于粒子沉降对于大气的影响研究方面，提出了如下几个问题：

- (1) 电子沉降、极光带沉降粒子、太阳质子事件对35~120km高度范围内极夜区大气中的奇氮物质产生的影响有什么观测特征？
- (2) 在一个太阳活动周内，由中间层向平流层输入了多少奇氮物质，以及这些奇氮物质的主要来源是什么？
- (3) 由电子沉降、极光沉降粒子、太阳质子事件带来的臭氧含量的变化是否可以改变平流层和对流层内的温度、环流和行星波的相位与幅度？

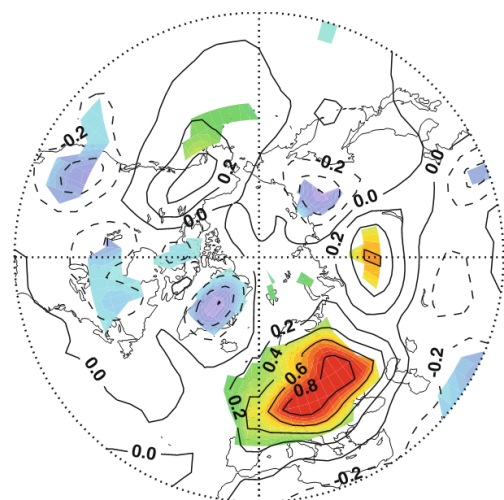


图8 Rozanov等<sup>[58]</sup>对多种粒子（银河宇宙线、高能质子、电子）沉降对气温影响的模拟。模拟时间范围是1960—2005年，模拟的结果表明欧洲中部气温因粒子沉降升温大概1K左右

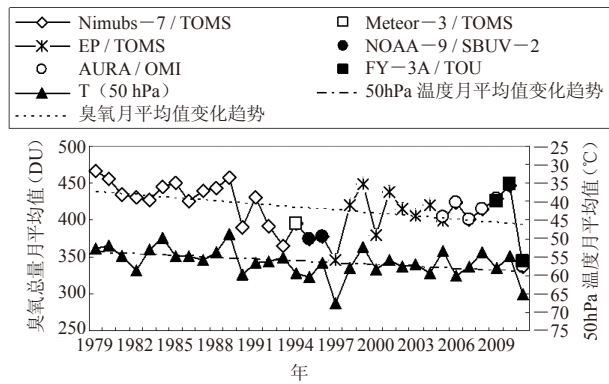


图9 1979—2011年60°—90°N范围内3月臭氧总量月平均值和50hPa等压面温度月平均值变化

(4) 电子沉降、极光沉降粒子、太阳质子事件对地球年代际和短期气候变化的作用如何? 这种作用是否可以与太阳活动周内紫外辐射的变幅和人类活动的贡献相比拟?

解答以上这些关键的科学问题可以帮助我们更好地理解太阳能量粒子沉降对大气臭氧乃至气候变化的影响, 因此这些问题也应当是我们在未来的工作中着力研究的方向。

致谢: 感谢中国科学院近地空间环境重点实验室开放课题资助, 感谢国家卫星气象中心遥感室刘年庆博士的帮助。

#### 参考文献

- [1] Reid G C. Solar energetic particles and their effects on the terrestrial environment. in *Physics of the Sun*, vol 3, edited by Sturrock P A. New York: Springer, 1986.
- [2] Weeks C H, Cuikey R S, Corbin J R. Ozone measurements in the mesosphere during the solar proton event of 2 November, 1969. *J Atmos Sci*, 1972, 29: 1138-1142.
- [3] Heath D F, Krueger A J, Crutzen P J. Solar proton event: influence on stratospheric ozone. *Science*, 1977, 197: 886-889.
- [4] McPeters R D, Jackman C H, Stassinopoulos E G. Observations of ozone depletion associated with solar proton events. *J Geophys Res*, 1981, 86: 12071-12081.
- [5] Thomas R J, Barth C A, Rottman G J, et al. Mesospheric ozone depletion during the solar proton event of July 13, 1982, Part I, Measurement. *Geophys Res Lett*, 1983, 10: 253-255.
- [6] Jackman C H, McPeters R D. The response of ozone to solar proton events during solar cycle 21: A theoretical interpretation. *J Geophys Res*, 1985, 90: 7955-7966.
- [7] Jackman C H, Douglass A R, Rood R B, et al. Effect of solar proton events on middle atmosphere during the past two solar cycles as computed using a two-dimensional model. *J Geophys Res*, 1990, 95: 7417-7428.
- [8] Jackman C H, Fleming E L, Vitt F M. Influence of extremely large solar proton events in a changing stratosphere. *J Geophys Res*, 2000, 105: 11659-11670.
- [9] Jackman C H, DeLand M T, Labow G J, et al. Satellite measurements of middle atmospheric impacts by solar proton events in solar cycle 23. *Space Science Reviews*, 2007, 125: 1-4, 381-391.
- [10] Seppälä A. Observations of production and transport of NO<sub>x</sub> formed by energetic particle precipitation in the polar night

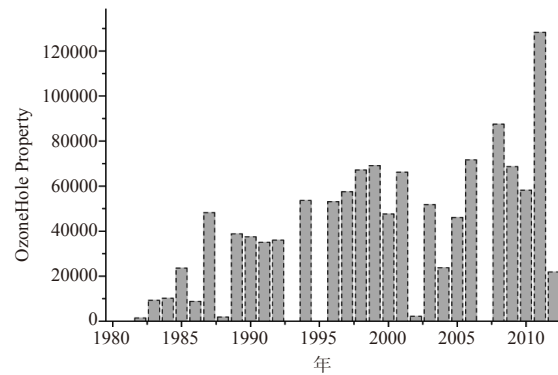


图10 1982—2012年南极10月臭氧洞特征值。臭氧洞特征值是由臭氧洞面积和臭氧洞距平厚度(即:平均厚度220DU减去臭氧洞厚度)计算出的一个值

atmosphere. PhD thesis. Helsinki, Finland: Finnish Meteorological Institute Contributions, 2007.

- [11] Seppälä A, Clilverd M A, Rodger C J. NO<sub>x</sub> enhancements in the middle atmosphere during 2003-2004 polar winter: Relative significance of solar proton events and the aurora as a source. *J Geophys Res*, 2007, D23303, doi:10.1029/2006JD008326.
- [12] Seppälä A, Verronen P T, Clilverd M A. Arctic and Antarctic polar winter NO<sub>x</sub> and energetic particle precipitation in 2002-2006. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L12810.
- [13] Verronen P T, Rodger C J, Clilverd M A, Wang S. First evidence of mesospheric hydroxyl response to electron precipitation from the radiation belts. *J Geophys Res*, 2011, 116: D07307.
- [14] 叶宗海, 薛顺生, 王莲英. 太阳质子事件与大气臭氧扰动. *空间科学学报*, 1987, 7(1): 65-72.
- [15] 言穆弘, 安学敏, 张义军, 等. 太阳活动、大气臭氧和平流层温度相关分析研究. *高原气象*, 1993, 12(3): 302-311.
- [16] Jackman C H, DeLand M T, Labow G J, et al. Neutral atmospheric influences of the solar proton events in October-November 2003. *J Geophys Res*, 2005, 110: A09S27.
- [17] Hargreaves J K. *The solar-terrestrial environment*. Cambridge Atmospheric and Space Science Series. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1992.
- [18] Brasseur G P, Solomon S. *Aeronomy of the middle atmosphere*. Dordrecht: Springer, 2005.
- [19] Emery B A, Coumans V, Evans D S, et al. Seasonal, K<sub>p</sub>, solar wind, and solar flux variations in long-term single-pass satellite estimates of electron and ion auroral hemispheric power. *J Geophys Res*, 2008, 113: A06311.
- [20] Marsh D R, Garcia R R, Kinnison D E, et al. Modeling the whole atmosphere response to solar cycle changes in radiative and geomagnetic forcing. *J Geophys Res*, 2007, 112: D23306.
- [21] Richardson I G, Cliver E W, Cane H V. Sources of geomagnetic activity over the solar cycle: Relative importance of coronal mass ejections, high-speed streams, and slow solar wind. *J Geophys Res*, 2000, 105(A8): 18203-18213.
- [22] Degenstein D A, Lloyd N D, Bourassa A E, et al. Observations of mesospheric ozone depletion during the October 28, 2003 solar proton event by OSIRIS. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L03S11.
- [23] Lopez-Puertas M, Funke B, Gil-Lopez S, et al. Observation of NO<sub>x</sub> enhancement and ozone depletion in the Northern and Southern Hemispheres after the October- November 2003 solar proton events. *J Geophys Res*, 2005, 110: A09S43.
- [24] Rohen G C, Savigny V, Sinnhuber M, et al. Ozone depletion during the solar proton events of October/November 2003 as seen by SCIAMACHY. *J Geophys Res*, 2005, 110: A09S39.
- [25] Lary D. Catalytic destruction of stratospheric ozone. *J Geophys Res*, 1997, 102: 21515-21526.
- [26] 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.
- [27] Jackman C H, Roble R G, Fleming E L. Mesospheric dynamical changes induced by the solar proton events in October-November 2003. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L04812.
- [28] Reid G C, Solomon S, Garcia R R. Response of the middle atmosphere to the solar proton events of August-December, 1989. *Geophys Res Lett*, 1991, 18: 1019-1022.
- [29] Zadorozhny A M, Turchkov G A, Kikthenko V N, et al. Nitric oxide and lower ionosphere quantities during solar particle events of October 1989 after rocket and ground-based measurements. *J Atmos Terr Phys*, 1992, 54: 183-192.
- [30] Jackman C H, Cerniglia M C, Nielsen J E, et al. Two-dimensional and three-dimensional model simulations, measurements, and interpretation of the influence of the October 1989 solar proton events on the middle atmosphere. *J Geophys Res*, 1995, 100: 11641-11660.
- [31] Jackman C H, McPeters R D, Labow G J, et al. Northern Hemisphere atmospheric effects due to the July 2000 solar proton event. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 2883-2886.
- [32] Jackman C H, Marsh D R, Vitt F M, et al. Short- and medium-term atmospheric effects of very large solar proton events. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2007, 7: 10543-10588.
- [33] Jackman C H, Marsh D R, Vitt F M. Long-term middle atmospheric influence of very large solar proton events. *J Geophys Res*, 2009, 114: D11304.
- [34] Verronen P T, Turunen E, Ulich T, et al. Modelling the effects of the October 1989 solar proton event on mesospheric odd nitrogen using a detailed ion and neutral chemistry model. *Annales Geophysicae*, 2002, 20: 1967-1976.
- [35] Vogel B, Konopka P, Groob J U, et al. Model simulations of stratospheric ozone loss caused by enhanced mesospheric NO<sub>x</sub> during Arctic Winter 2003/2004. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2008, 8: 4911-4947.
- [36] Robichaud A, Menard R, Chabrilat S, et al. Impact of energetic particle precipitation on stratospheric polar constituents: an assessment using MIPAS data monitoring and assimilation. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2009, 9: 22459-22504.
- [37] Thomas B C, Jackman C H, Melott A L. Modeling atmospheric effects of the September 1859 Solar Flare. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L06810.
- [38] Rodger C J, Verronen P T, Clilverd M A. Atmospheric impact of the Carrington event solar protons. *J Geophys Res*, 2008, 113: D23302.
- [39] Rozanov E, Callis L, Schlesinger M, et al. Atmospheric response to NO<sub>y</sub> source due to energetic electron precipitation. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L14811.
- [40] Randall C E, Harvey V L, Manney G L, et al. Stratospheric effects of energetic particle precipitation in 2003-2004. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L05802.
- [41] Randall C E, Harvey V L, Singleton C S, et al. Energetic particle precipitation effects on the Southern Hemisphere stratosphere in 1992-2005. *J Geophys Res*, 2007, 112: D08308.
- [42] Sinnhuber B M, Gathen P, Sinnhuber M, et al. Large decadal scale changes of polar ozone suggest solar influence. *Atmos Chem Phys*, 2006, 6: 1835-1841.
- [43] Callis L B, Natarajan M, Lambeth J D. Solar-atmospheric coupling by electrons (SOLACE) 3. Comparisons of simulations and observations, 1979-1997, issues and implications. *J Geophys Res*, 2001, 106: 7523-7539.
- [44] Callis L B, Natarajan M, Lambeth J D. Reply to comment by Siskind D E on "Solar-atmospheric coupling by electrons (SOLACE), 3, Comparisons of simulations and observations" by Callis L B, Natarajan M, Lambeth J D, et al. *J Geophys Res*, 2002, 107: 4634.
- [45] Siskind D E. Comment on "Solar-atmospheric coupling by electrons (SOLACE), 3, Comparisons of simulations and observations" by Callis L B, Natarajan M, Lambeth J D, et al. *J Geophys Res*, 2002, 107: 4633.
- [46] Seppälä A, Randall C E, Clilverd M A, et al. Geomagnetic activity and polar surface level air temperature variability. *J Geophys Res*, 2009, doi:10.1029/2008JA014001.
- [47] Porter H S, Jackman C H, Green A E S. Efficiencies for production of atomic nitrogen and oxygen by relativistic proton impact in air. *J Chem Phys*, 1976, 65: 154-167.
- [48] Funke B, Lopez-Puertas M, Fischer H, et al. Comment on "Origin of the January-April 2004 increase in stratospheric NO<sub>2</sub> observed in northern polar latitudes" by Jean-Baptist Renard et al. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L07813.
- [49] Jackman C H, Marsh D R, Vitt F M, et al. Short- and medium-term atmospheric constituent effects of very large solar proton events. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8: 765-785.
- [50] Reddmann T, Ruhnke R, Versick S, et al. Modeling disturbed stratospheric chemistry during solar-induced NO<sub>x</sub> enhancements observed with MIPAS/ENVISAT. *J Geophys Res*, 2010, 115: D00111.
- [51] Egorova T, Rozanov E, Ozolin Y, et al. The atmospheric effects of October 2003 solar proton event simulated with the chemistry-climate model SOCOL using complete and parameterized ion chemistry. *J Atmos Solar Terr Phys*, 2011, 73: 356-365.
- [52] Carrington R C. Description of a singular appearance seen on the Sun on September 1, 1859. *Mon Not R Astron Soc*, 1860, 20: 13-15.
- [53] Hodgson R. On a curious appearance seen in the Sun. *Mon Not R Astron Soc*, 1860, 20: 15.
- [54] Langematz U, Grenfell J L, Matthes K, et al. Chemical effects in 11-year solar cycle simulations with the Freie Universität Berlin Climate Middle Atmosphere Model with online chemistry (FUB-CMAM-CHEM). *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L13803.
- [55] Baumgaertner A J G, Jockel P, Bruhl C. Energetic particle precipitation in ECHAM5/MESSy1-Part I: downward transport of upper atmospheric NO<sub>x</sub> produced by low energy electrons. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9: 2729-2740.
- [56] Baumgaertner A, Seppälä A, Jockel P, et al. Geomagnetic activity related NO<sub>x</sub> enhancements and polar surface air temperature variability in a chemistry climate model: Modulation of the NAM index. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11: 4521-4531.
- [57] Semeniuk K, Fomichev V I, McConnell J C, et al. Middle atmosphere response to the solar cycle in irradiance and ionizing particle precipitation. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11: 5045-5077.
- [58] Rozanov E, Calisto M, Egorova T, et al. Influence of the precipitating energetic particles on atmospheric chemistry and climate. *Surv Geophys*, 2012, 33: 483-501.