

郭凤霞, 陈聪. 2012. 中国地区闪电和对流层上部  $\text{NO}_x$  的时空分布特征及其相关性分析 [J]. 大气科学, 36 (4): 713–721, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11129. Guo Fengxia, Chen Cong. 2012. Comparison of lightning activity and  $\text{NO}_x$  distribution in the upper troposphere in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 713–721.

# 中国地区闪电和对流层上部 $\text{NO}_x$ 的时空分布特征及其相关性分析

郭凤霞<sup>1,2</sup> 陈聪<sup>1,2</sup>

1 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

2 南京信息工程大学中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室, 南京 210044

**摘 要** 为了解闪电对对流层上部  $\text{NO}_x$  的贡献, 本文利用美国全球水资源和气候中心 (GHRC) 提供的 1995 年 4 月~2005 年 12 月的闪电卫星格点资料及高层大气研究卫星 (UARS) 上的卤素掩星试验装置 (HALOE) 1991 年 10 月~2005 年 11 月的观测资料, 分析了中国地区闪电与对流层上部  $\text{NO}_x$  体积混合比的时空分布特征及两者的相关性。结果表明: 中国地区闪电和对流层上部的  $\text{NO}_x$  在季节分布、年际分布和空间分布上保持很好的一致性, 闪电是对流层上部  $\text{NO}_x$  的重要来源;  $\text{NO}$  极值高度在 350 hPa 左右, 云闪直接产生的  $\text{NO}$  是极值产生的主要原因,  $\text{NO}_2$  的极值高度在 250 hPa 左右, 因为闪电产生的  $\text{NO}$  在传输过程中会被氧化成  $\text{NO}_2$  并通过雷暴的垂直输送作用抬升到更高高度; 强对流活动有利于  $\text{NO}_x$  的传输, 而人类活动产生的  $\text{NO}_x$  一般较难输送到对流层上部, 因此闪电多发区的  $\text{NO}_x$  极值较大, 所在的高度也较高。

**关键词** 闪电  $\text{NO}_x$  对流层上部

文章编号 1006-9895(2012)04-0713-09

中图分类号 P427.3

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11129

## Comparison of Lightning Activity and $\text{NO}_x$ Distribution in the Upper Troposphere in China

GUO Fengxia<sup>1,2</sup> and CHEN Cong<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 China Meteorological Administration Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract** In order to understand the contribution of lightning to the abundance of  $\text{NO}_x$  in the upper troposphere, the characteristics of spatial and temporal distribution of  $\text{NO}_x$  in the upper troposphere and lightning in China, and the relationships between them are analyzed in this paper. The lightning data (from April 1995 to December 2005) and the  $\text{NO}_x$  data (from October 1991 to November 2005) are obtained from the Global Hydrology Resource Center (GHRC), USA and the Halogen Occultation Experiment (HALOE) boarded on the Upper Atmosphere Research Satellite (UARS), respectively. It is found that lightning activities are in very good agreement with  $\text{NO}_x$  volume mixing ratio in seasonal

收稿日期 2011-07-14, 2011-10-31 收修定稿

资助项目 公益性行业科研专项 GYHY200806014, 南京信息工程大学校基金 20080319, 江苏省气象灾害重点实验室开放课题 KLME1004, 中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金 2010Z004 和江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

作者简介 郭凤霞, 女, 1977 年出生, 副研究员, 主要从事雷暴电学研究。E-mail: aguo\_fx@yahoo.com.cn

variations, annual variations, and spatial variations. The results prove that lightning is an important source of  $\text{NO}_x$  in the upper troposphere. The height of the extreme value of  $\text{NO}$  is at about 350 hPa, while that of  $\text{NO}_2$  is at about 250 hPa. Intra-cloud lightning-generated  $\text{NO}$  is the main reason for the extreme value, the  $\text{NO}$  will oxidize into  $\text{NO}_2$  during the transmission process, and  $\text{NO}_2$  will be transported to higher height through the thunderstorms. Strong convective is helpful to transport  $\text{NO}_x$  to the upper troposphere, while  $\text{NO}_x$  generated by human activities can hardly do this. Therefore, in the area that more lightnings occur, the extreme value is bigger and its height is higher.

**Key words** lightning,  $\text{NO}_x$ , upper troposphere

## 1 引言

氮氧化物  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) 在臭氧  $\text{O}_3$  和碳氢化合物的光化学反应中起着关键作用, 它参与碳氢化合物循环是对流层  $\text{O}_3$  浓度增高的重要原因之一。对流层  $\text{O}_3$  是一种重要的温室气体, 同时又是重要的氧化剂,  $\text{O}_3$  的光解产物激发态氧原子  $\text{O} (^1\text{D})$  与水反应生成的氢氧根  $\text{OH}$  自由基是对流层中  $\text{OH}$  自由基的主要来源。 $\text{NO}_x$  经  $\text{OH}$  氧化可以生成硝酸盐, 是大气中酸沉降的成分之一。在近地面,  $\text{NO}_x$  的生命史很短 (几小时), 它很快与其它化学物质反应分解, 对气候的影响作用不大; 但在对流层上层,  $\text{NO}_x$  的生命史较长 (约 7 天) (Levy et al., 1999), 它控制对流层  $\text{O}_3$  和  $\text{OH}$  自由基的含量, 影响全球大气环境和气候变化, 因此对  $\text{NO}_x$  的研究可以为对流层大气化学和气候模式提供科学依据。

对流层  $\text{NO}_x$  的源主要包括: 矿物燃料燃烧、生物质燃烧、土壤中的微生物分解、 $\text{NH}_3$  的氧化、海洋的光解产生的  $\text{NO}_x$  经对流向上的传输、平流层内  $\text{NO}_x$  的向下输送、飞机尾气产生的  $\text{NO}_x$  以及闪电产生的氮氧化物  $\text{LNO}_x$ 。闪电产生的高温 (大约 30000 K) 使通道内  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$  电离为  $\text{N}$  和  $\text{O}$ , 紧接着  $\text{N}$  和  $\text{O}_2$  或  $\text{O}$  和  $\text{N}_2$  反应生成  $\text{NO}$  (Von Liebig, 1827)。随后湍流扩散导热使闪电通道温度降低、能量外传, 大量  $\text{NO}$  被带出通道, 研究表明 (Hill et al., 1980; Goldenbaum and Dickerson, 1993) 湍流扩散能使  $\text{NO}$  离开通道约 100 m 距离, 传输时间超过 100 s。在传输过程中  $\text{NO}$  进一步被  $\text{O}_3$  氧化为  $\text{NO}_2$ , 其浓度降低。但在白天,  $\text{NO}_2$  会迅速光解生成  $\text{NO}$ , 几分钟后  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$  的浓度达到光化学平衡态。近年来, 随着卫星对闪电活动和  $\text{NO}_x$  含量分布的观测、飞机穿云试验和全球化学传输模式的发展,  $\text{LNO}_x$  的研究受到越来越多的重视 (Cook et al., 2000; Zhang et al., 2000; Bond et al., 2001; Tie et al., 2002)。

$\text{LNO}_x$  是对流层上部  $\text{NO}_x$  的主要来源 (Logan, 1983; Price et al., 1997; Donald et al., 2002), 地球表面向上输送的  $\text{NO}_x$  只占 20% (Singh et al., 1996)。Zhang et al. (2000) 通过对比 1993 年的 HALOE (Halogen Occultation Experiment) 资料和 1995~1996 年的光学瞬变探测器 OTD (Optics Transient Detection) 资料, 指出: 一年中每个月  $\text{NO}_2$  体积混合比大于 1ppb ( $10^{-9}$ ) 的天数与雷电活动旺盛的天数成正比; 在 100 hPa 高度上  $\text{NO}_2$  混合比 (大于 1ppb) 的季节变化与全球闪电活动的季节变化高度一致。Levy et al. (1996) 利用全球传输模式 GCM (General circulation model) 模拟了 190 hPa、500 hPa 和 835 hPa 三个高度的  $\text{LNO}_x$  含量, 认为闪电是对流层中上部  $\text{NO}_x$  的主要来源, 也是热带地区夏季对流层低层  $\text{NO}_x$  的重要来源。闪电与对流层上部  $\text{NO}_x$  较好的相关性使  $\text{LNO}_x$  的研究成为预测气候变化的依据之一 (Martin et al., 2002, 2006; Beirle et al., 2006; Barthe et al., 2007; Schumann and Huntrieser, 2007)。

Pickering et al. (1998) 利用 Goddard Cumulus Ensemble (GCE) 模式对 7 次雷暴活动进行模拟, 认为雷电产生的  $\text{NO}_x$  的垂直分布呈现 “C” 型, 即近地面和对流层上层占  $\text{NO}_x$  总量的比率较大。从 “C” 型结构看人类活动产生的  $\text{NO}_x$  向上输送的高度是有限的, 对流层上部的  $\text{NO}_x$  更多的还是闪电直接产生的, 而且当有活跃的深对流云存在时, 垂直输送作用可在 1 个小时内把边界层内的空气抬升到对流层顶 (Zhao et al., 2009), 雷暴是加快垂直输送的因素之一, 也间接造成对流层上部  $\text{NO}_x$  体积混合比增加。所以说闪电可能会把人类活动造成的空气污染问题转化为区域性的或是全球性的大气化学问题, 因此, 也有必要研究  $\text{NO}_x$  在不同高度上的含量及输送问题。本文利用 HALOE 和 OTD/LIS (Optics Transient Detection/Lightning Imaging Sensor) 卫星资料, 主要分析了中国地区的闪电及对流层上部  $\text{NO}_x$  体积混

合比随高度变化的时空分布特征, 并讨论了两者之间的相互关系。

## 2 资料介绍

本文所采用的闪电资料是美国全球水资源和气候中心 (GHRC) 提供的最新的 OTD/LIS 2.2 版本格点资料。安置在 MicroLab-1 卫星上的光学瞬变探测器 OTD 在高度 740 km 的轨道上运行, 轨道倾角 70°。OTD 能够观测到地面 1300 km×1300 km (75°S~75°N) 区域内的闪电活动。该仪器的空间分辨率是 10 km, 时间分辨率为 2 ms, 完成一个完整的本地日循环需要大约 55 天的时间。安置在 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 上的闪电成像感应器 (LIS) 采用 128×128 像素点的 CCD 阵列, 加上广角镜头的使用, 在 350 km 高度上可以观测到地球上 600 km×600 km (35°S~35°N) 区域内闪电的活动。该仪器空间分辨率是 4 km, 时间分辨率为 2 ms, 完成一个完整的本地日循环需要大约 49 天的时间。它可以给出闪电发生的时间、经纬度、闪电光辐射能、持续时间等信息。本文所用资料由 5 年 OTD (1995 年 4 月~2000 年 3 月) 资料和 8 年 LIS (1998 年 1 月~2005 年 12 月) 资料合成, 总的时间尺度为 11 年, 资料中的闪电为总闪电, 每个网格点上的闪电密度由探测到的该网格点上的总闪电数除以对该网格点的实际扫描时间而得到, 并经过了探测器探测效率及网格面积等的订正。2.2 版本的 OTD/LIS 格点资料有高 (0.5°×0.5°) 和低 (2.5°×2.5°) 两种分辨率, 共计十种不同用途的资料。本文选取的中国地区 (20°N~55°N, 70°E~135°E), 其中 20°N~55°N 的资料时间覆盖范围为 1995 年 4 月~2000 年 3 月共 5 年, 20°N~35°N 的资料时间覆盖范围为 1995 年 4 月~2005 年 12 月共 11 年。

本文所用的 NO<sub>x</sub> 观测资料来自一个搭载于高层大气研究卫星 UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) 上的卤素掩星试验仪器 HALOE。该仪器于 1991 年 10 月 11 日开始工作, 被用于测量中层大气的 O<sub>3</sub>、HCl、HF、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>O、NO、NO<sub>2</sub> 的垂直廓线和气溶胶的消光系数。其纬向测量范围为 80°S~80°N, 测量数据垂直分辨率很高, 从地表面到 10<sup>6</sup> hPa, 共有 271 层。不同气体的观测高度范围不完全相同, NO 的观测高度最高, 达到 130 km, NO<sub>2</sub> 最低, 只到达 50 km 附近。同时本文还使用了

陈月娟等 (2006) 提供的再分析资料, 即把所有年份不同时刻的同一成分存入同一个文件中, 譬如, 将 HALOE 原始资料中 1991 年 10 月~2005 年 11 月不同时刻、不同地点上空 271 层的 NO 日出资料存放在一个文件里, 从而方便对 NO 体积混合比进行研究。HALOE 有日出日落两部分资料, 即当太阳相对于某地是刚升起或落下时, HALOE 测量来自太阳方向并与大气相切高度上的太阳辐射, 再由此反演该地微量气体与气溶胶消光系数等的垂直分布。日落的资料由于经过一天的反应, NO、NO<sub>2</sub> 的值比日出时要大, 但混合比的垂直廓线很相似 (简俊等, 2001)。本文只使用了 NO<sub>x</sub> 的日出资料, 高度主要集中在对流层上部 (400 hPa~100 hPa), 选取的经纬度范围与 OTD/LIS 资料的一致, 在分析其与闪电年际分布特征关系时, 为了与闪电资料时间范围保持一致, 只采用 1996~2005 年的资料。

## 3 结果分析

### 3.1 季节分布特征对比

本文的季节定义为: 春季 (3~5 月); 夏季 (6~8 月); 秋季 (9~11 月); 冬季 (12 月、1 月、2 月)。图 1 是对 OTD/LIS 的高分辨率逐季气候资料 HRSC (High Resolution Seasonal Climatology) 作平均得到的中国地区闪电次数的季节分布, 由图可知我国闪电分布季节性明显, 夏季最为活跃, 春季次之, 然后是秋季, 冬季最弱, 且夏季发生闪电的次数比冬季闪电大一个数量级, 其主要原因是我国大部分地区处于亚洲季风区域, 夏季对流性气候旺盛, 降水丰富。春季闪电次数大于秋季是因为 4、5 月份夏季风已经开始形成 (袁铁和鄯秀书, 2004)。

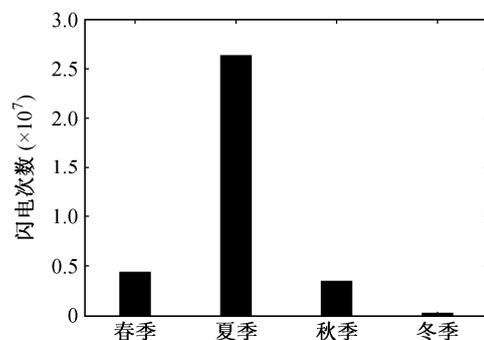


图 1 中国地区闪电次数的季节分布

Fig.1 Seasonal distribution of lightning numbers in China

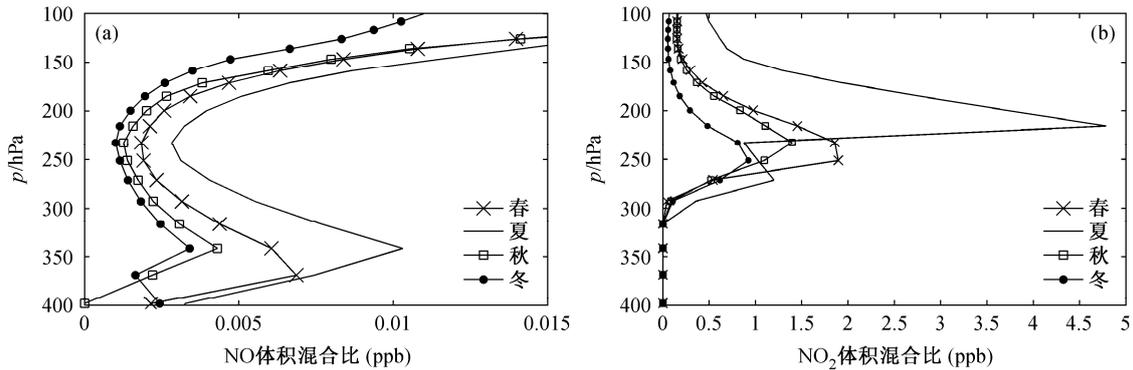
图2 100~400 hPa 各季节 (a) NO 和 (b) NO<sub>2</sub> 体积混合比随高度的变化Fig.2 Variations of (a) NO and (b) NO<sub>2</sub> volume mixing ratios with height from 100 to 400 hPa in four seasons

图2是对15年的HALOE资料分季节作平均得到的对流层上层NO<sub>x</sub>的季节分布,如图所示,在对流层上部NO、NO<sub>2</sub>的含量是夏季最大,春季次之,然后是秋季、冬季。夏季的NO值比冬季大了一个数量级,NO<sub>2</sub>极值也远大于其他季节,在250 hPa左右的拐点是因为夏季对流活动旺盛,NO<sub>2</sub>数据中同一气压层对应的高度差异较大,作季节平均造成的。从总体上看,NO<sub>x</sub>的季节分布与闪电的季节分布特征一致,这表明LNO<sub>x</sub>对对流层上部NO<sub>x</sub>的贡献很显著。对比图2a、b可发现,350 hPa左右NO含量有一个极大值,这基本对应云闪发生的高度(Thomas et al., 2004),由云闪直接产生的NO是造成这一极值的一个主要原因,而NO<sub>2</sub>的极值高度在250 hPa左右,NO<sub>2</sub>的极值所在高度比NO高,主要是因为闪电产生的NO一般在源区附近,几分钟内NO被氧化成NO<sub>2</sub>,NO<sub>2</sub>则由雷暴云或积云中的上升气流带到更高的高度。李冰等(1999)利用一个耦合的冰雹云—化学模式模拟了一次单体积云对流的发展过程,模拟的结果表明NO<sub>2</sub>会被强对流带至云顶及云砧处。NO<sub>2</sub>在更高的地方堆积体现了雷暴的垂直输送作用。在下文年际变化中也能看到同样的特征。

### 3.2 年际分布特征对比

图3为1996~2005年南北纬35°之间的闪电年际分布,从图中可知1998年的闪电次数明显较多,而1997年12月至1998年2月发生了较强的厄尔尼诺事件。而闪电次数相对较少的1996和2000年都有拉尼娜事件发生(翟盘茂等,2003)。其余年份闪电总数变化不是很明显。这些结果表明闪电对气候变化的响应非常明显,闪电可以作为气候变化的指示器。

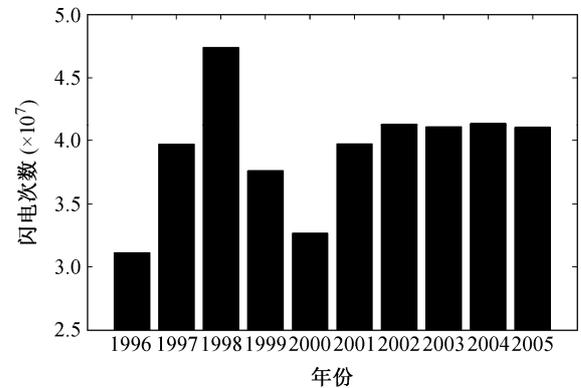


图3 1996~2005年闪电次数年际分布

Fig.3 Annual distribution of lightning numbers from 1996 to 2005

图4给出了1996~2000年闪电变化显著年份的对流层上部的NO<sub>x</sub>混合比廓线,由图可见,闪电活动最多的1998年,对应的NO、NO<sub>2</sub>体积混合比极值最大;闪电活动较少的1996和2000年,对应的NO、NO<sub>2</sub>体积混合比极值相对较少。2001~2005年闪电变化相对不显著,对其NO<sub>x</sub>的体积混合比分析发现,其变化也同样不显著(图略)。陈月娟等(2006)利用HALOE资料对1992~2005年100 hPa NO和NO<sub>2</sub>的年际变化作了分析,发现NO体积混合比在1992~1998年有增加趋势,从1998年以后有所下降;而NO<sub>2</sub>体积混合比变化不大,总体呈缓慢下降的趋势,这与本文的结果都有相似之处。年际分布相关性同样表明了闪电活动对对流层上部NO<sub>x</sub>的含量影响很显著。

### 3.3 空间分布特征对比

#### 3.3.1 闪电的空间分布

马明等(2004)、袁铁和郗秀书(2004)等利用8年OTD/LIS对中国闪电活动分布情况进行过

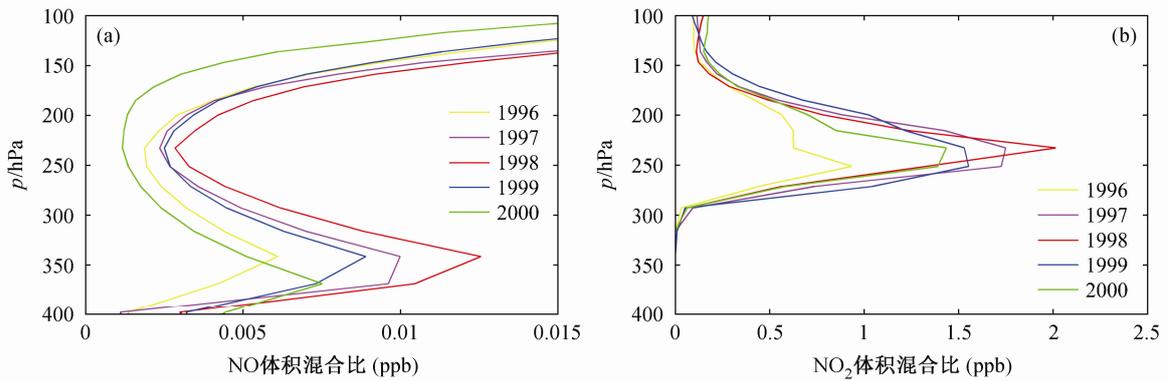


图4 100~400 hPa 1996~2000年 (a) NO 和 (b) NO<sub>2</sub> 体积混合比随高度的变化

Fig.4 Variations of (a) NO and (b) NO<sub>2</sub> volume mixing ratios with height from 100 to 400 hPa from 1996 to 2000

析, 指出我国闪电的空间分布与大气环流、地形地貌、纬度位置、局地条件等诸多因素都有着密切的关系。图 5 是由 10 年 OTD/LIS 高分辨率全年气候资料 HRFC (High Resolution Full Climatology) 得到的中国地区闪电密度空间分布, 从图中可以看出我国闪电密度分布随地形变化较大, 地区差异明显。总体呈现与中国地势三阶梯相吻合的特点。属于第三阶梯的东部沿海湿润地区平均闪电密度在  $10 \text{ fl}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  (每年每平方公里发生闪电次数) 以上, 云贵高原、广州地区可以达到  $20\sim 30 \text{ fl}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ; 属于我国地势第二阶梯的中部地区平均闪电密度在  $10 \text{ fl}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  以下, 青藏高原中部地区由于热力作用对流比较旺盛, 也有一定数量的闪电发生, 密度在  $6\sim 8 \text{ fl}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ; 属于我国地势第三阶梯的西部内陆地区如新疆和西藏西部由于远离海洋同时有青藏高原阻挡东南亚热带季风的原因, 常年干旱少雨, 平均闪电密度在  $1 \text{ fl}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  以下, 表明闪电很少发生。另外, 我国闪电海陆分布差异明显, 在图 5 中有清晰的海岸线显示, 台湾地区由于海陆风及热岛效应存在明显的高闪电密度中心, 除此之外, 青藏高原与印度板块结合处由于地理垂直梯度大, 闪电密度在喜马拉雅山南北两侧存在很大差异, 部分地区比值高达 20 倍以上。

### 3.3.2 NO<sub>x</sub> 的空间分布

根据上文结果, NO 和 NO<sub>2</sub> 的极值高度分别为 350 hPa 和 250 hPa, 图 6 则分别对这两个高度 NO<sub>x</sub> 的空间分布作分析并选择闪电次数最多的 1998 年为研究对象。如图 6 所示, NO<sub>x</sub> 的中心点主要分布在 30°N 以南, 集中在 100°E~120°E 的我国东南部

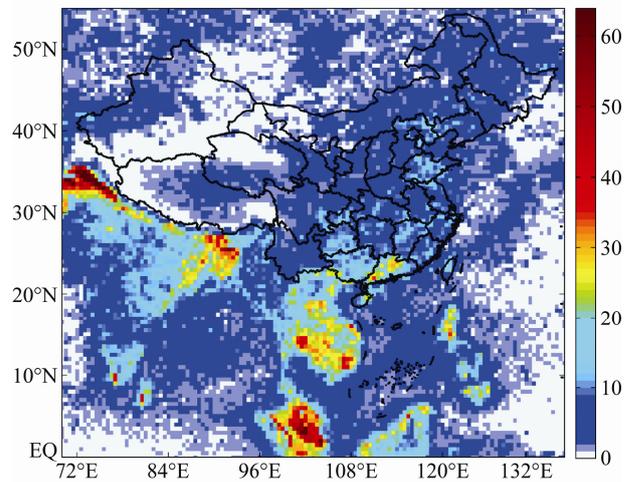


图5 1996~2005年闪电密度空间分布 (单位:  $\text{fl}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )

Fig.5 Spatial distribution of lightning activities from 1996 to 2005. Units:  $\text{flashes} (\text{fl})\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$

和 80°E~90°E 的青藏高原南部两个中心, 结合图 5 的闪电分布来看, 这两个区域的闪电密度均明显高于周围地区, NO<sub>x</sub> 极值中心和闪电密度在空间分布的吻合证明闪电越多的区域 NO<sub>x</sub> 的含量也越大, 闪电直接产生的 NO<sub>x</sub> 是其在对流层上部有较大值的原因之一。

### 3.3.3 闪电和 NO<sub>x</sub> 经向分布

上文对我国范围 NO<sub>x</sub> 空间分布进行分析时, 只选择了一个高度和一个年份, 在对多年的空间分布作分析时, 为了避免季节变化对结果的影响, 只选择 NO<sub>x</sub> 夏季日出的资料, 并对其进行三角剖分、插值处理, 从而可以对同一经度、不同纬度以及同一纬度、不同经度的 NO<sub>x</sub> 进行分析。本部分的资料处

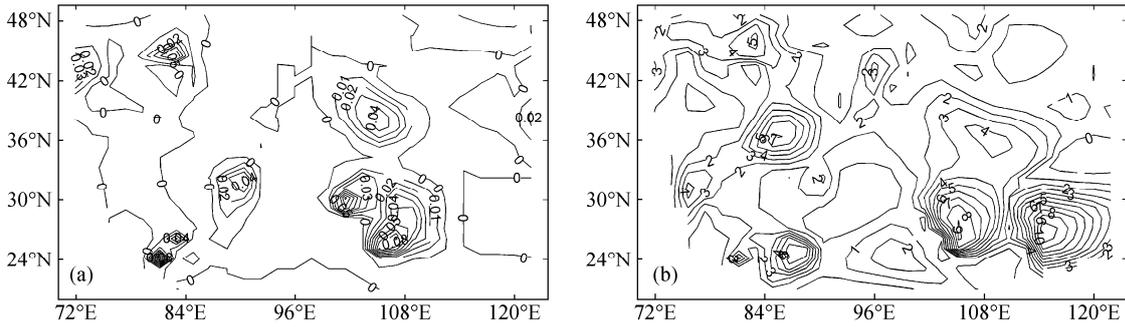


图6 1998年NO<sub>x</sub>体积混合比(ppb)空间分布: (a) 350 hPa NO空间分布; (b) 250 hPa NO<sub>2</sub>空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of NO<sub>x</sub> volume mixing ratio (ppb) in the year of 1998: (a) NO spatial distribution at 350 hPa; (b) NO<sub>2</sub> spatial distribution at 250 hPa

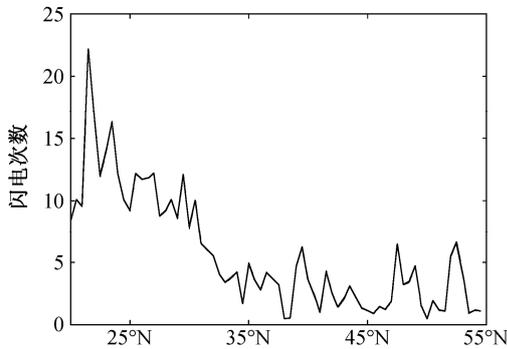


图7 (20°N~55°N, 110°E)地区年平均闪电次数分布

Fig. 7 Distribution of annual average lightning numbers from 20°N to 55°N at 110°E

理与此相同。

对同经度(110°E)不同纬度闪电和NO<sub>x</sub>的经向分布作分析。图7是这一经度的年平均闪电次数分布图,从图中可看出,纬度较低的区域年平均闪电次数较多,同时随着纬度变化,闪电次数波动也较大,这主要和我国复杂的地形有关。为了便于对比闪电和NO<sub>x</sub>的关系,选择了闪电密度差异较大的25°N、35°N和45°N三个纬度。从图7可知,25°N地区的闪电密度最大,为10.1次/年,35°N、45°N地区的闪电密度分别是4.2次/年和1.1次/年。从图8中可看出纬度越低,NO、NO<sub>2</sub>的值越大,另外从图8b可知,纬度越低的地方NO<sub>2</sub>不仅极值大且出现的高度也越高。周筠珺和鄯秀书(2002)通过分析广东、陇东、北京和东北地区的闪电资料对各纬度上每100 km<sup>2</sup>内闪电产生NO<sub>x</sub>年平均值(WLNO<sub>x</sub>)进行了估算,认为其值从南到北随纬度的增高而降低。这主要是因为纬度较低的地方对流活动相对比较多,闪电也多,NO<sub>2</sub>会由强对流活动的垂直输送作用被抬升到较高高度,除此之外低纬度地区对流

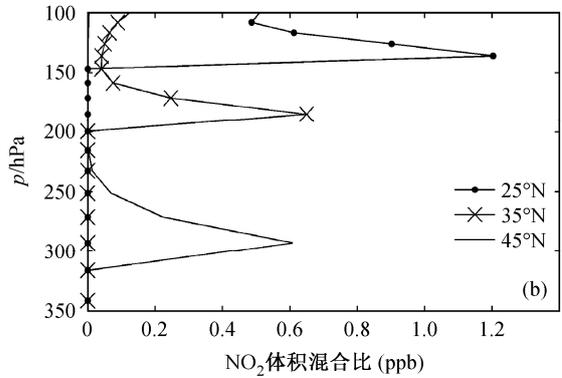
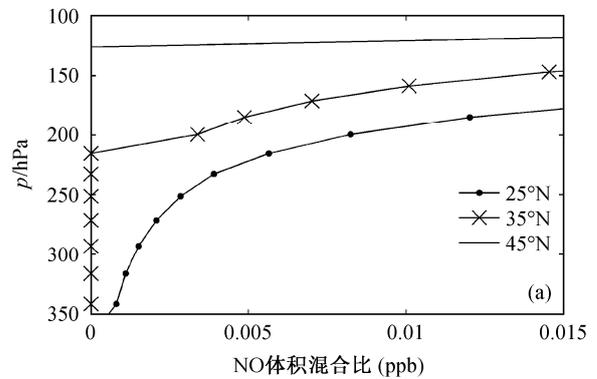


图8 NO及NO<sub>2</sub>体积混合比随高度的变化: (a) NO; (b) NO<sub>2</sub>

Fig.8 Variations of (a) NO and (b) NO<sub>2</sub> volume mixing ratios with height

层顶高度也比高纬度地区要高,NO<sub>2</sub>也会在更高的位置堆积。从下文中NO<sub>2</sub>的纬向差异也可以看出类似特征。

### 3.3.4 闪电和NO<sub>x</sub>纬向分布

对同纬度(35°N)、不同经度闪电和NO<sub>x</sub>的经向分布作对比分析。图9是这一纬度年平均闪电次数分布图,由图可知,从西到东闪电次数总体呈增加趋势,110°E左右闪电次数有所减小,主要是因

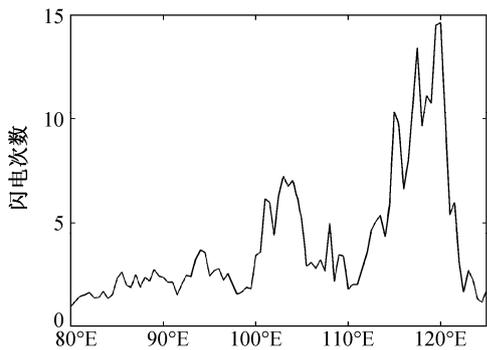


图9 (35°N, 80°E~125°E) 年平均闪电次数分布  
Fig.9 Distribution of annual average lightning numbers from 80°E to 125°E at 35°N

为这里地属我国关中平原, 闪电密度较低。分别对 80°E、100°E、120°E 三个经度作分析, 它们的闪电密度分别是 0.8 次/年、1.9 次/年、10.9 次/年。由图 10 可知, 120°E 的 NO<sub>x</sub> 极值要大于 80°E 的极值, 即闪电多发的地方, 对流层上部 NO<sub>x</sub> 的极值较大。另外, 图 10b 中 NO<sub>2</sub> 的极值分布与图 8b 经向差异类似, 即东部地区对流较多闪电活动旺盛的地方不仅极值大, 极值高度也越高。除此之外, NO<sub>2</sub> 在 80°E 的分布也比较有特点, 这里地属我国青藏高原, 虽然闪电密度不如东部地区, 但由于高原地区夏季的热力和动力作用, 高原上空有很强的上升气流, 使 NO<sub>2</sub> 在 200 hPa 以上增加较快其值比同纬度地区偏高, 这与李庆等 (2005) 的研究结果相同。从经纬度分布来看, 整个中国地区闪电的空间分布与对流层上部 NO<sub>x</sub> 体积混合比的分布近似, 闪电对对流层上部 NO<sub>x</sub> 的分布起到关键作用。

## 4 结论和讨论

### 4.1 结论

本文利用 OTD/LIS 和 HALOE 资料, 对比分析了我国闪电与对流层上部的 NO<sub>x</sub> 分布特征, 得到以下结论:

(1) 我国闪电次数夏季居多, 春季次之, 然后是秋季, 最后是冬季, 夏季闪电比冬季多一个数量级, 对流层上部 NO<sub>x</sub> 的季节分布与闪电一致, 同时 NO<sub>x</sub> 的年际分布与闪电的年际变化趋势相同, 闪电总次数最多的 1998 年, 对流层 NO<sub>x</sub> 的含量也最多, 闪电次数相对较少的 1996、2000 年对应的 NO<sub>x</sub> 也较少, 从时间分布来看闪电多则对流层上部 NO<sub>x</sub> 混

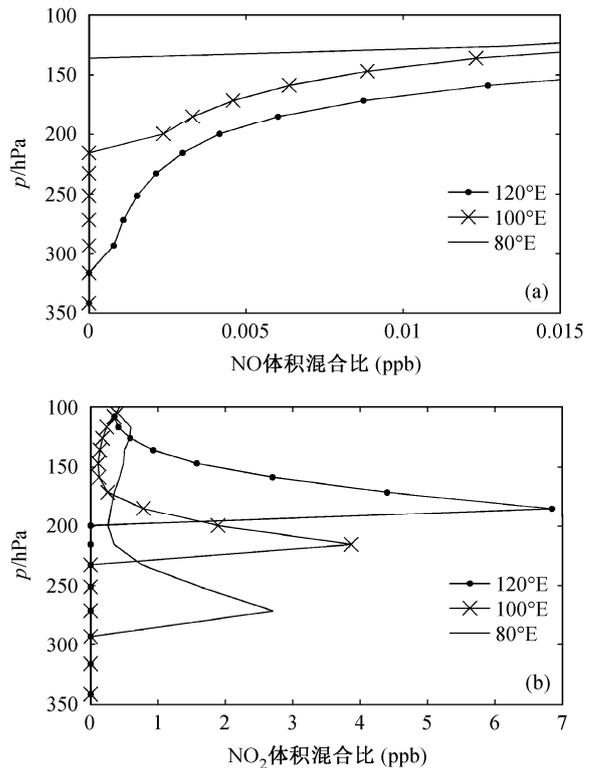


图 10 NO 及 NO<sub>2</sub> 体积混合比随高度的变化: (a) NO; (b) NO<sub>2</sub>  
Fig. 10 Variations of (a) NO and (b) NO<sub>2</sub> volume mixing ratios with height

合比含量也较大。

(2) 从空间分布来看, 我国闪电总体呈现与中国地势三阶梯相吻合的特点, 闪电密度从东部沿海湿润地区到西部内陆地区逐渐减少, 同时对流层上部的 NO<sub>x</sub> 分布也与闪电一致, NO<sub>x</sub> 极值中心和闪电密度在空间分布的吻合证明闪电越多的区域 NO<sub>x</sub> 的含量也越大, 闪电是对流层上层 NO<sub>x</sub> 的重要来源。

(3) NO 极值高度在 350 hPa 左右, 主要是因为闪电产生的 NO 一般在源区附近, 350 hPa 基本对应着云闪发生的高度, NO 的极值是由云闪直接产生的; NO<sub>2</sub> 的极值高度在 250 hPa 左右, 主要是因为闪电产生的 NO 几分钟内会被氧化成 NO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 则由雷暴云或积云中的上升气流带到更高的高度, 闪电直接产生的 NO<sub>x</sub> 是对流层上部 NO<sub>x</sub> 值较大的原因之一。

(4) 闪电多发的地区 NO<sub>x</sub> 极值较大, 同时这些区域 NO<sub>x</sub> 极值高度也较高, 这主要是因为在有局地雷暴存在时, 强对流会把 NO<sub>x</sub> 传送到更高位置, 青藏高原地区虽然闪电密度低于同纬度东部地区, 但夏季对流活动较强, NO<sub>x</sub> 极值也较大。闪电的对

流传输作用是  $\text{NO}_x$  在对流层上部含量较大的原因之一。

#### 4.2 讨论

本文分析  $\text{NO}_x$  含量使用的观测卫星 UARS 为极轨卫星, 其优点是时间序列较长、垂直分辨率高, 可以比较好地观测微量气体的垂直分布, 但在对特定区域或特定年份作分析时可能受到观测点少的限制, 本文在对比对流层  $\text{NO}_x$  空间分布时, 就对 HALOE 资料进行了插值处理; 在对比中国地区闪电与对流层上部  $\text{NO}_x$  相关性时, 本文主要针对  $\text{NO}_x$  垂直分布的变化作了分析, 并由时空分布特征得出一些正相关的结果。但对流层  $\text{NO}_x$  含量与许多因素有关, 比如日益增多的人为排放、飞机排放等, 本文都没有考虑这些因素。另外, 国内有一些研究如孙安平等 (2004) 和周筠珺等 (2004) 对全球及东亚地区闪电产生  $\text{NO}_x$  的量进行了估算, 而本文对闪电产生  $\text{NO}_x$  量的计算还没有涉及, 也希望今后能通过实际观测对闪电产生  $\text{NO}_x$  量的分布进行检测, 相关工作还值得进一步研究探讨。

**致谢** 本文所用 HALOE 资料由 UARS 卫星计划的研究人员在网站上提供并可自由下载, 所用 HALOE 的再分析资料由中国科学技术大学地球和空间科学学院周任君、陈月娟提供, 所用闪电卫星资料由美国全球水资源和气候中心 GHRC 在网站上提供并可自由下载, 使我们的工作得以顺利进行。在论文写作中得到南京信息工程大学施春华副教授的指导, 在此谨致谢意!

#### 参考文献 (References)

- Barthe C, Pinty J P, Mari C. 2007. Lightning-produced  $\text{NO}_x$  in an explicit electrical scheme tested in a stratosphere-troposphere experiment: Radiation, aerosols, and ozone case study [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D04302.
- Beirle S, Spichtinger N, Stohl A, et al. 2006. Estimating the  $\text{NO}_x$  produced by lightning from GOME and NLDN data: A case study in the Gulf of Mexico [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6: 1075–1089.
- Bond D W, Zhang R Y, Tie X X, et al. 2001.  $\text{NO}_x$  production by lightning over the continental United States [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 27701–27710.
- 陈月娟, 施春华, 周任君, 等. 2006. 我国上空平流层中微量气体的垂直分布和变化趋势 [J]. *地球物理学报*, 49 (5): 1288–1297. Chen Yuejuan, Shi Chunhua, Zhou Renjun, et al. 2006. Contents and trends of the trace gases in the stratosphere over China [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 49 (5): 1288–1297.
- Cook D R, Liaw Y P, Sisterson D L, et al. 2000. Production of nitrogen oxides by a large spark generator [J]. *J. Geophys. Res.*, 105: 7103–7110.
- Donald W B, Scott S, Zhang R Y, et al. 2002. The importance of  $\text{NO}_x$  production by lightning in the tropics [J]. *Atmos. Environ.*, 36: 1509–1519.
- Goldenbaum G C, Dickerson R R. 1993. Nitric oxide production by lightning discharges [J]. *J. Geophys. Res.*, 98: 18333–18338.
- Hill R D, Rinker R G, Willson H D. 1980. Atmospheric nitrogen fixation by lightning [J]. *J. Atmos. Sci.*, 37: 179–192.
- 简俊, 陈月娟, 郑彬, 等. 2001. 北半球中层大气中  $\text{NO}_x$  的垂直分布特征 [J]. *大气科学*, 25 (5): 697–706. Jian Jun, Chen Yuejuan, Zheng Bin, et al. 2001.  $\text{NO}_x$  Vertical distribution in the middle atmosphere in the Northern Hemisphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (5): 697–706.
- Levy H II, Moxim W J, Kasibhatla R S. 1996. A global three-dimensional time-dependent lightning source of tropospheric  $\text{NO}_x$  [J]. *J. Geophys. Res.*, 101: 22911–22922.
- Levy H II, Moxim W J, Klonecki A A, et al. 1999. Simulated troposphere  $\text{NO}_x$ : Its evaluation, global distribution and individual source contributions [J]. *J. Geophys. Res.*, 104: 26279–26306.
- 李冰, 刘小红, 洪钟祥, 等. 1999. 深对流云输送对于对流层  $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_x$  再分布的作用 [J]. *气候与环境研究*, 4: 291–296. Li Bing, Liu Xiaohong, Hong Zhongxiang, et al. 1999. The role of deep-convective cloud transport in the redistribution of tropospheric chemical species [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 4: 291–296.
- 李庆, 陈月娟, 施春华, 等. 2005. 青藏高原上空氮氧化物的分布特征及其与臭氧的关系 [J]. *高原气象*, 24: 935–940. Li Qing, Chen Yuejuan, Shi Chunhua, et al. 2005.  $\text{NO}_x$  distribution over the Qinghai-Xizang Plateau and its relationship with  $\text{O}_3$  [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 24: 935–940.
- Logan J A. 1983. Nitrogen oxides in the troposphere: Global and regional budgets [J]. *J. Geophys. Res.*, 88: 10785–10807.
- 马明, 陶善昌, 祝宝友, 等. 2004. 卫星观测的中国及周边地区闪电密度的气候分布 [J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 34 (4): 298–306. Ma Ming, Tao Shanchang, Zhu Baoyou, et al. 2004. Climatological distribution of lightning density observed by satellites in China and its circumjacent regions [J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences (in Chinese)*, 34 (4): 298–306.
- Martin R V, Chance K, Jacob D J. 2002. An improved retrieval of tropospheric nitrogen dioxide from GOME [J]. *J. Geophys. Res.*, 107: 4437.
- Martin R V, Sioris C E, Chance K, et al. 2006. Evaluation of space-based constraints on global nitrogen oxide emissions with regional aircraft measurements over and downwind of eastern North America [J]. *J. Geophys. Res.*, 111: D15308.
- Pickering K E, Wang Y S, Tao W K, et al. 1998. Vertical distributions of lightning  $\text{NO}_x$  for use in regional and global chemical transport models [J]. *J. Geophys. Res.*, 103: 31203–31216.
- Price C, Penner J, Prather M. 1997.  $\text{NO}_x$  from lightning. 2. Constraints from the global atmospheric electric circuit [J]. *J. Geophys. Res.*, 102: 5943–5951.
- Schumann U, Huntrieser H. 2007. The global lightning-induced nitrogen oxides source [J]. *Atmospheric Chemistry Physics*, 7: 3823–3907.
- Singh H B, Herlth D, Kolyer R, et al. 1996. Reactive nitrogen and ozone over the western Pacific: Distribution, partitioning, and sources [J]. *J. Geophys. Res.*, 101: 1793–1808.

- 孙安平, 杜健, 张义军, 等. 2004. 闪电产生氮氧化物 ( $\text{LNO}_x$ ) 全球特征计算 [J]. 高原气象, 23 (4): 481–487. Sun Anping, Du Jian, Zhang Yijun, et al. 2004. Calculation of global characteristics of  $\text{NO}_x$  produced by lightning [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (4): 481–487.
- Thomas R J, Krehbiel P R, Rison W, et al. 2004. Accuracy of the lightning mapping array [J]. J. Geophys. Res., 109: D14207.
- Tie X X, Zhang R Y, Brasseur G, et al. 2002. Global  $\text{NO}_x$  production by lightning [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 43: 61–74.
- Von Liebig J. 1827. Une note sur la nitrification [J]. Chemical Physics, 35: 329–333.
- 袁铁, 郗秀书. 2004. 卫星观测到的我国闪电活动的时空分布特征 [J]. 高原气象, 23 (4): 488–494. Yuan Tie, Qie Xiushu. 2004. Spatial and temporal distributions of lightning activities in China from satellite observation [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (4): 488–494.
- 翟盘茂, 李晓燕, 任福民. 2003. 厄尔尼诺 [M]. 北京: 气象出版社, 18–19. Zhai Panmao, Li Xiaoyan, Ren Fumin. 2003. El Niño [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 18–19.
- Zhang R Y, Sanger N T, Orville R E, et al. 2000. Enhanced  $\text{NO}_x$  by lightning in the upper troposphere and lower stratosphere inferred from the UARS Global  $\text{NO}_2$  measurements [J]. J. Geophys. Res., 27: 685–688.
- Zhao C, Wang Y, Choi Y, et al. 2009. Impact of convective transport and lightning  $\text{NO}_x$  production over North America: Dependence on cumulus parameterizations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 9: 2289–2317.
- 周筠珺, 郗秀书. 2002. 闪电产生 $\text{NO}_x$ 机制及中国内陆闪电产生 $\text{NO}_x$ 量的估算 [J]. 高原气象, 21 (5): 501–508. Zhou Yunjun, Qie Xiushu. 2002. Mechanism and estimation of lightning-generated  $\text{NO}_x$  in Chinese inland area [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (5): 501–508.
- 周筠珺, 郗秀书, 袁铁. 2004. 东亚地区闪电产生的 $\text{NO}_x$ 的时空分布特征 [J]. 高原气象, 23 (5): 488–494. Zhou Yunjun, Qie Xiushu, Yuan Tie. 2004. Spatial and temporal distributions of  $\text{NO}_x$  produced by lightning in East Asian region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (5): 488–494.