0577-6619/2008/66(6)-0906-15 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

闪电活动的气候学特征研究进展*

张义军[1] 马 明[1,2] 吕伟涛[1] 陶善昌[2]
ZHANG Yijun[1] MA Ming[1,2] LU Weitao[1] TAO Shanchang[2]

1. 中国气象科学研究院雷电物理和防护工程实验室，北京，100081
2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院，合肥，230026
1. *Laboratory of Lightning Physics and Protection, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing* 100081, *China*
2. *School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *China*
2008-10-08 收稿，2008-12-31 改回.

Zhang Yijun, Ma Ming, Lü Weitao, Tao Shanchang. 2008. Review on climate characteristic of lightning activity. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(6):906－915

Abstract Latest research results indicate that lightning can be measured by using satellite optical sensor, Schumann resonances and the time-of-arrival (TOA) techniques at very low frequency. It is observed that high lightning density areas mainly lie in seaboards, mountains, high frequency mesoscale cyclone areas and convergent regions of the tropical convergence zone. 88% of global lightning discharges occur in continent, island and seaboard areas. The three regions hit most frequently by lightning are Congo in equatorial Africa, South America, and South and Southeast Asia. A lot of studies reveal that the global lightning activity is directly linked to the Earth's climate and climate change. The global lightning activity responds positively to temperature changes on many time scales, such as diurnal, pentad, intraseasonal, semiannual, annual, ENSO, and decadal time scales. However, the sensitivity of lightning to temperature appears to diminish at longer time scales. Since lightning can be monitored easily and continuously, it may become a useful tool for monitoring changes in important climate parameters. The lightning discharge is a significant producing source of nitrogen oxides (NOx) in the atmosphere, which is closely associated with ozone production and the Earth's radiation balance. There appears to be a robust positive correlation between lightning activity and upper tropospheric water vapor on short time scales. The effect of aerosol on thunderstorm and lightning is uncertain. More observations and investigations are needed to identify the coupling mechanism between lightning and climate change.
Key words Lightning, Climate, Temperature, Aerosol, Water vapor

摘 要 综述了闪电活动与气候和气候变化相关研究的一系列最新进展。这些研究表明全球闪电活动可以通过卫星光学方法、地面的单站舒曼共振法以及低频多站时差法进行观测，其结果指出全球闪电密度高值区主要分布在海岸地区、山地地区、中尺度气旋多发地区以及热带辐合带的辐合区内，大陆、海岛、沿海地区所发生的闪电占全球的88%，全球3个闪电密度极大值依次出现在赤道地区的非洲刚果、南美洲大陆和东南亚。大量的研究结果表明全球闪电活动是与气候和气候变化相关的，在日、5 d、季、半年、年、ENSO、10 a多个时间尺度上，闪电活动对温度做出了一定的正响应，但在更长时间尺度上这种敏感性似乎是减弱的。闪电活动因易于被持续监测而可以作为监测气候一些重要参数变化的有利工具。闪电活动是氮氧化物(NO_x)的重要产生源，这与臭氧等温室气体以及地球辐射之间存在密切关系。在短时间尺度上，对流层上层水汽和全球闪电活动之间存在非常好的相关性。气溶胶对雷暴以及闪电活动的影响还不明确。气候变化与雷暴和闪电活动之间的相互耦合机制还有待于更多的观测和深入的研究。
关键词 闪电，气候，温度，气溶胶，水汽
中图法分类号 P427.3

---

* 资助课题：国家自然科学基金(40705001，50875003)。
作者简介：张义军，从事大气电学研究。E-mail：zhangyj@cams.cma.gov.cn

1 引 言

地球上每秒大约有2000多个雷暴在发生,并伴随着大量闪电。闪电活动高峰常常出现在太阳对地面加热达到峰值的数小时之后;在季节尺度上,全球闪电活动的高峰发生在一年中太阳对地加热达到峰值的几个月之后;就全球尺度而言,由于南北半球大陆不对称,相对于夏季南半球,北半球的闪电活动更加频繁。随着全球气候的变暖,极端天气事件增多,闪电活动作为雷暴中的一个重要天气现象,对气候变化的影响及其响应问题越来越受到人们的关注,目前闪电气候学已成为大气电学研究领域的一个重要内容,人们也越来越多地认识到闪电活动在气候和气候变化研究中的重要性(Williams, 2005; Price, 2008a; 郄秀书,2003)。在雷暴中闪电放电的发生一般伴随着很强的对流过程,而大气中对流过程主要发生在不稳定的大气层结条件下,导致这种大气不稳定的条件主要是由于在白天太阳辐射对边界层的加热或是不同密度气团的混合,但这些不稳定的地区不是随机产生的,而是有规律的,主要是由于太阳对地球表面加热不均匀而形成的。如果气候发生变化,对流的位置以及频次、强度也会随之变化,最终可能导致全球闪电分布的变化。因此最近对未来全球变暖的预测中,涉及到的关键问题之一是正在变暖的全球对雷暴以及其他强对流天气的影响。全球变暖是否会增加闪电活动? 是否会产生更多的强风暴? 如果闪电活动发生变化,是否也会对气候产生影响? 针对这些问题已有很多研究结果,本文阐述了全球闪电活动的监测、闪电与气候和气候变化等方面的最新观测和研究进展。

2 全球闪电活动

2.1 全球闪电活动的观测

全球闪电监测主要有3种方式,一是天基的卫星观测,二是地基的舒曼共振法观测,三是利用闪电产生的甚低频辐射对闪电进行的地基监测。在过去的10多年里,通过卫星的观测,人们已经获取了大量闪电活动资料。在卫星观测中,两个主要的闪电传感器是光学瞬态探测器(Optical Transient Detector,简称 OTD)和闪电成像仪(Lightning Imaging Sensor,简称 LIS)(Christian,et al, 2003)。美国从20世纪60年代开始研制卫星闪电探测仪,在20世纪80年代,美国国家航空航天局利用U-2高空飞机作为观测平台,开展闪电光辐射特性观测试验,并在20世纪90年代中期成功研制出新一代光学闪电成像仪OTD和LIS,并由低轨道卫星携带上天,实现了相对有效、可靠的卫星闪电探测。OTD/LIS都是搭载在非太阳同步圆形轨道卫星上,垂直向下观测雷暴云中闪电发出的强烈光脉冲,结合一个窄带干涉滤光器(中心波长777.4 nm,最大半宽0.856 nm)将影像聚焦在128×128像素的电荷耦合装置(Charge Coupled Device,简称CCD)焦平面上。OTD/LIS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。OTD是闪电光学成像探测的第一台原理性样机,于1995年4月由Microlab-1卫星携带上天,工作到2000年3月,轨道高度750 km,轨道倾角70°,像素空间分辨率10 km,时间分辨率2 ms,视场1300 km×1300 km,探测效率在50%左右。

LIS于1997年11月由TRMM卫星携带上天,至今仍在工作,轨道高度350 km,于2001年8月升轨到400 km,轨道倾角35°。像素空间分辨率5 km,视场550 km×550 km,探测效率在90%左右。LIS具有根据观测背景辐射状况变化而自动改变阈值的功能,更能适应白天和黑夜探测闪电的需要,从而提高了闪电探测效率。由于TRMM卫星轨道只有35°倾角,LIS主要用来探测中低纬度地区发生的闪电信息。

OTD和LIS获得的大量全球闪电数据提供了关于全球闪电分布特征的信息,得到了广泛应用,取得了一系列重要研究成果。然而,由于受卫星平台的制约,OTD和LIS对闪电的观测能力仍然很有限。这不仅表现在其观测覆盖范围有限,而且由于低轨道卫星的运动特性,例如LIS对视场范围内任一地点每次的注视时间只有大约90 s,获得的闪电事件只是在卫星运行到某个地点上空时该地点正在发生的闪电事件,这仅仅只是该地点全年全部闪电事件中的一部分。因此,OTD和LIS提供的只是在一定时间平均意义上的某一局域的闪电分布信息,无法实现闪电的实时监测、跟踪和预警。与低轨道卫星闪电观测相比,正在研制中的地球静止轨道卫星闪电探测仪则可以提供对闪电的连续观测,尤其是对台风、暴雨等强对流天气的移动过程和路径进行连续监测、跟踪和预警的能力将得到大大地加强。

舒曼共振(Schumann Resonance,简称 SR)是地球和电离层之间形成的波导中出现的极低频(ELF)电磁波谐振现象。闪电产生的宽带电磁辐射是激发 SR 的主要原因。理论计算指出,SR 的前 3 阶模基频为 8、14 和 20 Hz,其中一阶模频率(约 8 Hz)对应于地球圆周长(约 40000 km)。SR 信号的幅值是由全球闪电活动的积分效应决定,因此 SR 的测量可以提供全球雷电活动及其变化的信息。利用舒曼共振法可以在地球上任意一点测量全球的闪电活动。观测发现 SR 峰值功率和热带温度成正相关,因而 SR 与全球雷电活动关联的监测已成为研究全球气候变化的一种手段(Price, et al, 2004, 2007; Williams, 1999)。

由于大气无线电波在甚低频(VLF)范围内衰减较少,因此 VLF 传感器可以用来探测数百乃至上千千米的大气无线电波,同时可以探测雷暴中闪电产生的 VLF 辐射。多个地区建立起了使用 VLF 传感器的区域网络,并利用磁定向法(DF)和时差法(TOA)技术定位闪电的发生时间和位置,同时利用附加的电场传感器以确定地闪的极性(正或负),利用地闪 VLF 辐射场的峰值与地闪峰值电流的相关性,给出地闪的强度。因此,VLF 闪电定位网具有更宽阔的覆盖范围并提供有关闪电类型和强度的重要附加信息,但由于传感器主要在垂直方向探测闪电放电产生的辐射场,因此这种大尺度网络对云闪的探测不足,而云闪约占整个闪电总数的 2/3 以上,所以 VLF 网因其追踪雷暴整个发展的能力不足而受到限制。由于 VLF 网络可以对远距离雷暴活动进行实时监测,近年来 VLF 闪电探测网已经覆盖全球(全球闪电定位网-WWLLN)。值得注意的是,这样远距离探测网只能探测最强的闪电放电。因为在地球和电离层组成的波导中,电磁辐射波形会产生畸变,一般的 TOA 方法会因为辐射脉冲到达测站的时间不准确,而由此得到的闪电距离就会产生误差,因此全球闪电定位网采用了一种改进的成组到达时间(TOGA)方法在每一个测站确定天电到达天线的时间,以得到更准确的闪电发生时间和小于 10 km 的位置误差。

2.2 全球闪电活动的分布

利用 OTD/LIS 的观测资料分析得到许多非常有意义的结果,并得到了全球和区域闪电活动的时空分布特征(Christian, et al, 2003; Boccippio, et al, 2000; Ma Ming, et al, 2005; Toumi, et al, 2004),总结起来全球闪电活动气候分布的主要特征有:

(1) 全球总闪率 (Global total flash rate)

OTD 和 LIS 探测到的全球闪电频次平均为(46±5)次/s,一年里从最小的 35 次/s (出现在北半球冬季) 到最大 55 次/s (出现在北半球夏季),考虑到仪器对闪电的探测效率,由 OTD/LIS 得到的全球总闪率的误差在 20%以下。

(2)南北半球总闪频数的不对称分布和季节变化

OTD/LIS 观测得到的全球闪电密度的地理分布与 WMO 公布的雷暴日全球气候分布在定性上是一致的,主要受大陆地区的日加热状况影响。由于北半球的陆地面积大于南半球,因此,北半球的闪电总数也大于南半球,即使在陆地上不同的地区闪电活动也有明显的差异。大约 78%的闪电发生在 30°S—30°N,全球海洋区域的闪电频数年变化相对稳定,保持在 5 次/s 左右,而陆地为 31—49 次/s,且峰值出现在当地时间的午后,陆地和海洋的平均闪电密度比近似为 10:1。

对全球闪电的季节变化研究发现,全球闪电活动的年变化周期峰值出现在北半球夏季,峰值滞后夏至点一个月。热带和副热带的闪电活动有半年周期,其中南亚和东南亚、赤道非洲在北半球春季最大,而副热带非洲和南美在北半球秋季最大,非洲相对南美洲和东南亚其半年周期显得更对称。而在中纬度地区闪电活动都呈现出明显的季节变化,北半球的闪电活动在北半球夏季活跃,并在 8 月达到最大值,而在南半球,闪电活动峰值则发生在 10 月。

(3) 总闪电密度极值区和热带 3 大“烟囱”

全球闪电密度高值区主要分布在海岸地区、山地地区、中尺度气旋多发地区以及热带辐合带的辐合区内,大陆、海岛、沿海地区所发生的闪电占全球的 88%。其中赤道上的刚果盆地被认为是地球的热斑,其他两个极大值依次出现在南美洲大陆和东南亚及大洋洲,被称为 3 个热带烟囱(图 1)。

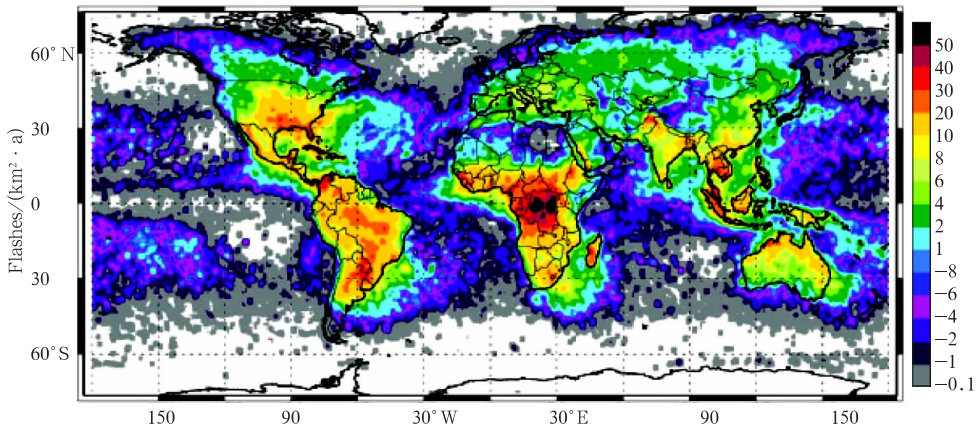


图 1　卫星观测的全球 1995 年 5 月—2000 年 4 月年平均闪电密度分布
(Christian, et al, 2003)

Fig. 1　The annualized distribution of total lightning activity observed by satellites from May 1995 to April 2000 (Christian, et al, 2003)

3　闪电和气候变化

3.1　闪电活动与地表温度

多年来,全球变暖现象是气候变化研究的一个热点,人们自然关心,在一个更暖的地球上闪电活动是增多还是减少? 或者说在不同时间和空间尺度上闪电活动是否并如何受全球气温变化的影响? Williams(1999)指出热带陆地测站的结果呈现出闪电活动随地表温度增高而非线性增加,舒曼共振磁场模的月平均值和热带地表月平均温度距平的变化曲线非常接近,温度变暖时舒曼共振振幅增大,而变冷时振幅减小,他得到温度每 1 ℃的增加会带来舒曼共振振幅 200%的增加,从而提出"舒曼共振是热带温度计"。对电离层电位的研究表明,1 ℃的温度变化将导致电离层电位 7%或 5%的敏感变化,电离层电位被假设可以作为全球表面温度的代理指数。Reeve 等(1999)用 3 年的星载 OTD 的闪电观测资料对全球陆地的不同区域进行分析后得到:1 K 的全球陆地 1000 hPa 湿球温度的增加可能引起闪电活动 40%的增加;全球陆地的闪电活动月平均值变化与相应的 1000 hPa 湿球温度变化的相关性较好,其中北半球相关最强,南半球较弱,在一个更温暖的地球上闪电活动更频繁,提出"闪电活动是气候变化的指示器"。马明等(Ma Ming, et al,2005)基于 5 年或 8 年星载 OTD/LIS 闪电观测资料和 NCEP 再分析资料,对全球和区域闪电活动对温度变化的响应进行了再分析,结果进一步证实了"闪电活动是气候变化指示器"的结论,具体表现为:在年际时间尺度上,全球总闪率对全球地表温度的变化是正响应,灵敏度为(17±7)%/K;全球陆地和北半球陆地季平均的闪电频次对地表温度和湿球温度增加也有灵敏的正响应,灵敏度约为(13±5)%/K。最近很多研究工作从多种时间尺度给出了闪电和地表温度的关系,从日变化到 5 d 的波动、季节变化和半年变化、年尺度和年际变化(Price, 1993; Markson, et al, 1999; Price, et al, 2006a, 2006b; Patel, 2001; Anyamba, et al, 2000; Williams, 1994; Satori, et al, 1996; Fullekrug, et al, 1998; Nickolaenko, et al, 1999; Heckman, et al, 1998)。在所有的这些尺度上,观测发现地表温度和闪电活动呈正相关,图 2 显示的是基于舒曼共振法得到的非洲日平均地表温

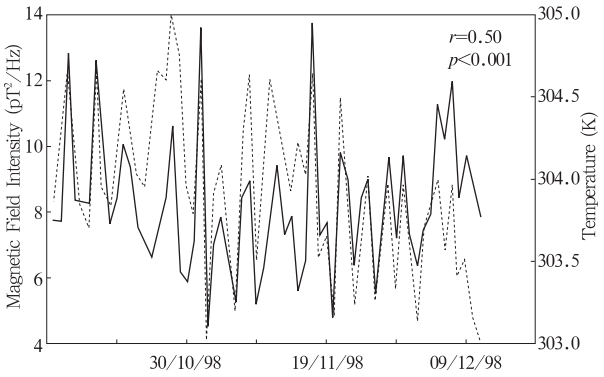


图 2　基于舒曼共振法得到的非洲闪电活动(实线)与平均地表温度(虚线)的日变化(Price, et al, 2006b)

Fig. 2　Daily variation of the lightning activity (Solid line) derived by SR over Africa compared with that of the surface temperature over the same region (Dased line) (Price, et al, 2006b)

度与日闪电活动的对比,资料的时段超过 2 个月(Price,et al, 2006a)。很明显,在热带闪电活动中心,地表温度是闪电活动日变化的一个关键驱动因子。不过,利用雷暴日资料分析最近 50 多年的闪电活动,并没有出现任何长期的这种趋势(Price, et al, 2006a,2006b; Markson, 2007)。在南半球、热带等其他区域,季平均的闪电频次与地表温度年际变化之间也没有明显相关。

3.2 闪电活动与对流层上层的水汽

对流层水汽是影响气候的关键因素,它不仅作为温室气体具有直接的气候效应,还通过与云、气溶胶和对流层化学相互作用具有间接的气候效应。而对流层上层的水汽,尽管相对来说较少,但作为温室气体对气候变化的影响至关重要。由于水汽吸收了来自地表放射的红外辐射,在温暖的气候中水汽的增加会产生一个正反馈,使 CO_2 增加的全球增暖效应被放大(Del Genio, 2002),考虑水汽的这种反馈作用要比单纯的 CO_2 加倍的增温效应大 60%。通常认为对流层上部水汽浓度变化对气候的影响要比低层大气水汽变化的影响更明显。最近研究表明,雷暴在对流层顶聚集了大量的水汽,对流层顶湿润的环境给气候带来了很大的影响(Rind, 1998)。Price(2000)的研究发现对流层上层水汽和全球闪电活动之间存在非常好的相关性。图 3 显示的是基于舒曼共振法得到的非洲闪电活动日变化与在 300 hPa高度的对流层顶的比湿之间的关系。从图上看出这两条日变化曲线非常一致,但闪电活动曲线的峰值比对流层顶比湿变化曲线的峰值要早 1 d。Sato 等(2005)研究指出在热带地区闪电活动和高云覆盖率有联系,而对流层顶的冰水含量和冰晶大小与热带闪电活动的联系更强(Petersen, et al, 2005; Sherwood, et al, 2006)。因为水汽、云量、冰水含量以及冰晶大小对地球辐射平衡有直接的影响,因此闪电活动监测可能为这些重要的气候参数变化的研究提供一个有利工具。研究结果也指出当闪电活动增加,对流层顶将变得潮湿(Price, et al, 2006b; Price, 2000)。然而对流层顶通常是非常干燥的,因此在干燥的气候中雷暴强度的增强的确会使对流层顶变得潮湿。利用 CO_2 浓度加倍的气候模式研究发现,这样的湿度增加导致了气候能达到最大限度的增暖。Baker 等(1995,1999)根据模式和区域观测结果提出可以用闪电表征传输到对流层上层的小冰粒,因为这些小冰粒将通过升华增加对流层上层的水汽。因此闪电活动监测不仅是监测强对流的一种方法,同时也是与雷暴垂直输送到大气层顶的水汽相联系的。

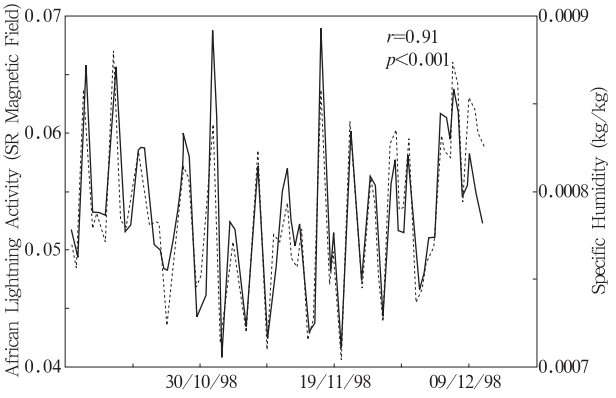


图 3 基于舒曼共振法得到的非洲日闪电活动(实线)与在 300 hPa 高度的对流层顶的比湿(虚线)(闪电活动向前移动了 24 h)(Price, et al, 2006b)

Fig. 3 Daily variation of the lightning activity (Solid line) derived by SR over Africa compared with that of the 300-hPa specific humidity (Dased line) in the following 24 h (Price, et al, 2006b)

3.3 闪电活动与对流层大气化学

闪电放电过程会产生氮氧化物,目前最新的估计每年全球闪电产生的 NO_x 总量为 5×10^{12}—10×10^{12}(g·N),预期随着温度升高,闪电产生的 NO_x 总量将增加。近来一些模式研究表明:这些 NO_x 将导致对流层中高层 O_3 浓度增加而对流层低层 O_3 浓度下降,引起正的温室效应;但同时它们会导致另一种温室气体 CH_4 含量下降,产生负的温室效应,所以闪电活动引起的对流层化学过程很重要但十分复杂,观测和模式研究的结果也常常存在较大的分歧,是一个正在继续深入研究的课题。Schumann 等(2007)总结了有关这方面的研究结果。最近的野外试验如热带对流、卷云和氮氧化物试验(TROCCINOX)(Huntriesser, et al, 2007)显示,当雷暴云中氮氧化物的浓度大量增加,下沉气流中的臭氧浓度也随之增加。Ryu 等(2005)也提出了闪电对对流层臭氧浓度有极其重要的影响。由于定量测量单个闪电产生氮氧化物的难度较大,确定一个特定的雷暴中一个特定的闪电放电增加了多少确切的氮氧化物浓度,这是非常困难的。很多研究采用根据闪电特征参量来计算的方法,由于闪电和雷暴多种多样,

闪电放电的重要参数如:能量、长度、峰值电流、先导起始高度和回击次数等也具有较大的分布范围,单从个别的野外试验得到的结果来推断全球的总量显然具有很大的不确定性,闪电和雷暴产生的氮氧化物全球总量目前还是非常不确定的一个量(张义军等,2002;杜建等,2002)。但闪电仍然被认为是对流层顶氮氧化物的主要产生源之一,而生命期为几天的氮氧化物在调节全球气候中起着重要的作用(Price,et al, 1997)。

3.4 闪电活动与气溶胶

人们了解气溶胶对晴天大气电场的作用已有一个世纪。但除了气溶胶通过辐射强迫作用直接影响气候的链条之外,气溶胶是否还通过改变大气电学特征和闪电活动以影响气候变化过程呢? 这是最近20多年来一个新的研究课题。随着卫星探测、分析和反演云微观物理过程特征的新方法的发展(Rosenfeld, et al, 1998, 2003),大大促进了气溶胶在云内微观物理过程、降水、云内起电过程以及闪电活动中的作用的研究。气溶胶含量的增加可能会导致液滴的减小、暖雨并合的抑制以及到达混合相区的云水的增多(Williams, et al, 2002a),进而影响云内起电和闪电活动。为了揭示气溶胶与闪电活动相互关系,学术界开展了一系列观测试验。

Orville 等(2001)以及 Steiger 等(2002)利用12 a的闪电观测资料,研究发现:在美国得克萨斯州的休斯顿,地闪密度是过去的3倍,并认为污染或者城市热岛效应可能是产生这种结果的一个原因。有研究报告指出:有的地方污染的增加导致降水的减少(Rosenfeld, 1999),但 Shepherd 等(2003)利用休斯顿的观测分析指出该地区下风方降雨增加以及午后的闪电活动出现很强的异常峰值,似乎表明城市热岛效应可能是主要的作用机制。Steiger 等(2003)发现在一个靠近路易斯安那州的查尔斯湖的原油提炼场附近闪电增强,他们将这个现象解释为气溶胶的作用。但是,在得克萨斯州和路易斯安那州的海岸线上闪电密度的明显不连续性表明了地表的不同性质对闪电活动的可能的控制作用。因此,直接通过观测试验,把气溶胶对闪电活动的影响与热力/动力作用对闪电活动的贡献区分开来是十分困难的。

Williams 等(2002)在巴西开展了一个试验试图证明闪电活动的增强与气溶胶有关。他们在季风之前闪电比较活跃的时期,对有污染和干净条件下对起电的测量进行对比研究,结果对气溶胶作为影响闪电活动的重要因素提出了怀疑。Andreae 等(2004)在巴西污染严重的季风转向期进行了观测,观测表明气溶胶能够加强对流,这些结果似乎与 Williams 等(2002a)早期的发现相悖。由于缺乏宏观量(闪电,降雨,CAPE)的定量观测,在闪电相对不活跃的湿季,气溶胶的作用与热动力作用之间的区别就更不明显了。Williams 等(2002a)提出了一个区别气溶胶假设和传统的热力假设的方法,这个方法基于闪电活动在海岛上的不同表现特征,其结果也支持热动力假设,因为海岛在海中就相当于城市热岛在陆地的作用。对海岛上闪电活动的进一步研究也得到了相似的结果(Williams, et al, 2004, 2005b)。

雷暴主要发生在不稳定的天气条件下,很强的不稳定条件可能生成灾害性更严重的天气过程,在这些过程的雷暴中会产生大量的正地闪,且雷暴电荷结构可能是反极性的(MacGorman, et al, 2005),因此在将来的研究中很有必要分别对气溶胶和不稳定条件作细致的分析。干燥的气候导致更多的悬浮气溶胶和云凝结核的产生,从而影响云的微物理过程和云的起电机制(Williams,et al, 2002b)。然而,迄今在雷暴起电机制和模式的研究中,人们只考虑了热力和动力学过程以及云和降水的微物理过程,气溶胶的作用(包括荷电气溶胶的作用)并未被考虑。气溶胶是否对气候与闪电的关系有影响仍是未来研究的一个主题。

4 结论和讨论

全球闪电活动的探测主要分为天基和地基,利用光学探测方法在卫星上可以获得全球的闪电资料,在地面利用单站舒曼共振法以及低频多站时差法也可对全球闪电活动进行观测。观测发现全球闪电密度高值区主要分布在海岸地区、山地地区、中尺度气旋多发地区以及如热带辐合带的辐合区内,大陆、海岛、沿海地区所发生的闪电占全球的88%。其中赤道上的刚果盆地被认为是地球的热斑,其他两个极大值依次出现在南美洲大陆和东南亚。大量的研究结果表明全球闪电活动是与气候相关的,在日、5 d、季、半年、年、ENSO、10 a多个时间尺度上,闪电活动对温度具有一定的响应,但在更长时间尺

度上这种敏感性似乎是减弱的。由于闪电活动易于被持续监测,可以作为监测气候一些重要参数变化的有利工具,闪电活动是氮氧化物(NO_x)的重要产生源,这对臭氧以及地球辐射平衡具有重要作用。对流层上层水汽和全球闪电活动之间存在非常好的相关性,但气溶胶对雷暴以及闪电活动的影响还需要更多的观测和深入的研究。

通过以上分析可以总结出气候变化与雷暴和闪电活动相互作用的概念模型(图 4)。温室气体的增加引起气候变化,气候变化使强雷暴增强并产生更多的闪电以及对流层上层的水汽和冰晶含量,闪电活动则由于产生了氮氧化物增加了臭氧含量,进而使温室气体增多。因为闪电在大气中氮氧化物产生过程中具有重要作用,而氮氧化物又是对流层中臭氧的前体。由于臭氧也是温室气体,所以闪电活动的变化可能导致气候变得更加温暖。气溶胶与雷暴和闪电活动相关,也与气候变化相关,气溶胶影响气候变化的同时,也在一定程度上通过改变云微物理性质影响起电过程并且是对流层和平流层化学反应的积极参与者,而闪电放电过程也产生大量离子和荷电气溶胶。由于全球闪电活动监测技术的发展,实现了全球闪电活动的长期监测,从闪电活动的监测信息中可以获取强对流的重要信息,而这些信息则涉及到其他重要的气候参数。因此,在气候变化研究中,通过对全球闪电活动的监测,能够追踪许多参数的变化,这也将进一步促进闪电活动信息在气候变化研究中的应用。

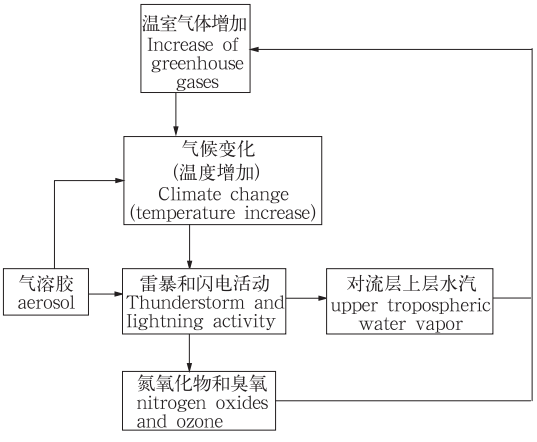


图 4 气候变化与雷暴和闪电活动相互作用概念模型

Fig. 4 Model of interaction between thunderstorm, lightning and climate change

尽管很多研究都揭示了气候变化与雷暴和闪电活动存在一定相关性的一些客观事实,但到目前为止这些相关性的产生机制以及物理过程还不是很清楚。无论日增温、纬度方向的温度梯度、大气环流、大气层中辐散与辐合,还是静态不稳定和斜压不稳定等都对全球的雷暴分布有影响,闪电活动在时间和空间上的分布受到太阳活动以及气候支配(言穆弘等, 1996, 1999; Qie Xiushu, et al, 2003)。从较短的时间尺度上来看(小时尺度、天尺度、月尺度和年尺度),热带闪电活动和地表温度、对流层顶水汽、云量以及冰晶含量呈明显的正相关,但从更长的时间尺度上来说,尽管气候模型证实温度与闪电活动呈正相关,但其他因子与闪电活动是否呈这种关系还不确定。因此,当我们考虑闪电与气候的关系时,不仅要考虑温度还应该考虑其他因素的作用。

目前我们拥有时间尺度为 10 多年的卫星闪电观测资料,热带降水测量卫星(TRMM)具有很强的全球闪电分布观测能力,这为研究闪电和气候的关系提供了技术手段。全球闪电集中在热带大陆的 3 个多发地(非洲、南美和东南亚),而热带降水的落区则是沿着热带辐合带(ITCZ)。这 3 个闪电多发地带从强到弱排序为非洲、南美和东南亚,但是观测到雨带的强弱排序却正好相反。对一个地区年气候尺度而言,降水量少对应着闪电活动强(Price, 2008)。Williams 等(2004)在研究热带非洲与热带南美洲闪电气候特征差异中指出,非洲与南美洲这种主要差异的可能原因是非洲比南美洲更干更热。非洲的这种明显的大陆性气候归因于它的地形以及该地区水汽输送在气候尺度上的不对称。另外,Williams 等(2005)指出雷暴云云底高度增加,闪电活动也随之增加。云底高度越高预示着地表越干燥。Carey 等(2007)的研究也证明了以正地闪为主的雷暴(通常与更严重的灾害性天气同时出现)更可能出现在很干燥的环境中。熊亚军等(2006)给出了闪电活动对地面相对湿度的响应,认为过大的相对湿度会抑制闪电活动。周筠珺等(1999)发现甘肃地区地闪与对流性天气中的降水有较好的相关性。袁铁等(2005)认为在青藏高原中部地区,感热通量或鲍恩比(感热通量和潜热通量之比)可能在对流有效位能向对流上升动能的转化过程中起着重要的作用。在 ENSO 时间尺度,Hamid 等(2001)研究发现 1997—1998 强厄尔尼诺年,印尼持续严重干旱,闪电活动增加了

57%,并指出在干旱的厄尔尼诺时期,雷暴会有很剧烈的垂直发展,而下沉混合区也变得更深厚。马明等(Ma Ming, et al, 2005)利用星载 OTD 和 LIS 观测得到的闪电资料研究也发现,在 1997/1998 年 NESO 事件期间中国东南部闪电活动表现为显著的正异常。

越来越多可靠的证据证明全球的气温在升高,其原因很可能是人为地增加大气中温室气体的排放(IPCC, 2007)。为了研究气候变暖对雷暴和闪电的影响,利用大气环流模式模拟是一个通用方法,并且可以讨论它们之间的相互作用机制。许多气候模式模拟结果发现,在变暖的气候中闪电活动将会增加(Price,et al,1992; Grenfell, et al, 2003; Shindell, et al, 2006; 张敏锋等, 2001)。尽管在全球气候模型中的闪电参数化非常的粗糙,但模式研究指出全球温度增加,全球闪电活动也随之增加,且增加的闪电活动大部分发生在预测大气将变得更稳定的热带。Del Genio 等(2007)研究发现在 CO_2 浓度加倍的气候条件下,由于在模式中 0 ℃层高度变高,上升气流将增加大约 1 m/s。他们指出在合适的区域,如美国西部,温暖的干燥气候减少了雷暴产生频率,但在发生的雷暴中通常有 26%的超强雷暴。也就是说,干燥的气候减少了雷暴数量,但在温暖的气候中雷暴强度会变得更强,这与最近的观测是相吻合的,Williams(2005)观测指出在美国大平原的干旱地区雷暴中起电过程更强烈。

在研究全球变暖的模式中,超过 20 种不同的模式都得到温室气体浓度将增加。所有的模型都显示强烈的气候变暖是由于温室气体浓度不是在地表增加而是在赤道的对流层顶。其中的原因是模型预测在潮湿的对流层顶,由于热带对流发展的很深厚,而对流中的水汽又是很强的温室气体,它们吸收了从地表发射的红外辐射。但如果对流层顶相对于地面是暖的,那么大气的层结就会变的很稳定,从而将抑制对流的发生,这将会使雷暴和闪电减少。这与前面的研究是矛盾的。因此气候变化与雷暴和闪电活动之间的内在机制还需要更多的观测和深入的研究。

References

Andreae M O, Rosenfeld D, Artaxo P, et al. 2004. Smoking rain-clouds over the Amazon. Science, 303: 1337-1342

Anyamba E, Williams E R, Susskind J, et al. 2000. The manifestation of the Madden-Julian oscillation in global deep convection and in the Schumann resonance intensity. J Atmos Sci, 57: 1029-1044

Baker M B, Christian H J, Latham J. 1995. A computational study of the relationships linking lightning frequency and other thundercloud parameters. Quart J Roy Meteor Soc, 121: 1525-1548

Baker M B, Blyth A M, Christian H J, et al. 1999. Relationship between lightning activity and various thundercloud parameters: Satellite and modeling studies. Atmos Res, 51:221-236

Boccippio D J, Goodman S J, Heckman S. 2000. Regional differences in tropical lightning distributions. J Appl Met, 39: 2231-2248

Carey L D, Buffalo K M. 2007. Environmental control of cloud-to-ground lightning polarity in severe storms. Mon Wea Rev, 135 (4):1327-1353

Christian H J, Blakeslee R J, Boccippio, et al. 2003. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector. J Geophys Res, 108: 4005

Del Genio A D. 2002. The dust settles on water vapor feedback. Science, 296: 665-666

Del Geuio A D, Mao-Sung Y, Jonas J. 2007. Will moist convection be stronger in a warmer climate? Geophys Res Lett, 34: Ll6703, doi: 10.1029/2007GL030525

Du Jian, Zhang Yijun, Yan Muhong. 2002. Regional characteristic calculation of lightning production of nitrogen oxides (LNO_x) (Ⅱ): Analysis on calculation result of LNO_x. Plateau Meteor (in Chinese), 21(5): 433-440

Fullekrug M, Fraser-Smith A. 1998. Global lightning and climate variability inferred from ELF field variations. Geophys Res Lett, 24:2411-2414

Grenfell J L, Shindell D T, Grewe V. 2003. Sensitivity studies of oxidative changes in the troposphere in 2100 using the GISS GCM. Atmos Chem Phys Discuss, 3: 1805-1842

Hamid E Y, Kawasaki Z-I, Mardiana R. 2001. Impact of the 1997-98 El Nino events on lightning activity over Indonesia. Geophys Res Lett, 28: 147-150

Heckman S, Williams E, Boldi B. 1998. Total global lightning inferred from Schumann resonance measurements. J Geophys Res, 103: 31775-31779

Huntriesser, et al. 2007. Lightning-produced NO_x over Brazil during TROCCINOX: Airborne measurements in tropical and subtropical thunderstorms and the importance of mesoscale convective systems. Atmos Chem Phys Discuss, 7: 2561-2621

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. World Meteorological Organization (WMO) and UN Environment Programme (UNEP)

Ma Ming, Tao Shanchang, Zhu Baoyou, et al. 2005. Climatological distribution of lightning density observed by satellites in China

and its circumjacent regions. Sci China, 48(1): 219-229

Ma Ming, Tao Shanchang, Zhu Baoyou, et al. 2005. Response of global lightning activity to air temperature variation. Chinese Sci Bull, 50(22):2640-2644

Ma Ming, Tao Shanchang, Zhu Baoyou, et al. 2005. The anomalous variation of the lightning activity in southern China during the 1997/98 El Niño event. Sci China (D), 48(9):1537-1547

MacGorman D R, Rust W D, Krehbiel P, et al. 2005. The electrical structure of two supercell storms during STEPS. Mon Wea Rev, 133: 2583-2607

Markson R, Price C. 1999. Ionospheric potential as a pruxy index for global temperatures. Atmos Res, 51:309-314

Markson R. 2007. The global circuit intensity: Its measurement and variation over the last 50 years. Bull Amer Meteor Soc, 88: 1-19

Nickolaenko A P, Hayakawa M, Hobara Y. 1999. Long-term periodical variations in global lightning activity deduced from Schumann resonance monitoring. J Geophys Res, 104:27585-27591

Orville R E, Huffines G R, Nielsen-Gammon, et al. 2001. Enhancement of cloud-to-ground lightning activity over Houston. Texas. Geophys Res Lett, 28: 2597-2600

Patel A. 2001. Modulation of African lightning and rainfall by the global five day wave, MSc thesis. Dept. of Mechanical Engineering, MIT, Cambridge, MA. 176pp

Petersen W A, Christian H J, Rutledge S A. 2005. TRMM observations of the global relationship between Ice water content and lightning. Geophys Res Lett, 32: L14819, doi: 10.1029/2005GL023236

Price C, Rind D. 1992. A simple lightning parameterization for calculating global lightning distributions. J Geophy Res, 97: 9919-9933

Price C. 1993. Global surface temperatures and the atmospheric electrical circuit. Geophys Res Lett, 20: 1363-1366

Price C, Penner J, Prather M. 1997. NO_x from lightning, Part Ⅰ: global distribution based on lightning physics. J Geophys Res, 102: 5929-5941

Price C. 2000. Evidence for a link between global lightning activity and upper tropospheric water vapor. Nature, 406:290-293

Price C, Melnikov A. 2004. Diurnal, seasonal and inter-annual variations in the Schumann Resonance parameters. J Atmos Solar-Terrestrial Phys, 66:1179-1185

Price C, Asfur M. 2006a. Long term trends in lightning activity over Africa. Earth Planets Space, 58: 1-5

Price C, Asfur M. 2006b. Can lightning observations be used as an indicator of upper-tropospheric water vapor variability? Bull Amer Meteor Soc, 87: 291-298

Price C, Pechony O, Greenberg E. 2007. Schumann resonances in lightning research. J Lightning Res, 1: 1-15

Price C. 2008a. Thunderstorms, lightning and climate change// The proceedings of 29th International Conference on Lightning Protection. Uppsala, Sweden, 2pp

Price C. 2008b. Will a drier climate result in more lightning? Atmos Res, in press

Qie Xiushu. 2003. Global lightning activity and climate change. Arid Meteor (in Chinese), 21(3): 69-73

Qie Xiushu, Ralf Toumi, Zhou Yunjun. 2003. Lightning activity on the central Tibetan Plateau and its response to convective available potential energy. Chinese Sci Bull, 48(4): 296-299

Reeve N, Toumi R. 1999. Lightning activity as an indicator of climate change. Quart J Roy Meteor Soc, 125: 893-903

Rind D. 1998. Just add water vapor. Science, 281: 1152

Rosenfeld D, Lensky I M. 1998. Spaceborne-sensed insights into precipitation formation processes in maritime and continental clouds. Bull Amer Meteor Soc, 79: 2457-2476

Rosenfeld D. 1999. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall. Geophys Res Lett, 26: 3105-3108

Rosenfeld D, Woodley W L. 2003. Closing the 5-year circle: from cloud seeding to space and back to climate change through precipitation physics// Tao W-K, Adler R. Cloud Systems, Hurricanes, and the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Meteor Monogr, 51: 59-80

Ryu J H, Jenkins G S. 2005. Lightning-tropospheric ozone connections: EOF analysis of TCO and lightning data. Atmos Environ, 39:5799-5805

Sato M, Fukunishi H. 2005. New evidence for a link between lightning activity and tropical upper cloud coverage. Geophys Res Lett, 32: L12807, doi :10.1029/2005GL022865

Satori G, Ziegler B. 1996. Spectral characteristics of Schumann resonances observed in central Europe. J Geophys Res, 101: 29663-29669

Schumann U, Huntrieser H. 2007. The global lightning-induced nitrogen oxides source. Atmos Chem Phys Discuss, 7:2623-2818

Sherwood S, Phillips V T J, Wettlaufer J S. 2006. Small ice crystals and the climatology of lightning. Geophys Res Lett, 33: L05804, doi: 10.1029/2005GL025242

Shepherd J M, Burian S J. 2003. Detection of urban-induced rainfall anomalies in a major coastal city. Earth Interct, 7: 1-17

Shindell D T, Faluvegi G, Unger N, et al. 2006. Simulations of preindustrial, present-day, and 2100 conditions in the NASA GISS composition and climate model G-PUCCINI. Atmos Chem Phys, 6: 4427-4459

Steiger S M, Orville R E, Huffines G. 2002. Cloud-to-ground lightning characteristics over Houston, Texas:1989－2000. J Geophys Res, 107(D11):4117

Steiger S M, Orville R E. 2003. Cloud-to-ground lightning enhancement over southern Louisiana. Geophys Res Lett, 30: doi: 10.1029/2003GL017923

Toumi R, Qie X S. 2004. Seasonal variation of lightning on the Tibetan plateau: a spring anomaly? Geophys Res Lett, 31 (4):

L04115, doi: 10.1029/2003GL018930

Williams E R. 1994. Global circuit response to seasonal variations in global surface air temperature. Mon Wea Rev, 122:1917-1929

Williams E R. 1999. The Schumann resonance: a global tropical thermometer. Science, 256:1184-1187

Williams E R, Stanfill S. 2002a. The physical origin of the land-ocean contrast in lightning activity. C R Acad Sci Phys, 3: 1277-1292

Williams E R, et al. 2002b. Contrasting convective regimes over the Amazon: implications for cloud electrification. J Geophys Res, 107 (D20):8082

Williams E R, Chan T, Boccippio D. 2004a. Islands as miniature continents: Another look at the land-ocean lightning contrast. J Geophys Res, 109: D16206

Williams E R, Satori G. 2004b. Lightning. thermodynamic and hydrological comparisons of the two tropical continental chimneys. J Atmos Solar-Terr Phys, 66: 1213-1231

Williams E R. 2005. Lightning and climate: A review. Atmos Res, 76: 272-287

Williams E R, Mushtak V C, Rosenfeld D, et al. 2005. Thermodynamic conditions favorable to superlative thunderstorm updraft, mixed phase microphysics and lightning flash rate. Atmos Res, 76: 288-306

Xiong Yajun, Qie Xiushu, Zhou Yunjun, et al. 2006. The regional response of lightning activities to the surface relative humidity. Chinese J Geophysics (in Chinese), 49(2), 367-374

Yan Muhong, Zhang Yijun. 1996. Review of research on atmospheric electric processes and climate change. Plateau Meteor (in Chinese), 15(2):234-242

Yan Muhong, Sun Anping, Zhang Yijun. 1999. Correlation analysis between solar activity, geomagnetic, atmospheric electric disturbance and weather, climate. Plateau Meteor (in Chinese), 18(3):377-391

Yuan Tie, Qie Xiushu. 2005. Seasonal variation of lightning activities and related meteorological factors over the central Qinghai-Xizang Plateau. Acta Meteor Sinica(in Chinese), 63(1):123-127

Zhang Yijun, Yan Muhong, Du Jian. 2002. Regional characteristic calculation of lightning production of nitrogen oxides (LNO_x) (Ⅰ): theory and calculation method. Plateau Meteor (in Chinese), 21: 348-353

Zhang Minfeng, Liu Xinsheng, Zhang Yijun. 2001. Simulation experiments of global lightning distributions by a coupled GCM. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 25(5): 689-695

Zhou Yunjun, Qie Xiushu, Zhang Yijun, et al. 1999. The relationship between cloud to ground lightning and precipitation in the convective weather. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 57(1): 104-111

附中文参考文献

杜建,张义军,言穆弘. 2002. 闪电产生氮氧化物(LNO_x)区域特征计算(Ⅱ):LNO_x 计算结果分析. 高原气象,21(5): 433-440

郄秀书. 2003.全球闪电活动与气候变化. 干旱气象,21(3):69-73

熊亚军,郄秀书,周筠珺等. 2006. 区域闪电活动对地面相对湿度的响应. 地球物理学报, 49(2): 367-374

言穆弘,张义军. 1996. 浅谈大气电过程与天气气候. 高原气象, 15(2): 234-242

言穆弘,孙安平,张义军. 1999. 太阳、地磁、大气电扰动与天气、气候相关研究. 高原气象,18(3): 377-391

袁铁,郄秀书. 2005. 青藏高原中部闪电活动与相关气象要素季节变化的相关分析. 气象学报, 63(1): 123-127

张敏锋,刘欣生,张义军. 2001. 利用 GCM 模式对全球雷电活动的模拟分析. 大气科学, 25(5): 689-695

张义军,言穆弘,杜建. 2002. 闪电产生氮氧化物(LNO_x)区域特征计算(Ⅰ)理论和计算方法. 高原气象,21: 348-353

周筠珺,郄秀书,张义军等. 1999. 地闪与对流性天气系统中降水关系的分析. 气象学报, 57(1): 104-111