2007年夏季长江流域及周边地区地闪时空分布及其天气学意义

王 颖[1,2,3,4] 郑永光[2,3] 寿绍文[4]

(1. 浙江省气象服务中心,杭州 310017; 2. 国家气象中心;
3. 中国气象局武汉暴雨研究所; 4. 南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室)

提 要: 对2007年夏季(6—8月)我国长江流域及其周边地区(25°～38°N、100°～122°E,不包括甘肃、山东)地闪分布与不同区域的日变化特征进行了分析,并与同期雷暴日分布和FY-2C红外亮温(*TBB*)≤－52℃频率分布、低轨卫星8年观测的闪电分布及11年静止卫星*TBB*≤－52℃频率日变化进行对比,结果表明不同资料获得的对流活动时空分布具有很大的一致性。江淮流域、川渝、浙江西北部、武夷山中段的地闪活动较其周边区域明显比多年星载观测的闪电活跃。地闪活动7、8月较6月活跃且活跃区位置偏北,7月最为活跃的正地闪反映了该月长江中下游地区有较多中尺度对流系统发生发展。不同区域的地闪活动具有不同的日变化特征,江淮流域和川渝地区地闪日变化表现出多峰型特征,浙赣闽区域地闪活动的单峰型特征显著;其中江淮流域、浙赣闽区域的地闪活跃时段在午后,而川渝地区地闪活动夜发性显著;四川盆地西南部地闪呈现出明显的向东、向北传播特征;川西高原、云贵高原中部及浙闽丘陵沿海地区正、负地闪日变化差异较大。浙赣闽区域和川西高原地区正负地闪活跃时段基本一致,江淮流域、川渝地区和贵州地区负地闪活跃时段提前于正地闪,这几个区域的正地闪活跃时段都提前于*TBB*≤－52℃频率。这表明负地闪日变化特征较好地反映了初始深对流的日变化特征,而正地闪与*TBB*≤－52℃频率则较好地反映了成熟与消散阶段的深对流日变化特征。

关键词: 地闪密度 时空分布 日变化 对比分析

资助项目: 国家重点基础研究973项目2004CB418300,武汉暴雨研究所暴雨开放基金IHR2008K02,国家自然科学基金项目40875019

收稿日期: 2009年1月9日; 修定稿日期: 2009年8月18日

Distribution and Spatio-temporal Variations of Cloud-to-Ground Lightning over the Yangtze River Basin and Adjacent Areas During the Summer of 2007

Wang Ying[1,2,3,4]　Zheng Yongguang[2,3]　Shou Shaowen[4]

(1. Meteorological Service Center of Zhejiang, Hangzhou 310017; 2. National Meteorological Center, Beijing;
3. Wuhan Institute of Heavy Rain of China Meteorological Administration;
4. KLME, Nanjing University of Information Science and Technology)

Abstract: Based on the June—August 2007 cloud-to-ground (CG) lightning dataset provided by the Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration, the distribution and spatio-temporal variations of CG lightning over the Yangtze River Basin and adjacent areas during the summer of 2007 are analyzed and compared with the thunderstorm distribution, the lightning distribution from low-orbit satellites and with the deep convection distribution denoted by TBB≤−52°C. The results show that the four distributions are, to some extent, consistent with each other. By comparing the 2007 CG lightning distribution with the lightning distribution from the low-orbit satellites, the CG lightning was more active over the Yangtze-Huaihe River Basin, Sichuan, Chongqing, the Northwest Zhejiang Province, the middle of the Wuyi Mountains during the summer of 2007. In addition, the CG lightning was more active in July and August than in June, and the location of active areas is farther north, however, the positive CG lightning is the most active in July. It shows that the mesoscale convective systems occurred more often in July 2007. Diurnal variations of CG lightning were different over different areas. Over the Sichuan Basin and the Yangtze-Huaihe River Basin, the diurnal variations of CG lightning had multiple active peaks, but there was only one active period of CG lightning all day long over Zhejiang-Jiangxi-Fujian area. The CG lightning was often more active in the afternoon over the Yangtze-Huaihe River Basin and Zhejiang-Jiangxi-Fujian area, but it had an obvious nocturnal feature over the Sichuan Basin. In the Southwest Sichuan Basin, the CG lightning obviously propagated eastwards and northwards. It is also found that there is a marked difference between the diurnal variations of positive CG lightning and negative CG lightning over the western Sichuan Plateau, the middle Yunnan-Guizhou Plateau and the coastal areas in Zhejiang. By comparing the diurnal variations of negative CG lightning with the positive CG lightning and the frequency of TBB≤−52℃ from the FY-2C satellite, the active period of negative CG lightning was often ahead of that of positive CG lightning and the active period of positive CG lightning in those areas was ahead of the frequency of TBB≤−52℃. It implies that the diurnal variations of negative CG lightning reflected the diurnal variations of initial convection, and positive CG lightning and the frequency of TBB≤−52℃ reflected the diurnal variations of mature and dissipating convections.

Key Words: CG lightning density　spatio-temporal distribution　diurnal variations　contrast analysis

引 言

2007年夏季我国暴雨和强对流事件频发导致人员伤亡和财产损失，特别是淮河流域、四川、重庆、山东等地遭遇历史罕见暴雨。闪电是伴随大气对流活动的一种复杂电现象，研究闪电的时空分布特征及其与静止卫星红外亮温(TBB)分布之间的关系既可以了解对流活动的时空分布特征，又可以为综合多种资料进行对流活动的临近预报提供背景参考。

Reap等[1]分析了1985和1986年4—9月美国强风暴实验室的闪电观测网获得的俄克拉荷马和堪萨斯州闪电资料的气候特征，Orville等[2-4]分别给出了1992—1995年、1989—1998年美国大陆和1998—2000年北美大陆的闪电气候分布特征，但这些研究并没有详细分析大范围区域内不同下垫面的闪电日变化特征的异同。Goodman等[5]，Rutledge等[6]研究了MCS(中尺度对流系统)中伴随的闪电活动，发现正、负闪电位于对流云不同的降水区，闪电频率与多单体对流云的厚度和单体数有关。20世纪90年代以来随着闪电定位仪在我国的应用，郄秀书等[7]、陶祖钰等[8]分别分析了兰州、京津冀地闪空间分布特征，前者并对两地的地闪日变化、比例、强度等特征进行了对比。近年来，李照荣等[9]、郑栋等[10]也对上述两地区的地闪活动的时空分布特征做了进一步分析。冯桂力等[11]分析了冰雹云形成发展与闪电演变特征的关系，蔡晓云等[12]给出了北京地区对流云天气闪电特征，尹承美等使用常规观测资料、地面加密资料和FY-2产品对济南市“7.18"大暴雨的天气形势、云图演变特征及中尺度系统发生、发展和移动的情况进行了分析[13]，郑媛媛等利用雷达、卫星、闪电定位仪及NCEP资料分析了2007年7月8日在安徽沿淮西部出现的特大暴雨过程的中尺度特征[14]，易笑园等分析了华北飑线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系及预警指标[15]。

马明等[16]利用8年星载OTD(光学瞬变探测仪)和LIS(闪电成像仪)观测的闪电资料给出了中国及周边地区闪电密度的气候分布特征。但这种低轨道卫星装载的闪电探测仪器OTD和LIS的观测范围和观测能力都存在较大制约，对观测范围内的每一地点每天的观测时间都不足91秒，且不能区分云闪与地闪，因此只能提供区域平均意义上的闪电分布信息。目前我国国家地基闪电定位网尚未完全建成，因此尚缺乏中国及周边地区较完整的正、负地闪时空分布特征研究。

虽然国内外进行了较多的闪电时空分布特征研究，但国内对地闪时空分布特征研究多针对某个省或者较小的区域进行，缺少针对我国较大范围区域内不同下垫面的闪电分布特征的对比分析研究，因此分析不同区域闪电时空分布特征的异同是本文的重点之一。

地球静止卫星红外TBB资料具有较高的时、空分辨率和很好的时、空完整性，TBB的统计结果能够较客观、全面地代表强对流天气的气候特征[17]。由于闪电总是伴随强对流天气发生，不同类型的对流系统以及对流系统的不同位置、不同发展阶段正闪和负闪的分布都有所不同[5-6]，因此分析闪电的时空分布特征及其与TBB分布的关系可以加深对闪电活动和对流系统关系的认识。但目前尚缺少综合使用闪电与静止卫星TBB资料来分析强对流时空分布特征的研究，因此本文在分析2007年夏季长江流域及其周边地区正、负云—地闪时空分布特征基础上同静止卫星TBB资料所表征的深对流活动时空特征进行对比分析，以加深对该区域对流活动时空分布的认识。

1　资料和方法

本文所用 2007 年地闪资料主要由中国气象局气象探测中心提供,使用的闪电定位仪为时差测向混合闪电探测仪,其子站探测半径≥300km,探测效率高于 80%,探测精度高于 1km①。整个闪电定位系统由探测子站、中心数据处理站、图形显示工作站、数据库与网络浏览服务器、通讯系统五部分组成。截至 2008 年我国有 232 个时差测向混合闪电探测仪的数据实时传输国家雷电数据处理中心进行定位处理。由于我国的地基闪电监测网尚未完全建成,目前尚无长时间序列闪电资料可用。此外,虽然安徽的闪电定位系统尚未纳入国家闪电监测网,但我们也补充了安徽的资料到气象探测中心提供的闪电定位资料中。对比补充的安徽资料和气象探测中心提供的资料来看,二者具有很好的空间连续性;从安徽闪电资料和 FY-2C 红外云图的天气系统演变来看,二者具有很好的时空一致性(图未给出)。

本文所指的长江流域及其周边区域主要包括四川、重庆、贵州、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海、浙江与福建等省市(25°～38°N、100°～122°E,具体参见图 1a,不包括甘肃与山东)。

为了分析地闪时空分布特征,本文将考察区域划分为 0.25°×0.25°的经纬度网格并统计每个网格内的日平均地闪密度来分析地闪的空间分布。为了分析地闪活动的日变化,本文分别计算了 4 个时段00:00—06:00,06:00—12:00, 12:00—18:00 及 18:00—24:00(北京时,下同)平均的每小时地闪密度分布;同时将计算的每小时地闪密度绘制成日变化曲线及剖面图与 FY-2C *TBB*≤－52℃频率进行对比分析。

本文所用 FY-2C 静止卫星 TBB 资料下载自中国遥感卫星数据服务网(网址:http://satellite.cma.gov.cn),水平分辨率为 0.1°×0.1°。在对静止卫星红外云图处理之前首先通过静止卫星云图处理系统云图动画的方法剔除地理定位有偏差的云图资料。对每一网格点 *TBB*≤－52℃发生频率进行了统计以获取 *TBB*≤－52℃所表征对流活动的时空分布特征。本文也使用了文献[17]所用的 1996—2006 年共 10 年(无 2004 年)的静止卫星 TBB 资料与 2007 年 FY-2C TBB 资料来分析不同地区对流活动日变化气候特征。

由于目前尚没有覆盖全国的较长时间序列的地闪观测资料,为了同较长时间序列的闪电分布特征进行对比,本文也使用了文献[16]所用的 8 年星载观测闪电资料。该资料下载自美国 NASA 的全球水文和气候中心(GHCC)网站,由 5 年 OTD(1995 年 4 月—2000 年 3 月)资料和 5 年 LIS(1998 年 1 月—2002 年 12 月)资料合成,水平分辨率 0.5°×0.5°。OTD 和 LIS 探测的是总闪电,不能区分云闪和云地闪。

需要说明的是,地闪观测资料存在站网探测效率空间分布的影响,距离探测站网越远地闪探测效率越低,因此地闪探测资料具有一定的不确定性。为了考察这种不确定性对本文分析结果的影响,我们把 2007 年地闪的时空分布形态特征同多年星载观测闪电资料、同期常规观测获得的雷暴日分布以及同期 FY-2C 卫星 *TBB*≤－52℃频率时空分布形态特征进行了对比分析,对比分析的结果表明不同资料获得的对流活动地理分布形态和日变化特征具有很大的一致性,因此地闪资料的不确定性对本文的分析结果影响不大。

① 马启明,雷电监测定位系统基本原理讲座,2003 年 2 月

2 地闪空间分布特征

闪电密度分布随地势的不同而有明显差别[3-4,8]。图1a(彩色填充区,见彩页)是2007年6—8月长江流域及其周边地区的日平均总地闪密度分布。图中显示,地闪密度分布显著不均,高值区主要集中在四川东南部与重庆西部交界处、贵州、湖北、江西北部、安徽、浙江、江苏西南部。把地闪密度分布与地势分布对比可以发现:四川盆地、云贵高原中北部、九岭山、罗霄山及武夷山区、浙闽丘陵是地闪密度高值区。这种分布形态与祁秀香等[18]利用卫星资料给出的2007年6—8月$TBB\leqslant-52$℃的频率分布结果(图1a等值线)、同期雷暴日分布(图1b,见彩页)及马明等[16]获得的闪电分布(图1c,见彩页)特征具有相当大的一致性,但在一些地区也存在显著差异,下面进行具体说明。

图1a中灰色等值线为2007年6—8月FY-2C静止地球卫星$TBB\leqslant-52$℃的频率分布,图1b为由常规气象观测获得的同期雷暴日分布。可以看出,川渝交界处、贵州、安徽、江苏的地闪分布与$TBB\leqslant-52$℃的频率和雷暴日分布较为一致,但其他一些区域存在较大差异。鄂西山地、鄂东北低山丘陵的交界区域及鄂东南低山丘陵区、江汉平原、浙江东部是高地闪密度和多雷暴日区域,但$TBB\leqslant-52$℃的频率却较低;川西高原、重庆北部、湖南南部、福建北部的地闪密度较小却对应$TBB\leqslant-52$℃的高频区和多雷暴日区。TBB的数值大小通常定量地反映大气中对流活动的强弱,$TBB\leqslant-52$℃反映的是大气中的深对流活动,且低TBB有时仅反映高云的特征,不一定与强对流和强降水区相对应[17],所以并非所有低TBB区都对应较高的闪电次数。此外,由于闪电分布在对流系统的不同阶段和不同位置都有所不同[6],也可能由于部分热对流活动中闪电较活跃[1],但由于其尺度较小而TBB高于-52℃,从而导致$TBB\leqslant-52$℃的统计结果不同于地闪密度的分布。

图1c是多年星载闪电探测仪的观测结果。由于地闪密度单位不同于多年星载闪电探测仪的探测闪电密度单位,而且二者的观测方式也不同,因此我们将二者进行地理分布形态比较(图1a彩色填充区与图1c)。2007年夏季地闪分布具有如下特点:川渝交界区域、江淮流域等地区的地闪分布相对于其周边区域比多年星载观测的闪电活跃;鄂东南低山丘陵、武夷山中段的地闪较多年平均活跃;江西北部与贵州2007年夏季闪电活动同多年平均类似,都较活跃;但江西中部闪电活动较多年平均来看较不活跃,贵州闪电活跃区较多年平均偏西。上述地理分布特征可能与2007年夏季的大尺度环流背景[18]及川渝、江淮流域等地中尺度对流系统频发②有关,但图1c是低轨卫星观测的年闪电平均密度,而图1a仅仅是2007年夏季的地闪密度分布,且星载闪电探测仪的观测方式与地闪不同,前者为天基观测且包含云闪,所以二者的差异也与这些因素有关。

需要指出的是,已有文献中[8-9,19]给出北京、兰州、山东地区负闪比例分别为87.76%、84.74%、84.3%。本文的统计结果为整个区域中负地闪比例约为96%,同美国夏季的负地闪比例相当[1-3],高于北京、兰州、山东等地区,根据相关文献[20],台湾地区局地热对流系统中负地闪比例与此相当,因此这可能表明2007年夏季长江流域及其周边地区的局地热对流也比较活跃。

由于负地闪占总地闪的绝大多数,负地

② 祁秀香,郑永光,2007年夏季川渝与淮河流域及周边区域中尺度对流系统普查,气象投稿

闪密度的地理分布特征(图未给出)与总地闪基本一致。正地闪与总地闪地理分布也基本一致(图 1d,见彩页),但其活跃区比负地闪更为分散,空间尺度也较小。负地闪密度较高的九岭山与鄱阳湖平原的交界地区、江西中东部山地与丘陵地区、福建西南部地区正地闪密度相对较低,这表明较低海拔地区的山区中正地闪比例较低,可能局地热对流较活跃[20];成都的东北侧、洪泽湖以东区域正地闪密度较大,贵州正地闪密度高值区域范围分布较广;川西高原总地闪密度很低,但正地闪密度与其他地区平均相当,因此该区域正地闪比例相对较高。

从地面常规观测来看,无论是气候平均[21]还是 2007 年的实况观测(图未给出),川西高原都是冰雹天气较多的区域,由于冰雹天气过程的正地闪比例较高[22],因此该地区较高的正地闪比例可能与冰雹天气有关;但郄秀书等[7]也发现内陆高原地区的弱雷暴过程通常也存在较高的正地闪发生比例,因此该地区较高的正地闪比例也可能与该地区的弱雷暴过程有关。需要指出的是,高原地区较少的总闪电分布可能与高原上积雨云垂直厚度小、云内液态水含量少有关[23]。

总之,2007 年夏季长江流域及其周边地区的地闪空间分布形态与雷暴日分布、$TBB \leqslant -52$℃的频率分布具有相当大的一致性。但是,2007 年夏季江淮流域、川渝交界处、浙江西北、武夷山中段的地闪分布相对于其周边区域比多年星载观测的闪电分布显著活跃。此外,2007 年夏季江西西北部和中东部、福建西南部的负地闪密度较大而正地闪密度相对较低,而洪泽湖以东区域、成都东北侧地区、川西高原等地区正地闪密度相对较高。

3　地闪月际和日际变化

3.1　地闪月际变化

图 2(见彩页)是 2007 年 6—8 月长江流域及周边地区地闪密度的月变化分布。地闪活动具有显著的月变化特征,负地闪与正地闪月变化基本一致,7、8 月地闪明显比 6 月活跃且活跃区偏北,8 月地闪活跃区较 7 月分散。结合大气环流背景来看,受东亚夏季风影响,7、8 月暖湿空气比 6 月更活跃、更偏北[24],因此 7、8 月地闪活动明显较 6 月活跃且活跃区偏北这种特征与东亚夏季风活动密切相关。

同星载观测闪电密度(图略)时空分布特征形态进行比较发现:川渝交界处相对于其周边区域的地闪 6—8 月均比多年星载观测的闪电活跃且活跃区范围较大,对应于较高的 $TBB \leqslant -52$℃频率;安徽、洪泽湖和南京周边地区、浙江北部的地闪 7 月活跃、$TBB \leqslant -52$℃频率较高,这正对应于 7 月江淮流域的强暴雨事件;8 月湖北东南部的地闪比多年星载观测的闪电活跃,但 $TBB \leqslant -52$℃频率并不太高。上述区域各月的地闪分布基本上反映了 2007 年重庆暴雨、江淮流域暴雨等强对流天气的分布特征。

图 2a、2c、2e 分别为 6、7、8 月负地闪密度分布。6 月,负地闪集中在四川东南与重庆西部的交界处、贵州西部、江西北部、浙江沿海。7 月,负地闪活跃区北进至 35°N 以北,川渝交界处的负地闪活动范围扩大,贵州的负地闪活跃区移至东北部,湖北中部及东南部负地闪活动增多,江西负地闪仍很活跃,浙江负地闪活跃区扩展到全省,安徽、江苏西南部负地闪活动密集。8 月,负地闪活跃区略向南移,湖北中部和东南部、湖南东北部负地闪活动增多,江浙、川滇渝的负地闪活动相对 7 月减少且较分散。闽赣两省的负地闪月变化不明显。

整体来看 7 月正地闪密度分布(见彩图 2b、2d、2f)明显高于 6、8 月。川渝地区正地闪只有 7 月较活跃,6、8 月活动均较少;江西东北部与武夷山交界处的正地闪 7 月较活跃

而6、8月活动很少；湖北、安徽、江苏、贵州正地闪月变化与负地闪基本一致；但是川东南、赣西北的正地闪月变化特征不同于负地闪。

正地闪经常发生在对流云的消散阶段和中尺度的层状云区(对流系统的云砧部分)，但一些雹暴和内陆高原的弱雷暴中正地闪也可能占有很大比例[7,22]。对2007年7月FY-2C红外云图普查发现该区域有较多中尺度对流系统发生发展②，$TBB\leqslant-52$℃频率高，但从常规地面观测和重要天气报告来看长江中下游区域冰雹天气较少、川西高原和云贵高原有较多冰雹天气，因此7月较高的正地闪分布可能更大程度上反映的是长江中下游区域较多的中尺度对流系统活动和西南地区高原上较多的冰雹和弱雷暴天气，但从后文(4.2节)的日变化分析来看较高的正地闪分布主要由中尺度对流系统活动产生。

对比 $TBB\leqslant-52$℃频率，6、7月地闪高密度区域与 $TBB\leqslant-52$℃高频区有较好的对应关系，但8月虽然 $TBB\leqslant-52$℃频率较低，但浙江、江淮流域负地闪仍然较活跃，而正地闪显著比7月减弱。8月浙江、江淮流域主要受西太平洋副热带高压天气系统控制[23]，$TBB\leqslant-52$℃频率低于6、7月，这些区域多热对流活动而有组织的中尺度对流系统较不活跃，由于局地热对流系统负地闪发生比例较高[20]，因此8月地闪活跃区较7月分散且负地闪比例较高，这也表明地闪活动与中尺度对流系统演变密切相关。

3.2 地闪日际变化

图3(见彩页)给出了整个区域平均的总地闪和正地闪密度日际变化曲线以及沿纬向平均的总地闪和正地闪密度时间—纬度剖面图。图3表明总地闪和正地闪密度具有较为一致的日际变化，地闪活动具有明显的间歇性、波动性特征，6月地闪活跃区偏南，主要位于30°N以南，7月地闪活动北进到38°N以北，8月地闪活动有所南退。地闪活动的这种日际变化同FY-2C $TBB\leqslant-52$℃频率[18]具有相当好的一致性，这也表明2007年的地闪探测资料虽然具有一定的不确定性，但具有很好的稳定性和可用性。

图3还表明2007年夏季该区域地闪活动的活跃时段主要在6月17日到8月10日，8月下旬又出现一个地闪活跃时段，6月上、中旬和8月中旬地闪活动较不活跃，尤其6月中旬和8月中旬地闪最不活跃，是持续时间较长的闪电活动静寂期，类似于相关文献中的黄海地区持续4～7天的MCS静寂期[25]。如前所述，地闪活动的这种日际变化与大气环流密切相关，东亚夏季风北进、副热带高压的北跳和北方冷空气活动等直接决定了地闪活跃区域和时段的变化。

图3a表明不同月份正负地闪比例显著不同，7月正闪最为活跃，6月正闪较为活跃、正闪比例较高，8月正闪比例最小。如3.1节所述，7月较高的正地闪分布反映的是长江中下游区域较多的中尺度对流系统活动和西南地区高原上较多的冰雹和弱雷暴天气。由于6月正地闪主要发生在西南地区的云贵高原(图2b)，从常规地面观测和重要天气报告来看该区域6月也有较多的冰雹和雷暴天气，因此6月较高的正地闪比例可能与该区域的冰雹和弱雷暴天气过程有关。8月长江流域及周边地区主要受热带季风气团控制[23]，大气暖湿且不稳定，容易发生局地热对流，由于局地热对流负地闪比例较高[20]，因此8月正闪比例最低。

4 地闪的日变化特征

不同下垫面的地闪具有不同的日变化特征[1,8,10,26]。本文通过分析不同区域地闪的日变化、沿不同经线与不同纬线的地闪日变化以及 $TBB\leqslant-52$℃频率日变化来展示

2007 年夏季长江流域及周边地区中不同区域地闪活动日变化特征的异同。

4.1　不同时段地闪空间分布

图 4(见彩页)分别给出了 2007 年夏季长江流域及周边地区 4 个时段(北京时 00—06 时,06—12 时,12—18 时,18—24 时)的地闪空间分布。浙江、江西、福建闪电活跃区(见图 4a)四个时段的地闪活动变化显著,凌晨后(00—06 时)和上午时段(06—12 时)地闪活动不活跃,午后(12—18 时)地闪活动显著增多,傍晚至午夜(18—24 时)减少。这些区域的闪电活动与热对流活动关系密切,因为热对流活动在下午时段最活跃[17]。

江淮流域、湖北闪电活跃区(见图 4a)四个时段均有一定密度的地闪活动,其中湖北东南部(与江西交界处)的地闪活动特征与浙赣闽类似;湖北中部凌晨后有少量地闪活动,上午地闪最不活跃,午后、傍晚至午夜地闪都较活跃;江淮流域凌晨以后地闪仍较活跃,上午最不活跃,而下午地闪最活跃,傍晚后有所减少,这种凌晨后较活跃的地闪活动与具有夜发性特征的 α 中尺度对流系统密切相关[17]。

川渝交界处及其周边区域是地闪活跃区之一(见图 4a),具有较为突出的凌晨地闪最活跃的特征,这与该区域 $TBB\leqslant-52$℃频率高频时段具有夜发性特征相一致[17-18]。

贵州也是闪电较集中的地区(见图 4a),凌晨以后贵州西南部地闪较活跃,上午时段地闪最不活跃,地闪午后开始活跃并覆盖全省,傍晚至午夜最活跃。

总之,浙赣闽地区地闪活跃时段在下午;江淮流域四个时段地闪活动都较活跃,但下午最为活跃;而川渝地区地闪凌晨前后最活跃,下午次之;贵州地闪下午和晚上都较活跃。地闪活动的这些日变化特征与 $TBB\leqslant-52$℃频率的日变化特征[17-18]基本一致。但四个时段只大体上显示了不同区域地闪的日变化特征,因此下面将详细分析不同区域地闪活动的日变化特征。

4.2　不同区域地闪日变化特征

图 5a 与图 5b(见彩页)分别给出长江流域及周边地区整个区域(25°～38°N,100°～122°E)和江淮流域 (30.5°～34.1°N,115.4°～120.5°E)、浙赣闽(26°～29.6°N,115°～120.1°E)、川渝地区(28.9°～32.5°N,104.3°～109.4°E)、贵州(25°～28.6°N,103.6°～108.7°E)等 4 个地闪活跃区(见图 5a)的平均地闪密度和 $TBB\leqslant-52$℃频率日变化时间曲线。由于这些区域中总地闪中负地闪占大多数,达 90%以上,负地闪与总地闪日变化特征几乎完全相同,总地闪日变化完全可以表征负地闪日变化特征,因此图中未给出负地闪日变化曲线。由于川西高原区域(27.7°～32.9°N,100°～102°E)是 $TBB\leqslant-52$℃高频区和多雷暴日区,但闪电活动较不活跃,正地闪比例却较高,因此图 5c 给出了川西高原区域负地闪、正地闪密度和 $TBB\leqslant-52$℃频率日变化时间曲线以考察该区域闪电日变化等其他区域的异同。

图 5a 表明从整个长江流域及周边地区(25°～38°N,100°～122°E)来看,虽然正地闪仅仅是总地闪中的很小一部分,但正地闪与总地闪(或负地闪)随时间变化趋势基本一致,不过正地闪密度峰值显著滞后于负地闪 1～2 个小时,这与正地闪多发生在中尺度对流系统的消亡阶段有关[8]。虽然雹暴和内陆高原地区弱雷暴中也有较多正地闪活动[7,22],但正地闪多发生在这些类型对流活动的发展和活跃阶段[7,22],因此这也从另一个侧面说明3.1节中讨论的 7 月该区域较高密度的正地闪分布主要是由中尺度对流系统活动产生。

图 5a 中纬向平均时间-纬度剖面不仅表

明正地闪具有与负地闪较一致的日变化特征，还显示出了不同纬度区域地闪密度的高低和日变化特征的异同。从地闪活动的高峰时段来看，最活跃的地闪活动发生在大约27°～29°N区域，次活跃区位于大约30°～32°N区域；25°～28°N区域地闪日变化呈现为单峰型特征，28°～34°N区域地闪日变化呈现出多峰型特征，但主要活跃时段都在下午。不过纬向平均的地闪日变化特征不能表征不同下垫面区域地闪活动的独特日变化特征。

图5b和图5c(见彩页)分别给出了5个对流活跃区闪电和 $TBB\leqslant-52$℃频率日变化曲线，结果表明这5个区域的闪电密度大小和日变化特征各不相同。从地闪峰值密度来看，浙赣闽区域闪电最活跃，其次为江淮区域，再次为贵州区域，再次为川渝交界区域，最不活跃的区域为川西高原区域。从正地闪所占总地闪比例来看，浙赣闽地区的正地闪比例相对较低，只占总地闪的2.2%，云贵高原的约为3.2%，江淮流域和川渝地区的为3.4%左右，川西高原的正地闪比例高达10.6%。

图5b和图5c表明虽然2007年夏季 $TBB\leqslant-52$℃频率的数值不同于11年夏季平均 $TBB\leqslant-52$℃频率，但二者分布形态和变化趋势却较为一致，这说明仅使用1年夏季的TBB资料分析对流活动的气候特征虽然具有一定的偶然性但仍能够在相当程度上说明 $TBB\leqslant-52$℃频率的气候分布特征；从2007年夏季负地闪(或总地闪)密度和正地闪密度的日变化来看，具有与 $TBB\leqslant-52$℃频率较为一致的日变化形态和趋势，尤其是正地闪密度的日变化与 $TBB\leqslant-52$℃频率日变化形态更为接近；因此仅使用2007年夏季的地闪资料来分析地闪的日变化特征虽然具有一定的偶然性，但从以上两点的分析可以表明2007年夏季地闪的日变化特征在相当程度上能够表征这些区域的地闪日变化气候特征，同时这也说明2007年的地闪探测资料虽然具有一定的不确定性，但具有很好的稳定性和可用性(如3.2节的分析)。

这几个区域地闪日变化特征有以下特点：① 江淮流域与川渝地区的地闪活动活跃时段呈现为多峰型特征，浙闽赣区域、贵州区域和川西高原地闪活跃时段为单峰特征。② 不同区域地闪活跃时段有所不同，江淮流域、浙闽赣区域、贵州与川西高原高峰时段在下午，川渝地区在午夜。③ 从地闪的不活跃时段来看，江淮流域、浙闽赣区域、贵州与川西高原的最不活跃时段在10—12时，川渝地区存在两个不活跃时段分别是10时和17时。④ 从日变化的振幅来看，浙闽赣区域振幅最大，其次为江淮流域，再次为贵州，再次为川渝地区，最小振幅为川西高原。⑤ 正地闪日变化分布基本与负地闪相同，其活跃时段比负地闪有所滞后，但不同区域滞后时间不同：浙闽赣区域和川西高原区域正负地闪峰值时段基本相同；江淮流域正地闪下午主峰约滞后1小时、午夜后次峰约滞后2小时；川渝地区正地闪午夜后主峰约滞后2小时、但下午次峰正负地闪基本一致；贵州地区的正、负地闪变化趋势差异较大，傍晚后负地闪显著减弱但正地闪和 $TBB\leqslant-52$℃频率却持续活跃到24时之后。⑥ $TBB\leqslant-52$℃频率与正负地闪日变化趋势基本一致，尤其与正地闪日变化趋势更为接近，但 $TBB\leqslant-52$℃频率峰值时段比正地闪活跃时段滞后约2～4小时。

4.3 沿不同经度地闪日变化特征

为了更具体地展示2007年夏季长江流域及周边地区地闪日变化和传播特征，本文选取105°E、115°E、119°E三条分别通过地闪活跃区的经线，将正、负地闪密度及 $TBB\leqslant-52$℃频率沿三条经线分别做时间-纬度剖面图，如图6(见彩页)。篇幅所限，图6只给出了105°E与

119°E两条经线的时间-纬度剖面图。

105°E经线经过云贵高原中部、四川盆地中部、甘肃等地区(图 6a、b)。云贵高原中部(25°～28°N)地闪日变化显著,午后、凌晨后分别是负地闪活动的高峰期、次高峰期,凌晨前有所减少。四川盆地(29°～32°N)地闪日变化具有显著的夜发性和多峰现象,22—04 时是地闪活动的高峰时段,次高峰时段出现在午后 14—18 时。

115°E 经线涵盖了江西、湖北、河南等省(图未给出)。该经线上显示出江西、湖北两省地闪日变化特征明显不同。30°N 以南多山地和丘陵(鄂东南低山丘陵区和江西的幕阜山、罗霄山及江南丘陵)分布,地闪日变化具有明显的单峰特征,中午 12—13 时左右开始活跃,一直持续到 20 时。江汉平原东部(30°～31°N)的地闪活跃时段具有多峰型特征,午后 14—17 时地闪最活跃,19 时又再度活跃持续到 22 时减到最弱,04—08 时地闪再度活跃。

119°E 经线通过福建西部、浙江东部、江苏、山东半岛等地区(图 6c、d)。该经线上地闪日变化一个突出特征是浙闽地闪活动的单峰现象,浙闽丘陵(25°～30°N)地闪活跃期在下午,正如图 5b 所示单峰特征尤其明显,说明该地区产生地闪的雷暴具有明显的午后热对流性质。江淮平原(31°～34°N)地闪活跃时段的多峰型特征是该经线上又一显著特点,淮河以南地区午后地闪开始活动,持续到傍晚(长江流域活跃时间持续更长)后减少,凌晨再度活跃一直持续到 10 时;而淮河及以北地区凌晨到 10 时地闪较活跃,下午相对较不活跃。

图 6b、d 为 105°E 和 119°E 经线上正地闪日变化特征。正地闪日变化分布比负地闪较为分散。图 6b 与图 6d 作对比,贵州西部(25°～27°N)正地闪比例相对较高,负地闪在凌晨减弱时正地闪仍较活跃;川黔滇交界区域(27.5°～29°N)负地闪较不活跃持续时间短,正地闪傍晚很活跃凌晨前后不活跃而 $TBB\leqslant-52$℃的高频期在午夜前后;湖北地区正地闪日变化的多峰特征比负地闪更明显(图略)。对比图 6c 和图 6d,浙闽丘陵地区(25°～31°N),特别是福建(25°～28°N)、浙江西北部(29°～30°N)、安徽东南部(30°～31°N),下午时段是 $TBB\leqslant-52$℃的高频期,负地闪很活跃但正地闪相对不活跃,这种负地闪分布特征正如同台湾地区局地热对流中具有较高比例的负地闪分布[20],由于浙闽丘陵地区夏季较多热对流活动而较少较大尺度的中尺度对流系统活动②,因此这也表明浙闽丘陵地区夏季尺度较小的热对流活动中负地闪较活跃、正地闪较不活跃。正地闪日变化同样具有单峰特征但正地闪活跃的开始时刻比负地闪约滞后 2 个小时,活跃时段持续时间短,减弱也比负地闪缓慢,江西山区的正地闪日变化也呈现出类似特征(图略);32°N 附近、淮河及以北地区(33°～34°N)正地闪较活跃且多峰特征较负地闪显著。正、负地闪的这种日变化差异反映了该区域中只有当午后的对流系统发展到成熟阶段后才发生较多正地闪[4]。

对比正、负地闪密度与 $TBB\leqslant-52$℃的频率日变化特征(图 6 中彩色填充区和灰色实线)可见正、负地闪与 $TBB\leqslant-52$℃频率日变化特征具有相当的一致性,但如前所述,正负地闪活跃时段比 $TBB\leqslant-52$℃频率的活跃时段提前,但正地闪与 $TBB\leqslant-52$℃频率的活跃时段更为接近。由于负地闪在深对流活动的初始发展阶段就较活跃,而在深对流发展成熟阶段及消散阶段时负地闪减少、正地闪较活跃[4],因此负地闪的高峰时段比正地闪和 $TBB\leqslant-52$℃频率都有提前,从而正地闪和 $TBB\leqslant-52$℃频率较好地反映了成熟与消散阶段的深对流日变化特征,负地闪则较好地反映出了初始发展阶段深对流的

日变化特征。

从对流活动的传播特征来看，105°E经线25°～31°N区域内对流活动有从27°N附近区域向北和向南传播的特征（如图6a、b中红色划线所示），其中27°～31°N区域正、负地闪向北传播特征显著，而25°～27°N区域负地闪从27°N区域向南传播特征不如正地闪显著。115°E与119°E经线对流活动传播特征不显著。

4.4 沿不同纬度地闪日变化特征

沿纬线的地闪密度和 $TBB \leqslant -52$℃频率时间-经度剖面图可以进一步显示不同地势分布区域的地闪日变化特征、地闪分布与静止卫星红外亮温的关系、对流活动沿纬向的传播特征等（图7，见彩页）。

29°N纬线（图7a）经过四川、重庆、湖南、江西和浙江省，所经之处涵盖了不同的地势分布区域（四川盆地，西南—东北走向的大娄山、武陵山、幕阜山、九岭山，浙闽丘陵，洞庭湖和鄱阳湖平原），因此能反映不同地势分布区域地闪日变化及传播特征。图7a显示，该纬线上地闪日变化呈现出4个显著特点：① 四川盆地南部（103°～109°E）地闪日变化具有明显的夜发性和多峰型特征（与图6a一致），凌晨和下午分别是地闪活动的高峰和次高峰期。值得注意的是，四川盆地的负地闪午夜活跃，并在其减少的过程中沿着该纬线向东传播（图7a、b红色划线所示）。② 同4.3节所述，江西山区（114°～116°E）和浙闽丘陵（117°E以东）的地闪日变化都表现出明显的单峰型现象。③ 洞庭湖平原（112°～113°E）和鄱阳湖平原（116°～117°E）地闪与周围山区相比较不活跃，地闪日变化呈现多峰型特征。④ 116°～122°E区域对流活动呈现出典型的波动状分布和向东传播特征。

32°N纬线（图未给出）涵盖了四川盆地北部、湖北、江淮平原等区域。江汉平原北部（112°～115°E）和江淮流域平原（119°～122°E）的地闪日变化具有多峰型特征，下午是地闪活跃期，凌晨以后仍有地闪活动。该纬线上四川盆地北部（105°～108°E）与大巴山交界处地闪日变化东传特征不显著，地闪较不活跃但仍有一定的夜发性特征，01—07时是活跃时段。

图7b给出29°N纬线上正地闪的日变化特征，川西高原（103°E以西）突出的特点是正地闪比例显著高于其他区域，下午是正地闪的活跃期，负地闪密度较小且日变化不明显。四川盆地南部正地闪日变化有类似负地闪的东传现象，但不如负地闪显著。赣浙山地丘陵（114°E以东）的正地闪比例较低（与4.3节结论一致），但浙江沿海地区（120°～121°E）的正地闪下午和凌晨都很活跃，下午开始时间较负地闪早且持续时间长。沿28°N、30°N纬线的时间-经度剖面图（图略）也显示出温州、宁波沿海地区的正地闪较活跃且持续时间长，同时在这些沿海地区 $TBB \leqslant -52$℃的活跃时段也较长，而31°～34°N江淮平原沿海地区的正、负地闪日变化未表现出上述特征。32°N纬线上（图略），四川盆地北部地区（105°～108°E）正地闪比例相对较高，05—08时较活跃。

对比图7a、b的彩色填充区及灰色实线，正、负地闪与 $TBB \leqslant -52$℃的频率的日变化趋势与4.3节结论基本一致。

5 结论和讨论

本文利用2007年夏季我国长江流域及周边地区的云—地闪资料较全面地分析了该区域闪电活动的时空分布特征，并与同期雷暴日分布、FY-2C红外 $TBB \leqslant -52$℃频率分布以及低轨卫星观测的8年闪电的空间分布和11年平均 $TBB \leqslant -52$℃频率日变化特征进行了比较，结果表明不同资料获得对流活

动时空分布具有很大的一致性,因此这也说明 2007 年的地闪探测资料虽然具有一定的不确定性,但具有很好的稳定性和可用性,能够在相当程度上表征该区域地闪活动时空分布的气候特征。本文主要得到如下一些结论:

(1) 2007 年夏季江淮流域、川渝交界处、浙西北、武夷山中段的地闪活动较这些区域的周边区域分布来看明显比多年星载观测闪电活跃。2007 年夏季长江流域及周边地区负地闪比例高于文献中统计的其他地区负地闪比例,川西高原地区虽然闪电较不活跃但正地闪比例较高。

(2) 2007 年夏季该区域地闪活动具有显著的间歇性和波动性,7、8 月较 6 月活跃且活跃区位置偏北,而正地闪 7 月最活跃。7 月活跃的正地闪和正闪日变化峰值滞后于负地闪反映了该月长江中下游区域较多的中尺度对流系统活动,8 月活跃的负地闪和较低的正地闪比例反映了该月局地热对流比较活跃。地闪活动的月变化特征与大气环流以及天气系统的演变密切相关。

(3) 不同区域的地闪日变化显著不同。四川盆地、江淮流域的负地闪日变化呈现出多峰型特征,正地闪日变化的多峰特征更明显;江汉和江淮平原、四川盆地的负地闪日变化分别表现为午后和午夜较活跃的特点,四川盆地西南部地闪具有显著的东传和北传特点。浙赣闽、贵州和川西高原地闪日变化具有明显的单峰型特征。贵州地区入夜后地闪活动显著比其他区域活跃,入夜后负地闪活动虽有所减弱但正地闪却持续活跃。

(4) 正、负地闪与 $TBB \leqslant -52$℃频率具有较为一致的日变化特征。浙赣闽区域和川西高原地区正负地闪活跃时段基本一致,江淮流域、川渝地区、和贵州地区负地闪活跃时段提前于正地闪,这几个区域的 $TBB \leqslant -52$℃频率高峰时段都滞后于负地闪和正地闪。虽然雹暴和内陆高原的弱雷暴在初始发展阶段正地闪也较活跃,但大多数对流活动初始阶段负地闪较活跃、成熟与消散阶段正地闪较活跃,因此本文的结果表明负地闪日变化特征较好地反映了初始深对流的日变化特征,而正地闪与 $TBB \leqslant -52$℃频率则较好地反映了成熟与消散阶段的深对流日变化特征。

地闪时空分布特征不仅受大气环流背景与天气系统的影响,同时也与局地地形、水系分布、对流系统的不同发展阶段、对流系统云砧分布等因素密切相关。但需要说明的是,本文没有针对地闪活动的机理进行深入的分析,今后我们将针对不同区域、不同类型的强对流天气选择一些典型个例联合使用卫星、雷达、闪电和数值模式的模拟结果对地闪活动的机理进行更深入分析。

致谢:感谢国家气象中心周兵博士提供 2007 年中国气象局气象探测中心的地闪观测资料。

参考文献

[1] Reap R M, and MacGorman D R. Cloud-to-ground lightning climatological characteristics and relationships to motion fields, radar observations, and severe local storms[J]. Mon Wea Rev, 1989, 117(3): 518-535.

[2] Orville R E and Silver A C. Lightning ground flash density in the contiguous United States: 1992, 95. Mon Wea Rev, 1997, 125(4): 631-638.

[3] Orville R E and Huffines G R, Cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN results in the first decade, 1989 - 98[J]. Mon. Wea. Rev., 2001, 129(5): 1179-1193.

[4] Orville R E, Huffines G R, Burrows W R, et al. The North American lightning detection network (NALDN)-first results: 1998 - 2000[J]. Mon. Wea. Rev., 2002, 130(8): 2098-2109.

[5] Goodman S J, and MacGorman D R. Cloud-to-ground lightning activity in mesoscale convective complexes[J]. Mon Wea Rev, 1986, 114(12): 2320-2328.

[6] Rutledge S A and MacGorman D R. Cloud-to-ground

lightning activity in the 10－11 June 1985 mesoscale convective system observed during the Oklahoma-Kansas PRE-STORM project[J]. Mon Wea Rev, 1988(7), 116: 1393-1408.

[7] 郄秀书,郭昌明,刘欣生. 北京与兰州地区的地闪特征[J]. 高原气象,1990,9(4):388-394.

[8] 陶祖钰,赵昕奕. 京津冀地区闪电的气候分析[J]. 气象学报,1993,51(3):325-332.

[9] 李照荣,陈天宇,等. 兰州周边地闪分布特征[J]. 干旱气象,2004,22(2):45-51.

[10] 郑栋,孟青,吕伟涛,等. 北京及周边地区夏季地闪活动时空特征分析[J]. 应用气象学报,2005,16(5):80-86.

[11] 冯桂力,边道相,刘洪鹏,等. 冰雹云形成发展与闪电演变特征分析[J]. 气象,2001,27(3), 33-37.

[12] 蔡晓云, 宛霞, 郭虎. 北京地区对流云天气闪电特征及短时预报, 气象,2003,29(8), 16-21.

[13] 尹承美, 卓鸿, 胡鹏,等. FY-2产品在济南"7.18"大暴雨临近预报中的应用[J]. 气象,2008,34(1):27-34.

[14] 郑媛媛, 张小玲, 朱红芳,等. 2007年7月8日特大暴雨过程的中尺度特征[J]. 气象,2009,35(2):1-7.

[15] 易笑园,宫全胜, 李培彦,等. 华北飑线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系及预警指标[J]. 气象,2009,35(2):34-40.

[16] 马明,陶善昌,祝宝友,等. 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,2004,34(4):298-306.

[17] 郑永光,陈炯,朱佩君. 中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征[J]. 科学通报,2008,53(4):471-481.

[18] 祁秀香,郑永光. 2007年夏季深对流云时空分布[J]. 应用气象学报,待发表.

[19] 冯桂力,陈文选,刘诗军,等. 山东地区闪电的特征分析[J]. 应用气象学报,2002,13(3):347-355.

[20] 谭振威. 台湾地区闪电与降水的分类及其气候特征[D]. 国立中央大学大气物理研究所硕士论文,2006,P25.

[21] 张家诚, 林之光. 中国气候[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 411-436.

[22] 冯桂力,郄秀书, 袁铁, 等. 雹暴的闪电活动特征与降水结构研究[J]. 中国科学D辑地球科学,2007,37(1):123-132.

[23] 邹进上, 江静, 王梅华. 高空气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1990. 296-299.

[24] 郑永光, 张春喜, 陈炯, 等. 用NCEP资料分析华北暖季对流性天气的气候背景[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(5): 600-608.

[25] Zheng Y G, Tao Z Y, Wang H Q, et al. Environment of meso-α scale convective system development in Yellow Sea region[J]. Prog Nat Sci, 1999, 9(7), 842-848

[26] Lopez R E, and Holle R L. Diurnal and spatial variability of lightning activity in northeastern Colorado and central Florida during the summer[J]. Mon Wea Rev,1986(7), 114: 1288-1312.

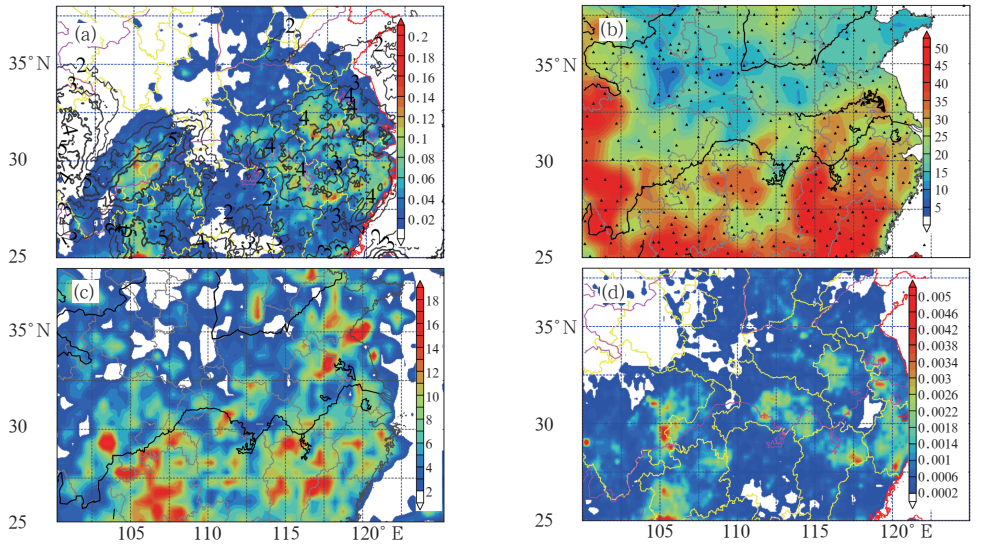


图 1 (a) 2007年6—8月日平均总地闪密度分布(单位：闪/km²/d,彩色填充区)与*TBB*≤−52℃频率分布(单位：%，黑色实线由细到粗表示频率由低到高)；(b) 2007年6—8月雷暴日分布(单位：d，黑色三角为气象测站位置)；(c) 8年低轨卫星观测的闪电密度分布(单位：闪 · a^{-1} · km^{-2})；(d) 正地闪密度分布(单位：闪/km²/d)

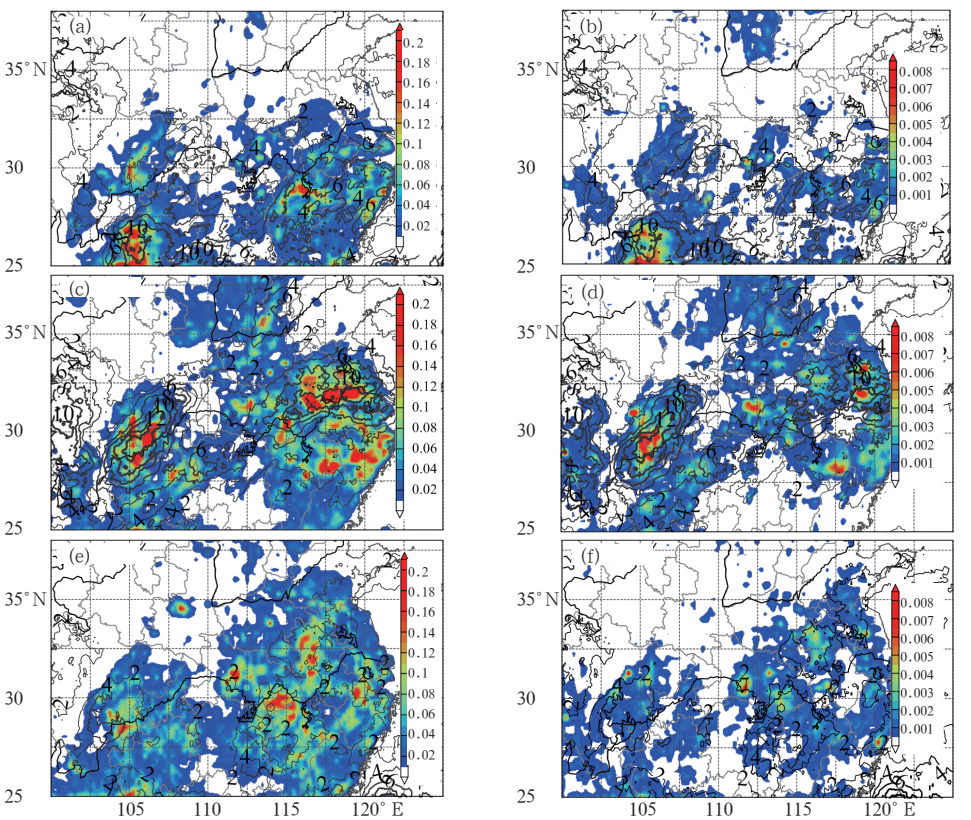


图 2 月际日平均地闪密度分布(单位：闪/km²/d，彩色填充区)与*TBB*≤−52℃频率分布(单位：%，黑色实线由细到粗表示频率由低到高)

(a) 6月负地闪；(b) 6月正地闪；(c) 7月负地闪；(d) 7月正地闪；(e) 8月负地闪；(f) 8月正地闪

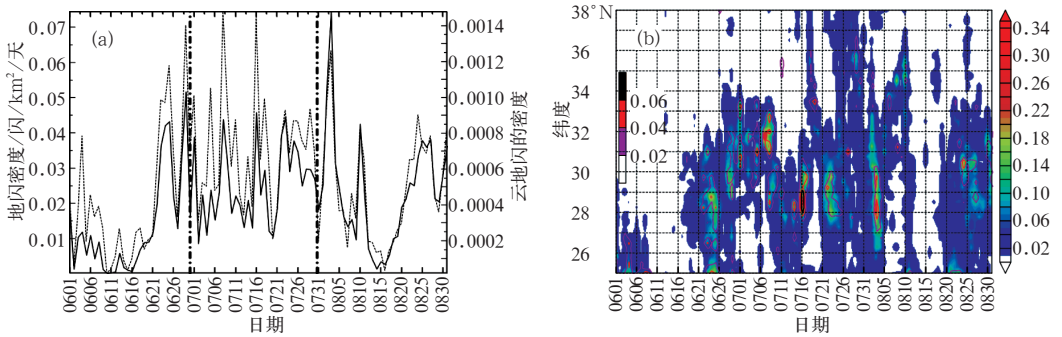


图 3 区域平均地闪密度日际变化（单位：闪/km²/d）
(a) 整个区域平均的地闪密度日际变化曲线（实线为总地闪密度，虚线为正地闪密度）；(b) 沿纬向平均的地闪密度日际变化剖面图（彩色填充区为总地闪密度，颜色条位于右侧；等值线为正地闪密度，颜色条位于左侧）

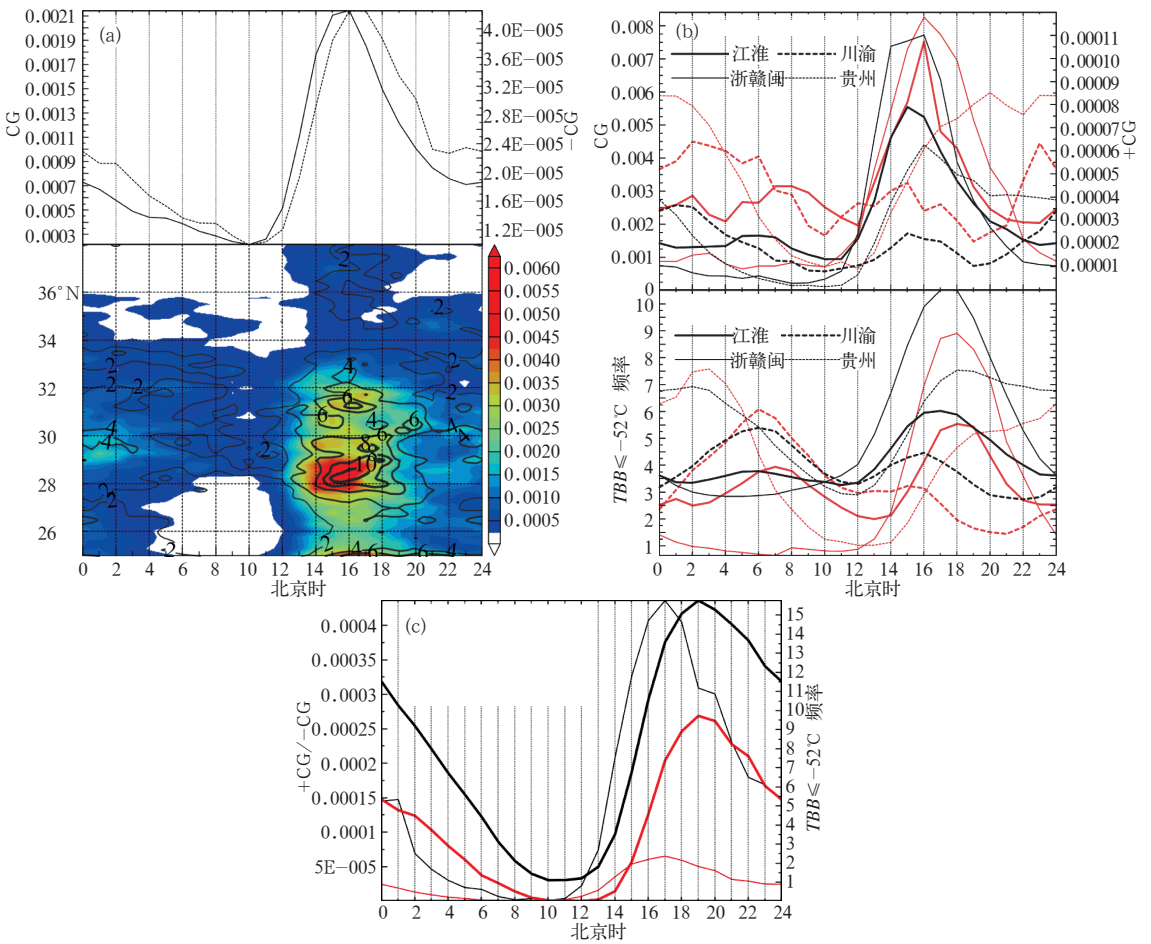


图 5 不同区域平均的小时地闪密度的日变化和*TBB*≤−52℃频率日变化
(a) 上图为整个区域平均的地闪密度日变化曲线（单位：闪/km²/h，实线为小时总地闪密度，点线为小时正地闪密度）；下图为沿纬向平均的地闪密度日变化（彩色填充区为小时总地闪密度，单位：闪/km²/h；黑色等值线为小时正地闪密度，单位：10^{-5}闪/km²/h）；(b)不同地区小时地闪密度(单位：闪/km²/h，黑色线为小时总地闪密度，红色线为小时正地闪密度）和*TBB*≤−52℃频率日变化（单位：%，黑色线1996−2007年（无2004年）6−8月平均的*TBB*≤−52℃频率日变化曲线，红色线为2007年6−8月平均的*TBB*≤−52℃频率日变化曲线），其中粗实线为江淮地区、粗划线为川渝地区、细实线为浙赣闽地区，细划线为贵州地区；(c) 川西高原小时地闪密度(单位：闪/km²/h，黑色细实线为小时负地闪密度；红色细实线为小时正地闪密度)和*TBB*≤−52℃频率日变化(单位：%，黑色粗实线1996−2007年（无2004年）6−8月平均的*TBB*≤−52℃频率日变化曲线，红色粗实线为2007年6−8月平均的*TBB*≤−52℃频率日变化曲线）

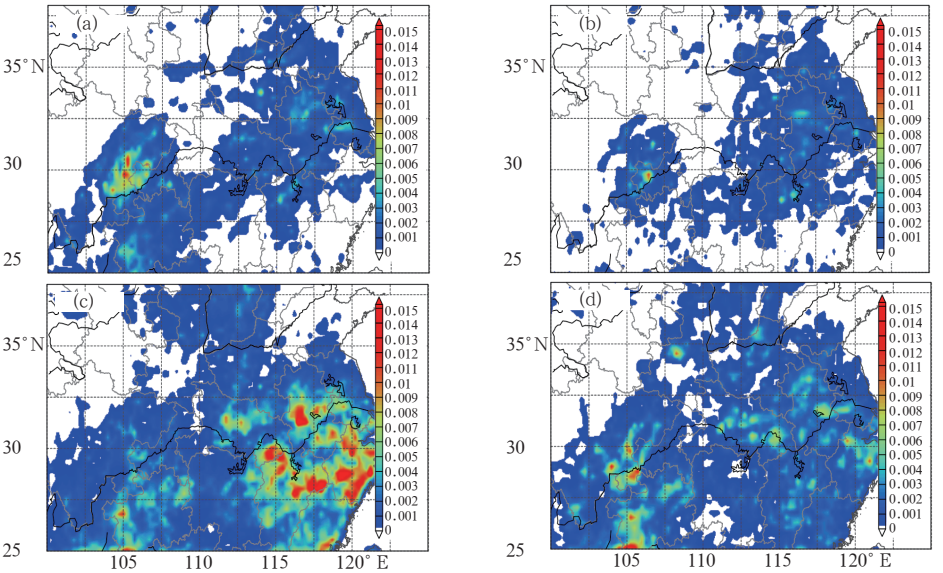


图 4 4个时段平均的小时地闪密度分布(北京时，单位：闪/km^2/h)
(a) 00:00−06:00BT；(b) 06:00−12:00BT；(c) 12:00−18:00BT；(d) 18:00−24:00BT

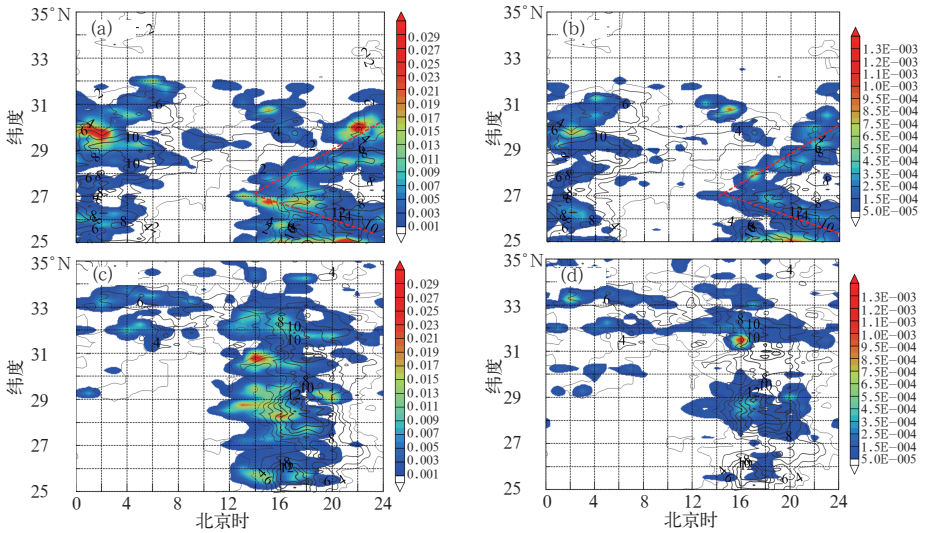


图 6 2007年6−8月平均的小时正负地闪密度(单位：闪/km^2/h，彩色阴影)及*TBB*≤−52℃的频率(单位：%，黑色实线)沿经线时间-纬度剖面图(横轴为北京时，纵轴为纬度) (a) 105°E小时负地闪密度；(b) 105°E小时正地闪密度；(c) 119°E小时负地闪密度；(d) 119°E小时正地闪密度

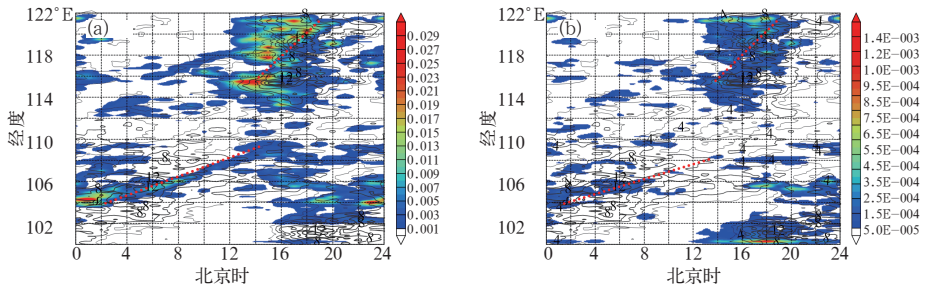


图 7 同图6，但为沿29°N纬线的时间-经度剖面图
(a) 负地闪；(b) 正地闪